

5.3 ヒト生体情報多次元解析技術

Extraction and applications of brain function information to driving system

Tomoyuki HIROYASU*

(Received March 30, 2015)

Key words : brain function information, EEG, fMRI, fNIRS, metabolome

キーワード : 脳機能情報、生体情報、EEG、fMRI、fNIRS、メタボローム

脳機能情報の抽出とドライビングへの応用

廣安 知之 (同志社大学・生命医科学部)

1 はじめに

進化適応型自動車運転システム「ドライバ・イン・ザ・ループ」研究拠点形成支援事業では、人間との共存を前提とした進化適応型自動車運転システム「ドライバ・イン・ザ・ループ」(自動システム(ループ)内に人(ドライバ)を組み込む機構)を開発することを目的としている。そこでは、ヒトの運転特性と車両の走行環境を動的に把握し、運転支援のためのソフトウェアエージェントとして遺伝的アルゴリズムと機械学習を利用して運転システムをヒトの特性に適応させる数学的、情報学的な理論を構築し、実システムの実現を通しての評価が目的である。これにより、ドライバそれぞれの特性、嗜好と、リアルタイムの運転状況を考慮した安全運転の実現が可能で、その結果、高齢者のみならず女性や若年層を含む一般ドライバの交通事故削減が期待される。また、自動車の運転により高齢者が安心して運転できることで外出や遠出が活発となり、公共交通が普及していない地方都市において社会の活性化が可能となる。加えて、若

年層の運転者数減少にともなう自動車販売台数減少が問題となっているが、高齢者の自動車保持数増加により、産業にも好影響を与えることができる。

この目的を達成するための、研究構成図を Fig. 1 に示す。本目的を達成するためには、ドライバもしくは、車の乗員の生体情報を利用し、彼らの状態を把握し、システムに反映する必要がある。我々の研究グループの目的は、これを達成することであり、Fig. 1 においては、最上位に位置し、取得した生体情報を、通信・データベース基盤を通じて、コアエージェントに連絡する。そこで取り扱う生体情報の取得方法、解析方法、コアエージェントにどのように伝達するかが研究のサブ目標となる。

ヒト生体情報は「化学」「脳科学」「認知科学」といった様々な情報から成っており、本研究ではこれをヒト生体情報の多次元情報と呼んでいる。これまでヒトの行動を理解する上でこれらの情報は個別に検討されてきた。それに対して、ヒトの行動を統合的に理解するためには、ヒト生体情報を「化学」「脳科学」「認知科学」などの側面から多角的に測定し、得られたデータを統合し解析す

* Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University, Kyoto
tomo@is.doshisha.ac.jp

** Center for Innovative Computing, Doshisha University, Kyoto

Telephone : +81-774-65-6932, E-mail :

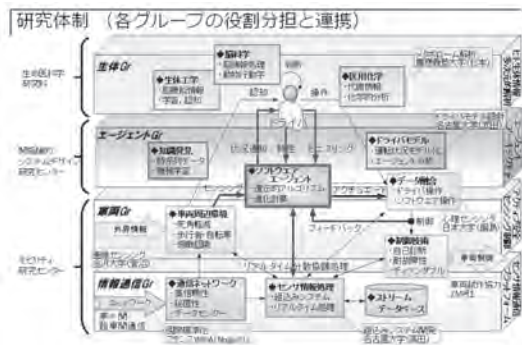


Fig. 1. 研究構成図.

るといふ新しい生体情報解析技術が必要である。本研究では、ヒト生体情報を多次元解析する技術を構築し、その技術を利用して得られる統合的な生体情報を利用して、高齢者の運転行動モデルを構築する。生体情報における多次元情報の中でも、本研究グループでは、

- 脈動情報
- 脳機能情報
- 唾液や汗といったメタボローム情報
- 視線情報

に絞って取得、利用を検討する。特に、脳機能情報については、同志社大学・生命医科学部に設置されている

- functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) 装置
- functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) 装置
- ElectroncephaloGram (EEG) 装置

の利用を検討する。これらの生体の多次元情報は

- BMI (Brain Machine Interface) による運転補助
- 生体情報取得による運転者の注意力の把握と注意継続補助
- 生体情報取得による運転時の満足度の向上

への利用を想定しており、プロジェクト全体の後半で実施・検討する予定である。

本稿では、BMIによる運転補助の基礎的な検討として、肘関節屈曲運動イメージにおける左右識別のためのEEGを用いた特徴量の検討について説明する。また、多次元生体情報の検討として、急性ストレス時における唾液内 α -アミラーゼと脳活動の検討を説明する。

2 肘関節屈曲運動イメージにおける左右識別のためのEEGを用いた特徴量の検討

2.1 はじめに

脳機能のドライビングシステムへの応用の1つに、BMI (Brain Machine Interface) が考えられる。BMIとは末梢神経系、感覚器、運動器を介さず、脳と機械間で直接相互作用させる技術の総称であり、ドライビングシステム意外には、医療・福祉技術としての応用が期待されている。Fig. 2にBMIの概要を示す。BMIとして左右の運動イメージ (Motor Imagery: 以下MI) を利用するシステムが考案されている。そこで本研究では、EEG (Electroencephalograph) を用いて取得されたMIにおける脳波の識別精度の向上を目的としている。本実験では、左右の肘関節屈曲運動におけるMIの脳波を計測し、識別に使用する特徴量を抽出するためのウィンドウ幅について検討した。MIの識別には、運動に関係する脳波である β 帯域や μ 帯域^{1, 2)}の信号を使用し、それぞれの帯域における特徴量抽出にはFFT (Fast Fourier Transform) とウェーブレット変換を用いた。また、識別にはSVM (Support Vector Machine) を用いた。

2.2 既存手法の問題点

BMIにおける過去の研究では、左右の手のMI時における脳波をEEGで計測し、FFT³⁾やウェーブレット変換⁴⁾を用いて識別に用いる特徴量を抽出する方法が考案されている。これらの研究ではMIを行う時間を1秒以上とり、MIを行っている全ての時間における脳波から特徴量を抽出している。しかし、実際に運動を行っている場面でのBMIの利用を考慮すると、MIには1秒以上の時間を要しないため、不必要な脳波のデータ処理も行っている可能性がある。そのため、オーバーラップ処理を使用しウィンドウ幅を1秒以下にし特徴量を抽出する。次章でオーバーラップ処理について説明する。

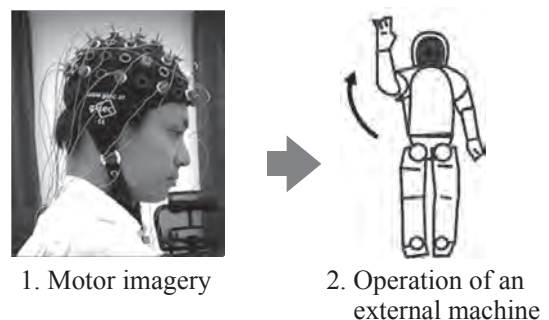


Fig. 2. Overview of BMI system.

2.3 オーバーラップ処理を用いた特徴量抽出方法

オーバーラップ処理により、最も強く MI を行ったとされる区間を算出した。その後、その区間に周波数解析を適用して得られる値を特徴量として左右識別に使用した。以下に特徴量抽出の手順を示す。

Step.1 運動野付近、且つ左右対称に位置する 4 パターンのチャンネルの組み合わせ (C3-C4, FC1-FC2, FC5-FC6, CP1-CP2) に着目する。

Step.2 Step.1 で着目したチャンネルの脳波に対して、MI を開始した時間からウィンドウ幅までの脳波に周波数解析を適用する。

Step.3 周波数解析により得られた値から特定の周波数帯域における値の積分値を算出する。

Step.4 解析のためのウィンドウを 1 サンプル移動し、Step.3 を行う。

Step.5 Step.2 - 4 を MI が終わる時間まで繰り返す。

Step.6 左右の運動野における積分値の差の絶対値が最大となる時間を算出する。

Step.7 Step.6 で得られた時間からウィンドウ幅までの区間を用いて全計測チャンネルに周波数解析を適用し識別のための特徴量を抽出する。

2.4 実験

被験者は、年齢 22-24 歳、左利き 1 名、右利き 19 名の成人男性計 20 名である。

使用機器は、生体計測器としてティアック社の Polymate AP1532 を使用し、サンプリング周波数は 1kHz である。電極の設置方法は国際 10-20 法を参考に行い、基準電極に A1, A2, 探査電極に計 8 チャンネル (C3, C4, FC1, FC2, FC5, FC6, CP1, CP2) を使用した。

課題はレストとタスクが交互に繰り返し行われる。レストでは画面中央に「+」を 5 秒間表示し、被験者はそれを注視する。タスクでは画面中央に左右のどちらかを向く矢印を 1.25 秒間表示し、被験者はその矢印が示す方向の肘関節屈曲の MI を行う。矢印の表示回数は、左右でそれぞれ 10 回ずつであり、1 回の課題の合計施行時間は 130 秒である。またこの課題を 5 回行い、各被験者は計 100 回の MI を行った。

本実験では、 β 帯域として 13-30Hz、 μ 帯域として 8-12Hz の運動に関係する周波数帯域を使用した。また

周波数解析として FFT とウェーブレット変換を使用した。オーバーラップ処理における特徴量を抽出するための区間を決定する積分値を、FFT では β 帯域におけるパワースペクトル、ウェーブレット変換では β 帯域におけるウェーブレット係数を用いて算出した。識別のための特徴量として、FFT では β 帯域のパワースペクトル積分値と μ 帯域のパワースペクトル積分値を使用した。また、ウェーブレット変換では β 帯域におけるウェーブレット係数の平均値と標準偏差、 μ 帯域におけるウェーブレット係数の平均値と標準偏差を使用した。オーバーラップ処理におけるウィンドウ幅を FFT では 256, 512, 1250 とした。また、ウェーブレット変換ではウィンドウ幅を 128, 256, 512, 1250 と設定し、各ウィンドウ幅における識別率を算出した。

識別方法には、SVM (Support Vector Machine) を用いた。SVM は教師あり学習を用いる識別手法の一種である。今回の実験では識別に用いるチャンネルの数を 2-8 とした。全ての測定チャンネルの組み合わせから、最も高いチャンネルの組み合わせの識別率を使用した。識別率の算出には 4-分割交差検定を用いた。

2.5 実験結果と考察

Fig. 3 に FFT を用いて特徴量を抽出した時の識別率の結果を示す。ウィンドウ幅が 256, 512 の時はオーバーラップ処理を行い、1250 の時はオーバーラップ処理を行っていない時の識別率である。Fig. 3 よりオーバーラップ処理を行った場合の識別率の方がオーバーラップ処理を行わなかった場合の識別率より分散が小さいことから、被験者に依らず安定した識別率を得ることができた。またウィンドウ幅を 512 にした時の結果はウィンドウ幅を 256 や 1250 にした時の結果より識別率の平均値と中央値が高く、且つ被験者間の分散が小さかった。そのため、FFT を使用する時はウィンドウ幅を 512 にすべきであると考えられる。

Fig. 4 にウェーブレット変換を用いて特徴量を抽出した時の識別率の結果を示す。ウィンドウ幅が 128, 256, 512 の時はオーバーラップ処理を行い、1250 の時はオーバーラップ処理を行っていない時の識別率である。Fig. 4 よりウィンドウ幅を 128 とした時、識別率大幅に低下した。この結果から、128 のウィンドウ幅は左右の MI の解析時間として不十分であることが分かる。また、ウィンドウ幅が 256, 512, 1250 における識別率に有意差が見られなかった (一元配置分散分析, 有意水準: 5%)。し

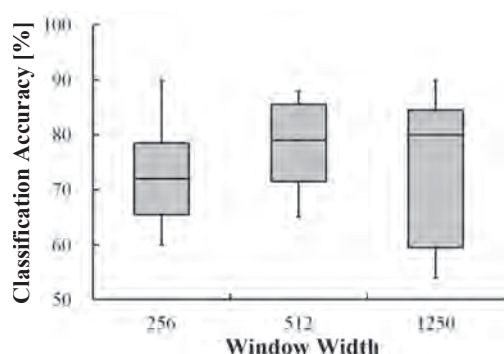


Fig. 3. Classification accuracy using feature values extracted by FFT.

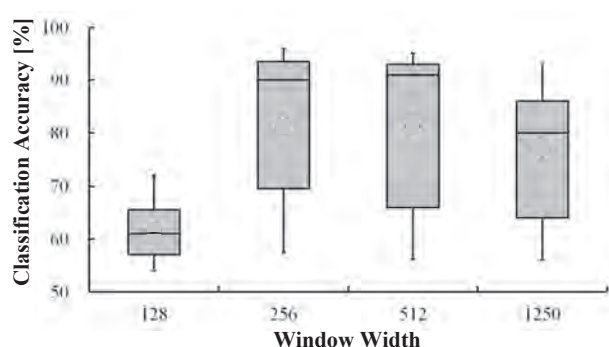


Fig. 4. Classification accuracy using feature values extracted by wavelet transform.

かし、ウィンドウ幅が 256, 512 の時の中央値はウィンドウ幅が 1250 の時より高い結果であった。また、BMI システムにはリアルタイムでの応答が必要であるため、ウェーブレット変換を使用する際はウィンドウ幅を 256 にするべきであると考えられる。

2.6 まとめ

本研究では、EEG を用いて取得された MI における脳波の識別精度の向上を目的としている。本実験では、左右の肘関節屈曲運動における MI 時の脳波を計測し、解析の際のウィンドウ幅を変化させた時の左右の MI における識別率を検討した。FFT を用いた特徴量抽出による識別率の算出には、ウィンドウ幅を 512 とした場合、最も良い結果が得られた。またウェーブレット変換を用いた特徴量抽出による識別率の算出には、ウィンドウ幅を 256 とした場合、最も良い結果が得られた。

3 急性ストレス時における唾液内 α -アミラーゼと脳活動の検討

3.1 はじめに

現在、社会には様々なストレス刺激が存在する。そのような状況下では、常にストレス刺激に曝される可能性がある。ドライビング中にもストレスを受け、そのストレス情報をドライビングシステムに還元することにより、より快適なドライビングを実行することが可能なシステムを構築することが可能であると考えられる。この際、ドライバーは、自分がストレス状態にあるという自覚がなかったり、どのようにその状況に対応すればよいか分からない場合がある。また、ストレスには個人差があり、同じ状況下でも人によってストレスになる場合とならない場合やストレスへの対処法が異なる場合がある。これらの状況から、個人においてストレス状態にあるかどうかを評価し、その個人ごとのストレスへの対処法を提案できる手法が求められている。

先行研究において、ストレスマーカーとされる唾液内コルチゾールをストレスの指標とし、ストレス度合いが異なるときの脳活動を調査しているものが多数存在する⁵⁾⁶⁾⁷⁾。しかし、まだストレス状態と脳活動の関係は解明されていない。その要因として、ストレスは上述したように非常に複雑であることから、唾液内コルチゾールの変化だけでストレス状態を判断することが不十分である可能性が考えられる。そこで本研究では、多様な情報を含む脳活動に着目し、ストレス時の様々な状態を脳活動からパターン分けすることを目的とする。また、ホルモンの分泌や抑制のコントロールは脳を起点として行われているため、これらのパターンと相関する唾液内ホルモンが存在する可能性がある。そのようなホルモンが発見されれば、唾液を採取することによりその被験者の脳活動を推定することが可能になり、簡便に詳細なストレス状態の診断が可能になると考える。

そこで本研究では、ストレス状態での脳活動と唾液内ホルモンの変化の関係性の解明を目的とする。そのための検討として、本稿では非侵襲生体計測装置である fMRI (functional Magnetic Resonance Imaging) を用いてストレス課題時の脳活動を計測し、その前後に唾液内 α -アミラーゼ (salivary alpha-amylase : sAA) 濃度を計測することによって、急性ストレス時の脳活動と唾液内ホルモン変化について調査した。

3.2 実験方法

本実験の目的は、急性ストレス時の脳活動と唾液内ホルモン変化について調査することである。そのために、2種類の実験を行った。1つ目として、ストレスタスクとしてタスク時の脳機能イメージングが可能でかつ、安定したストレス反応が得られるとされている Montreal Imaging Stress Task (MIST)⁸⁾を採用した。MIST時の脳活動を fMRI を用いて計測し、その前後で唾液を採取し sAA を計測した。この実験を本稿では MIST 実験とする。次に、脳機能イメージングは出来ないが、より安定したストレス反応が得られるとされる Maastricht Acute Stress Test (MAST)⁹⁾を実施し、タスク前後で唾液を採取し sAA を計測した。この実験を MAST 実験とする。

本稿では、MIST 実験時の脳活動が、個人により異なったパターンを示すか調査した。また、MIST 時の sAA と MAST 時の sAA を比較し、ストレス時の sAA について調査した。被験者は健康な男性 3 名 (21~23 歳, 非喫煙者) を対象とした。

実験設計は先行研究を一部参考とした⁸⁾。MIST 実験はブロックデザインであり、ブロックは Rest と Task で構成されている。Rest は 30 秒で、Task は 90 秒である。Rest と Task を交互に 2 回行い、これを 1 セッションとし、計 3 セッション行った。Task では回答インターフェースに表示される暗算課題を制限時間内に回答させた。制限時間は緑色のプログレスバーで表示した。回答はインターフェースに表示されるボタンを回答用ボタンデバイスを用いて選択することによって行われた。制限時間と難易度は被験者によって自動で調整され、回答に対して正誤のフィードバックを与えた。被験者には平均の正答率が 80%以上になるように指示し、自分の現在の正答率も回答インターフェースの制限時間バーの上の白色の四角の位置によってフィードバックした。平均正答率が 80%に到達しなかった場合、セッションの間に口頭で負のフィードバックを与えた。実験前に 10 分間タスクを練習させ、また MRI の中においてもさらに 2 分間タスクの練習をさせた。Rest では暗算課題が表示されていない状態のインターフェースを表示し、ボタンタッチングを行わせた。MIST の回答インターフェースを Fig. 5 に示す。

先行研究において、visual association cortex, sensory cortices, motor cortices, angular gyrus, thala-

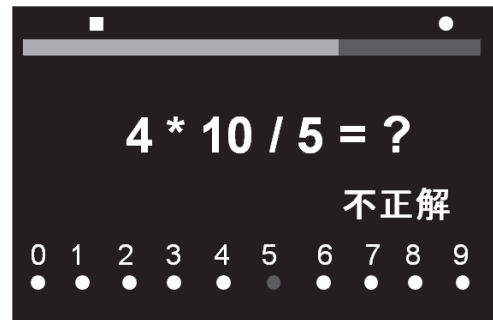


Fig. 5. 回答インターフェース.

mus, cingulate gyrus などがタスク時に賦活すると報告されている。またタスクに関連して、ストレスマーカーとして知られる唾液内コルチゾール濃度が上昇すると報告されている⁸⁾。しかし、同タスク時に帯状回など、ストレスや情動に関連するとされる大脳辺縁系に賦活がみられず、唾液内コルチゾール濃度についても変化する被験者としなない被験者に分かれたとする論文も報告されている¹⁰⁾。

実験設計は先行研究を一部参考にした⁹⁾。MAST は Hand Immersion Trials (HIT) と Mental Arithmetic Trials (MAT) という 2 つのコンディションから構成される。HIT では 2 °C に保たれた氷水に一定時間手を浸し続けさせる。時間は 60~90 秒の間でランダムに決められる。MAT では一定時間 4 桁の数字から 17 を連続して引き算させ続けた。回答は口頭で行わせ、回答が不正解だった場合最初の数字に戻りそこから引き算を再開させた。時間は 45~60 秒の間でランダムに決められる。この 2 つのコンディションを交互に連続して行わせた。

先行研究において、唾液内コルチゾール濃度と sAA がタスク後有意に上昇すると報告されている。

MIST 実験と MAST 実験における唾液サンプリングと sAA の計測では、唾液アミラーゼモニター (NIPRO) を使用した。唾液採取用テストストリップを口腔に挿入し、30 秒間舌下部に置き全唾液を採取する。採取した唾液から免疫測定法 (ELISA) を用いて sAA を計測する¹¹⁾。採取のプロトコルを以下の Fig. 6 に示す。

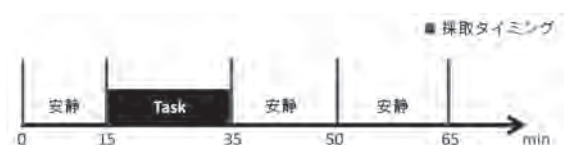


Fig. 6. 唾液採取プロトコル.

実験 1 時間前からは被験者に水以外口にしないように

させ、過度の運動は控えさせた。安静時は過度の作業以外で自由に過ごさせた。

MIST 実験では、日立メディコ製 ECHELON Vega (1.5 T) の MRI 装置を使用した。画像撮像のパラメータを Table 1 に示す。データ処理は SPM8 (Statistical Parametric Mapping)¹²⁾ を用いて体動の補正、標準化、平滑化を行った。有意水準を 0.001 とし、個人解析を行った。刺激画像の提示に関しては、MRI 室には磁性体を持ち込めないため、隣室のプロジェクターから画像提示する光を取り込む。取り込んだ光をスクリーンに映し、被験者頭部のコイルに取り付けた鏡に反射させ、被験者に刺激画像が見える環境を構築した。また、回答には Fig. 7 に示す非磁性体のボタンを用いた。



Fig. 7. 回答用ボタン。

Table 1. スキャンパラメータ。

パラメータ	値
スライス方向	Axial
TR [ms]	2500
TE [ms]	50
FOV [mm]	256
スライス厚 [mm]	5
スライス [枚]	28
Matrix Size	64×64

3.3 実験結果

MIST 実験により得られたタスク時の脳活動に関して、被験者それぞれで個人解析を行った。ストレスや情動に関連するとされる大脳辺縁系の部位に着目すると、被験者 C にもみ海馬に賦活がみられ、他の 2 人には賦活がみられなかった。賦活のマップを Fig. 8 に示す。

MIST 時の sAA 変化を Fig. 9 に示す。

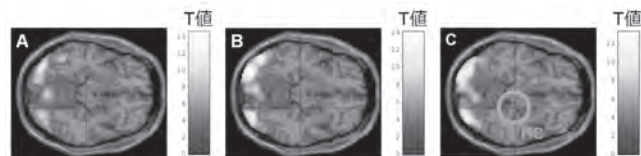


Fig. 8. MIST 時の賦活 (個人解析, $p < .001$, $y = -22$, HC : 海馬)。

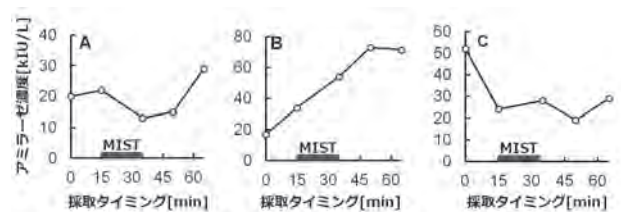


Fig. 9. MIST 時の sAA レベル変化。

青色のバーは MIST を実施した時間を示しており、各プロットはそのとき採取した唾液から測定された sAA レベルを示している。被験者 A において、タスク後に sAA の低下がみられ、一定時間後にタスク前の状態に戻る結果となった。被験者 B, C はタスク前後で安定することが無かった。

MAST 時の sAA レベル変化を Fig. 10 に示す。

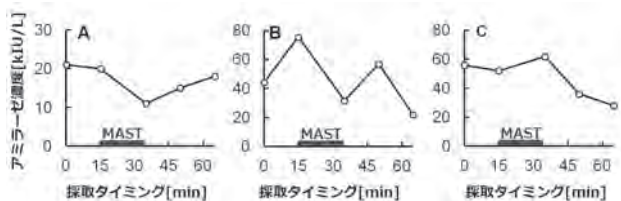


Fig. 10. MAST 時の sAA レベル変化。

赤色のバーは MAST を実施した時間を示しており、各プロットはそのとき採取した唾液から測定された sAA レベルを示している。被験者 A において、MIST 実験の結果と同様、タスク後に sAA の低下がみられ、一定時間後にタスク前の状態に戻る変化がみられた。また、被験者 B, C はタスク前後で安定することが無かった。

3.4 考察と展望

MIST 実験における脳活動の計測結果は先行研究から予想された通り、ストレスに関連するとされる大脳辺縁系において、賦活する被験者とならない被験者に分かれた。このことから、同じストレスタスクを実施したときでも、個人によってストレス状態が異なり、脳活動のパターンの違いとしてあらわれる可能性が示唆された。しかし、被験者が 3 人ではこの違いがパターンの違いに起因するものではなく、ノイズである可能性があるため、今後被

験者を増やし、また同じ被験者に対して何度か実験を行うことにより再現性を調査する必要があると考える。

MAST 実験の結果より、被験者 A において先行研究の結果と異なり、sAA レベルはタスク後に低下した。現在、先行研究において、唾液内コルチゾール濃度は同じストレス課題に対しても、個人によって異なると報告されている¹⁰⁾。今回の結果から sAA についても、唾液内コルチゾールと同様に、個人によってストレス時の変化が異なる可能性が考えられる。また、被験者 A は MIST 時にも sAA レベルが低下している。ストレスタスクとして確立された MIST と MAST のどちらに対してもストレスを感じなかったとは考えにくいので、この被験者 A はストレスを感じたときに sAA レベルが下がるような反応をする性質があること可能性が示唆された。これについて検討するため、ストレス刺激を与えないコントロールタスクなどを実施し、その結果と比較することで sAA レベルの変化の要因を調査する必要があると考えられる。

被験者 B, C は sAA レベルがタスク前後を通して安定しなかった。その要因として、まず唾液分泌流量の影響が考えられる。sAA レベルは唾液分泌流量に比例してその活性が増加することが知られている。つまり、sAA レベル変化の主要因としては、ストレスに起因し、交感神経を介する耳下腺唾液アミラーゼ産生・分泌（エキソサイトシス）の増減だけでなく、耳下腺唾液の全唾液量に対する割合の変化に起因した唾液分泌流量の変化による見かけ上の増減である可能性もある。この唾液分泌流量は唾液中に含まれる総タンパク質量（唾液総タンパク）と良好な相関を示すことが知られている¹³⁾。このことから、唾液総タンパクを同時にモニターすれば、唾液分泌流量が sAA レベルに与える影響をキャンセル出来る可能性が示唆されている¹⁴⁾。sAA レベルを安定させる、また変化の要因からノイズを除くために、今後これらについての調査が必要だと考えられる。

また、ストレスに対する被験者の性質も sAA レベルの変化に影響を与えると考えられる。先行研究において、State-Trait Anxiety Inventory (STAI) という被験者の不安に対する性質と現在の状況を評価出来るアンケートを用いて、それによって得られた評価とストレス課題時の唾液内ホルモン変化の関係が報告されている¹⁵⁾。今後はこの STAI についても調査することで、実験前の被験者の状態や実験後の状況を把握し、より多角的に被験

者の状況を把握、調整する必要があると考える。

3.5 まとめ

本稿では、MIST 時の脳活動と sAA レベル変化、MAST 時の sAA レベル変化を計測した。MIST 時の脳活動については、賦活に違いがみられ、同じストレスタスク実施時でもストレス状態が異なり、それを脳活動によりパターン分け出来る可能性が示唆された。また、sAA レベル変化については、タスク後低下する被験者がみられ、ストレス時の sAA レベルの変化にも個人差があることが示唆された。今後は被験者を増やし、再現性を高めるとともに、被験者の統制をより詳細に行うことにより、脳活動や唾液内ホルモン変化の要因を調査する必要性が示唆された。

4 まとめ

本稿では、肘関節屈曲運動イメージにおける左右識別のための EEG を用いた特徴量の検討および急性ストレス時における唾液内 α -アミラーゼと脳活動の検討を説明した。

本グループでは、生体情報計測用ドライビングシミュレータを導入した。生体情報計測用ドライビングシミュレータは、簡易的なドライビングシミュレータおよび fNIRS および EEG を利用した脳機能イメージング装置、呼吸収集およびその質量分析装置、視線追跡装置、状態記録用カメラから構成される。このシミュレータを利用することで、複数の生体情報の基礎データ収集が可能となる。2014 年度に、この装置を構築し、基礎データを収集することを予定していたが、完成に至っていない。2015 年度の課題である。

謝辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」（平成 26 年～平成 30 年、事業番号 S1411030）の支援のもとに行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) A.K. Engel et al. Beta-band oscillations - signalling the status quo? *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 20, No. 2, pp. 156-165, 2010.

- 2) G. Pfurtscheller et al. Mu rhythm (de)synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks. *NeuroImage*, Vol. 31, No. 1, pp. 153–159, 2006.
- 3) M. Polak et al. Feature extraction in development of brain-computer interface: a case study. In *Engineering in Medicine and Biology Society*, Vol. 4, pp. 2058–2061, 1998.
- 4) P. Herman et al. Comparative analysis of spectral approaches to feature extraction for eeg-based motor imagery classification. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 317–326, 2008.
- 5) Katarina Dedovic, Miriam Rexroth, Elisabeth Wolff, Annie Duchesne, Carole Scherling, Thomas Beaudry, Sonja Damika Lue, Catherine Lord, Veronika Engert, and Jens C Pruessner. Neural correlates of processing stressful information: an event-related fmri study. *Brain research*, Vol. 1293, pp. 49–60, 2009.
- 6) Katarina Dedovic, Annie Duchesne, Julie Andrews, Veronika Engert, and Jens C Pruessner. The brain and the stress axis: the neural correlates of cortisol regulation in response to stress. *Neuroimage*, Vol. 47, No. 3, pp. 864–871, 2009.
- 7) Najmeh Khalili-Mahani, Katarina Dedovic, Veronika Engert, Marita Pruessner, and Jens C Pruessner. Hippocampal activation during a cognitive task is associated with subsequent neuroendocrine and cognitive responses to psychological stress. *Hippocampus*, Vol. 20, No. 2, pp. 323–334, 2010.
- 8) Katarina Dedovic, Robert Renwick, Najmeh Khalili Mahani, Veronika Engert, Sonia J Lupien, and Jens C Pruessner. The montreal imaging stress task: using functional imaging to investigate the effects of perceiving and processing psychosocial stress in the human brain. *Journal of Psychiatry and Neuroscience*, Vol. 30, No. 5, p. 319, 2005.
- 9) Tom Smeets, Sandra Cornelisse, Conny WEM Quaedflieg, Thomas Meyer, Marko Jelacic, and Harald Merckelbach. Introducing the maastricht acute stress test (mast): A quick and non-invasive approach to elicit robust autonomic and glucocorticoid stress responses. *Psychoneuroendocrinology*, Vol. 37, No. 12, pp. 1998–2008, 2012.
- 10) Jens C Pruessner, Katarina Dedovic, Najmeh Khalili-Mahani, Veronika Engert, Marita Pruessner, Claudia Buss, Robert Renwick, Alain Dagher, Michael J Meaney, and Sonia Lupien. Deactivation of the limbic system during acute psychosocial stress: evidence from positron emission tomography and functional magnetic resonance imaging studies. *Biological psychiatry*, Vol. 63, No. 2, pp. 234–240, 2008.
- 11) 山口昌樹, 花輪尚子, 吉田博. 唾液アミラーゼ式交感神経モニタの基礎的性能. 生体医工学: 日本エム・イー学会誌, Vol. 45, No. 2, pp. 161–168, 2007.
- 12) 菊池吉晃, 妹尾淳史, 安保雅博, 渡邊修, 米本恭三. SPM8 脳画像解析マニュアル. 医歯薬出版株式会社, 2012.
- 13) Jorma O.Tenovuo, 石川達也, 高江洲義矩. 唾液の科学. 一世出版, 1998.
- 14) 山口昌樹, 金森貴裕, 金丸正史, 水野康文, 吉田博. 唾液アミラーゼ活性はストレス推定の指標になり得るか. 医用電子と生体工学: 日本 ME 学会雑誌 = Japanese journal of medical electronics and biological engineering: JJME, Vol. 39, No. 3, pp. 46–51, 2001.
- 15) Noriyasu Takai, Masaki Yamaguchi, Toshiaki Aragaki, Kenji Eto, Kenji Uchihashi, and Yasuo Nishikawa. Effect of psychological stress on the salivary cortisol and amylase levels in healthy young adults. *Archives of Oral Biology*, Vol. 49, No. 12, pp. 963–968, 2004.

Study of Multivariate Analysis for Human Bio-Information Data

Yadohisa Hiroshi^{*},

(Received May 7, 2015)

In this paper, data consisting of chemical science, brain science, and cognitive science, are called multivariate human bio-information data. Such the multivariate human bio-information data is observed as complicated data form. Therefore, there are four problems that often occur, and it is difficult to apply the existing methods to such data. For the first problem, both fMRI data and questionnaire data are usually observed, and these data are f time series data and qualitative data respectively. It is difficult to use the existing method to such the both data at the same time. For the second problem, fMRI data usually include various noises, and the results of existing methods are affected by noise. For the third problem, it is difficult to interpret the each factor such as chemical, brain, and cognitive science when human bio-information data is analyzed. For the last problem, such the complicated data sometimes usually contain missing values. To overcome these problems, I have a plan to propose new methods for human bio-information data. In this year, I proposed new methods for considering the problem (1), (2), and (3). Especially, dimensional reduction methods are proposed since these methods provide us to interpret the structure of data easily.

Key words : Dimensional Reduction, Multivariate data Analysis, Simultaneous Optimization, Clustering

キーワード : 次元縮約, 多変量データ解析, 同時最適化, クラスタリング

ヒト生体情報多次元解析手法の開発

宿久 洋

1 はじめに

ヒト生体情報とは「化学」「脳科学」「認知科学」といった様々な情報から成っており、本研究ではこれをヒト生体情報の多次元情報と呼ぶ。このような多次元情報は非常に複雑なデータ形式であり、以下を考慮した多変量解析手法の開発が望まれる。(1) 量質混在データに対する解析手法の開発, (2) 多量のノイズが混入した系列データの解析手法の開発, (3) 多変量データ間の関連性を考慮した解析手法の開発, (4) 欠損値を考慮した解析手法の提案。(1)については、例えばfMRIデータを観測する際、課題等により質的変量が得られ、量的変量との関連性を把握する必要がある場合がある。そのよう

な場合、質的変量のデータをダミー変数化して解析が適用される場合が多く、質的変量が結果に寄与しすぎたり、そうでなくなるなどの問題が生じる場合がある。そのような問題を克服する方法として数量化と呼ばれる方法が提案されており、目的に応じた数量化および解析のパラメータを同時に推定する方法が望まれる。(2)についても、fMRIデータを観測した際、前処理としてノイズ除去を行うのがノイズ除去と解析手法を別箇に行うことで解析結果にノイズ除去がどの程度寄与したのかを。そこで解析方法とノイズ除去を同時に行うことでモデルに基づくノイズの解釈等を行うことが可能な解析方法が望まれる。(3)については、今回「化学」、「脳科学」、「認知科学」

^{*} Culture and Information Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-7657, E-mail : hyadohis@mail.doshisha.ac.jp

といった多次元情報を統合したデータを用いて解析を行う。その際、化学、脳科学、認知科学固有の要因、各変量群間の関連性を把握することが重要となってくる。そこで、変量間ではなく変量群間の関係を明らかにする解析方法が望まれる。(4)について、化学実験や脳科学実験等を別々の被験者に対して観測したが、それぞれの変量間の関係を把握したい場合が存在する。そのような場合、欠損値を補完して解析手法を適用する必要がある。

本年度の研究進捗状況では(1)(2)(3)の解析手法の開発を主に行い、(4)について次元度以降に開発を行う予定である。(1)(2)(3)の研究については特に次元縮約に基づく特徴把握を目的とした多変量解析手法の開発を行った。次元縮約に基づく方法の主な利点としては解析結果の解釈が容易となることが挙げられる。以下、(1)に対応する解析手法である量質混在データに対する次元縮約クラスタリング法の概要、(2)に対応する解析手法であるノイズを考慮した独立成分分析混合モデルの概要、(3)に対応する解析手法である多変量因子回帰分析モデルの概要の順にそれぞれ述べる。

2 提案モデルについて

2.1 量質混在データに対する解析手法について

同一対象群に対して量的変量群と質的変量群が与えられた際、対象のグループ(クラスター)を識別するような低次元空間を検知し、かつ同時に対象を分類する(クラスタリングする)方法を提案した。利点としては2つ挙げられる。1つめは各クラスターの特徴を把握する低次元空間を求めることによって各クラスターの解釈を容易に行える点であり、2つめは質的変量の各カテゴリに対してモデルとデータの当てはまりに関して最適な値を推定し、量的変量と質的変量それぞれのバラつきが結果に与える影響を均一にしているという点である。

モデルについて説明する。量的変量に対するデータ行列 $\mathbf{X} = (x_{ij}), x_{ij} \in \mathbb{R} (i = 1, 2, \dots, n; j \in J_1)$, 質的変量に対するダミー変数データ行列 $\mathbf{Z} = (\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_p)$ $\mathbf{Z}_j = (z_{iq_jj}) z_{iq_jj} \in \{0, 1\} (i = 1, 2, \dots, n; q_j = 1, 2, \dots, m_j; j \in J_2)$ が与えられた際、モデルは以下のようなになる。

$$(\mathbf{X}, \mathbf{ZB}) = \mathbf{FA} + \mathbf{E}_1, \quad \mathbf{F} = \mathbf{U}\mathbf{\Gamma} + \mathbf{E}_2$$

ここで n は対象数, m_j は質的変量 j のカテゴリ数, J_1 は量的変量の集合, J_2 は質的変量の集合, $\mathbf{B} =$

$\text{diag}(\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_{|J_2|})$ は $\mathbf{B}_j = (b_{q_j s_j j}) b_{q_j s_j j} \in \mathbb{R} (q_j = 1, 2, \dots, m_j; s_j = 1, 2, \dots, d_j; j = 1, 2, \dots, p)$ とし, $b_{q_j s_j j}$ は変量 j の各カテゴリ q_j の値とし, $\mathbf{F} = (f_{it}) f_{it} \in \mathbb{R} (i = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, d)$ は d 次元上の対象の座標行列, $\mathbf{A} = (a_{tj}) a_{tj} \in \mathbb{R} (t = 1, 2, \dots, d; j = 1, 2, \dots, p)$ は変量の係数行列, 行列 $\mathbf{U} = (u_{i\ell})$ は対象 i がクラスター ℓ に属するなら $u_{i\ell} = 1$, そうでない場合は $u_{i\ell} = 0$ を表す要素を持つ行列, $\mathbf{\Gamma} = (\gamma_{\ell t}) \gamma_{\ell t} \in \mathbb{R} (\ell = 1, 2, \dots, k; t = 1, 2, \dots, d)$ は d 次元上のクラスター重心行列, $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ はそれぞれ誤差行列とする。このとき, $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ を同時に最小化する $\mathbf{B}, \mathbf{F}, \mathbf{A}, \mathbf{U}, \mathbf{\Gamma}$ を推定する次元縮約クラスタリング法を提案し, 発表した(光廣 & 宿久, 2014)。

2.2 多量のノイズが混入した系列データの解析手法について

複数の元信号が入り混じって得られた観測信号から元の原信号を分類して取り出すことをブラインド信号分離とよび, そのためによく用いられている多変量解析の一つとして独立成分分析が挙げられる。しかし, 時間ごとに異なる種類の原信号であるような場合, 通常独立成分分析ではうまく原信号を抽出することができない。そのような問題を解決する方法として, Lee et al., (1999) は対象の分類と独立成分分析を同時に行う独立成分分析混合モデル(ICAMM)を提案した。しかし, ノイズの影響を考慮していないため, ノイズが原信号に含まれている場合, ICAMMのクラスタリング結果が悪くなる状況がある。そこで, ノイズの影響を考慮したICAMMを提案した(高岸 et al., 2014)。

p 個の観測信号の T 時間文の無作為標本 $\mathbf{X} = (\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(T)})$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^p$ が与えられているとする。このときモデルは以下の通りである。

$$\mathbf{x}^{(t)} = \mathbf{A}_k \bar{\mathbf{s}}_k \quad (t = 1, 2, \dots, T)$$

ここで, $\bar{\mathbf{s}}_k \in \mathbb{R}^p$ をクラスター k に対応するノイズ入り原信号ベクトル, $\mathbf{A}_k \in \mathbb{R}^{p \times p}$ をクラスター k に対応する混合行列とし, $\boldsymbol{\theta}_k$ をパラメータとした原信号が従うラプラス分布とガウス分布の混合分布に従う確率密度関数 $f(\bar{\mathbf{s}}_k^{(t)} | \boldsymbol{\theta}_k)$ を用いて推定を行う。

2.3 多変量データ間の関連性を考慮した解析手法について

目的変量群と説明変量群が与えられた際, 目的変量群と説明変量群間の関係を明らかにしたい状況がある。し

かし、目的変数および説明変数のそれぞれ変数数が多い場合、その関係を解釈することは困難となる。そこで、目的変数および説明変数間の関係を明らかにするような次元縮約を行い、かつ同時に多変量回帰を行う方法を提案した(有重 & 宿久)。

目的変数に対応する変数群 $\mathbf{Y} = (y_{io}) y_{io} \in \mathbb{R} (i = 1, 2, \dots, n; o = 1, 2, \dots, r)$, 説明変数行列 \mathbf{X} が与えられた際、提案モデルは以下ようになる。

$$\mathbf{X} = \mathbf{F}_X \mathbf{A}_X + \mathbf{E}_X, \quad \mathbf{Y} = \mathbf{F}_Y \mathbf{A}_Y + \mathbf{E}_Y,$$

$$\mathbf{F}_Y = \mathbf{F}_X \mathbf{B} + \mathbf{E}_Z$$

ここで、 $\mathbf{F}_X = ((^{(X)}f_{it}))$, $(^{(X)}f_{it}) \in \mathbb{R} (i = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, d)$ は \mathbf{X} の因子得点, $\mathbf{A}_X = ((^{(X)}a_{tj}))$ $(^{(X)}a_{tj}) \in \mathbb{R} (t = 1, 2, \dots, d; j = 1, 2, \dots, p)$ は係数行列, $\mathbf{F}_Y = ((^{(Y)}f_{it}))$, $(^{(Y)}f_{it}) \in \mathbb{R} (i = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, d)$ は \mathbf{Y} の因子得点, $\mathbf{A}_Y = ((^{(Y)}a_{tj}))$ $(^{(Y)}a_{tj}) \in \mathbb{R} (t = 1, 2, \dots, d; j = 1, 2, \dots, p)$ は係数行列, $\mathbf{B} = (b_{to})$ $b_{to} \in \mathbb{R} (t = 1, 2, \dots, d; o = 1, 2, \dots, r)$ は回帰係数行列, \mathbf{E}_X , \mathbf{E}_Y , \mathbf{E}_Z はそれぞれ誤差行列とする。

このとき、 \mathbf{E}_X , \mathbf{E}_Y , \mathbf{E}_Z を同時に最小化する \mathbf{F}_X , \mathbf{F}_Y , \mathbf{A}_X , \mathbf{A}_Y , \mathbf{B} を推定する方法となる。

3 おわりに

研究成果として(1)(2)(3)を考慮した解析手法を提案し、それぞれシミュレーションに基づいて手法の利点は示せたものの、(4)に関する手法および今回提案した解析手法を実際のヒト生体情報多次元データに対して適用し、手法の性質やその数理的な特徴付けを行う必要がある。

本研究の一部は、「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」(平成26年～平成30年、事業番号S1411030)、および、科学研究費補助金の支援を受けている。

参考文献

- 1) 有重文平 & 宿久洋 (2014), 探索的因子回帰分析法の定式化について, 第26回大規模データ科学に関する研究会, (於 北海道大学).
- 2) 高岸茉莉子, 谷岡健資 & 宿久洋 (2014), 雑音を考慮した独立成分分析混合モデルについて, 日本計算機統計学会第28回大会, (於 中央大学).

- 3) 光廣正基 & 宿久洋 (2014), 縮約とクラスタリングの同時分析法における統一的表記について, 複雑データの解析法に関する研究会, (於 北海道大学).
- 4) Lee, T.-W., Lewicki, M. S., and Sejnowski, T. J. (1999). ICA mixture models for unsupervised classification and automatic context switching. *In International Workshop on ICA*, 209-214.

生体から得られる微量物質分析のための GC-MS システムの確立

大江洋平・吉仲壮真・太田哲男

1. はじめに

人は、ストレスを受けることにより状態が変化する。この変化は、本人が自覚する場合や外から見てわかる場合もあるが、客観的な判断方法の確立が必要とされる。そのため、近年、疾病予防などの観点からストレスの評価法に注目が集まっており、それらは主に唾液中のコルチゾール、アミラーゼを指標としている。¹⁾ コルチゾールは、ストレスとの関連で最も研究されている物質であり、心理的・身体的な健康状態を考える上でも重要なホルモンである。²⁾ アミラーゼは唾液に含まれるグリコシド結合を加水分解する化酵素であり、交感神経系の直接神経作用とノルアドレナリン作用の両作用で分泌され、ストレスにより増加することが知られている。³⁾

一方、乗用車保有台数および運転免許保有者数は年々増加傾向にあり、ドライバのストレスもそれに伴い増加すると考えられる。運転中のストレスは危険運転さらには事故を誘発することになるため、運転中のドライバのストレス計測や異常に関する警鐘のフィードバックが事故防止につながることを期待される。しかしながら、上述のようなストレス測定法では、唾液サンプルの採取が車の運転中などにおいて困難な場合も多いため、現実的ではない。

そこで、本研究ではストレス計測の試料として、呼気に焦点を当てた。呼気は呼吸をしている以上、常に体外に排出されるため非侵襲を保てる。また、唾液成分の変動に伴い、そこにも何らかの成分変化が起こると考えている。本研究の全体像としては、呼気やその揮発成分が呼気に含まれる唾液などの非侵襲的に得られる試料に含まれる物質を分析し、そこで得られた新たなストレスマーカーやその特徴量を反映した簡便な測定法の検討へと展開し、最終的には、運転中ストレスのリアルタイム測定を実現し、安全運転システムの構築の一助になることを目的としている。本成果報告では、研究の第一段階で

ある呼気分析のシステムの構築と分析実験系の確立のための基礎的検討の結果を報告する。

2. 装置および実験方法

2.1 装置およびサンプル

2.1.1 GC-MS

ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS, 島津製作所社製 GC-2010/PARVUM 2 システム) に、サーマルディソープションシステム (島津製作所社製 TD-20) を連結し、呼気等の分析に用いた (Fig.1)。



Fig.1. GC-MS システム (左から, PARVUM2, GC-2010, TD-20, PC モニタ)。

2.1.2 呼気サンプル

呼気サンプルは、実験者自ら捕集バックに吹き込み、特に保存することなく、そのまま使用した。

2.2 実験方法

2.2.1 呼気サンプルの分析

呼気を二つ口 PVDF サンプリングバッグ 1L に入れ、シリコンチューブで捕集管と接続し、一方はミニポンプの IN 側と接続し、呼気を吸引し、捕集管に吸着させた。その後、Thermal Desorption System のサンプルトレイに、捕集管を乗せ、加熱脱離を行い、分析した。

3. 結果および考察

3.1 呼気サンプルの分析

採取した呼気サンプル中の有機成分を上記

GC-MS システムで分析するために、吸着管にサンプル中に含まれる成分を吸着させた。装置の概略を Fig.2 に示した。

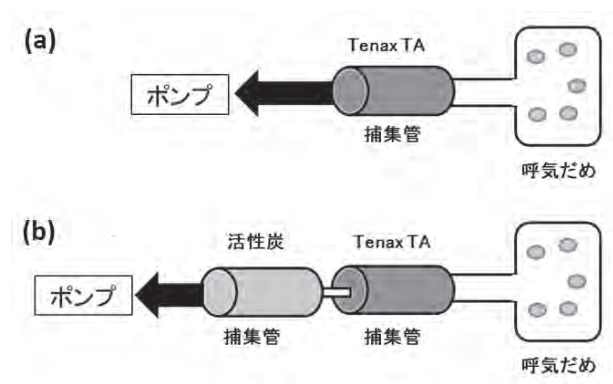


Fig. 2. 吸着管への呼気成分の吸着.

吸着管としては、大気中有機成分に使用される Tenax 管および Carbon 管を使用した。Tenax 管のみを使用した場合 (Fig.2 (a)), 有機化合物は検出されず、亜酸化窒素やケイ素化合物が検出された。これらは、吸着管などに付着していた成分であると推定している一方で、Tenax 管と carbon 管を直列に繋いだ場合 (Fig.2 (b)), Tridecane (b.p. = 234°C) や Heptadecane (b.p. = 318°C), Nonanal (b.p. = 195°C), 2-Nonenal (b.p. = 205°C) などの複数の有機化合物が検出された (Fig.3). 2-Nonenal は呼気中にも含まれ、その含有量により口臭の原因になる物質である。これらの結果は、呼気中のある程度以上の沸点をもつ揮発性物質をこのシステムで測定できる一方で、呼気中に含まれていてもよい Acetone (b.p. = 56°C) や isoprene (b.p. = 34°C) などは観測されなかったという問題点も挙げられる。これらのような、より低沸点 (または低分子量) の化合物の捕捉をするためには、GC の設定や上述のサンプル濃縮法の改善が必要であることを示す。

4. 結論

新規導入した TD-20 の利用と呼気分析の可能性を検討した。その結果、呼気に由来する成分の分析が可能であることが示された一方、低沸点化合物の捕捉という今後改善すべき課題も明らかとなった。

これらを改善し、唾液中揮発成分の分析も並行して行い、既存のストレスマーカとそれらの成分分布の関連性を明らかにしていく。

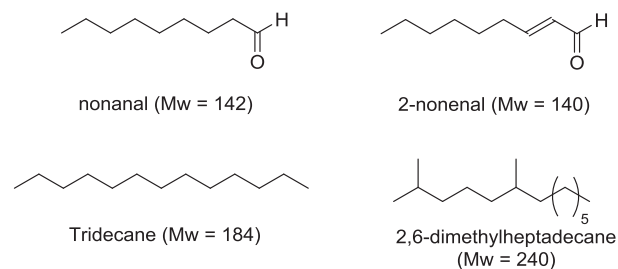


Fig. 3. 検出された有機化合物.

参考文献

- 1) 井澤修平, 城月健太郎, 菅谷渚, 小川奈美子, 鈴木克彦, 野村忍, *日本補完代替医療学誌*, **2007**, *4*, 91-101.
- 2) BS McEwen, *Neuropsychopharmacology*, **2000**, *22*, 108-124.
- 3) 山口昌樹, *日本薬理学雑誌*, **2007**, *129*(2), 80-84.

Adaptive Shift of Sensitivity in Auditory Periphery Based on Attention

Hiroyuki Miyawaki, Ayako Nakayama, Kohta I. Kobayasi

(Received March 28, 2015)

It is known that there is a non-linearity in the response of a cochlea. For example, the outer hair cells of basilar membrane amplifies weak sounds. It is, however, still not known whether the amplification mechanism can be controlled by the attention. Mongolian gerbil, *Meriones unguiculatus*, communicate with others by various sounds. About 80 percentage of those sounds range over 20 kHz. A threshold of hearing in this range, however, was about 20 dB higher than their most sensitive frequency (1 to 16 kHz). We proposed a hypothesis that the auditory sensitivity heightened when gerbils focus on the sound by means of cochlea non-linearity. This study tested the hypothesis by recording cochlear microphonics (CM) as a measure of auditory sensitivity under various behavioral conditions. In paired condition, subject was set with other anesthetized conspecific. The power spectrum analysis of CM, evoked by pseud communication sound showed that CM response in paired condition was higher by 2 to 4 dB than in single condition. Then, we further investigated if the CM increase was communication specific. Subject was trained to pay attention to sound stimuli using an electric shock as a positive punishment. After training, CM increased by at most 1.9 dB while animals were paying attention to the sound. Those results suggest that the sensitivity of auditory periphery increase while gerbils communicate with others, and that the increase could not be explained only by auditory attention.

Key words: Attention, Amplification mechanism of cochlea

キーワード: 注意, 蝸牛の増幅機構

注意の性質および有無に依存した聴覚末梢の感度の動的な変化

宮脇 弘之, 中山 綾子, 小林 耕太

1. はじめに

スナネズミ (*Meriones unguiculatus*) はコミュニケーション音声をを用いることが分かっている。この音声は周波数帯域によって分類されており、人間の可聴域と重なる帯域に属する音声もあれば、超音波領域に属する音声も存在する¹⁾。スナネズミは主に他個体とのコミュニケーションでは超音波領域に属する音声を使うが、先行研究ではスナネズミのオ

ーディオグラムにおいて超音波領域の閾値は相対的に高いことが分かっている²⁾。なぜ閾値の高い領域の音声をコミュニケーションに使うのかは謎であった。考えられることとして蝸牛の増幅機構が挙げられる。これは蝸牛の非線形性機構の一つであり、小さな音に対して能動的に行われる。ここでスナネズミが集中して音を聴くと蝸牛の増幅機構が働くのではないかと考えた。

*Faculty of Life and Medical Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone: 0774-65-6439, E-mail: bml1057@mail4.doshisha.ac.jp

本実験では、音に対して集中した際の蝸牛における増幅機構を検討することを目的とし、実験を行った。まずスナネズミに音に集中させるためには音に意味を持たせればよいと考え、音に罰を関連付ける訓練を行うことにより、スナネズミが音に対して何らかの行動をするようになって考えた。その時、スナネズミは音に対して意味を持ったとみなすことができ、音に対して集中したと定義した。また、蝸牛の働きを検討するために蝸牛マイクロフォン電位(Cochlear microphonics: CM)を指標として増幅機構を調べた。蝸牛マイクロフォン電位とは内耳の聴覚器官である蝸牛に到達した音や音声の周波数、強さ、時間の3つの情報を忠実に再現している電気的な信号である。蝸牛内にある有毛細胞の受容器電位が統合されたものであり、蝸牛の機能を知る面で有効な手段の一つである。

今回実験を行ったところ、後述するがスナネズミの頭が動くことによって耳に届く音の物理量が変わり、CMの値を比較することが困難であった。そこで2つ目の実験としてスナネズミを麻酔下におき、覚醒下における頭の運動による耳とスピーカーの位置関係の変化を再現してCMの変化を計測した。この2つ目の実験の目的はスナネズミの意識がない麻酔下で計測したCMの変化と覚醒下でのCMの変化を比較して、頭の動きによるCMの変化の成分を除去することである。

2. 実験手法

2.1 実験1 覚醒下での自由行動下の集中によるCMの変化の計測

2.1.1 CM電極留置手術

被験体として週齢72週間のスナネズミ2匹を用いた。CMを測定するためにCM測定用電極を正円窓周辺に留置する手術を行った。記録電極と基準電極はICソケットに固定し、頭蓋に接着した。その作業の後、被験体が覚醒下でもCMが測定出来るようにするためにICソケットを露出させ、その他の部分は縫合糸により縫合した。

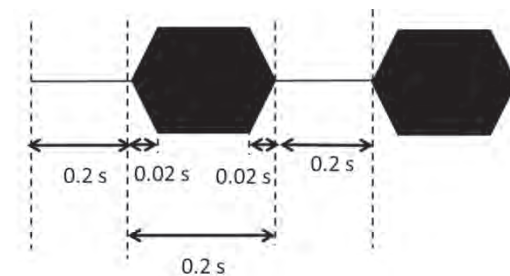
2.1.2 装置と音刺激

音刺激として5 kHzのトーンバーストを制作した。

継続時間は0.2 sで、立ち上がりと立ち下がりには0.02 sである。このトーンバーストを時間間隔0.2 sで10回繰り返し、これを1試行とした。そして1日にこの試行を20回行った。試行と試行の時間間隔は56.4 sである(Fig. 1)。

実験は防音装置の中にスピーカーが設置された実験用ケージの中で行われた。オペラント条件付けに電気ショックを用いるため、実験用ケージに電気ショック装置を設置し、床と台の2つの領域を作った(Fig. 2)。それぞれに電気ショックを与えられるようにした。電圧は112 V DCであった。

(a)



(b)

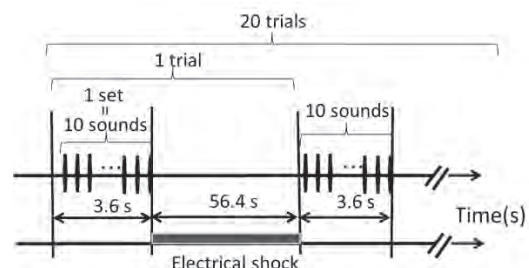


Fig. 1 Time pattern of sound stimulus (a):Image of tone burst.Duration:0.2 s, Rise/Fall time:0.02 s, Frequency:5 kHz, 70 dB SPL.(b):Image of 20 sets of sound stimuli. 1 set is 10 tone bursts. Time interval to the next set is 56.4 s. Electrical shock was presented during the time interval.

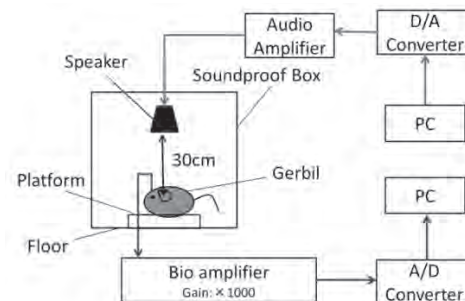


Fig. 2 Experimental environment. Speaker was placed 30cm above gerbil's ear.

2.1.3 訓練

訓練は、1試行の音刺激を提示し、音刺激が終了

した直後、音刺激が提示された時に被験体がいいた方の領域(床か台)に電気ショックを与えた。この時、被験体が音刺激が提示されている間に別の領域に移動することが出来れば訓練は成功とみなした。逆に被験体が音刺激が提示されている間に移動することが出来なかった時は罰を与えた。

2.1.4 計測と解析

今回被験体は音刺激に対してまず頭を動かすという行動をとったため、この行動が集中に関わる行動であろうと考えた。そこで頭を動かす直前の CM 波形と動かした直後の CM 波形の差を dB で評価した。

2.2 実験 2 麻酔下での頭の動きによる CM の変化の計測

2.2.1 被験体と音刺激

実験 1 で用いた被験体を用いた。また音刺激も実験 1 で用いたものを用いた。

2.2.2 実験環境

実験 1 で用いた機材を用いた。防音箱のなかにケージの床と台の部分のみを配置した。防音箱内部を自由に動かせるように、スピーカーを防音箱の内部に設置した。

2.2.4 実験手順

まず麻酔前投薬として硫酸アトロピン(*Atropine Sulfate*)(約 0.7 mg/kg)を筋肉注射した。その後麻酔として混合麻酔(ケタミン(*Ketamine*)(約 35 mg/kg)とキシラジン(*Xylazine*)(約 14 mg/kg))を筋肉注射し、被験体を麻酔下にした。次に被験体を台の上に配置した。この時被験体の体温低下を防ぐために被験体の下に携帯カイロをしいた。CM に対する麻酔の影響を考慮して、30 分放置した。その後被験体の耳の位置とスピーカーの距離を 30 cm に保つようにしてスピーカーを移動させ、音刺激を提示して CM の差を計測した。

被験体は訓練が進むと頭を動かす行動と罰から避ける行動の 2 種類の行動をとるようになった。音刺激に対してまず頭を音源の方へ動かし、その後罰から避ける行動をとった。頭を動かす割合が上昇すると逃げる割合も上昇することが確認できた。

覚醒化で頭を動かした時の CM の波形を fig. 3 に、CM の変化を dB で評価したものをいくつかの例を fig. 4 に示す。時折頭を動かしたにも関わらず減少している試行もあったが基本的には上昇の傾向が見られた。しかしこの CM の変化が単に頭を動かした時の変化なのかそれとも音刺激に対して集中したために起こった変化なのかを判別することは出来なかった。

そこで、先ほどの fig. 4 で示したいくつかの例のそれぞれの頭の動きと同じだけ頭とスピーカーの位置関係を再現した時の CM の変化を計測し、覚醒化での CM の電圧変化と麻酔下での CM の電圧変化を比べた(Fig. 5)。頭とスピーカーの位置関係が変われば麻酔下でも覚醒化でも同じように変化した。覚醒化のほうが CM の電圧変化が大きくなっている傾向が見られた。その数値は平均で 1.9dB で標準偏差は 3.7dB であった。

今回の実験では覚醒化では、麻酔下に比べて CM の上昇が見られた。その数値は $1.9\text{dB} \pm 3.7\text{dB}$ であった。この上昇が集中による CM の上昇である可能性が示唆される。しかし今回の実験系は誤差が出やすく、標準偏差も 3.7 dB であったので、仮説を検討するには至らなかった。また今回使用した被験体は生後 1 年以上たった個体であり、比較的に年老いた個体であった。よって老化から生じる聴力の低下や学習能力の低下が影響した可能性も考えられる。今後は若い個体を用いて検討する必要もあるだろう。最後に、今回の実験では音刺激として、音圧が 70 dB SPL というネズミにとって聴くことが容易であろうことが予想される音刺激の大きさのものを用いた。

3. 結果と考察

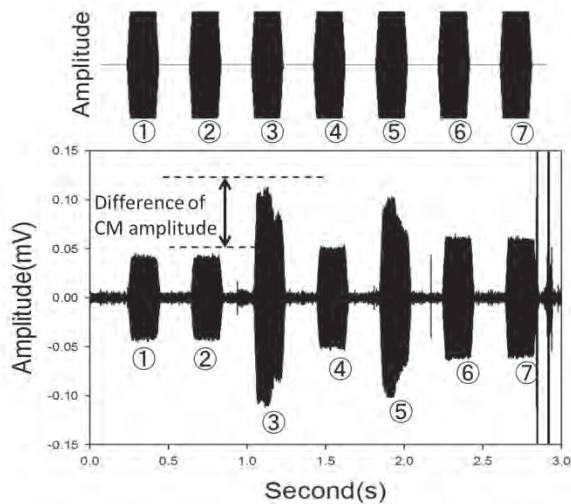


Fig. 3 Example of CM wave form in 1 set. In 7 out of 10 sounds, CMs could be measured. CM amplitude increased at 3rd sound by shaking gerbil's head. The upper figure is wave form of the sound stimulus



Fig. 4 Some examples of difference of CM amplitude under awake situation.

仮に集中による増幅機構が働くとしても、今回の音刺激では音刺激が増幅せずとも十分に聴こえると考えられるため増幅する必要がなかった可能性が考えられる。よって例えば 60 dB SPL, 50 dB SPL といったより小さい音圧レベルの音刺激を用いて検証すべきではなかったかと考えられる。

4. 結論

本実験の目的は集中による蝸牛の増幅機構について調べることであった。今回実験では頭が動くことにより、耳に届く音の物理量が変わることでCMが変化することが示唆された。覚醒下において頭の動きによって生じるCMの変化と、

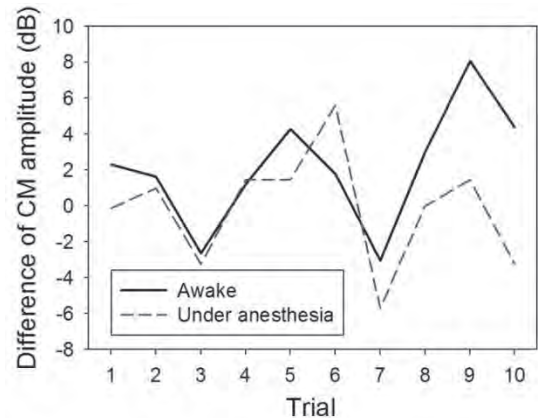


Fig. 5 Some examples of difference of CM between awake gerbils and gerbils under anesthesia. Each plots are difference in the same situation about the angle head to speaker.

麻酔下において覚醒下と同じだけ頭とスピーカ-の位置関係を再現した時のCMの変化を比較すると覚醒下のCMの変化の方が 1.9 ± 3.7 dB 高いということが分かった。これが集中によるCMの増幅である可能性が示唆される。

本研究を行うにあたり協力して下さいった知覚・脳神経機構研究室の皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Nabetani, Y., Riquimaroux, H., Situation-dependent vocalizations of Mongolian gerbils for communication. The Seventh International Congress of Neuroethology Program and Abstracts, PO34, August 8-13, Nyborg, Denmark, (2004)
- 2) Ryan, A., Hearing sensitivity of the mongolian gerbil, *Meriones unguiculatus*. Journal of Acoustical Society of America 59:1222-1226, (1976)
- 3) Delano, PH., Elegueda, D., Hamame, CH., Robles, L., Selective attention to visual stimuli reduces cochlear sensitivity in chinchillas. Journal of Neuroscience 27.4116-4153, (2007)
- 4) 川瀬哲明 蝸牛アクティブメカニズムと遠心性神経の役割 シンポジウム I 「蝸牛 active mechanism の現在」 特集 Otol Jpn 10(2), 72-77, (2000)

Discussions of effects of different measurement day on the saliva concentrations of cortisol

Masahiro SUGIMOTO*

(Received March 30, 2015)

Key words : Cortisol, fNIRS, working memory, reading span test.

キーワード : コルチゾール, fNIRS, ワーキングメモリ, リーディングスパンテスト.

測定日の違いが唾液内コルチゾール濃度に及ぼす影響の検討

杉本昌弘

1 序章

コルチゾールは視床下部-下垂体-副腎 (HPA) 軸が活性化したときに最終的に生成されるホルモンである。このホルモンはストレス反応を制御するという役割において、健康心理学の分野などから注目されている¹⁾。その中で、コルチゾール濃度変化は慢性ストレスによる健康被害と関係があるとされており、研究が進められている²⁾³⁾。このコルチゾール濃度は唾液から分析することが可能であるため、非侵襲的に計測が可能である。一般にコルチゾールには日内で周期的な変動があるとされており、起床後 30~45 分で最大になり、その後緩やかに減少し、深夜が最も少ないとされている⁴⁾⁵⁾。このような日内のコルチゾール濃度の変化の周期については多くの研究が行われているが⁶⁾⁷⁾、別の日の同じ時間帯におけるコルチゾール濃度の安定性について調査したものは少ない。そこで本研究では、同じ被験者において同じ時間帯で別の日に採取した唾液内のコルチゾール濃度がどの程度変動するのかについて実験を行った。得られた結果について、使用したコルチゾール分析キット由来の変動

と個人における変動について検討した。

2 唾液内コルチゾール濃度の日毎の安定性の検証実験

2.1 実験目的

測定日による唾液内コルチゾール濃度の変動がどの程度の範囲にあるのかを調査する。それによって、今後の実験においての唾液内コルチゾール濃度変化が測定日が異なることによるものなのか、それ以外による変化なのかを推定する指標とする。

2.2 被験者

男性健常者において、実験の趣旨に同意を得た 15 名 (22~24 歳) を被験者とした。本実験において、唾液を採取することから全被験者は非喫煙者に統一した。また、唾液採取の 1 時間前からは飲食は水のみとし、激しい運動は控えさせた。

2.3 実験方法

各被験者から異なった 3 日間の同じ時間帯で唾液を採取した。唾液の採取は、唾液内コルチゾール濃度の日内

* Institute for Advanced Biosciences, Keio University, Yamagata
E-mail : msugi@sfc.keio.ac.jp

3 まとめ

本実験では、異なる日の同時刻に測定された唾液内コルチゾール濃度がどの程度変動するのかについて調査した。3日間の検証実験（N=15）により、測定日が異なることにより生じた唾液内コルチゾール濃度の変動係数の平均は32.9[%]であった。したがって、今後唾液内コルチゾール濃度の経日変化を調査する場合は、32.9[%]以内の変化であればその変化の要因は測定日による誤差である可能性が示唆された。

被験者ラベル	日付	19	20	23	24	25
1		15:42		15:30		16:10
2		15:42	15:30	15:30		
3		16:55	16:30			16:30
4		16:55		16:45		16:30
5		16:55		16:30	16:30	
6		19:05	16:15	16:45		
7			16:30		16:30	16:30
8			16:31		16:30	16:30
9			16:32	16:30		16:30
10			16:33	16:30	16:30	
11			16:34		16:30	16:30
12			16:35		16:30	16:30
13			15:30	15:30		15:30
14				16:30	16:30	16:30
15			16:30	16:00		16:30

Fig. 1. 各被験者の唾液採取のタイミング。

変動を考慮し、最も変動が少ない15時以降に行った。各被験者の唾液を採取した時間について、Fig. 1に示す。

唾液の採取については、SARSTEDT社製のサリベットを用いた。コットンロールを口内に1分間保持させ、その後3000[rpm]で2分間遠心分離し唾液を抽出した。コルチゾール濃度の分析にはSALIMETRICS社の1-3002-Cortisol Salivary Immunoassay Kit(ELISA/EIA)を用いた。また、同キットにはControlとして高濃度と低濃度のコルチゾールが同梱されており、これらの分析結果からキット由来の変動を調査した。

2.4 実験結果と考察

各被験者から採取した3回分の唾液、およびキットに同梱されていたControlの分析結果をFig. 2に示す。

それぞれ吸光度をAbs、コルチゾール濃度の定量値をConcの列に示し、各被験者およびコントロールの平均と標準偏差(SD)、変動係数(RSD)を計算した。被験者15人分の測定日による変動係数の平均は32.9[%]、Controlの変動係数の平均は2.9[%]となった。このことから、測定日が異なることにより生じるコルチゾール濃度の変動は32.9[%]であり、そのうちコルチゾール分析キット由来の変動は2.9[%]であるという結果となった。したがって、唾液内コルチゾール濃度変化において経日変化を見るような実験をする場合は、その変化率が32.9[%]以内であればその要因は測定日による誤差である可能性があるということが示唆された。また、それぞれの被験者の唾液内コルチゾール濃度の定量値の分散が大きいことから、唾液内コルチゾール濃度の定量値の多寡は個人差が大きく影響するということが示唆された。今後はより実験環境などを統制し、分析結果の誤差の要因を詳細に推定する必要がある。

参考文献

- 1) Sapolsky, Robert M., Romero, L Michael., Munck, Allan U., “How do glucocorticoids influence stress responses? Integrating permissive, suppressive, stimulatory, and preparative actions.”, *Endocrine reviews*, **1**(21), 55–89 (2000).
- 2) Miller, Gregory E., Chen, Edith., Zhou, Eric S., “If it goes up, must it come down? Chronic stress and the hypothalamic-pituitary-adrenocortical axis in humans.”, *Psychological bulletin*, **1**(133), 25 (2000).
- 3) Adam, Emma K., Kumari, Meena., “Assessing salivary cortisol in large-scale, epidemiological research”, *Psychoneuroendocrinology*, **10**(34), 1423–1436. (1993).
- 4) Kirschbaum, Clemens., Hellhammer, Dirk H., “Salivary cortisol in psychobiological research: an overview.”, *Neuropsychobiology*, **22**, 150–69 (1989).
- 5) Pruessner, JC., Wolf, OT., Hellhammer, DH., Buske-Kirschbaum, A., Von Auer, K., Jobst, S., Kaspers, F., Kirschbaum, C., “Free cortisol levels after awakening: a reliable biological marker for the assessment of adrenocortical activity”, *Life sciences*, **26**(61), 2539–2549 (1997).
- 6) Ross, Kharah M., Murphy, Michael LM., Adam, Emma K., Chen, Edith., Miller, Gregory E., “How stable are diurnal cortisol activity indices in healthy individuals? Evidence from three multi-wave studies”, *Psychoneuroendocrinology*, **39**, 184–193 (2014).
- 7) Lumeng, Julie C., Miller, Alison., Peterson, Karen E., Kaciroti, Niko., Sturza, Julie., Rosenblum, Katherine., Vazquez, Delia M., “Diurnal cortisol pattern, eating behaviors and overweight in low-income preschool-aged children”, *Appetite*, **73**, 65–72(2014).

被験者No.	Abs			Conc. (ng/mL)			平均	SD	RSD(%)
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd			
#1	0.395	0.423	0.369	13.608	11.222	16.178	13.670	2.479	18.134
#2	0.386	0.405	0.461	14.433	12.666	8.642	11.913	2.968	24.910
#3	0.375	0.402	0.351	15.592	12.910	18.360	15.621	2.725	17.444
#4	0.328	0.297	0.452	21.472	26.506	9.184	19.054	8.910	46.763
#5	0.451	0.371	0.300	9.266	15.948	26.003	17.073	8.425	49.348
#6	0.431	0.287	0.334	10.646	28.499	20.637	19.927	8.947	44.899
#7	0.357	0.333	0.420	17.538	20.751	11.462	16.584	4.717	28.445
#8	0.301	0.263	0.331	25.756	33.375	21.036	26.722	6.226	23.298
#9	0.397	0.412	0.449	13.369	12.049	9.356	11.591	2.045	17.646
#10	0.356	0.433	0.466	17.719	10.459	8.967	12.382	4.682	37.814
#11	0.365	0.466	0.377	16.616	8.335	15.328	13.426	4.456	33.190
#12	0.300	0.402	0.445	25.986	12.910	9.661	16.186	8.641	53.387
#13	0.397	0.414	0.378	13.350	11.910	15.255	13.505	1.678	12.424
#14	0.377	0.357	0.443	15.391	17.634	9.754	14.260	4.060	28.472
#15	0.389	0.537	0.337	14.188	5.129	20.163	13.160	7.570	57.519
Control(low)	0.402	0.399		12.937	13.232		13.085	0.209	1.596
Control(High)	0.192	0.184		54.344	57.636		55.990	2.327	4.157

Fig. 2. 吸光度と定量値.

Optimization of Spatial Filter for EEG Signal Distinction of Right and Left Hands Motor Imagery

Tomoyuki HIROYASU*

Key words : EEG, Motor Imagery, BMI, GA

左右手運動想起中の脳波識別における空間フィルタの最適化

廣安 知之

1 はじめに

自動車の自動運転の技術向上においては、脳機能情報を利用する Brain Computer Interface (BCI) の活用が期待されている。BCI の一種である運動想起型 BCI (Motor-Imagery based BCI:MI-BCI) は運転者の運動を想起することで外部機器の操作を可能にする。この MI-BCI では EEG (Electroencephalogram) 等の非侵襲計測機器を用いて脳活動情報を取得し、運動想起に関連する脳活動を認識・識別することで外部機器の操作を行う。しかしながら、非定常的な脳活動から運動想起のような、ある特定の脳活動パターンを識別することは困難とされており、実用化のために識別精度の改善が求められている。そこで本研究では EEG を用いて取得された脳波から効率的に特徴量を抽出し、左右手運動想起の識別精度向上を目指す。

MI-BCI では精度向上ため、前処理で行う Bandpass Filter (BF) の通過帯域幅が重要である。この帯域は経験的に 7-30Hz が用いられてきた。しかしながら、被験者や実験環境によってもこの通過帯域幅は異なることから BF の帯域を最適化することが本研究分野での課題となっている。この問題に対して先行研究では 4Hz-40Hz の帯域において 4Hz スケールの BF を 2Hz ごとにオーバーラップ処理しながら特徴量を抽出し、識別を行っている^{1, 2)}。しかし、この 4-40Hz という帯域は個人差を全

く考慮しておらず、不必要な特徴量を抽出することで識別精度を低下させている可能性がある。そこで本研究では、この帯域を被験者に適合した帯域へと最適化する方法を提案する。この通過帯域を最適化する対象として本稿では Sparse filter band CSP (SFBCSP) を用いる。

2 空間フィルタ帯域を最適化した MI-BCI の提案

2.1 提案手法概要

本提案手法の概略図を Fig. 1 に示す。提案手法では、被験者に適した大局的な周波数帯域を探索するため Genetic Algorithm (GA) を用いて最適化を行う。次に GA によって最適化された帯域内において 4Hz スケールの BF をオーバーラップ処理し、各フィルタから Common Spatial pattern (CSP) を用いて特徴量抽出を行う。次に、その中から運動想起に関連する重要な特徴量のみを抽出するため Lasso 回帰を用いて BF のスパース化を行い、この BF によって得られた運動想起に関連する重要な CSP 特徴量のみを用いて非線形 Support Vector Machine (SVM) を用いて識別率を求める。

2.2 Common Spatial Pattern

本手法では、運動想起に関連する特徴量を抽出するために CSP を用いる。CSP は各電極から得られる脳波に対応した空間重み係数を求める。この空間重み係数によ

* Faculty of Medical Information Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-6932, E-mail : tomo@is.doshisha.ac.jp

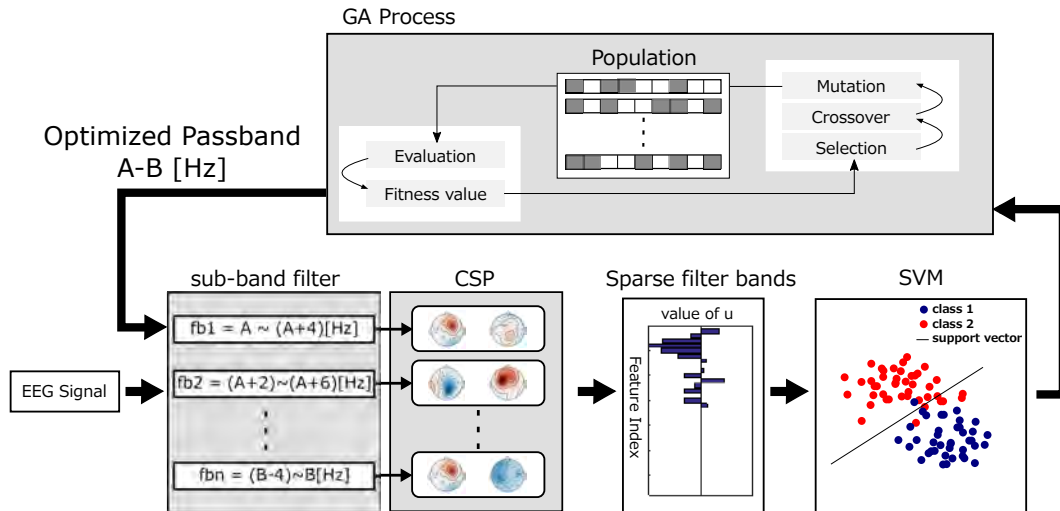


Fig. 1. Proposal Optimization Process.

り抽出された信号は、クラス間の分散比が最大となる。そのため、SN 比が低い状態の脳波に対しても刺激や運動に関連した成分を効率的に抽出することが出来る。

2.3 Lasso 回帰によるスパース化

Lasso 回帰は L1 正則化項もった線形回帰モデルのことを指し、CSP の重要な特徴量のみを抽出するフィルタ係数を推定する。その際、運動想起に関連しないとされる CSP 特徴量はフィルタ係数によりスパース化される。本稿では、このフィルタ帯域内のスパースの度合は、SVM の識別率が最も高くなるように調整する。Lasso 回帰を式 (1) に示す。

$$u = \arg \min \|Fu - y\|_2^2 + \lambda \|u\|_1 \quad (1)$$

ここで F は CSP 特徴量の空間フィルタバンク、 u は推定されるスパースなフィルタ係数、 y は左右運動想起の教師ベクトル $\{1, 2\}$ 、 λ はスパースの度合を調整するためのパラメータである。

2.4 GA による帯域最適化

GA は遺伝的操作を繰り返すことで、問題に適した良好な個体 (解候補) を生成する最適化アルゴリズムである。本稿では、評価関数に SFBCSP の識別率、設計変数に大局的な周波数帯域の下限遮断周波数とその帯域幅、制約条件として周波数帯域が 50Hz 以下になるように設定した。本稿では、GA を用いることで SFBCSP の識別結果が最も高くなるような大局的な周波数帯域に最適化を行う。

3 提案手法の有効性の検証

3.1 実験データセット

本実験では BCI Competition IV において、提供されたデータセット IIb を用いる。本データセットは 9 名の健常者を対象に、左右手運動想起時の脳波を記録したものである。サンプリング周波数に 250Hz、ノイズ除去に 0.5-100Hz の BF、及び、ノッチフィルタを使用している。計測チャンネルは基準電極として左耳朶、設置電極として Fz、探索電極として C3、Cz、C4 を用いる。本計測実験にて被験者は 4 秒間の左右の手の運動想起をそれぞれ 80 回ずつ行う。

3.2 実験概要

本実験では、GA により被験者に適合した大局的な周波数領域の最適化を行った後、この帯域を用いて既存手法との比較実験を行った。比較手法は CSP、SFBCSP、提案手法の 3 つである。本実験には被験者 9 名の運動想起区間における 0.5-2.5 秒の脳波データから特徴量抽出を行った。

3.3 実験結果

被験者 9 名における各手法の識別率の比較結果を Fig. 2 に、提案手法によって最適化した周波数帯域を Fig. 3 に示す。識別結果より提案手法は既存手法に対して高い識別結果が得られた。Fig. 3 からは、最適な周波数帯域は被験者によって異なることが確認できる。このことから、各被験者に適合したフィルタ帯域の最適化により、Lasso 回帰におけるフィルタ係数 u の推定精度が向上したと考えられる。また、これらの大局的な周波数は既存手法で用いられていた 4-40Hz の周波数帯域よりも狭い周波数領域であることから、本提案手法のフィルタ帯域

参考文献

- 1) Yu Zhang, Guoxu Zhou, Jing Jin, Xingyu Wang, and Andrzej Cichocki. Optimizing spatial patterns with sparse filter bands for motor-imagery based brain-computer interface. *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 255, pp. 85 – 91, 2015.
- 2) Q. Novi, Cuntai Guan, T.H. Dat, and Ping Xue. Sub-band common spatial pattern (sbcsp) for brain-computer interface. In *Neural Engineering, 2007. CNE '07.*, pp. 204–207, 2007.

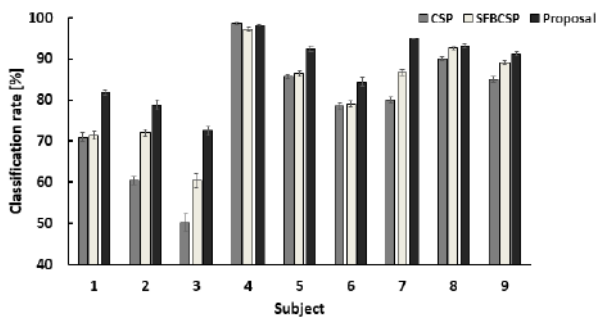


Fig. 2. Result of classification accuracy.

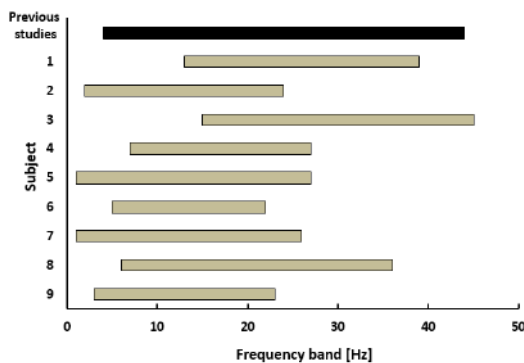


Fig. 3. Result of Frequency bandwidth.

最適化により、実際の BCI におけるリアルタイム処理では従来よりも少ない処理回数で、高い識別精度が得られることが示唆された。

4 まとめ

本稿では、左右手運動想起中の脳波の識別精度を向上させるために、GA と SFBCSP を用いた空間フィルタの最適化手法を提案した。実験では、異なる手法間での識別結果の比較を行った。結果、本提案手法は既存手法に対して高い識別結果が得られた。また、最適化された大局的な周波数帯域においては、全ての被験者に対して異なる帯域をもつことが確認できた。このことから本提案手法は従来よりも実際のリアルシステム上では少ない処理回数で高い識別精度を持った BCI アルゴリズムであることが示唆された。

謝辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」（平成 26 年～平成 30 年，事業番号 S1411030）の支援のもとに行われた。ここに記して謝意を表す。

Optimization of Spatial Filter for EEG Signal Distinction of Right and Left Hands Motor Imagery

Tomoyuki HIROYASU*

Key words : EEG, Motor Imagery, BMI, GA

左右手運動想起中の脳波識別における空間フィルタの最適化

廣安 知之

1 はじめに

自動車の自動運転の技術向上においては、脳機能情報を利用する Brain Computer Interface (BCI) の活用が期待されている。BCI の一種である運動想起型 BCI (Motor-Imagery based BCI:MI-BCI) は運転者の運動を想起することで外部機器の操作を可能にする。この MI-BCI では EEG (Electroencephalogram) 等の非侵襲計測機器を用いて脳活動情報を取得し、運動想起に関連する脳活動を認識・識別することで外部機器の操作を行う。しかしながら、非定常的な脳活動から運動想起のような、ある特定の脳活動パターンを識別することは困難とされており、実用化のために識別精度の改善が求められている。そこで本研究では EEG を用いて取得された脳波から効率的に特徴量を抽出し、左右手運動想起の識別精度向上を目指す。

MI-BCI では精度向上ため、前処理で行う Bandpass Filter (BF) の通過帯域幅が重要である。この帯域は経験的に 7-30Hz が用いられてきた。しかしながら、被験者や実験環境によってもこの通過帯域幅は異なることから BF の帯域を最適化することが本研究分野での課題となっている。この問題に対して先行研究では 4Hz-40Hz の帯域において 4Hz スケールの BF を 2Hz ごとにオーバーラップ処理しながら特徴量を抽出し、識別を行っている^{1, 2)}。しかし、この 4-40Hz という帯域は個人差を全

く考慮しておらず、不必要な特徴量を抽出することで識別精度を低下させている可能性がある。そこで本研究では、この帯域を被験者に適合した帯域へと最適化する方法を提案する。この通過帯域を最適化する対象として本稿では Sparse filter band CSP (SFBCSP) を用いる。

2 空間フィルタ帯域を最適化した MI-BCI の提案

2.1 提案手法概要

本提案手法の概略図を Fig. 1 に示す。提案手法では、被験者に適した大局的な周波数帯域を探索するため Genetic Algorithm (GA) を用いて最適化を行う。次に GA によって最適化された帯域内において 4Hz スケールの BF をオーバーラップ処理し、各フィルタから Common Spatial pattern (CSP) を用いて特徴量抽出を行う。次に、その中から運動想起に関連する重要な特徴量のみを抽出するため Lasso 回帰を用いて BF のスパース化を行い、この BF によって得られた運動想起に関連する重要な CSP 特徴量のみを用いて非線形 Support Vector Machine (SVM) を用いて識別率を求める。

2.2 Common Spatial Pattern

本手法では、運動想起に関連する特徴量を抽出するために CSP を用いる。CSP は各電極から得られる脳波に対応した空間重み係数を求める。この空間重み係数によ

* Faculty of Medical Information Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-6932, E-mail : tomo@is.doshisha.ac.jp

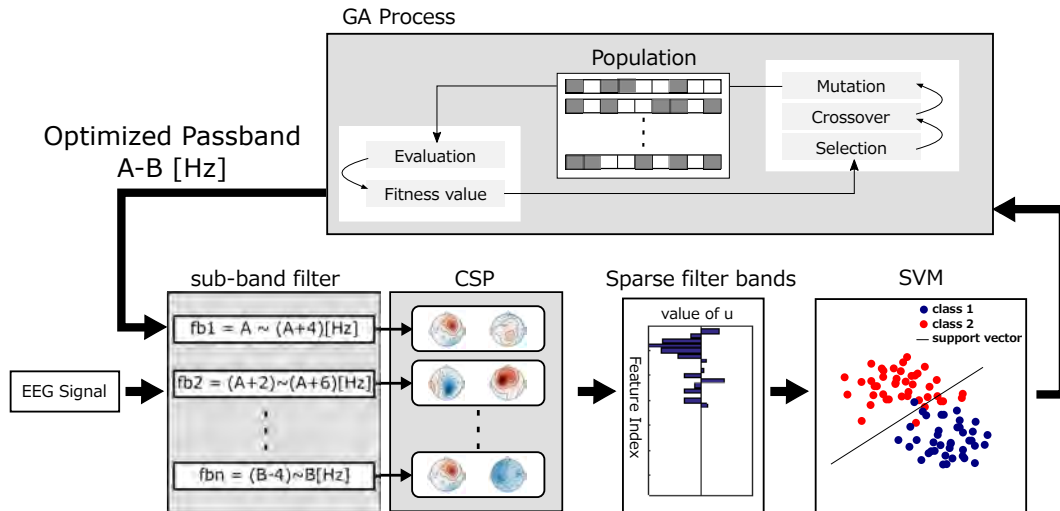


Fig. 1. Proposal Optimization Process.

り抽出された信号は、クラス間の分散比が最大となる。そのため、SN 比が低い状態の脳波に対しても刺激や運動に関連した成分を効率的に抽出することが出来る。

2.3 Lasso 回帰によるスパース化

Lasso 回帰は L1 正則化項もった線形回帰モデルのことを指し、CSP の重要な特徴量のみを抽出するフィルタ係数を推定する。その際、運動想起に関連しないとされる CSP 特徴量はフィルタ係数によりスパース化される。本稿では、このフィルタ帯域内のスパースの度合は、SVM の識別率が最も高くなるように調整する。Lasso 回帰を式 (1) に示す。

$$u = \arg \min \|Fu - y\|_2^2 + \lambda \|u\|_1 \quad (1)$$

ここで F は CSP 特徴量の空間フィルタバンク、 u は推定されるスパースなフィルタ係数、 y は左右運動想起の教師ベクトル $\{1, 2\}$ 、 λ はスパースの度合を調整するためのパラメータである。

2.4 GA による帯域最適化

GA は遺伝的操作を繰り返すことで、問題に適した良好な個体 (解候補) を生成する最適化アルゴリズムである。本稿では、評価関数に SFBCSP の識別率、設計変数に大局的な周波数帯域の下限遮断周波数とその帯域幅、制約条件として周波数帯域が 50Hz 以下になるように設定した。本稿では、GA を用いることで SFBCSP の識別結果が最も高くなるような大局的な周波数帯域に最適化を行う。

3 提案手法の有効性の検証

3.1 実験データセット

本実験では BCI Competition IV において、提供されたデータセット IIb を用いる。本データセットは 9 名の健常者を対象に、左右手運動想起時の脳波を記録したものである。サンプリング周波数に 250Hz、ノイズ除去に 0.5-100Hz の BF、及び、ノッチフィルタを使用している。計測チャンネルは基準電極として左耳朶、設置電極として Fz、探査電極として C3、Cz、C4 を用いる。本計測実験にて被験者は 4 秒間の左右の手の運動想起をそれぞれ 80 回ずつ行う。

3.2 実験概要

本実験では、GA により被験者に適合した大局的な周波数領域の最適化を行った後、この帯域を用いて既存手法との比較実験を行った。比較手法は CSP、SFBCSP、提案手法の 3 つである。本実験には被験者 9 名の運動想起区間における 0.5-2.5 秒の脳波データから特徴量抽出を行った。

3.3 実験結果

被験者 9 名における各手法の識別率の比較結果を Fig. 2 に、提案手法によって最適化した周波数帯域を Fig. 3 に示す。識別結果より提案手法は既存手法に対して高い識別結果が得られた。Fig. 3 からは、最適な周波数帯域は被験者によって異なることが確認できる。このことから、各被験者に適合したフィルタ帯域の最適化により、Lasso 回帰におけるフィルタ係数 u の推定精度が向上したと考えられる。また、これらの大局的な周波数は既存手法で用いられていた 4-40Hz の周波数帯域よりも狭い周波数領域であることから、本提案手法のフィルタ帯域

参考文献

- 1) Yu Zhang, Guoxu Zhou, Jing Jin, Xingyu Wang, and Andrzej Cichocki. Optimizing spatial patterns with sparse filter bands for motor-imagery based brain-computer interface. *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 255, pp. 85 – 91, 2015.
- 2) Q. Novi, Cuntai Guan, T.H. Dat, and Ping Xue. Sub-band common spatial pattern (sbcsp) for brain-computer interface. In *Neural Engineering, 2007. CNE '07.*, pp. 204–207, 2007.

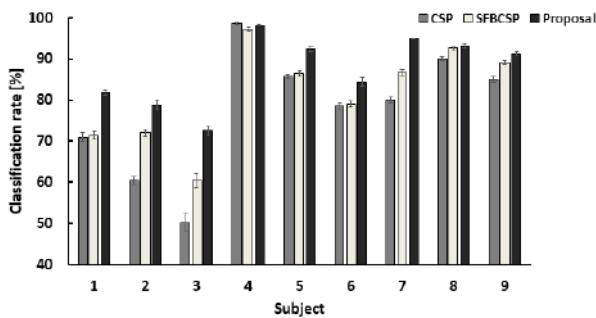


Fig. 2. Result of classification accuracy.

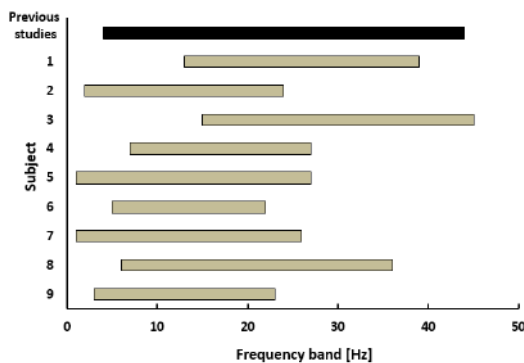


Fig. 3. Result of Frequency bandwidth.

最適化により、実際の BCI におけるリアルタイム処理では従来よりも少ない処理回数で、高い識別精度が得られることが示唆された。

4 まとめ

本稿では、左右手運動想起中の脳波の識別精度を向上させるために、GA と SFBCSP を用いた空間フィルタの最適化手法を提案した。実験では、異なる手法間での識別結果の比較を行った。結果、本提案手法は既存手法に対して高い識別結果が得られた。また、最適化された大局的な周波数帯域においては、全ての被験者に対して異なる帯域をもつことが確認できた。このことから本提案手法は従来よりも実際のリアルシステム上では少ない処理回数で高い識別精度を持った BCI アルゴリズムであることが示唆された。

謝辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」（平成 26 年～平成 30 年，事業番号 S1411030）の支援のもとに行われた。ここに記して謝意を表す。

GC-MS による呼気分析の基礎的研究： ドライバーのストレスモニタリングに向けて

大江洋平・吉仲壮真・佐野大成・太田哲男

1. はじめに

人は、ストレスを受けることにより状態が変化する。この変化は、本人が自覚する場合や外から見てわかる場合もあるが、客観的な判断方法の確立が必要とされる。そのため、近年、疾病予防などの観点からストレスの評価法に注目が集まっており、それらは主に唾液中のコルチゾール、アミラーゼを指標としている。¹⁾ コルチゾールは、ストレスとの関連で最も研究されている物質であり、心理的・身体的な健康状態を考える上でも重要なホルモンである。²⁾ アミラーゼは唾液に含まれるグリコシド結合を加水分解する化酵素であり、交感神経系の直接神経作用とノルアドレナリン作用の両作用で分泌され、ストレスにより増加することが知られている。³⁾

一方、乗用車保有台数および運転免許保有者数は年々増加傾向にあり、ドライバーのストレスもそれに伴い増加すると考えられる。運転中のストレスは危険運転さらには事故を誘発することになるため、運転中のドライバーのストレス計測や異常に関する警鐘のフィードバックが事故防止につながると期待できる。しかし、上述のストレス測定法は、唾液サンプルの採取が車の運転中などにおいて困難であるなど、現実的ではない。

そこで、本研究ではストレス計測の試料として、呼気に焦点を当てた。呼気は呼吸をしている以上、常に体外に排出されるため非侵襲を保てる。また、唾液成分の変動に伴い、そこにも何らかの成分変化が起こると考えている。本研究の全体像としては、呼気やその揮発成分が呼気に含まれる唾液などの非侵襲的に得られる試料に含まれる物質を分析し、そこで得られた新たなストレスマーカやその特徴量を反映した簡便な測定法の検討へと展開し、最終的には、運転中ストレスのリアルタイム測定を実現し、安全運転システムの構築の一助になることを目

的としている。本研究では、多数の呼気中物質情報を得るための基礎的な研究として、採取した呼気の GC-MS への導入段階を中心に様々な検討を行い、ある一定の成果を得たので以下に報告する。

2. 装置および実験方法

2.1 装置およびサンプル

2.1.1 GC-MS

ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS, 島津製作所社製 GC-2010/PARVUM 2 システム) に、サーマルディソープションシステム (島津製作所社製 TD-20) を連結し、呼気等の分析に用いた (Fig. 1)。



Fig. 1 GC-MS システム (左から, PARVUM2, GC-2010, TD-20, PC モニタ)。

2.1.2 呼気サンプル

呼気サンプルは、被験者の呼気を捕集バックに直接吹き込み、特に保存することなく、そのまま使用した。

2.2 実験方法

2.2.1 呼気サンプルの分析

呼気を二つ口 PVDF サンプリングバッグ 1L に入れ、シリコンチューブで捕集管と接続し、一方はミニポンプの IN 側と接続し、以下に示す **Method A~C** によって捕集管に吸着させた。その後、Thermal Desorption System のサンプルトレイに、捕集管を乗せ、加熱脱離を行い、GC-MS により分析した。

3. 結果および考察

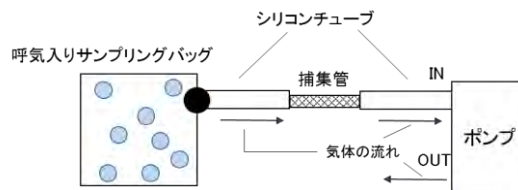
3.1 吸着メソッドの検討

従来法である呼気入りのサンプリングバッグと捕集管 (Tenax TA), ポンプをシリコンチューブで接続し, ポンプでバッグに入っている呼気を吸い込むことで捕集管に吸着させる方法 (Method A, Fig.2)により, 呼気の GC-MS 分析を行ったところ, Tridecane (b.p. = 234°C) や Heptadecane (b.p. = 302°C), Nonanal (b.p. = 195°C), 2-Nonenal (b.p. = 205°C) といった複数の有機化合物が検出された. 2-Nonenal は呼気中にも含まれ, その含有量により口臭の原因になる物質である. これらの結果は, 呼気中のある程度以上の沸点をもつ揮発性物質をこのシステムで測定できる一方で, 呼気中に含まれていてもよい Acetone (b.p. = 56°C) や isoprene (b.p. = 34°C) などは観測されなかったという問題点も挙げられる. そこで, これらの改善を図るため, ポンプの OUT 側をバッグのもう片方の口に接続することでバッグ-捕集管-ポンプ系の循環系をつくって吸着させる方法 (Method B), ポンプの OUT 側に空のバッグを接続し, 空のバッグの容量が気体で満たされれば元々呼気で満たされていたバッグを入れ替える方法 (Method C) の二つの方法を検討した. その結果, Method A と比べて Method B では, 一部の物質においてサイクル時間を延ばすほどピークが強く出ることが分かった (Fig.3 (a) vs (b) and (c)). この結果は, 従来法のように一度だけ捕集管を通じる方法では十分に吸着できない成分があることを示している. また, Method C (5セット, 10セット)で吸着させたところ, Method A と比較してバッグを入れ替える回数を増やせば増やすほどピークが強く出ることが分かった (Fig.3 (a) vs (d) and (e)).

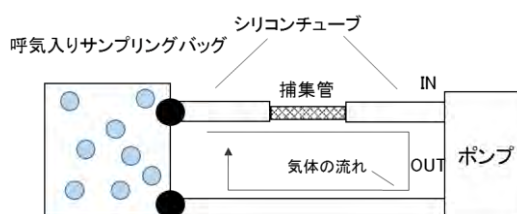
3.2. Tenax TA 管と Tenax TA/活性炭管との比較

一般的に Tenax TA 管は幅広い有機化合物の吸着に優れているが, 低沸点領域の化合物の吸着は活性炭の方が優れている場合がある. そこで, Tenax TA と活性炭の混合物が入った捕集管 (TenaxTA/活性炭管) を用いて検討することにした. 吸着させる方法

Method A



Method B



Method C

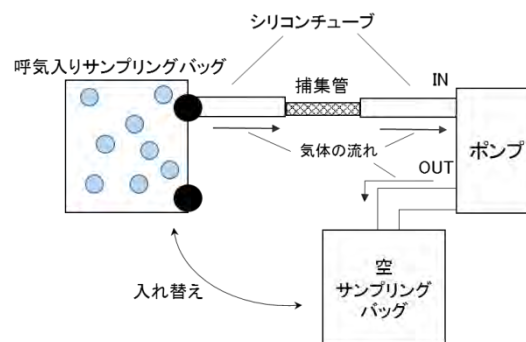


Fig. 2 Absorption Methods.

としては, 上記の検討で好成績であった Method C (10セット) を用いた. その結果, Tenax TA/活性炭管を用いた時の物質のピークが Tenax TA 管に比べて強く, 特に保持時間5~10分の区間で Tenax TA 管と比較してピークが強く出る化合物の存在を確認することができた. この結果より, 本呼気分析においては, Tenax TA/活性炭管の方が適しているといえる. 次に, 主なピークに対応する物質を決定する目的で, まず, それらを類似度検索で化合物を推定し, 推定された化合物を個別に GC-MS 分析を行い, そのマススペクトルと比較した結果, Hexanal (b.p.=131°C), Nonanal などの脂肪族アルデヒド, *n*-butyl acetate (b.p.=126°C) など報告されている呼気由来の成分や, 上述で問題点として取り上げた低沸

点化合物の Acetone や酢酸も確認された。

4. 結論

本実験では、ドライバーのストレスモニタリングを目的とした GC-MS 条件、測定方法の検討を行った。実験系に用いたポンプによる影響も考慮しなければならない可能性があるが、捕集管を Tenax TA/活性炭管に変更することで、Hexanal, Nonanal などの長鎖アルデヒド、*n*-butyl acetate および Acetone や酢酸といった呼気中低沸点成分の捕集に成功し、呼気中から多くの物質情報が得られるようになった。本法を用いてストレス下での呼気情報を蓄積、解析し、ストレスと呼気との関連を探っていくことが今後の課題である。

5. 参考文献

- 1) 井澤修平, 城月健太郎, 菅谷渚, 小川奈美子, 鈴木克彦, 野村忍, *日本補完代替医療学誌*, **2007**, 4, 91-101.
- 2) BS McEwen, *Neuropsychopharmacology*, **2000**, 22, 108-124.
- 3) 山口昌樹, *日本薬理学雑誌*, **2007**, 129(2), 80-84.

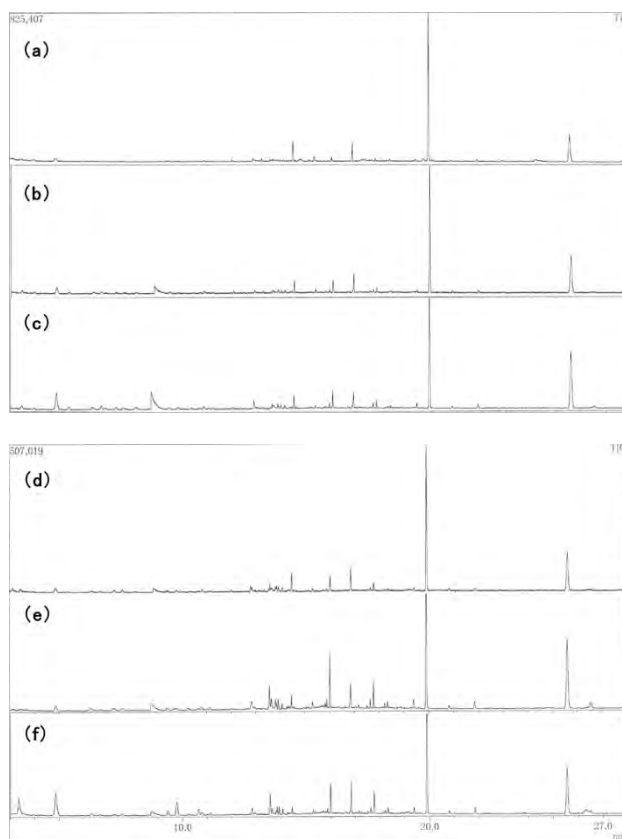


Fig. 3 Total Ion Chromatogram of Breath Sample. **(a)** Method A. **(b)** Method B (5 min). **(c)** Method B (10 min). **(d)** Method C (5 times). **(e)** Method C (10 times). **(f)** Method C (10times, Tenax TA/activated carbon).

Adaptive Sensitivity Shift in Auditory Periphery Modulated by Attention

Hiroyuki Miyawaki, Kohta I. Kobayasi

(Received February 28, 2016)

It has been well documented that a cochlea respond to sound nonlinearly. For example, the amplification mechanism takes place at a very peripheral level, cochlear hair cell, when we perceive weak sounds. It is, however, still not known whether the amplification can be controlled by the attention. The purpose of this experiment is to investigate the cochlear amplification in animal model. Cochlear microphonics (CM) was measured to evaluate the cochlear response in Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*). For measuring CM, a silver electrode was implanted on the round window of a cochlea. Animals were trained to associate certain sound stimulus to concurrent mild electrical shock, so as to attend the sound stimulus. As training results, they began to move their head when the sound stimulus was presented. This action was able to be regarded as attention of the animals to the sound stimulus. Comparing the CM before and after the action, significant change in CM amplitude was observed. As the head movement inevitably affects physical amplitude of sound reaching the ear of interest, we evaluated the deviation the movement could cause by measuring CM response in anesthetic animals while changing position of a speaker around the animal's head. After deducting the deviation, effect of attention in CM response was still 1.9 dB. The result suggests that the attention could modulate the auditory sensitivity at the peripheral level (i.e., outer hair cell).

Key words : amplification mechanism of cochlea, efferent control

キーワード : 蝸牛の増幅機構, 遠心性制御

注意が及ぼすスナネズミの聴覚抹消の感度への影響

宮脇 弘之, 小林 耕太

1. はじめに

生物の感覚系は、外界を正しく認識するために、同時に起きる様々な刺激を分離・解釈する必要がある。そのためには、意味のある刺激（信号）を意味のない刺激（ノイズ）より分離することが不可欠である。感覚情報処理のどのレベル（末梢から中枢）で、信号とノイズの分離がなされるかについては未だ殆ど明らかされていない。近年の様々な研究によ

り“注意”によって感覚感度が増加する可能性が示唆されている。本研究では聴覚のモデル動物であるスナネズミ (*Meriones unguiculatus*) を対象に、聴覚末梢の感度が“注意”によって変化するか否かを検討した。

スナネズミはコミュニケーションに音声を用いることが分かっている。この音声は周波数帯域によって分類可能であり、人間の可聴域と重なる帯域に属する音声もあれば、超音波領域に属する音声も存

*Faculty of Life and Medical Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone: 0774-65-6439, E-mail: kkobayas@mail.doshisha.ac.jp

在する¹⁾。スナネズミは主に他個体とのコミュニケーションでは超音波領域に属する音声を使うが、先行研究ではスナネズミのオーディオグラムにおいて超音波領域の閾値は 20kHz 以下の閾値より高いことが分かっている²⁾。なぜ閾値の高い領域の音声をコミュニケーションに使うことが可能なのか分かっていない。一つの仮説として蝸牛の増幅機構が挙げられる。これは蝸牛の非線形性機構の一つであり、小さな音を能動的に増幅する働きのことである。本研究では、スナネズミが集中して音を聴くと蝸牛の増幅機構が働き、聴覚感度が上昇する可能性を検討した。

実験は、音に対して集中した際の蝸牛における増幅機構を検討することを目的とした。まずスナネズミに音に集中させるためには音に意味を持たせるため、音に罰を関連付ける訓練を行うことにより、スナネズミが音に対して何らかの行動をするようになると考えた。その時スナネズミは音に対して意味を持ったとみなすことができ、音に対して集中したと定義した。また、蝸牛の働きを検討するために蝸牛マイクロフォン電位(Cochlear microphonics: CM)を指標として増幅機構を調べた。蝸牛マイクロフォン電位とは内耳の聴覚器官である蝸牛に到達した音や音声の周波数、強さ、時間の 3 つの情報を忠実に再現している電気的な信号である。蝸牛内にある有毛細胞の受容器電位が統合されたものであり、蝸牛の機能を知る面で有効な手段の一つである。

今回実験を行ったところ、後述するがスナネズミの頭が動くことによって耳に届く音の物理量が変わり、CM の値を比較することが困難であった。そこで 2 つ目の実験としてスナネズミを麻酔下におき、覚醒下における頭の運動による耳とスピーカーの位置関係の変化を再現して CM の変化を計測した。この 2 つ目の実験の目的はスナネズミの意識がない麻酔下で計測した CM の変化と覚醒下での CM の変化を比較して、頭の動きによる CM の変化の成分を除去することである。しかしこれらの実験結果では誤差が大きく出てしまった。そこで 3 つ目の実験としてスナネズミに装着するヘッドホンを用いる実験を行った。この 3 つ目の実験の目的はヘッド

ホンを用いて提示する音圧レベルを安定させて誤差を小さくして計測することである。

2. 実験手法

2.1 実験 1 覚醒下での自由行動下の集中による CM の変化の計測

2.1.1 CM 電極留置手術

被験体として週齢 72 週間のスナネズミ 2 匹を用いた。CM を測定するために CM 測定用電極を正円窓周辺に留置する手術を行った。記録電極と基準電極は IC ソケットに固定し、頭蓋に接着した。その作業の後、被験体が覚醒下でも CM が測定出来るようにするために、IC ソケットを露出させ、その他の部分は縫合糸により縫合した。

2.1.2 装置と音刺激

音刺激として 5 kHz のトーンバーストを制作した。継続時間は 0.2 s で、立ち上がり立ち下がりは 0.02 s である。このトーンバーストを時間間隔 0.2 s で 10 回繰り返す、これを 1 試行とした。そして 1 日にこの試行を 20 回行った。試行と試行の時間間隔は 56.4 s である(Fig. 1)。

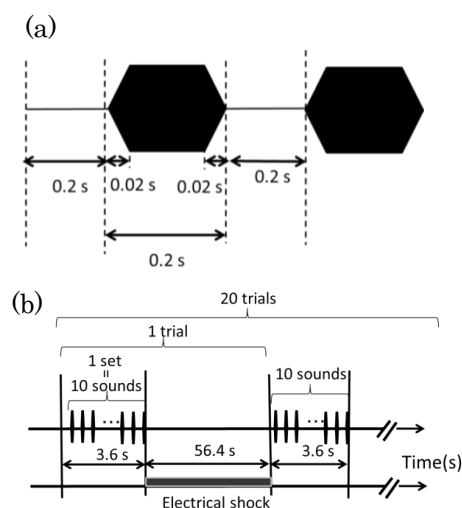


Fig. 1 Temporal pattern of sound stimulus (a):Tone burst. Duration:0.2 s, Rise/Fall time:0.02 s, Frequency:5 kHz, 70 dB SPL. (b):Image of 20 sets of sound stimuli. 1 set is 10 tone bursts. Time interval to the next set is 56.4 s. Electrical shock was presented during the time interval.

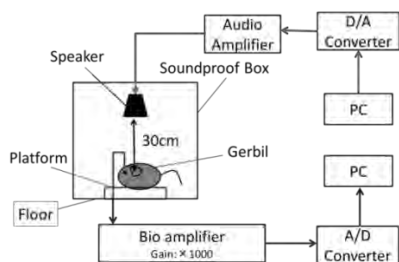


Fig. 2 Experimental environment. A speaker was placed 30cm above gerbil's ear.

実験は防音装置の中にスピーカーが設置された実験用ケージの中で行われた。オペラント条件付けに電気ショックを用いるため、実験用ケージに電気ショック装置を設置し、床と台の2つの領域を作った(Fig. 2)。またそれぞれに電気ショックを与えられるようにした。電圧は 112 V DC である。

2.1.3 訓練

訓練は、1 試行の音刺激を提示し、音刺激が終了した直後、音刺激が提示された時に被験体があった方の領域(床か台)に電気ショックを与えた。この時、被験体が、音刺激が提示されている間に別の領域に移動することが出来れば訓練は成功とみなした。逆に被験体が音刺激が提示されている間に移動することが出来なかった時は罰を与えた。

2.1.4 計測と解析

計測する際は、測定機器を保護するために被験体に電気ショックを与えた時はその直前に被験体と生体アンプを切断した。また後述するが、今回被験体は音刺激に対してまず頭を動かすという行動をとったため、この行動が集中に関わる行動であろうと考えた。そこで頭を動かす直前の CM 波形と動かし直後の CM 波形の差を dB で評価した。

2.2 実験 2 麻酔下での頭の動きによる CM の変化の計測

2.2.1 被験体と音刺激

実験 1 で用いた被験体を用いた。また音刺激も実験 1 で用いたものを用いた。

2.2.2 実験環境

実験 1 で用いた機材を用いた。防音箱のなかにケージの床と台の部分のみを配置した。防音箱内部を自由に動かせるように、スピーカーを防音箱の内部に引っ掛けることのできる木の板に金網で括りつけた。

2.2.4 実験手順

まず麻酔前投薬として硫酸アトロピン(Atropine Sulfate), (約 0.7 mg/kg)を筋肉注射した。その後麻酔として混合麻酔(ケタミン(Ketamine), (約 35 mg/kg)とキシラジン(Xylazine), (約 14 mg/kg))を筋肉注射し、被験体を麻酔下にした。次に被験体を台の上に配置した。この時被験体の体温低下を防ぐために被験体の下に携帯カイロをした。CM に対する麻酔の影響を考慮して、30 分放置した。その後被験体の耳の位置とスピーカーの距離を 30 cm に保つようにしてスピーカーを移動させて、音刺激を提示して CM の差を計測した。

2.3 実験 3 ヘッドホンを用いた時の他個体に対する集中による CM の変化の計測

2.3.1 実験装置と音刺激

実験 1 と実験 2 の結果よりこれらの実験系では誤差が出やすいと判断したため、より誤差の少なくなる実験系として被験体に装着したヘッドホンから音を提示する方法を考えた。このヘッドホン(Fig. 3)は被験体に対して提示する音圧レベルの誤差が ± 0.5 dB になるように作った。音刺激には 50 ~ 65 dB のスナネズミのグリーティングコールと喧嘩するとき発する音声を用いた。

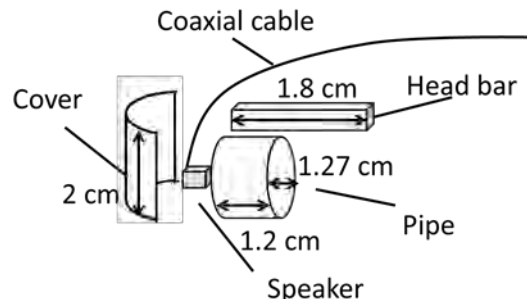


Fig. 3 A headphone system for gerbil. A miniature headphone developed for auditory prosthesis was utilized.

2.3.2 実験手順

まずヘッドホンを装着した被験体を一匹の状態にして音刺激を提示した。次に麻酔をかけて眠らせた別の個体と一緒にして音刺激を提示した。

3. 結果と考察

3.1 実験 1 と実験 2

被験体は訓練が進むと頭を動かす行動と罰から避ける行動の 2 種類の行動をとるようになった。音刺激に対してまず頭を音源の方へ動かし、その後罰から避ける行動をとった。頭を動かす割合が上昇すると逃げる割合も上昇することが確認できた。

CM の変化が単に頭を動かした時の変化なのかそれとも音刺激に対して集中したために起こった変化なのかを判別することは出来なかった。

そこで、それぞれの頭の動きと同じだけ頭とスピーカーの位置関係を再現した時の CM の変化を計測して、覚醒化での CM の電圧変化と麻酔下での CM の電圧変化を比べた (Fig. 5)。覚醒化では、麻酔下に比べて CM の上昇が見られた。その数値は $1.9\text{ dB} \pm 3.7\text{ dB}$ であった。この上昇が集中による CM の上昇である可能性が示唆される。しかし今回の実験系は誤差が出やすく、標準偏差も数値に対して大きかったので実験で目指した仮説にはふさわしくなかったと考えられる。

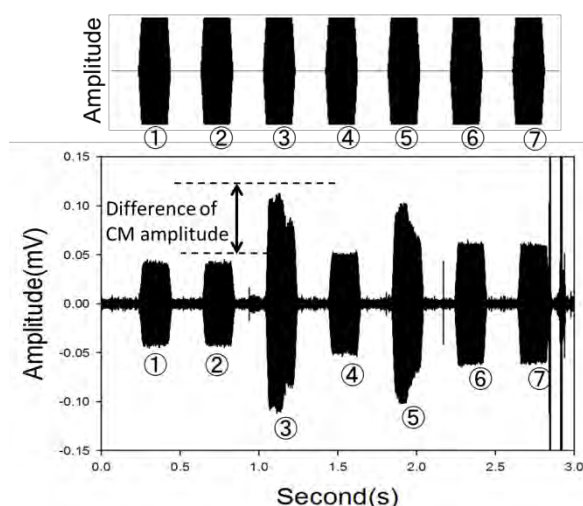


Fig. 4 Example of CM wave form in 1 set. In 7 out of 10 sounds, CMs could be measured. CM amplitude increased at 3rd sound by shaking gerbil's head. The upper figure is wave form of the sound stimulus

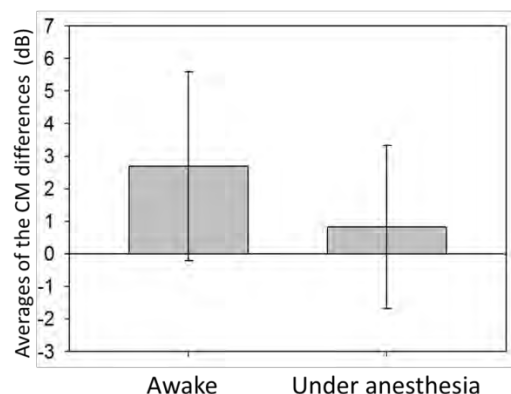


Fig. 5 The average of CM amplitude under different conscious level.

3.2 実験 3

実験中被験体は刺激音に対してグリーティングコールと思われる発声をした。これを刺激音のグリーティングコールに対して返事をしたと考え刺激音に対して集中していたと考えた。

CM の計測を行ったところ刺激音がグリーティングコールの時は一匹でいる状況より二匹でいる状況の方が CM の上昇が見られた。その上昇の平均は 1.94 dB であった。刺激音が喧嘩の時に発声する音声の場合 CM の上昇は確認出来なかった。

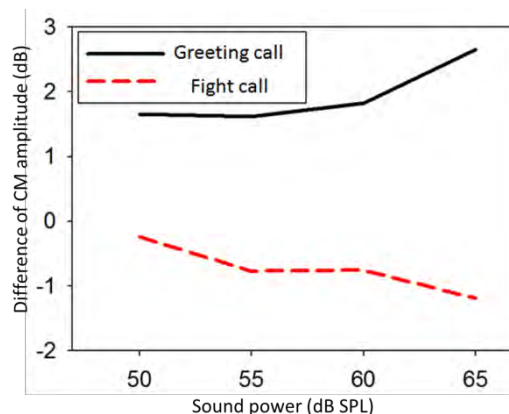


Fig. 6 Difference of CM amplitude with the greeting call and the agonistic call in different social context.

4. 結論

本実験の目的は集中による蝸牛の増幅機構について調べることであった。覚醒下において頭の動きによって生じる CM の変化と、麻酔下において覚醒下と同じだけ頭とスピーカーの位置関係を再現した時の CM の変化を比較すると覚醒下の CM の変化の方が約 2 dB 高いということ分かった。またヘッドホンからコミュニケーション音声を提示したときに一匹でいるのに比べて二匹でいる方が CM が約 2

dB 大きくなることが分かった。これらの結果の 2 dB の上昇が集中による CM の増幅である可能性がある。

参考文献

- 1) Nabetani, Y., Riquimaroux, H., Situation-dependent vocalizations of Mongolian gerbils for communication. The Seventh International Congress of Neuroethology Program and Abstracts, PO34, August 8-13, Nyborg, Denmark (2004)
- 2) Ryan, A., Hearing sensitivity of the Mongolian gerbil, *Meriones unguiculatus*. Acoustical Society of America 59:1222-1226,(1976)
- 3) Delano, P. H., Elegueda, D., Hamame, C. M., Robles, L., Selective Attention to Visual Stimuli Reduces Cochlear Sensitivity in Chinchillas. *The Journal of Neuroscience* 11 27(15), 4116-4153 (2007)
- 4) Hoffman, L. A., Kelly, C. W., Nicholson, D. A., Sober, S. J., Lightweight, Headphones-based System for Manipulating Auditory Feedback in Songbirds. *Journal of Visualized Experiments*. 69, e50027 (2012)

Relationship between brain function status and saliva metabolome under stress condition

Masahiro SGUGIMOTO*

Key words : Brain Functional Imaging, Metabolome

ストレス時における脳活動状態と唾液内代謝物質の関係

杉本 昌弘

1 はじめに

自動車運転時には、様々なストレス刺激が存在し、これらは運転への集中の低下や意思決定などに影響を与える可能性がある。また慢性的にストレス状態であることは、精神疾患の発症の促進や症状の悪化に影響することが知られている。これらの状況から自分のストレス時の状態を把握し対応することが望まれるが、ストレスは個人差や状況など多因子が関係した複雑な状態であるため診断が難しく、またストレスの定義自体あいまいである。

ストレスの指標としてはコルチゾール等のホルモンやストレスに関連する脳領域が注目されている¹⁾。これらの研究はコルチゾール濃度の多寡によって被験者のストレス状態を分類し、その分類間の脳活動の差を調査している。しかし前述した通り、ストレス状態は多様であるためコルチゾール濃度のみからストレス状態を定義することは適切でない可能性が考えられる。また近年、分析機器や技術の発展から唾液内代謝物質の濃度を網羅的に分析することが可能となっている。唾液は簡便に採取でき、かつ内分泌の制御は脳を起点として行われているため、脳活動やストレスとの関連が期待されるがまだ解明されておらず、それを調査する手法も確立されていない。

そこで本研究では principal component analysis (PCA) と教師なし学習を組み合わせた提案手法を用いて、特定の領域に限定しない全脳の脳活動情報から被験

者の状態を定義する。そして、得られた被験者のラベルと紐づく唾液内代謝物質を調査することによって、脳活動と関連のある唾液内代謝物質を同定するというアプローチを採用する。

2 脳活動と唾液内代謝物質の関係解析手法

本提案手法は脳活動データから被験者の分類を定義し、その分類に紐づく代謝物質を同定することで脳活動と関連する代謝物質を推定するものである。既存の研究ではストレスとの関係が既知である特定の物質や脳領域のみに着目していたことに対して、本手法は全脳を対象として前提条件を必要としない教師なし学習を適用することで、より客観的かつ複合的な分類が得られるという特徴を持つ。提案手法の流れを下記に示す。

Step.1 脳活動状態の分類

まず設定された実験タスク中の脳活動を functional magnetic resonance imaging (fMRI) を用いて計測し、それぞれの脳領域に含まれる賦活ボクセル数を算出する。ここで1つの脳活動データは116種類の脳領域の賦活ボクセル数という116次元の特徴を持つが、PCAによってそれを累積寄与率が80[%]以上になる次元まで削減し、得られたスコアを特徴量として k-means 法を用いて被験者を2クラスに

* Institute for Advanced Biosciences, Keio University, Kyoto
E-mail : tomo@is.doshisha.ac.jp

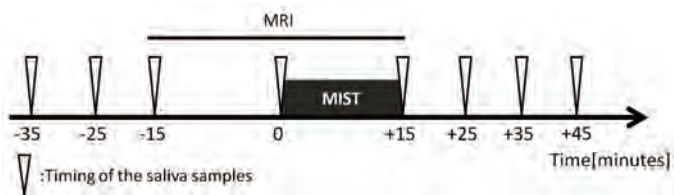


Fig. 1. Timeline of this study.

分類する。

Step.2 関連代謝物質の同定

実験前後の唾液サンプルのそれぞれの代謝物質濃度から Area under the curve with respect to ground (AUC_G) と Area under the curve with respect to increase (AUC_I)²⁾ を算出する。 AUC_G はその物質がどの程度の濃度でどれだけの時間体内に影響を与えたのか、 AUC_I はその物質の濃度変化の度合いを表す。この2つの値をそれぞれ特徴量として、脳活動と同じ分類が得られる代謝物質を同定する。

3 提案手法に対する評価実験

3.1 実験概要

本実験の目的は、ストレス時の脳活動と唾液内代謝物質データに対して提案手法を適用することによって被験者のストレス状態の分類を定義すること、そしてその分類と紐づく唾液内代謝物質を調査し、本手法の有効性を検討することである。

本実験では健常男性 11 名に対して、ストレス時の脳活動を fMRI を用いて計測した。そしてその中の 8 名の被験者に対して、ストレス刺激の前後に 8 回唾液を採取し唾液内代謝物質濃度の変化を分析した。ストレス刺激のための実験タスクとして Montreal Imaging Stress Task (MIST) を採用した。MIST は成績や制限時間に関するプレッシャーを与えつつ計算課題をさせることによってストレス状態を作るもので、本実験では 2Session 行ったが Session 間に実験者より口頭でストレスを与えられるため 2Session 目の方が高ストレスであると考えられる。本実験のデザインを Fig. 1 に示す。

3.2 結果と考察

脳活動状態の分類の定義 3.2.1 S

Session1 と Session2 の脳活動データに PCA を適用し、次元を削減して得られた特徴量に対して k-means 法により 2 クラスに分類した結果を Fig. 2 に示す。ここで

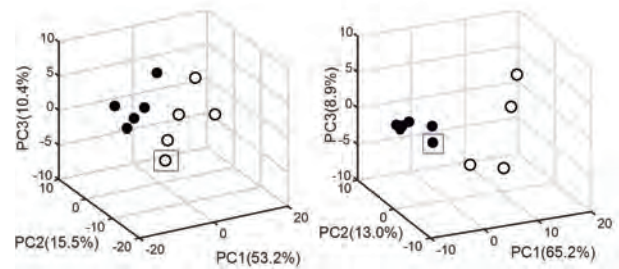


Fig. 2. PCA score plots.

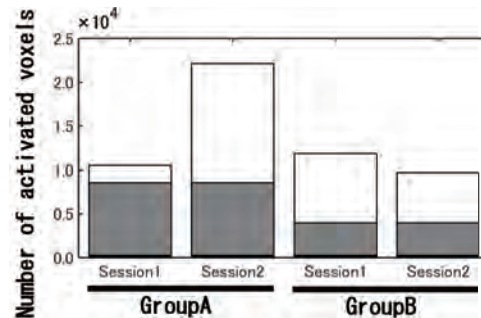


Fig. 3. Number of activated voxels.

それぞれの軸は各主成分を示しており、軸名のカッコ内は寄与率を示している。黒丸でプロットしたグループを GroupA、白丸でプロットしたグループを GroupB と定義した。ここで、四角の枠線で囲まれた被験者以外は、Session1 と Session2 で同じグループに分類された。

それぞれのグループがどのような脳活動状態であるのかを調査するため、それぞれのグループで集団解析 ($p < 0.001, k > 10$) を行った。各グループの賦活ボクセル数を Session 間で比較したグラフを Fig. 3 に示す。グレーの部分がグループ内において Session 間で同じ領域が賦活したボクセル数、白色の部分が異なる領域のボクセル数、黒色の部分がグループ間で共通した賦活ボクセル数である。Fig. 3 より、GroupA はよりストレス強度が大きい Session2 において Session1 での賦活領域を維持しつつ新たに賦活領域を広げていることが分かる。GroupB は Session1 の賦活領域の半分以上を Session2 で変化させていることが分かる。これらの結果から、Fig. 2 でのクラスタリングによってストレス強度が変化したときの対応が異なる被験者の分類が得られたと考えられる。

脳活動と関連する唾液内代謝物質 3.2.2 各

被験者の唾液内代謝物質の AUC_G と AUC_I から、Fig. 2 と同じ分類が得られるものを調査した。 AUC_G を用いた場合、 Guanidinoacetate, 3-Hydroxybutyrate, 2-

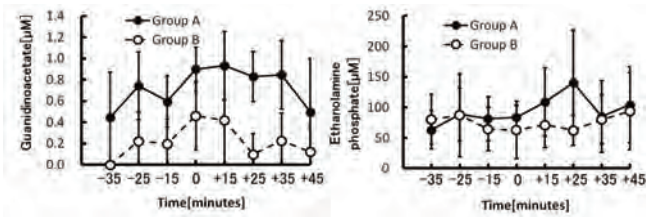


Fig. 4. Salivary Guanidinoacetate and Ethanolamine phosphate responses.

Furoate, Adipate, Glucuronate, Gluconate, AUC_I を用いた場合 Ethanolamine phosphate が同じ分類を得られるという結果となった。 AUC_G の 6 種類の中で最もグループ間の分離度が大きい Guanidinoacetate と AUC_I の Ethanolamine phosphate における各グループで平均した濃度変化を Fig. 4 に示す。 Guanidinoacetate では実験中の全てのサンプルでの濃度に、 Ethanolamine phosphate ではストレス課題後の濃度変化においてグループ間で差異がみられた。 このことから、これらの唾液内代謝物質濃度からその被験者の脳活動状態が推定できる可能性が示唆された。

4 まとめ

本稿では、脳活動状態と唾液内代謝物質の関係推定のための手法の提案を行った。 本手法の有効性を検討するために実験を行い、 MIST 時の脳活動を fMRI を用いて測定し、 その前後に採取した唾液をメタボローム解析することにより代謝物質濃度変化を得た。 これらのデータに対して PCA と k-means クラスタリングを適用した結果、異なるストレス強度に対する脳活動の対応が異なるグループが得られた。 そしてこれらと同じ分類が得られる唾液内代謝物質が 7 種類存在し、 これらの濃度変化からストレス時の脳活動状態を推定できる可能性が示唆された。

謝辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」(平成 26 年～平成 30 年, 事業番号 S1411030) の支援のもとに行われた。 ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Jens C Pruessner, Katarina Dedovic, Najmeh Khalili-Mahani, Veronika Engert, Marita Pruessner, Claudia Buss, Robert Renwick, Alain Dagher, Michael J Meaney, and Sonia Lupien. Deactivation of the limbic system during acute psychosocial stress: evidence from positron emission tomography and functional magnetic resonance imaging studies. *Biological psychiatry*, Vol. 63, No. 2, pp. 234–240, 2008.
- 2) Jens C Pruessner, Clemens Kirschbaum, Gunther Meinlschmid, and Dirk H Hellhammer. Two formulas for computation of the area under the curve represent measures of total hormone concentration versus time-dependent change. *Psychoneuroendocrinology*, Vol. 28, No. 7, pp. 916–931, 2003.

Automatic driving system development using biometric information

Tomoyuki HIROYASU* and Satoru HIWA*

(Received March 30, 2016)

In this research, the goal is development of an automatic driving system incorporating biological information. In this year, the driver's state judgment system based on biological information (pulse) was constructed and integrated with the main control system of the driver in the loop. When excessive tension of the driver was detected, a system was constructed to switch from automatic operation to manual operation, and this system was confirmed to operate with a driving simulator.

Key words : brain function information, EEG, fMRI, fNIRS

キーワード : 脳機能情報、生体情報、EEG、fMRI、fNIRS

生体情報を用いた自動運転システムの構築

廣安 知之 ・日和 悟 (同志社大学・生命医科学部)

1 はじめに

進化適応型自動車運転システム「ドライバ・イン・ザ・ループ」研究拠点形成支援事業では、人間との共存を前提とした進化適応型自動車運転システム「ドライバ・イン・ザ・ループ」(自動システム(ループ)内に人(ドライバ)を組み込む機構)を開発することを目的としている。そこでは、ヒトの運転特性と車両の走行環境を動的に把握し、運転支援のためのソフトウェアエージェントとして遺伝的アルゴリズムと機械学習を利用して運転システムをヒトの特性に適応させる数学的、情報学的な理論を構築し、実システムの実現を通しての評価が目的である。これにより、ドライバそれぞれの特性、嗜好と、リアルタイムの運転状況を考慮した安全運転の実現が可能で、その結果、高齢者のみならず女性や若年層を含む一般ドライバの交通事故削減が期待される。また、自動車の運転により高齢者が安心して運転できることで外出や遠出が活発となり、公共交通が普及していない地

方都市において社会の活性化が可能となる。加えて、若年層の運転者数減少にともなう自動車販売台数減少が問題となっているが、高齢者の自動車保持数増加により、産業にも好影響を与えることができる。

この目的を達成するための、研究構成図を Fig. 1 に示す。本目的を達成するためには、ドライバもしくは、車の乗員の生体情報を利用し、彼らの状態を把握し、システムに反映する必要がある。我々の研究グループの目的は、これを達成することであり、Fig. 1 においては、最上位に位置し、取得した生体情報を、通信・データベース基盤を通じて、コアエージェントに連絡する。そこで取り扱う生体情報の取得方法、解析方法、コアエージェントにどのように伝達するかが研究のサブ目標となる。

ヒト生体情報は「化学」「脳科学」「認知科学」といった様々な情報から成っており、本研究ではこれをヒト生体情報の多次元情報と呼んでいる。これまでヒトの行動を理解する上でこれらの情報は個別に検討されてきた。

* Faculty of Life and Medical Sciences, Center for Innovative Computing, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-6932, E-mail : tomo@is.doshisha.ac.jp

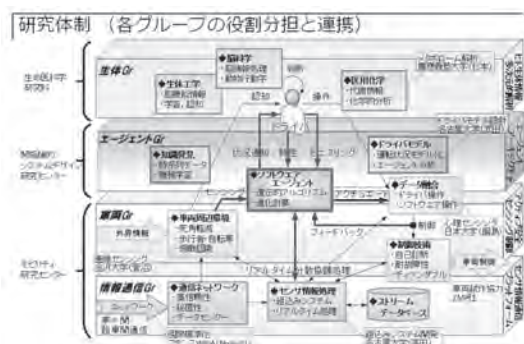


Fig. 1. 研究構成図.

それに対して、ヒトの行動を統合的に理解するためには、ヒト生体情報を「化学」「脳科学」「認知科学」などの側面から多角的に測定し、得られたデータを統合し解析するという新しい生体情報解析技術が必要である。本研究では、ヒト生体情報を多次元解析する技術を構築し、その技術を利用して得られる統合的な生体情報を利用して、高齢者の運転行動モデルを構築する。生体情報における多次元情報の中でも、本研究グループでは、

- 脈動情報
- 脳機能情報
- 唾液や汗といったメタボローム情報
- 視線情報

に絞って取得、利用を検討する。特に、脳機能情報については、同志社大学・生命医科学部に設置されている

- functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) 装置
- functional Near-InfraRed Spectroscopy (fNIRS) 装置
- ElectroncephaloGram (EEG) 装置

の利用を検討する。これらの生体の多次元情報は

- BMI (Brain Machine Interface) による運転補助
- 生体情報取得による運転者の注意力の把握と注意継続補助
- 生体情報取得による運転時の満足度の向上

への利用を想定しており、プロジェクト全体の後半で実施・検討する予定である。

本年度の大きな成果は、生体情報（脈拍）のデータをドライバインザループの制御システムに取り入れるシステムを構築し、検討したことである。構築したシステムは、脈拍計測から運転者状態を判別し、UDP 通信によりドライバインザループの制御システムに情報をフィードバックするシステムである。構築されたシステムは、ドライビングシミュレータを用いてシステム評価を行った。また、今後発展していくレベル3の自動運転車における課題とされる自動運転と手動運転の切り替え時の評価についても検討した。レベル3では自動運転に問題が生じたときに運転者に運転を切り替える必要がある。その時運転者が極度のリラックス状態、緊張状態にあると切り替え時に運転に支障をもたらす事故に繋がる可能性がある。本研究では運転者が自動運転に恐怖やストレスを感じたときに手動運転へと切り替える基準を評価した。緊張判定は、脈拍を事前に計測し、運転加速時に緊張しているかを低周波成分/高周波成分の緊張指標を用いて確認した。その結果、運転時に問題が生じたときに、一定速度運転時よりも大きい緊張指標を示した。この状態を察知したときに、自動運転から手動運転に切り替えるシステムが構築でき、ドライビングシミュレータで動作を確認した。

2 ドライビングシミュレータと自動運転

本研究ではFORUM8社製のUC-win/Roadドライビングシミュレータを用いて行った。またFig. 2にドライビングシミュレータのシステム構成を示す。Fig. 2 (1)ドライビングシミュレータのMasterPCと各モニターに対応したClientPCが設置されている。Fig. 2 (2)42インチの平面モニターが正面、左右前方、左右の5か所、小型モニターが両サイドミラー、ルームミラーの3か所に計8面のモニターが設置され、運転席視点の映像が映し出される。運転席はステアリング、アクセル、ブレーキ、ハンドブレーキ、ギア、ウinker操作が可能になっており、実際のAT車と同様に運転操作が可能である。

またデジタル地図上に車両、自転車、歩行者などの移動する物体や道路の陥没や事故車両などの障害物を配置し、目的とする実験内容に沿った任意の場面を作成することが可能である。さらに、ドライビングシミュレータのMasterPCと制御データを送信するパソコンをイー

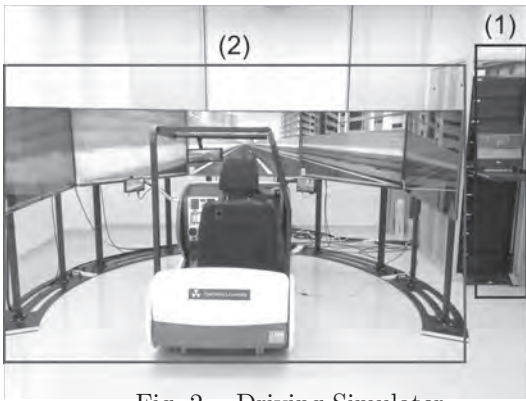


Fig. 2. Driving Simulator.

サernetで接続しUDP通信を用いることで、車両の状態を受信したり、車両の動作を制御することが可能である。制御機能を用いて自動運転車と同様に周囲の状況に応じて自動運転を可能とするAPIが存在する。本実験ではこのAPIを用いて自動運転と手動運転を任意のタイミングで切り替えることが可能なGUIを作成し実験を行った。

3 自動運転と手動運転の選択方法

本研究では自動運転と手動運転を選択する基準に生体情報を用いる。生体情報を取得する際、運転の妨げになることなく計測可能であるかを考慮する必要がある。また体動により計測精度が大きく変化してしまうと正確なデータが得られない。そこで今回用いる生体情報は、比較的拘束感が少なく、体動による影響が出にくい脈拍計測を用いた。

今回、実験に用いた脈拍計測機は東京デバイズのパルスラボである。この指尖脈波センサは血中のヘモグロビンの吸光特性を活用し赤外線を指先に照射し、その光量変化を用いて脈拍を推定する。脈拍データは拍動の過去6回分における時間間隔を移動平均することで算出され、脈波を一拍打つごとに取得できる。さらに取得したデータの時間間隔からR-R間隔を算出できる。

評価実験では心的負荷を与えないコースと心的負荷を与えるコースをそれぞれ自動運転で走行し、その時の脈拍を計測する。そしてストレス指標として用いられるLF/HFをR-R間隔の時系列データよりパワースペクトル密度を算出する。その低周波成分(0.05-0.15[Hz])と高周波成分(0.15-0.40[Hz])の比率より求め、そのスト

レス指標の確認と脈拍の上昇傾向を解析することで自動運転と手動運転を切り替える基準を評価した。

4 評価実験

実験では障害物を何も設置しないLow Stressコースと70[s], 100[s], 130[s]時に衝突すると衝突音が鳴る障害物を設置したHigh Stressコースの2コース(どちらのコースもベースは約80[km/h]で走行し約3分で完走する高速道路を模擬したコース)を用いて実験を行った。

被験者は運転免許を取得している22歳の男性3名を対象とし、実験を行った。はじめにドライビングシミュレータでの自動運転と走行内容に慣れてもらうためにLow Stressコースの自動走行を行った。そして被験者の利き手人差し指に指尖脈波センサを装着して、Low Stressコース、High Stressコースの順番に走行を行い、それぞれの脈拍数を計測した。

4.1 評価結果

全被験者のLF/HFをFig. 3に示す。

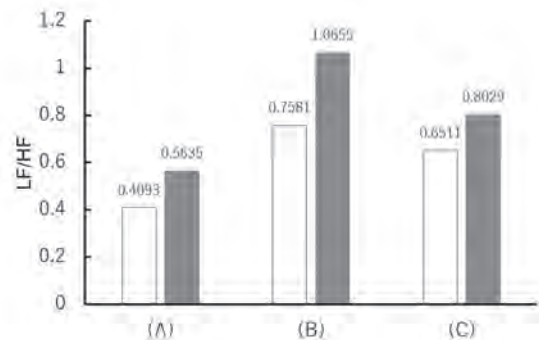


Fig. 3. LF/HF.

また全被験者とも障害物通過後のほうがLF/HFが1.5以上上昇しており、ストレス指標が大幅に上昇したと確認された。

最も大きな脈拍上昇が確認された被験者BのLow StressコースとHigh Stressコースでの脈拍変化をFig. 4に示す。Low Stressコースでは大きな変化をすることなく、時間経過とともに脈拍が低下した。High StressコースではFig. 4(1), Fig. 4(2)での障害物通過時の5-10秒後に急激な増加が確認された。Fig. 4(3)では増加は見られたが他と比べると急激な上昇は見られなかった。この増加傾向を解析することで急な緊張時を判定し手動運転へと切り替える基準を決定した。

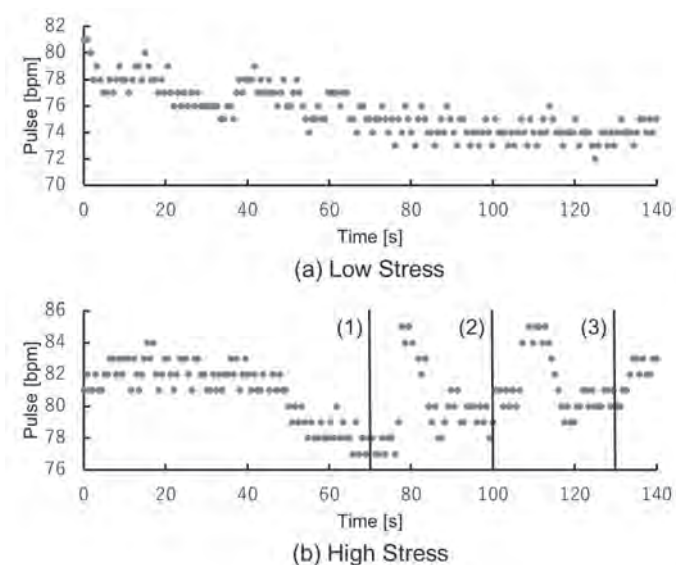


Fig. 4. Pulse change.

5 まとめ

自動運転車のレベル3に対する課題である自動運転と手動運転との切り替え時を評価するため、本論文ではその足掛かりとして、自動運転に対してストレスを感じると手動運転へと切り替える方法を決定することを目的とした。

ドライビングシミュレータの自動運転システムを用いてストレスを与えるコースと走行するのみのコースを用いて実験を行った。

結果において High Stress コースにおいて3人の被験者に共通して3つ目の障害物で急激な増加がみられなかったのは2つ目までの障害物で被験者が慣れてしまったためと思われる。しかしいずれの障害物の時も脈拍数の上昇がみられる。これは、身体に影響を与えるほどのストレスを感じたと考えられる。そこで一つ目の障害物通過時の脈拍数増加を考慮して選択基準を決定した。

謝辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」(平成26年～平成30年, 事業番号S1411030)の支援のもとに行われた。ここに記して謝意を表す。

脳機能ネットワークに対する相関分析法について

Correlation Analysis for Brain Functional Connectivity

谷岡健資 *1 日和悟 *2 廣安知之 *2 宿久洋 *3
Kensuke TANIOKA Satoshi HIWA Tomoyuki HIROYASU Hiroshi YADOHISA

*1 和歌山県立医科大学臨床研究センター *2 同志社大学生命医科学部医情報学科
Clinical Study Support Center, Wakayama Medical University Department of Biomedical Information, Doshisha University
*3 同志社大学文化情報学部文化情報学科
Department of Culture and Information Science, Doshisha University

Given fMRI data, it is important to reveal functional connectivity between distant Region of Interest (ROI) in brain, and there are various previous studies for estimating such the connectivity via correlations or partial correlations. However, given class of subjects and correlations between ROI for these several subjects, methods such that common correlations and particular correlation for each class are estimated are not still established. Therefore, in this paper, we proposed new method and algorithm based on majorizing function to achieve the purpose. In addition to that, we apply the method to functional connectivity data for mental calculation and show the result.

1. はじめに

近年、fMRI(functional Magnetic Resonance Imaging) のような非侵襲の脳機能イメージング装置が発達し、ヒトの脳機能を解析するための様々な研究が行われている ([Filippi 09], [Friston et al., 07]) . さらに、fMRI データから物理的に離れた関心領域 (Region of Interest ; ROI) 間の機能的結合を明らかにすることは脳活動を明らかにする上で重要となる ([Varoquaux et al., 13]) . また、そのような目的を達成する方法として機能的結合を推定するための様々な研究が実施されている ([Varoquaux et al., 12], [Smith et al. 11]) . しかし、実験等によって観測された各被験者の機能的結合および被験者の群が与えられた際に群間で機能的結合を比較することが重要となるが、そのような目的を達成するための方法はまだ確立されていない。

そこで本稿では、複数の被験者に関する脳機能ネットワークと被験者に関する二つのクラスが与えられた際、[Pietersz et al., 04] および [Simon et al., 10] に基づく被験者共通の脳機能ネットワークと各クラス特有の脳機能ネットワークを推定する方法を提案する。また、本提案手法を暗算課題に関するデータへ適用し、暗算能力が相対的に高い群と低い群それぞれ特有の相関行列を推定した結果についても提示する。

2. 相関行列の低階数近似モデル

2.1 目的関数

ここでは、被験者 n 名に対する脳領域間の機能的結合行列から n 名共通の相関行列、各クラス特有の相関行列を推定するための目的関数を以下のように定義する。

$$L(\Phi, \{\Psi_\ell\}_{\ell=1}^2 | \{\mathbf{R}_i\}_{i=1}^n) = \sum_{i=1}^n \left\| \mathbf{R}_i - (w_1 \Phi + w_2 \sum_{\ell=1}^2 u_{i\ell} \Psi_\ell) \right\|^2 \quad (1)$$

連絡先: 谷岡健資, 和歌山県立医科大学, 和歌山県和歌山市紀三井寺 811 番地, 073-441-0867, 073-441-0868, ktaniok@wakayama-med.ac.jp

subject to

$$r_{jji} = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, p; i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$\phi_{jj} = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

$$\psi_{j\ell} = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, p; \ell = 1, 2) \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{R}_i = (r_{j_1 j_2 i})$ $r_{j_1 j_2 i} \in [-1, 1]$ ($i = 1, 2, \dots, n$; $j_1, j_2 = 1, 2, \dots, p$) は被験者 i の脳の領域 j_1, j_2 間の対称な機能的結合とし、 $\Phi = (\phi_{j_1 j_2})$ $\phi_{j_1 j_2} \in [-1, 1]$ ($j_1, j_2 = 1, 2, \dots, p$) を被験者の共通部分に対応する機能的結合、 $\Psi_1 = (\psi_{j_1 j_2 1})$ $\psi_{j_1 j_2 1} \in [-1, 1]$ ($j_1, j_2 = 1, 2, \dots, p$) をクラス 1 特有の機能的結合 $\Psi_2 = (\psi_{j_1 j_2 2})$ $\psi_{j_1 j_2 2} \in [-1, 1]$ ($j_1, j_2 = 1, 2, \dots, p$) をクラス 2 特有の機能的結合とする。 Φ, Ψ_ℓ ($\ell = 1, 2$) はそれぞれ予め階数 r ($\leq p$) を定める必要があることに注意されたい。また、 w_1 と w_2 はそれぞれ共通部分とクラス固有の重みとする。ただし、 $w_1 + w_2 = 1$ ($w_1, w_2 > 0$) とし、 $\|\cdot\|$ はフロベニウスノルムとする。

本目的関数の目的は、被験者 n 名の機能的結合行列が与えられた際に、(1) 式を最小化する Φ, Ψ_ℓ ($\ell = 1, 2$) を求めることである。

2.2 アルゴリズム

推定方法としては、交互最小二乗法を用いて、各パラメータを推定する。アルゴリズムの step は以下の通りである。なお、停止条件は目的関数の値の更新幅があらかじめ定めた $\varepsilon > 0$ より小さくなったときとする。

Step 1 制約条件を満たす初期値として、 Ψ_ℓ ($\ell = 1, 2$) を発生させる。

Step 2 Φ を更新する。

Step 3 Ψ_ℓ ($\ell = 1, 2$) を更新する。

Step 4 停止条件を満たすまで Step2 と Step3 を繰り返す。

Step 2, Step 3 の更新ではそれぞれ Majorizing 関数を導出して、各パラメータを更新する。 Φ, Ψ_ℓ ($\ell = 1, 2$) は対称性かつ制約条件 (2) 式, (3) 式, (4) 式を満たすように推定を行う。

2.3 Majorizing 関数の導出および更新式

[Pietersz et al., 04] および [Simon et al., 10] と同様に不等式を用いて Majorizing 関数を導出する. まず, 任意の Φ, Ψ_ℓ ($\ell = 1, 2$) に対して以下を充たすような $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_p)^T = (x_{js}) x_{js} \in \mathbb{R}$ ($j = 1, 2, \dots, p; s = 1, 2, \dots, r$), $\mathbf{Q}_\ell = (\mathbf{q}_{1\ell}, \mathbf{q}_{2\ell}, \dots, \mathbf{q}_{p\ell})^T = (q_{j\ell o}) q_{j\ell o} \in \mathbb{R}$ ($j = 1, 2, \dots, p; o = 1, 2, \dots, r; \ell = 1, 2$) が存在する.

$$\Phi = \mathbf{X} \mathbf{X}^T \quad (5)$$

$$\Psi_\ell = \mathbf{Q}_\ell \mathbf{Q}_\ell^T \quad (\ell = 1, 2) \quad (6)$$

ただし, $\|\mathbf{x}_i\| = 1$ ($i = 1, 2, \dots, n$), $\|\mathbf{q}_{i\ell}\| = 1$ ($i = 1, 2, \dots, n; \ell = 1, 2$) とする. (5) 式および (6) 式に基づいて Majorizing 関数を導出する. まず, Φ に関する Majorizing 関数を導出する.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \left\| (\mathbf{R}_i - w_2 \sum_{\ell=1}^2 u_{i\ell} \Psi_\ell) - w_1 \Phi \right\|^2 \\ & \leq 2\eta - 4 \sum_{i=1}^n \sum_{j_1 < j_2} r_{ij_1 j_2}^* \\ & \quad + 2 \sum_{j_1=1}^p \left(2\lambda - 2\mathbf{x}_{j_1}^T (\lambda \mathbf{y}_{j_1} - \mathbf{B} \mathbf{y}_{j_1}) - \mathbf{y}_{j_1}^T \mathbf{B} \mathbf{y}_{j_1} \right) = G(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで, η は定数, $\mathbf{R}_i - w_2 \sum_{\ell=1}^2 u_{i\ell} \Psi_\ell = \mathbf{R}_i^* = (r_{j_1 j_2 i}^*)$ ($j_1, j_2 = 1, 2, \dots, p; i = 1, 2, \dots, n$), $\mathbf{B} = \sum_{i=1}^n \sum_{j_2 \neq j_1} w_1^2 \mathbf{x}_{j_2} \mathbf{x}_{j_2}^T$, λ を \mathbf{B} の最大固有値, \mathbf{y}_{j_1} は前ステップで推定した \mathbf{x}_{j_1} とする. また, $G(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ を Majorizing 関数とし, $\mathbf{X} = \mathbf{Y}$ のとき, Majorizing 関数の値は (1) 式と同じ値となる. (7) 式に基づき, \mathbf{x}_{j_1} ($j_1 = 1, 2, \dots, p$) の更新式は以下のように導出することができる.

$$\mathbf{x}_{j_1} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j_2 \neq j_1} r_{j_1 j_2 i}^* w_1 \mathbf{x}_{j_2} + \lambda \mathbf{y}_{j_2} + \mathbf{B} \mathbf{y}_{j_2}}{\left\| \sum_{i=1}^n \sum_{j_2 \neq j_1} r_{j_1 j_2 i}^* w_1 \mathbf{x}_{j_2} + \lambda \mathbf{y}_{j_2} + \mathbf{B} \mathbf{y}_{j_2} \right\|} \quad (8)$$

(7) 式と同様にして, Ψ_ℓ ($\ell = 1, 2$) に対しても Majorizing 関数を導出することができ, 更新式は (9) 式ようになる.

$$\mathbf{q}_{j_1 \ell} = \frac{\sum_{i \in C_\ell} \sum_{j_2 \neq j_1} r_{j_1 j_2 i}^\dagger w_2 \mathbf{q}_{j_2} + \delta \mathbf{s}_{j_2} + \mathbf{C} \mathbf{s}_{j_2}}{\left\| \sum_{i \in C_\ell} \sum_{j_2 \neq j_1} r_{j_1 j_2 i}^\dagger w_2 \mathbf{q}_{j_2} + \delta \mathbf{s}_{j_2} + \mathbf{C} \mathbf{s}_{j_2} \right\|} \quad (9)$$

ここで, C_1 は, クラス 1 の被験者の集合, C_2 のとき, クラス 2 の被験者の集合とする. また, $\mathbf{R}_i - w_1 \Phi = \mathbf{R}_i^\dagger = (r_{j_1 j_2 i}^\dagger)$ ($j_1, j_2 = 1, 2, \dots, p; i \in C_\ell; \ell = 1, 2$), $\mathbf{C} = w_2 \sum_{i \in C_\ell} \sum_{j_2 \neq j_1} \mathbf{q}_{j_2} \mathbf{q}_{j_2}^T$, δ を \mathbf{C} の最大固有値, \mathbf{s}_{j_2} は前ステップで推定した \mathbf{q}_{j_2} とする.

すなわち, アルゴリズムにおいて, Φ の更新は (8) 式により更新し, Ψ_ℓ ($\ell = 1, 2$) の更新は (9) 式により更新を行う.

3. 暗算課題時の機能結合性解析への適用

3.1 ワーキングメモリと暗算課題

認知機能の中でも, 会話や読書など, 日常的な場面において重要となるものの一つにワーキングメモリがある. ワーキングメモリは情報の処理をしつつ一時的に必要な情報を保持するシステムである [Baddeley and Hitch, 74][Baddeley, 00]. このような認知機能を解明するため, fMRI によりワーキングメ

モリの神経基盤についての研究が行われており, 前頭葉や頭頂葉, 前部帯状回がワーキングメモリに関与することが報告されている [荻阪, 10]. 本研究では, ワーキングメモリを検査する課題として暗算課題を用い, 暗算遂行中の脳活動を fMRI により計測したデータに対して, 提案手法を適用することでその有効性を検討する.

3.2 被験者と実験環境

被験者は, 健常成人 32 名 (年齢: 22.0 ± 1.2 , 男性: 20 名, 女性: 12 名, 右利き: 31 名, 左利き: 1 名) を対象とした. 被験者には, 本実験の方法, 危険性などを事前に説明し, 書面による同意を得た. MRI データの撮像には 1.5T Echelon Vega (日立製作所) を用いた. また fMRI 撮像時の画像提示ソフトとして, Presentation (Neurobehavioral System Inc.) を用い, 被験者からボタン押下による回答を取得するためのインタフェースとして fORP 932 Subject Response Package (Cambridge Research Systems) を使用した. 脳機能画像は Gradient-Echo Echo-Planer Imaging (GE-EPI) シーケンスで撮像した (TR = 3000 [ms], TE = 40 [ms], FA = 90 [°], FOV = 240 × 240 [mm], matrix = 64 × 64, thickness = 5.0 [mm], スライス枚数 = 20). T1 構造画像は Rf-Spoiled Steady state Gradient echo (RSSG) シーケンスで撮像した (TR = 9.4 [mm], TE = 4.0 [mm], FA = 8 [°], FOV = 256 × 256 [mm], matrix = 256 × 256, Thickness = 1.0 [mm], スライス枚数 = 194).

3.3 実験設計

暗算課題を用いて, fMRI 撮像を行った. 実験設計を 1 に示す. 本実験は, レストとタスクが交互に提示されるブロックデザインの実験設計で行った. タスクでは, 簡単な数式が提示されるタスク (Low-WM タスク) 3 つと難しい数式が提示されるタスク (High-WM タスク) 3 つがランダムに提示される. レストははじめが 30 s, その他が 36 s, タスクは 30 [s] となっている. レストでは注視点, 簡単な数式のタスクでは整数 1 桁の加算, 難しい数式のタスクではワーキングメモリを使用する小数点を含む 3 桁の四則演算が提示される. 被験者は, レスト中は固視点注視をし, タスク中は数式の正誤を判断し, その正誤に対応するボタンを押す. ボタンを押すと数式が切り替わるように設定されている.

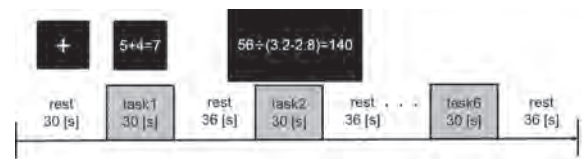


図 1: Task design of mental calculation

3.4 データの前処理

磁場不均一の影響を除外するため, fMRI データのはじめの 6 枚を除き, 計 136 枚の画像を解析に用いた. 前処理には SPM8 (Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK) [Friston et al., 07] を用いた. 全ての画像は計測中の頭部の動きを補正し, 個人脳の機能画像と構造画像間での位置合わせを行い, 個々の脳画像を Montreal Neurological Institute (MNI) 標準脳に合うように調整した後に, ガウシアンフィルタ (full width at half maximum: 8 mm) を用いて平滑化を行った.

3.5 機能的結合性解析：相関行列の抽出

脳領域間の協調関係を検討する場合、複数の領域間で脳活動（BOLD 信号）の時系列相関を求め、その相関の高いものを該当脳領域間が「機能的に」結合しているとみなして解析する機能的結合性解析が有効である。本稿では、暗算課題中の機能的結合を解析するため、機能的結合性解析ツールとして conn[Susan and Nieto-Castanon 12] を用いた。SPM8 での前処理に追加して band pass filter (0.008 Hz – 0.09 Hz) をかけた後に、個々のボクセルの BOLD 信号から頭部の動きによるアーチファクト、白質と脳脊髄液の BOLD 信号を回帰子として除いた。タスク中の相関値を算出するため、各タスク期間中の BOLD 信号を抽出し、それぞれのタスク期間中の BOLD 信号を結合した。さらに AAL を用いて全脳を 116 の領域に分割し、領域ごとの BOLD 信号の平均を算出した。最後に領域間の BOLD 信号の Pearson 相関を算出し、フィッシャーの z 変換により母相関係数を推定した。全脳領域間の相関係数は 116×116 の対称行列として得られた。

3.6 結果・考察

ここでは、提案手法を適用した結果について考察を行う。暗算成績が高い被験者群の方が成績が低い被験者群より相関が高かった領域間結合に着目すると、左右の上・中後頭回と左右の中心傍小葉の機能的結合が特に両群で差が大きい結合として抽出されている。上・中後頭回は視覚連合野であり、中心傍小葉は体性感覚野に該当することから、暗算成績の高い群は提示された問題を視覚情報として処理し、ボタンプレスにより回答するためにこれらの領域間の結合性を高めたことが示唆される。また、楔部や上前頭回背側部、上頭頂小葉、楔前部、中前頭回眼窩部は、ワーキングメモリに関わる脳領域として先行研究でも報告されている [芋阪, 08, Marvel et al., 10]。また、左後部帯状回と左下側頭回の結合については、後部帯状回が空間的な記憶に関わる領域であること、また下側頭回が物体認知や色・形の認識に関係していることから、提示された数字や四則演算の記号を認知し、記憶の引き出しを行っていることが推察される。

一方、低成績群の方が結合度が高い領域間結合の上位は、後部帯状回と側頭極上側頭回部の結合であった。側頭極上側頭回部は意味記憶や社会的・情動的機能に関わる領域であることから、暗算課題において問題の記憶に寄与する領域の結合が強化されていることがわかる。特に、高成績群で見られた視覚野と体性感覚野の結合が見られず、逆に側頭極や扁桃体のような情動に関わる領域が抽出されている。推察ではあるが、課題に取り組むことに不快感を覚え、成績の低下につながった可能性も考えられる。一方で高成績群は、画像で提示される暗算課題を視覚情報として一時的に記憶しながら計算し、回答することで高成績をおさめたと推察される。

以上から、提案手法はワーキングメモリに関わる脳領域を抽出することができることがわかった。さらに、結果より各群の特徴を抽出できることが示された。

4. おわりに

本報告では、複数の脳機能ネットワークデータおよび被験者に関する二つのクラスが与えられた際に被験者共通および各クラス特有の脳機能ネットワークを推定する方法を提案した。また、本提案手法を実際の fMRI データに適用し、ワーキングメモリに関わる脳領域を抽出することができることを示した。

課題としては、被験者共通のネットワークと各クラス固有の脳機能ネットワークを直交するように推定する必要があること

や、スパース推定ができるよう手法を改良する必要があることが挙げられる。

参考文献

- [Baddeley and Hitch, 74] Baddeley, A.D. and Hitch, G. :The psychology of learning and motivation, Working memory, 8, 47–89 (1974).
- [Baddeley, 00] Baddeley, A.D.:The episodic buffer: a new component of working memory?, Trends in Cognitive Sciences, 4, 417–423 (2000).
- [Filippi 09] Filippi, M. : fMRI Techniques and Protocols, Springer Protocols, NewYork: Humana Press (2009).
- [Friston et al., 07] Friston, K.J., Worsely, K. J., Frackowiak, R.S.J., Mazziotta, J.C., and Evans, A. C. :Statistical Parametric Mapping: The Anof Functional Brain Images, London: Academic Press (2007).
- [Marvel et al., 10] Marvel, C.L., Cherie, L., and Desmond, J.E. :Functional topography of the cerebellum in verbal working memory, Neuropsychology review, 20 (3), 271–279, (2010).
- [Pietersz et al., 04] Pietersz, R. and Groenen, J.F: Rank Reduction of Correlation Matrices by Majorization, Quant. Finance, 4 , 649–662 (2004).
- [Varoquaux et al., 12] Varoquaux, G., Gramfort, A., Poline, J.B. and Thirion B. : Brain Covariance Selection: Better Individual Functional Connectivity Models Using Population prior, NIPS, (2016).
- [Varoquaux et al., 13] Varoquaux, G. and Craddock R.C. : Learning and comparing functional connectomes across subjects, NeuroImage, 80(15), 405–415 (2013).
- [Smith et al. 11] Smith, S., Miller, K., Salimi-Khorshidi, G., Webster, M., Beckmann, C., Nichols, T., Ramsey, J., and Woolrich, M.: Network modelling methods for fMRI, Neuroimage, 54, 875–891 (2011).
- [Simon et al., 10] Simon, D. and Abell, J.: A Majorization Algorithm for Constrained Correlation Matrix Approximation, Linear Algebra and its Applications, 432, 1152–1164 (2010).
- [Susan and Nieto-Castanon 12] Susan, W. and Nieto-Castanon, A. : Conn: a functional connectivity toolbox for correlated and anticorrelated brain networks, Brain connectivity, 2(3), 125–141 (2012).
- [芋阪, 10] 芋阪 直行 :脳イメージング ワーキングメモリと視覚的注意からみた脳, 培風館, (2010).
- [芋阪, 08] 芋阪 直行 :ワーキングメモリの脳内表現, 京都大学学術出版会, (2008).

呼気の GC-MS 分析：実験系の確立と呼気成分

大江洋平・桂田誠也・太田哲男

1. はじめに

運転中のストレスは危険運転さらには事故を誘発することになるため、運転中のドライバーのストレス計測や異常に関する警鐘のフィードバックが事故防止につながることを期待される。しかしながら、既知のストレス測定法では、唾液サンプルの採取が車の運転中などにおいて困難な場合も多いため、現実的ではない。そこで、本研究では、呼吸をしている以上、常に体外に排出され、非侵襲性の高い呼気からの生体情報検出を試みる。

本研究の全体像としては、呼気やその揮発成分が呼気に含まれる唾液などの非侵襲的に得られる試料に含まれる物質を分析し、そこで得られた新たなストレスマーカやその特徴量を反映した簡便な測定法の開発へと展開し、最終的には、運転中ストレスのリアルタイム測定を実現し、安全運転システムの構築の一助になることを目的としている。

本成果報告では、研究の第一段階である呼気分析のシステムの構築と分析実験系の確立、およびそれに続く呼気中に含まれる物質群の同定に関する検討結果を報告する。

2. 装置および実験方法

2.1 装置およびサンプル

2.1.1 GC-MS

ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS, 島津製作所製 GC-2010/PARVUM 2 システム) に、サーマルディソープションシステム (島津製作所製 TD-20) を連結し、呼気等の分析に用いた (Fig.1)。

2.1.2 その他の器具, 装置

呼気の採取するサンプリングバッグとして、ジエールサイエンス社製のテドラーバッグを使用した。呼気を捕集する捕集管に充填する吸着剤は Tenax TA および carboxen 1000 を使用した。呼気をサンプリングバッグから捕集管へと移行には、柴田科学株式

会社製のミニポンプ MP-Σ 500N II 型を使用した。

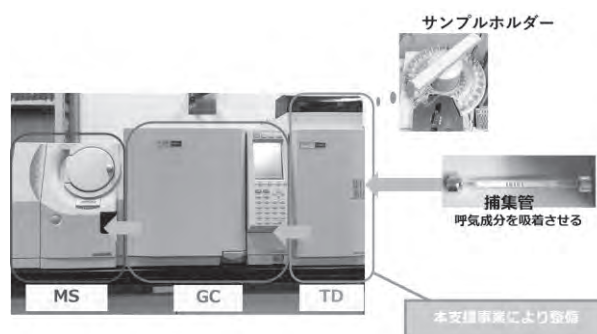


Fig.1 GC-MS システム

2.2 実験方法

2.2.1 呼気サンプル採取および処理

1 L の呼気をサンプリングバッグ (バッグ A) に入れた。シリコンチューブを介して、捕集管、ポンプの吸引側に接続した。ポンプの排出側にはシリコンチューブを介して空のサンプリングバッグ (バッグ B) を接続した。ポンプを作動させ、呼気サンプルを吸着させた。バッグ A が空になった後、バッグ A と B を入れ替え、再度吸着させた。この動作を 5 回繰り返した。

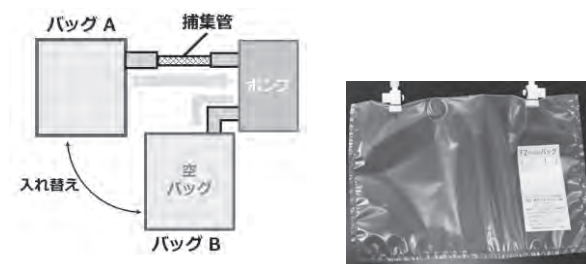


Fig.2 (左) サンプリングバッグー捕集管の接続方法, (右) サンプリングバッグ。

2.2.2 呼気サンプルの分析

2.2.1 で得た捕集管に、流量を調節した乾燥ヘリウムガスを通じて水分を除去した後、TD-20 にセットし、加熱脱離方式で GC-MS へと導入した。

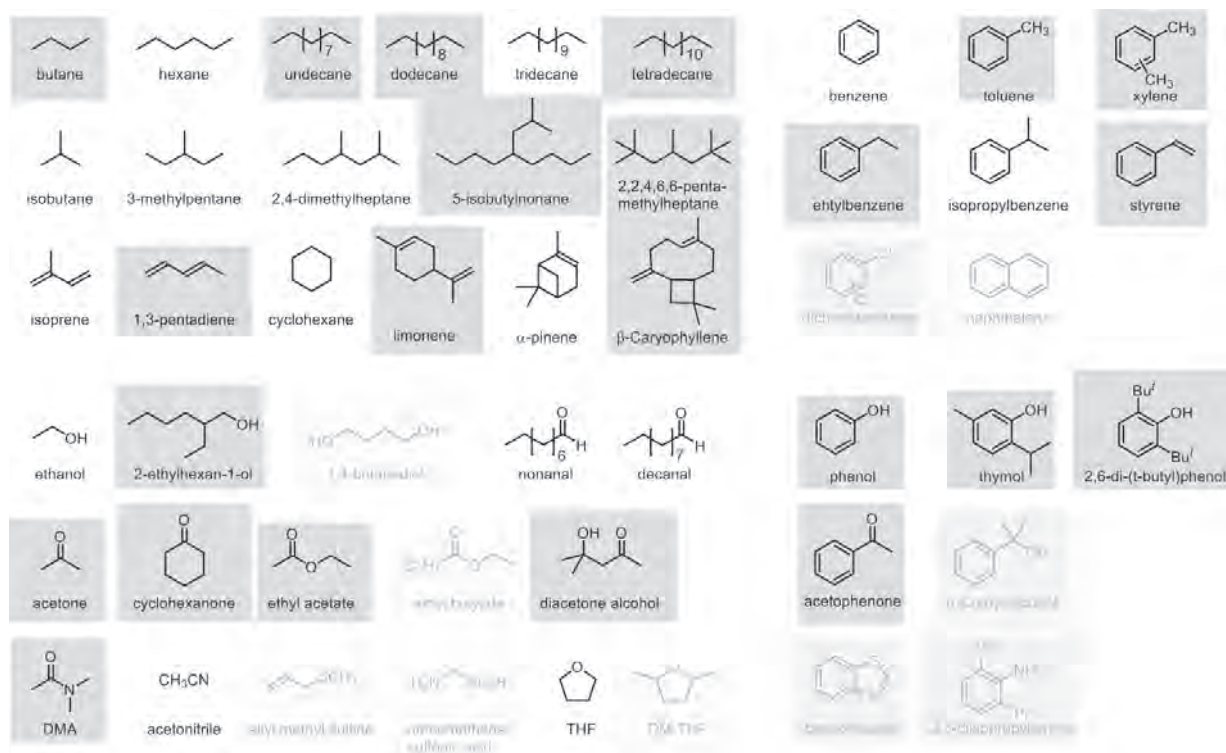


Fig.3 現段階で同定できている呼気中の有機物質群.

3. 実験結果

3.1 呼気サンプルの採取及び処理

呼気中の揮発性有機物質を分析する上で、呼気中の成分を精度よく分析するために、以下に示す 1)-3) の三点が、特に検出能と再現性に影響することがわかった。

- 1) 捕集管に充填する吸着物質としては、Tenax-TA と carboxen を混合したものがよい。
- 2) 実験方法に記載したように、呼気成分の捕集管への吸着の際、呼気を繰り返し捕集管へと通じる手法がよい。
- 3) GC-MS 分析において、水分は分解能の低下等を招くことがある。そのため、GC への導入の前に乾燥 He をパージすることがよい。

3.2 呼気サンプルの分析

上述の方法により、5名の被験者から呼気を採取し、GC-MS 分析を行った。得られた質量分析データを精査したところ、Fig.3 に示したように、およそ 50 種類の有機物を同定することができた。現在、同定を進めている物質もある。Fig.3 に示した化合物の

中には、呼気分析の先行研究中で着目されているような isoprene, acetone, ethanol およびアルカン類なども含まれており、この実験系でも十分な呼気成分分析が可能であることがわかる。

また、先行研究で呼気成分として含まれる物質として報告されており、また、我々の検討において複数の被験者で検出された物質を抽出したところ、23 種類の化合物が浮かび上がった (Fig. 3 中、網掛けの物質)。本研究では、まず、この 23 種類の物質を着目すべき第一候補の化合物群として設定し、ストレス下での呼気分析を進めることにしている。

4. 参考文献

- 1) 井澤修平, 城月健太郎, 菅谷渚, 小川奈美子, 鈴木克彦, 野村忍, *日本補完代替医療学誌*, **2007**, *4*, 91-101.
- 2) BS McEwen, *Neuropsychopharmacology*, **2000**, *22*, 108-124.
- 3) 山口昌樹, *日本薬理学雑誌*, **2007**, *129(2)*, 80-84.

Auditory peripheral sensitivity change by attention for communication sound

Yuta Harada, Hiroyuki Miyawaki, Kohta I. Kobayasi*

Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*) communicate with other individuals by using frequency moderated sound beyond 20 kHz. Their auditory sensitivity for that frequency range, however, is relatively low. Therefore we assume that when gerbil listen significant sound, their auditory periphery might amplify a received signal. Amplitude of cochlear microphonic (CM), which is total sum of receptor potential of auditory periphery, was measured as an index of auditory peripheral sensitivity. Communication sound and the tone burst were presented to the gerbil. The CM response were measured while the subject was placed with or without an anesthetized cage mate for evaluating the effect of behavioral context on CM. We tried to minimize variation in stimulus amplitude caused by fluctuations in distance between ears and a sound source using a headphone system developed for this experiment. As a rest, it was confirmed that CM amplitude were enhanced when cage mate present. The result suggests that the cochlear amplification could increase auditory sensitivity when animal pays attention to the communication sound.

Key words : Miniature headphone, Cochlear microphonic, Attention, Communication sound

キーワード : ヘッドフォン, 蝸牛マイクロフォン電位, 注意, コミュニケーション音声

音声コミュニケーションによる聴覚末梢感度の変化： 注意と耳介の影響の検討

原田 勇太, 宮脇 弘之, 小林 耕太*

1. はじめに

スナネズミ (*Meriones unguiculatus*) は周波数変調音を用いてコミュニケーションを行うことが分かっている。この音声は周波数帯域によって分類されており、人間の可聴域と重なる帯域に属する音声もあれば、超音波領域に属する音声も存在する¹⁾。スナネズミは主に他個体とのコミュニケーションでは超音波領域に属する音声を使うが、先行研究ではスナネズミのオーディオグラムにおいて超音波領域の閾値は人間の可聴域の閾値より高いことが分かっている²⁾。しかし、コミュニケー

ションを行う際に閾値の高い領域の音声を何故用いるかは解明されていない。考えられる要因として、蝸牛の増幅機構が挙げられる。これは蝸牛の非線形性機構の一つであり、小さな音に対して能動的に行われる。そのため、スナネズミが集中して音を聴くと蝸牛の増幅機構が働くのではないかと考えた。本実験では、音に対して集中した際の蝸牛における増幅機構を検討することを目的とし、実験を行った。他個体とコミュニケーションを行う時に超音波領域の音声を集中して音を聴くと考えたため他個体に注意を向けている状態を音に対

*Faculty of Life and Medical Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone: 0774-65-6499, E-mail: kkobayas@mail.doshisha.ac.jp

して集中していると仮説を立てた。また、蝸牛の働きを検討するために蝸牛マイクロフォン電位 (Cochlear microphonics: CM) を指標として計測した。蝸牛マイクロフォン電位とは内耳の聴覚器官である蝸牛に到達した音や音声の周波数, 強さ, 時間の 3 つの情報を再現している電気的な信号である。

また, 実験を行う上でスナネズミを覚醒状態で用いる必要があり, 加えて耳と音源を常に一定の距離に保つことが出来る装置を作る必要があった。これらの必要性からスナネズミに装着するための専用のヘッドフォンを製作した。また, 耳介による増幅機構への影響も調べるために耳介を取り除いた個体で同様に実験を行った。

2. 実験方法

2.1.1 被験体

実験には生後 40~50 週間のスナネズミ匹用いた。CM を測定するために CM 測定用電極を正円窓周辺に留置する手術を行った。記録電極と基準電極は IC ソケットに固定し, 頭蓋に接着した。また, ヘッドフォン用の IC ソケットも固定した。その作業の後, 被験体が覚醒下でも CM が測定出来るようにするために, IC ソケットを露出させた。

2.1.2 手術方法

最初に完全麻酔下で CM 計測のためのテフロン皮膜銀線電極を蝸牛の正円窓付近の骨に留置した (Fig.1)。その後, CM 測定用の電極と基準電位用の電極を IC ソケットの足にそれぞれはんだ付けした。

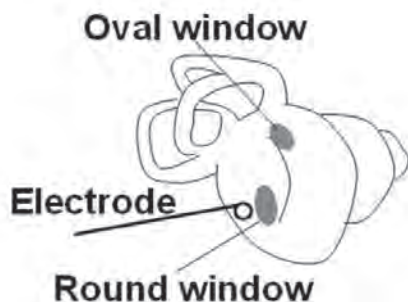


Fig.1 Measurement of cochlear microphonics. A silver electrode was implanted to a round window of cochlea.

自由行動下で CM 波形を計測するため, この IC ソケットとヘッドフォン固定用のソケットを頭蓋の上にデンタルセメントで固定した。

CM 波形が安定して計測可能であることを確認した後に皮膚縫合を行った。この際, 頭蓋上の皮膚はソケットの周りを覆うように縫合した。

2.2 ヘッドフォンの製作

2.2.1 製作方法

スナネズミに安定した音圧の音を提示するためにヘッドフォンを製作した。まず, $\Phi 1$ の真鍮線を 2.8 cm の長さに切り出し, その両端に 3 穴に切り出した IC ソケットをはんだで接着し, さらに接着剤で固めた。これをヘッドフォンのフレーム部分とした (Fig.2)。

スピーカー部分はスピーカー (CUI INC, CDM-10008) の正負それぞれの端子に IC ソケットをはんだで接着したものを用いた。

これらのスピーカー部分とフレーム部分の IC ソケットを組み合わせるとヘッドフォンを構成した。また, スピーカーからの電磁波ノイズを防ぐためにスピーカーを GND に落とした銅網で覆い防磁処理とした。

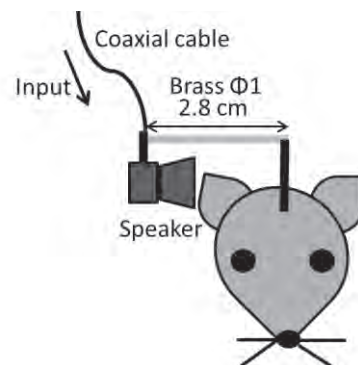


Fig.2 Schematic image of a headphone stimulation system. Distance between the headphones to the ear canal is c.a. 1cm.

2.2 音刺激と実験環境

音刺激としてスナネズミの連続した 3 つのコミュニケーション音声 (Greeting call) を記録したものを用いた。この音声は周波数 25 ~ 32 kHz の周波

数情報を持ち、継続時間は約 0.02 s、3 つの音のそれぞれの時間間隔は約 0.1 s であった。

また、トーンバーストも製作した。周波数は 1, 2, 4, 8, 16, 20, 25, 32, 40 kHz で継続時間 0.02 s、立ち上がり立ち下がり 0.002 s であった。このトーンバーストを時間間隔 0.1 s で 3 回繰り返して 1 単位の音とした。このトーンバーストはコミュニケーション音声を模したものであった。これらのトーンバーストとコミュニケーション音声の同じ音圧のものを時間間隔 0.1~1.0 s でランダムにつなぎ合わせたものを 1 セットの音刺激とした (Fig.4)。

実験は、防磁処理された防音箱の中で行われた。被験体は防音箱の中に入れ、ヘッドフォンを固定用の IC ソケットに固定した。さらに、頭の IC ソケットに電極を挿し CM を測定出来るようにし、そこから生体アンプで 1000 倍に増幅し、パソコンで記録した (Fig.3)。

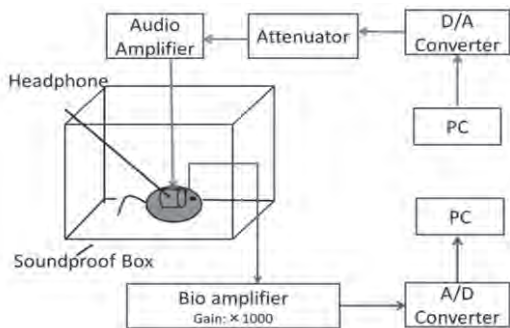


Fig.3 Experimental environment.

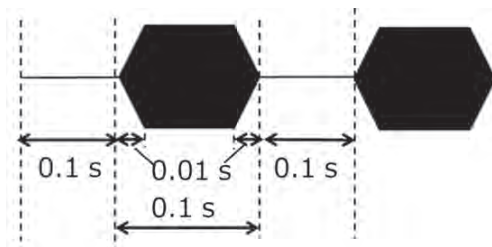


Fig.4 A set of tone burst in the experience. Duration : 0.1 s, Rise/Fall time:0.002 s, Frequency:1,2,4,8,16,20,25,32,40 kHz, 40,50,60,70 dB SPL, time interval: 0.1~1.0 s.

2.3 測定方法

防音箱の中の箱にスナネズミを入れ音圧 40~70 dB SPL でランダムに設定したそれぞれの音圧の

音刺激を 10 セット提示した。この時の生体電位を記録した。これを Single 状況とする (Fig.5 (a))。

次に麻酔で眠らせた、被験体とは別のスナネズミを用意した先程の Single 状況にこの別のスナネズミを投入し、同じように音圧 40~70 dB SPL をランダムに設定したそれぞれの音圧の音刺激を 10 セット提示し生体電位を記録した。これを Paired 状況とする (Fig5 (b))。

また、耳介を取り除いたスナネズミを 4 匹用いて同様に実験を行った。

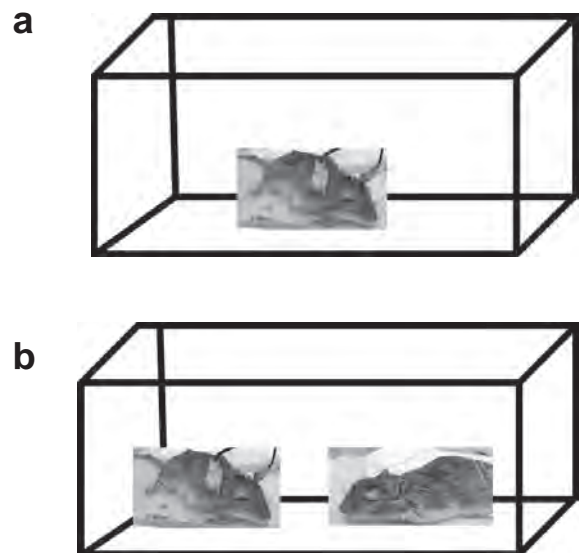


Fig.5 Experimental situations. (a) is Single situation. A gerbil was alone in the experimental environment. (b) is Paired situation. A gerbil with another sleeping gerbil in the experimental environment.

3. 実験結果

3.1 コミュニケーション時での CM の上昇

被験体に刺激音を提示したところ全体的に Single 状況よりも Paired 状況の方が CM の大きさが大きくなる傾向にあった (Fig.6)。製作したヘッドフォン (Fig.3) の誤差率は全体で約 ±4 dB であった。

また、周波数に注目すると高周波領域では 16 kHz 以上の高周波数領域で誤差率よりも CM が上昇する傾向が見られ、音圧に注目すると 60 dB SPL の音刺激で誤差率よりも CM が上昇する傾向が見られた (Fig.7)。

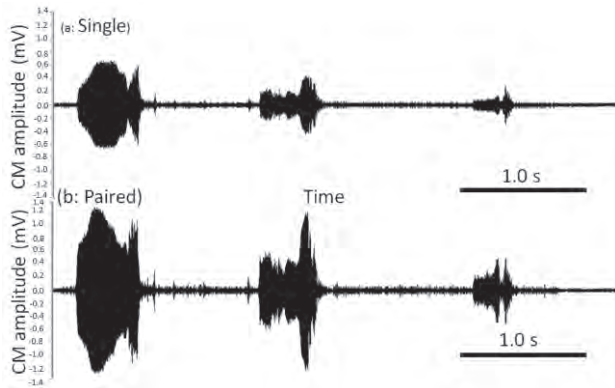


Fig.6. CM waveform of Greeting call. (a) In single situation. (b) In paired situation

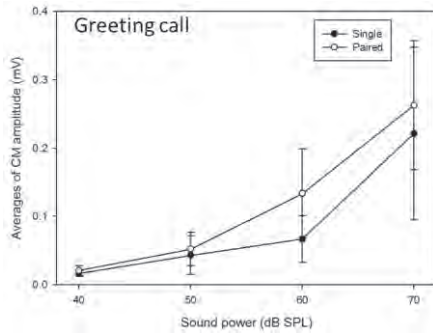


Fig.7 Averages of CM amplitude of Greeting call in the experiment.

3.2 CMの上昇の耳介による影響

耳介を取り除いた個体で同様に実験を行ったところ耳介を取り除いた個体でも全体的に Single 状況よりも Paired 状況の方が CM の大きさが大きくなる傾向にあった。

しかし、耳介を取り除いていない個体と比較すると周波数に注目しても (Fig.8) 音圧に注目しても (Fig.9) 耳介がある個体の方が、耳介がない個体よりも CM の上昇率が大きくなる傾向にあった。

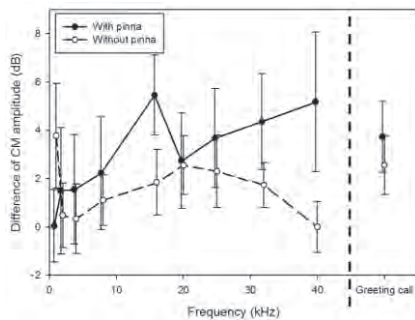


Fig.8. Effect of pinna on the CM amplitude. Comparison of the CM average responding to 40, 50, 60 and 70 dB SPL tone burst.

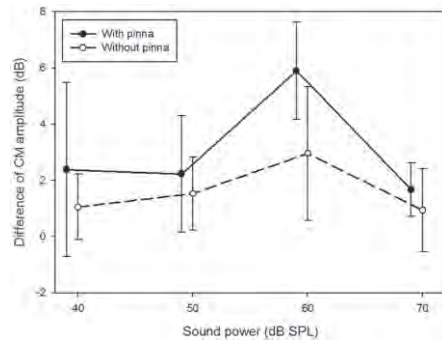


Fig.9. The average difference of CM amplitude (1, 2, 4, 8, 16, 20, 25, 32, 40 kHz) and Greeting call with pinna and the average without pinna.

4.考察

周波数に注目すると高周波数領域になればなるほど CM の上昇率が増加する傾向にあった。スナネズミのオーディオグラムにおいては周波数が高くなればなるほど閾値が上がることからコミュニケーション状況においては高周波数領域の音を増幅させて聴いている可能性がある。また、音圧に対して注目すると 60 dB SPL の音圧で CM 感度が上昇する傾向にあった。先程の場合ではコミュニケーションに用いる周波数領域で増幅が見られたことからこの音圧もコミュニケーションに関わる要素だと考えられる。スナネズミが普段コミュニケーション音声に用いる音声の音圧がこの音圧に近い可能性が考えられる。

また、耳介の有無で CM の増幅の度合いを比べたところ耳介が有る方が無い方よりも度合いが大きくなったことから増幅機構の由来は耳介にあると考えられる。しかし、耳介が無い場合でも全体としては増幅の傾向が見られたことから耳介による増幅のメカニズム以外にも内耳で別のメカニズムが存在する可能性が示唆される。

参考文献

- 1) Kohta I. Kobayashi Hiroshi, Riquimaroux "Classification of the vocalizations in the Mongolian gerbil, *Meriones unguiculatus*" Journal of the Acoustical Society of America, 131, 1622-1631, 2012
- 2) Allen Ryan "Hearing sensitivity of the Mongolian gerbil, *Meriones unguiculatus*" Journal of Acoustical Society of America 59:1222-1226, 1976

Relationship between cerebral activity state and salivary metabolite during stress

Masahiro SUGIMOTO* and Tomoyuki HIROYASU**

(Received March 30, 2016)

In this year, we collected saliva before and after mindfulness meditation. Then, whether the feedback of the meditation state by salivary metabolites is possible by examining the relationship between the change in the salivary metabolite and the brain state was discussed.

Key words : brain function information, EEG, fMRI, fNIRS

キーワード : 脳機能情報、生体情報、EEG、fMRI、fNIRS

ストレス時における脳活動状態と唾液内代謝物質の関係

杉本昌弘 (同慶應義塾大学・先端生命科学研究所) ・廣安知之 (同志社大学・生命医科学部)

1 はじめに

本提案手法は脳活動データから被験者の分類を定義し、その分類に紐づく代謝物質を同定することで脳活動と関連する代謝物質を推定するものである。既存の研究ではストレスとの関係が既知である特定の物質や脳領域のみに着目していたことに対して、本手法は全脳を対象として前提条件を必要としない教師なし学習を適用することで、より客観的かつ複合的な分類が得られるという特徴を持つ。今年度は、マインドフルネス瞑想の前後に唾液を採取し、唾液内代謝物質の変化と脳状態の関連性を検討することで、唾液内代謝物質による瞑想状態のフィードバックが可能かどうかについて検討した。特にマインドフルネス瞑想がストレス低減法として用いられることから、唾液内代謝物質の内、ストレス指標として用いられる唾液コルチゾールに着目し、脳状態と唾液コルチゾール濃度の関連性を解明することによって、

フィードバック指標としての有用性を検討した。被験者4名の実験時における唾液コルチゾールを検討したところ次のことがわかった。被験者のうち2名は、実験を通して唾液コルチゾール濃度の変化が少なく、また瞑想前安静時から瞑想後安静時の唾液コルチゾール濃度の変化も小さいことから、瞑想を行うことがストレスになっていないことが考えられる。残りの2名は唾液コルチゾール濃度の変化が大きく、また瞑想前後に濃度変化の仕方が変わっていることから、瞑想が影響を及ぼしていることが考えられた。

2 ストレス計測

ストレスという言葉は、日常生活において多くの人に使用されているが、カナダの生理学者 Hans Selye によって、「生体に作用する外からの刺激に対して生じる非特異的反応の総称である」と定義されている。また、Hans Selye は「生体にストレス状態を引き起こす種々の因子」

* 慶應義塾大学先端生命科学研究所 特任教授
E-mail : msugi@sfc.keio.ac.jp

** Faculty of Life and Medical Sciences, Center for Innovative Computing, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-6932, E-mail : tomo@is.doshisha.ac.jp

をストレスと定義した¹⁾。ストレスが生体に作用した場合、生体はストレスが起きることを防ぐために恒常性を維持しようとする。恒常性とは、生体がさまざまな環境の変化に対応して、内部状態を一定に保ち生存を維持する現象である。しかし、ストレスが強大で恒常性に破綻をきたすと、種々の障害、すなわちストレスが発現する。本節では、恒常性を維持するために働くストレス応答とストレス評価の指標について述べる。

2.1 ストレス応答

ストレス応答とは、ストレスにより、生体内の諸バランスが崩れた際に生じる生体の防衛反応や回復反応である。ストレスは大脳皮質や大脳辺縁系を経由して視床下部に情報伝達され、ストレス反応系を活性化させる。Fig. 1 にストレス応答経路を示す。

ストレス反応系には視床下部 - 下垂体前葉 - 副腎皮質系を介する hypothalamus-pituitary-adrenal axis (HPA 系) と視床下部 - 交感神経 - 副腎髄質系を介する sympathetic-adrenal-medullary axis (SAM 系) があり、この2つのストレス反応系に免疫系の調節機能も加わることで、心身の恒常性を維持している。HPA 系の活性化では、視床下部から副腎皮質刺激ホルモン放出ホルモン (corticotropin releasing hormone : CRT), 下垂体から副腎皮質刺激ホルモン (adrenocorticotropic hormone : ACTH) が放出される。ACTH が副腎皮質に達すると、血液中にコルチゾールなどの糖質コルチコイドが放出され、血糖上昇や免疫低下など生体の機能に影響を及ぼす。コルチゾールの分泌量が増えると、ACTH の分泌を抑える調節機構により、過剰なストレスへの反応が制御される。一方の SAM 系は交感神経がストレスに対して攻撃もしくは闘争する反応を担う経路である。刺激に応じて外界に向けて能動的に活動するときに働く器官である効果器への指令を交感神経を介する神経伝達と、副腎髄質からのホルモン分泌による液性伝達の2つのメカニズムが担っており、即時性のストレス応答である急性ストレスの基盤となる。SAM 系の活性化では交感神経の活性により、血圧上昇や心拍数の上昇などの基礎反応が導かれる。

2.2 ストレス指標

Table 1 に示すように、ストレスの計測には大きく分けて、生理学的評価方法と生化学的評価方法がある。生理学的評価方法では、自律神経系の支配を受ける器官から計測される生理信号である心拍や脈拍、血圧などの時

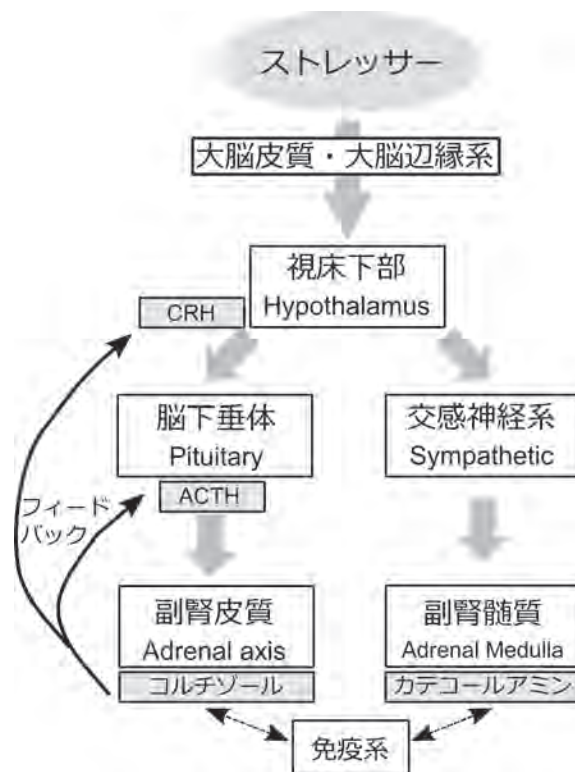


Fig. 1. ストレス応答経路.

間変動パターンを計測してストレス度を評価している。この評価方法は、短いサンプリング間隔で連続的な計測評価が可能である。また、無意識な状態で自動的に計測することが可能であるため、日常生活の中でリアルタイムに支援できる可能性を持つ。非侵襲計測であることも利点である。生化学的評価方法では、血液、唾液、尿などの生体サンプルに含まれる化学物質の濃度から生体情報を読み取り、数値化・定量化して評価を行う。この数値化・定量化した指標をバイオマーカーと呼ぶ。交感神経系や内分泌系に直接的、または間接的に関与するバイオマーカーには、ストレスの強度に応じて濃度が顕著に変化するものがあり、これをストレスマーカーとして計測する。そのため生理学的評価方法である物理計測だけでは拾うことが不可能であったストレスを定量的に評価することが可能である²⁾。

2.3 心理的評価指標

ストレスの計測手法として、ストレス刺激に伴う心理的变化に着目した心理的評価指標が存在する。State-Trait Anxiety Inventory (STAI)³⁾⁴⁾ は個人の不安に対する特性や現在の不安の状態を評価する。他にもストレス計測のアンケートには、神経症患者の症状の評価などが可能な General Health Questionnaire (GHQ)⁵⁾ や、抑うつや緊張など6尺度の気分の状態を評価する Profile

Table 1. 主なストレスの評価方法.

分類	検査項目	測定・評価内容
生理学的評価	心拍変動	自律神経活動
	脳波	リラククス度
	光トポグラフィ	大脳皮質の血流変化
生化学的評価	血液検査	ホルモン分泌 交感神経活動
	唾液検査	ホルモン分泌 交感神経活動

of Mood States (POMS)⁶⁾⁷⁾などが挙げられる。これらは簡易に診断が出来る一方で、主観的評価であることから認知のゆがみが生じてしまう可能性などが指摘されている。これらの診断指標は他の指標と組み合わせてストレスの評価に用いられることが多い。さらに、同じアンケート手法であるがストレスに対する評価ではなく、ストレス刺激の種類（「配偶者の死」や「離婚」など）を回答しその種類によって予め設定されたストレス強度を診断できるSRRS (Social Readjustment Rating Scale)がある⁸⁾。この方法はストレス強度を自分で評価せず、ストレス刺激の種類を客観的に評価することから認知のゆがみの影響を受けにくいとされている⁹⁾。

3 唾液コルチゾールによるストレス計測

コルチゾールは副腎皮質ホルモンである糖質コルチコイドの一種であり、HPA系の活性を反映する。そのため、ストレスの計測に広く利用されている。コルチゾールは、血中では約90%が結合型コルチゾールとして、残りの約10%が遊離型コルチゾールとして存在するが、唾液中には遊離型コルチゾールのみが現れる。これは、唾液が唾液腺によって血液を原料に作られ、高分子のタンパク質は唾液腺の通過が不可能なためである。ストレスの評価には遊離型コルチゾールのみが影響することから、唾液コルチゾールをストレス指標とした研究が数多く行われている¹⁰⁾¹¹⁾。唾液コルチゾールはストレス刺激後約15分で濃度上昇のピークが現れる¹²⁾。そのため、実験においては任意の刺激に対するストレスを評価するために、ストレスの原因となる要素に注意する必要がある。

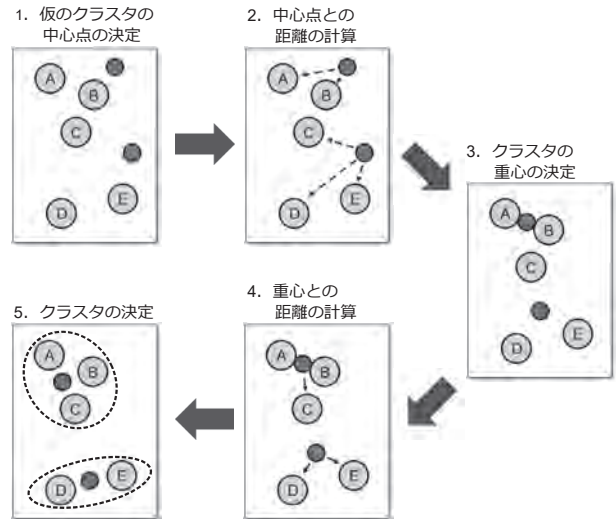


Fig. 2. k-means 法の手順.

Table 2. Reduced k-means clustering における表記.

表記法	意味
I	オブジェクト数
J	変数の数
C	分割するクラスタの数
Q	変数の縮約数
X	観測データ ($I \times J$ 行列)
U	クラスタリング結果 ($I \times C$ 行列)
F	クラスタの重心 ($C \times Q$ 行列)
A	主成分負荷量 ($J \times Q$ 行列)

3.1 Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay による分析

唾液中に含まれるコルチゾール濃度を分析する方法として、酵素免疫測定法の一つであるELISA分析があげられる。また、ELISA分析には競合法とサンドイッチ法があり、競合法は極微量のサンプルの検出、サンドイッチ法は高感度でサンプルを検出が可能である。本研究では競合法のELISA分析によって唾液コルチゾールの測定を行った。Fig. 3にELISA分析の原理を示す。コルチゾール抗体を固相化したマイクロカップに唾液サンプルを添加する。さらに、コルチゾールと horseradish peroxidase (HRP) が結合した酵素標識抗原 (コンジュゲート) を添加し、抗原・抗体反応を引き起こす。この時、唾液サンプル中のコルチゾールが少ない場合、コンジュゲートと抗体の抗原・抗体反応が多く起こり、唾液サンプル中のコルチゾールが多く存在する場合、コンジュゲートと抗体の抗原・抗体反応は少なくなる。その後、洗浄によって、未反応の残ったコンジュゲートを取

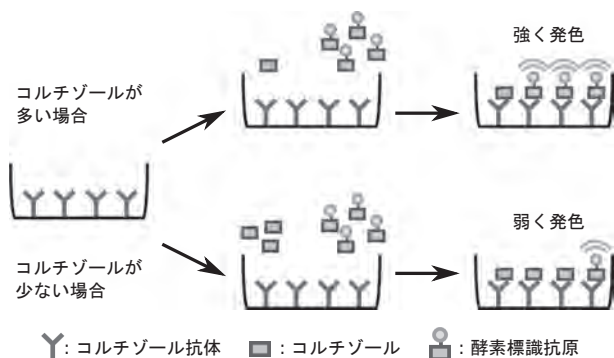


Fig. 3. ELISA 分析によるコルチゾール分析原理.

り除き、酵素基質として tetramethylbenzidine (TMB) を添加し、反応・発色させる。発色は HRP と TMB の反応によって起き、唾液サンプル中のコルチゾールが少ない程、発色が強くなり、唾液サンプル中のコルチゾールが多い程、発色は弱くなる。そのため、発色後に吸光度を測定することで、唾液サンプル中のコルチゾール濃度を算出することが可能となる。

4 瞑想中の脳状態と唾液コルチゾール濃度変化の関連性の検討

4.1 実験概要

本実験では、息の出入りを数えることによって呼吸に意識を集中させる「数息観」と呼ばれる集中瞑想を用いた。この時の脳活動を fMRI で計測し、同時に唾液コルチゾール濃度を計測することで、集中瞑想による脳活動と唾液コルチゾール濃度の関連性を検討する。そのために 2 つの実験を行った。被験者は、瞑想初心者 24 名 (22.88±0.48 歳, 右利き, 瞑想訓練時間: 30 時間以下, 男性: 18 名, 女性: 6 名), 瞑想熟練者 3 名 (45±8 歳, 右利き, 瞑想訓練時間: 1000 時間以上, 男性: 3 名) であり、すべての被験者は書面による同意の上、実験に参加した。また、瞑想初心者の内 4 名に対しては、脳活動の計測と同時に、唾液を採取し、唾液コルチゾール濃度の計測も行った。MRI 装置は Echelon Vega 1.5T (日立メディコ) を用いた。脳機能画像は Gradient Echo-Echo Planer Imaging (GE-EPI) シーケンスで、T1 構造画像は Rf-Spoiled Steady state Gradient echo (RSSG) により撮像した。Table 3 に撮像パラメータを示す。

4.2 実験方法：瞑想中の脳活動の計測

実験設計を Fig. 4 に示す。本実験は、瞑想前安静時、瞑想時、瞑想後安静時 (1)、瞑想後安静時 (2) の 4 区

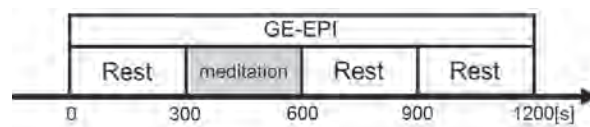


Fig. 4. 脳活動の計測実験設計.

間、各 5 分で構成され、被験者にヘッドホンを装着した状態で MRI 装置を用いて撮像した。瞑想の開始時と終了時に、ヘッドホンを経由して「task 開始」、「rest 開始」の音声で瞑想の開始・終了の合図を行った。実験を行うにあたって、MRI 計測の前に数息観に関して以下の指示を行った。

- 数息観を行っている間は、閉眼である。
- 呼吸は鼻呼吸で、自然な呼吸を心がけ、意図的に呼吸の長さを変化させない。
- 息を吸い始める時から数え始め、吐き終わるまでを 1 と数え、心の中で数えていき、10 まで数えたら、再び 1 から数え始める。
- 数を数え忘れる、10 を超えて数える、呼吸を数えること以外に意識が逸れるなどの事象が生じた場合は、それに気づき、再び 1 から数え始める。

安静時には、呼吸に意識を向けることがないように、呼吸を数えることはせず、楽な状態で過ごすように指示をした。また、マインドフルネスの心理的評価として FFMQ を採用し、MRI 計測の前に調査を行った。

4.3 実験方法：瞑想中の脳活動と唾液コルチゾール濃度変化の計測

本実験では、唾液コルチゾール濃度の日内変動¹²⁾を考慮し、変化が大きく現れる 10 時~12 時の間に唾液を 8 サンプル採取した。Fig. 5 に実験設計を示す。実験ブロックは瞑想前安静時、瞑想時、瞑想後安静時 (1) の 3 ブロック、各 5 分で構成される。唾液サンプルは、Passive Drool (Fig. 6) で採取され、10 時から 15 分間隔で行い、各ブロックごとに唾液を採取するために被験者を MRI 装置から移動させた。それに伴い、各ブロックの撮像前に位置合わせを行った。数息観に関しては、4.2 と同様に指示を行った。また、コルチゾール濃度に与える影響を取り除くために、以下の条件で統制を行った。

- 被験者は非喫煙者であること

5 結果と考察

Table 3. MRI 撮像パラメータ.

パラメータ	GE-EPI	RSSG
TR [ms]	3000	9.4
TE [ms]	40	4.0
flip angle[°]	90	8
Field of View [mm]	240×240	256×256
Matrix Size [pixel]	64×64	256×256
Thickness [mm]	5.0	1.0
Slice Number	20	194

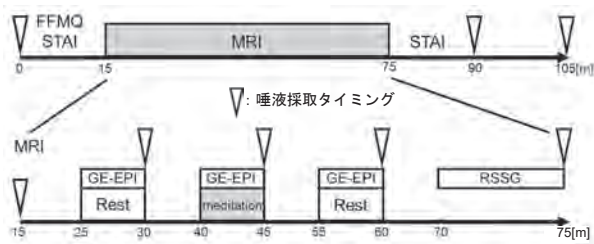


Fig. 5. 脳活動と唾液コルチゾールの計測実験設計.



Fig. 6. Passive Drool による唾液採取.

- 実験開始前の 12 時間前以内のアルコール・カフェインの採取の禁止
- 実験開始の 1 時間前から水以外の飲食と過度の運動禁止
- 実験開始 10 分前に水で口をゆすぐ

実験アンケートは実験前後に行い、FFMQ を実験前に、被験者の不安を評価する STAI を実験の前後に採用した。

5.1 唾液コルチゾールとストレス

以下の Fig. 7 に唾液を採取した被験者 4 名の実験時における唾液コルチゾール濃度の変化を示す。唾液コルチゾールは刺激に対して約 15 分後にピークが現れるため、サンプル 3 からサンプル 7 が MRI で撮像されることによる変動、サンプル 4 からサンプル 5 が瞑想を行ったことによる変動を表すと考えられる。Fig. 8 のように、被験者 1 と被験者 2 は、実験を通して唾液コルチゾール濃度の変化が少なく、また瞑想前安静時から瞑想後安静時の唾液コルチゾール濃度の変化も小さいことから、瞑想を行うことがストレスになっていないことが考えられる。一方の被験者 3 と被験者 4 は実験を通して唾液コルチゾール濃度の変化が大きく、また瞑想前後に濃度変化の仕方が変わっていることから、瞑想が影響を及ぼしていることが考えられる。

次に、STAI の得点結果を用いてストレスの評価を行うため、「今まさに、どのように感じているか」という不安のような状態特性を測定する STAIY-1 の実験前と実験後の得点を検討した。Fig. 8 に各被験者における実験前後の STAIY-1 の得点結果を示す。STAIY-1 の得点が高い程、不安を感じており、ストレス状態にあると考えられる。被験者 2 と被験者 4 は実験後に STAIY-1 の得点が下がっており、実験を通してストレスが低減したと考えられる。また、Fig. 7 から、被験者 2 と被験者 4 は唾液コルチゾール濃度変化に関しても実験前に比べ、実験後に唾液コルチゾール濃度が低下していることから、実験を通してストレスが低減したと考えられ、STAI の結果と唾液コルチゾール濃度変化の両面から、実験がストレス低減につながったことが示唆された。一方の被験者 1 と被験者 3 は実験後に STAIY-1 の得点が上がっており、実験がストレスとなった可能性がある。Fig. 7 より、唾液コルチゾール濃度変化においても被験者 3 は実験後に大きく唾液コルチゾール濃度が高くなっていることから、実験のストレスが考えられる。被験者 1 では実験前後の唾液コルチゾール濃度の差は見られなかったが、被験者 1 はサンプル 7 において実験前に比べ、唾液コルチゾール濃度が高かった。よって、実験はストレスとなったが、MRI 撮像が終了したことによって、ストレスが下がったと考えられる。これらのことから、唾液コルチゾール濃度から今回の実験がストレスとなる可能性の有無を検討することが可能であることが示唆された。

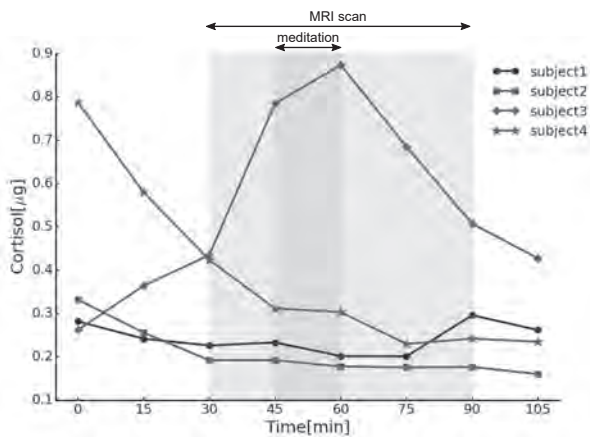


Fig. 7. 実験時の唾液コルチゾール濃度変化.

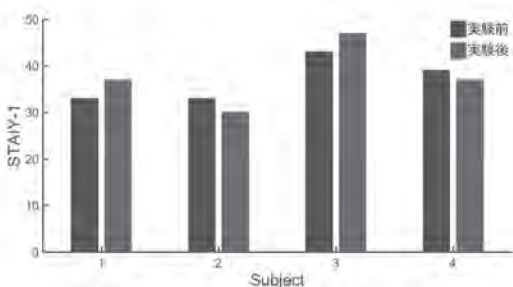


Fig. 8. 実験前後の STAIY-1 の変化.

5.2 唾液コルチゾールと脳状態

唾液を採取した被験者4名は脳機能ネットワーク解析により瞑想時の脳状態から、被験者1はclusterAに分類され、残りの3名の被験者はclusterBに分類された。clusterAでは、0.12以上の主成分負荷量を示した変数に右視床と右被殻のDegree Centralityが抽出され、視床は脳基底核に情報を伝達し、被殻は脳基底核の一部で大脳辺縁系の制御を行う。大脳辺縁系は、自律神経活動に関与し、ホルモン分泌などを制御することから、大脳辺縁系の制御はホルモン分泌の制御につながることが考えられる。このことから、瞑想状態にある場合、右視床、右被殻の結合数を増加させることで、ホルモン分泌の制御が行われると考えられる。Table 4に実験結果から考えられる各被験者における瞑想時と実験時のストレス状態を示す。被験者1は実験がストレスとなったが、瞑想はストレスとならなかった。このことから、被験者1は瞑想時に瞑想状態にあったため、ストレスが低減し、唾液コルチゾール濃度の低下が生じたと考えられる。被験者2は瞑想をストレスと感じていなかったが、実験を通してストレスを感じていなかった。しかし、瞑想時の脳状態から瞑想状態にないclusterBに分類された。よって、瞑想の効果によるストレスの低下ではなく、他

Table 4. 瞑想時と実験時のストレス状態.

被験者	ストレスの有無	
	瞑想時	実験時
1	無	有
2	無	無
3	有	有
4	有	無

の要因によるストレスの低下が考えられる。被験者3と被験者4は瞑想がストレスとなっていたことから、瞑想状態でなかったためにclusterBに分類されたと考えられる。

謝辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」(平成26年～平成30年, 事業番号S1411030)の支援のもとに行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Hans Selye, et al. A syndrome produced by diverse nocuous agents. *Nature*, Vol. 138, No. 3479, p. 32, 1936.
- 2) 山口昌樹. ストレスと生活 2 唾液マーカーでストレスを測る. *日本薬理学雑誌*, Vol. 129, No. 2, pp. 80–84, 2007.
- 3) Noriyasu Takai, Masaki Yamaguchi, Toshiaki Aragaki, Kenji Eto, Kenji Uchihashi, and Yasuo Nishikawa. Effect of psychological stress on the salivary cortisol and amylase levels in healthy young adults. *Archives of Oral Biology*, Vol. 49, No. 12, pp. 963–968, 2004.
- 4) CD Spielberger, RL Gorsuch, R Lushene, PR Vagg, and GA Jacobs. *Manual for the state-trait anxiety inventory (STAI)*. San Diego, CA: Mindgarden, 1983.
- 5) David P Goldberg and Valerie F Hillier. A scaled version of the general health questionnaire. *Psychological medicine*, Vol. 9, No. 01, pp. 139–145, 1979.
- 6) McNair DM, Lorr M, Droppleman LF. *Profile of Mood States*. Educational and Industrial Testing Service, 1992.
- 7) McNair DM, Heuchert JWP. *Profile of Mood States Technical Update 2003*. Multi-Health Systems Inc, 2003.
- 8) Thomas H Holmes and Richard H Rahe. The social readjustment rating scale. *Journal of psychosomatic research*, Vol. 11, No. 2, pp. 213–218, 1967.

- 9) 夏目誠. ストレス評価に関する調査研究: 平成 22 年度における厚生労働省から産業精神保健学会への委託研究成果を中心に. *精神神経学雑誌= Psychiatria et neurologia Japonica*, Vol. 114, No. 12, pp. 1385–1395, 2012.
- 10) Clemens Kirschbaum, Oliver T Wolf, Mark May, W Wippich, and Dirk H Hellhammer. Stress-and treatment-induced elevations of cortisol levels associated with impaired declarative memory in healthy adults. *Life sciences*, Vol. 58, No. 17, pp. 1475–1483, 1996.
- 11) Clemens Kirschbaum and Dirk H Hellhammer. Salivary cortisol in psychoneuroendocrine research: recent developments and applications. *Psychoneuroendocrinology*, Vol. 19, No. 4, pp. 313–333, 1994.
- 12) Sally S Dickerson and Margaret E Kemeny. Acute stressors and cortisol responses: a theoretical integration and synthesis of laboratory research. *Psychological bulletin*, Vol. 130, No. 3, p. 355, 2004.

Mindful Driving: Analysis of the attention states during simulated driving using fNIRS

Tomoyuki HIROYASU* and Satoru HIWA*

(Received March 30, 2017)

It is said that we are in a state of mind wandering for approximately 50% of the day. Mind wandering while driving sometimes cause traffic accidents. In order to perform mindful driving, our attention should be appropriately directed toward the objects surrounding the driver, but should not be captured by them. For that reason, it is important to detect mind wandering. In this study, drivers' mind wandering was defined from their behavior during simulated driving and their brain activity was measured and investigated using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). Fractional amplitude low-frequency fluctuation (fALFF) was used as an indicator of brain activity. From the results, mind wandering while driving can be detected by variations in the steering angle along with brain activity in the forehead.

Key words : brain function information, EEG, fMRI, fNIRS

キーワード : 脳機能情報、生体情報、EEG、fMRI、fNIRS

マインドフル・ドライビング：fNIRSを用いた自動車運転中の注意状態の分析

廣安 知之 ・ 日和 悟 (同志社大学・生命医科学部)

1 はじめに

Well-being とは、身体的、精神的、社会的に良好な状態であることを意味し、Well-being を実現するためには、マインドフルネスの概念が必要不可欠である。マインドフルネスとは、過去や未来にとらわれず現在の瞬間に意図的に非判断的な注意を向けることである。しかし、マインドフルネスと対極にあるマインドワンダリングは、過去の失敗などに意図せず注意を向けることで私たちの幸福感を低下させる。日常的にマインドフルな状態が期待されているが、その中でも、自動車運転時は運転と歩行者、道路標識などの対象物が多数存在することから、私たちは運転中において様々な対象に適切に意図

的な注意を払い、またそれらに囚われない状態であるべきである。そのため、マインドフルな状態で運転する必要があると考えられる。マインドフル・ドライビングにより、交通事故を削減し、運転をより楽しむことに貢献することが期待される。マインドフル・ドライビングのための重要な構成要素の一つは、マインドワンダリングを検出することである。ドライバが注意状態を知覚し、正しい対象へと注意を払うためには、ドライバの注意状態を評価し適切な方向へと導く運転支援システムが必要である。運転操作に必要な認知、判断、処理は脳内で行われることから、脳活動はドライバ状態を推定するための指標として広く用いられている。しかし、運転時の

* Faculty of Life and Medical Sciences, Center for Innovative Computing, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-6932, E-mail : tomo@is.doshisha.ac.jp

マインドワンダリング時の脳状態の変化は明らかにされていない¹⁾。そこで、本稿では運転時のマインドワンダリング状態を脳活動を用いて検出することを目的とした。シミュレータ環境下でドライバのマインドワンダリング状態を行動データから定義し、その時の脳活動を functional Near Infrared Spectroscopy (fNIRS) を用いて計測し、運転時のマインドワンダリング状態の脳活動を検討した。

2 実験方法

2.1 実験概要

本実験では、ドライビングシミュレータ環境下でマインドワンダリングを誘発するために異なる二つの課題を同時に課す dual task を用いた。その時の脳活動を fNIRS で計測し、脳活動から運転時におけるマインドワンダリング状態を検討した。被験者は、運転免許を所有している健常男性 10 名 (22.6 ± 1.4 歳, 右利き) であった。fNIRS 装置はサンプリング周波数が 1.53Hz の OEG16 (Spectratech 社製) を用いた。計測部位は前頭部 16CH で国際 10-20 法に従ってプローブを配置した。また、運転課題はドライビングシミュレータを用いて行った。

2.2 実験プロトコル

実験設計を Fig. ?? に示す。本実験はレスト 30s, タスク 480s, レスト 30s で構成される。dual task の主課題はドライビングシミュレータを用いた運転課題, 副課題にはランダムな刺激に対して、可能な限り速く反応することで持続的注意を測定可能な Psychomotor Vigilance Task (PVT) を用いた。レスト区間では、ハンドルを握ったまま前方の画面を注視する。タスク区間では、運転課題としてオーバルコースでの運転を行う。また、運転中に PVT の音刺激がランダムな間隔で与えられ、その刺激に対してハンドル横に設置されたボタンプレスにより反応を示す。

3 解析方法

3.1 行動データによる状態定義

今回行った dual task によって、被験者が PVT に注意を向けている時にはドライビングシミュレータ環境下でマインドワンダリング状態に陥っている可能性が考えられる。そこで、本実験では PVT で得られた反応時間 (Reaction time:RT) から状態定義を行った。定義方法

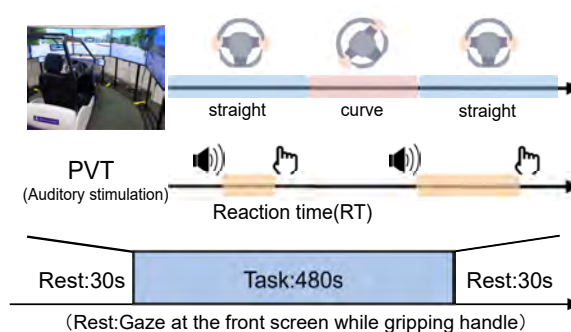


Fig. 1. Experimental Design.

を Fig. ?? に示す。被験者毎に最も速い RT, 最も遅い RT を算出し、その反応が行われた直前の区間をステアリング舵角変動と脳血流変化の解析対象区間として定めた。また、ステアリング舵角変化の指標として、変動係数を算出した。

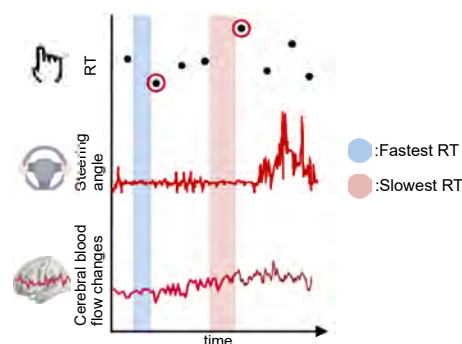


Fig. 2. Definition of section by behavior data.

3.2 脳活動の特徴量算出

fNIRS の計測チャンネルのすべては automatic anatomical labeling (AAL) に基づいて脳部位とは対応付けを行った。各チャンネルで得られた脳血流変化の時系列データから、脳活動の指標として fractional amplitude low-frequency fluctuation (fALFF) を算出した。fALFF は以下のように算出される。

$$fALFF(\text{低周波振動振幅}) = \frac{0.008 - 0.09[\text{Hz}] \text{の振幅の和}}{\text{全周波数帯の振幅の和}}$$

fALFF は脳活動と考えられる周波数帯 (0.008-0.09Hz) の振幅の和を測定された正の周波数帯で除算することで得られる²⁾。周波数領域のデータに対して各チャンネルごとに fALFF を算出し、z 変換を行った (zfALFF)。各チャンネルの zfALFF は脳領域ごとに平均され、全被験者の脳領域ごとの zfALFF を算出した。

4 結果・考察

最も速い RT と最も遅い RT の比較結果を Fig. ?? に示す。被験者毎に最も速い RT と最も遅い RT を算出し、比較を行った結果、有意水準 5% で有意差が見られた。このことから反応する直前の区間でドライバの状態が異なることが考えられる。速く反応するためには刺激呈示が行われるまで PVT に注意を向けることが必要となる。よって、RT が速い区間では本実験の主課題である運転課題でなく、副課題である PVT に注意が向いていたことから、マインドワンダリングしていた可能性が考えられる。また、RT が遅い区間では運転に注意が向いていることが考えられる。

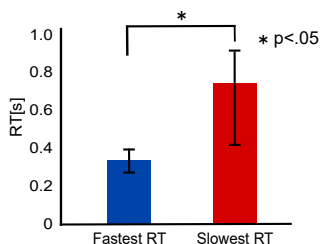


Fig. 3. Comparison of RT.

RT で定義した最も速い RT 区間と最も遅い RT 区間にあたるステアリング舵角変化と脳血流変化から算出した zfALFF の比較を行った。最も速い RT 区間と最も遅い RT 区間にあたる zfALFF のカラーマップを Fig. ?? に示す。最も速い RT 区間と最も遅い RT 区間で比較をお行った結果、最も速い RT 区間では、左中前頭回の zfALFF の値が有意に高かった ($p < 0.05$)。左中前頭回は選択的注意に関係づけられ、注意対象を判断する時に活性化される³⁾。また、自動車を走行コース内で安定して操作するためには、ある程度の舵角変動が必要と考えられるため、最も速い RT 区間における小さい舵角変動は、マインドワンダリングの傾向と推察される。一方、最も遅い RT 区間では、右上前頭回背側部の zfALFF の値が有意に高かった ($p < 0.05$)。右上前頭回背側部は、注意の維持と転換時に活性化されることを報告している³⁾。最も遅い RT 区間において舵角変動が大きいことから、この区間ではドライバは運転課題に注力していたことが考えられる。この推察は、注意維持に関連する右上前頭回背側部の高い zfALFF と一致する。

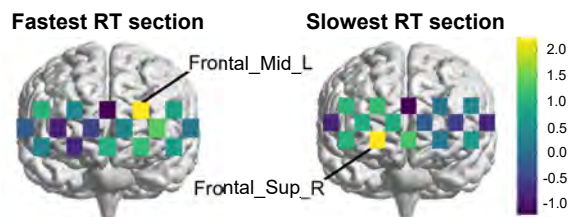


Fig. 4. Colormap of zfALFF in section.

5 結論

本稿では、運転時のマインドワンダリング状態を検出するために運転課題を主課題、PVT を副課題とした dual task が用いられ、fNIRS によって脳血流変化が計測された。また、局所的自発性脳活動の指標として zfALFF が算出された。PVT における最も速い RT 区間では左中前頭回の zfALFF の値に有意差が見られ、最も遅い RT 区間では右上前頭回背側部の zfALFF の値に有意差が見られた。また、舵角の変動係数にも 2 区間で有意差が見られた。これらの実験結果は、運転時のマインドワンダリングがステアリング舵角変動と前頭部の脳活動を用いて検出でき得ることを示唆した。

謝辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」(平成 26 年～平成 30 年、事業番号 S1411030) の支援のもとに行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Carryl L Baldwin, Daniel M Roberts, Daniela Barragan, John D Lee, Neil Lerner, and James S Higgins. Detecting and quantifying mind wandering during simulated driving. *Frontiers in human neuroscience*, Vol. 11, p. 406, 2017.
- 2) Qi-Hong Zou, Chao-Zhe Zhu, Yihong Yang, Xi-Nian Zuo, Xiang-Yu Long, Qing-Jiu Cao, Yu-Feng Wang, and Yu-Feng Zang. An improved approach to detection of amplitude of low-frequency fluctuation (alf) for resting-state fmri: fractional alf. *Journal of neuroscience methods*, Vol. 172, No. 1, pp. 137–141, 2008.
- 3) Wendy Hasenkamp, Christine D Wilson-Mendenhall, Erica Duncan, and Lawrence W Barsalou. Mind wandering and attention during focused meditation: a fine-grained temporal analysis of fluctuating cognitive states. *Neuroimage*, Vol. 59, No. 1, pp. 750–760, 2012.

Mindful Driving: Analysis of the attention states during simulated driving using fNIRS

Tomoyuki HIROYASU* and Satoru HIWA*

(Received March 30, 2017)

It is said that we are in a state of mind wandering for approximately 50% of the day. Mind wandering while driving sometimes cause traffic accidents. In order to perform mindful driving, our attention should be appropriately directed toward the objects surrounding the driver, but should not be captured by them. For that reason, it is important to detect mind wandering. In this study, drivers' mind wandering was defined from their behavior during simulated driving and their brain activity was measured and investigated using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). Fractional amplitude low-frequency fluctuation (fALFF) was used as an indicator of brain activity. From the results, mind wandering while driving can be detected by variations in the steering angle along with brain activity in the forehead.

Key words : brain function information, EEG, fMRI, fNIRS

キーワード : 脳機能情報、生体情報、EEG、fMRI、fNIRS

マインドフル・ドライビング：fNIRSを用いた自動車運転中の注意状態の分析

廣安 知之 ・ 日和 悟 (同志社大学・生命医科学部)

1 はじめに

Well-being とは、身体的、精神的、社会的に良好な状態であることを意味し、Well-being を実現するためには、マインドフルネスの概念が必要不可欠である。マインドフルネスとは、過去や未来にとらわれず現在の瞬間に意図的に非判断的な注意を向けることである。しかし、マインドフルネスと対極にあるマインドワンダリングは、過去の失敗などに意図せず注意を向けることで私たちの幸福感を低下させる。日常的にマインドフルな状態が期待されているが、その中でも、自動車運転時は運転と歩行者、道路標識などの対象物が多数存在することから、私たちは運転中において様々な対象に適切に意図

的な注意を払い、またそれらに囚われない状態であるべきである。そのため、マインドフルな状態で運転する必要があると考えられる。マインドフル・ドライビングにより、交通事故を削減し、運転をより楽しむことに貢献することが期待される。マインドフル・ドライビングのための重要な構成要素の一つは、マインドワンダリングを検出することである。ドライバが注意状態を知覚し、正しい対象へと注意を払うためには、ドライバの注意状態を評価し適切な方向へと導く運転支援システムが必要である。運転操作に必要な認知、判断、処理は脳内で行われることから、脳活動はドライバ状態を推定するための指標として広く用いられている。しかし、運転時の

* Faculty of Life and Medical Sciences, Center for Innovative Computing, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-6932, E-mail : tomo@is.doshisha.ac.jp

マインドワンダリング時の脳状態の変化は明らかにされていない¹⁾。そこで、本稿では運転時のマインドワンダリング状態を脳活動を用いて検出することを目的とした。シミュレータ環境下でドライバのマインドワンダリング状態を行動データから定義し、その時の脳活動を functional Near Infrared Spectroscopy (fNIRS) を用いて計測し、運転時のマインドワンダリング状態の脳活動を検討した。

2 実験方法

2.1 実験概要

本実験では、ドライビングシミュレータ環境下でマインドワンダリングを誘発するために異なる二つの課題を同時に課す dual task を用いた。その時の脳活動を fNIRS で計測し、脳活動から運転時におけるマインドワンダリング状態を検討した。被験者は、運転免許を所有している健常男性 10 名 (22.6 ± 1.4 歳, 右利き) であった。fNIRS 装置はサンプリング周波数が 1.53Hz の OEG16 (Spectratech 社製) を用いた。計測部位は前頭部 16CH で国際 10-20 法に従ってプローブを配置した。また、運転課題はドライビングシミュレータを用いて行った。

2.2 実験プロトコル

実験設計を Fig. 1 に示す。本実験はレスト 30s, タスク 480s, レスト 30s で構成される。dual task の主課題はドライビングシミュレータを用いた運転課題, 副課題にはランダムな刺激に対して、可能な限り速く反応することで持続的注意を測定可能な Psychomotor Vigilance Task (PVT) を用いた。レスト区間では、ハンドルを握ったまま前方の画面を注視する。タスク区間では、運転課題としてオーバルコースでの運転を行う。また、運転中に PVT の音刺激がランダムな間隔で与えられ、その刺激に対してハンドル横に設置されたボタンプレスにより反応を示す。

3 解析方法

3.1 行動データによる状態定義

今回行った dual task によって、被験者が PVT に注意を向けている時にはドライビングシミュレータ環境下でマインドワンダリング状態に陥っている可能性が考えられる。そこで、本実験では PVT で得られた反応時間 (Reaction time:RT) から状態定義を行った。定義方

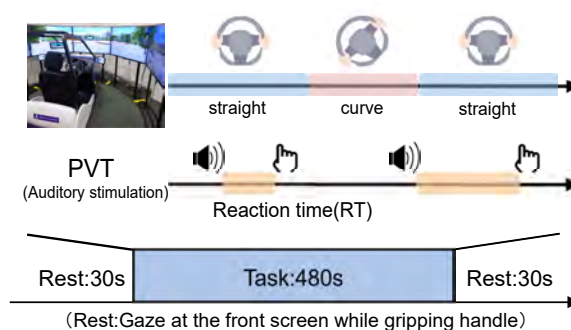


Fig. 1. Experimental Design.

法を Fig. 2 に示す。被験者毎に最も速い RT, 最も遅い RT を算出し、その反応が行われた直前の区間をステアリング舵角変動と脳血流変化の解析対象区間として定めた。また、ステアリング舵角変化の指標として、変動係数を算出した。

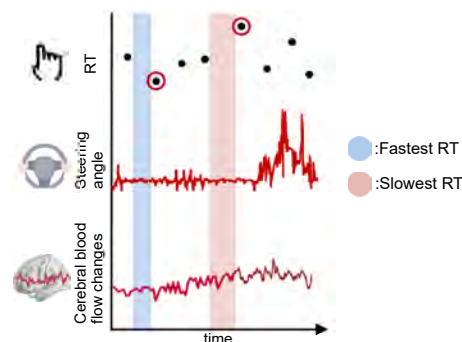


Fig. 2. Definition of section by behavior data.

3.2 脳活動の特徴量算出

fNIRS の計測チャンネルのすべては automatic anatomical labeling (AAL) に基づいて脳部位とは対応付けを行った。各チャンネルで得られた脳血流変化の時系列データから、脳活動の指標として fractional amplitude low-frequency fluctuation (fALFF) を算出した。fALFF は以下のように算出される。

$$fALFF(\text{低周波振動振幅}) = \frac{0.008 - 0.09[\text{Hz}] \text{の振幅の和}}{\text{全周波数帯の振幅の和}}$$

fALFF は脳活動と考えられる周波数帯 (0.008-0.09Hz) の振幅の和を測定された正の周波数帯で除算することで得られる²⁾。周波数領域のデータに対して各チャンネルごとに fALFF を算出し、z 変換を行った (zfALFF)。各チャンネルの zfALFF は脳領域ごとに平均され、全被験者の脳領域ごとの zfALFF を算出した。

4 結果・考察

最も速い RT と最も遅い RT の比較結果を Fig. 3 に示す。被験者毎に最も速い RT と最も遅い RT を算出し、比較を行った結果、有意水準 5% で有意差が見られた。このことから反応する直前の区間でドライバの状態が異なることが考えられる。速く反応するためには刺激呈示が行われるまで PVT に注意を向けることが必要となる。よって、RT が速い区間では本実験の主課題である運転課題でなく、副課題である PVT に注意が向いていたことから、マインドワンダリングしていた可能性が考えられる。また、RT が遅い区間では運転に注意が向いていることが考えられる。

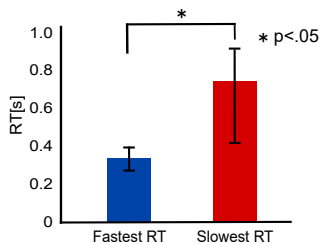


Fig. 3. Comparison of RT.

RT で定義した最も速い RT 区間と最も遅い RT 区間にあたるステアリング舵角変化と脳血流変化から算出した zfALFF の比較を行った。最も速い RT 区間と最も遅い RT 区間にあたる zfALFF のカラーマップを Fig. 4 に示す。最も速い RT 区間と最も遅い RT 区間で比較をお行った結果、最も速い RT 区間では、左中前頭回の zfALFF の値が有意に高かった ($p < 0.05$)。左中前頭回は選択的注意に関係づけられ、注意対象を判断する時に活性化される³⁾。また、自動車を走行コース内で安定して操作するためには、ある程度の舵角変動が必要と考えられるため、最も速い RT 区間における小さい舵角変動は、マインドワンダリングの傾向と推察される。一方、最も遅い RT 区間では、右上前頭回背側部の zfALFF の値が有意に高かった ($p < 0.05$)。右上前頭回背側部は、注意の維持と転換時に活性化されることを報告している³⁾。最も遅い RT 区間において舵角変動が大きいことから、この区間ではドライバは運転課題に注力していたことが考えられる。この推察は、注意維持に関連する右上前頭回背側部の高い zfALFF と一致する。

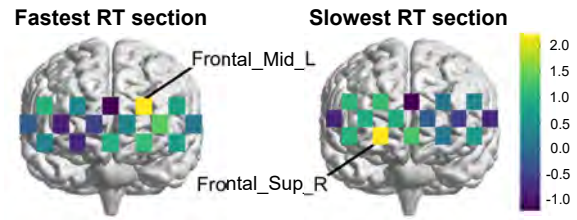


Fig. 4. Colormap of zfALFF in section.

5 結論

本稿では、運転時のマインドワンダリング状態を検出するために運転課題を主課題、PVT を副課題とした dual task が用いられ、fNIRS によって脳血流変化が計測された。また、局所的自発性脳活動の指標として zfALFF が算出された。PVT における最も速い RT 区間では左中前頭回の zfALFF の値に有意差が見られ、最も遅い RT 区間では右上前頭回背側部の zfALFF の値に有意差が見られた。また、舵角の変動係数にも 2 区間で有意差が見られた。これらの実験結果は、運転時のマインドワンダリングがステアリング舵角変動と前頭部の脳活動を用いて検出でき得ることを示唆した。

謝辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」(平成 26 年～平成 30 年、事業番号 S1411030) の支援のもとに行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Carryl L Baldwin, Daniel M Roberts, Daniela Barragan, John D Lee, Neil Lerner, and James S Higgins. Detecting and quantifying mind wandering during simulated driving. *Frontiers in human neuroscience*, Vol. 11, p. 406, 2017.
- 2) Qi-Hong Zou, Chao-Zhe Zhu, Yihong Yang, Xi-Nian Zuo, Xiang-Yu Long, Qing-Jiu Cao, Yu-Feng Wang, and Yu-Feng Zang. An improved approach to detection of amplitude of low-frequency fluctuation (alf) for resting-state fmri: fractional alf. *Journal of neuroscience methods*, Vol. 172, No. 1, pp. 137–141, 2008.
- 3) Wendy Hasenkamp, Christine D Wilson-Mendenhall, Erica Duncan, and Lawrence W Barsalou. Mind wandering and attention during focused meditation: a fine-grained temporal analysis of fluctuating cognitive states. *Neuroimage*, Vol. 59, No. 1, pp. 750–760, 2012.

Simultaneous analysis for both clustering of variables and low-rank approximation of correlation matrices based on Majorization

Kensuke Tanioka^{*}, Satoru Hiwa^{**}, Tomoyuki Horoyasu^{**} and Hiroshi Yadohisa^{**}

(Received June 4, 2018)

Given two different correlation matrices between variables, it is important to detect and interpret the relations such that the difference is larger. For example, in fMRI data analysis, such the situation is observed. Given two correlation matrices corresponding to classes between region of interests (ROIs), it is important to detect ROIs such that these functions of distinctive classes are revealed. However, when these differences are interpreted, it becomes complicated since there are many correlations and these values takes various values. Therefore, it is suitable to achieve the purpose for detecting the sparse low rank difference matrix between classes. In this paper, we proposed simultaneous analysis of clustering and low-rank estimation for the difference between correlation matrices based on Majorization algorithm.

Key words : dimensional reduction, simultaneous optimization, sparse estimation

1 Introduction

In fMRI data analysis, it is important to detect functional connectivities between regions of interests (ROIs) for brains (e.g. Filippi, 2009; Friston et al., 2007). In these domains, functional connectivities are observed as correlations between signals of ROIs. Given these correlation matrices of subjects and their information of classes, it is important to reveal the functional connectivities such that these differences between classes are larger. To detect such the distinctive networks for each class, various methods have been proposed. (Varoquaux et al., 2013)

However, it is difficult to interpret these relations between ROIs when the differences of correlations between ROIs are small. In the situation, estimating low rank correlation matrix is useful. See Fig. 1. While it is difficult to interpret the relation between variables from the original matrix, it becomes easy to interpret the relation between variables by using low rank correlation matrix since these differences of the estimated

correlations tend to become larger. Therefore, it is important to estimate low rank correlation matrix from the perspective of interpretation.

In this paper, we proposed simultaneous analysis of estimating low rank matrix for the difference between two correlation matrices and clustering variables., given correlation matrices for classes. Pietersz and Groenen (2004) proposed rank reduction of correlation matrices by majorization and there is good properties. Therefore, the proposed method adopts majorization algorithm. In addition, Simon and Abell (2010) proposed a majorization algorithm for constrained correlation matrix approximation, such that some of elements of the correlation matrix are constrained to 0. Our method is based on these methods and low rank matrix can be estimated based on these algorithm, easily.

The remains of this paper is as follows. In section 2, we show the motivation, and the objective function of the proposed method. In section 3, these results of the numerical simulation is shown. Finally, we conclude this paper.

^{*} Wakayama Medical University, Wakayama

Telephone : +81-73-441-0867, E-mail : ktaniok@wakayama-med.ac.jp

^{**} Doshisha University, Kyoto

Telephone : +81-774-65-6932, E-mail : hiro@is.nagoya-u.ac.jp

Telephone : +81-774-65-6381, E-mail : shiwa@mail.doshisha.ac.jp

Telephone : +81-774-65-7657, E-mail : hyadohis@mail.doshisha.ac.jp

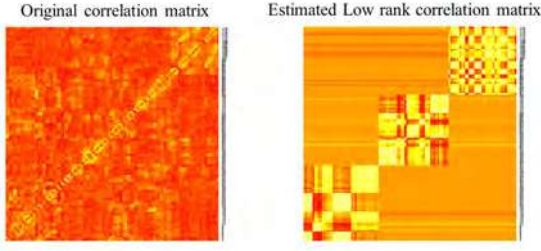


Fig. 1. An original matrix and estimated low rank correlation matrix (heat map).

2 Simultaneous analysis for both clustering of variables and low-rank approximation of correlation matrices

Here, we show the problem setting of the proposed method. Given correlation matrices of classes $\mathbf{R}_\ell = (r_{ij\ell})$ $r_{ij\ell} \in [-1, 1]$ ($i, j = 1, 2, \dots, p$; $\ell = 1, 2$), where p is the number of variables.

the proposed method estimate the distinctive correlation matrices for classes $\Psi_\ell = (\psi_{\ell so})$ $\psi_{\ell so} \in [-1, 1]$ ($\ell = 1, 2$; $s, o = 1, 2, \dots, p$). The estimated Ψ_ℓ satisfy the following structure

$$\Psi_1 = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & \mathbf{O} & \cdots & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \Psi_{12} & \cdots & \mathbf{O} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \cdots & \Psi_{1K} \end{bmatrix} \quad \text{and}$$

$$\Psi_2 = \begin{bmatrix} \Psi_{21} & \mathbf{O} & \cdots & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \Psi_{22} & \cdots & \mathbf{O} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \cdots & \Psi_{2K} \end{bmatrix}.$$

as a result of permutations for variables. Let K be the number of clusters for variables, \mathbf{O} be the matrix such that these elements are 0, and $\Psi_{\ell k} = (\psi_{\ell s_k o_k})$, $\psi_{\ell s_k o_k} \in [-1, 1]$ ($s_k, o_k = 1, 2, \dots, p$; $k = 1, 2, \dots, K$) be submatrix of Ψ_ℓ . Therefore, the proposed method can require clustering structure for the estimated correlation matrices. In addition, if differences between elements of Ψ_{1k} and those of Ψ_{2k} tend to be far from 0, we consider them as distinctive relations for these classes. On the other hands, if these differences are close to 0, these relations are considered as common networks for class

1 and class 2.

2.1 Objective function of the proposed method

Here, we provide the objective function of the proposed method. See Fig. 2. Fig. 2 indicates the image of the proposed method through the heat map. The yellow parts represent the elements with higher values, on the other hands, red parts indicate those with lower values.

Given correlation matrices for subjects \mathbf{R}_ℓ ($\ell = 1, 2$), and the number of clusters for variables K , the objective function of the proposed method is defined as follows:

$$L(\{\Phi_\ell\}_{\ell=1}^2, \mathbf{U} | \{\mathbf{R}_i\}_{i=1}^2) = \|\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2 - \mathbf{U}\mathbf{U}^T \odot (\Phi_1 - \Phi_2)\|^2 \quad (1)$$

subject to

$$\text{rank}(\Phi_\ell) = d \quad (\ell = 1, 2)$$

where $\mathbf{U} = (u_{jk})$ $u_{jk} \in \{0, 1\}$ ($j = 1, 2, \dots, p$; $k = 1, 2, \dots, K$) is indicator matrix such that

$$u_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{(variable } j \text{ belong to cluster } k) \\ 0 & \text{(others)} \end{cases},$$

$\Phi_\ell = (\phi_{\ell so})$, $\phi_{\ell so} \in [-1, 1]$ ($\ell = 1, 2$; $s, o = 1, 2, \dots, p$) is correlation matrices corresponding to class ℓ , $\|\cdot\|$ indicates Frobenius norm and \odot is Hadamard product such that $\mathbf{A} \odot \mathbf{B} = (a_{ij}b_{ij})$ for $\mathbf{A} = (a_{ij})$ and $\mathbf{B} = (b_{ij})$ ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, p$). In this objective function, Ψ_ℓ is described as follows:

$$\Psi_\ell = \mathbf{U}\mathbf{U}^T \odot \Phi_\ell \quad (\ell = 1, 2).$$

In this model, Ψ_ℓ can be decomposed into indicator matrix and correlation matrix.

The purpose of the method is $\{\Phi_\ell\}_{\ell=1}^2$ and \mathbf{U} are estimated such that Eq. (1) is minimized. From Eq. (1), if differences between elements of \mathbf{R}_1 and those of \mathbf{R}_2 are close to be 0, the difference between the estimated low rank correlations are estimated as 0. Therefore, we can achieve the sparse estimation. In addition to that, the differences between estimated low rank correlation matrices tend to be simple structure. Again, see Fig. 1. Therefore, it is easy to interpret the elements such that correlations between classes are different.

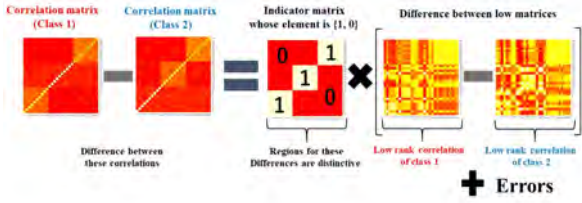


Fig. 2. Model of the proposed method through the heat map: the elements with yellow represent higher values, while those with red represent lower values.

2.2 Algorithm and Updated formula

Next, we show the algorithm of the proposed method. Here, Alternative least squares criterion (ALS) is used (Young et al., 1980). The summary of the algorithm is as follows:

Algorithm based on ALS

Step 0 Set initial values for Φ_ℓ ($\ell = 1, 2$), the number of clusters for variables K and threshold $\varepsilon > 0$.

Step 1 Update U , given Φ_ℓ ($\ell = 1, 2$).

Step 2 Update Φ_ℓ ($\ell = 1, 2$), given U .

Step 3 If the difference between the value of the objective function of the current step and the previous step is lower than ε , stopped the algorithm, else back to Step 1.

Next, we explain how to update these parameters.

Update U

Given Φ_ℓ , values of the objective function are calculated for n^K patterns since elements of U can be 0 or 1. The result is determined among these feasible areas such that the value of the objective function is minimized.

Update Φ_ℓ

Given U , Φ_ℓ can be updated based on Majorization algorithm (Pietersz and Groenen, 2004; Simon

and Abell, 2010). For the detail of majorization algorithm, see Borg and Groenen (2005).

For any correlation matrix Φ_ℓ , there exists $X_\ell = (\mathbf{x}_{1\ell}, \mathbf{x}_{2\ell}, \dots, \mathbf{x}_{p\ell})^T$ $\mathbf{x}_{j\ell} \in \mathbb{R}^d$ ($j = 1, 2, \dots, p$; $\ell = 1, 2$) such that $\Phi_\ell = X_\ell X_\ell^T$ constrained to $\|\mathbf{x}_{j\ell}\| = 1$. Therefore, the estimation problem for Φ_ℓ becomes those for X_ℓ . We derive the majorization function of Eq.(1), and the updated formula for X_ℓ based on the function.

Here, we set $UU^T = W = (w_{so})$ ($s, o = 1, 2, \dots, p$) to describe Eq.(1) briefly. First, to derive the updated formula of Φ_1 with class 1, corresponding the majorization function is shown.

$$\begin{aligned} L(\{\Phi_\ell\}_{\ell=1}^2, U | \{R_\ell\}_{\ell=1}^2) \\ = \|(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2) - W \odot (\Phi_1 - \Phi_2)\|^2 \\ = \|(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2 + W \odot \Phi_2) - W \odot \Phi_1\|^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Here, we set $(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2 + W \odot \Phi_2) = \mathbf{Q} = (q_{so})$ ($s, o = 1, 2, \dots, p$) and $\mathbf{Q} = \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_1^T$. Therefore, Eq. (2) is derived as follows:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{Q} - W \odot \Phi_1\|^2 \\ = \sum_{s \neq o} (q_{so} - w_{so} \mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{o1})^2 \\ = \sum_{s \neq o} q_{so}^2 - 2 \sum_{s \neq o} q_{so} w_{so} \mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{o1} + \sum_{s \neq o} w_{so} \mathbf{x}_{o1}^T \mathbf{x}_{s1} \mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{o1} \end{aligned} \quad (3)$$

To solve Eq.(3) with the constraints such that $\|\mathbf{x}_{j1}\| = 1$ by using Lagrangean method, the third term of Eq.(3) are replaced to the linear function of \mathbf{x}_{o1} . We define the following equation to solve \mathbf{x}_{o1} ;

$$\mathbf{B}_{o1} = \sum_{s \neq o} w_{so} \mathbf{x}_{s1} \mathbf{x}_{s1}^T,$$

In addition to that, let λ_{o1} be the maximum eigenvalue of \mathbf{B}_{o1} . Here, for any $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$ subject to $\|\mathbf{x}\| = 1$, the following inequality is satisfied;

$$\mathbf{x}^T (\mathbf{B}_{o1} - \lambda_{o1} \mathbf{I}_d) \mathbf{x} \leq 0 \quad (4)$$

In short, $\mathbf{B}_{o1} - \lambda_{o1} \mathbf{I}_d$ becomes negative semidefinite. Here, let $\mathbf{x}_{o1} \in \mathbb{R}^d$ and $\mathbf{y}_{o1} \in \mathbb{R}^d$ are coordinate of subject o corresponding the current step and the previous

step, respectively. From Eq.(4), the following inequality is satisfied:

$$(\mathbf{x}_{o1} - \mathbf{y}_{o1})^T (\mathbf{B}_{o1} - \lambda_{o1} \mathbf{I}_d) (\mathbf{x}_{o1} - \mathbf{y}_{o1}) \leq 0. \quad (5)$$

Therefore, the majorizing function of the third term of Eq.(3) is derived as follows

$$\mathbf{x}_{o1} \mathbf{B}_{o1} \mathbf{x}_{o1} \leq 2\lambda_{o1} + \mathbf{x}_{o1}^T (\mathbf{B}_{o1} - \lambda_{o1} \mathbf{I}_d) \mathbf{y}_{o1} - \mathbf{y}_{o1} \mathbf{B}_{o1} \mathbf{y}_{o1}. \quad (6)$$

From (6), we get the following majorizing function of Eq. (1) as follows:

$$\begin{aligned} & \sum_{s \neq o} q_{so}^2 - 2 \sum_{s \neq o} q_{so} w_{so} \mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{o1} + \sum_{s \neq o} w_{so} \mathbf{x}_{o1}^T \mathbf{x}_{s1} \mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{o1} \\ \leq & \sum_{s \neq o} q_{so}^2 - 2 \sum_{s \neq o} q_{so} w_{so} \mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{o1} \\ & + \sum_{s \neq o} w_{so} (2\lambda_{o1} + \mathbf{x}_{o1}^T (\mathbf{B}_{o1} - \lambda_{o1} \mathbf{I}_d) \mathbf{y}_{o1} - \mathbf{y}_{o1} \mathbf{B}_{o1} \mathbf{y}_{o1}) \end{aligned} \quad (7)$$

Based on Eq.(7), the updated formula can be derived as follows:

$$\mathbf{x}_{o1} \leftarrow \frac{\mathbf{z}_{o1}}{\|\mathbf{z}_{o1}\|} \quad (8)$$

where

$$\mathbf{z}_{o1} = \sum_{s \neq o} w_{so} q_{so} \mathbf{y}_{s1} - (\mathbf{B}_{o1} - \lambda_{o1} \mathbf{I}_d) \mathbf{y}_{o1}$$

Therefore, algorithm for estimating $\Phi_1 = \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_1^T$ is shown as follows:

Step (A1) Update \mathbf{X} based on Eq. (8)

Step (A2) Update the auxiliary variables such that

$$\mathbf{y}_{o1} \leftarrow \mathbf{x}_{o1}$$

Step (A3) Iterate Step (A) and Step (B) still the stop condition is satisfied

Here, in this paper, the stop condition of (A3) is set as the same way of Algorithm based on ALS.

For the estimation of $\Phi_2 = \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_2^T$, it can be conducted as the same way of estimating Φ_1 .

3 Numerical simulation

Here, to evaluate the clustering results for variables, numerical simulation is conducted through the artificial data. In this simulation, first, artificial correlation

Table 1. Factors of this simulation.

Factor name	levels	Description of the factor
Factor 1:methods	2	the proposal and the control
Factor 2:rank	29	2, 3, \dots , 30
Factor 3:noise	2	$n =$: 1000, 100

matrices for classes are generated such that these differences include true clustering structures. Next, the proposed method and tandem method are applied to the data and get these clustering results, where tandem method is consists of two method such as dimensional reduction method and clustering method. For the detail of the tandem method, we will explain later. Finally, Adjusted Rand Index (ARI) (Hubert and Arabie, 1985) between true clustering results and these clustering results are calculated. Here, ARI is similarity index between two clustering results. If the value is close to 1, these clustering results are considered as very similar. On the other hands, if the value is close to 0, these clustering results are considered as distant. Therefore, we compared two methods though the degree of recovery for the true clustering structure.

3.1 Simulation design

We set the number of variables as $p = 30$ and the number of clusters as $K = 3$. Table 1 represents these factors of this simulation. There is $2 \times 29 \times 2 = 116$ patterns and, by each pattern, artificial data are generated 100 times.

Here, we show you about the factors of this simulation.

Factor 1

Here, in this simulation, clustering results of two methods are compared though ARI. One is the proposed method, and the other method is tandem method. The tandem method consists of two steps as follows.

Tandem method

Step 1 The low rank matrix corresponding to the difference between two correlation matrices is es-

timated based on the following objective function.

$$L(\{\Phi_\ell\}_{\ell=1}^2 | \{R_\ell\}_{\ell=1}^2) = \|(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2) - (\Phi_1 - \Phi_2)\|^2 \quad (9)$$

Eq.(9) indicates the objective function for the estimation of difference matrix between two correlation matrices without clustering. The estimation is easy to be conducted by the majorization function.

Step 2 From the estimation results $\Phi_\ell = \mathbf{X}_\ell \mathbf{X}_\ell^T$ in step1, k -means is applied to the estimated difference $\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2$ and get the clustering results.

The purpose of the comparison is that we would like to show the meaning of simultaneous estimation through the simulation. In this simulation, these methods run from 100 different initial values and adopt the result among them such that the value of the objective function is minimized, respectively, since these results depend on initial values.

Factor 2

There are 29 levels such as 2, 3, ..., 30. Therefore, these two methods are applied to the data by rank from 2 to 30,

Factor 3

This factor consists of two levels. In the first level, true correlation matrices are generated from the multivariate data with the number of subject = 1000. In the level, the situation is considered as noiseless. On the other hands, in the second level, true correlation matrices are generated from the multivariate data with the number of subject = 100. In the level, the data is considered as including noise.

Finally, we explain how to generate data with true clustering structure. Artificial data for class 1 $\mathbf{X}_1 \in \mathbb{R}^{n \times p}$ and class 2 $\mathbf{X}_2 \in \mathbb{R}^{n \times p}$ are generated based on multivariate normal distribution as follows:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1 &\sim N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}_1) \\ \mathbf{X}_2 &\sim N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}_2) \end{aligned}$$

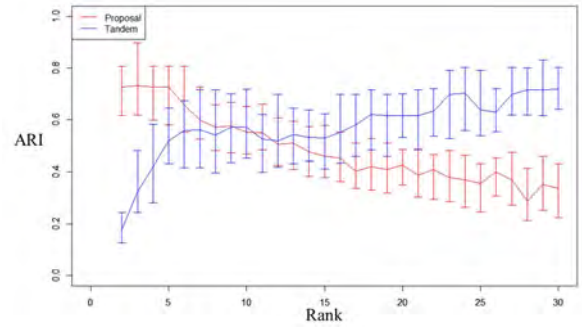


Fig. 3. Results of ARI without noise.

where $\boldsymbol{\mu} = (0, 0, \dots, 0)^T$ with the length of p , $\boldsymbol{\Sigma}_1$ and $\boldsymbol{\Sigma}_2$ are covariance matrix of variables for class 1 and class 2 as follows:

$$\boldsymbol{\Sigma}_1 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{11} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \boldsymbol{\Sigma}_{13} \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \boldsymbol{\Sigma}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \boldsymbol{\Sigma}_{22} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \boldsymbol{\Sigma}_{32} \end{bmatrix}$$

where $\boldsymbol{\Sigma}_{11}$, $\boldsymbol{\Sigma}_{13}$ and $\boldsymbol{\Sigma}_{23}$ are 12×12 matrix and these elements are 0.2. In addition to that, $\boldsymbol{\Sigma}_{22}$ is 12×12 matrix and these elements are 0.1.

3.2 Simulation results

In this subsection, we show you ARI as a results. These clustering results of ARIs without noise and those with noise are shown as Figure 3 and Figure 4, respectively. In both Figure 3 and Figure 4, these vertical axes indicate the rank for these methods and horizontal axes indicate ARIs. For these ARIs, we plot three different points such as 25% quantile point, median and 75%point.

From Figure 3 and Figure 4, we can confirm that the clustering results of the proposed method is superior to those of tandem method irrespective to including or not including noise, when these estimated ranks are lower cases. Therefore, in the problem setting, using the proposed method is matched our motivation. When the rank is higher, the clustering results of the proposed method is worse. However, in the problem setting, we could not consider the situation. Therefore, we concluded that the proposed method is good recovery in the problem setting.

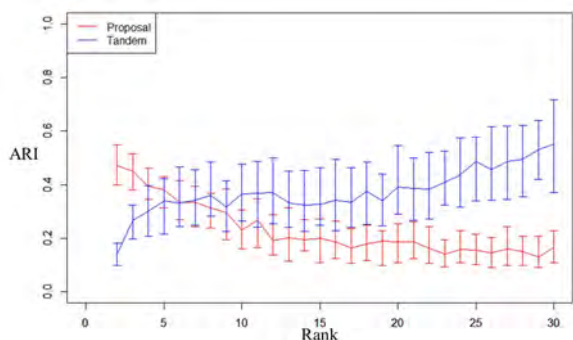


Fig. 4. Results of ARI with noise.

4 Conclusion

In this paper, we proposed sparse estimation of the differences between low-rank correlation matrices corresponding to classes. The advantage of this method is that it is easy to interpret the difference parts between classes since the estimated matrix is sparse and the contrast among elements is larger. For the evaluation of clustering results, we show the superiority of the proposed method and the necessity of optimization for both indicator matrix U and distinctive correlation matrices Φ_ℓ through the numerical simulation. Our proposed method can be considered as a generalization method of Simon and Abell (2010) since if $W = UU^T$ is fixed beforehand in Eq.(1).

It is sure that the proposed method can detect clustering structure for variables well, however, it needs to determine the number of clusters and the number of dimensions. One approach for determining these values is cross validation method (e.g. Wang, 2010) as a future work. Therefore, it needs index to evaluate the data where the assumption is satisfied or not.

Reference

- 1) Borg, I. and Groenen, P.J.F. (2005) *Modern multidimensional scaling: Theory and applications*. 2nd Ed. New York: Springer.
- 2) Filippi, M. (2009) *FMRI Techniques and Protocols*, Springer Protocols, New York: Humana Press.
- 3) Friston, K.J., Worsely, K. J., Frackowiak, R.S.J., Mazziotta, J.C., and Evans, A. C. (2007), *Statistical Parametric Mapping: The Anof Functional Brain Images*, London: Academic Press.
- 4) Hubert, L., and Arabie, P. (1985). Comparing partitions. *Journal of Classification*, **2**, 193-218.
- 5) Pietersz, R. and Groenen, J.F (2004), Rank Reduction of Correlation Matrices by Majorization, *Quant. Finance*, **4** , 649–662.
- 6) Simon, D. and Abell, J.: A (2010), Majorization Algorithm for Constrained Correlation Matrix Approximation, *Linear Algebra and its Applications*, **432**, 1152–1164.
- 7) Susan, W. and Nieto-Castanon, A. (2012) Conn: a functional connectivity toolbox for correlated and anticorrelated brain networks, *Brain connectivity*, **2**(3), 125–141.
- 8) Varoquaux, G. and Craddock R.C. (2013), Learning and comparing functional connectomes across subjects, *NeuroImage*, **80**(15), 405–415.
- 9) Wang, J. (2010). Consistent selection of the number of clusters via crossvalidation. *Biometrika*, **97**, 893-904.
- 10) Young, F. W., De Leeuw, J. A. N., and Takane, Y. (1980). Quantifying qualitative data, In E.D. Lantermann and H.Feger (Eds), *Similarity and choice*. Bern: Huber. *Nature*, **231**, 39-41.

Simultaneous analysis for both clustering of variables and low-rank approximation of correlation matrices based on Majorization

Kensuke Tanioka^{*}, Satoru Hiwa^{**}, Tomoyuki Horoyasu^{**} and Hiroshi Yadohisa^{**}

(Received June 4, 2018)

Given two different correlation matrices between variables, it is important to detect and interpret the relations such that the difference is larger. For example, in fMRI data analysis, such the situation is observed. Given two correlation matrices corresponding to classes between region of interests (ROIs), it is important to detect ROIs such that these functions of distinctive classes are revealed. However, when these differences are interpreted, it becomes complicated since there are many correlations and these values takes various values. Therefore, it is suitable to achieve the purpose for detecting the sparse low rank difference matrix between classes. In this paper, we proposed simultaneous analysis of clustering and low-rank estimation for the difference between correlation matrices based on Majorization algorithm.

Key words : dimensional reduction, simultaneous optimization, sparse estimation

1 Introduction

In fMRI data analysis, it is important to detect functional connectivities between regions of interests (ROIs) for brains (e.g. Filippi, 2009; Friston et al., 2007). In these domains, functional connectivities are observed as correlations between signals of ROIs. Given these correlation matrices of subjects and their information of classes, it is important to reveal the functional connectivities such that these differences between classes are larger. To detect such the distinctive networks for each class, various methods have been proposed. (Varoquaux et al., 2013)

However, it is difficult to interpret these relations between ROIs when the differences of correlations between ROIs are small. In the situation, estimating low rank correlation matrix is useful. See Fig. 1. While it is difficult to interpret the relation between variables from the original matrix, it becomes easy to interpret the relation between variables by using low rank correlation matrix since these differences of the estimated

correlations tend to become larger. Therefore, it is important to estimate low rank correlation matrix from the perspective of interpretation.

In this paper, we proposed simultaneous analysis of estimating low rank matrix for the difference between two correlation matrices and clustering variables., given correlation matrices for classes. Pietersz and Groenen (2004) proposed rank reduction of correlation matrices by majorization and there is good properties. Therefore, the proposed method adopts majorization algorithm. In addition, Simon and Abell (2010) proposed a majorization algorithm for constrained correlation matrix approximation, such that some of elements of the correlation matrix are constrained to 0. Our method is based on these methods and low rank matrix can be estimated based on these algorithm, easily.

The remains of this paper is as follows. In section 2, we show the motivation, and the objective function of the proposed method. In section 3, these results of the numerical simulation is shown. Finally, we conclude this paper.

^{*} Wakayama Medical University, Wakayama

Telephone : +81-73-441-0867, E-mail : ktaniok@wakayama-med.ac.jp

^{**} Doshisha University, Kyoto

Telephone : +81-774-65-6932, E-mail : hiro@is.nagoya-u.ac.jp

Telephone : +81-774-65-6381, E-mail : shiwa@mail.doshisha.ac.jp

Telephone : +81-774-65-7657, E-mail : hyadohis@mail.doshisha.ac.jp

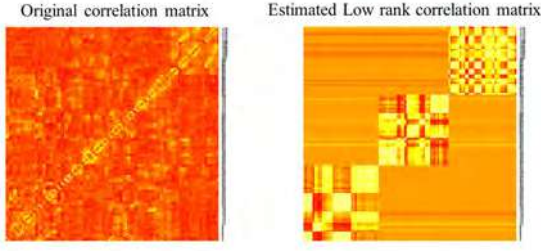


Fig. 1. An original matrix and estimated low rank correlation matrix (heat map).

2 Simultaneous analysis for both clustering of variables and low-rank approximation of correlation matrices

Here, we show the problem setting of the proposed method. Given correlation matrices of classes $\mathbf{R}_\ell = (r_{ij\ell})$ $r_{ij\ell} \in [-1, 1]$ ($i, j = 1, 2, \dots, p$; $\ell = 1, 2$), where p is the number of variables.

the proposed method estimate the distinctive correlation matrices for classes $\Psi_\ell = (\psi_{\ell so})$ $\psi_{\ell so} \in [-1, 1]$ ($\ell = 1, 2$; $s, o = 1, 2, \dots, p$). The estimated Ψ_ℓ satisfy the following structure

$$\Psi_1 = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & \mathbf{O} & \cdots & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \Psi_{12} & \cdots & \mathbf{O} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \cdots & \Psi_{1K} \end{bmatrix} \quad \text{and}$$

$$\Psi_2 = \begin{bmatrix} \Psi_{21} & \mathbf{O} & \cdots & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \Psi_{22} & \cdots & \mathbf{O} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \cdots & \Psi_{2K} \end{bmatrix}.$$

as a result of permutations for variables. Let K be the number of clusters for variables, \mathbf{O} be the matrix such that these elements are 0, and $\Psi_{\ell k} = (\psi_{\ell s_k o_k})$, $\psi_{\ell s_k o_k} \in [-1, 1]$ ($s_k, o_k = 1, 2, \dots, p$; $k = 1, 2, \dots, K$) be submatrix of Ψ_ℓ . Therefore, the proposed method can require clustering structure for the estimated correlation matrices. In addition, if differences between elements of Ψ_{1k} and those of Ψ_{2k} tend to be far from 0, we consider them as distinctive relations for these classes. On the other hands, if these differences are close to 0, these relations are considered as common networks for class

1 and class 2.

2.1 Objective function of the proposed method

Here, we provide the objective function of the proposed method. See Fig. 2. Fig. 2 indicates the image of the proposed method through the heat map. The yellow parts represent the elements with higher values, on the other hands, red parts indicate those with lower values.

Given correlation matrices for subjects \mathbf{R}_ℓ ($\ell = 1, 2$), and the number of clusters for variables K , the objective function of the proposed method is defined as follows:

$$L(\{\Phi_\ell\}_{\ell=1}^2, \mathbf{U} | \{\mathbf{R}_i\}_{i=1}^2) = \|\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2 - \mathbf{U}\mathbf{U}^T \odot (\Phi_1 - \Phi_2)\|^2 \quad (1)$$

subject to

$$\text{rank}(\Phi_\ell) = d \quad (\ell = 1, 2)$$

where $\mathbf{U} = (u_{jk})$ $u_{jk} \in \{0, 1\}$ ($j = 1, 2, \dots, p$; $k = 1, 2, \dots, K$) is indicator matrix such that

$$u_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{(variable } j \text{ belong to cluster } k) \\ 0 & \text{(others)} \end{cases},$$

$\Phi_\ell = (\phi_{\ell so})$, $\phi_{\ell so} \in [-1, 1]$ ($\ell = 1, 2$; $s, o = 1, 2, \dots, p$) is correlation matrices corresponding to class ℓ , $\|\cdot\|$ indicates Frobenius norm and \odot is Hadamard product such that $\mathbf{A} \odot \mathbf{B} = (a_{ij}b_{ij})$ for $\mathbf{A} = (a_{ij})$ and $\mathbf{B} = (b_{ij})$ ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, p$). In this objective function, Ψ_ℓ is described as follows:

$$\Psi_\ell = \mathbf{U}\mathbf{U}^T \odot \Phi_\ell \quad (\ell = 1, 2).$$

In this model, Ψ_ℓ can be decomposed into indicator matrix and correlation matrix.

The purpose of the method is $\{\Phi_\ell\}_{\ell=1}^2$ and \mathbf{U} are estimated such that Eq. (1) is minimized. From Eq. (1), if differences between elements of \mathbf{R}_1 and those of \mathbf{R}_2 are close to be 0, the difference between the estimated low rank correlations are estimated as 0. Therefore, we can achieve the sparse estimation. In addition to that, the differences between estimated low rank correlation matrices tend to be simple structure. Again, see Fig. 1. Therefore, it is easy to interpret the elements such that correlations between classes are different.

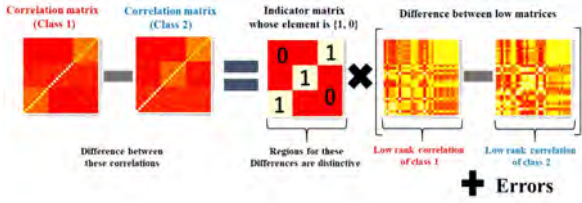


Fig. 2. Model of the proposed method through the heat map: the elements with yellow represent higher values, while those with red represent lower values.

2.2 Algorithm and Updated formula

Next, we show the algorithm of the proposed method. Here, Alternative least squares criterion (ALS) is used (Young et al., 1980). The summary of the algorithm is as follows:

Algorithm based on ALS

Step 0 Set initial values for Φ_ℓ ($\ell = 1, 2$), the number of clusters for variables K and threshold $\varepsilon > 0$.

Step 1 Update U , given Φ_ℓ ($\ell = 1, 2$).

Step 2 Update Φ_ℓ ($\ell = 1, 2$), given U .

Step 3 If the difference between the value of the objective function of the current step and the previous step is lower than ε , stopped the algorithm, else back to Step 1.

Next, we explain how to update these parameters.

Update U

Given Φ_ℓ , values of the objective function are calculated for n^K patterns since elements of U can be 0 or 1. The result is determined among these feasible areas such that the value of the objective function is minimized.

Update Φ_ℓ

Given U , Φ_ℓ can be updated based on Majorization algorithm (Pietersz and Groenen, 2004; Simon

and Abell, 2010). For the detail of majorization algorithm, see Borg and Groenen (2005).

For any correlation matrix Φ_ℓ , there exists $X_\ell = (\mathbf{x}_{1\ell}, \mathbf{x}_{2\ell}, \dots, \mathbf{x}_{p\ell})^T$ $\mathbf{x}_{j\ell} \in \mathbb{R}^d$ ($j = 1, 2, \dots, p$; $\ell = 1, 2$) such that $\Phi_\ell = X_\ell X_\ell^T$ constrained to $\|\mathbf{x}_{j\ell}\| = 1$. Therefore, the estimation problem for Φ_ℓ becomes those for X_ℓ . We derive the majorization function of Eq.(1), and the updated formula for X_ℓ based on the function.

Here, we set $UU^T = W = (w_{so})$ ($s, o = 1, 2, \dots, p$) to describe Eq.(1) briefly. First, to derive the updated formula of Φ_1 with class 1, corresponding the majorization function is shown.

$$\begin{aligned} L(\{\Phi_\ell\}_{\ell=1}^2, U | \{R_\ell\}_{\ell=1}^2) \\ = \|(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2) - \mathbf{W} \odot (\Phi_1 - \Phi_2)\|^2 \\ = \|(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2 + \mathbf{W} \odot \Phi_2) - \mathbf{W} \odot \Phi_1\|^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Here, we set $(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2 + \mathbf{W} \odot \Phi_2) = \mathbf{Q} = (q_{so})$ ($s, o = 1, 2, \dots, p$) and $\mathbf{Q} = \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_1^T$. Therefore, Eq. (2) is derived as follows:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{Q} - \mathbf{W} \odot \Phi_1\|^2 \\ = \sum_{s \neq o} (q_{so} - w_{so} \mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{o1})^2 \\ = \sum_{s \neq o} q_{so}^2 - 2 \sum_{s \neq o} q_{so} w_{so} \mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{o1} + \sum_{s \neq o} w_{so} \mathbf{x}_{o1}^T \mathbf{x}_{s1} \mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{o1} \end{aligned} \quad (3)$$

To solve Eq.(3) with the constraints such that $\|\mathbf{x}_{j1}\| = 1$ by using Lagrangean method, the third term of Eq.(3) are replaced to the linear function of \mathbf{x}_{o1} . We define the following equation to solve \mathbf{x}_{o1} ;

$$\mathbf{B}_{o1} = \sum_{s \neq o} w_{so} \mathbf{x}_{s1} \mathbf{x}_{s1}^T,$$

In addition to that, let λ_{o1} be the maximum eigenvalue of \mathbf{B}_{o1} . Here, for any $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$ subject to $\|\mathbf{x}\| = 1$, the following inequality is satisfied;

$$\mathbf{x}^T (\mathbf{B}_{o1} - \lambda_{o1} \mathbf{I}_d) \mathbf{x} \leq 0 \quad (4)$$

In short, $\mathbf{B}_{o1} - \lambda_{o1} \mathbf{I}_d$ becomes negative semidefinite. Here, let $\mathbf{x}_{o1} \in \mathbb{R}^d$ and $\mathbf{y}_{o1} \in \mathbb{R}^d$ are coordinate of subject o corresponding the current step and the previous

step, respectively. From Eq.(4), the following inequality is satisfied:

$$(\mathbf{x}_{o1} - \mathbf{y}_{o1})^T (\mathbf{B}_{o1} - \lambda_{o1} \mathbf{I}_d) (\mathbf{x}_{o1} - \mathbf{y}_{o1}) \leq 0. \quad (5)$$

Therefore, the majorizing function of the third term of Eq.(3) is derived as follows

$$\mathbf{x}_{o1} \mathbf{B}_{o1} \mathbf{x}_{o1} \leq 2\lambda_{o1} + \mathbf{x}_{o1}^T (\mathbf{B}_{o1} - \lambda_{o1} \mathbf{I}_d) \mathbf{y}_{o1} - \mathbf{y}_{o1} \mathbf{B}_{o1} \mathbf{y}_{o1}. \quad (6)$$

From (6), we get the following majorizing function of Eq. (1) as follows:

$$\begin{aligned} & \sum_{s \neq o} q_{so}^2 - 2 \sum_{s \neq o} q_{so} w_{so} \mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{o1} + \sum_{s \neq o} w_{so} \mathbf{x}_{o1}^T \mathbf{x}_{s1} \mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{o1} \\ \leq & \sum_{s \neq o} q_{so}^2 - 2 \sum_{s \neq o} q_{so} w_{so} \mathbf{x}_{s1}^T \mathbf{x}_{o1} \\ & + \sum_{s \neq o} w_{so} (2\lambda_{o1} + \mathbf{x}_{o1}^T (\mathbf{B}_{o1} - \lambda_{o1} \mathbf{I}_d) \mathbf{y}_{o1} - \mathbf{y}_{o1} \mathbf{B}_{o1} \mathbf{y}_{o1}) \end{aligned} \quad (7)$$

Based on Eq.(7), the updated formula can be derived as follows:

$$\mathbf{x}_{o1} \leftarrow \frac{\mathbf{z}_{o1}}{\|\mathbf{z}_{o1}\|} \quad (8)$$

where

$$\mathbf{z}_{o1} = \sum_{s \neq o} w_{so} q_{so} \mathbf{y}_{s1} - (\mathbf{B}_{o1} - \lambda_{o1} \mathbf{I}_d) \mathbf{y}_{o1}$$

Therefore, algorithm for estimating $\Phi_1 = \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_1^T$ is shown as follows:

Step (A1) Update \mathbf{X} based on Eq. (8)

Step (A2) Update the auxiliary variables such that

$$\mathbf{y}_{o1} \leftarrow \mathbf{x}_{o1}$$

Step (A3) Iterate Step (A) and Step (B) still the stop condition is satisfied

Here, in this paper, the stop condition of (A3) is set as the same way of Algorithm based on ALS.

For the estimation of $\Phi_2 = \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_2^T$, it can be conducted as the same way of estimating Φ_1 .

3 Numerical simulation

Here, to evaluate the clustering results for variables, numerical simulation is conducted through the artificial data. In this simulation, first, artificial correlation

Table 1. Factors of this simulation.

Factor name	levels	Description of the factor
Factor 1:methods	2	the proposal and the control
Factor 2:rank	29	2, 3, \dots , 30
Factor 3:noise	2	$n =$: 1000, 100

matrices for classes are generated such that these differences include true clustering structures. Next, the proposed method and tandem method are applied to the data and get these clustering results, where tandem method is consists of two method such as dimensional reduction method and clustering method. For the detail of the tandem method, we will explain later. Finally, Adjusted Rand Index (ARI) (Hubert and Arabie, 1985) between true clustering results and these clustering results are calculated. Here, ARI is similarity index between two clustering results. If the value is close to 1, these clustering results are considered as very similar. On the other hands, if the value is close to 0, these clustering results are considered as distant. Therefore, we compared two methods though the degree of recovery for the true clustering structure.

3.1 Simulation design

We set the number of variables as $p = 30$ and the number of clusters as $K = 3$. Table 1 represents these factors of this simulation. There is $2 \times 29 \times 2 = 116$ patterns and, by each pattern, artificial data are generated 100 times.

Here, we show you about the factors of this simulation.

Factor 1

Here, in this simulation, clustering results of two methods are compared though ARI. One is the proposed method, and the other method is tandem method. The tandem method consists of two steps as follows.

Tandem method

Step 1 The low rank matrix corresponding to the difference between two correlation matrices is es-

timated based on the following objective function.

$$L(\{\Phi_\ell\}_{\ell=1}^2 | \{R_\ell\}_{\ell=1}^2) = \|(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2) - (\Phi_1 - \Phi_2)\|^2 \quad (9)$$

Eq.(9) indicates the objective function for the estimation of difference matrix between two correlation matrices without clustering. The estimation is easy to be conducted by the majorization function.

Step 2 From the estimation results $\Phi_\ell = \mathbf{X}_\ell \mathbf{X}_\ell^T$ in step1, k -means is applied to the estimated difference $\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2$ and get the clustering results.

The purpose of the comparison is that we would like to show the meaning of simultaneous estimation through the simulation. In this simulation, these methods run from 100 different initial values and adopt the result among them such that the value of the objective function is minimized, respectively, since these results depend on initial values.

Factor 2

There are 29 levels such as 2, 3, ..., 30. Therefore, these two methods are applied to the data by rank from 2 to 30,

Factor 3

This factor consists of two levels. In the first level, true correlation matrices are generated from the multivariate data with the number of subject = 1000. In the level, the situation is considered as noiseless. On the other hands, in the second level, true correlation matrices are generated from the multivariate data with the number of subject = 100. In the level, the data is considered as including noise.

Finally, we explain how to generate data with true clustering structure. Artificial data for class 1 $\mathbf{X}_1 \in \mathbb{R}^{n \times p}$ and class 2 $\mathbf{X}_2 \in \mathbb{R}^{n \times p}$ are generated based on multivariate normal distribution as follows:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1 &\sim N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}_1) \\ \mathbf{X}_2 &\sim N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}_2) \end{aligned}$$

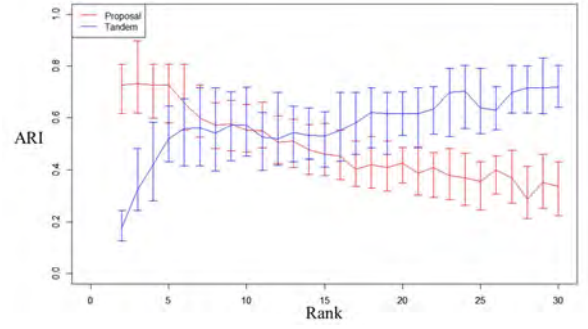


Fig. 3. Results of ARI without noise.

where $\boldsymbol{\mu} = (0, 0, \dots, 0)^T$ with the length of p , $\boldsymbol{\Sigma}_1$ and $\boldsymbol{\Sigma}_2$ are covariance matrix of variables for class 1 and class 2 as follows:

$$\boldsymbol{\Sigma}_1 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{11} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \boldsymbol{\Sigma}_{13} \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \boldsymbol{\Sigma}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \boldsymbol{\Sigma}_{22} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \boldsymbol{\Sigma}_{32} \end{bmatrix}$$

where $\boldsymbol{\Sigma}_{11}$, $\boldsymbol{\Sigma}_{13}$ and $\boldsymbol{\Sigma}_{23}$ are 12×12 matrix and these elements are 0.2. In addition to that, $\boldsymbol{\Sigma}_{22}$ is 12×12 matrix and these elements are 0.1.

3.2 Simulation results

In this subsection, we show you ARI as a results. These clustering results of ARIs without noise and those with noise are shown as Figure 3 and Figure 4, respectively. In both Figure 3 and Figure 4, these vertical axes indicate the rank for these methods and horizontal axes indicate ARIs. For these ARIs, we plot three different points such as 25% quantile point, median and 75%point.

From Figure 3 and Figure 4, we can confirm that the clustering results of the proposed method is superior to those of tandem method irrespective to including or not including noise, when these estimated ranks are lower cases. Therefore, in the problem setting, using the proposed method is matched our motivation. When the rank is higher, the clustering results of the proposed method is worse. However, in the problem setting, we could not consider the situation. Therefore, we concluded that the proposed method is good recovery in the problem setting.

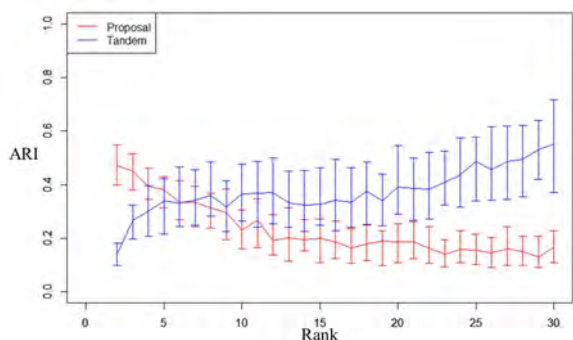


Fig. 4. Results of ARI with noise.

4 Conclusion

In this paper, we proposed sparse estimation of the differences between low-rank correlation matrices corresponding to classes. The advantage of this method is that it is easy to interpret the difference parts between classes since the estimated matrix is sparse and the contrast among elements is larger. For the evaluation of clustering results, we show the superiority of the proposed method and the necessity of optimization for both indicator matrix U and distinctive correlation matrices Φ_ℓ through the numerical simulation. Our proposed method can be considered as a generalization method of Simon and Abell (2010) since if $W = UU^T$ is fixed beforehand in Eq.(1).

It is sure that the proposed method can detect clustering structure for variables well, however, it needs to determine the number of clusters and the number of dimensions. One approach for determining these values is cross validation method (e.g. Wang, 2010) as a future work. Therefore, it needs index to evaluate the data where the assumption is satisfied or not.

Reference

- 1) Borg, I. and Groenen, P.J.F. (2005) *Modern multidimensional scaling: Theory and applications*. 2nd Ed. New York: Springer.
- 2) Filippi, M. (2009) *FMRI Techniques and Protocols*, Springer Protocols, New York: Humana Press.
- 3) Friston, K.J., Worsely, K. J., Frackowiak, R.S.J., Mazziotta, J.C., and Evans, A. C. (2007), *Statistical Parametric Mapping: The Anof Functional Brain Images*, London: Academic Press.
- 4) Hubert, L., and Arabie, P. (1985). Comparing partitions. *Journal of Classification*, **2**, 193-218.
- 5) Pietersz, R. and Groenen, J.F (2004), Rank Reduction of Correlation Matrices by Majorization, *Quant. Finance*, **4** , 649–662.
- 6) Simon, D. and Abell, J.: A (2010), Majorization Algorithm for Constrained Correlation Matrix Approximation, *Linear Algebra and its Applications*, **432**, 1152–1164.
- 7) Susan, W. and Nieto-Castanon, A. (2012) Conn: a functional connectivity toolbox for correlated and anticorrelated brain networks, *Brain connectivity*, **2**(3), 125–141.
- 8) Varoquaux, G. and Craddock R.C. (2013), Learning and comparing functional connectomes across subjects, *NeuroImage*, **80**(15), 405–415.
- 9) Wang, J. (2010). Consistent selection of the number of clusters via crossvalidation. *Biometrika*, **97**, 893-904.
- 10) Young, F. W., De Leeuw, J. A. N., and Takane, Y. (1980). Quantifying qualitative data, In E.D. Lantermann and H.Feger (Eds), *Similarity and choice*. Bern: Huber. *Nature*, **231**, 39-41.

GC-MS による呼気分析—運転中のストレスモニタリングに向けた基礎研究—

大江洋平・桂田誠也・栗田裕樹・久保園 侑介・太田哲男

1. はじめに

人は、ストレスを受けることにより状態が変化する。この変化は、本人が自覚する場合や外から見てわかる場合もあるが、客観的な判断方法の確立が必要とされる。そのため、近年、疾病予防などの観点からストレスの評価法に注目が集まっており、それらは主に唾液中のコルチゾール、アミラーゼを指標としている。¹⁾ コルチゾールは、ストレスとの関連で最も研究されている物質であり、心理的・身体的な健康状態を考える上でも重要なホルモンである。²⁾ アミラーゼは唾液に含まれるグリコシド結合を加水分解する化酵素であり、交感神経系の直接神経作用とノルアドレナリン作用の両作用で分泌され、ストレスにより増加することが知られている。³⁾

一方、乗用車保有台数および運転免許保有者数は年々増加傾向にあり、ドライバのストレスもそれに伴い増加すると考えられる。運転中のストレスは危険運転さらには事故を誘発することになるため、運転中のドライバのストレス計測や異常に関する警鐘のフィードバックが事故防止につながる事が期待される。しかしながら、上述のようなストレス測定法では、唾液サンプルの採取が車の運転中などにおいて困難な場合も多いため、現実的ではない。

そこで、本研究ではストレス計測の試料として、呼気に焦点を当てた。呼気は呼吸をしている以上、常に体外に排出されるため非侵襲を保てる。また、唾液成分の変動に伴い、そこにも何らかの成分変化が起こると考えている。本研究の全体像としては、呼気やその揮発成分が呼気に含まれる唾液などの非侵襲的に得られる試料に含まれる物質を分析し、そこで得られた新たなストレスマーカーやその特徴量を反映した簡便な測定法の検討へと展開し、最終的には、運転中ストレスのリアルタイム測定を実現し、安全運転システムの構築の一助になることを目的としている。昨年度までに、呼気採取実験系、測

定系に関する検討を行い、呼気からアセトンなど通常呼気に含まれる物質を含む多数の揮発性有機物質 (Volatile Organic Compound: VOCs) を計測できることが明らかとなった。本成果報告では、ストレスタスク下にある被験者の呼気分析、唾液中コルチゾール濃度分析、および STAI 評価を比較検討することでそれら VOCs とストレスとの関係に迫った。

2. 装置および実験方法

2.1 装置およびサンプル

2.1.1 GC-MS

ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS, 島津製作所社製 GC-2010/PARVUM 2 システム) に、サーマルディソープションシステム (島津製作所社製 TD-20) を連結し、呼気等の分析に用いた。

2.1.2 呼気サンプル

呼気サンプルは、実験者自ら捕集バックに吹き込み、特に保存することなく、そのまま使用した。

2.1.3. 唾液サンプル

唾液サンプルは、廣安教授の協力のもと、ストレスタスクの被験者から採取したものを使用した。

2.2 実験方法

2.2.1 呼気・唾液サンプルの分析

ストレス時の呼気成分の調査を行うために Fig.1 に示したタイムテーブルに従って、呼気、唾液の採取を行った。また、STAI を用いてタスク前後のストレス度合の調査を行った。

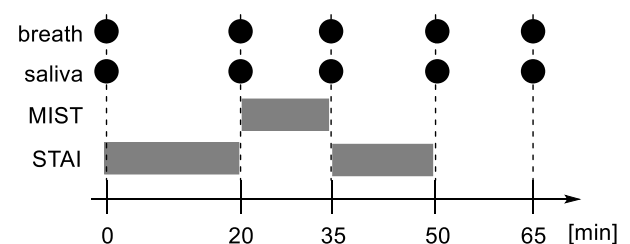


Fig.1 実験のタイムテーブル

2.2.2 処理手順

He ガスを予め2分間パージした捕集管 (充填剤: TenaxTA+活性炭) に呼気サンプルを吸着後, 内部標準として ethyl methacrylate 0.02 μ L を添加した. この捕集管をさらに He ガスで2分間パージした後, TD-GC-MS システムによる質量分析を行った. また, 採取した唾液サンプルは中のコルチゾール濃度は ELISA/EIA 法により測定した.

3. 結果および考察

3.1 STAI 得点

ストレスタスクを行う前後で実施した STAI の結果は Fig.2 のようになった. 数字は被験者番号, A はストレス負荷ありの実験であり, B はストレス負荷をかけない対照実験となる. STAI の得点が高いほどストレス強度が高いことから, 被験者 1,2 および 4 はストレスタスクの影響を受けていると考えられる.

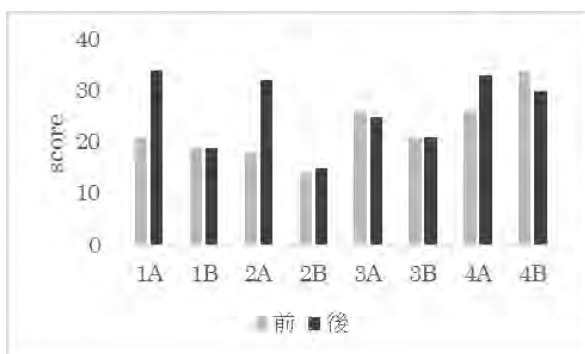


Fig.2 STAI 得点

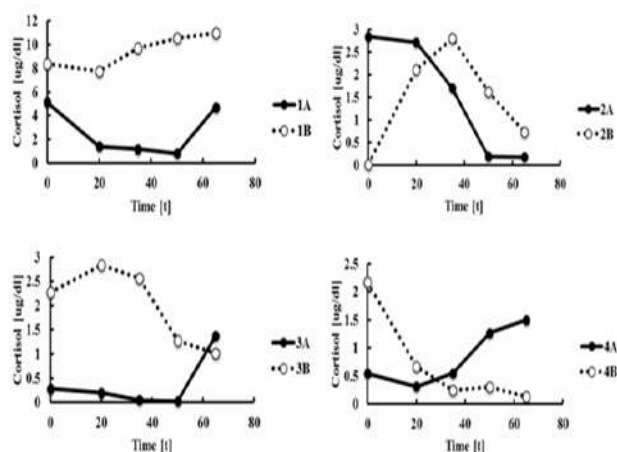


Fig.3 コルチゾール濃度変化

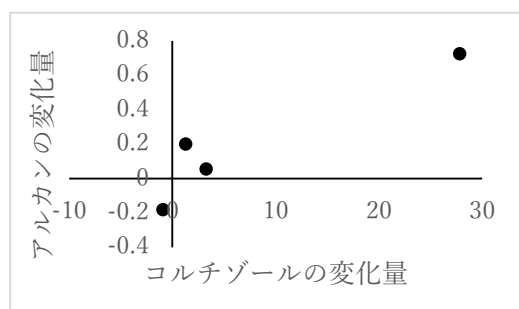


Fig.4 変化量の相関

3.2 コルチゾール濃度

呼気採取時に採取した唾液中コルチゾール濃度変化を Fig.3 に示す. コルチゾール濃度は, ストレスを受けた 20~30 分後に上昇値のピークを迎えることが知られており,³⁾ 被験者 1,3 および 4 はこの実験の試験によりストレスを受けていると考えられる. この結果は STAI アンケートとは異なるが, 表面化していないストレスを反映しているためではないかとも考えられる.

3.3 呼気成分

最後に, 呼気成分の GC-MS 解析を行った. その結果, 全被験者に共通した VOC とコルチゾールとの関係性について検討した. 実験中のコルチゾールの最大変化量と VOC 成分の最大変化量の関係を調べたところ, ある長鎖アルカンとコルチゾールとの間に相関が確認された (Fig. 4).

4. 結論

呼気サンプルの GC-MS 測定を行ったところ, ストレス指標のコルチゾールの濃度変化と似た変化を示す物質を見つけることができた. 今後, この物質の量的変化とストレスとの関連性を精査することとしている.

5. 参考文献

- 1) 井澤修平 他, 日本補完代替医療学誌, 2007, 4, 91-101.
- 2) BS McEwen, Neuropsychopharmacology, 2000, 22, 108-124.
- 3) 山口昌樹, 日本薬理学雑誌, 2007, 129(2), 80-84.

Auditory attention modulated by maternal experience in Mongolian gerbil (*Meriones unguiculatus*)

Yuta Harada, Yuta Tamai, Kohta I. Kobayasi*

Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*) have been studied in a field of auditory physiology for longer than two decades. We recently reported that the animal have at least 12 distinct types of vocalization and used them for communication. The finding made the animal a variable model for uncovering the neural underpinning of vocal communication. In this study, we investigate the mother-infant vocal interaction. When pups of gerbil are isolated from their mothers or littermates, they often emit ultrasounds called “isolation call”. We tested pup-retrieving behavior of dam and virgin gerbils. The isolation calls recorded from postnatal day 1(PD1), postnatal day 12(PD12), postnatal day 16(PD16), was presented to dam and virgin. As a result, dam responded specifically to the voice of PD 1, while virgin female did so to PD12 as well, suggesting that virgin female did not discriminate the age difference of the isolation call. The plasticity of auditory cortex related to auditory attention could underlie this experience-dependent behavioral modification.

Key words : Attention, Communication sound, mother-infant interaction

キーワード : 注意, コミュニケーション音声, 母子間インタラクション

スナネズミ (*Meriones unguiculatus*)における母性経験が 音声に対する注意に与える影響

原田 勇太, 玉井 湧太, 小林 耕太*

1. はじめに

スナネズミ(Mongolian gerbil 学名: *Meriones unguiculatus*)は周波数変調音を用いてコミュニケーションを行う。ヒトをはじめ, 多くの動物は様々な場面で音声によるコミュニケーションを行っているが, 特に発達時期における母子間の音声コミュニケーションは, 子供の育成にとって極めて重要である。本研究ではこの母子間音声インタ

ラクションに着目し, 音声の発達及び音声の機能について実験的考察をおこなった。

スナネズミは可聴域が比較的ヒトに近く, 聴覚は未発達なまま出生し, 出生後に外耳道が開き, hearing onset があるため聴覚の発達研究に適している^{1,2)}。スナネズミの幼獣は, 出生後しばらくは聴覚系が未発達のみならず, 体温を自ら維持することすらままならない。通常, スナネズミの幼

*Faculty of Life and Medical Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone:0774-65-6499,E-mail:kkobayas@mail.doshisha.ac.jp

獣は母親が掘ってつくった巣の中で過ごしているが、巣からでて体温が下がると母親に危機を知らせる超音波の音声を発する³⁾。この音声が、彼らの母親に母性行動を誘発させ、幼獣を口でくわえて回収し巣にもどすという行動がみられるということが分かっている⁴⁾。この幼獣が巣から離れ体温が下がったときに発する音声を **isolation call** という。**Isolation call** は、スナネズミに限らずラットやマウスでもみられる。ラットやマウスにおける **isolation call** の研究は多くされており、スナネズミにおいて **isolation call** は発達につれて、回数、周波数、持続時間共に減少方向に移行し、音響的に変化していく⁵⁾。

本実験では、スナネズミの発達により **isolation call** が **greeting call** に音響変化すると仮説を立て、母親に生後 1 日目、12 日目、16 日目の音声を聞かせ、3 種類に音声に対する母親の行動に差異が見られるかどうかを調べた。また、行動実験に用いるための音声を計測するために幼獣(pup)1 匹を隔離し、**isolation call** を 26 日間計測した。

2. 実験 I : 音声発達の記録・解析

2.1 実験方法

音声計測実験で用いられる被験体はスナネズミの幼獣計 12 匹である。離乳をするまでは母親からの授乳を受け、離乳をした際には常時設置されている餌と水を大人のスナネズミと共に摂取した。本実験ではスナネズミの幼獣をグループ分けし、同じ親から同じ日に生まれた幼獣を 1 グループとして、グループ A, B, C, D と名付けた。なお、各グループの幼獣の匹数は、A=3 匹、B=5 匹、C=7 匹、D=7 匹となった。

被験体の入った飼育ケージを防音室に入れ、ケージの天井付近にマイクを設置し、384 kHz のサンプリング周波数でデジタル録音を行った。記録は誕生日より開始し、生後 26 日目まで (4 グループ中 2 グループは 27 日まで) 行った。録音は 1 個

体当たり 3 分間行った。スナネズミは昼間に比べて晩の方がより活発的であるため、すべての録音は午後 6 時-10 時の間で行った。

録音した音声から、3 分間で鳴いた回数、平均持続時間、音圧レベルがピーク時での平均周波数、平均音圧レベルを調べた。解析方法としては、Avisoft Bioacoustics 製の音声解析用のソフトウェア、Avisoft-SASLab Pro を用いて、回数と持続時間はスペクトログラムから、周波数と音圧レベルはパワースペクトルから求めた。

2.2. 実験結果

発せられたそれぞれの音圧レベルがピーク時における周波数を調べ、その周波数の 3 分間での平均変化を Fig. 1 および 2 に示す。図に示されるように **postnatal day (PD)** が増加するとともに周波数が線形的に減少していくことがわかった。**isolation call** は成長するごとに周波数が低くなることが確認された。



Fig.1 Spectrograms of developmental changes in isolation call. (A) Isolation call (PD1) (B) Isolation call (PD12) (C) Isolation call (PD16)

3. 実験 II : Isolation call への母性応答

3.1 実験方法

音声計測実験で用いられる被験体はスナネズミの出産経験の無いメスのスナネズミ計 5 匹と出産

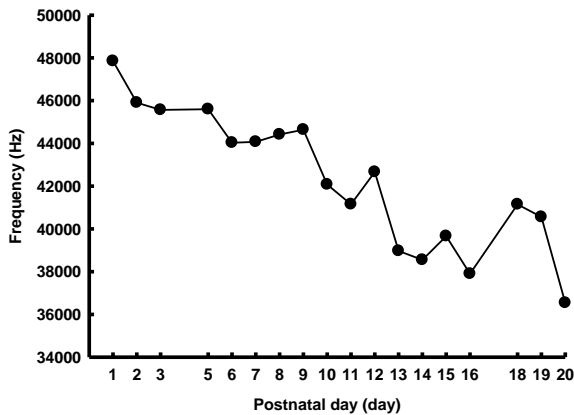


Fig.2 Developmental changes in frequency of isolation call.

経験済のメスのスナネズミ計5匹であった。

行動実験には test cage (150W × 150L × 200H[mm]) を用いた。録画は test cage と同じ素材の筒を2つ取り付けて行った。Isolation call が呈示される側を test side, 呈示されない側を dummy side とした。テスト音声刺激とカメラでの録画を確認後に, 被験体を test cage に投入し, 被験体の行動の様子を5分間録画した。

の実験で計測した生後1日目 (PD1), 12日目 (PD12), 16日目 (PD16) の isolation call を用いた。音圧は実験を行う際に最大値が 70 dB SPL となるように減衰器で補正している。

解析は録画された動画で, 被験体が投入されてからの5分間を分析。それぞれの tube のスピーカー方向の網に向いている状況の時間 (duration), 初めて tube の網に到達時間(latency), tube の網に到達した回数 (number) を調べた。また, 日齢間, tube 間, dam-virgin 間で Wilcoxon signed-rank 検定を行った。

3.2 実験結果

5分間の動画での test side, dummy side それぞれへの duration, number, latency を解析し, dam 5体の平均値と標準偏差を集計した。

Dam の test side への duration の平均値は PD1 の

isolation call を再生した際に最も長くなった。しかし, 標準偏差が PD12, PD16 の isolation call 再生と比較して ± 27.13 sec (PD1) と長くなっており, 個体差が大きかった。Tube 間での Wilcoxon signed-rank 検定の結果 $p=0.0782$ (PD1), $p=0.6858$ (PD12), $p=0.6853$ (PD16) となり, $p<0.05$ とはならなかったが PD1 においては $p<0.1$ となっており, isolation call (PD1) 再生時の tube 間の有意性が示唆された。

Dam の number は PD1, 12, 16 全ての場合において, dummy side と比較して test side の場合の方が大きな値となり, test side により多く入る傾向があることが示唆された。標準偏差は PD1 の dummy side で最もばらつきが少なかった Tube 間での Wilcoxon signed-rank 検定の結果は $p=0.0507$ (PD1), $p=0.176$ (PD12), $p=0.225$ (PD16) となっており, PD1 のみで $p<0.1$ となっており tube 間での有意性が示唆された。

Dam の latency の平均値は PD1, PD12 において test side の方が短くなっており, PD16 においては dummy side の方が短くなっていた。よって, PD1, 12 の isolation call 再生時には最初に test side の tube に入ることが示唆された。標準偏差は PD12 の test side で最もばらつきが少なかった (Fig.6C, Table.1B)。Tube 間での Wilcoxon signed-rank 検定の結果は $p=0.0500$ (PD1), $p=0.0431$ (PD12), $p=0.686$ (PD16) となっており, PD1, 12 で $p\leq 0.05$ となっており tube 間での有意性が確認された。

Virgin 個体についても同様に5分間の動画での test side, dummy side それぞれへの duration, number, latency を求め virgin 5体の平均値と標準偏差を求めた。

Virgin の dummy side への duration の平均値は PD1 の isolation call を再生した際に最も長くなった。しかし, 標準偏差が PD12, PD16 の isolation call 再生と比較して ± 97.04 sec (PD1) と長くなっており, 個体差が大きかった。

Tube 間での Wilcoxon signed-rank 検定の結果

p=0.345 (PD1), p=0.225 (PD12), p=0.345 (PD16)となっており, p<0.05 とも p<0.1 も満たしておらず, tube 間の有意性が示されなかった。

Postnatal 間での Wilcoxon signed-rank 検定の結果 p=0.224 (PD1-PD12, test side), p=0.238 (PD1-PD16, test side), p=0.686 (PD12-PD16, test side)となり, すべての場合で p<0.1 を満たさなかったため有意性は示されなかった。

また, dummy side での検定結果は p=0.500 (PD1-PD12, dummy side), p=0.500 (PD1-PD16, dummy side), p=0.892 (PD12-PD16, dummy side)となり, PD1-12, PD1-16 の場合で p<=0.5 を満たしていたため有意性が示された。

Virgin の number の平均値は PD1, 12 の場合において, dummy side と比較して test side の場合の方が大きな値となっており, test side により多く入る傾向があることが示唆され, PD16 の場合では test side と比較して dummy side の場合の方が大きな値となっていた。標準偏差は全体的にばらつきが大きかった (Fig.7B, Table.2B)。

Tube 間での Wilcoxon signed-rank 検定の結果は p=0.297 (PD1), p=0.138 (PD12), p=0.345 (PD16)となっており p<0.1 も満たしておらず tube 間での有意性が示されなかった。

Postnatal 間での Wilcoxon signed-rank 検定の結果 p=0.0796 (PD1-PD12, test side), p=0.777 (PD1-PD16, test side), p=0.136 (PD12-PD16, test side)となり, PD1-PD12 間で p<0.1 となり PD1-PD12 間での有意性が示唆された。

また, dummy side での検定結果は p=0.248 (PD1-PD12, dummy side), p=0.225 (PD1-PD16, dummy side), p=0.686 (PD12-PD16, dummy side)となり, すべての場合で p<0.1 を満たさなかったため有意性は示されなかった。

Virgin の latency の平均値は PD1, PD16 において test side の方が長くなっており, PD12 においては dummy side の方が長くなっていった。よって, PD1, 12 の isolation call 再生時には最初に dummy side の

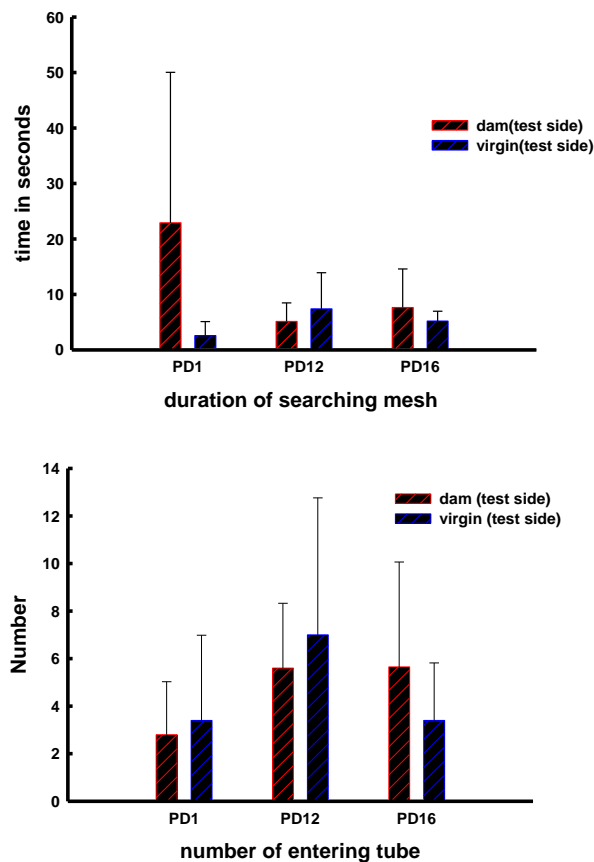


Fig. 3 Response to reproduced isolation call (test side) of virgin and dam. (A) Mean (\pm SE) duration of search of the mesh, (B) mean (\pm SE) number of times a dam entered a tube, Dam (n=5) approached reproduced isolation call more than virgin gerbils.

tube に入ることが示された。標準偏差は PD16 の dummy side で最もばらつきが少なかった。

Tube 間での Wilcoxon signed-rank 検定の結果は p=0.0593 (PD1), p=0.345 (PD12), p=0.225 (PD16)となっており, p<0.1 も満たしておらず tube 間での有意性が示されなかった。

Postnatal 間での Wilcoxon signed-rank 検定の結果 p=1 (PD1-PD12, test side), p=0.686 (PD1-PD16, test side), p=0.893 (PD12-PD16, test side)となり, p<0.1 も満たしておらず, 有意性は示されなかった。また, dummy side での検定結果は p=0.715 (PD1-PD12, dummy side), p=0.144 (PD1-PD16,

dummy side), $p=0.0431$ (PD12-PD16, dummy side)となり, PD12-PD16 間で $p<0.05$ を満たしたため, PD12-16 間で有意性が示された.

4. 考察

dam と virgin で比較するために test side と dummy side で場合分けし比較した. dam (PD1) の平均値が最も大きく, virgin (PD1)と比較しても大きな差があることが示された. PD12, PD16 においては大きな差は確認されなかった.

Number について, 平均値は PD1, PD12 において virgin の方が多くなり, PD16 においては dam のほうが多くなることが確認されたが大きな差はなかった.

Latency については平均値は PD1, PD16 において dam のほうが大きくなっていった. PD12 においては virgin のほうが大きくなっていった. PD12 で大きな差があることが示された.

5 まとめ

本実験の目的は, isolation call の音響変化が母子間の行動に影響を生じさせるかの解明であった. そのため, dam と virgin に PD1, PD12, PD16 の3種類の isolation call を聞かせ, dam と virgin の行動を比較した. その結果, dam では PD1 の音声に対し積極的な行動が確認され, PD12 の音声に対しても virgin よりは興味を持っていることが示唆された. 逆に, virgin ではどの PD の音声に対しても興味を持っているという結果が得られなかったテスト刺激の周波数が線形的に減少するのに対して, duration は PD12 の時点で行動量の減少が止まっている. このことから PD12 の時点で isolation call と retrieve behavior の関連性は失われており, 関連性の転換点は PD1 から PD12 の間にある可能性が示唆された.

6. References

- 1) Ryan, A., (1976) "Hearing sensitivity of the mongolian gerbil, *Meriones unguiculatus*", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 59, No. 5.
- 2) Nabetani, Y. and Riquimaroux, H., (2004) "Situation-dependent vocalizations of Mongolian gerbils for communication", *The Seventh International Congress of Neuroethology program and abstracts*, PO34.
- 3) Echterler, S., Arjmand, E. and Dallos, P., (1989) "Developmental alterations in the frequency map of the mammalian cochlea", *Nature*, 341, 147-149.
- 4) Akira Uematsu, Takefumi Kikusui, Takeshi Kihara, Toshihiro Harada, Masahiro Kato. Kiyoshi Nakano, Osamu Murakami, Nobuyoshi Koshida, Yukari Takeuchi, Yuji Mori, (2007) "Maternal approaches to pup ultrasonic vocalizations produced by a nanocrystalline silicon thermo-acoustic emitter", *Brain research* 1163(2007) 91-99.
- 5) Elwood, R., (1979) "Ultrasounds and maternal behavior in the Mongolian gerbil", *Developmental psychobiology*, 12(4), 281-284.
- 6) Hashimoto, H., Moritani, N., Komori, S., Tanaka, M. and Saito, T., (2004) "Comparison of ultrasonic vocalization emitted by rodent pups", *Exp. animal*, 53(5), 409-416.

Effects of breath-counting meditation on functional brain network and salivary hormones

Masahiro SUGIMOTO* Satoru HIWA** and Tomoyuki HIROYASU**

(Received March 30, 2017)

Key words : brain function information, EEG, fMRI, fNIRS

キーワード : 脳機能情報、生体情報、EEG、fMRI、fNIRS

脳機能ネットワークと唾液内代謝物質における数息観の影響

杉本昌弘 (慶應義塾大学・先端生命科学研究所) ・

日和 悟 (同志社大学・生命医科学部) ・ 廣安知之 (同志社大学・生命医科学部)

1 はじめに

思いやりの瞑想は、ストレスを軽減し、集中力を向上させることが示されている。近年、fMRIを用いた瞑想中の脳活動に関する研究が盛んに行われている。加えて、瞑想による人間の状態の変化も様々な生物学的情報の形で現れる。ここでは、瞑想中の脳活動と唾液ホルモンであるコルチゾールの変化を調査した。

2 ストレス計測

ストレスという言葉は、日常生活において多くの人に使用されているが、カナダの生理学者 Hans Selye によって、「生体に作用する外からの刺激に対して生じる非特異的反応の総称である」と定義されている。また、Hans Selye は「生体にストレス状態を引き起こす種々の因子」をストレッサーと定義した¹⁾。ストレッサーが生体に作用した場合、生体はストレスが起きることを防ぐために

恒常性を維持しようとする。恒常性とは、生体がさまざまな環境の変化に対応して、内部状態を一定に保ち生存を維持する現象である。しかし、ストレッサーが強大で恒常性に破綻をきたすと、種々の障害、すなわちストレスが発現する。本節では、恒常性を維持するために働くストレス応答とストレス評価の指標について述べる。

2.1 ストレス応答

ストレス応答とは、ストレッサーにより、生体内の諸バランスが崩れた際に生じる生体の防衛反応や回復反応である。ストレスは大脳皮質や大脳辺縁系を經由して視床下部に情報伝達され、ストレス反応系を活性化させる。Fig. 1 にストレス応答経路を示す。

ストレス反応系には視床下部 - 下垂体前葉 - 副腎皮質系を介する hypothalamus-pituitary-adrenal axis (HPA系) と視床下部 - 交感神経 - 副腎髄質系を介する sympathetic-adrenal-medullary axis (SAM系) があり、この2つのストレス反応系に免疫系の調節機能も加わることで、心身の恒常性を維持している。HPA系の

* 慶應義塾大学先端生命科学研究所 特任教授

E-mail : msugi@sfc.keio.ac.jp

** Faculty of Life and Medical Sciences, Center for Innovative Computing, Doshisha University, Kyoto

Telephone : +81-774-65-6932, E-mail : tomo@is.doshisha.ac.jp

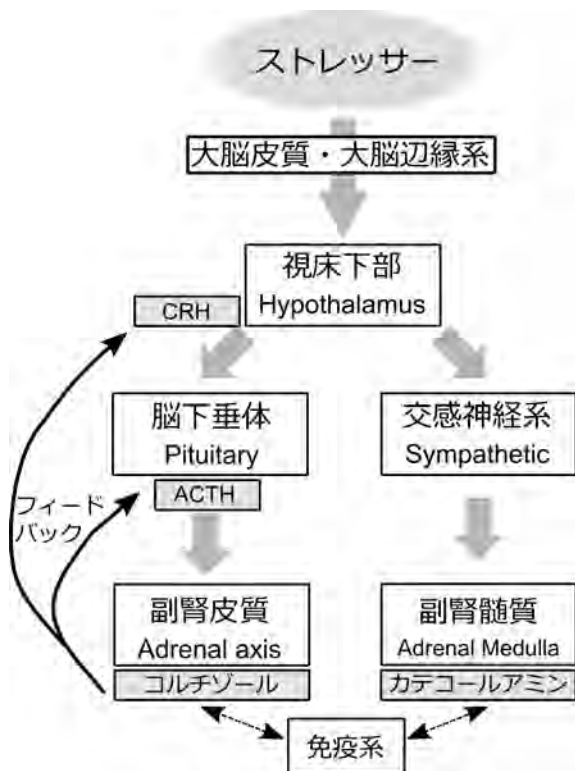


Fig. 1. ストレス応答経路.

活性化では、視床下部から副腎皮質刺激ホルモン放出ホルモン (corticotropin releasing hormone : CRT), 脳下垂体から副腎皮質刺激ホルモン (adrenocorticotropic hormone : ACTH) が放出される。ACTH が副腎皮質に達すると、血液中にコルチゾールなどの糖質コルチコイドが放出され、血糖上昇や免疫低下など生体の機能に影響を及ぼす。コルチゾールの分泌量が増えると、ACTH の分泌を抑える調節機構により、過剰なストレッサーへの反応が制御される。一方の SAM 系は交感神経がストレッサーに対して攻撃もしくは闘争する反応を担う経路である。刺激に応じて外界に向けて能動的に活動するときに働く器官である効果器への指令を交感神経を介する神経伝達と、副腎髄質からのホルモン分泌による液性伝達の2つのメカニズムが担っており、即時性のストレス応答である急性ストレスの基盤となる。SAM 系の活性化では交感神経の活性により、血圧上昇や心拍数の上昇などの基礎反応が導かれる。

2.2 ストレス指標

Table 1 に示すように、ストレスの計測には大きく分けて、生理学的評価方法と生化学的評価方法がある。生理学的評価方法では、自律神経系の支配を受ける器官から計測される生理信号である心拍や脈拍、血圧などの時間変動パターンを計測してストレス度を評価している。

この評価方法は、短いサンプリング間隔で連続的な計測評価が可能である。また、無意識な状態で自動的に計測することが可能であるため、日常生活の中でリアルタイムに支援できる可能性を持つ。非侵襲計測であることも利点である。生化学的評価方法では、血液、唾液、尿などの生体サンプルに含まれる化学物質の濃度から生体情報を読み取り、数値化・定量化して評価を行う。この数値化・定量化した指標をバイオマーカーと呼ぶ。交感神経系や内分泌系に直接的、または間接的に関与するバイオマーカーには、ストレッサーの強度に応じて濃度が顕著に変化するものがあり、これをストレスマーカーとして計測する。そのため生理学的評価方法である物理計測だけでは拾うことが不可能であったストレスを定量的に評価することが可能である²⁾。

2.3 心理的評価指標

ストレスの計測手法として、ストレス刺激に伴う心理的变化に着目した心理的評価指標が存在する。State-Trait Anxiety Inventory (STAI)³⁾⁴⁾ は個人の不安に対する特性や現在の不安の状態を評価する。他にもストレス計測のアンケートには、神経症患者の症状の評価などが可能な General Health Questionnaire (GHQ)⁵⁾ や、抑うつや緊張など6尺度の気分の状態を評価する Profile of Mood States (POMS)⁶⁾⁷⁾ などが挙げられる。これらは簡易に診断が出来る一方で、主観的評価であることから認知のゆがみが生じてしまう可能性などが指摘されている。これらの診断指標は他の指標と組み合わせてストレスの評価に用いられることが多い。さらに、同じアンケート手法であるがストレスに対する評価ではなく、ストレス刺激の種類(「配偶者の死」や「離婚」など)を回答しその種類によって予め設定されたストレス強度を診断できる SRSS (Social Readjustment Rating Scale) がある⁸⁾。この方法はストレス強度を自分で評価せず、ストレス刺激の種類を客観的に評価することから認知のゆがみの影響を受けにくいとされている⁹⁾。

3 方法

本研究においては、24人の瞑想の初心者と2人の瞑想の専門家が参加した。すべての参加者は、禅呼吸法の瞑想法 (Susokukan) を使用した。我々は、すべての参加者において fMRI を用いて瞑想中の脳活動を測定した。4名の初心者で唾液コルチゾールも測定された。全脳を

Table 1. 主なストレスの評価方法.

分類	検査項目	測定・評価内容
生理学的評価	心拍変動	自律神経活動
	脳波	リラックス度
	光トポグラフィ	大脳皮質の血流変化
生化学的評価	血液検査	ホルモン分泌 交感神経活動
	唾液検査	ホルモン分泌 交感神経活動

AAL (Automated Anatomical Labeling) を用いて 116 の領域に分割し、各領域間で BOLD 信号の相関係数を計算した。相関行列をエッジ濃度 15 % で二値化し、各領域の度合いの中心性および中間度を計算した。その結果得られた 232 次元のデータセットは、116 のエリアにおける中心度と中心の重心から構成され、縮小された k 平均クラスタリングによって 2 つのグループに分けられ、各グループの特徴が分析された。

実験設計を Fig. 2 に示す。本実験は、瞑想前安静時、瞑想時、瞑想後安静時 (1)、瞑想後安静時 (2) の 4 区間、各 5 分で構成され、被験者にヘッドホンを装着した状態で MRI 装置を用いて撮像した。瞑想の開始時と終了時に、ヘッドホンを経由して「task 開始」、「rest 開始」の音声で瞑想の開始・終了の合図を行った。実験を行うにあたって、MRI 計測の前に数息観に関して以下の指示を行った。

- 数息観を行っている間は、閉眼である。
- 呼吸は鼻呼吸で、自然な呼吸を心がけ、意図的に呼吸の長さを変化させない。
- 息を吸い始める時から数え始め、吐き終わるまでを 1 と数え、心の中で数えていき、10 まで数えたら、再び 1 から数え始める。
- 数を数え忘れる、10 を超えて数える、呼吸を数えること以外に意識が逸れるなどの事象が生じた場合は、それに気づき、再び 1 から数え始める。

安静時には、呼吸に意識を向けることがないように、呼吸を数えることはせず、楽な状態で過ごすように指示をした。また、マインドフルネスの心理的評価として FFMQ を採用し、MRI 計測の前に調査を行った。

本実験では、唾液コルチゾール濃度の日内変動¹²⁾を考慮し、変化が大きく現れる 10 時～12 時の間に唾液

Table 2. MRI 撮像パラメータ.

パラメータ	GE-EPI	RSSG
TR [ms]	3000	9.4
TE [ms]	40	4.0
flip angle[°]	90	8
Field of View [mm]	240×240	256×256
Matrix Size [pixel]	64×64	256×256
Thickness [mm]	5.0	1.0
Slice Number	20	194

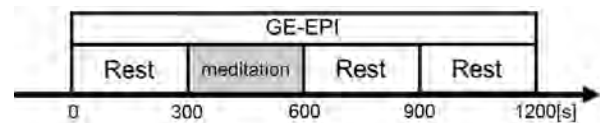


Fig. 2. 脳活動の計測実験設計.

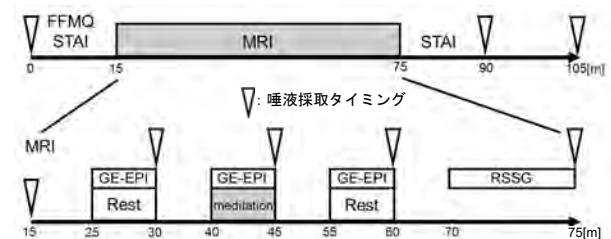


Fig. 3. 脳活動と唾液コルチゾールの計測実験設計.

を 8 サンプル採取した。Fig. 3 に実験設計を示す。実験ブロックは瞑想前安静時、瞑想時、瞑想後安静時 (1) の 3 ブロック、各 5 分で構成される。唾液サンプルは、Passive Drool (Fig. 4) で採取され、10 時から 15 分間隔で行い、各ブロックごとに唾液を採取するために被験者を MRI 装置から移動させた。それに伴い、各ブロックの撮像前に位置合わせを行った。数息観に関しては、??と同様に指示を行った。また、コルチゾール濃度に与える影響を取り除くために、以下の条件で統制を行った。

- 被験者は非喫煙者であること
- 実験開始前の 12 時間前以内のアルコール・カフェインの採取の禁止
- 実験開始の 1 時間前から水以外の飲食と過度の運動禁止
- 実験開始 10 分前に水で口をゆすぐ

実験アンケートは実験前後に行い、FFMQ を実験前に、被験者の不安を評価する STAI を実験の前後に採用した。



Fig. 4. Passive Drool による唾液採取.

4 結果

k-means クラスタリングの縮小により、大きな 232 次元データセットが 1 次元データ (第 1 主成分) に分解された。全ての被験者は、2 人の専門家を含むクラスター A と、初心者のみからなるクラスター B に分けられた。2 人の専門家はクラスター内で互いに近くに位置していた。Fig. 6 は、主要コンポーネントの負荷を示している。有意な正の主要成分負荷を有する変数は、右上前頭回、内側 (rSFG 内側)、右海馬、右視床 (rTHA)、および右被殻 (rPUT) の程度を中心であった。rSFG 内側および右側海馬はデフォルトモードネットワーク (DMN) に属していた。DMN は、瞑想中に活性化される脳ネットワークの 1 つである。rTHA は情報を基底核に伝達し、rPUT は辺縁系を制御する。一方、最も重要な負の主要成分負荷を有する変数は、右後頭葉および右鼠径症 (rCUN) の程度を中心であった。右後頭葉および rCUN は、視覚に関連する領域である。これは、クラスター A が、視覚に関連する領域と DMN 内の領域間の接続の増加との関連性の低下を反映していることを示唆している。クラスターの重心の特徴は、2 つの群の間に大きな違いを示さなかった。Fig. 5 は唾液中コルチゾールの変化を示す。被験者 1 および 2 はクラスター A に分類され、被験者 3 および 4 はクラスター B に分類された。クラスター A では、rTHA および rPUT の重心度が高かった。ホルモン分泌は辺縁系によって制御されていたので、被験者 1 および 2 における唾液コルチゾールの変動は小さかった可能性がある。

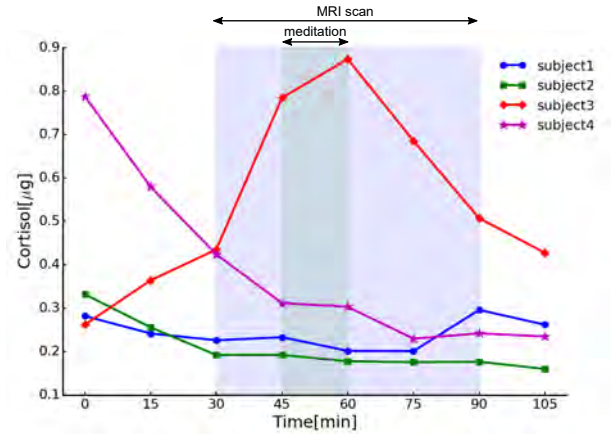


Fig. 5. 実験時の唾液コルチゾール濃度変化.

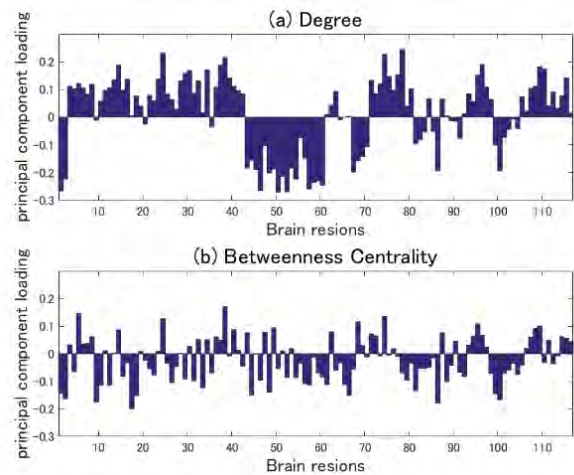


Fig. 6. 主要コンポーネントの負荷量.

5 まとめ

本稿では、脳の状態や唾液中のコルチゾールの変化を fMRI を用いた初心者や専門家の瞑想者が参加して調査した。専門家を含むクラスターでは、視覚に関連する領域と他の領域との間の接続が減少し、DMN と他の領域との間の接続が増加した。同じ房で唾液中コルチゾールの変化は観察されなかった。したがって、瞑想は視覚と DMN に関連する領域のつながりを変化させ、さらに唾液中コルチゾールの変動を減少させることが示唆された。

謝辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」(平成 26 年~平成 30 年, 事業番号 S1411030) の支援のもとに行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Hans Selye, et al. A syndrome produced by diverse noxious agents. *Nature*, Vol. 138, No. 3479, p. 32, 1936.
- 2) 山口昌樹. ストレスと生活 2 唾液マーカーでストレスを測る. *日本薬理学雑誌*, Vol. 129, No. 2, pp. 80–84, 2007.
- 3) Noriyasu Takai, Masaki Yamaguchi, Toshiaki Aragaki, Kenji Eto, Kenji Uchihashi, and Yasuo Nishikawa. Effect of psychological stress on the salivary cortisol and amylase levels in healthy young adults. *Archives of Oral Biology*, Vol. 49, No. 12, pp. 963–968, 2004.
- 4) CD Spielberger, RL Gorsuch, R Lushene, PR Vagg, and GA Jacobs. *Manual for the state-trait anxiety inventory (STAI)*. San Diego, CA: Mindgarden, 1983.
- 5) David P Goldberg and Valerie F Hillier. A scaled version of the general health questionnaire. *Psychological medicine*, Vol. 9, No. 01, pp. 139–145, 1979.
- 6) McNair DM, Lorr M, Droppleman LF. *Profile of Mood States*. Educational and Industrial Testing Service, 1992.
- 7) McNair DM, Heuchert JWP. *Profile of Mood States Technical Update 2003*. Multi-Health Systems Inc, 2003.
- 8) Thomas H Holmes and Richard H Rahe. The social readjustment rating scale. *Journal of psychosomatic research*, Vol. 11, No. 2, pp. 213–218, 1967.
- 9) 夏目誠. ストレス評価に関する調査研究: 平成 22 年度における厚生労働省から産業精神保健学会への委託研究成果を中心に. *精神神経学雑誌= Psychiatria et neurologia Japonica*, Vol. 114, No. 12, pp. 1385–1395, 2012.
- 10) Clemens Kirschbaum, Oliver T Wolf, Mark May, W Wippich, and Dirk H Hellhammer. Stress-and treatment-induced elevations of cortisol levels associated with impaired declarative memory in healthy adults. *Life sciences*, Vol. 58, No. 17, pp. 1475–1483, 1996.
- 11) Clemens Kirschbaum and Dirk H Hellhammer. Salivary cortisol in psychoneuroendocrine research: recent developments and applications. *Psychoneuroendocrinology*, Vol. 19, No. 4, pp. 313–333, 1994.
- 12) Sally S Dickerson and Margaret E Kemeny. Acute stressors and cortisol responses: a theoretical integration and synthesis of laboratory research. *Psychological bulletin*, Vol. 130, No. 3, p. 355, 2004.

GC-MS による呼気分析—運転中のストレスモニタリングに向けた基礎研究—

大江洋平・桂田誠也・栗田裕樹・満岡夏生・野村優介・太田哲男

1. はじめに

人は、ストレスを受けることにより状態が変化する。この変化は、本人が自覚する場合や外から見てわかる場合もあるが、客観的な判断方法の確立が必要とされる。そのため、近年、疾病予防などの観点からストレスの評価法に注目が集まっており、それらは主に唾液中のコルチゾール、アミラーゼを指標としている。¹⁾ コルチゾールは、ストレスとの関連で最も研究されている物質であり、心理的・身体的な健康状態を考える上でも重要なホルモンである。²⁾ アミラーゼは唾液に含まれるグリコシド結合を加水分解する化酵素であり、交感神経系の直接神経作用とノルアドレナリン作用の両作用で分泌され、ストレスにより増加することが知られている。³⁾

一方、乗用車保有台数および運転免許保有者数は年々増加傾向にあり、ドライバのストレスもそれに伴い増加すると考えられる。運転中のストレスは危険運転さらには事故を誘発することになるため、運転中のドライバのストレス計測や異常に関する警鐘のフィードバックが事故防止につながる事が期待される。しかしながら、上述のようなストレス測定法では、唾液サンプルの採取が車の運転中などにおいて困難な場合も多いため、現実的ではない。

そこで、本研究ではストレス計測の試料として、呼気に焦点を当てた。呼気は呼吸をしている以上、常に体外に排出されるため非侵襲を保てる。また、唾液成分の変動に伴い、そこにも何らかの成分変化が起こると考えている。本研究の全体像としては、呼気やその揮発成分が呼気に含まれる唾液などの非侵襲的に得られる試料に含まれる物質を分析し、そこで得られた新たなストレスマーカーやその特徴量を反映した簡便な測定法の検討へと展開し、最終的には、運転中ストレスのリアルタイム測定を実現し、安全運転システムの構築の一助になることを目的としている。昨年度までに、呼気採取実験系、測

定系に関する検討を行い、呼気からアセトンなど通常呼気に含まれる物質を含む多数の揮発性有機物質 (Volatile Organic Compound: VOCs) を計測できることが明らかとなった。本成果報告では、ストレスタスク下にある被験者の呼気分析、唾液中コルチゾール濃度分析、および STAI 評価を比較検討することでそれら VOCs とストレスとの関係に迫った。

2. 装置および実験方法

2.1 装置およびサンプル

2.1.1 GC-MS

ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS, 島津製作所社製 GC-2010/PARVUM 2 システム) に、サーマルディソープションシステム (島津製作所社製 TD-20) を連結し、呼気等の分析に用いた。

2.1.2 呼気サンプル

呼気サンプルは、実験者自ら捕集バックに吹き込み、特に保存することなく、そのまま使用した。

2.1.3. 唾液サンプル

唾液サンプルは、ストレスタスクの被験者から採取したものを使用した。

2.2 実験方法

2.2.1 呼気・唾液サンプルの分析

ストレス時の呼気成分の調査を行うために Fig.1 に示したタイムテーブルに従って、呼気、唾液の採取および STAI アンケートを行った。また別日に MIST を課さない control 実験も行った。

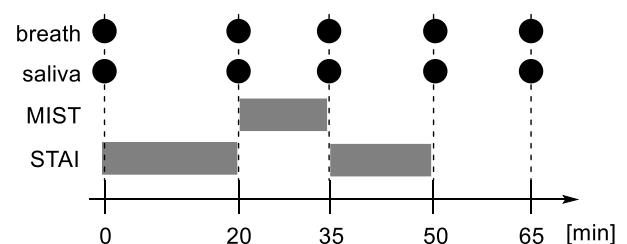


Fig.1 実験のタイムテーブル

2.2.2 処理手順

He ガスを予め2分間パージした捕集管 (充填剤: TenaxTA+活性炭) に呼気サンプルを吸着後, 内部標準として ethyl methacrylate 0.02 μ L を添加した. この捕集管をさらに He ガスで2分間パージした後, TD-GC-MS システムによる質量分析を行った. また, 採取した唾液サンプルは中のコルチゾール濃度は ELISA/EIA 法により測定した.

3. 結果および考察

被験者 10 名から得られたデータを用い, 代謝物質の変化の指標である AUCi (Area Under the Curve with respect to Increase) をコルチゾール濃度変化から導出した⁴⁾. Fig. 2 に示すのは各被験者の AUCi に対して k-means を用いて 2 群に分類を行なった結果であるが, 被験者 7 のみが他の被験者の明らかに異なる動向を示している. この分類結果をラベルとして, GC-MS データより算出した各 VOC の AUCi と比較した. その結果, コルチゾールの AUCi と同様に分類が行える 7 つの VOC を見出した (Table 2). これら VOC の相対量の経時変化を, Fig. 3 に示す. Fig. 3 には, 被験者 7 以外の VOC の平均値の推移を示している. 化合物 No.1, 3, 6 ではストレス刺激後である 35 分以降の呼気サンプルにてその濃度を大きく変化させている. 一方, No.2, 4, 5 では control 実験での VOC と比べストレス実験時の VOC の濃度変化がいずれも大きい. 以上より, 一部の VOC は

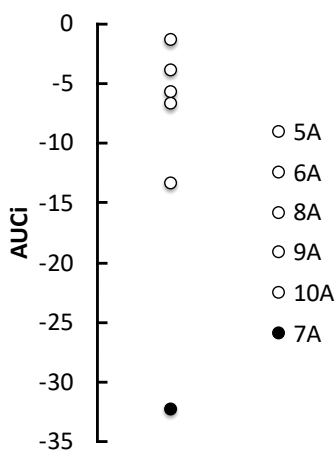


Fig. 2 AUCi various of cortisol.

Table 2 Possible stress biomarkers in breath.

No	Name	Classification
1	benzene	aromatic compound
2	Isopropyl acetate	aliphatic carbonyl compound
3	Octanal	aliphatic carbonyl compound
4	-	aliphatic carbonyl compound
5	-	aliphatic compound
6	-	aliphatic compound
7	-	aliphatic compound

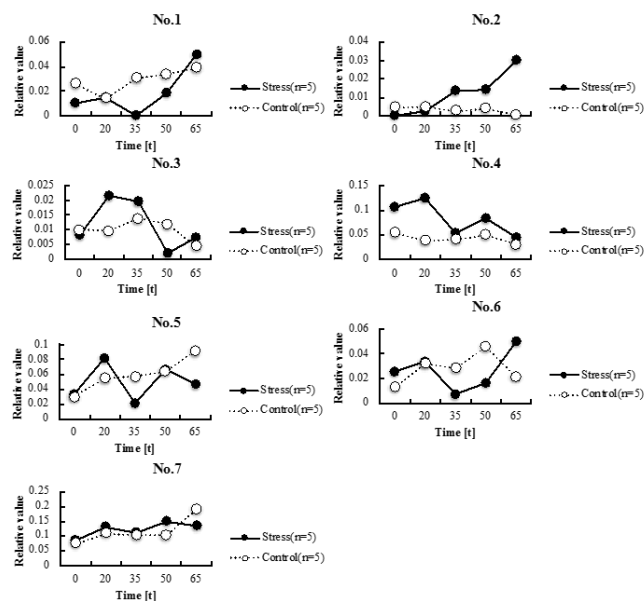


Fig.3 Time course of relative amount of VOCs.

ストレス刺激後に濃度を大きく変化させており, ストレス状態の変化と関連する呼気中のバイオマーカーとして有効となる可能性が示唆された.

4. 課題

今回得られたバイオマーカー候補物質の量的変化とストレスとの関連性を精査することが今後の重要な課題である.

5. 参考文献

- 1) 井澤修平 他, *日本補完代替医療学誌*, **2007**, 4, 91-101.
- 2) B. S. McEwen, *Neuropsychopharmacology*, **2000**, 22, 108-124.
- 3) 山口昌樹, *日本薬理学雑誌*, **2007**, 129(2), 80-84.
- 4) J. C. Pruessner, C. Kirschbaum, G. Meinlschmid, D. H. Hellhammer, *Psychoneuroendocrinology*, **2003**, 916-931.

Auditory cortical activities modulated by maternal experience in Mongolian gerbil (*Meriones unguiculatus*)

Taisei Minei, Yuta Tamai, Takafumi Furuyama, Kohta I. Kobayasi*

Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*) have been studied in a field of auditory physiology for longer than two decades. We recently reported that the animal have at least 12 distinct types of vocalization and use them for communication. The finding made the animal a variable model for uncovering the neural underpinning of vocal communication. This study investigated effect of the mother-infant vocal interaction on neural activities of primary auditory cortex in mother gerbils. We measured auditory cortical activities reposing to several types of sound stimulus, including pup's isolation calls by auto-fluorescence (Flavoprotein fluorescence) imaging. Gerbils having different baby-rearing experiences were used as subjects. We successfully located several auditory related regions (i.e., A1, AAF, and DP) by response strength to different tone burst. The selectivity to the isolation call was highest in females with birth experience, and males showed lowest selectivity while the sexually-inexperienced females was in the middle. These selectivity difference in auditory cortex might underlies the experience-dependent behavioral modification.

Key words : cortical plasticity, attention, communication sound, mother-infant interaction, cortical plasticity

キーワード : 皮質可塑性, 注意, コミュニケーション音声, 母子間インタラクション

注意や社会的経験が聴覚皮質の神経応答に与える影響： スナネズミをモデルとした研究

嶺井大聖, 玉井 湧太, 古山貴文, 小林 耕太*

1. はじめに

ヒトをはじめ, 多くの動物は様々な場面で音による情報の取得や情報交換を行っている。スナネズミ (Mongolian gerbil 学名: *Meriones unguiculatus*) は周波数変調音を用いてコミュニケーションを行う小型のげっ歯類である。特に発

達時期における母子間の音声コミュニケーションは, 子供の育成にとって極めて重要である。本研究ではこの母子間音声インタラクションに着目し, 聴覚皮質の神経応答が経験 (育児経験) によってどのような調整をうけるかについて実験的考察をおこなった。

*Faculty of Life and Medical Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone: 0774-65-6499, E-mail: kkobayas@mail.doshisha.ac.jp

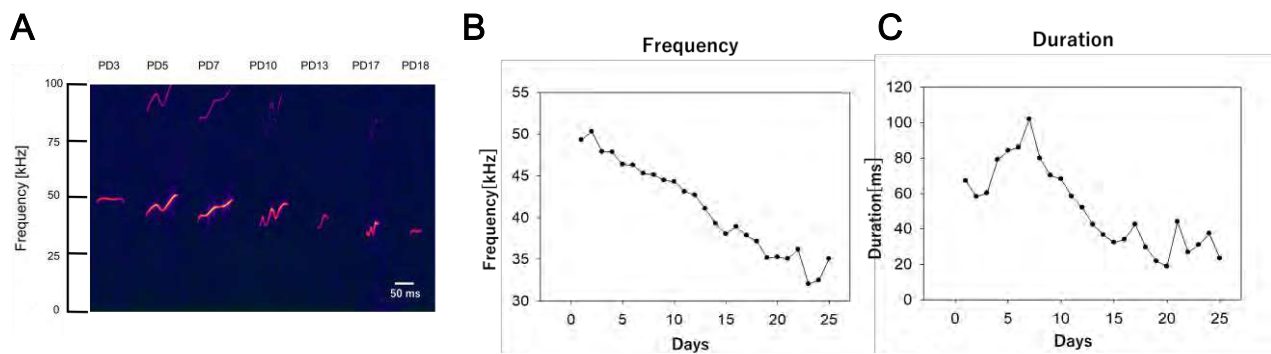


Fig. 1 Development of isolation call

スナネズミは可聴域が比較的ヒトに近く、聴覚は未発達なまま出生し、出生後に外耳道が開き、**hearing onset** があるため聴覚の発達研究に適している^{1,2)}。スナネズミの幼獣は、出生後しばらくは聴覚系が未発達のみならず、体温を自ら維持することすらままならない。通常、スナネズミの幼獣は母親が掘ってつくった巣の中で過ごしているが、巣からでて体温が下がると母親に危機を知らせる超音波の音声を発する。この音声が、彼らの母親に母性行動を誘発させ、幼獣を口でくわえて回収し巣にもどすという行動がみられるということが分かっている³⁾。この幼獣が巣から離れ体温が下がったときに発する音声を **isolation call** という。**Isolation call** は、スナネズミに限らずラットやマウスでもみられる。ラットやマウスにおける **isolation call** の研究は多くされており、スナネズミにおいて **isolation call** は発達につれて、回数、周波数、持続時間共に減少方向に移行し、音響的に変化していく⁴⁾。

本研究では、スナネズミの幼獣が発する **Isolation call** を用い、その音声に選択的に反応する脳部位の特定を目的として実験を行った。**Isolation call** を出産経験のある雌、出産経験のない雌、雄の三種類の個体に提示し、その時の脳活動をイメージングすることにより反応の比較を行った。イメージングには内因性信号を利用する方法の一つであり、外来性色素を用いず神経活動を可視化することができるフラビン

蛋白蛍光イメージングを用いた⁵⁾。また、スナネズミの聴覚皮質の特定を行うため、トノトピシティの計測もイメージングを利用し同時に行った。

2. 実験方法

2.1. スナネズミのコミュニケーション音声

スナネズミは様々な音声を発し、その音声によって他個体とのコミュニケーションをはかっている。このコミュニケーションに用いるスナネズミのコミュニケーション音声は 12 種類以上の音声に分類可能である (Nabetani, Riquimaroux, 2006)。

Isolation call とは、齧歯類など (スナネズミ、マウス、ラットなど) の幼獣が親や兄弟から隔離され体温が下がったときに発する超音波の鳴き声である

2.1.1. 被験体

音声計測実験で用いられる被験体はスナネズミの幼獣計 30 匹である。毎日、1 日 1 回幼獣が生まれているかをチェックし、幼獣を確認した日を生後 1 日目とする。

被験体が入った飼育ケージを防音室に入れ、ケージの天井付近にマイクを設置し、384 kHz のサンプリング周波数でデジタル録音を行った (Ultrasound Microphone CM 16, Avisoft Bioacoustics, マイクと A/D converter がセットと

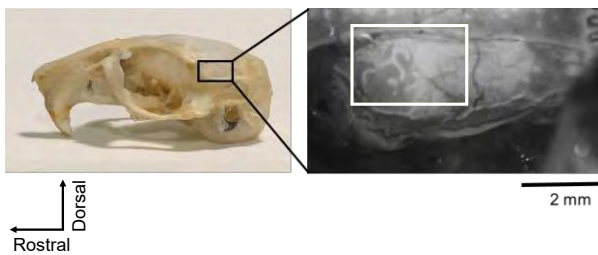


Fig. 2 Recoding site and original image

なっている).

2.1.2. 録音および解析

それぞれのグループから1匹ずつ幼獣に匂いが移らないように配慮してシャーレに移した。そのシャーレを母親、父親、兄弟と共生したケージとは別のケージに移した。記録は出生日より開始し、生後25日目まで行った。録音は1個体当たり3分間行った。

録音した音声から、3分間で鳴いた回数、平均持続時間、音圧レベルがピーク時での平均周波数を調べた。解析方法としては、Avisoft Bioacoustics製の音声解析用のソフトウェア、Avisoft-SASLab Proを用いて、回数と持続時間はスペクトログラムから、周波数はパワースペクトルから求めた。

2.2. フラビン蛋白蛍光イメージング

脳機能マッピングを行う方法の1つとして光学イメージングがある。フラビン蛋白はミトコンドリアの電子伝達系で活動するタンパク質のうちの一つである。神経細胞が興奮することでフラビン蛋白は酸化型に変化する。酸化型フラビン蛋白は青色励起光を照射すると緑色の自家蛍光を発する性質があるため、この緑色蛍光の変化を捉えることで脳活動を計測することができる。

2.2.1. 被験体および計測方法

生後一年半以内のスナネズミを6匹使用した(雄2匹、出産経験の無い雌2匹、出産経験の有る雌2匹)。

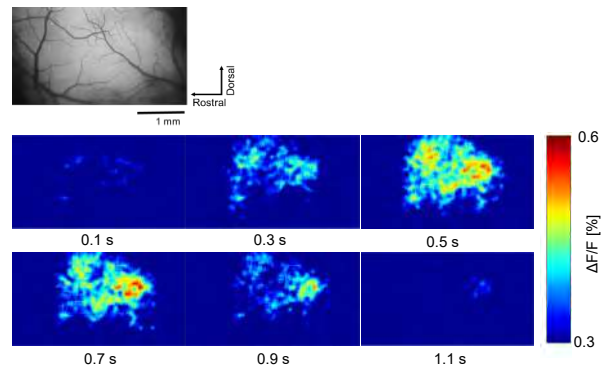


Fig. 3 High frequency region of auditory cortex

被験体にウレタン麻酔(1.5 g/kg, i.p.)を投与し、頭蓋骨を露出させた。その後頭部を固定し、左聴覚野周辺の頭蓋骨を切除した。頭蓋骨を切除した部位を明視野に置き、顕微鏡(SZX16, OLYMPUS, JPN)を介して、青色励起光(450~470 nm)を照射し、緑色蛍光(500~550 nm)の変化をCCDカメラ(BU61M, BITRAN, JPN)で計測した。撮影が開始されてから2秒後に刺激が提示され、撮影時間は合計で8秒であった。シャッター速度は0.1秒であった。得られた画像はMATLAB(MathWorks, Natick, MA)を用いて画像解析を行った。刺激提示前の画像3枚分の蛍光強度を平均し、基準値(F)とした。基準値との差を ΔF とし、蛍光応答は $\Delta F / F$ とした。最も強い蛍光応答が確認された画像を用いて蛍光が生じた領域にROIを立てた。撮影開始から次の撮影までの時間は20秒であった。各刺激において20回計測を行った。

2.3 音刺激

トノトピー計測のため、1 kHz、4 kHz、20 kHzのトーンバーストを提示した。音圧、時間間隔はいずれも60 dB SPL、25 msであった。また、Isolation call(生後4日目)に選択的に反応する脳部位を特定するため、Isolation call、その時間軸を反転させた音刺激を使用した。音圧、時間間隔はいずれも95 dB SPL、110 msであった。

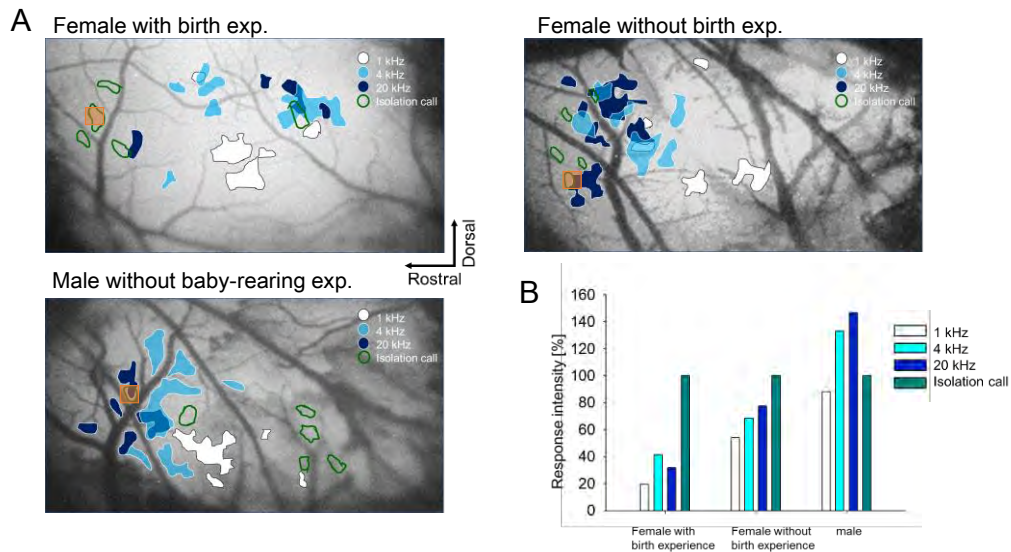


Fig. 4 Experience dependent selectivity change in auditory cortex

3. 実験結果

3.1. Isolation call 計測

3分間での平均発声回数, 平均持続時間, 音圧レベルがピーク時での平均周波数について, 生後1日目から生後25日目までの変化を Fig. 1に示す. 音声の平均周波数と平均持続時間は, 被験体が発育するにつれて減少する様子が観察された. 平均発声回数は生後5日目が最大となり, 生後18日目まで徐々に減少し, 生後19日目以降は音声ほとんど計測されなかった. また生後8日目前後では周波数変調の大きな音声計測された.

3.2. フラビン蛋白蛍光イメージング

スナネズミの頭蓋の画像と CCD カメラで撮影した出産経験のある雌における計測部位の画像を Fig. 2に示す. また, 出産経験のある雌, 出産経験のない雌, 雄の三个体におけるトノトピーのイメージング結果を Fig. 3に示す. これらの結果から 1 kHz, 4 kHz, 20 kHz の音刺激に対して反応が最大となる脳部位はそれぞれ異なることがわかった. また, 反応の最大点はそれぞれの刺激に対して反応開始から終了まで一貫して同じ部位であった.

次に同様の三个体において Isolation call と時間軸を反転させた isolation call を提示した際に反応が最大であった時間でのイメージング結果を Fig. 4に示す. この結果から, 出産経験のある雌の個体では吻側と尾側, 出産経験のない雌の個体では吻側, 雄の個体では尾側に反応が現れることが確認されたが, 全ての個体において, 二つの刺激間での反応部位の差異はみられなかった.

4. 考察

4.1. Isolation call 計測

幼獣の発達に伴い Isolation call の継続時間と周波数が減少しており, スナネズミの成体が発する Greeting call の継続時間と周波数に近づいていることがわかった. このことから成長にしたがって, Isolation call が Greeting call に変化していることが示唆される.

また, 生後19日目以降は発声頻度が大きく減少していた. したがって幼獣が自ら巣へ帰ることができ, 親の助けを必要としていないことが考えられる.

生後8日目前後での Isolation call は周波数変調が大きく, 生後間もない頃の音声と比べて複雑な音声を発していることがわかった(Fig. 1).

このことから生後 8 日目前後にかけて幼獣の声帯が発達していることが示唆される。

4.2. フラビン蛋白蛍光イメージング

計測された結果と電気生理学的手法でトノトピーを計測した先行研究を比較すると、本実験で計測された部位は AAF, A1, DP であると考えられる⁶⁾。

出産経験のある雌、出産経験のない雌、雄の三個体において 1 kHz, 4 kHz, 20 kHz, isolation call の音刺激に対する応答部位の比較と、A1, AAF 内におけるそれぞれの音刺激に対する反応強度の比較を行った。全ての個体において 1 kHz の音刺激に対しては A1 での反応が最も強く、他の音刺激よりも反応が大きかった。したがって低周波の音に対しては領域、反応強度の選択性が高く、高周波の音声とは異なる処理がされている可能性が考えられる。また、出産経験のある雌の個体のみ Isolation call に対する選択性の高さが顕著であった。このことから他個体よりも Isolation call を聞き分けることができ、そのため瞬時に Retrieve behavior を行うことができると考えられる⁷⁾。しかし Isolation call の時間軸反転の有無による反応の差はみられなかったため、周波数変調の微細な差は A1 の活動を大きく変化させない可能性が示唆される。

vocalizations produced by a nanocrystalline silicon thermo-acoustic emitter”, *Brain Res.* 1163(2007) 91-99.

- 4) Elwood, R., (1979) “Ultrasounds and maternal behavior in the Mongolian gerbil”, *Developmental Psychobiol.*, 12(4), 281-284.
- 5) Nishikawa, J. Ohtaka, Y., Tachibana, Y., et al. (2018); Flavoprotein fluorescence imaging-based electrode implantation for subfield-targeted chronic recording in the mouse auditory cortex; *J. Neurosci. Methods* 293 77–85
- 6) Thomas, H and Lopez, V. (2003); Comparative study of inter-and intrahemispheric cortico-cortical connections in gerbil auditory cortex; *Biolog. Res. ISSN 0716-9760*.
- 7) Marlin, Bianca J., et al. “Oxytocin enables maternal behaviour by balancing cortical inhibition.” *Nature* 520.7548 (2015): 499.

References

- 1) Ryan, A., (1976) “Hearing sensitivity of the mongolian gerbil, *Meriones unguiculatis*”, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 59, No. 5.
- 2) Nabetani, Y. and Riquimaroux, H., (2004) “Situation-dependent vocalizations of Mongolian gerbils for communication”, *The Seventh International Congress of Neuroethology program and abstracts*, PO34.
- 3) Uematsu, A., Kikusui, T., Kihara, T. et al., (2007) “Maternal approaches to pup ultrasonic

5.4 センサ情報通信プラットフォーム

Effective Vehicle-to-Vehicle Communication with OpenFlow Technology

Yoshiharu INOUE* , Masanori TADA* , Hideki SHIMADA* and Kenya SATO*

(Received November 25, 2014)

In contemporary society, many people conduct the study of the inter-vehicle communication. On the inter-vehicle communication, the automobile communication uses wireless network communication such as ad-hoc network. However, the stability of wireless communication on the inter-vehicle communication is changeable from moment to moment. And, when the distance between vehicle to vehicle is long, the stability will be unstable. By the way, the openflow network is called soft-defined network. We can control the openflow network programmably and dynamically using openflow controller and switch. The purpose of this paper intends to control the inter-vehicle communication stably by managing the wireless ad-hoc network dynamically using openflow as considering the position of vehicles on the assumption that the vehicles have the function of openflow switch. If the intermediate vehicle exists between sender and receiver they are communicating each other, we construct the robust wireless communication as changing the network flow from receiver to intermediate vehicle and establishing the communication from intermediate vehicle to receiver. In this paper, we estimate the stability of openflow wireless communication as comparing the throughput, the packet transport factor and time cost of establishing of conventional ad-hoc inter-vehicle communication with our proposal system that considers the position of vehicles.

Key words : OpenFlow,ITS,Vehicle-to-Vehicle Communication

キーワード : OpenFlow, ITS, 車車間通信

OpenFlow による車々間通信の効率化

井上 慶春, 多田 正範, 島田 秀輝, 佐藤 健哉

1 はじめに

近年, 知的交通システム (ITS) の研究において, 安全運転支援や将来の自動運転に向けた通信ネットワークに関する検討が活発に行われている. 道路交通においては, 比較的限られた範囲の道路情報に着目することが多く, 通信形態においては, 車両と車両 (車々間), 車両と歩行者の通信等が挙げられる. このような限られた範囲での通信では, 一般的に無線通信のアドホックネットワークを用いた通信を用いることが多く, 様々なプロト

コルを開発し, 通信環境を改善する研究がおこなわれている¹⁾. 本稿では, ネットワークの機能を仮想的に制御するための技術の1つである OpenFlow²⁾を用いて, 通信する移動体同士の最適な通信経路を確立し, 快適な通信が行えるネットワークを構築することを目的として, 車両の位置や速度, 進行方向などの動的特性を利用した OpenFlow によるアドホックネットワーク制御方式を提案する.

* Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Telephone : +81-774-65-7564, E-mail : hshimada@mail.doshisha.ac.jp, ksato@mail.doshisha.ac.jp

2 OpenFlow

OpenFlow は、Soft-Defined Networking, 通称 SDN と呼ばれるものの一種であり、従来のネットワークとはことなり、ネットワークの動作をルータやスイッチによる自律的な動作ではなく、それらを使用するシステム開発者がプログラミングを行うことによって、ルーティングの動作を設定するネットワークの形態である。Openflow によるデータ通信は、基本的に Layer2 のデータリンク層で行われる。OpenFlow のシステム構成例を Fig.1 に示す。Fig.1 に示す通り、OpenFlow のシステムは、基本的に OpenFlow コントローラ、OpenFlow スイッチとホストで構成される。OpenFlow コントローラは、OpenFlow ネットワークのトラフィック状況や、スイッチの接続状況、ポート等、様々なことパラメータを監視し、スイッチからの要求によって、ネットワークのルーティング方法や、トラフィックの流れを変更する。OpenFlow スイッチの役割は、主に OpenFlow スイッチ間と、ホスト間でデータを通信することであるが、OpenFlow コントローラへ、パケットや、ルーティング方法等の問い合わせを Packet-in という情報を送信することにより問い合わせるのが特徴である。OpenFlow の動作例を説明する。Fig.1 において、ホスト 1 とホスト 2 がホスト 3 へデータを送信する場合を考える。図の関係上、スイッチ 1 とスイッチ 4 が Openflow コントローラとセキュアネットワークを通じて接続されているように描いているが、全ての OpenFlow スイッチはセキュアネットワークを通じて、OpenFlow コントローラと接続されているものとする。ホスト 1 は OpenFlow スイッチ 1 と接続されており、ホスト 2、ホスト 3 はそれぞれ Openflow スイッチ 2、OpenFlow スイッチ 5 と接続されている。ここで、ホスト 2 が先にホスト 3 へデータを送信すると考える。この時の経路はホスト 2⇒スイッチ 2⇒スイッチ 1⇒スイッチ 4⇒スイッチ 5⇒ホスト 3 とする。その場合、Fig.1 に示す通り、スイッチ 2 とスイッチ 1 間、スイッチ 1 とスイッチ 4 間、スイッチ 4 とスイッチ 5 間が通信混雑状態になるとする。この状態の時に、ホスト 1 がホスト 3 に対してデータの送信を開始するとする。しかしながら、この時、スイッチ 1 とスイッチ 4 の間が混雑しており、スループットが落ちている。ここで、スイッチ 1 が OpenFlow コントローラに対して、経路変更を要請する Packet-In パケットを送信する。その時、スイッチ 1 とスイッチ 5 間は混雑していないので、ここにデー

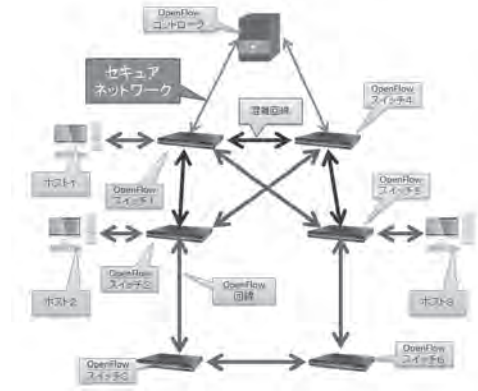


Fig. 1. The Example of OpenFlow.

タを流すよう OpenFlow コントローラが命令する。このことにより、通信が快適になる。これが、OpenFlow の動作の一つである。

3 提案システム

3.1 概要

本提案システムは、移動体ノード（以下モバイルノード）間で無線によるアドホックネットワークを OpenFlow の技術により効率的に実現することを目的とする。動的特性とは、移動体における動きの特性であり、この動的特性を考慮しながら、データを送信するモバイルノードからデータを受信するモバイルノードまで、通信を効率的に行うことができる通信経路の構築を目的とする。本稿で考慮する動的特性として、モバイルノードの位置情報と、モバイルノードの速度情報、速度ベクトルを挙げる。

3.2 システム構成

提案システムの構成の例を Fig.2 に示す。本稿のシステム要素は、Fig.2 に示す通り、OpenFlow コントローラ、送信ノード、中継ノード、受信ノード（以下、総称しモバイルノード）、そして OpenFlow コントローラとモバイルノードを接続する 3G/セルラー回線、モバイルノード同士を相互に接続する IEEE802.11p に代表されるアドホックネットワークの回線から構成される。

3.3 提案システムの構成要素の仕様

OpenFlow コントローラの仕様を以下に示す。

設置するネットワーク階層 Layer3（グローバルネットワーク）に設置する。

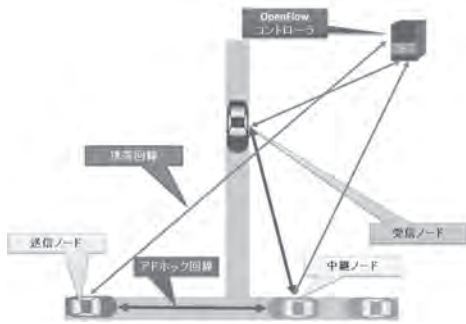


Fig. 2. The Composition of Proposed System.

通信対象 OpenFlow スイッチ機能を持つモバイルノードと通信を行う。

通信手段 セルラーネットワーク（インフラストラクチャー）を用いて通信を行う。

管理対象データ・データ管理方法 モバイルノードノードのグループの通信を管理。この際、モバイルノードの識別子、データを送信するモバイルノードからデータを受信するモバイルノードノードと中継となるモバイルノードをそれぞれ接続するデータパスIDとそのポート番号を管理する。加えて、モバイルノードのIP アドレス、MAC アドレスと位置情報、速度情報を管理し、モバイルノードからの要求にしたがって、経路の変更とその経路情報データの更新を行う。

次に、モバイルノードの仕様を以下に示す。

クライアント機能 位置情報、速度情報を OpenFlow コントローラに送信、あるいは転送する。

OpenFlow スイッチ機能 OpenFlow スイッチの機能を果たす。OpenFlow を利用する目的としては、情報を送信したい目的モバイルノードまでの最適なネットワーク経路を確保する。

アドホック/セルラー通信機能 OpenFlow コントローラに位置情報と経路変更を求めるためにセルラー通信機能を、OpenFlow 機能を持つ特定の範囲に存在するモバイルノードとの通信を行うためにアドホックネットワークを利用する。

3.4 動作手順

提案システムの通信確立シーケンスを 3 に示す。

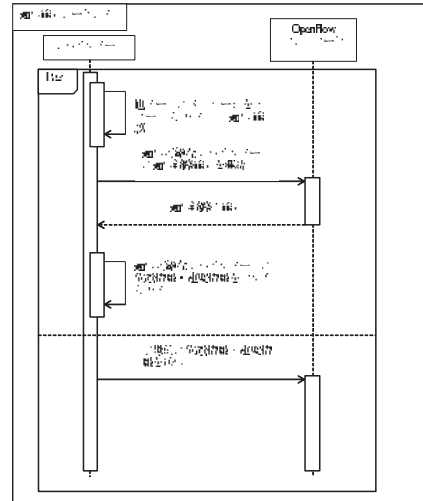


Fig. 3. The Sequence of Establishment of Transmission.

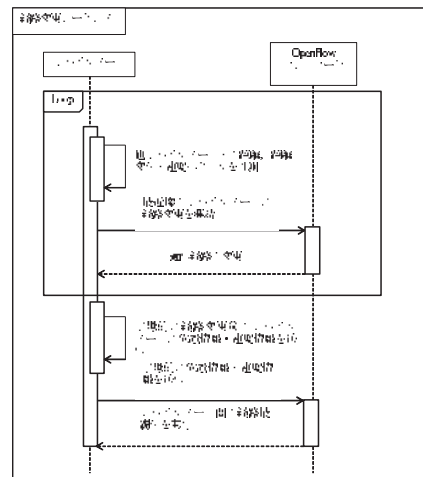


Fig. 4. The Sequence of Changing Transmission Path.

本稿の提案システムは、モバイルノード同士の通信経路の確立と、Fig.3 のように、まず、通信可能なモバイルノードが存在することを確認するために、フラッディングを行う。その後、相手のメッセージを受け取った場合、自分のメッセージも相手にとってもらったこととして、OpenFlow コントローラへ通信可能なモバイルノードに通信経路確立要請を行う。また通信確立までの同時並行的動作として、モバイルノードがセルラー回線を通じて OpenFlow コントローラへ、自分の位置情報と速度情報を送ることとする。次に、他モバイルノードと通信を確立してから、経路を変更するまでのシステムシーケンスを Fig.4 に示す。

Fig.4 のように、経路変更時の動作では、まず他モバ

Table 1. The Control Data of Mobile Node.

管理データ	説明
識別子	モバイルノードの識別子
データパス ID	モバイルノードが接続しているデータパス ID
IP アドレス	モバイルノードの IP アドレス
MAC アドレス	モバイルノードの MAC アドレス (48 ビット)
ポート番号	モバイルノードが接続するポート番号
位置情報	モバイルノードの位置情報 (xy 座標)
速度情報	モバイルノードの速度情報 (xy 方向)

イルノードとの距離を計測する。さらに、メッセージを受け取った瞬間から次のメッセージを受け取った瞬間までの他モバイルノードとの距離差から、速度ベクトルを計算し、他ノードがどの場所へ移動しようとしているかを予測し、遠ざかっているならば通信を中止し、近づいているモバイルノードとの通信を確立する。なお、全ての他モバイルノードとの通信が切断された場合、通信経路確立シーケンスへ戻ることとする。

4 実装

4.1 Trema

本稿では、OpenFlow による通信を実現するため、OpenFlow コントローラを開発するためのプログラミングフレームワークである Trema³⁾ を利用する。Trema では、シミュレーションにおいて、車両の位置や速度、進行方向などの動的特性の実装がされていないため、後の節で述べるように、動的特性の管理、演算方法の実装を行った。

4.2 モバイルノードの情報

本稿の実装では、モバイルノードの動的特性に基づいてシミュレータを行うため、OpenFlow コントローラが管理するモバイルノードのデータとその演算方法を記す。表 1 に OpenFlow コントローラが管理するデータの一覧を示す。

まず、モバイルノードの識別子は、シミュレーション上に存在するモバイルノードを区別するためのもので、ID として扱う。そして、モバイルノードが接続しているデータパス ID は、モバイルノードが他モバイルノードとどの経路で接続されているかを確認するためのもの

で、経路ごとに ID を設ける。次にモバイルノードの IP アドレスであるが、モバイルノードと OpenFlow コントローラは、携帯回線を用いて接続されているため、L3 での通信である。したがって、モバイルノードごとに IP アドレスを設ける。次にモバイルノードの MAC アドレスであるが、モバイルノード同士は、アドホックネットワークを用いて接続されているため、通信には MAC アドレスが必要である。そして、アドホックネットワークがそれぞれのモバイルノードのスイッチのどのポートに接続されているかを把握するため、モバイルノードが接続するポート番号を管理する。そして、モバイルノードの位置情報として、x 座標、y 座標を用いて表し、モバイルノードがどの位置に存在しているかをコントローラが把握するためのものである。また、速度ベクトルを計算するため、移動した後の現在の位置と、移動する直前の位置を記録し、移動後の現在の位置を x 座標、y 座標をそれぞれ、x[1], y[1]、移動する直前の x 座標、y 座標をそれぞれ x[0], y[0] としている。最後に、モバイルノードの速度情報として、モバイルノードの速さと向きを表す。速度情報も、x 方向、y 方向を用いて表すので、正の速度、負の速度をそれぞれ、x、y の正の方向、負の方向の速度として用いている。

4.3 モバイルノードの情報の演算

次に、モバイルノードの情報をどのように用いて、演算するかについて述べる。

他モバイルノードとの距離 自モバイルノードの x 座標と y 座標を、それぞれ x1, y1、他モバイルノードの x 座標、y 座標を x2, y2 として、距離 L を式 1 のように演算を行う。

$$L = \sqrt{(x1 - x2)^2 + (y1 - y2)^2} \quad (1)$$

速度ベクトル 速度ベクトルの演算は、モバイルノードを移動させるスレッドの Sleep タイムと同じ間隔で演算する。4.2 節で述べたように、速度ベクトルの演算は、移動直後の x,y 座標と、移動直前の x,y の差を用いて演算する。

$$\Delta x = x[1] - x[0] \quad (2)$$

$$\Delta y = y[1] - y[0] \quad (3)$$

4.4 接続優先度の設定

本節では、接続優先度の設定方法に説明する。まず、本稿での接続優先度は、データを送信するモバイルノード

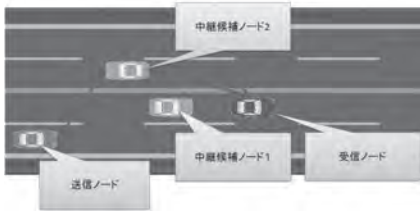


Fig. 5. The case of Existing Two Intermediate Nodes.

Table 2. The Element of Connection Priority.

接続優先要素	接続優先度
送信・中継ノードの速度ベクトル	1
送信・中継ノードの位置情報	2

ドが中継となるモバイルノードをどのように選ぶかということである。例えば、Fig.5のように、データを送信するモバイルノードと、データを受信するモバイルノードがxの正の方向に移動しているとし、二者の間に、中継となる車両が2台存在しているとす。一方の中継車両は、xの正の方向に移動しており、もう一方の中継車両は、xの負の方向に移動しており、かつ、xの正の方向に移動しているモバイルノードよりも、データを送信するモバイルノードと距離が近いとする。無線通信をする際、距離が近いモバイルノードに接続する方が、通信が安定するが、xの正の方向に移動するモバイルノードと、xの負の方向に移動するモバイルノード同士が接続すると、最終的には距離が離れてしまい、通信が安定しなくなる。送信者と受信者の二者の間に、移動方向が違う二つの中継となるモバイルノードが存在する場合、同方向に移動するモバイルノードに優先して接続する。接続優先度は表2の通りである。表2は、速度ベクトルと距離情報による接続優先度の順位を表しており、昇順に優先順位が高くなる。速度ベクトルが大きく異なる場合、送信モバイルノードと中継モバイルノードの距離が広がり、無線通信が安定しなくなるため、速度ベクトル情報を、接続における優先度の情報として高位としている。

5 評価

5.1 評価環境

表3に本稿で用いた評価の環境を記載する。

また、評価するモデルとしては、今回はx方向のみを

Table 3. The Environment of Estimation.

ホスト OS	Windows7
ゲスト OS	Ubuntu 13.0
ホスト OS RAM	3072MB
CPU	Corei7-860
仮想環境構築 RAM	VMPlayer5.0
シミュレーションフレームワーク	Trema0.4.7

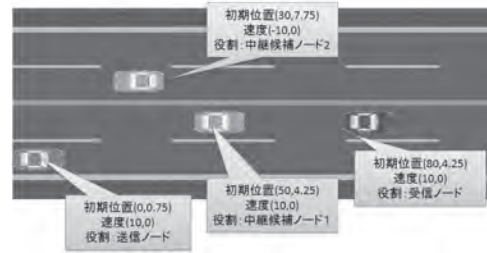


Fig. 6. The Disposition of Mobile Nodes.

考慮し、設定した瞬間での位置特性や速度特性を持つモバイルノードを考える。

5.2 実装車両

Fig.6に評価用に実装した車両の情報を記載する。Fig.6示したように、車両1、車両2、車両3はそれぞれxの正方向に毎秒10m/sで等速運動をしており、車両4のみ、xの負の方向に毎秒10m/sで等速運動をしている。

5.3 評価結果

本稿の提案システムでは、通信するモバイルノード同士が経路の切り替えを行う。しがたって、経路の変更に要する時間を評価する必要がある。表4に経路変更に要する時間を示す。OpenFlowを用いない通信においては、通信経路の変更という概念が存在しない。つまり、経路変更による通信の途絶時間が存在しないということであるが、本提案システムでは、通信経路の変更において、表4に示す通信の途絶時間が存在する。

Table 4. The Time Cost of Changing Transmission Path.

通信方式	変更時間 [sec]
OpenFlowを用いない通信	0
提案システム	0.4

6 関連研究

6.1 先行経路上の道路情報取得用アドホック通信プロトコルの開発

本稿の関連研究として、先行経路上の道路情報取得用アドホック通信プロトコルの開発⁴⁾を挙げる。本関連研究では、車々間通信を無線 LAN のアドホック通信機能を用いて先行経路上の道路情報を伝播させていくためのアプリケーション層のプロトコルを提案している。本稿の研究とは、各車両が自身の道路情報と受信した他車両の道路情報を一定の周期で通信・中継し、そのデータを前後車両、対向車線を走る他の車両に転送する部分が類似する。本研究は、無線 LAN のアドホックプロトコルに OpenFlow を用いることによって、最適な通信経路を確保し、通信を行う点と通信には主にブロードキャストを用いる点が本関連研究と異なっている。

6.2 Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks

本研究⁵⁾では、アドホックネットワークにおける車車間通信を研究対象としている。プロトコルとして3つのプロトコルを開発しているが、その中でも本関連研究と類似している点は、Area Based Methods の Distance Scheme というシステムである。ブロードキャストを用いている点で、本研究とは異なるが、近隣車との距離情報を用いて、パケットを送る前に、ブロードキャストをして、通信確認を行う。そして、通信確認を行った後、設定した閾値以下の距離ならば、以後ブロードキャストによる通信確認は行わず、近隣車との通信を実行する。

7 考察

本稿の提案システムでは、通信しているモバイルノード同士の距離と速度情報を考慮して、経路変更を行うことによって、通信の安定を図ることを述べた。??節でも述べたように、無線通信において、通信距離が延びるならば、データを受信するノードの受信電力は低くなり、スループットやパケット到達率が低下するが、提案システムでは、通信距離を中継となる車両を経由するので、スループットとパケット到達率の低下を防ぐことができる。しかし、通常通信する場合は、経路変更という手続きが存在しないが、この手続きが、提案システムにおいては追加される。したがって、経路変更にかかる時間を考慮する必要がある。また、実環境下のことを考慮する

場合、無線通信においては、温度や障害物等を考慮する必要がある。

8 おわりに

本稿では、本研究の背景として高度道路交通システム (ITS) により、様々な交通での通信形態やアルゴリズムが研究されていることを述べ、通信形態においては、車両と車両 (車々間)、車両と歩行者の通信形態が考えられることを挙げ、その中でも車両と車両の通信に着目した。

問題点としては、データを受信するモバイルノードとデータを送信するモバイルノードの距離が離れることにより、無線での通信不安定となり、様々な問題が起こることを指摘し、その中でもスループットの低下と、パケット到達率の低下を問題点として挙げた。そして関連研究として、「先行経路上の道路情報取得用アドホック通信プロトコルの開発」と「Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks」を挙げ、本研究との類似点と相違点を述べた。そして動的特性を利用した OpenFlow によるアドホックネットワーク制御方式を提案、実装を説明し、評価の方法と結果を述べ、その考察によって提案システムの有効性を述べた。

本研究の一部は、科学研究費助成事業および総務省戦略的情報通信研究開発推進制度の支援を受けている。

参考文献

- 1) 若山 公威, 車車間通信に適したアドホックネットワーク, *Journal of School of Foreign Languages, Nagoya University of Foreign Studies* (34), pp.197 - 212, 2008-02
- 2) Nick McKeown, Tom Anderson, Hari Balakrishnan, Guru Parulkar, Larry Peterson, Jennifer Rexford, Scott Shenker, and Jonathan Turner. 2008. OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks. *SIGCOMM Rev.* 38, No.2, pp.69-74, 2008.
- 3) H. Shimonishi, Y. Chiba, Y. Takamiya, and K. Sugyo, Trema: An Open Source OpenFlow Controller Platform, GEC-11 Poster, 2011.
- 4) 齊藤 正史, 塚本 淳, 船井 麻祐子, 梅津 高朗, 北岡 広宣, 寺本 英二, 東野 輝夫, 先行経路上の道路情報取得用アドホック通信プロトコルの開発, *情報処理学会論文誌*, pp.2695-2703, 2005
- 5) Brad Williams, Tracy Camp: Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks, *Proceedings of the ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC)*, pp.194 - 205, 2002

Global LDM Concept : Dynamic Information Management on Networked Distributed System

Kenya SATO^{*}, Hideki SHIMADA^{*} and Hiroaki TAKADA^{**}

(Received March 10, 2014)

In recent years, automotive systems require various data, including data from on-board sensors and external sources through vehicle-to-vehicle (V2V) communication and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication to recognize environmental situation. As increasing the amount of data being used in automotive systems, processes that use these data become more complicate, and can be duplicated over multiple applications. To manage automotive data efficiently, a relational database management systems for automotive systems based on a data integration architecture has been developed. Meanwhile, cooperative safety driving systems using V2V and V2I communication are being developed as a means of exchanging vehicle sensor information, road information, and other types of data. Local Dynamic Map (LDM) has been standardized as a mechanism for managing these sensor data with geographical maps. The implementations make use of existing database management systems for which response time is thought to deteriorate as the number of vehicles increase. According to the experimental results, the number of vehicles increases and the response time of the application becomes worse. In this paper, we propose the global LDM concept using NoSQL. By using NoSQL, many vehicles and the cloud center can manage large amount of sensor data dispersedly. The vehicles make a local sensing map and the center makes the global sensing map by consolidating the local maps in the global LDM concept.

Key words : LDM (Local Dynamic Map), Distributed Systems, Information Management, Global LDM Concept

キーワード : LDM (Local Dynamic Map), 分散システム, 情報管理, グローバル LDM コンセプト

グローバル LDM コンセプト : 動的情報のネットワーク分散管理

佐藤 健哉, 島田 秀輝, 高田 広章

1 はじめに

近年, カメラやレーダなどのセンサを車両に搭載し安全運転支援システムが広く普及し始めている. ステレオカメラにより前方を監視することで先行車の追従走行や障害物認識による衝突被害軽減などの運転支援を行うシステム¹⁾, ミリ波レーダを利用したシステム²⁾. レーザレーダを利用したシステム³⁾ などがある. これらのシ

ステムは, それぞれ異なるセンサが利用されているが, 空間分解能, 検知距離, 悪天候下における認識精度, 価格など, センサごとに特性が異なり, 長所, 短所が存在する⁴⁾.

このような個々のセンサの短所を補うため, たとえば, カメラ, ミリ波レーダ, レーザレーダを同時に搭載し, 個々のセンサで異なる機能を実現でしているシステム⁵⁾もある. 具体的には, カメラにより中距離を監視

^{*} Mobility Research Center, Doshisha University, Kyoto

Telephone : +81-774-65-6297, E-mail : ksato@mail.doshisha.ac.jp, hshimada@mail4.doshisha.ac.jp

^{**} Center for Embedded Computing Systems, Nagoya University, Nagoya

Telephone : +81-52-747-5887, E-mail : hiro@is.nagoya-u.ac.jp

することで衝突被害軽減を実現し、ミリ波レーダで比較的長距離を監視することで前方車追従と衝突危険警告、レーザレーダで近距離を監視し急発進抑制を実現している。

この場合、それぞれのアプリケーションの役割ごとに個別システムを構築しており、センサデータを効率的に融合できていないのが現状である。一方で、ミリ波レーダやレーザレーダの検知結果、カメラの認識結果、車輪速センサ、加速度センサ、位置検出センサなど多様なセンサを複数搭載し、これに車々間通信や路車間通信からのデータも加わって、相互に情報交換を行う高度な安全運転支援システムを実現するためには、それぞれの電子制御ユニットがネットワーク経由で情報をやりとりする必要があり、センサやアプリケーションの種類に増加に伴い、ソフトウェアの設計がますます複雑になるという問題がある。

2 データ統合アーキテクチャ

2.1 アプローチ

このソフトウェア設計の複雑化という問題を解決するため、アプリケーションごとの個別システムをネットワークで接続する従来型の構成ではなく、それぞれのセンサデータを統合して管理することでシステム設計を容易に実現するアプローチを検討してきた⁶⁾。Fig. 1 に示すように、個別システムにおいてそれぞれ管理されていたデータを仮想的に統合管理し、センサによるデータ取得を切り離す構成を採る。周辺監視のためのレーダやカメラなどのセンサ情報から得られる物体の存在情報を確率として合算し、車速/車輪速センサやステアリングセンサ、加速度/角速度センサなどから得られる車両の運動状況を示すデータを正規化し、路車間・車々間通信経由で取得した情報を統合することで、複数のアプリケーションから共通に利用することが可能となる。

2.2 LDM

一方で、車両のセンサデータである位置や速度の情報に加えて、道路状態、交通状況、天気などに関する情報、および、静的地図データも含めて、Fig. 2 に示すように、これらを階層的に管理・保持している概念的なデータの集合体で Local Dynamic Map (LDM) の標準化が検討されている⁷⁾。

LDM では、静的な地図情報と動的な車両情報が別の

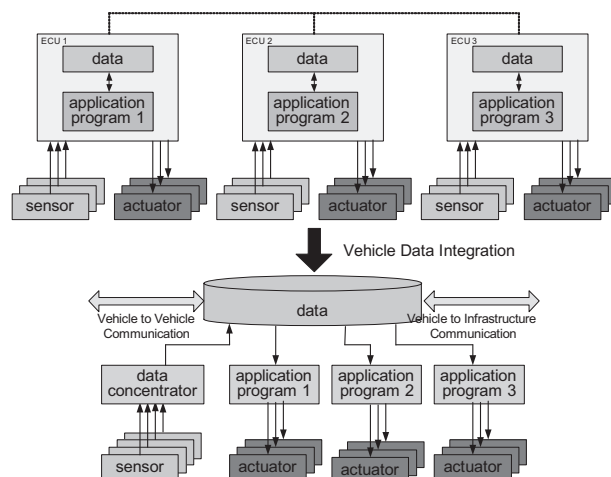


Fig. 1. Vehicle Data Integration Architecture.

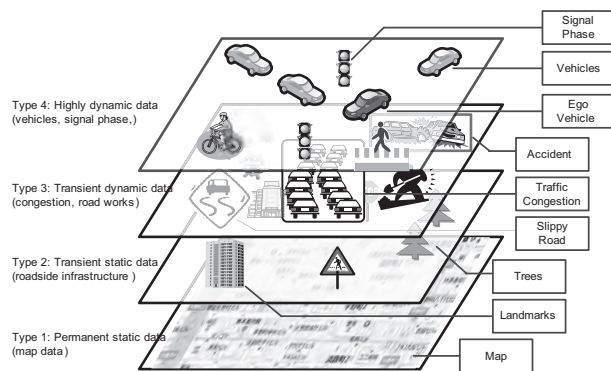


Fig. 2. Local Dynamic Map (LDM).

テーブルで管理するように設計されており、各階層のデータには geometry と呼ばれる位置に関する属性情報を持つ。位置情報を管理することによって、各情報がどの位置に存在するかを取得することは可能であるが、LDM では階層間を関係付ける機構を備えている。車両情報を管理するテーブルでは各車両の絶対位置情報を取得することが可能であるが、関係テーブルを利用することによって各車両が LDM におけるどの道路情報を走行しているかなどを取得することが可能となる。

3 協調 ITS

前述のようなカメラ、ミリ波レーダ、レーザレーダなど、車両に搭載されたセンサでは、車両から見通せる範囲の障害物しか検知できず、見通しの悪い交差点からの飛び出しなどの衝突可能性に対応することができない。そこで道路側に設置されたセンサにより車両や歩行者を検知し、その情報を路車間通信により車両に送信するこ

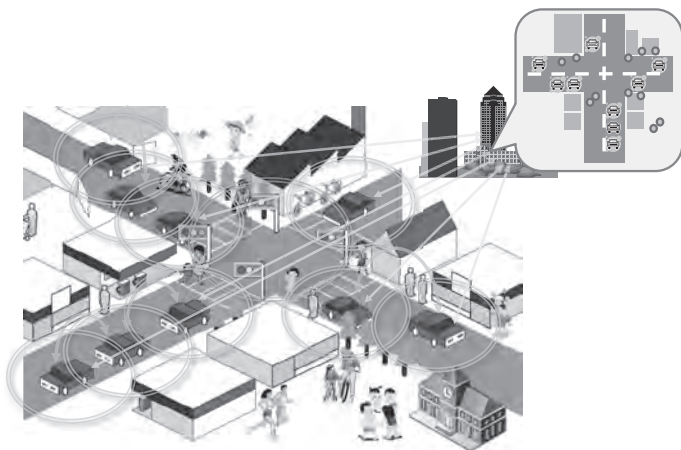


Fig. 3. Cooperative ITS Applications.

とで危険を知らせる協調型の ITS 関連システムが登場してきた。

たとえば、国土交通省道路局が中心となって開発を進めているスマートウェイ (ETC2.0)⁸⁾、警察庁などによる DSSS (Driving Safety Support Systems)⁹⁾、国土交通省自動車局が中心となって進める先進安全自動車 (ASV)¹⁰⁾がある。また、欧州の Car2Car コミュニケーションコンソーシアム¹¹⁾、米国運輸省が進める Connected Vehicle プロジェクト¹²⁾などもある。

4 グローバル LDM コンセプト

4.1 全体構成

路車間通信や車々間通信を利用した協調 ITS では各車両やインフラのセンサ情報を相互に提供することで、Fig. 3 に示すように、車両に搭載されたセンサでは検知できない範囲の対象物を知らせることができ、より安全なシステムを実現可能となる。しかし、この分散されたセンサ情報を相互に効率よく処理するためには、それぞれの車両、あるいは、センターに LDM の機能を搭載し、標準的な手法で、この LDM のデータを相互にやりとりし、共通的に管理し分散処理する仕組みが必要となる。ここではこの機能をグローバル LDM コンセプトと呼ぶ。

4.2 実現方法

Fig. 4 に示すように、グローバル LDM コンセプトでは、各車両とクラウド上に存在するセンターにおいて、それぞれにおいてグリッドマップ上で車両センサデータ及び道路状態情報、物体情報を管理する。ここでは、車両同士は車々間通信を利用し、狭域グリッドマップで管

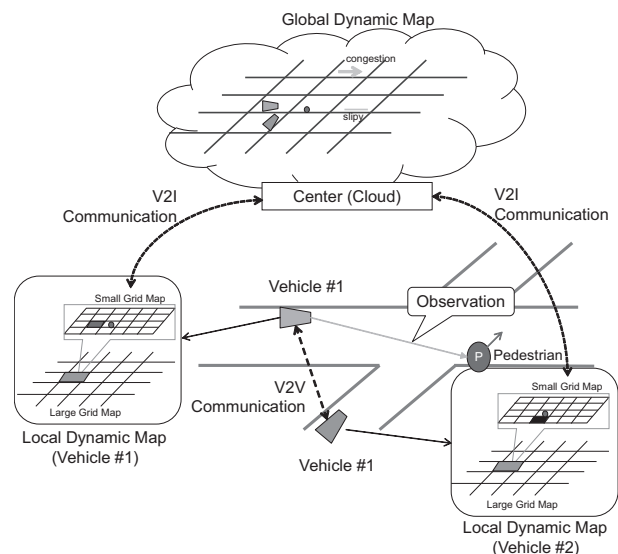


Fig. 4. Global LDM Concept.

理する近隣の情報をやりとりする。また、車両とセンター間は路車間通信を利用し、広域グリッドマップで管理する空間的に遠い情報をやりとりし、各車両で生成した車両センサデータを分散管理する。

また、車両の位置情報および、車両に搭載されたセンサから取得することができる物体情報を存在確率と共にグリッドマップにて管理を行う。センターは車両から収集したセンサデータをもとに渋滞情報などをデータフュージョンすることによって情報生成し広域グリッドマップにて管理し、車両に対して提供する、また、車両同士が直接通信できない場合も想定されるため、車両が存在する狭域グリッドマップの情報を各車両に対して提供する。狭域グリッドマップ、広域グリッドマップとグリッドのサイズが異なる 2 種類のグリッドマップを利用し、空間的に関連性が高い自車両の近隣のエリア情報に関しては狭域グリッドマップを利用し管理し、空間的に関連性が低い自車両の遠方のエリア情報に関しては広域グリッドマップを利用し管理する。

5 設計

5.1 設計方法

一般的に LDM の実装では、リレーショナルデータベースシステム (RDBMS) が利用される場合が多い。RDBMS は通常ハードディスク上でデータ管理を行うため、データ書き込みなどに処理時間を要するため車両の台数増加に伴いディスクアクセスが増加しアプリケー

ションの応答時間が車両センサデータの更新周期内に実行できないことある。加えて、LDM の特徴である車両センサデータと地図情報を関係づけるための空間演算処理の負荷が高く高遅延となることが判明している¹³⁾。

そこで、本研究においては、車両センサデータをセンサデータの時間的/空間的特性に応じて管理する方法を変更し、また車両センサデータを分散管理する手法を提案する。ここでは、グリッドマップを用いて物体情報、車両情報を管理し、また NoSQL を用いてオンメモリでデータ管理を行う仕組みをとる。

大量データを関係モデルを用いずに単純なデータモデルで分散管理することを可能とする NoSQL を利用する。RDBMS では各データを一貫して管理することには長けているが、センサデータなどを取り扱う場合、NoSQL のような単純なデータモデルで大量に高速処理する仕組みを利用することで性能向上を見込め、ここではこの構成の仕組みを利用して車両センサデータを管理する。

5.2 NoSQL データベース

グローバル LDM コンセプトの実装においては、Fig. 5 に示すモジュールで構成される。車載のセンサからの出力されたデータをグリッドマップを用いて管理し、ネットワークで接続された他車両およびセンターと通信しセンサデータの送受信を行う。衝突警告、車両制御などのアプリケーションが必要な情報を指定し、出力された情報を処理し出力する。本実装において、車両およびセンターにおけるデータ管理機構は、すべて同一として設計している。グリッドマップのデータは、NoSQL の mongoDB²⁾ を用いて管理している。mongoDB は、ドキュメント指向で設計された NoSQL の実装の一つであり、RDBMS とは異なりスキーマが存在せずデータ構造が柔軟であるという特徴を持つ。また、PostgreSQL の PostGIS のような地理空間インデックスの処理も mongoDB では可能であるため、位置情報や地図データを同時に取り扱うデータ管理の実装に適している。

5.3 自転車情報管理モジュール

自転車情報管理モジュールは、車両に搭載されたセンサから得られる値を変換し、グリッドマップおよび車両情報管理テーブルに登録する機構である。センサからの値は周期的 (一般に 10Hz) で生成されグリッドマップに登録する。センサの値としては GPS から得られる位置情報、カメラ画像、レーダから得られる周辺に存在する物体情報などがあげられる。緯度、経度の位置情報をグ

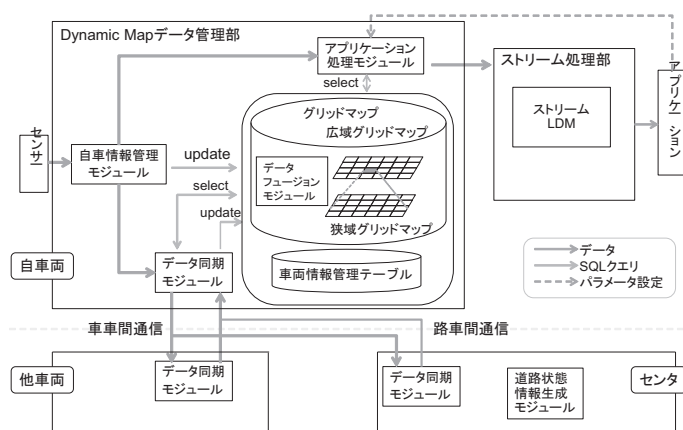


Fig. 5. System Design of Global LDM Concept.

リッドマップに登録するために座標系の変換を行う。グリッドマップの基準となる起点情報、グリッドサイズは全車両およびセンターで共通の情報として持っており、この情報をもとに緯度経度情報からグリッド座標系に変換しグリッドマップに登録する。

5.4 グリッドマップ

グリッドマップは仮想ダイナミックマップでデータを管理する機構である。全体構成の例を Fig. 6 に示す。グリッドマップは広域グリッドマップ、狭域グリッドマップの 2 種類に分けて管理する。今回の実装では、広域グリッドマップはグリッドのサイズが 200m 四方であり、空間的に遠く実時間性が低い情報を管理する。具体的には、距離が離れたところに存在する車両の位置情報、渋滞といった道路状態情報などがあげられる。広域グリッドの ID 情報、登録時刻、情報のタイプ、属性情報を管理する。一方、狭域グリッドマップはグリッドのサイズが 0.5m 四方であり、空間的に近く実時間性が高い情報を管理する。具体的には、自車のレーザーで検知した道路上の障害物情報および歩行者情報、近隣に存在する車両の位置情報などである。狭域グリッドの ID 情報、親となる広域グリッドの ID 情報、登録時刻、生成した車両の ID、確からしさ、情報のタイプ、属性情報を管理する。

5.5 車両情報管理テーブル

車両情報管理テーブルは、自転車および近隣に存在する車両から取得した車両の情報を管理するテーブルである。車両のセンサから得られる速度や加速度、緯度経度情報などの数値データを管理し、ストリーム処理部に対して出力する。

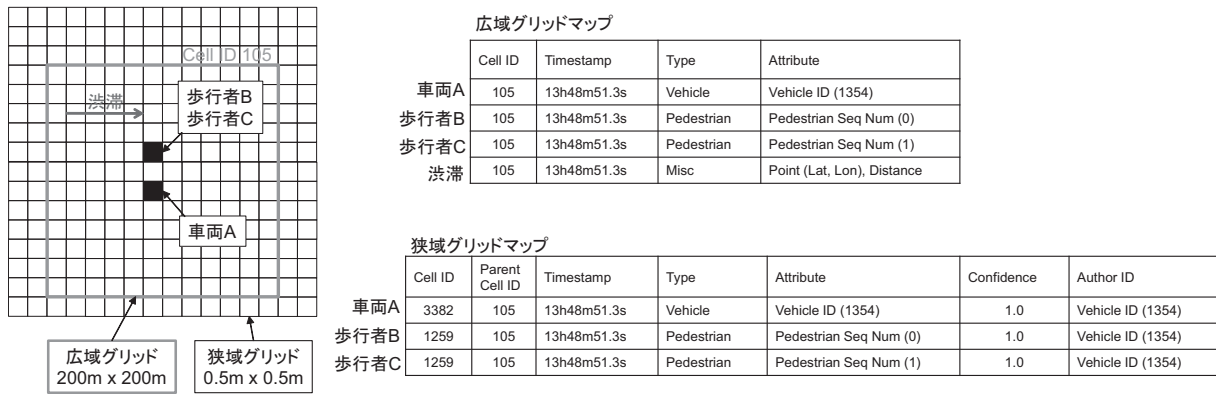


Fig. 6. Example of (Large and Small) Grid Maps.

5.6 アプリケーションモジュール

アプリケーションモジュールは、アプリケーションから必要な情報を受け付ける機構である。アプリケーションによってデータ処理部での処理内容は異なり、グリッドマップで管理し出力すべき情報は異なるため、この機構において取得する値および更新頻度を切り替える。

5.7 データ同期モジュール

データ同期モジュールは、他車両およびセンターと通信し生成したセンサデータを同期し分散管理する機構である。自車両と他車両のデータ同期は、データの生成周期ごとに実行される。対象となる車両は各車両の無線ネットワークデバイスの1ホップ内に存在する端末で、各車両は同期メッセージをブロードキャストする。同期メッセージを受信した車両は、各車両内のグリッドマップに受信内容を登録し、グリッドマップを更新する。同時に車両情報管理テーブルの更新も行う。

車両はセンターに対して前回の同期時との差分データを同期メッセージに含めて、センターに対して送信することで、車両間との同期を実現する。Fig. 7に同期シーケンスの例を示す。これによって、各車両とセンターは車両が生成したセンサデータの分散管理を実現する。センターは受信した車両のログデータを管理し、センター内のグリッドマップを更新する。

一方、センターには道路状態情報生成モジュールを設定し、各車両の位置、速度、方向などの車両情報を元に渋滞情報などを生成しグリッドマップを更新する。更新したグリッドマップの情報を車両からの同期メッセージの応答として各車両に対して配信する。各車両はセンターからの同期メッセージを受信し、車両内にあるグリッドマップの情報を更新する。このような手順によっ

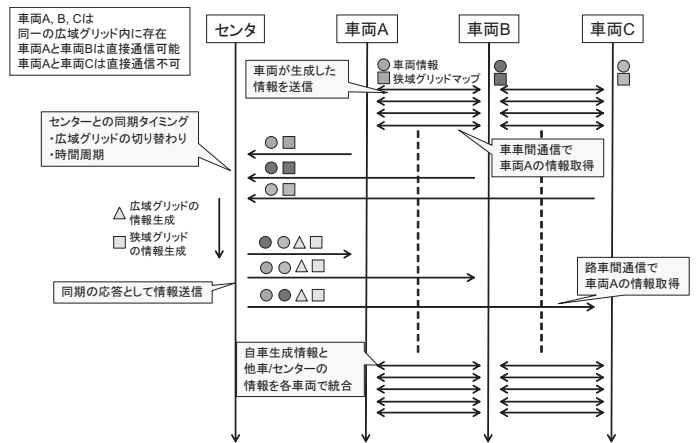


Fig. 7. Example of Data Sequence.

て、車両間の距離が離れているなど車両同士が直接通信できない場合の車両情報を取得することが可能になる。

6 実装・評価

6.1 評価環境

グローバルLDMコンセプトを評価するため、車両A、車両B、センタの役割を担うPCにより環境を構築した。評価環境をFig. 8に示す。OSにLinux Fedora 10を採用し、データベースとして、MonnoDB (2.6.2)を利用してLocal Dynamic Map機能およびGlobal Dynamic Map機能を実装した。

6.2 評価方法

交通流シミュレータを利用して、車両Aおよびその周辺を走行する合計50台の車両の位置、速度、方向を100m秒間隔(10Hz)で車両情報取得し、その記録した

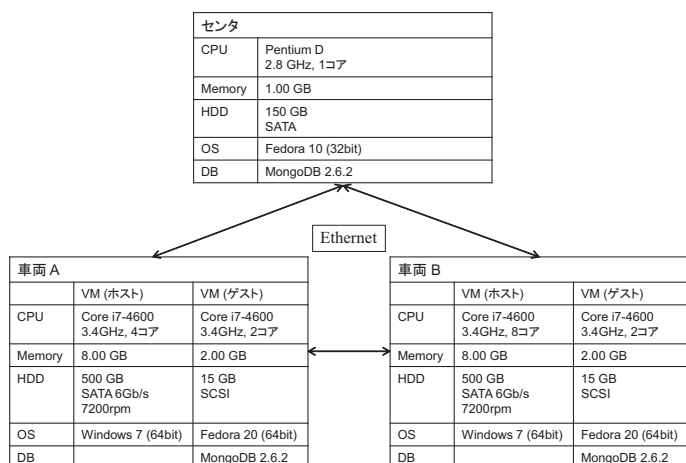


Fig. 8. Evaluation Environment.

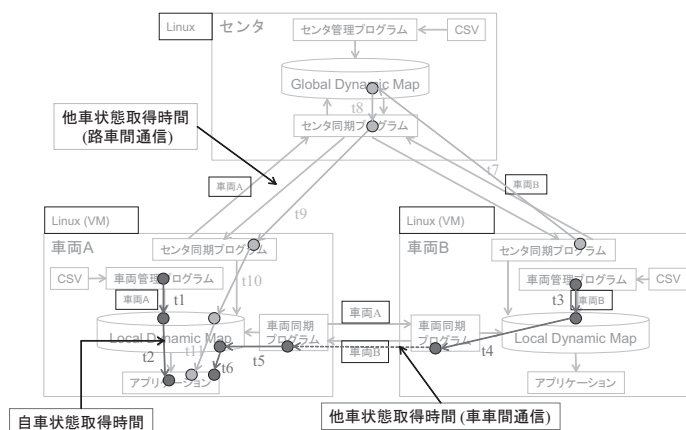


Fig. 9. Evaluation System Architecture.

データを CSV 形式で事前に用意する。車両 B に関しても同様である。これらを車両管理プログラムが読み込むことで、自車の状態および周辺の状態をセンサを利用して取得する模擬モデルを構築する。車両 A における衝突検知アプリケーションが、自車両情報および車両 B の車両情報を取得するまでの時間を計測して評価する。評価を行うためのシステム構成を Fig. 9 に示す。

車両 A の車両管理プログラムが Local Dynamic Map にデータを保存 (insert) する時間 (t1)、および、アプリケーションが Local Dynamic Map からデータを取り出す (select) する時間 (t2) を合わせて、自車両情報取得時間とする。

また、車々間通信を利用して、車両 A が車々間通信を利用して車両 B の車両情報を取得する時間は、車両 B の車両管理プログラムが Local Dynamic Map にデータを

保存 (insert) する時間 (t3)、車両同期プログラムが車両情報を取り出す (select) する時間 (t4)、このデータを車両 A に送信して車両 A の車両同期プログラムが Local Dynamic Map にデータを保存 (insert) する時間 (t5)、および、衝突検知アプリケーションが Local Dynamic Map からデータを取り出す (select) する時間 (t6) の合計となる。

一方、路車間通信を利用して、対象となるすべての車両の車両情報をセンタに集約し、そこから車両 B の車両車両を取り出し、車両 A に送信する場合を考える。車両 B の車両情報をセンタの Global Dynamic Map に保存 (insert) する時間 (t7)、保存したデータの中からセンタ同期プログラムが車両 B の車両情報を取り出す時間 (t8)、センタから車両 A に送信する時間 (t9)、車両 A の車両同期プログラムが Local Dynamic Map にデータを保存 (insert) する時間 (t10)、および、衝突検知アプリケーションが Local Dynamic Map からデータを取り出す (select) する時間 (t11) の合計が、路車間通信経由で車両 B の車両情報を車両 A のアプリケーションが取得する時間となる。

センタを利用する場合、車両 B 以外にも他の車両が車両情報を送信し、Global Dynamic Map に保存する必要があるため、車両情報を保存する車両の台数をパラメータとして評価した。

6.3 評価結果

車両 A において衝突検知アプリケーションが動作することを想定して、自車両情報と車両 B の車両情報を取得するまでの時間を計測した。車両 B の車両情報取得には、車々間通信を利用する場合、および、路車間通信を利用する場合を想定した。また、路車間通信を利用する場合は、センタに登録する車両の台数をパラメータとして時間を計測した。車両情報取得時間の評価結果を Fig. 10 に示す。

通常、車両情報の送信には 100m 秒周期のブロードキャストが利用されるため、今回の評価環境において、車両が 50 台程度であれば送信周期内に収まることを確認した。

7 まとめ

NoSQL を利用し車両とセンターにてセンサデータを分散管理し、各ノードで生成されるセンサデータを共

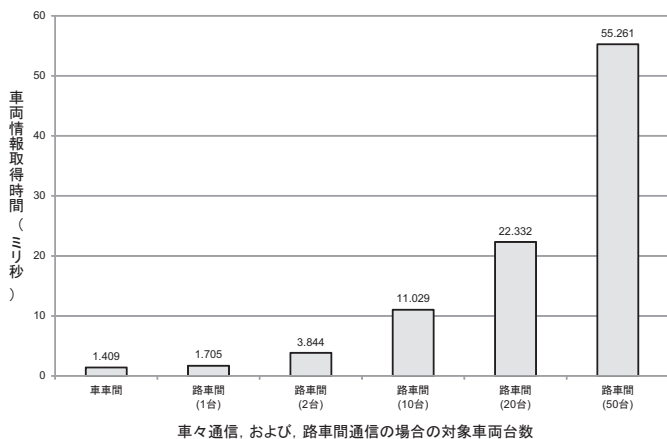


Fig. 10. Evaluation Result for V2V and V2I Communication.

有する仕組みであるグローバルLDMコンセプトの実現方法について示した。エミュレーション環境において、車々間通信および路車間通信システムを構築し、車両情報を直接送信する場合と、センタ経由で送信する場合の比較を行い、システムの妥当性を検証した。

本研究の一部は、「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」(平成26年~平成30年, 事業番号S1411030), および, 科学研究費補助金の支援を受けている。

参考文献

- 1) 真壁 俊介, “先進運転支援システムアイサイト (ver.2) の紹介”, 自動車技術, **66**[3], 88-93 (2012).
- 2) 市田 浩靖, 魚住 重康, 沖田 敏宣, “普及型プリクラッシュセーフティシステムの開発”, Toyota technical review, **59**[1], 88-92 (2013).
- 3) ダイハツ工業, “スマートアシスト”, <http://www.daihatsu.co.jp/sumaashi/>.
- 4) 日経 Automotive Technology, 日経エレクトロニクス 共同編集, “「ぶつからないクルマ」いざ普及へ, カーエレクトロニクス最前線 自動運転と衝突防止技術”, 74-83 (2013).
- 5) マツダ, “i-ACTIVSENSE ~ あなたの走りをサポートする安全技術 ~”, <http://www.mazda.com/jp/technology/safety/i-activesense/>.
- 6) 佐藤 健哉, “自動車走行環境認識のためのセンサデータ処理機構”, 電子情報通信学会 データ工学研究会, 信学技報 **110**[107], 51-56 (2010).
- 7) ETSI, “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Local Dy-

- 8) 畠中秀人, “ITSによる安全運転支援: 「スマートウェイ」の取り組み”, 信学技報, **109**[250], 5-8 (2009).
- 9) 小林 雅文, 大田 利文, 鎌田 邦廣, “DSSSの実用化に向けた開発研究”, 自動車技術, **64**[9], 43-48 (2010).
- 10) 鈴木 延昌, “先進安全自動車 (ASV) 推進計画について”, 自動車技術, **64**[9], 24-30 (2010).
- 11) Car2Car Communication Consortium, “Overview of the C2C-CC system” Technical Report version 1.0 (2007).
- 12) USDOT Connected Vehicle Research Program, “Vehicle-to-Vehicle Safety Application Research Plan”, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS811 373 (2011).
- 13) Hideki Shimada, Akihiro Yamaguchi, Hiroaki Takada, Kenya Sato, “Implementation and Evaluation of Local Dynamic Map in Safety Driving Systems”, Journal of Transportations Technologies (2015). (to be appeared)

Rate-Compatible Spatially Coupled Repeat-Accumulate Codes

Jun CHENG*

(Received March 10, 2015)

A construction of rate-compatible spatially coupled repeat-accumulate (RC-SC-RA) code is proposed. For a given high-rate SC-RA mother code, a family of low-rate member codes can be obtained by extending the protograph of mother code with repeat-accumulation (RA). The rate compatibility is obtained by adjusting the parameters of RA-extension. The continuous code rate is achieved without extra cost. Density evolution analysis shows that the iterative decoding thresholds of all member codes of rate-compatible family are very close to the Shannon limits over the AWGN (Additive White Gaussian Noise) channel.

Key words : Repeat-accumulate code, spatially coupled code, RA-extension, rate-compatibility.

キーワード : RA 符号, 空間結合符号, RA 拡張, 可変レート.

任意可変レート空間結合 RA 符号の構成および性能解析

程 俊

1 はじめに

無線通信は雑音や干渉が原因となり通信品質が劣化し、通信における信頼性を損なう可能性がある。このような劣化の大きな原因となる雑音を低減する方法として通信路符号化がある¹⁾²⁾。通信の信頼性向上を図る通信路符号化の手法として、1998年に Divsalar, Jin, McEliece らにより RA(Repeat-Accumulate) 符号が考案された³⁾⁻⁵⁾。RA 符号は、符号化が非常に簡単になっており、復号は SPA(Sum-Product Algorithm) を基にした復号であるため、符号化と復号の両方の複雑性を解決することができた。

また、RA 符号に空間結合 (Spatial Coupling) 技術を応用した空間結合 RA 符号 (SC-RA 符号) も考案された⁶⁾。空間結合符号は通信路に応じた最適化を必要とせず、たったひとつの符号器によって多くの通信路に対して理論限界に近い復号性能を達成できることが報告され

ている。一方で、空間結合 RA 符号は、符号を構成する際に各種パラメータに制限がかかってしまい、符号化率の柔軟性が不足するという欠点がある。

一方、可変レート符号 (Rate Compatible Code)⁷⁾⁸⁾ では、柔軟な符号化率が得られる反面、パリティ検査行列の重み分布の最適化が必要である。

本論文では、可変レート空間結合 RA 符号 (RC-SC-RA 符号) を提案する。提案手法では、空間結合 RA 符号をベースとして、符号に対応したプロトグラフの変数ノードをリピート、インタリーブ、アキュムレートを用いて拡張する。さらに、RA 拡張後にパリティビットの一部をまとめてパンクチャする。これによって、連続的かつ柔軟な符号化率を得ることができる。密度発展法およびモンテカルロシミュレーションにおいて、提案手法は、様々な符号化率に設定した場合でも、シャノン限界に近い復号性能が得られることを示す。

* Department of Intelligent Information Eng. and Sci., Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-6295, E-mail : jcheng@mail.doshisha.ac.jp

2 符号の構成法

本章では、提案手法である可変レート空間結合 RA 符号の構成について説明する。提案手法は空間結合 RA 符号⁶⁾をベースに拡張を施すことで構成できる。

2.1 任意可変レート空間結合 RA 符号

提案手法である、可変レート空間結合 RA 符号について説明する。可変レート空間結合 RA 符号のプロトグラフを図 1 に示す。図 1 の下部は従来の空間結合 RA 符号⁶⁾のプロトグラフであり、図 1 の上部は RA(Repeat-Accumulate) 拡張である。また、真ん中の変数ノードがメッセージビットを表している。このように、空間結合 RA 符号のプロトグラフをベースに RA 拡張を施すことで、可変レート空間結合 RA 符号のプロトグラフを構成する。

RA 拡張は 1 個の α -extension と q 個の 1-extension から構成され、 $(q+\alpha)$ -extension と呼ぶ。 i 番目 ($1 \leq i \leq L$) の変数ノードごとに拡張を施す。 q の値は正の整数であり、 α の値は $0 \leq \alpha < 1$ の範囲の実数である。文献⁶⁾と同様、図 1 のプロトグラフを拡大次数 M を用いてコピーし、メッセージビットにあたる変数ノードとチェックノードをつないでいるエッジごとにインタリーブを施すことでタナーグラフを構成する。

次に、RA 拡張の α -extension について説明する。図 1 の右図は RA 拡張の α -extension のタナーグラフを表している。 M 個のメッセージビットにあたる変数ノードにインタリーブを施し並び替えた後、アキュムレートを施す。生成されたパリティビットの内、 $(1-\alpha)M$ 個をパンクチャする。 1-extension はパンクチャせずに生成された M 個のパリティビット全てを保持する。

可変レート空間結合 RA 符号の符号化率は、

$$R = \frac{LK/J}{LK/J + (L+J-1) + (q+\alpha)LK/J} \quad (1)$$

$(0 < R \leq R_{SC-RA})$

となる。ここでの可変レート空間結合 RA 符号の符号化率の最大値は、親符号である空間結合 RA 符号の符号化率、 $R_{SC-RA} = \frac{LK/J}{LK/J+(L+J-1)}$ となる。

提案手法である RC-SC-RA 符号の主な特徴は以下の三つである。

- 親符号は空間結合 RA 符号であること。空間結合 RA 符号は、理論限界に近い復号性能を達成できる

符号である⁶⁾。ゆえに、提案手法も理論限界に近い復号性能が期待される。

- 可変レート符号であること。 q の値は正の整数、 α の値は $0 \leq \alpha < 1$ の範囲内で、両変数の値を任意に設定することで符号化率を柔軟にできる。
- 同一構造の復号器で復号できること。

著者らは、LDPC 符号を親符号とする可変レート空間結合 LDPC(Low Density Parity Check) 符号⁹⁾を検討したが、符号化の際の計算量が膨大だった。本稿では、LDPC 符号の代わりに RA 符号を用いることで符号化の際の計算量が低減し、容易に符号化を行うことができた。

次に、密度発展法で解析を行うために、図 1 下部に示される空間結合 RA 符号のメッセージビットにあたる変数ノードとチェックノードのエッジの接続をランダム化する。空間結合 RA 符号のプロトグラフの位置 i 、 ($1 \leq i \leq L$)、の変数ノードのそれぞれのエッジを位置 i から $i+w-1$ のチェックノードにランダムに接続する¹⁰⁾。このようにエッジの接続をランダム化することで、密度発展法での解析が容易になる。このランダム化後のプロトグラフと一致する符号を $C(J, K, L, w, q, \alpha)$ と表す。符号化率は、

$$R = \frac{L}{L + \frac{J}{K} \left(L + w + 1 - 2 \sum_{i=0}^w \left(\frac{i}{w} \right)^K \right) + (q+\alpha)L} \quad (2)$$

$(w \leq L)$

となる。

3 反復復号の分析

本章では、SPA に基づいた復号について説明した後、密度発展法による解析について説明する。

3.1 SPA に基づいた復号

本節では、タナーグラフに基づいて復号を行う SPA について説明する。SPA では周辺事後確率を近似に計算する。受信値 y_a を使って、初期値 λ_a を求める。 σ^2 は通信路における AWGN 雑音の電力を表している。第 a 受信シンボル y_a から送られたであろう x_a を推測したときに、その x_a が 0 もしくは 1 である場合の事後確率の比が、

$$\lambda_a = \frac{2}{\sigma^2} y_a \quad (3)$$

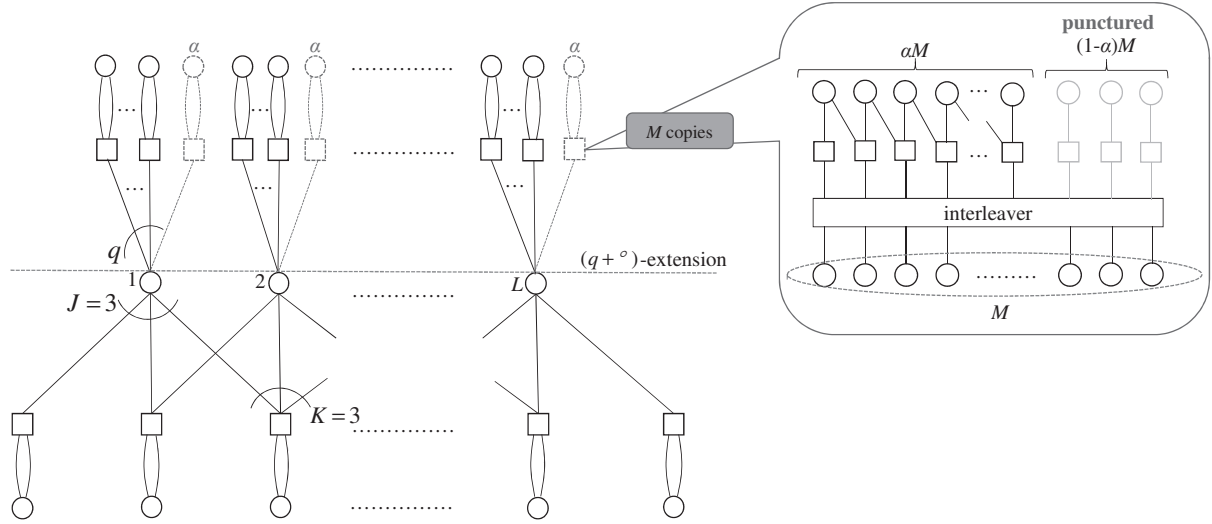


Fig. 1. RA 拡張を施した $J=3, K=3$ の可変レート空間結合 RA 符号のプロトグラフと α -extension のタナーグラフ.

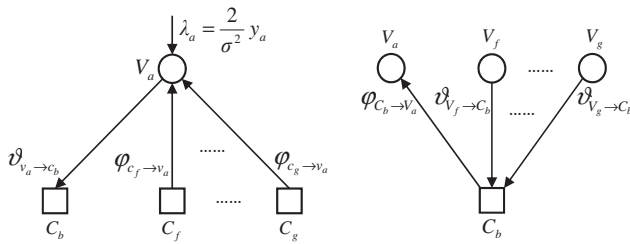


Fig. 2. SPA の変数ノード処理 (左) とチェックノード処理 (右).

となる¹¹⁾.

変数ノード処理では、変数ノードからチェックノードに送られるメッセージが計算され、チェックノード処理では、チェックノードから変数ノードに送られるメッセージが計算される。ここでは変数ノードを V 、チェックノードを C とする。ここで、表記 $C \setminus C_b$ は C_b を除く C に含まれる全ての要素のことである。

変数ノードにおける対数領域メッセージの第 ℓ 回目の更新式は、

$$\vartheta_{V_a \rightarrow C_b}^{(\ell)} = \lambda_a + \sum_{k \in C \setminus C_b} \varphi_{k \rightarrow V_a}^{(\ell)} \quad (4)$$

となり、チェックノードにおける対数領域メッセージ更新式は、

$$\varphi_{C_b \rightarrow V_a}^{(\ell)} = 2 \tanh^{-1} \left(\prod_{k \in V \setminus V_a} \tanh \left(\frac{1}{2} \vartheta_{k \rightarrow V_a}^{(\ell)} \right) \right) \quad (5)$$

となる¹¹⁾.

3.2 密度発展法による解析

本節では、必要な E_b/N_0 の最小値を密度発展法の解析で求める。AWGN 通信路において、式 (3) の λ_a は平均 $\frac{2}{\sigma^2}$ 、分散 $\frac{4}{\sigma^2}$ の正規分布 $\mathcal{N}(\frac{2}{\sigma^2}, \frac{4}{\sigma^2})$ に従い、 λ_a の確率密度関数を Λ とする²⁾。同様に θ は SPA での変数ノードからチェックノードへのメッセージの確率密度関数、 Φ は SPA でのチェックノードから変数ノードへのメッセージの確率密度関数とする。ここでは、オールゼロの符号語を送信することとする。演算子 $*$ は変数ノードにおいてメッセージを交換するための畳み込み演算子であり、演算子 \star はチェックノードにおいてメッセージを交換するための広義的な畳み込み演算子である²⁾。

図 3 の変数ノード処理を式で表すと、

$$\theta^{(\ell)} = \Lambda * (\Phi^{(\ell)})^{*(J-1)} \quad (6)$$

となり、チェックノード処理を式で表すと、

$$\Phi^{(\ell)} = (\theta^{(\ell)})^{*(K-1)} \quad (7)$$

となる²⁾。

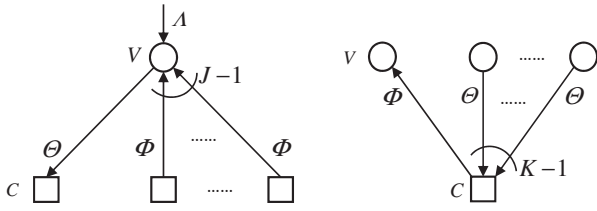


Fig. 3. 密度発展法の変数ノード処理 (左) とチェックノード処理 (右).

図 4 は図 1 の中から i 番目のプロトグラフのみを取り出したものであり, 密度発展法では図 4 に示される i 番目のプロトグラフのメッセージパッシングに注目する. i 番目のプロトグラフの各ノードは $A, R, A_\alpha, R_\alpha, V, C$ の 6 つに分類できる.

$\theta_{XY,i}^{(\ell)}$ は変数ノード X からチェックノード Y に送られるメッセージの確率密度関数を表す. ここで上付き文字の ℓ は第 ℓ 回目のメッセージパッシング, 添え字は i 番目のプロトグラフを取り出したことを表している. 式 (6), (7) より, 図 4 における各ノード間のメッセージの値を以下のように示す.

$$\theta_{VC,i}^{(\ell)} = \Lambda * Y^{*(J-1)} * \left(\left(\theta_{AR,i}^{(\ell-1)} \right)^{*2} \right)^{*q} * \left(\alpha \cdot \left(\theta_{AR_\alpha,i}^{(\ell-1)} \right)^{*2} + (1-\alpha) \right) \quad (8)$$

$$\theta_{VR,i}^{(\ell)} = \Lambda * Y^{*J} * \left(\left(\theta_{AR,i}^{(\ell-1)} \right)^{*2} \right)^{*(q-1)} * \left(\alpha \cdot \left(\theta_{AR_\alpha,i}^{(\ell-1)} \right)^{*2} + (1-\alpha) \right) \quad (9)$$

$$\theta_{VR_\alpha,i}^{(\ell)} = \Lambda * Y^{*J} * \left(\left(\theta_{AR,i}^{(\ell-1)} \right)^{*2} \right)^{*q} \quad (10)$$

$$\theta_{AC,i}^{(\ell)} = \Lambda * \left(\theta_{AC,i}^{(\ell-1)} * \left(\frac{1}{w} \sum_{k=0}^{w-1} \theta_{VC,i-k}^{(\ell-1)} \right)^{*K} \right) \quad (11)$$

$$\theta_{AR,i}^{(\ell)} = \Lambda * \left(\theta_{VR,i}^{(\ell-1)} * \theta_{AR,i}^{(\ell-1)} \right) \quad (12)$$

$$\theta_{AR_\alpha,i}^{(\ell)} = \Lambda * \left(\theta_{VR_\alpha,i}^{(\ell-1)} * \theta_{AR_\alpha,i}^{(\ell-1)} \right) \quad (13)$$

ここで,

$$Y = \frac{1}{w} \sum_{j=0}^{w-1} \left(\left(\theta_{AC,i+j}^{(\ell-1)} \right)^{*2} * \left(\frac{1}{w} \sum_{k=0}^{w-1} \theta_{VC,i+j-k}^{(\ell-1)} \right)^{*(K-1)} \right).$$

もし $q \leq 0$ になれば $\theta^{*q} = \delta(0)$ とする. ここでの δ

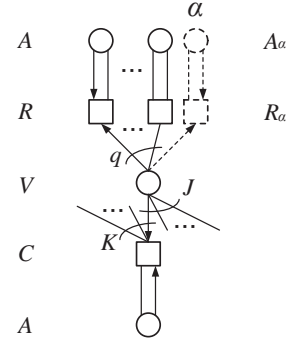


Fig. 4. i 番目のプロトグラフのメッセージパッシング.

は単位インパルス関数を表す. メッセージの確率密度関数の初期値は,

$$\begin{aligned} \theta_{VC,i}^{(0)} &= \theta_{VR,i}^{(0)} = \theta_{VR_\alpha,i}^{(0)} = \theta_{AC,i}^{(0)} \\ &= \theta_{AR,i}^{(0)} = \theta_{AR_\alpha,i}^{(0)} = \theta_0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\theta_0 = \begin{cases} \Lambda, & 1 \leq i \leq L, \\ \delta(+\infty), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (15)$$

式 (8)-(13) から提案手法によって正しく復号できる雑音の標準偏差の最大値

$$\begin{aligned} \sigma^{BP}(J, K, L, w, q, \alpha) \\ \triangleq \sup \left\{ \sigma : \lim_{\ell \rightarrow +\infty} \int_{-\infty}^0 \Theta^{(\ell)}(\tau) d\tau = 0 \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

を求めることができる. さらに, σ からしきい値 E_b/N_0 を算出する. ここでは,

$$\begin{aligned} \Theta^{(\ell)} = \{ & \theta_{VC,1}^{(\ell)}, \dots, \theta_{VC,L}^{(\ell)}, \theta_{VR,1}^{(\ell)}, \dots, \theta_{VR,L}^{(\ell)}, \\ & \theta_{VR_\alpha,1}^{(\ell)}, \dots, \theta_{VR_\alpha,L}^{(\ell)}, \theta_{AC,1}^{(\ell)}, \dots, \theta_{AC,L}^{(\ell)}, \\ & \theta_{AR,1}^{(\ell)}, \dots, \theta_{AR,L}^{(\ell)}, \theta_{AR_\alpha,1}^{(\ell)}, \dots, \theta_{AR_\alpha,L}^{(\ell)} \}. \end{aligned}$$

$q = 0$ のとき $\theta_{VR,i}^{(\ell)} = 0, \theta_{AR,i}^{(\ell)} = 0$ となる.

4 数値計算

本章では, 第 3 章で解析された AWGN 通信路上での復号しきい値を数値計算で求める. 同一復号器で復号できる符号化率 0.4926, 0.4, 0.35, 0.3, 0.25, 0.2 の符号を w, q, α それぞれを設定し用意する. 各符号化率のしきい値およびシャノン限界とのギャップを表 1 に示す. 最

Table 1. $\mathcal{C}(4, 4, 100, w, q, \alpha)$ のしきい値 (単位:dB).

R	シャノン限界	しきい値	ギャップ
0.4926	0.187	0.383	0.196
0.40	-0.236	-0.0153	0.2207
0.35	-0.432	-0.197	0.235
0.30	-0.657	-0.3665	0.2905
0.25	-0.793	-0.441	0.352
0.20	-0.963	-0.683	0.280

Table 2. シミュレーション諸元.

データ長	100000 bits
符号化法	RC-SC-RA 符号
各種パラメータ	$J=4, K=4, L=100, M=1000$
符号化率	$R=0.4926, 0.4, 0.35, 0.3, 0.25, 0.2$
変調方式	BPSK 変調
通信路	AWGN 通信路
復号法	SPA 復号

もギャップが大きい $R = 0.25$ でさえシャノン限界まで 0.352 まで迫る性能を示している. 提案手法ではどの符号化率でもシャノン限界に近いしきい値を示した.

また, 先の密度発展法が算出したしきい値に, 有限長のモンテカルロシミュレーションの結果が漸近するか確認を行う. シミュレーション諸元を表 2, シミュレーション結果を図 5 に示す. 結果としては, どの符号化率でも BER(Bit Error Rate) 10^{-5} 以下のとき, 密度発展法で算出したしきい値とモンテカルロシミュレーションで最低限必要とされる E_b/N_0 は近い値を示した.

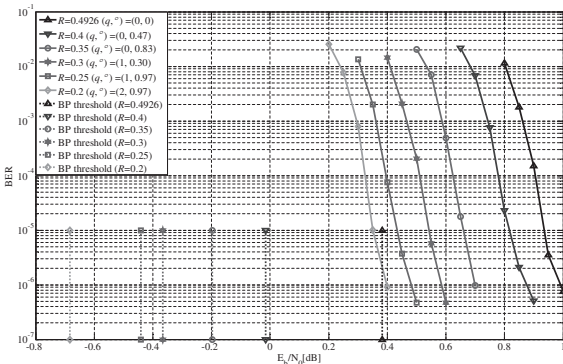


Fig. 5. SC-RA 符号と RC-SC-RA 符号の BER 特性.

本論文では, 可変レート空間結合 RA 符号を提案した. 提案手法では, 空間結合 RA 符号をベースとして, 符号に対応したプロトグラフの変数ノードをリPEAT, インタリーブ, アキュムレートを用いて拡張する. さらに, RA 拡張後にパリティビットの一部をまとめてパンクチャする. これによって, 連続的かつ柔軟な符号化率を得ることができる. 密度発展法およびモンテカルロシミュレーションを用いて評価した結果, 提案手法は, 様々な符号化率に設定した場合でも, シャノン限界に近い復号性能が得られることを示した.

提案符号は, 車車間通信を用いた, 自動車における車両ネットワークのために, 構成したものである. 車両間で個別に, かつ独自に通信リンクを作成することにより, 複数の自動車が同時に通信できる車両ネットワークを形成すると, レスポンスの高い車車間通信が期待される. しかし, 複数の自動車が同時通信にすると, お互いに干渉が生じる. そのため, 強力な誤り訂正能力を持つ符号 (すなわち, 低レート符号) の開発が必要である. さらに, 同時通信の自動車数によって, 干渉の強さが異なるため, 可変レートの符号が望ましい. 本提案符号を, 車両ネットワークへ適用し, 高信頼・低遅延特性を持つレスポンスの高い車車間通信の実現が期待される.

参考文献

- 1) S. J. Johnson, *Iterative Error Correction*, Cambridge University Press, Cambridge, 2010.
- 2) W. E. Ryan and S. Lin, *Channel Codes : Classical and Modern*, Cambridge University Press, Cambridge, 2009.
- 3) D. Divsalar, H. Jin, and R. J. McEliece, "Coding theorems for turbo-like codes," in Proc. 1998 Allerton Conf. on Communications, Control, and Computing, pp. 201-210.
- 4) A. Abbasfar, D. Divsalar, and K. Yao, "Accumulate-repeat-accumulate codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 4, pp. 692-702, Apr. 2007.
- 5) X. Chen and Y. Shen, "Research of RA coding algorithm based on AWGN channel," *Journal of Networks*, vol. 7, no. 4, pp. 605-612, Apr. 2012.
- 6) S. Johnson and G. Lechner, "Spatially coupled repeat-accumulate codes," *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 2, pp. 373-376, Feb. 2013.
- 7) J. Ha, J. Kim, and S. W. McLaughlin, "Rate-

- compatible puncturing of low-density parity-check codes,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 11, pp. 2824-2836, Nov. 2004.
- 8) G. Yue, X. Wang, and M. Madhian, “Design of rate-compatible irregular repeat accumulate codes,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 6, pp. 1153-1163, Jun. 2007.
 - 9) W. Hou, S. Lu, and J. Cheng, “Rate-compatible spatially coupled LDPC codes via repeat -accumulation extension,” in *Proc. ISTC*, pp. 1-5, Aug. 2014.
 - 10) S. Kudekar, T. Richardson, and R. Urbanke, “Threshold saturation via spatial coupling: Why convolutional LDPC ensembles perform so well over the BEC,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 2, pp. 803-834, Feb. 2011.
 - 11) 和田山正, 誤り訂正技術の基礎, 森北出版株式会社, 東京, 2010.

Road Hazard Sharing System by Using Mobile Ad Hoc Network for Multiple Cyclists

Yusuke TABATA^{*}, Akira YAMAMOTO^{*}, Yuta KAWACHI^{*}, Shohei ASADA^{*} and Shigeo KANEDA^{*}

(Received April 1, 2015)

Studies are increasing that analyze ambient environments by sensing bicycle movements using smart phones. We propose a system that shares road hazard information among smart phones by an ad hoc network. Our system estimates the locations and the types of hazards by a distributed cooperation approach among smart phones. Cyclists can share all the hazard information sensed by each bicycle without any specially-designed servers on a system that is only composed of a single smart phone application. Our prototype evaluation shows that cyclists can identify safe roads using shared hazard maps to enjoy comfortable outings.

Key words : Bicycle, Hazard, Ad Hoc Network, Distributed Cooperation.

キーワード : 自転車, 危険箇所, アドホックネットワーク, 分散協調

モバイルアドホックネットワークを利用した 複数自転車向け路上危険箇所共有システム

田端 佑介, 山本 光, 河内 雄太, 浅田 翔平, 金田 重郎

1 はじめに

自転車ユーザーに向けた既存の危険箇所提供サービスとして、市町村や Web などから多く公開されている交通事故ハザードマップがある¹⁾²⁾³⁾。市町村が発表しているマップ¹⁾²⁾の多くは事故が発生した場所や事故の内容から作成され、Web で公開されているマップ³⁾の多くは付近住民や自転車ユーザーへのインタビューから作成される。ところが、これらの既存の危険箇所の共有手段は以下のような問題点がある。

- 交通事故の発生現場以外にも危険箇所が存在しており、自転車ユーザーが気づかないような危険箇所やこれから交通事故が起きる可能性のある危険箇所をマッピングしていない。つまり、交通事故の場所や

自転車ユーザーへのインタビューでは未然の事故を防ぐことができない。

- 既存の紙媒体のマップや Web の情報はリアルタイムなものではなく、実際に自転車に乗っているユーザーにとって使いづらい。実際の道路状況は時々刻々と変わっており、自転車ユーザーが知りたいリアルタイムでの危険箇所を推定することが難しい。

これらの問題を解消するため、携帯端末のセンサから自動的に危険箇所を推定し、地図にマッピングするとともに、その地図を共有するシステムを提案する。システムは、携帯端末の加速度センサと角速度センサからリアルタイムに波形を取得し、地図の危険箇所と推定できる場所にアイコンをマッピングする。また、携帯端末

^{*} Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-6976, E-mail : skaneda@mail.doshisha.ac.jp

Table 1. Hazard locations for bicycle riders.

	危険箇所	危険箇所が存在する場所
(1)	危険な交差点	見通しが悪い交差点
(2)	混雑した道路	道路に障害物(交通量)が多い
(3)	路面状況が悪い	ガタガタしている道路
(4)	急カーブ	鋭く曲がっている道路
(5)	坂道(傾斜)	傾斜が大きい道路
(6)	暗い道路	高架下, 橋の下, 夜道

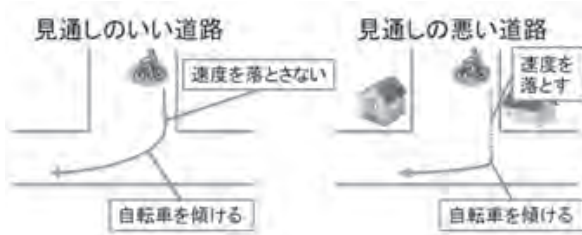


Fig. 1. Dangerous intersection.

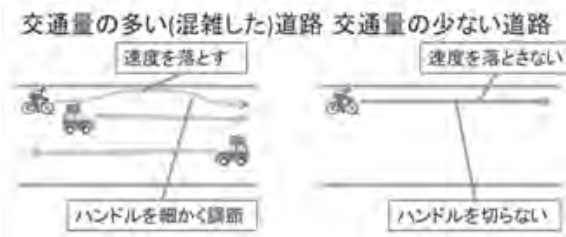


Fig. 2. Congested road.

の Bluetooth を利用して、本システムを使用するユーザー同士がすれ違おうと、お互いの地図情報を共有できる。Bluetooth を用いてアドホックネットワークを形成することで、システムはサーバが不要であり、ユーザーは携帯端末にアプリケーションをインストールするだけで使用できる。

以下、第2章では、ハザードについて紹介し、第3章では提案システムの概要を示す。第4章では、評価実験の概要と結果について示す。第5章は結びである。

2 京都市における路上危険箇所

自転車にとっての危険箇所を推定するため、京都市でフィールドワークを行った。フィールドワークは4人で10回行っており、自転車に乗って交通状況を観察した。フィールドワークの後、危険と思われる場所の写真を共有しあい、意見をまとめた結果、表1の状況が危険箇所であると判断した。

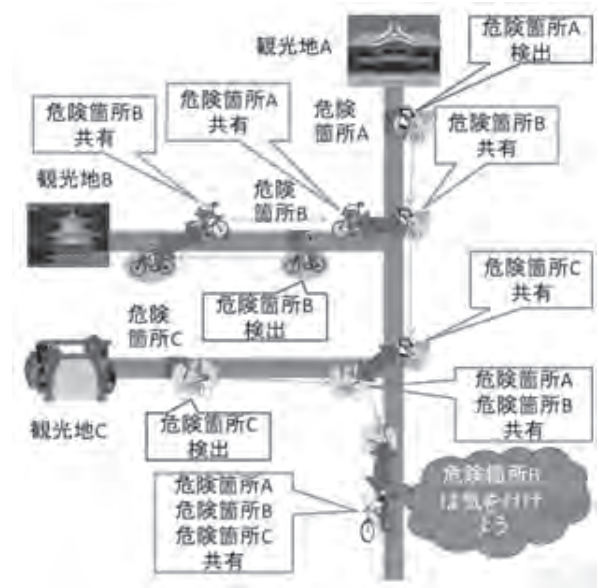


Fig. 3. Outline of proposed system.

それぞれの危険箇所について説明する。危険な交差点(1)は見通しが悪く、信号機のない交差点である。見通しがよい交差点(図1左)では、自転車は速度を少し落とすとともにゆったりとハンドルを切って曲がる。しかし見通しが悪い交差点(図1右)では、自転車は速度を落として警戒しながら曲がる。交差点で障害物に遭遇した時はハンドルを急に切って回避する。

混雑した道路(2)は路上の障害物が多く、道路上の障害物が多い道路である。交通量の多い混雑した道路(図2左)では、走行している車などの移動する障害物が多いので、細かくハンドルを切るとともに速度を落とすことで位置を調整して障害物を回避している。一方、快適に走行できる道路(図2右)では、自転車はハンドルを切らずに速度を出して走行している。

路面状況が悪い(3)は路面の凹凸が多い道路である。道路の凹凸は、路面が煉瓦や砂利になっている道路や車道と歩道との段差等が挙げられる。また、道路工事による古いアスファルトと新しいアスファルトの間にできる段差も自転車ユーザーにとっては不快である。

急カーブ(4)は鋭く曲がっている道路や右左折の間隔がない道路である。京都市では京都駅付近の高架や二条通などに存在する。

坂道(5)は傾斜が大きい道路である。京都市では左京区の観光地に多く見られる。

暗い道路(6)は太陽光や電柱による光が少なく、見通しが悪い、先が見えない道路である。線路など的高架下や橋の下などが当てはまる。



Fig. 4. Communication Overview of between bicycles.



Fig. 5. Data processing flow of proposed system.

3 危険箇所共有システム

3.1 提案システムの概要

本章では提案システムの概要を説明する。システムに必要なハードウェアは自転車 1 台につき携帯端末 1 台である。提案システムの全体像は図 3 のようになっている。システムは観光地やサイクリングロードなどで使用されることを想定しており、初めて観光地を自転車でサイクリングする人に注意を促す目的がある。

図 4 のようにシステムの自転車に搭載された携帯端末は擦れ違うと所持している危険箇所情報と GPS 情報を共有する。複数の端末間で危険箇所情報が共有されれば、実際に走行していない道路の危険箇所情報を手にすることができる。また、端末を媒介すれば、すれ違っていない自転車がセンシングした危険箇所情報も獲得できる。携帯端末の画面には、共有した道路の危険箇所をマッピングした地図が表示される。危険箇所と判断された場所に種類別のアイコンを付加する。

システムに用いた危険箇所の認識手法は図 5 のようになっている。携帯端末の加速度センサ、角速度センサから取り出した情報をリアルタイムに走行区間のみ切り出す。その後、走行区間の情報から機械学習を用いて危険

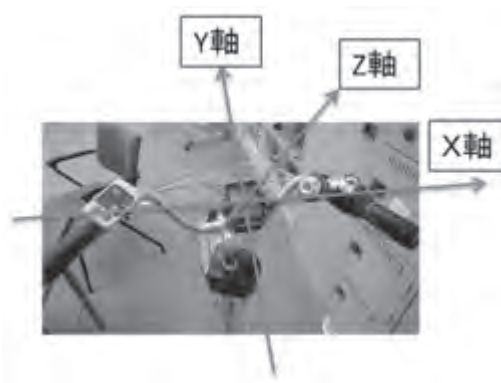


Fig. 6. Bicycle attached mobile terminal.

Table 2. Equipped sensors.

センサ名	取得データ
加速度センサ	加速度, 傾き
ジャイロセンサ	角速度
地磁気センサ	傾き
照度センサ	明るさ
GPS	位置座標

箇所の判断をし、地図上の危険箇所と判定された場所にアイコンをマッピングする。

3.2 プローブ自転車の概要

自転車の危険箇所を推定するため、携帯端末を図 6 のように自転車に装着した。携帯端末はハンドルに対して z 軸の正の向きに装着されており、y 軸の正の向きが進行方向になるようになっている。また、携帯端末のセンサの内、利用したセンサは表 2 のようになっている。加速度、角速度、地磁気、照度を取得して危険箇所の判断をする。加速度センサと地磁気センサからは傾きが計算される。

3.3 走行区間の切り出し

本節では 3.2 節の自転車で走行時に取得した波形の処理手法について述べる。最初に、携帯端末のセンサ値には重力値や携帯端末を取り付けた角度による雑音が含まれているため除去しなければならない。雑音による影響は、携帯端末のセンサを起動させた初期値が雑音であるとして、その値を削除するようにする。

次に、取得した波形には走行している区間と停止している区間が存在している。携帯端末から走行している区間を切り出すため、加速度センサが $0[m/s^2]$ であり、かつ角速度センサが $0[deg/s]$ である区間は走行していないと見なす。加速度センサが $0[m/s^2]$ であるのは加速も

Table 3. Hazard and its criterion.

	危険箇所	判断基準
(1)	危険な交差点	図 8 の決定木 自転車が傾いている
(2)	混雑した道路	図 11 の決定木
(3)	路面状況が悪い	路面方向の加速度 $\geq 3[m/s^2]$
(4)	急カーブ	自転車の傾き $\geq 10[度]$
(5)	坂道	道路の傾斜 $\geq 10[度]$
(6)	暗い道路	照度センサ $\leq 10[Lx]$

減速もしていない状態であることを示し、角速度センサが $0[deg/s]$ であるのはハンドルをどちらにも切っていないことを示す。最後に、取得したデータは雑音も含まれているため、3点移動平均をとった。データから危険判断を判断する処理は次節で説明する。

3.4 危険箇所の判断

次に、自転車の走行データから危険箇所を切り出す処理の説明をする。危険箇所の判断としては (1)~(6) で判断が異なる。表 3 は危険箇所の判断基準をまとめたものである。本稿では (1) と (2) を詳しく説明する。

危険な交差点 (1) では、自転車の傾きから交差点に差し掛かったかどうか判断する。これは、自転車のハンドル角速度から自転車の蛇行と右左折を判別することは難しいが、右左折する場合は自転車を傾けて走行する特徴があるからである。図 7 は交差点で急な加減速した例である。テストデータでは自転車が傾いている区間で、進行方向の加速度センサの振幅が $\pm 2[m/s^2]$ になっている。

実際の公道での交差点で回避行動をした自転車の加速度、角速度センサのデータを 5 回分取得した。走行区間のデータは 500 個存在する。危険箇所の可否の判断として機械学習をして自動的に判断するため、本稿では決定木⁵⁾を用いた。本節では 2 クラスを判断するために用いている。2 クラスとは危険な交差点、通常の交差点のことである。決定木の構築には、機械にデータを学習させていく過程で交差検証法を用いており、10 ホールドの交差検証法を用いている。ツリーは J48 を用いている。決定木は図 8 になり、精度は 82% である。この決定木を用いて危険な交差点を判定する。

混雑した道路 (2) では、進行方向の加速度センサとハンドル角速度センサの振幅から周囲の混雑度を推定する。図 9、図 10 は混雑した道路でのテストデータである。テストデータの混雑した道路は、複数台の自動車が

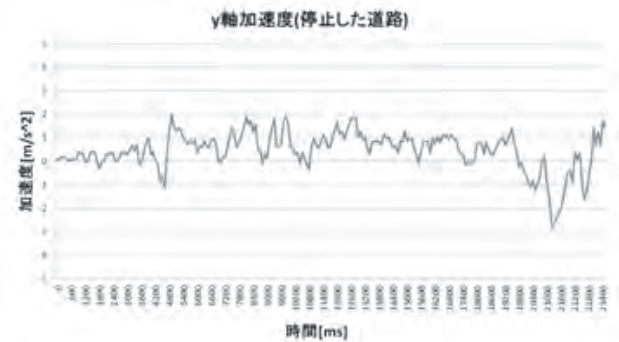


Fig. 7. Rapid deceleration at intersection.



Fig. 8. Decision tree for dangerous intersection.

走る道路で走行しており、最後に駐車している自動車を回避した場面である。走行している自動車とすれ違った場面では、自転車が警戒して速度を調整するため、加速度が $2[m/s^2]$ の振幅が起こる。ただし、ハンドル角速度は大きな振幅がない。一方、駐車している自動車を回避する自転車は、ハンドル角速度も $\pm 5[deg/s]$ を超える大きな振幅が起こっている。駐車している自動車を回避するときはハンドルを大きく切るためハンドル角速度も大きくなるためである。

ここでも機械学習を用いて道路の混雑度を自動的に判断するため決定木⁵⁾を用いた。今回は通常走行、少し混雑、混雑、かなり混雑の 4 クラスに分ける。決定木の

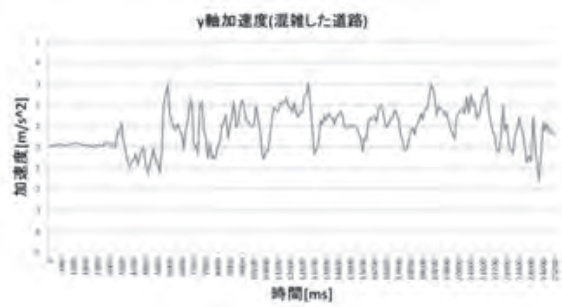


Fig. 9. Traveling direction acceleration in crowded road.

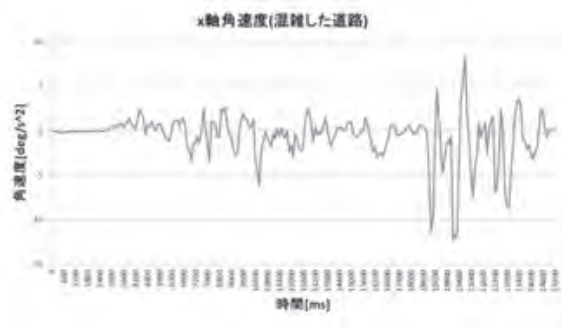


Fig. 10. Wheel angular velocity in crowded road.

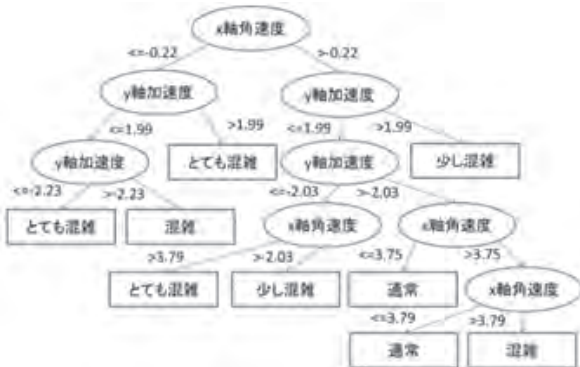


Fig. 11. Decision tree for congested road.

結果は図 11 のようになり、精度は 79%である。決定木の条件は交差点 (1) と同じである。

3.5 複数端末間の処理

自転車に搭載された携帯端末のみで判断された危険箇所は精度がさほど高くない。本稿では危険箇所検知の精度を向上させるため、複数台の端末間で情報共有するとともに精度を向上させる処理をさせることにした。本稿では、個々の携帯端末はネットワーク内で以下のような作業を行う。

- (ア) 危険箇所を一定時間で消滅させる
- (イ) 障害物の種類を推測する
- (ウ) 通信履歴から快適に走行可能な道路を判断する



Fig. 12. User interface of prototype hazard information system.



Fig. 13. Snap of social experiment.

(ア)の危険箇所の一定時間での消去は、ネットワーク内のどの端末も一定時間危険と判断しない危険箇所を消去するという仕組みである。本稿では、一定時間を5分に設定した。古い危険箇所を消去することで、システムの画面はある程度リアルタイム性が確保される。ある端末が誤って危険だと判断した場所は、他の端末では危険だと判断されず一定時間で消去される。

(イ)の障害物の種類の推定は、混雑した道路(2)の推定時に障害物の種類を判別するため用いられる。アドホックネットワーク内にいる複数の端末が混雑した道路と判断した場所は、障害物が動いていないことを示す。その場所には駐車している車や電柱・店の看板といった固定障害物が存在すると推測し、それ以外の混雑した道路は移動障害物が存在すると推測する。

(ウ)の通信履歴からの快適な道路の判断は、携帯端末同士で通信をしたときに、その場所のGPS情報を記録しておく方法で実現する。複数の自転車と交信した場所は自転車が多い場所であり、その時間帯は快適に走行できる道路として携帯同士で共有する。

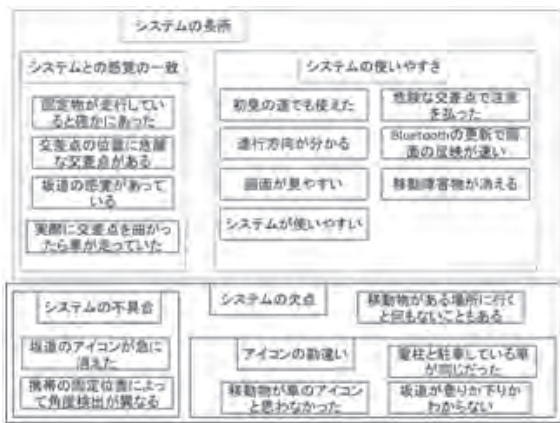


Fig. 14. Summary diagram of interview.

混雑した道路 (2) では、進行方向の加速度センサとハンドル角速度センサの振幅から周囲の混雑度を推定する。

4 実験と評価

4.1 システムを用いた走行実験の結果

著者らは危険箇所共有システムを評価するため、実験を行った。本システムを使って実験するに当たり、被験者4名が京田辺市の通称「同志社団地」内を走行した。同志社団地は京田辺市の南部に位置し、京田辺市三山木七瀬川や天神山あたり一帯の地区である。昼間は閑静な住宅街であるが、朝や夕方北にある同志社国際中学・高等学校や北西にある同志社大学へ通学・通勤する学生や自転車、自動車が多数通行する。

被験者には本アプリケーションがインストールされた携帯端末を、自転車のハンドル部分に装着した電動機付自転車を用意した。実験は被験者1名が被験者3名とすれ違うことで情報の共有を行い、被験者1名は出発地点から携帯端末の画面を見ながら自由に道路を選択して走行し、目的地点まで走行する。走行の様子はビデオカメラで撮影をした。実験の結果、擦れ違いにより情報をもたらした側は図12のような画面が得られた。

図12の結果画面はシステムのユーザが検知した危険箇所とネットワークによって得た他人の検知した危険箇所は色を変えることで認識できるようにしている。実験はビデオカメラで撮影しており、図12の実験結果画面と危険箇所の比較を行った。比較の結果、危険箇所の推定率は81.8%ということが判明した。

4.2 インタビューによる評価

実験に参加した被験者にシステムを使用して走行した感想をインタビューにより聞き出した。インタビュー結

果をまとめたところ図14のようになった。システムの長所としては実際に道路を走ってみた感覚とシステムの結果画面が一致している箇所が多い点と、初めて見る道路でも使用しやすいといったシステム自体が使いやすさが挙げられた。まったく走行経験のない道路でもシステムを使用すれば、危険箇所を警戒しながら走行できたという意見もあった。

一方、システムの短所としては、アイコンの種類が分かりにくいといった点や、システム自体の不具合が挙げられた。今後は、アプリケーションの開始時にアイコンの種類を示すダイアログを出すことやアプリケーションの処理を軽くすることが求められる。

5 おわりに

本稿では過去の事故が発生した場所以外のユーザが気づかないような、事故が起こる可能性のある危険箇所を共有するシステムを提案した。システムは携帯端末を用いており、携帯端末のセンサを用いて危険箇所をセンシングするとともに、アドホックネットワークによって危険箇所を共有する。システムを用いた実験を行った結果、危険箇所の推定率は81.8%であり、本システムは危険箇所をある程度推定できることが判明した。また、インタビューによりシステムは使いやすいといった感想が得られた。本システムは多数の自転車がサービスを使用しないと成り立たないという欠点がある。今後はさらにこの研究を深めるため、道路にリピータを配置することで、自転車を通るたびに危険箇所情報を収集し、近くを通った自転車に配信するようなシステムも考えられる。

謝辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」(平成26年～平成30年、事業番号S1411030)の支援のもとに行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 京都府警察, 交通事故発生マップ,
<http://www.pref.kyoto.jp/fukei/kotu/koki.k.t/jikomap/>

- 2) 千葉市, 走りやすさマップ,
<http://www.city.chiba.jp/kensetsu/doboku/bicycle/soukougankyouseibi.html>
- 3) 自転車大好きマップ, <http://www.bicyclemap.net/>
- 4) 浅田翔平, 田端佑介, 河内雄太, 山本光, 金田重郎, “自転車の走行状態推定を加味したハザードマップの提案”, 情報システム学会第9回全国大会・研究発表大会, Nov., (2013)
- 5) Ian H. Witten, Eibe Frank and Mark A. Hall, “Data Mining, Practical Machine Learning Tools and Techniques,“ Third Edition, Morgan Kaufmann Publishers, (2011)
- 6) 田端佑介, 河内雄太, 金田重郎, “自転車センサを用いた市街地走行環境と阻害度の測定”, 情報処理学会第75回全国大会講演論文集, Vol.3, pp.165-166, March (2013)
- 7) 田端佑介, 河内雄太, 金田重郎, “速度と舵角に基づく自転車走行状態の高精度推定法”, 情報処理学会第12回情報技術フォーラム講演論文集, Vol.4, pp.311-312, Sept., (2013)

A Calculation Formula of Propagation Path Loss for Vehicle to Vehicle Communications (V2V) in a Crank Road

Yuki HOSOKAWA*, Hisato IWAI* and Hideichi SASAOKA*

(Received April 30, 2015)

In this paper, we propose a simple calculation formula of propagation loss in a crank road assuming V2V communication systems. In the formula, multiple dominant paths in a crank road environment are identified based on the ray-tracing technique. The received signal power is determined by combining the paths and the propagation loss is calculated. The estimation results of the formula are compared with those by the ray-tracing technique to evaluate the estimation accuracy of the proposed method.

Key words : Vehicle-to-Vehicle communications, Propagation loss, Simple calculation formula, Ray-tracing

キーワード : 車車間通信, 伝搬損失, 簡易計算式, レイトレーシング

クランク道路における車車間通信用伝搬損失簡易推定

細川 裕樹, 岩井 誠人, 笹岡 秀一

1. はじめに

交通事故防止などを目的とした高度交通システムに関する研究が進められている。その中でも、安全運転支援の実現を目指した車車間通信の研究が精力的に行われている。これに対して、車車間通信環境を想定した伝搬損失モデルに関する検討が行われている¹⁾⁵⁾。しかし、これらの検討では、典型的な十字形状の交差点を想定していることが多い。交差点形状は様々であり、他の多くの道路形状にも対応する伝搬モデルが必要である。そこで本稿では、このような道路形状のうち、クランク構造の道路環境における伝搬損失の簡易計算式を検討する。

文献[3]では交差点見通し外環境における伝搬損失簡易推定法(以下交差点越え簡易推定式)が検討さ

れている。これは、簡易化したレイトレーシングにより直交する交差点環境における支配的なパスを同定し、その合成電力を求めることにより、伝搬損失を推定する方法である。本稿では、この考えをクランク道路に適用し、車車間通信環境を対象としたクランク道路の送受信点間伝搬損失を簡易に計算可能とする簡易計算式を提案する。

交差点越え簡易推定式では、交差点から受信点までの距離に応じて支配的なパス(交差点近傍では反射波、遠方では回折波)を推定している。これに対してクランク道路環境の場合には、壁面での反射回数と道路環境パラメータにより、クランク形状部分を通過可能なパスを決定することができる。このうち、反射回数の小さいパスが、伝搬損失を決定する

* Mobility Research Center, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6267, E-mail: iwai@mail.doshisha.ac.jp

支配的なパスとなる。またクランク道路では回折波の影響は小さい。したがって本稿では、支配的となる直接波や反射パスのみを簡易な方法で推定し、それらを合成することによって伝搬損失を推定する方法を考える。

本稿では、まず簡易な2次元環境を対象とし、クランク道路環境の送受信点間に存在可能な複数のパスをレイトレーシングの考え方に基づいて探索する。その合成電力を求めることにより伝搬損失を計算する。その後、この2次元の結果に、大地反射2波モデルの考え方を融合させることにより、3次元環境にも対応する伝搬損失簡易計算式を構築する。このようにして得られた2次元および3次元の計算式による伝搬損失の推定結果をレイトレーシングによる推定結果と比較し、その推定精度を確認する。

2. 交差点越え簡易推定式

車車間通信環境を想定した伝搬損失推定式については、これまで幾つかの検討が行われている¹⁾⁵⁾。これらの推定式の多くは、次式のように、伝搬損失 L [dB]を建物の壁による反射波の伝搬損失 L_R [dB]と建物のエッジによる回折波の伝搬損失 L_D [dB]をそれぞれ求め、これらを電力的に合成することで与えている。

$$L = -10 \log \left(10^{-L_R/10} + 10^{-L_D/10} \right) \quad (1)$$

文献[3]では交差点越え環境を Fig. 1 のようにモデル化し、レイトレーシングの考え方を簡易化することにより L_R と L_D をそれぞれ求め、それらを式(1)により合成することによって全体の伝搬損失を推定している。以下に、この簡易推定式の手法を示す。なお、この手法は2次元環境を対象とした推定法である。また計算の簡略化のため送受信点の位置をそれぞれの道路の中央と仮定している。

まず、反射波の伝搬損失 L_R について考える。レイトレーシングでは反射するパスを探索する場合、壁を鏡面とみたてた仮想送受信点を想定する。Fig. 1 に示すように、反射回数を送信点側の道路で n_t 回、受信点側の道路で n_r 回とする場合、仮想送受信点の

位置は $n_t W_t$ および $n_r W_r$ 移動した位置になる。ここで、計算の簡易化のために、仮想送受信点を結ぶ直線が Fig. 1 に示す点 P を通ると仮定すれば、伝搬距離 D と壁に対する入射角 ϕ , ϕ_t は次式で与えられる。

$$D = \sqrt{\{(n_t + 0.5)W_t + d_t\}^2 + \{(n_r + 0.5)W_r + d_r\}^2} \quad (2)$$

$$\phi_t = \arctan(d_t / \{(n_t + 0.5)W_t\}), \quad \phi_r = \pi/2 - \phi_t \quad (3)$$

ここでレイトレーシングにおける反射波の中で最も強いパスは全反射回数($n_t + n_r$)が最も少ない場合と考える。この場合には $n_t = n_r$ となる場合となるため、片側の道路での最少反射回数 n_{\min} は次式となる。

$$n_{\min} = n_t = n_r = \sqrt{\frac{d_t d_r}{W_t W_r}} - \frac{1}{2} \quad (4)$$

式(4)を式(2)、式(3)に代入することで最も強い反射波の伝搬距離、それぞれの壁への入射角および最も強いパスの伝搬損失が得られる。ただし、この最も強いパス 1 波のみでは全受信電力を表すには十分ではないため、このパスにそれぞれの道路で反射が1回増加(もう一方のパスでは1回減少)した2つのパスを加えた合計3波の電力の合成として、伝搬損失を表す。この場合の反射波の伝搬損失 L_R は以下の式で与えられる。

$$L_R = 20 \log \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) - 10 \log \left[\left(\frac{(R(\phi)R(\phi_t))^{n_{\min}}}{D_0} \right)^2 + \left(\frac{(R(\phi_{t+})^{n_{t+}} (R(\phi_{t-}))^{n_{t-}})}{D_{t+}} \right)^2 + \left(\frac{(R(\phi_{r+})^{n_{r+}} (R(\phi_{r-}))^{n_{r-}})}{D_{r+}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

ただし、 λ は波長、 $R(\phi)$ は壁面(この場合はコンクリート)へ入射角 ϕ で入射する平面波の反射係数の絶対値である。

次に、回折波の伝搬損失 L_D について考える。回折波が支配的となるのは送受信点が交差点から離れた場合であり、そのような環境では Fig. 1 に示す点(エッジ)Q からの回折波が最も強いことが明らかとなった。これに基づき、エッジ Q を経る回折波強度を推定することにより、 L_D を求める方法が考えられた。さらに、エッジ Q での回折波は Fig. 1

の真下方向から入射し直角右方向に回折するという近似計算(送受信点位置に依存しない一定の回折係数による近似)を行い、その回折波とそれぞれの道路内で生じる反射を組み合わせ、次式が得られた。

$$L_D = 20 \log \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) + 20 \log \left(\frac{60\pi}{19\sqrt{3}\lambda} \right) + 10 \log \left(\sum_{n_r=0}^M \left(\sum_{n_t=0}^{M-n_r} \frac{(R(\theta_{n_t}))^{n_t} (R(\theta_{n_r}))^{n_r}}{s_{1,n_t} s_{2,n_r} (s_{1,n_t} + s_{2,n_r})} \right)^2 \right) \quad (6)$$

ここで、 M は送信点、受信点それぞれと Q の間の道路壁面で反射する最大の反射回数である。この反射については、1 回のみでは精度が十分でなく、 $M=3$ とすることでレイトレーシングと同程度の結果が得られることが示されている。

式(5)および式(6)のその他の変数についての詳細は文献[3]を参照されたい。

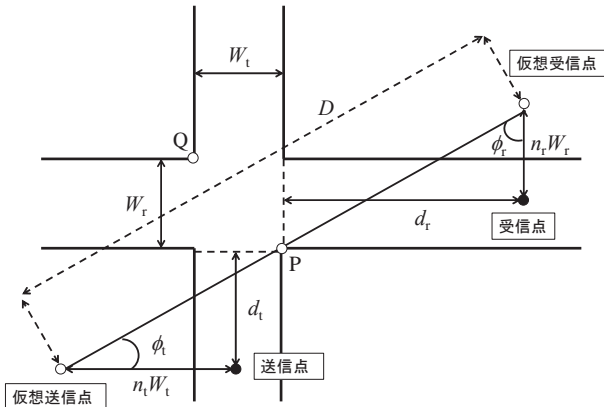


Fig. 1. Cross type intersection model.

3. クランク道路における伝搬損失簡易推定式

3.1 クランク道路モデルと簡易化手法

本稿では Fig. 2 に示すような比較的簡易なクランク道路モデルにおける伝搬損失の計算式を提案する。見通し内道路幅を W_s [m]、見通し外道路幅を W_c [m]、クランク道路のオフセット幅を S [m] とそれぞれ表す。建物の各辺の長さおよび高さは半無限長とする。また交差点越え伝搬損失簡易推定式同様に、送受信点位置は見通し内道路の中央に位置するものとする。交差点から送信点までの距離を d_t [m]、交差点から受信点の距離を d_r [m] とする。本稿で用いる基本的なパラメータは表 1 に示した値とする。

2 章で述べた交差点越え伝搬損失簡易推定式と同様の考え方をクランク道路に適用することによって伝搬損失の簡易計算式を構築する。クランク道路環境では反射回数と道路環境パラメータにより、クランク形状部分を通過することができるパスが決定される。この考え方は、交差点越え簡易推定式同様に、レイトレーシング計算の簡易化に相当する。ここでは、計算式の構築を容易なものとするため、まず 2 次元環境における簡易計算式を検討する。その後、2 次元で得られた結果に大地反射 2 波モデルの考え方を適用することにより、3 次元に拡張する。

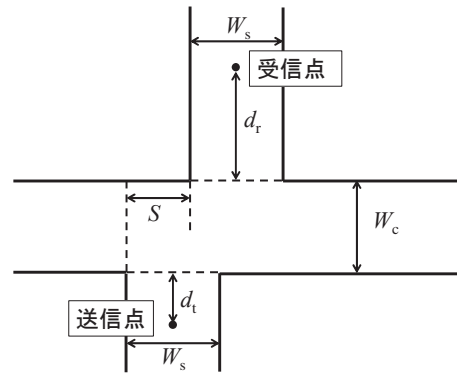


Fig. 2. Crank type intersection model.

Table 1 System and environmental parameters.

Carrier frequency	760MHz
Tx and Rx antenna height	2m
Road width (W_s and W_c)	16m
Crank offset (S)	3.2m to 14.4m
Tx distance (d_t)	40m
Rx distance (d_r)	10m to 200m
Building material	Concrete

3.2 2 次元環境における簡易計算式

3.2.1 計算式のモデル化前提条件

まず、受信点に到達するパスを探索する手法を 2 次元で検討する。クランク道路環境におけるレイトレーシングの結果、送受信点間の支配的なパスは直接波もしくは反射波であり、回折波(1 回以上回折を経るパス、回折前後に壁による反射を伴うパスも含

む)の影響は小さいことがわかった。そこで、本稿における簡易推定式の検討では回折波は考慮しない。また Fig. 3 に示すような見通し外(NLOS: Non Line-of-Sight)道路の両側で反射し受信点に到達するパスの可能性も考えられるが、本稿で対象とする環境ではこのようなパスが存在する確率は小さいと考えられる。さらにこのようなパスは、受信点に到達するためには複数回反射する必要があるため、全体の伝搬損失に与える影響は小さいと考えられる。したがって本稿ではこのようなパスは計算式構築の対象としないこととする。

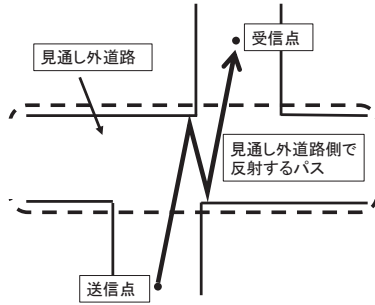


Fig. 3. Reflection paths at NLOS roads.

3.2.2 出射角と伝搬距離

レイトレーシングにおいて、反射パスを探索する場合、鏡面的に仮想送受信点を想定し、それらを結んだ直線が伝搬経路となる。クランク道路環境に同様の考え方を適用する。反射回数を送信点側の道路で n_t 回、受信点側の道路で n_r 回とすると、Fig. 4 に示すように、仮想送受信点の位置はそれぞれ $n_t W_s$, $n_r W_s$ 移動した位置に移動することとなる。この場合、送信点から出射されたパスの出射角 ϕ と伝搬距離 D は次式で与えられる。

$$\phi^\pm = \arccos \left(\frac{\pm(n_t W_s \pm S + n_r W_s)}{\sqrt{(n_t W_s \pm S + n_r W_s)^2 + (d_t + W_c + d_r)^2}} \right) \quad (7)$$

$$D^\pm = \sqrt{(n_t W_s \pm S + n_r W_s)^2 + (d_t + W_c + d_r)^2} \quad (8)$$

ここで ϕ^+ (ϕ^-)は仮想送信点が左側(右側)、仮想受信点が右側(左側)に想定する場合の出射角 ϕ である。また D^+ および D^- はそれに対応する伝搬距離である。

ここで $n_t + n_r = n$ と表せば、式(7)および式(8)は次式で表される。

$$\phi^\pm = \arccos \left(\frac{\pm(n W_s \pm S)}{\sqrt{(n W_s \pm S)^2 + (d_t + W_c + d_r)^2}} \right) \quad (9)$$

$$D^\pm = \sqrt{(n W_s \pm S)^2 + (d_t + W_c + d_r)^2} \quad (10)$$

したがって、今回のような環境においては n_t , n_r の組み合わせによらずに n が一定ならば出射角 ϕ 、伝搬距離 D^\pm は一定となる。

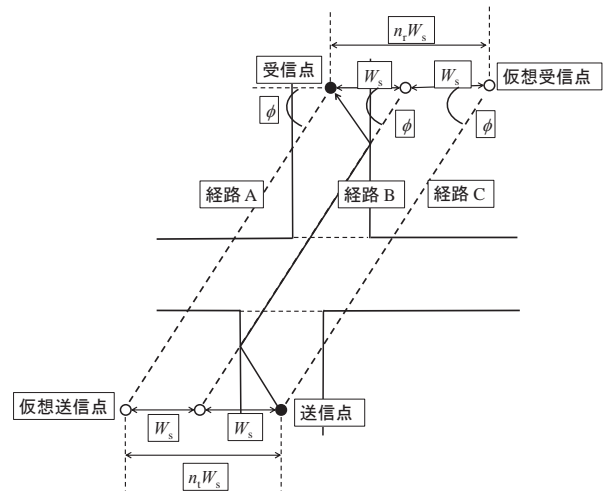


Fig. 4. Conceptual view of path search method.

3.2.3 クランク部分の通過判定

送信点から受信点に到達可能なパスを判定する方法を考える。Fig. 4 に示すように仮想送受信点を結んだ直線は n_t , n_r の組み合わせによって水平方向に W_s の整数倍の距離を平行移動する。このような複数の仮想パスのうちクランク部分を通過しない仮想的なパス(図中の経路 A および経路 C)はクランク部分を通過できず、実際には存在しないパスである。一方、クランク部分を通過する仮想パス(同経路 B)が実際に存在するパスである。つまり、反射回数が n の仮想パスのうち、受信点に到達し得るパスは 1 つのみ(仮想送信点を左側(右側)、仮想受信点を右側(左側)に想定するそれぞれの場合に対して)である。また反射回数が n の仮想パスの出射角 ϕ は一定であるため、 ϕ についてのみ考えることによ

って受信点に到達するパスを探索することができる。

次に送信点から出射されたパスが受信点に到達することが可能な出射角 ϕ の範囲について考える。Fig. 5に示すように交差道路部分の対角線の角度をそれぞれ ϕ_l , ϕ_h とする。出射角 ϕ のパスが ϕ_l よりも小さい場合、送信点側道路内のどのような反射波も受信点側の道路に入らず、見通し外道路側に抜けていく。出射角 ϕ のパスも同様に ϕ_h よりも大きい場合には受信点に到達しない。したがって受信点に到達するためには少なくともFig. 5に示す ϕ_l から ϕ_h の範囲内である必要がある。 ϕ_l から ϕ_h の範囲内のパスのうち、Fig. 6に示す送信点側道路で反射(その回数を m とする)する角度の範囲内に存在するパスが受信点に到達する。この受信点に到達可能な仮想パスは実際には送信点から出射される。つまり受信点に到達可能な出射角 ϕ の範囲はFig. 7の斜線部で示される。このように考えることにより、仮想送信点を想定することなく、受信点に到達するパスを探索することができる。

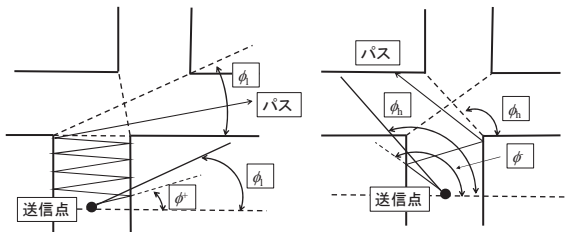


Fig. 5. Diagonal angle condition.

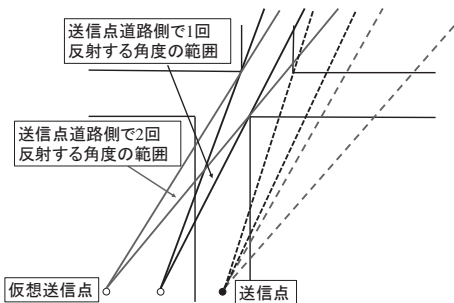
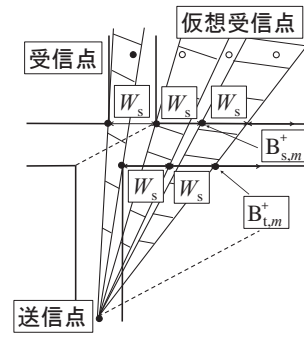
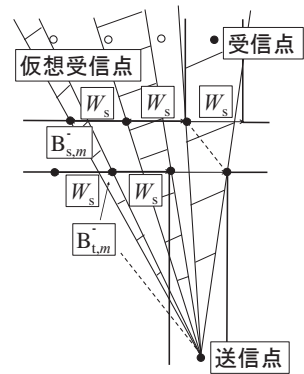


Fig. 6. Angle condition reachable to receiving point.



(a) Range of ϕ^+



(b) Range of ϕ^-

Fig. 7. Angle condition when transmitting point is fixed.

ここでFig. 7に示す点 $B_{t,m}^\pm$ への出射角を $\phi_{t,m}^\pm$ 、点 $B_{s,m}^\pm$ への直線の出射角を $\phi_{s,m}^\pm$ とすれば、受信点に到達可能な角度の範囲は次式で表される。

$$\phi_{t,m}^+ < \phi^+ < \phi_{s,m}^+ \cdot \phi_{s,m}^- < \phi^- < \phi_{t,m}^- \quad (11)$$

ここで $\phi_{t,m}^\pm$, $\phi_{s,m}^\pm$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$\phi_{t,m}^\pm = \arccos \left(\frac{(0.5 \pm m)W_s}{\sqrt{\{(0.5 \pm m)W_s\}^2 + d_t^2}} \right) \quad (12)$$

$$\phi_{s,m}^\pm = \arccos \left(\frac{(-0.5 \pm m)W_s + S}{\sqrt{\{(-0.5 \pm m)W_s + S\}^2 + d_t^2}} \right) \quad (13)$$

3.2.4 2次元レイトレーシングとの比較

式(11)で示される範囲のパスを合成した場合の伝搬損失 L [dB]は以下の式で与えられる。

$$L = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) - 10 \log_{10} \left[\sum_{n=0}^N \left(\frac{R(\theta^\pm)}{D^\pm} \right)^2 \right] \quad (14)$$

上式中の θ^\pm は次式で与えられる。

$$\theta^* = \phi^*, \quad \theta = \pi - \phi \quad (15)$$

また式(14)中の N は最大反射回数である。

式(14)によって N を 10 として計算した結果とレイトレーシング(2次元)による結果とを比較したものを Fig. 8 に示す。なお、レイトレーシングは反射波のみで行い、最大反射回数を 10 とし、各パスを電力次元で合成している。この結果より、レイトレーシングの伝搬損失特性と非常に良く一致することがわかる。

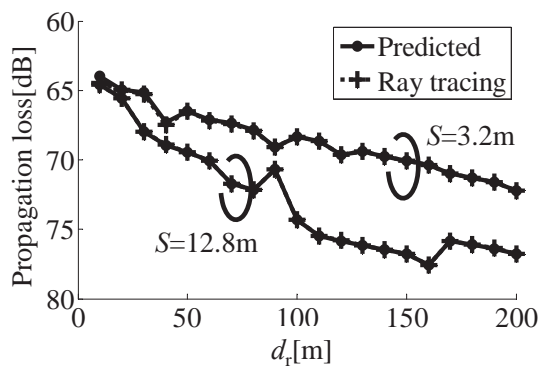


Fig. 8. Comparison with ray-tracing (2 dimensional).

次に、反射回数 N について検討する。式(14)において N を変化させた場合の計算結果を Fig. 9 に示す。 S は 12.8 m (\bar{W}_s の 80% の値) とした。 $N > 4$ の場合には $N=10$ の場合とほぼ同じの結果が得られた。したがって、少なくともこの環境では、反射回数 N は 4 で十分である。

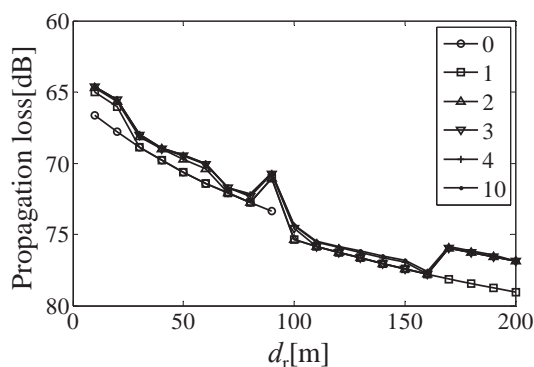


Fig. 9. Dependence on N .

3.3 3次元環境への拡張

3.3.1 計算式の拡張方法

前節では、2次元でパスを探索し、レイトレーシングと一致する結果を得ることが可能であることを示した。本節では、2次元で得られた方法を3次元に拡張する。

送受信アンテナ高が小さい車車間通信のような環境における距離に対する伝搬損失は、ある距離までは距離の2乗に比例する自由空間伝搬損失特性により、その距離以上の領域では距離の4乗に比例する特性により、それぞれ表される大地反射2波モデルによって与えられる⁶⁾。この大地反射2波モデルの考え方を2次元の簡易計算式に融合させることにより、3次元環境にも対応する計算式を構築する。

大地による反射を伴うパスの伝搬損失は、その伝搬距離は2次元で探索したパス(3次元では大地反射を伴わないパス)の伝搬距離とほぼ等しいので、2次元パスの伝搬損失に大地による反射損を加えることによって得られる。それらを合成すると、大地反射2波モデルになる。3次元レイトレーシングにおける伝搬損失計算は、このような、大地反射を伴わないパスと大地反射波の位相関係だけでなく、壁からの反射波それぞれの間の位相関係も含めて計算される。しかし、大地反射を伴わないパスと大地反射波の位相関係は逆相に近い位相でほぼ固定されるのに対して、周囲の壁の反射波間の位相関係は、その経路長差が波長に比べて大きいと考えられるため、無相関に変化すると考えられる。位相が無相関に変化する際には、平均電力は、到来各波の電力和で近似できる。そこで、2次元環境において伝搬損失推定に用いた各パスそれぞれを大地反射2波モデルで表し、それらを電力次元で合成することによって3次元のクランク道路における伝搬損失を得る方法を考える。以上の考え方に基づき、式(14)を3次元に拡張した式は次式で与えられる。

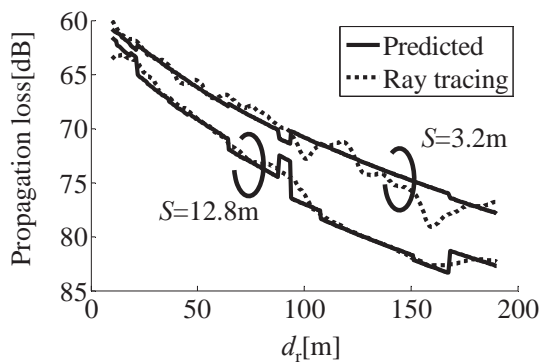
$$L = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) - 10 \log_{10} \left[\sum_{n=0}^N \left(\left| \frac{R(\theta^*)}{D^\pm} \right| \left\{ 1 - \exp \left(-j \frac{4\pi T_n R_h}{\lambda D^\pm} \right) \right\} \right)^2 \right] \quad (16)$$

$$= 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) - 10 \log_{10} \left[\sum_{n=0}^N \left(2 \left| \frac{R(\theta^*)}{D^\pm} \right| \sin \left(\frac{2\pi T_n R_h}{\lambda D^\pm} \right) \right)^2 \right]$$

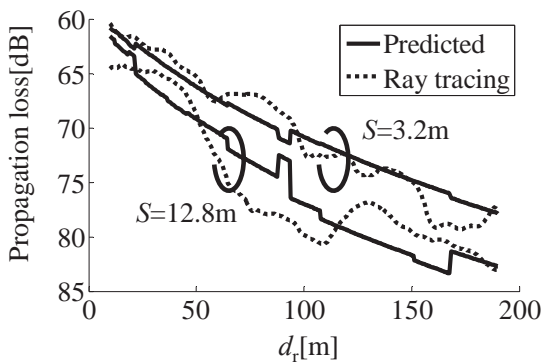
ここで T_h , R_h はそれぞれ, 送信アンテナ高, 受信アンテナ高である.

3.3.2 3次元レイトレーシングとの比較

式(16)によって求めた結果と3次元レイトレーシングによる結果との比較を Fig. 10 に示す.



(a) Without diffraction wave.



(b) With diffraction wave.

Fig. 10. Comparison with ray-tracing (3 dimensional).

同図(a)のレイトレーシングの計算結果は反射回数を4回までとし, 回折波は含めていない. また同図(b)のレイトレーシングは反射回数を4回まで, 回折回数を1回までとして計算を行った. なお, レイトレーシングによる計算は電界次元でパスの合成を行っている. その場合にはフェージング変動を伴う結果が得られるので, 比較を容易とするため距離方向の平均化による平均伝搬損失を求めた. 具体的には d_r についてそれぞれの地点における前後 10 m の範囲の受信電力を平均している. Fig. 10(a)の結果

から, 3次元環境においてもレイトレーシングによる結果とよく一致していることが確認できる. また Fig 10(b)の結果より, 回折波を考慮した場合にはレイトレーシングとの差は増加するが, 変化の傾向は一致しており, 約 5 dB 以下の誤差で推定が実現されていることが確認できる.

送受信点位置の変化に対する計算精度の変化を調べるために, d_t および d_r を変化させ, 簡易計算式による結果と回折波を含むレイトレーシングによる結果(Fig. 10(b)と同様の計算)との差を Fig. 11 に示す. Fig. 11(d)から S が大きくなるとレイトレーシングと差が大きくなるのがわかる. これは S が大きい環境では, 回折波の影響が大きくなるためと考えられる.

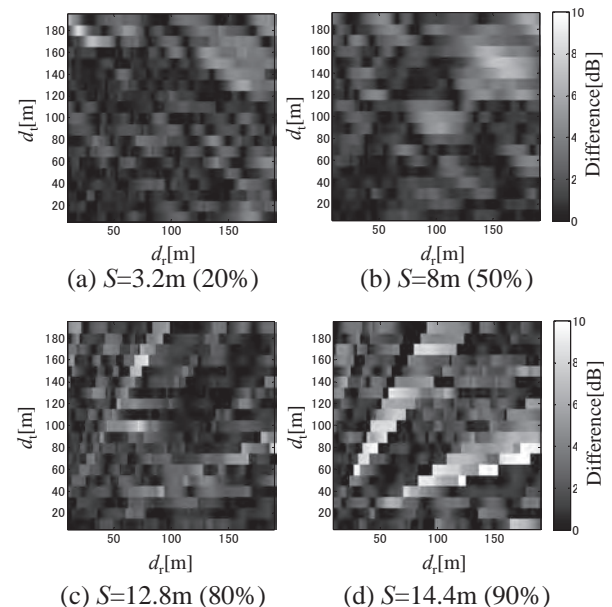


Fig. 11. Difference of predicted propagation loss between ray-tracing and prediction formula.

4. まとめ

伝搬損失の簡易計算式を提案した. 提案する簡易計算式は, まず送受信点間に存在可能なパスを2次元で検討し, その後3次元に拡張することによって構築した. 構築した簡易計算式をレイトレーシングと比較することによりその精度を評価した. 提案計算式による結果はレイトレーシングによる計算結果と約 5 dB 以下の精度の推定であり, 提案した計

算式によって、レイトレーシングによる伝搬損失特性を簡易に推定できることを示した。本提案方式はレイトレーシングに比べてはるかに簡易な手法である。レイトレーシングでは何らかのプログラム言語による複雑なプログラムが必要であるが、簡易推定式では、一般によく普及している表計算ソフトウェアで計算可能である。

参考文献

- 1) 伊藤義信, 多賀登喜雄, 村松潤哉, 鈴木徳祥, “車車間通信環境における見通し内伝搬損失推定,” 信学技報, AP2006-126, pp. 95-100, Jan. 2007.
- 2) 伊藤義信, 多賀登喜雄, “車車間通信環境における見通し外伝搬損失推定,” 2008 信学総大, B-1-61, pp. 61, March 2006.
- 3) 丹後俊宏, 岩井誠人, 笹岡秀一, “車々間通信における交差点見通し外環境での伝搬損失簡易推定法の検討,” 信学技報, AP2007-173, pp. 1-6, March. 2007.
- 4) ITU-R, “Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz,” ITU-R P.1411-7, Sept. 2013.
- 5) S. Sai, E. Niwa, K. Mase, M. Nishibori, J. Inoue, M. Obuchi, T. Harada, H. Ito, K. Mizutani, M. Kizu, “Field evaluation of UHF radio propagation for an ITS safety system in an urban environment,” IEEE Communications Magazine, 47(11), pp. 120-127, Nov. 2009.
- 6) 細矢良雄(監), “電波伝搬ハンドブック,” リアライズ社, 1999.

Considering Query Processing and Optimization in RDBMS with Key-Value Store Function

Kenji HATANO* and Takamitsui SHIOI**

(Received April 30, 2015)

Currently, DBMSs being able to handle big data have two types of storages such as RDB and key-value storage. Conventional query optimizing approaches in the DBMSs usually classify issued queries according to their operation type (e.g. insert, delete, update, and so on), and select data storage to be used. In short, we have the potential to find other approach to improve query processing time if we focus on the type of each issued query to the DBMSs. In this paper, we propose a method for optimizing query processing in a RDBMS with key-value store function considering the type of each query to the DBMS.

Key words : Key-Value Store, RDBMS, Query Processing and Optimization

キーワード : Key-Value Store, RDBMS, 問合せ処理最適化

Key-Value ストア対応 RDBMS における問合せ処理最適化の一手法

波多野 賢治, 塩井 隆円

1 はじめに

近年, 様々なデバイスから多種多様なデータを収集し, それらをリアルタイム分析することで, 企業の経営戦略やコンシューマ向けの的確な情報提供を行うサービスに役立つビッグデータ分析が行われるようになった [1]. しかしながらビッグデータを利活用したいと考えている 70% の企業に対して, ビッグデータの利活用ができる企業は高等技術と大量資源を有する 1% のみと限られているのが現状である.

ビッグデータ分析を効率よく行うためには, 日々蓄積するデータを格納する機能と蓄積されたデータを分析するための機能が必要となるため, データを効率的に扱うためにデータベース管理システム (Database Management

System: DBMS) を用いることが一般的である. これまで DBMS は, 伝統的にリレーショナルデータベースシステム (Relational Database Management System: RDBMS) が用いられてきたが, ビッグデータ分析に必要な DBMS の機能には, 処理分散のコストや負荷分散のし易さ, そしてシステムのサービスが提供できなくなる事態の発生頻度が少ないことを示す高可用性 (High Availability: HA) が挙げられるため, 最近ではキーバリューストア型データベースシステム (Key-Value Store Database Management System: KVSDBMS) が用いられるようになってきた [2].

KVSDBMS は RDBMS とは異なり, データの格納方式が行指向型ではなく列指向型を採用している. この列指向型データ格納方式は, プログラミング言語における連想配列や Map と同様, 単に Key と Value の

* Mobility Research Center, Doshisha University, Kyoto, Japan
Telephone : +81-774-65-7663, E-mail : khatano@mail.doshisha.ac.jp

** Graduate School of Culture and Information Science, Doshisha University, Kyoto, Japan
Telephone : +81-774-65-7656, E-mail : shioi@ilab.doshisha.ac.jp

ペアからなる非常に簡単なデータモデルに基づいているため、前述したビッグデータ解析に必要な機能をサポートできるようになっている。その反面、単純なデータモデルでしかないため、RDBMS で実現できている複雑なデータ検索や集計、またデータの一貫性保証といった機能に関しては、その実現が困難である。つまり、DBMS の機能の差を決定づけるのはデータ格納方式に依存していると言えるが、どちらかを用いているだけでは RDBMS/KVSDBMS それぞれの問題に対応することができない。このことから、二種類の DBMS の得意とする処理を相互補完するためにこれらを組み合わせて運用する試みが始まっている [3-5]。

本稿では、こうした試みで未だ行われていない個々の問合せに対してどちらの DBMS を使用して問合せ処理を実行すべきかという点に着目し、列指向型データ格納可能な RDBMS (KVS-RDBMS) における問合せ最適化の一手法について検討する。

2 関連研究

1 節でも述べたように、昨今着目されているビッグデータを DBMS で扱うためには、RDBMS が得意とするオンライントランザクション処理 (Online Transaction Processing: OLTP) と KVSDBMS が得意とするオンライン分析処理 (Online Analytical Processing: OLAP) の両方を一つのシステムで運用する必要がある。このような二つの処理の一体化はオンライントランザクション分析処理 (Online Transactional and Analytics Processing: OLTAP) と呼ばれており、実際に多くのデータベースベンダでもその採用が進んでいる [6-8]。本節では、この流れの先駆けとなった DBMS の研究をいくつか紹介する。

Fractured Mirrors は、多数列を利用する問合せの場合は RDBMS で、少数列を利用する問合せの場合は KVSDBMS で処理を実行することで、効率的に問合せ処理が実行できるようになったものである [3]。当然、RDBMS/KVSDBMS を共に利用する問合せでは、一方の DBMS を利用する問合せに比べて高速にクエリ処理を実行できるというメリットがある。また、データを RDBMS/KVSDBMS それぞれのストレージに重複格納することによって、どちらか片方だけにデータアクセスが集中してしまった場合でも、アクセスを分散させるこ

とでそれぞれの問合せ処理の偏りにも対応できる。

C-store は、Fractured Mirrors と同様、RDBMS と KVSDBMS それぞれが扱うデータストレージが存在するが、OLTP/OLAP それぞれの処理においてもさらに二種類のストレージを用意することで、データの更新処理をしながら参照処理も効率的に行う仕組みを確立している [4]。この仕組みは Tuple Mover と呼ばれているが、具体的には書込用ストレージに書き込まれた更新内容を、随時、読込指向ストレージへと更新していくというものである。つまり、データの挿入、削除、更新といった実際にディスクにアクセスされなければならない処理は負荷の高い書込用ストレージを、データの参照処理は読込用ストレージを使用するよう問合せ処理をそれぞれの DBMS に振り分けて運用するのである。

MicroSharding は NEC のスケールアウト型 DBMS である Infotable Relational Store (IRS)* の中核となる技術であり、分散配置させてある KVSDBMS のデータストレージにトランザクション機能を持たせることで、あたかも一つの RDBMS のデータストレージにデータが格納されているかのように振る舞わせるという機能を持っている [5]。したがって、Fractured Mirrors や C-store のように二種類のストレージを持っているのではない点がメリットとなっているが、RDBMS の適用領域すべてを網羅できない点が残っていることがデメリットとなっている。

3 提案手法

2 節で説明した関連研究では、主に RDBMS と KVSDBMS が扱うデータストレージをどのように設計するのか、また、OLTP/OLAP それぞれの処理においてどちらの DBMS を利用するのかといった点に着目され、それぞれの研究が行われていた。そのため、更なる問合せ処理最適化を図るためには、問合せ個々に対してそれらの細部に着目した研究が行われるべきである。本稿では、それぞれのデータストレージの違いに着目し、既存の RDBMS の上で実装が進んでいる KVSDBMS 用のストレージと従来のストレージをハイブリッドに運用する、KVS-RDBMS を用いた問合せ処理最適化について検討することにした**。

* NEC Infotable Relational Store: <http://jpn.nec.com/infotable/relationalstore/>

** 本提案の詳細は、文献 [9] を参照のこと。

KVSDBMS を用いることのメリットは、

- 分散化が容易かつ低コスト
- 高可用性

と 1 節でも述べたが、KVSDBMS 用のストレージはデータの圧縮が可能であるため、データを高速に検索するための索引機能が利用できないという制限が存在する。そのため、検索されるデータ数によっては KVSDBMS 用のストレージが RDBMS 用のストレージよりも性能が下がる可能性がある。このことを考慮し文献 [10] では、KVSDBMS 用ストレージを利用する条件を、

1. RDBMS 用ストレージを利用する際の結果件数が KVSDBMS 用ストレージのそれと比較して 60% 以下になった場合
2. RDBMS 用ストレージを利用する際に結合処理 3 回以上発生する場合

の二条件とし、それ以外の場合は RDBMS 用ストレージを使用するハイブリッド運用するようにしたが、相副問合せを含むような問合せの場合に処理速度が遅くなってしまったことが分かった。これは、相副問合せ実行されると NestedLoop 結合が行われ、KVSDBMS 用のストレージ性能が下がることに起因すると推察される。このことから、上記条件を見直し、問合せ処理は基本的には KVSDBMS 用データストレージで行うが、相副問合せ処理を実行する場合にのみ RDBMS 用データストレージを用いるという、別形式のハイブリッド運用を行うこととした。

4 評価実験

提案手法の有用性を評価するために、DBMS の性能を評価するための組織であるトランザクション処理性能評議会 (Transaction Processing Performance Council: TPC) が提供する TPC-H ベンチマーク [11] のデータと問合せを用いた評価実験を行い、全 22 種類の各問合せに対して問合せ実行速度を計測した。TPC-H ベンチマークは意思決定支援システム用のベンチマークテストであり、ビッグデータの分析処理の性能を評価するために近年頻繁に用いられるものである。

本評価実験では、RDBMS/KVSDBMS 用ストレージ内に TPC-H ベンチマークで使用するデータをそれぞれ

格納し、RDBMS/KVSDBMS それぞれ単体で問合せ処理した時間と、3 節で提案した相副問合せ処理を実行する場合のみ RDBMS を、それ以外の場合は KVSDBMS を用いる手法の問合せ処理時間の結果を計測した。Table 1 と Fig. 1 は、全 22 種類の問合せ処理を 10 セット実行した平均実行時間である。

Table 1. Average Query Processing Times (sec.).

ストレージ	KVSDBMS	RDBMS	KVS-RDBMS
平均実行時間	106.02	9.17	6.88

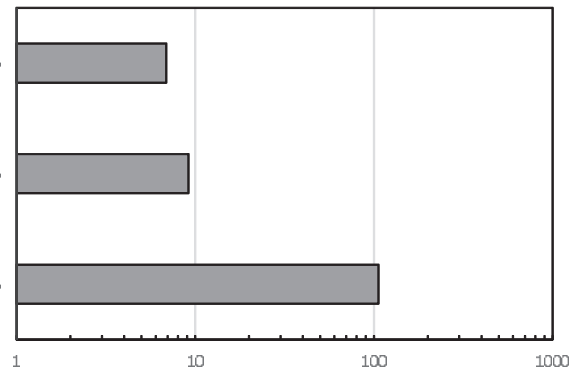


Fig. 1. Average Query Processing Times (sec.).

これらの結果から各 DBMS を単体で問合せ実行した場合に比べて、本提案手法である RDBMS/KVSDBMS をハイブリッド運用した KVS-RDBMS が最も高速に問合せ処理を実行可能であり、それぞれ 94%、25% 高速化が図れることが判明した。

5 おわりに

本稿では、KVS-RDBMS 上における問合せ処理最適化法の提案とその評価を行い、提案手法の有効性が判明した。

しかしながら、個々の問合せ、特に結合問合せに着目した場合、ハッシュ結合やマージ結合、ネステッド・ループ結合といった結合の種類によって、まだまだ処理の高速化が図れる部分が残されているように見受けられる。今後はさらに問合せの細部にまで着目し、更なる最適化を図っていく予定である。

また、今回の評価実験はデータベースサーバー一台で

行ったものだが、ビッグデータ分析を行う計算機環境は、基本、計算機の分散化が必須となる。したがって、そうした分散環境化での KVS-RDBMS 運用方法を検討する点が、今後検討すべき課題である。

本研究の一部は、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 S1411030、および、科学研究費補助金 26280115 の支援を受けたものである。

参考文献

- 1) Adam Jacobs. The Pathologies of Big Data. *Communications of the ACM*, Vol. 52, No. 8, pp. 36–44, August 2009.
- 2) 首藤一幸. Key-Value ストアの基礎知識. *Software Design* 2010 年 2 月号, pp. 14–21. 技術評論社, January 2010.
- 3) Ravishankar Ramamurthy, David J. DeWitt, and Qi Su. A Case for Fractured Mirrors. In *Proceedings of the 28th International Conference on Very Large Data Bases*, pp. 430–441. VLDB Endowment, August 2002.
- 4) Mike Stonebraker, Daniel J. Asadi, Adam Batkin, Xuedong Chen, Mitch Cherniack, Miguel Ferreira, Edmond Lau, Amerson Lin, Sam Madden, Elizabeth O’Neil, Pat O’Neil, Alex Rasin, Nga Tran, and Stan Zdonik. C-Store: A Column-Oriented DBMS. In *Proceedings of the 31st International Conference on Very Large Data Bases*, pp. 553–564. VLDB Endowment, August 2005.
- 5) Junichi Tatemura, Oliver Po, and Hakan Hacgümiş. Microsharding: A Declarative Approach to Support Elastic OLTP Workloads. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, Vol. 46, No. 1, pp. 4–11, January 2012.
- 6) Roland Seiffert. Online Transactional and Analytics Processing using SPSS, DB2 z/OS, DB2 Analytics Accelerator, March 2013. http://www-304.ibm.com/connections/blogs/systemz/entry/online_transactional_and_analytics_processing.
- 7) Franz Färber, Sang-Kyun Cha, Jürgen Primsch, Christof Bornhövd, Stefan Sigg, and Wolfgang Lehner. SAP HANA Database: Data Management for Modern Business Applications. *ACM SIGMOD Record*, Vol. 40, No. 4, pp. 45–51, December 2011.
- 8) Maria Colgan, Jesse Kamp, and Sue Lee. *Oracle Database In-Memory*. Oracle Corporation, October 2014. An Oracle White Paper.
- 9) 塩井隆円, 波多野賢治. 列指向型データ格納 RDBMS の問合せ処理最適化の一検討. 電子情報通信学会総合大会講演論文集, March 2015. D-4-25.
- 10) 塩井隆円. ローストア型／カラムストア型構成データ基盤のハイブリッド運用に関する研究. 同志社大学文化情報学部卒業論文, December 2014.
- 11) TPC. *TPC Benchmark H Standard Specification Revision 2.16.0*, November 2013.

A Distributed Management of Vehicle Sensor Data Using NoSQL

Hideki SHIMADA^{*}, Akihiro YAMAGUCHI^{**}, Shinya HONDA^{**}, Hiroaki TAKADA^{**} and Kenya SATO^{***}

(Received November 25, 2014)

Cooperative safety driving support systems using V2V and V2I communication are developed. Automotive data of vehicles and roads are communicated in the cooperative safety driving system. We have implemented the LDM (Local Dynamic Map) using the RDBMS by reference to the specification of SAFESPOT. According to the experimental results, the number of vehicles increases and the response time of the application becomes worse. In this paper, we propose the virtual dynamic map system using NoSQL. By using NoSQL, the vehicles and the center can manage large amount of the sensor data dispersedly. The vehicles make the local sensing map and the center makes the global sensing map by consolidating the local maps in the virtual dynamic map.

Key words : cooperative safety driving system, ITS, NoSQL.

キーワード : 協調型安全運転支援システム, ITS, NoSQL.

NoSQL を利用した車載センサーデータ分散管理

島田 秀輝, 山口 晃広, 本田 晋也, 高田 広章, 佐藤 健哉

1 はじめに

ネットワーク通信を利用した協調型安全運転支援システムの開発が欧米および日本で進められている。米国では VII (Vehicle Infrastructure Integration) プロジェクト, 欧州では ETSI (European Telecommunications Standards Institute, 欧州電気通信標準化機構) によって, 協調型システムの標準化が進められている。日本では, 先進安全自動車 (ASV : Advanced Safety Vehicle) 推進計画¹⁾ や次世代安全運転支援システム (DSSS : Driving Safety Support System)²⁾ などが進められている。

ETSI が標準化を進めている Local Dynamic Map(LDM)³⁾ は, 関係データベース管理システムを用いた実装例が報告されており, 我々も SAFESPOT プ

ロジェクト⁴⁾ の仕様に従い実装を進めた。実際の道路地図上を走行するシナリオを作成し, シミュレータを用いて生成した車両データを関係データベース管理システムに実装した LDM に登録しアプリケーションの動作確認を行った。関係データベース管理システムは, PostgreSQL, SQLite を用い実装したが, 両実装共, 車両台数の増加共にディスクアクセスが増加し応答性能が悪化するという問題点が存在する。上記の問題以外にも, 関係データベース管理システムは一般的に管理するデータ数には限界があり, 分散管理が困難であると言われている。

今後, 車車間/路車間通信可能な車両が増加すると, 管理すべき車両センサーデータ数は増加すると考えられる。

^{*} Organization for Research Initiatives and Development, Doshisha University, Kyoto

Telephone : +81-774-65-7564, E-mail : hshimada@mail.doshisha.ac.jp

^{**} Center for Embedded Computing Systems, Nagoya University, Aichi

Telephone : +81-52-789-3630, E-mail : yamagut@nces.is.nagoya-u.ac.jp, honda@ertl.jp, hiro@ertl.jp

^{***} Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone : +81-774-65-6297, E-mail : ksato@mail.doshisha.ac.jp

そこで、LDM の概念をベースに車両センサデータを分散管理する新しい仕組みを提案する。管理するセンサデータの時間的特性、空間的特性を考慮し、時間的に高頻度で更新される空間的に関連性が高いセンサデータを一貫性より応答時間優先で管理する。各車両で生成されるセンサデータのデータベースをセンターに集約し、ローカルなエリアのセンサデータ群をセンターでグローバルなエリアのセンサデータ群を作成する。これによって、空間的に関連性が低い情報をセンターから取得することによって、自車の情報と同様に取得することが可能になる。

本稿では、センサデータの時間的特性および空間的特性を考慮したデータ管理機構の提案と設計を述べる。データ管理機構は、関係データベース管理システムで実装した LDM とは異なり、スケーラビリティが高く分散管理が容易な NoSQL の使用し設計実装を行う。本論文の構成は以下のとおりである。2 章にて協調安全運転支援システムにおけるデータ管理および、LDM の実装に関して述べる。3 章にて提案する仮想ダイナミックマップの概要について説明し、4 章にて仮想ダイナミックマップの設計、実装について述べる。最後に 5 章にて本稿のまとめを述べる。

2 協調型安全運転支援のためのデータ管理

2.1 安全運転支援システム

安全運転支援システムは、車両に搭載されたセンサから得られる情報を元に車両の制御およびアプリケーションを実行するシステムである。自車のセンサの情報のみを利用する車両単独型の安全運転支援システムと、自車だけでなく他車のセンサ情報も利用する協調型安全運転支援システムに分けられる。車両単独型の安全運転支援システムとしては、スバルのアイサイトやトヨタ自動車の衝突回避支援型プリクラッシュセーフティシステムといった装備が市販化され実運用されている。市販化されている装備以外にも、車両単独型の安全運転支援システムは、Google の自動運転カーに代表されるような研究もドライバーレスな自動運転システムを目指し開発されている。

車両単独型の安全運転支援システムでは、自車両に搭載されたセンサを利用し歩行者や車両、障害物を検知しドライバーに対して警告出力する、車両の制御を行うと

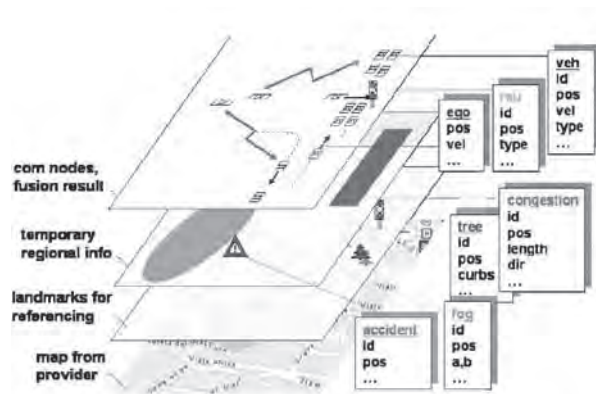


Fig. 1. Local Dynamic Map ⁵⁾ .

いうといった動作を行う。しかし、見通しの悪い交差点などからの飛び出しなどセンサ単体では検知することができない情報が存在する。そこで、ネットワークを利用した協調型安全運転支援システムが研究開発されている。協調型安全運転支援システムでは、車車間、路車間、歩車間においてネットワーク通信を利用し各端末で取得するセンサデータを共有することによって、上記の問題点を解決する。

2.2 車両センサデータ管理と LDM

車両には様々なセンサが搭載されている。それらのセンサが出力するデータを車両センサデータとする。具体的には、車両の速度、加速度、GPS から得られる位置情報だけでなく、アイサイトのようなステレオカメラから得られるカメラ画像、近隣の物体を検知するためのレーザーやレーダといったデバイスから得られる情報などである。

LDM は欧州で標準化が進められている協調型安全運転支援システムで利用するデータの集合体である。Fig. 1 に示すように四階層モデルを採用しており、第一層が静的なデータであり、上位層になるほど動的なデータになるように分類されている。具体的には、もっとも静的データである第一層のデータとしては道路情報などの地図データ、次に静的である第二層のデータとしては、地図データに含まれない信号情報などがあげられる。また、比較的動的な情報を管理する第三層のデータとしては、道路の渋滞状況などがあげられ、もっとも動的なデータを扱う第四層のデータとして車両のセンサ情報などがあげられる。

LDM では、静的な地図情報と動的な車両情報が別のテーブルで管理するように設計されており、各階層の

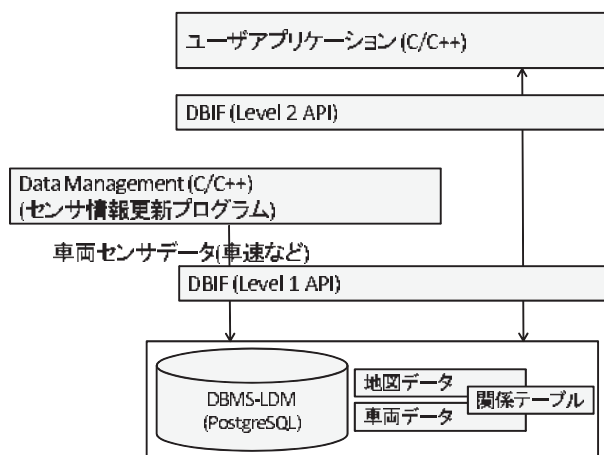


Fig. 2. LDM implemented by RDBMS.

データには geometry と呼ばれる位置に関する属性情報を持つ。位置情報を管理することによって、各情報がどの位置に存在するかを取得することは可能であるが、LDM では階層間を関係付ける機構を備えている。車両情報を管理するテーブルでは各車両の絶対位置情報を取得することが可能であるが、関係テーブルを利用することによって各車両が LDM におけるどの道路情報を走行しているかなどを取得することが可能となる。

LDM の実装例としては、Bosch 社と Tele Atlas 社による PG-LDM と NAVTEQ 社による NAVTEQ-LDM が報告されている^{5, 6)}。それぞれの実装は関係データベース管理システム (RDBMS) が用いられており、PG-LDM では PostgreSQL, NAVTEQ-LDM では SQLite がそれぞれ採用されている。両 RDBMS 共、位置情報を利用する空間演算が実行可能であり、地図上を検索するのに適している。

我々は、SAFESPOT プロジェクトでも実装が報告されている PostgreSQL, SQLite を利用し LDM の実装している^{7, 8)}。LDM では、地図情報の管理や地図と車両の関係性を演算する必要があり、PostgreSQL は PostGIS, SQLite は SpatiaLite という空間演算モジュールが備わっている。我々の実装は、Fig. 2 のような構成になっており、LDM データベースにアクセスするための API を実装し、その上で車両情報を更新するプログラムならびに、ユーザアプリケーションを実装した。

また、地図データ及び車両データを用いて実装した LDM の評価実験を行った。Open Street Map⁹⁾ の地図データを利用し、PreScan シミュレータ¹⁰⁾ 上でシナリオを作成し、その地図上を走行する車両センサデータ

を収集する。車両センサデータのログデータを実装した LDM に登録するプログラムを作成し、衝突警告アプリケーションを実装し応答時間の調査を行った。

2.3 問題点

RDBMS を用いた LDM では、PostgreSQL, SQLite は共にハードディスク上でデータ管理を行うため、データ書き込みなどに処理時間を要するため車両の台数増加に伴いディスクアクセスが増加しアプリケーションの応答時間が車両センサデータの更新周期内に実行できないことが分かった。中でも、LDM の特徴である第四層の車両センサデータと第一層の地図情報を関係づけるための空間演算処理の負荷が高いため、高遅延の結果となった。

3 仮想ダイナミックマップの提案

3.1 仮想ダイナミックマップの概要

車両台数が増加することによって、RDBMS を利用した実装ではアプリケーションが動作しない。また、既存の LDM の実装では車両センサデータを RDBMS において集中的に管理する仕組みをとっている。このため車両センサデータの種類によらずデータを管理するため、RDBMS への登録に際してディスクアクセスが増加し応答時間が悪化している。

そこで、我々は車両センサデータをセンサデータの時間的/空間的特性に応じて管理する方法を変更し、また車両センサデータを分散管理する手法を提案する。この車両センサデータ管理システムを仮想ダイナミックマップと呼ぶ。仮想ダイナミックマップでは、グリッドマップを用いて物体情報、車両情報を管理し、また NoSQL を用いてオンメモリでデータ管理を行う仕組みをとる。

3.2 グリッドマップ

グリッドマップとは、二次元平面を等間隔のグリッドに分割し各グリッドに存在する物体の存在確率を管理する手法である。レーザレーダによって生成される情報を管理するために用いられている。具体的には、ロボットを用いたマップ生成、車両による道路形状の推定や移動体の検知といったシステムにおいて利用されている¹¹⁾。仮想ダイナミックマップでは、車両の位置情報および、車両に搭載されたセンサから取得することができる物体情報を存在確率と共にグリッドマップにて管理するものとする。また、狭域グリッドマップ、広域グリッドマッ

プとグリッドのサイズが異なる二種類のグリッドマップを利用し、空間的に関連性が高い自車両の近隣のエリア情報に関しては狭域グリッドマップを利用し管理し、空間的に関連性が低い自車両の遠方のエリア情報に関しては広域グリッドマップを利用し管理する。

3.3 NoSQL

既存のLDMではRDBMSを用いてデータ管理を行っている。RDBMS内にて位置情報を管理し、空間演算を実行することによって、動的な車両センサデータと静的な地図データを対応付け管理する。RDBMSでは、データの一貫性や永続性が確保するためにトランザクション制御の管理を厳密に行われる。しかし、そのために大量のデータを管理することには不適であり、データを分散管理するのは難しい。

そこで、大量のデータを関係モデルを用いずにシンプルなデータモデルで分散管理することを可能とするNoSQLという技術が開発されている。大量のデータを関係モデルを用いずにシンプルなデータモデルで分散管理することを可能とするNoSQLという技術が開発されている。NoSQLにはキーバリュー型やドキュメント指向型など様々なアーキテクチャが存在し、オープンソースの実装例も多く存在し実運用されている。安全運転支援システムでは、一般的に車両センサデータは10Hzといった高頻度で更新されるデータを取り扱うため、ストリーム型のデータであると言える。ストリーム型のデータは、値が時間的に連続して更新され新しいデータが生成されると古いデータの有効性は少なくなる。RDBMSでは各データを一貫して管理することには長けているが、このようなストリーム型のデータを取り扱う場合、NoSQLのようなシンプルなデータモデルで大量に高速処理する仕組みを利用しても問題ないため、仮想ダイナミックマップではNoSQLのアーキテクチャを利用して車両センサデータを管理する。

3.4 システム構成

Fig. 3のように仮想ダイナミックマップのシステムは、車両とクラウド上に存在するセンターで構成される。それぞれの端末上でNoSQLを用いてグリッドマップ上で車両センサデータ及び道路状態情報、物体情報を管理する。車両同士は車車間通信を利用し、狭域グリッドマップで管理する近隣の情報をやりとりする。また、車両とセンター間は路車間通信を利用し、広域グリッドマップで管理する空間的に遠い情報をやりとりし、自車で生成

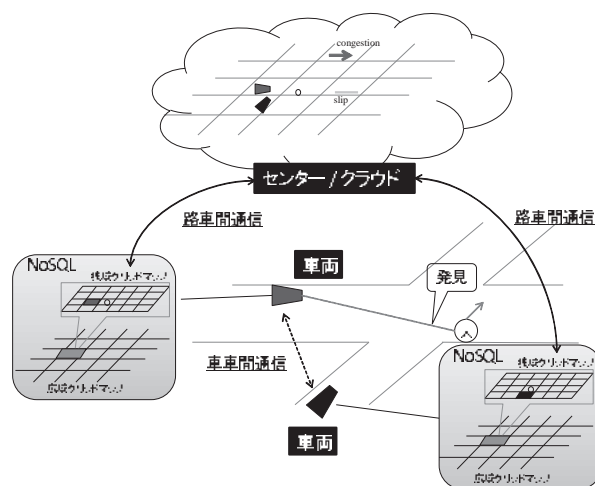


Fig. 3. Overview of virtual dynamic map.

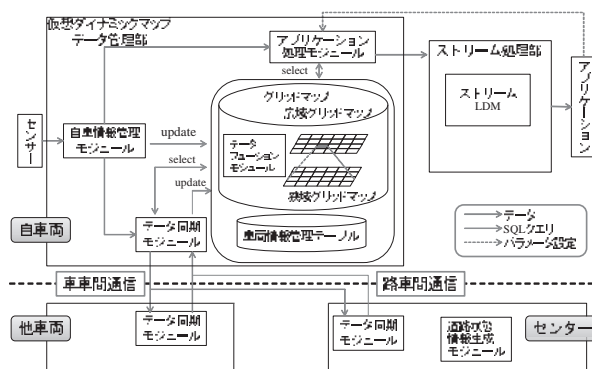


Fig. 4. Architecture of virtual dynamic map.

した車両センサデータを分散管理する。

センターは車両から収集したセンサデータをもとに渋滞情報などをデータフュージョンすることによって情報生成し広域グリッドマップにて管理し、車両に対して提供する、また、車両同士が直接通信できない場合も想定されるため、車両が存在する狭域グリッドマップの情報を各車両に対して提供する。

4 仮想ダイナミックマップの設計と実装

4.1 設計概要

仮想ダイナミックマップはFig. 4のようなモジュールで構成される。車載のセンサからの出力されたデータを仮想ダイナミックマップではグリッドマップを用いて管理し、ネットワークで接続された他車両およびセンターと通信しセンサデータの送受信を行う。衝突警告、車両制御などのアプリケーションは仮想ダイナミックマップ

に対して、必要な情報を指定し、出力された情報をストリーム処理部にてデータストリーム管理システムを用いてデータ処理しデータ出力する。

車両およびセンターにおけるデータ管理の機構は、同一の構成になっている。NoSQLの実装は、mongoDB¹²⁾を用いてグリッドマップを管理している。mongoDBは、ドキュメント指向で設計されたNoSQLの実装の一つであり、RDBMSとは異なりスキーマが存在せずデータ構造が柔軟であるという特徴を持つ。また、PostgreSQLのPostGISのような地理空間インデックスの処理もmongoDBでは可能であるため、今回、位置情報を取り扱う仮想ダイナミックマップの実装に適している。各モジュールは、C言語を用いて記述しmongoDBの操作はmongo c driverを利用する。

4.2 自転車情報管理モジュール

自転車情報管理モジュールは、車両に搭載されたセンサから得られる値を変換し、仮想ダイナミックマップおよび車両情報管理テーブルに登録する機構である。センサからの値は周期的(10Hz)で生成されグリッドマップに登録する。センサの値としてはGPSから得られる位置情報、カメラ画像、レーダから得られる周辺に存在する物体情報などがあげられる。緯度、経度の位置情報をグリッドマップに登録するために座標系の変換を行う。グリッドマップの基準となる起点情報、グリッドサイズは全車両およびセンターで共通の情報として持っており、この情報をもとに緯度経度情報からグリッド座標系に変換しグリッドマップに登録する。

4.3 グリッドマップ

グリッドマップは仮想ダイナミックマップでデータを管理する機構である。本実装ではNoSQLの一つであるmongoDBを利用し実装している。グリッドマップは広域グリッドマップ、狭域グリッドマップの2種類に分けて管理し、それぞれの構成はTable 1のようになる。

広域グリッドマップはグリッドのサイズが200m四方であり、空間的に遠く実時間性が低い情報を管理する。具体的には、距離が離れたところに存在する車両の位置情報、渋滞といった道路状態情報などがあげられる。Table 1のように広域グリッドのID情報、登録時刻、情報のタイプ、属性情報を管理する。

狭域グリッドマップはグリッドのサイズが0.5m四方であり、空間的に近く実時間性が高い情報を管理する。具体的には、自車のレーザーで検知した道路上の障害物

情報および歩行者情報、近隣に存在する車両の位置情報などである。Table 1のように狭域グリッドのID情報、親となる広域グリッドのID情報、登録時刻、生成した車両のID、確からしさ、情報のタイプ、属性情報を管理する。

4.4 車両情報管理テーブル

車両情報管理テーブルは、自転車および近隣に存在する車両から取得した車両の情報を管理するテーブルである。車両のセンサから得られる速度や加速度、緯度経度情報などの数値データを管理し、ストリーム処理部に対して出力する。

4.5 アプリケーション処理モジュール

アプリケーション処理モジュールは、アプリケーションから必要な情報を受け付ける機構である。アプリケーションによってストリーム処理部での処理内容は異なり、グリッドマップで管理し出力すべき情報は異なるため、この機構において取得する値および更新頻度を切り替える。

4.6 データ同期モジュール

データ同期モジュールは、他車両およびセンターと通信し生成したセンサデータを同期し分散管理する機構である。自車両と他車両のデータ同期は、データの生成周期ごとに実行される。対象となる車両は各車両の無線ネットワークデバイスの1ホップ内に存在する端末で、各車両は同期メッセージを1ホップブロードキャストする。同期メッセージを受信した車両は、各車両内のグリッドマップに受信内容を登録し、グリッドマップを更新する。同時に車両情報管理テーブルの更新も行う。

車両とセンターの同期は、車両間の同期より低頻度で実行する。車両はセンターに対して前回の同期時との差分データを同期メッセージに含めて、センターに対して送信する。これによって、各車両とセンターは車両が生成したセンサデータの分散管理を実現する。センターは受信した車両のログデータを管理し、センター内のグリッドマップを更新する。また、センターには道路状態情報生成モジュールを設定し、各車両のログデータを元に渋滞情報などを生成しグリッドマップを更新する。更新したグリッドマップの情報を車両からの同期メッセージの応答として各車両に対して配信する。車両はセンターからの同期メッセージを受信し、グリッドマップの情報を更新する。このようにすることによって、直接通信できない近隣の車両情報を車両は取得することが可能

Table 1. Configuration of grid map.

広域グリッドマップ								
gridID_X	gridID_Y	timestamp	type	attribute				
狭域グリッドマップ								
gridID_X	gridID_Y	widegridID_X	widegridID_Y	timestamp	carID	confidence	type	attribute

になる。

5 おわりに

路車間/車車間協調による ITS におけるセンサデータを管理する機構である LDM に注目し研究開発を進めてきた。しかし、関係データベース管理システムを用いた LDM の実装では車両台数の増加と共にセンサデータの管理が難しくなる。

そこで本稿では、NoSQL を利用し車両とセンターにてセンサーデータを分散管理し、各ノードで生成されるセンサーデータを共有する仕組みの提案を行った。本稿では、NoSQL を利用し車両とセンターにてセンサーデータを分散管理し、各ノードで生成されるセンサーデータを共有する仕組みの提案を行った。NoSQL を利用することによって、関係データベース管理システムでは困難であった分散管理が可能となり、管理するセンサーデータが増加してもデータ管理可能である。提案した仮想ダイナミックマップは、センサーデータの時間的特性および空間的特性を考慮し分散管理し、各車両で生成されるセンサーデータをマップした物を集約しグローバルなセンサーデータマップを作成することが可能になる。

今後、クラウド環境を構築した上で、シミュレーションによって得られた車両データを用いてアプリケーションを用いた評価実験を行う予定である。また、各車両にて管理するグリッドマップの状態を地図上にマッピングし可視化するツールの作成を進める予定である。

本研究の一部は戦略的情報通信研究開発推進精度 (SCOPE) および科学研究費補助金の助成を受けたものである。

参考文献

1) 国土交通省, “先進安全自動車 (ASV) 推進計画 報告書,” <http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/>

resource/data/asv4pamphlet_seika.pdf, 参照 Nov. 25, 2014.

2) 小林雅文, 大田利文, 鎌田邦廣, “DSSS の実用化に向けた研究開発,” 自動車技術, **64**[9], 43–48 (2010).

3) ETSI, “ETSI TR 102 863 (V1.1.1),” http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102800_102899/102863/01.01.01_60/tr_102863v010101p.pdf, 参照 Nov. 25, 2014.

4) SAFESPOT, “SAFESPOT Integrated Project,” <http://www.safespot-eu.org/>, 参照 Nov. 25, 2014.

5) SAFESPOT, “SAFESPOT SP 7 SCORE - SAFESPOT Core Architecture, D7.3.1 Annex2 - LDM API and Usage Reference,” http://www.safespot-eu.org/documents/SF_D7.3.1_Annex2_LDM_API_and_Usage_Reference_v0.7.pdf, 参照 Nov. 25, 2014.

6) J. Ibanez-Guzman, S. Lefevre, A. Mokkadem, S. Rodhaim, “Vehicle to Vehicle Communications Applied to Road Intersection Safety, Field Results,” Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010 13th International IEEE Conference, pp.192-197 (2010).

7) 島田秀輝, 山口晃広, 本田晋也, 高田広章, 佐藤健哉, “協調型安全運転支援のための車載データ管理機構の実装と評価,” 第 50 回同志社大学理工学研究所発表会・2012 年度学内研究センター合同シンポジウム講演予稿集, 140–145 (2012).

8) 島田秀輝, 山口晃広, 本田晋也, 高田広章, 佐藤健哉, “組込み型データベースを利用した Local Dynamic Map の設計,” 第 54 回同志社大学理工学研究所発表会・2013 年度学内研究センター合同シンポジウム講演予稿集, 115–120 (2013).

9) OpenStreetMap, “OpenStreetMap,” <http://www.openstreetmap.org/>, 参照 Nov. 25, 2014.

10) TASS International, “PreScan,” <http://www.tass-safe.jp/prescan/index.html>, 参照 Nov. 25, 2014.

11) 高木聖和, 安藤忍, 橋本雅文, “レーザーレーダによる歩行者認識技術,” デンソーテクニカルレビュー, **12**[1], 35–39 (2007).

12) MongoDB, Inc. “MongoDB,” <http://www.mongodb.org/>, 参照 Nov. 25, 2014.

Methodology and Tool for Experimental Evaluation of Vehicular Networks

Manabu TSUKADA^{*}, José SANTA^{**}, Satoshi MATSUURA^{***}, Thierry ERNST¹ and Kazutoshi FUJIKAWA²

(Received March 9, 2014)

One of the most challenging fields in vehicular communications has been the experimental assessment of protocols and novel technologies. Researchers usually tend to simulate vehicular scenarios and/or partially validate new contributions in the area by using constrained testbeds and carrying out minor tests. In this line, the present work reviews the issues that pioneers in the area of vehicular communications and, in general, in telematics, have to deal with if they want to perform a good evaluation campaign by real testing. The key needs for a good experimental evaluation is the use of proper software tools for gathering testing data, post-processing and generating relevant figures of merit and, finally, properly showing the most important results. For this reason, a key contribution of this paper is the presentation of an evaluation environment called AnaVANET, which covers the previous needs. By using this tool and presenting a reference case of study, a generic testing methodology is described and applied. This way, the usage of the IPv6 protocol over a vehicle-to-vehicle routing protocol, and supporting IETF-based network mobility, is tested at the same time the main features of the AnaVANET system are presented. This work contributes in laying the foundations for a proper experimental evaluation of vehicular networks and will be useful for many researchers in the area.

Key words F Experimental Evaluation, Vehicular Ad-hoc Networks, Wireless Multihop Communication, Network Mobility, Cooperative ITS, Intelligent Transportation Systems

1 Introduction

Intelligent Transportation Systems (ITS) are systems deployed to optimize the road traffic and realize safe, efficient and comfortable human mobility. There are a number of research fields in ITS but cooperative ITS and vehicular communications have received an especial attention during the last years. Within this area various technologies are considered, such as wireless communications, network management, communication security, navigation, etc. In cooperative ITS, multiple entities share information and tasks to achieve common objectives. Thus, data exchange ex-

ists among vehicles, roadside infrastructure, traffic control centers, road users, road authorities and road operators, to support drivers, pedestrians, road authorities and operators in different areas of safety, traffic efficiency and infotainment. The European Commission (EC), for instance, published the action plan ¹⁾ in Europe followed by ITS standardization mandate ²⁾, to speed up the adoption of these systems in the European Union, but there are a number of initiatives worldwide to encourage the research and development in ITS, mainly from the US Department of Transport and the Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.

There are few barriers in the global road network among countries, and vehicles easily cross country borders, especially in Europe. Thus there is a huge neces-

^{*} The University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan
Telephone : +81-3-5841-7465
E-mail : tsukada@hongo.wide.ad.jp

^{**} E-mail : jose.santa@tud.upct.es

^{***} E-mail : matsuura@gsic.titech.ac.jp

^{****} E-mail : thierry.ernst@mines-paristech.fr

^{*****} E-mail : fujikawa@itc.naist.jp

sity that cooperative ITS relies on the same architecture, protocols and technologies. As such, standardization organizations are developing cooperative ITS standards. The International Organization for Standardization (ISO) Technical Committee 204 Working Group 16 (TC204 WG16) (also known as Communications Architecture for Land Mobile (CALM)) is in charge of standardizing a communication architecture for cooperative ITS. TC204 WG16 is specially working on a communication architecture supporting all types of access media and applications. In Europe, the European Telecommunications Standards Institute (ETSI) TC ITS is working on building blocks of the same architecture in harmonization with ISO TC204 WG16. In 2010, both ISO TC204 WG16 and ETSI TC ITS defined the ITS Station reference architecture ^{3, 4)}.

In cooperative ITS and, in general, in vehicular networks, there are two main communication paradigms, vehicle to vehicle (V2V) and vehicle to infrastructure (V2I), depending on whether the communication is performed directly between vehicles or using nodes locally or remotely installed on the road infrastructure. When the V2V paradigm is considered, the research field is commonly called Vehicular Ad-hoc Networks, or VANET, as an especial case of Mobile Ad-hoc Networks (MANET) where nodes are vehicles. Although there are a lot of works related to VANET applications and basic research at physical, MAC and network layers, there is a significant lack of real evaluation analysis in this field, due to cost and effort implications. Many VANET solutions and protocols could be considered as non-practical designs if they were tested over real scenarios, as it has been proved in MANET ⁵⁾. Performance of VANET protocols based on a pure broadcast approach can be more or less expected in simple configurations, even if they are not experimentally tested; but the number of issues concerning the real performance of multi-hop designs is much more tricky. A similar problem can be found in V2I, which has received a great attention by the research community in the last years, due to the idea that V2I technologies and services will find a place in the market before V2V

approaches. Nevertheless, a number of experimentation works and supporting tools should be improved in the short term, in order to give real evidences to car manufacturers and road operators of the benefits of vehicular communications.

Conventional network measurement tools (e.g. *iperf*, *ping* or *traceroute*) assume fixed networks and assess network performances in an end-to-end basis. However, under dynamic network conditions such as in the vehicular networks case, it is difficult to analyze in detail the operation of networks by using solely these tools, because vehicles are always changing their location and the performance of wireless channels fluctuates. In order to solve these issues, we have developed a packet analysis and visualization tool called AnaVANET*, which considers the peculiarities of the vehicular environment for providing an exhaustive evaluation software for outdoor scenarios (Figure 1 includes a preliminary screenshot of the visualization). Both V2V and V2I networks can be efficiently analyzed, thanks to the integrated features for collecting results, post-processing data, generate graphical figures of merit and, finally, publish the results in a dedicated web site (if desired). All tests and results are later available in the form of an animated webpage where both researchers and the general public can access the evaluations. AnaVANET has been successfully exploited for the moment in experimental evaluation campaigns in the GeoNet ⁶⁾ and ITSSv6 ⁷⁾ projects.

In this paper, apart from presenting our tool for assessing the performance of vehicular networks, we analyze in detail the problem of real testing in V2V and V2I, identifying the main issues, requirements, and proposing a general methodology useful for further works in the area. To sum up, the rest of the paper is organized as follows. Section 2 introduces the readers in network layer protocols for vehicular networks. Section 3 reviews related works in the area of testing vehicular networks. Then, the issues and requirements for evaluating vehicular networks are listed in Section 4. The evaluation methodology desired in

* <http://anavanet.net/>



Fig. 1. Screenshot of AnaVANET viewer.

this frame is described in Section 5 and, as a result of our analysis, the design and implementation of the AnaVANET evaluation tool is detailed in Section 6, together with a reference evaluation of a network testbed using the tool in Section 7. As a result of this evaluation, the functionalities provided by AnaVANET are analyzed in Section 8 according to the previously identified needs. Finally, Section 9 concludes the paper summarizing the main results and addressing future works.

2 Network protocols in vehicular networks

Network protocols in vehicular networks can be classified in infrastructure-less scenarios, i.e. V2V, and infrastructure-based scenarios, i.e. V2I, as showed in Figure 2.

The infrastructure-less scenario is well-known in the research areas of VANET and MANET. These approaches are designed to enable wireless communications in dynamic topologies without any infrastructure. Routing protocols here are further classified as *topology-based* and *position-based* routing protocols. Upon the appearance of vehicular communications, a second class of infrastructure-less protocols added to the list: VANETs. Most of the VANET solutions are based on geographical routing, thus based on the

node's position.

Topology-based protocols were divided into two main branches by the IETF MANET working group: *reactive*, where nodes periodically exchange messages to create routes, and *proactive*, in which control messages are exchanged on demand when it is necessary to reach a particular node. Generally, proactive protocols have the advantage of starting communication rapidly by making the routing table ahead, however, this makes battery life shorter due to frequent signaling. If the topology is highly dynamic and the data traffic is frequent, a proactive protocol could be better. Reactive protocols, on the contrary, keep the battery life longer by reducing signaling messages when there is no data to transmit. The *hybrid* protocols that take the advantage of both proactive and reactive protocols by maintaining routes to near neighbors regularly and searching the destination in long distance on demand.

Some routing protocols are specified by the IETF MANET working group⁸⁾. Both IPv4 and IPv6 are supported in the working group. Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV)⁹⁾ and Dynamic Source Routing Protocol (DSR)¹⁰⁾ are specified as reactive routing protocols. And Optimized Link State Routing (OLSR)¹¹⁾ and Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)¹²⁾ are specified as proactive routing protocols. As an example of a hybrid MANET protocol, Zone Routing Protocol (ZRP)¹³⁾ is proposed.

VANETs are a particular case of MANETs, and are not restricted by the battery of the communication nodes and are also characterized by the high speed of nodes, the availability of GPS information, and a regular distribution and foreseeable movements. First, vehicles have a larger battery than mobile terminals or sensor devices, which is also charged when the engine is running. Second, the speed of vehicles is also higher than common portable terminals, and relative speeds can reach 300 Km/h; hence, the duration of the routing entries is extremely short. Third, a GPS device and digital map can be assumed in many cases, whose information improves the network performance

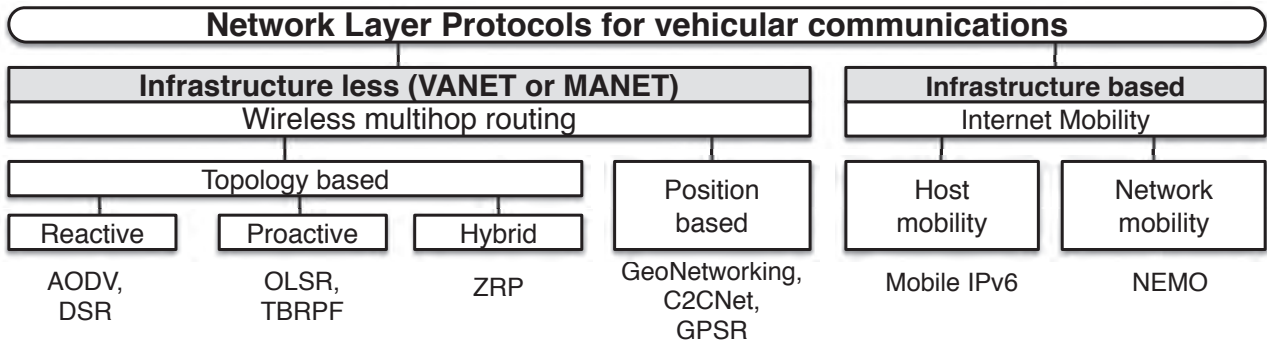


Fig. 2. Network protocols in vehicular networks.

in some proposals.

Unlike topology based routing, position based routing does not need to maintain part of the network structure in order to forward packets towards the destination node. When the routing is based on the position, nodes forward the packets with the aim of reaching the nodes within a geographical location. Thus, position based routing can eliminate the problem that appears in topology based protocols when routes become quickly unavailable in high mobility scenarios. In Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) ¹⁴⁾, for instance, intermediate nodes make a decision based on the destination position and neighbor positions. The Car-to-Car Communication Consortium (C2CC) also specified the C2CNet protocol, which was later enhanced by the GeoNet project to support IPv6. Within the ITS standardization domain, GeoNetworking ¹⁵⁾ is being completed by ETSI at the moment, integrating several geo-aware strategies to better route packets in vehicular networks.

On the other side, infrastructure-based protocols have been focused on the global connectivity of nodes to the Internet. Mobile IPv6 ¹⁶⁾ solved the mobility problem for mobile hosts and, later, Network Mobility Basic support (NEMO) ¹⁷⁾ provided a solution for the mobility of a whole network (e.g. a vehicle or bus), which has been recommended by the ISO TC204 WG16 to achieve Internet mobility for vehicles. NEMO maintains a bi-directional tunnel between the router in the vehicle, known as the *mobile router (MR)*, and a

server in the fixed infrastructure, known as the *home agent (HA)*, in order to provide a unchanged network prefix called *mobile network prefix (MNP)* to the in-vehicle network. All the in-vehicle nodes called *mobile network nodes (MNN)* maintain a permanent address derived from the MNP even when MR changes the point of attachment to the Internet during the movement (i.e. handover).

3 Experimental evaluation of VANET approaches in the literature

Because of equipment cost, logistic issues and, in general, the necessary effort, literature in experimental evaluation of vehicular network architectures is limited. However, these works are of key importance for the ITS community. Up to now, there are several works dealing with this issue, although most of them are still focused on studying the operation of WiFi, DSRC (Dedicated Short Range Communications) or IEEE 802.11p technologies in the vehicular field.

Communication between a vehicle and a static terminal is important for some ITS services. In ¹⁸⁾ a communication scenario considering a static terminal and a moving vehicle is studied in detail. Among all metrics considered in this work, the transmission power is the more original one, determining the maximum communication range. The type of data traffic used to test the performance of the communication channel is also of interest. Most VANET designs use

UDP packets, due to poor TCP performance over wireless channels^{19, 20}). The evaluations performed in²¹) with IEEE 802.11p reveal that the packet delivery ratio achieved by this technology is highly dependent on the distance between sender and receiver. These results are also confirmed in²²), where it is also concluded that the vehicle speed does not imply a noticeable performance degradation of the communication. A similar evaluation is performed in²³), but this time carrying out a great testing campaign in a city.

When V2V scenarios are considered, most of the previous works only consider two terminals in performance tests, what is not too representative when multi-hop schemes are evaluated. In²⁴), the applicability of 802.11b in V2V communications is evaluated over urban and highway scenarios, and it is demonstrated that a direct line of sight is one of the most important issues in the network performance. Two works evaluate a multi-hop VANET over real conditions, using three²⁵) and even six vehicles²⁶). These papers offer a wide study about a real VANET setup, and the last one includes an interesting analysis describing the impact of the number of hops on the final performance. Nonetheless, static routes are used in that work, presenting a non-realistic vehicular network. Our prior work²⁷), by contrast, considered a real and standardized ad-hoc routing protocol to dynamically modify communication paths. The hardware testbed presented is also suited for future ITS research, with a flexible in-vehicle and inter-vehicle IPv6 network based on mobile routers.

To the best of our knowledge, there exists a few works dealing with the evaluation of IPv6-based communications at network level in vehicular communications, and some of them are within our research line^{28, 29}). However, our prior evaluations are only focused on IPv6 network mobility. In this work, the operation of NEMO over a V2V protocol is evaluated, using an implementation of GeoNetworking. This way, an integrated V2V and V2I approach is considered for providing an integral vehicular connectivity using IETF and ETSI standardized protocols. The novelty of this

work is twofold, since not only this routing approach is experimentally analyzed, but also an evaluation tool especially designed for vehicular networks is used. As far as the authors know, no specific tools for assessing the performance of vehicular networks have been developed or used in previous research works.

4 VANET evaluation: issues and requirements

4.1 Issues

As said above, the experimental evaluations carried out in vehicular networks are mostly based on single-hop studies. In the case of multi-hop experiments, a static route configuration is often employed, but dynamic routing presents a more realistic view in vehicular communications.

Using multi-hop and dynamic routing strategies presents a challenge in the evaluation of vehicular networks. Common end-to-end evaluation tools such as *ping6* and *iperf* are useless to track the effect of route change, because they are unaware of the path taken during a communication test. An additional lack of these tools is the possibility to measure the performance of hop-by-hop links, since the study is carried out end-to-end. Also, geographical and external factors such as nodes position, distance between nodes or obstacles are not linked with network performance figures of merit. Therefore, the performance comparison of various dynamic routing protocols is essentially missing.

4.2 Requirements

With the aim of summarizing these main requirements when evaluating multi-hop vehicular networks, the next needs are found essential by the software tools used in experimental campaigns for evaluating both V2V and V2I:

- **Path detection**

The topology and communication path of a vehicular network changes frequently with dynamic routing as vehicles move. Thus, the tool should take note of the communication path used in every moment.

- **Communication performance in links**

The communication performance between ends is the sum of the links on the way between them. Once the communication path is tracked, the tool should measure the performance link by link as well as end-to-end.

- **Geographical awareness**

The network performance in a link depends on various geographical factors. For example, the distance between the nodes affects the packet loss probability of the link; the movement speed and the direction are also important factors for the packet loss in the link; and the existence of obstacles between the nodes may screen the wireless radio propagation. Thus, the evaluation tool should take the above geographical factors into account.

- **Intuitive visualization**

It is important to visualize the geographical factors such as node movement (speed, direction), distance and signal obstacles in order to analyze which of them affect the network performance. For intuitive visualization, performance figures of merit and environmental information should be shown together in a synchronized way. Moreover, the spatio-temporal data series should be available in post process to play them at different speeds, stop when desired, or replayed freely as he or she wants.

- **Independence from network protocols**

As shown in Section 2, there are many network layer protocols in the literature for vehicular scenarios, both infrastructure-less and infrastructure based. The evaluation tool should be independent from the network protocols employed in the target vehicular network. This includes that the tool does not require changes to adapt to neither specific protocols nor special message or data transported.

- **Independent from devices**

Depending on the experiment, the configuration of the used devices may differ in both vehicle and infrastructure sides. The devices include the antenna, wireless chipset, CPU, memory, GPS and so on. The tools should not rely on any of the specific devices functionalities. Most favorably, the same software and settings for an experimental test should work on multiple devices.

- **Adaptation to various scenarios**

There are a number of possible networking scenarios in vehicular communications, such as using parked vehicles, slow speeds with surrounding buildings in a urban situation, vehicles moving at higher speeds in a highway, overtaking, vehicles crossing in a two-way road, different topological locations of the ends in a V2I setting, etc. The software evaluation tool should accommodate to all of these scenarios.

- **Easiness for data collection**

In order to compare the network performance obtained when using different network protocols, a lot of experiments could be needed. This may require installing data collector software on many devices, depending on the scenario. Thus, the easiness of the installation of these software modules is very important. Of course, the most favorable case is to employ common software in all of them, such as *tcpdump* or *cat*.

- **Flexible experimental data format**

The experimental data should be stored in a well-organized way. Therefore, the data format needs to be flexible for future extension. For example, the user of the system could require adding new attributes to the data format of evaluation results. We must consider flexible data formats in order not to impact the process of adding new attributes.

5 Evaluation methodology

As it is later described, the evaluation tool presented in this work (AnaVANET) copes with the previous requirements, but first it is important to identify a generic testing methodology that allow a researcher to success in a testing campaign with a vehicular network.

In general, the evaluation goals in computer networks are to analyze which *testing conditions* affect which *data flows or network protocols*. For achieving this end it is necessary to design a proper evaluation methodology. Within it, we should consider the tendency of results by repeating tests with the same settings or varying parameters under study, such as the network protocol, the mobility of nodes or the data volume. A proper evaluation tool, such as the later presented AnaVANET, should support the overall analysis. This section considers both the testing conditions and the possible routing protocols to consider in vehicular networks, as it is summarized in Figure 3, by introducing the concept and presenting our real use case for testing the performance of NEMO over IPv6 GeoNetworking.

5.1 Testing conditions

- **Testbed platform**

The testbed used for the evaluation of network architecture should be carefully chosen to implement most relevant nodes in real software and hardware. In vehicular communications, this is extremely important, since a good deployment could be needed in case of testing V2V multi-hop networks.

In our particular case, the testbed comprises a set of four vehicles and two roadside stations, as illustrated in Figure 4. Each vehicle is equipped with a mobile router (MR), with at least two interfaces: an Ethernet link to connect mobile network nodes (MNNs) within the in-vehicle network, and a wireless adapter in ad-hoc mode used for both V2V and V2I communications. On the roadside, access routers (ARs) are fixed on the top of a building or any other elevated point near the road. Each one provides two interfaces: an Ethernet link for

a wired Internet access, and a wireless adapter in ad-hoc mode to connect with vehicles in the surroundings. At a backend point on the Internet, a home agent (HA) is installed to support Internet mobility of MRs by using NEMO.

Among the various testbed conditions, the hardware specifications (CPU, memory, etc), antenna and wireless settings are important factors for the evaluation, since they will highly affect the results. In our case, MRs are Alix3d3 embedded boxes provided with a Linux 2.6.29.6 kernel. Each MR has a mini-pci wireless card Atheros AR5414 802.11 a/b/g Rev 0, and an antenna 2.4GHz 9dBi indoor OMNI RP-SMA6 is used. The frequency used has been 2.422Ghz and the data rate has been fixed to 6 Mbits/s.

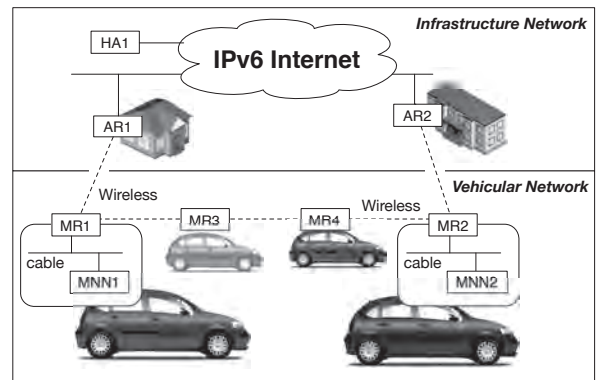


Fig. 4. Reference network configuration.

- **Testing scenarios**

Fixing the evaluation scenarios beforehand is essential in the planning of a testing campaign. In general, the main factors that determine the possible scenarios are:

Mobility Vehicle mobility is a key issue to cope with realistic vehicular network conditions. This way, we can consider not only static scenarios, to test the network operation in a controlled way, but also dynamic scenarios under common speed situations. Of course, field operational tests should be conducted

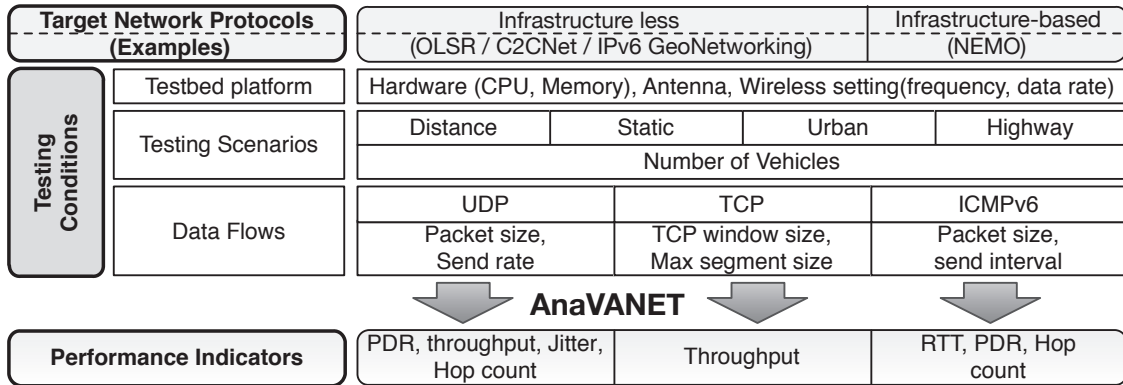


Fig. 3. Evaluation methodology.

to confirm the expected results, taking into account the proper handling of mobility, i.e. Doppler shifting, fast fading, etc.

Location Urban and interurban environments affect communication performance in a different way, because the signal propagation can be interfered by buildings (among other elements), and the line of sight between vehicles is not always possible. Two environments are considered in our tests: a semi-urban one located at INRIA-Rocquencourt, which contains a set of small buildings surrounded by streets, and a highway stretch, the A-12 one, near INRIA-Rocquencourt.

Number of vehicles The number of hops between the source and the destination vehicles affect the communication delay and the higher probability of packet losses, due to route changes or MAC transmission issues. Up to four conventional vehicles (Citroën C3) are considered in our case. This testing fleet is showed in Figure 5.

A set of possible testing scenarios when evaluating multi-hop vehicular networks is summarized in Figure 6. These have been divided into urban and highway. Mobility has been set to static, urban-like speed and high speed. In our particular evaluation, these scenarios have been consid-



Fig. 5. Testing vehicles.

ered with our fleet of vehicles, with the aim of covering a wide range of communication conditions. The obstacles have been in our case a set of building blocks located at the Paris - Rocquencourt premises. The chosen highway has been the French A13, near Versailles.

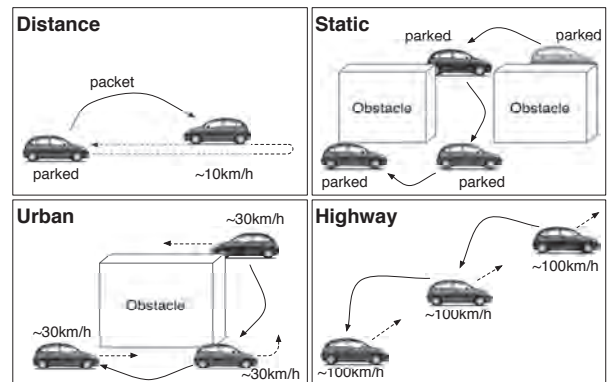


Fig. 6. Proposal of movement scenarios.

5.2 Data flows and performance indicators

A number of protocols and data flows can be set for evaluations, however, only the most representative and more used in the literature should be considered to study concrete performance indicators. For instance, in our case UDP, TCP and ICMPv6 are used to measure the network performance between two communication end-nodes (MNN to MNN) mounted within two vehicles:

UDP is a connection-less unidirectional transmission flow. The traffic is generated by *iperf* in our case. It is considered that with UDP the performance indicators under consideration can be the packet delivery ratio, throughput and jitter.

TCP is a connection-oriented bidirectional transmission flow. This traffic is also generated by *iperf* in our case. The performance indicator under consideration here has been the maximum throughput.

ICMPv6 is a bi-directional transmission flow. The traffic is generated by *ping6* in our case. The performance indicator under consideration can be the road trip delay time and packet deliveries.

The set of performance indicators most used in the literature are detailed next:

Round-Trip Time (RTT) can be measured using ICMPv6, as in our case. A host on the source vehicle, or located at an infrastructure point, sends ICMPv6 echo request to a host on the destination vehicle, or located at an infrastructure point. The destination host replies with an ICMPv6 echo reply. The period between the time that the request is sent and the time that the reply is received can be obtained by using *ping6*.

Throughput can be measured using UDP or TCP. It can be measured with a traffic generator tool, such as the *iperf* tool in our case. In UDP, *iperf* is executed in both the sender and the receiver nodes. The UDP packet transmission rate is set with a fixed rate and the sender is not able to

see the result because the communication is unidirectional from the sender to the receiver. The throughput is shown on the receiver side. On the other hand, when using a TCP transmission, the sending rate is automatically adjusted with the TCP congestion control mechanism. The sending rate is adjusted depending on the acknowledgement messages received. The throughput appears in both the sender and receiver nodes.

Jitter is a measure of the variability over time of the packet latency across a network. A network with a constant latency has a null jitter. In general, the jitter is expressed as an average of the deviation from the network mean latency, and can be calculated using the RTT, as in our case.

Packet Delivery Ratio (PDR) is the percentage of packets received by the target node as compared with the number of packets sent by the source. *iperf*, for instance, shows this value at the receiver side when using TCP in an end-to-end manner, but AnaVANET is also able to calculate the PDR on each hop between the sender and destination nodes.

6 System design and implementation of AnaVANET

6.1 Overview of the software

AnaVANET (initially standing for Analyzer of VANET) is an evaluation tool implemented in Java to assess the performance of vehicular networks. It takes as input the logs generated by the *iperf*, *tcpdump* and/or *ping6*, together with navigation information in NMEA format, to compute the next performance metrics: network throughput, delay, jitter, hop count and list of intermediate nodes in the communication path, PDR end-to-end and hop-by-hop, speed, and instantaneous position.

In this part of the work AnaVANET is put in the context of the evaluation scenario described in the previous section in Figure 7, showing also the main inputs and outputs of the tool. The sender MNN (left

most vehicle) is in charge of generating data traffic, and both the sender and the receiver (right most vehicle) MNNs record a high level log, according to the application used to generate network traffic (*iperf* and *ping6* for the moment). All MRs record information about forwarded data packets by means of the *tcpdump* tool, and log the vehicle position continuously. All this data is post-processed by the AnaVANET core software and then analyzed. The tool traces all the data packets transmitted from the sender node to detect packet losses and calculate statistics for each link and end-to-end, and then merge all these per-hop information with transport level statistics of the traffic generator. As a result, AnaVANET outputs a JSON file with statistics on a one-second basis (see Section 6.2 for details), and a packet trace file with the path followed by each data packet.

Once generated, performance metrics can be graphically showed through plots generated by *gnuplot* and a website where all tests are available. The screenshot of the website is shown on the left bottom corner of Figure 7 (which is also enlarged in the previous Figure 1). Accessing the website one can replay the tests on a map to see momentary figures of merit. Previous experiments can be chosen to monitor the main performance metrics at any time of the tests. Users can play and stop at any arbitrary point of the test with the control buttons on the upper left part of the window. The player speed, one step forward and one step backward are also implemented. On the map, the position and movement of the vehicle are depicted with the speed of each vehicle and the distance between them. The transferred data size, bandwidth, packet loss rate, RTT and jitter, for each link and end-to-end are displayed. The network performance is visualized by the width of links and the colors used to draw them.

6.2 Data format of experimental results

In this part, we describe the problems of the former AnaVANET data format ³⁰, which was based on XML, and we detail the recent changes to improve the flexibility of the results using the JSON format ³¹.

There is a fundamental trade-off between flat data

format and structured data format. Flat data format is more flexible than structured one, because if developers want to add a new attribute, they just put the attribute next to the other attributes. On the other hand, in a structured format, developers have to consider the layers and relationships to add a new attribute and they sometimes cannot add the new attribute because of its structure. However, when a flat data format is used, developers have to revise and adjust their applications, since the relationships among attributes can vary. In this line, a normalized way of calling the attributes is also important. If there is no rule of normalization, developers have to handle differences of an attribute name (e.g., temperature, Temperature, temp).

AnaVANET was initially developed to analyze the real operation of VANETs. The initial data format used as output of an evaluation had some problems regarding its flat format and the dynamic columns available per each data record. Hence it took several hours to check the results after carrying out new experiments. To solve these problems, we have designed a structured and normalized format, considering the features of vehicular networks. Our format is extensible and independent from concrete experimental environments and visualization tools. We have also adapted the initial visualization tool with an internal converter module within the web application, and an additional command line tool has been implemented to process the output logs of AnaVANET in a text-based basis. The new data format and tools enable us to check the results in several seconds after carrying out experiments, considering that users could require a fast evaluation to continue with new experiments.

The new structured and normalized data format of AnaVANET considers three layers, as it is shown in Figure 8. AnaVANET summarizes data on each time slot following the next scheme. The top layer is the “experiment” layer. This layer mainly manages static attributes (e.g. ID of experiment or the name of experiment). The second layer is the “data” layer. This layer manages results of an experiment on each time slot. This layer has time, total packet delivery ratio

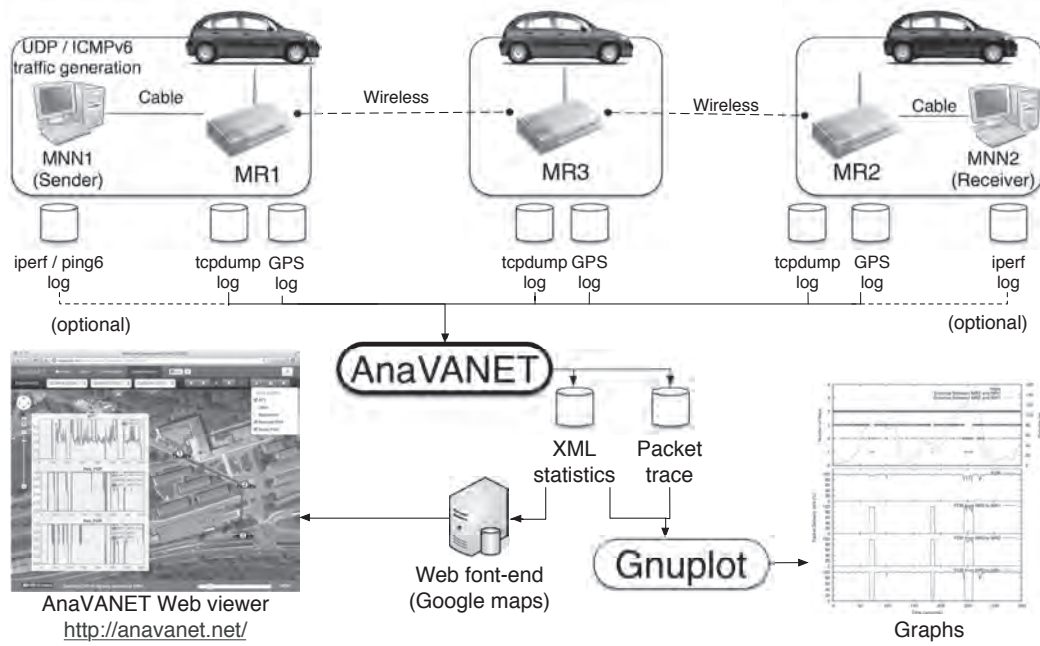


Fig. 7. Overview of AnaVANET.

(PDR), total RTT and other attributes. The third layer is comprised by the “node” and “link” parts. The node part manages each node’s statuses, whereas the link part manages each link’s statuses. Link means a relationship between two nodes and especially represents wireless link statuses. An experiment has a series of data and each data has several nodes and links. We have also normalized the names of the attributes considered in each layer.

This data format based on time-series for saving node and link information is an abstracted representation that can be used to collect results from any kind of network. Moreover, by using this three-layer representation, the system can be easily adapted to future requirements.

7 Evaluation of NEMO over IPv6 GeoNetworking

Early versions of AnaVANET were designed for evaluating infrastructure less network protocols, as used in our previous works for analyzing OLSR in vehicular environments³²⁾ and later tests of IPv6 over C2CNet³³⁾ in the FP7 GeoNet project. The current version of AnaVANET can also analyze infrastructure-based net-

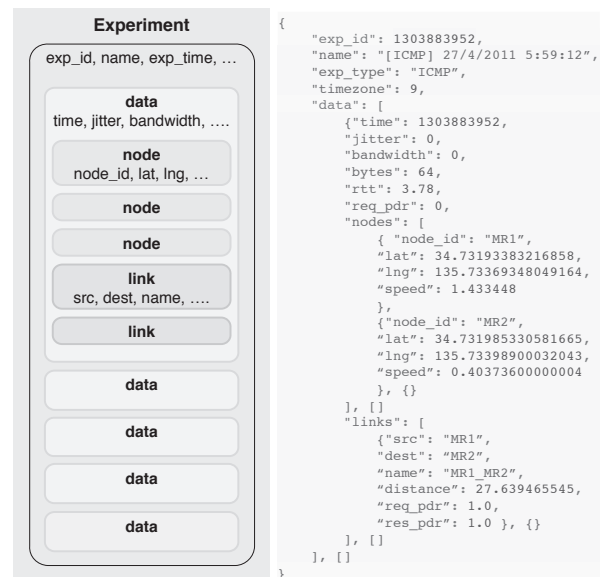


Fig. 8. Three-layer model of the structured data format used by AnaVANET.

work protocols such as NEMO.

In this section, we report a summary of the results collected in the evaluation of NEMO over IPv6 GeoNetworking when a vehicle connects with a node located in the Internet using two roadside units as access routers. The *umip.org*** implementation of NEMO is used, whereas the *cargeo6.org**** software is used for IPv6 GeoNetworking. ICMPv6 and UDP evaluations in handover scenarios were performed at INRIA Paris-Rocquencourt campus with the two ARs previously presented in the testbed description. The speed of the vehicle was limited to less than 15 km/h, like in a low speed urban scenario.

The reader can directly click in from Figure 9 to Figure 12 to see the correspondent results in the ANAVANET web viewer, to further perceive the details of the gathered results.

7.1 ICMP evaluation in a handover scenario

ICMPv6 echo requests (64 bytes) are sent from the MNN to a common computer located in the wired network twice a second, which replies with ICMPv6 echo replies. The results collected in the ICMPv6 tests are plotted in Figure 9. The lower part shows the itinerary of the vehicle and the locations of AR1 and AR2 on the map, whereas the upper part shows the RTT, the packet loss and the result of the mobility signaling. The X-axis and the Y-axis of the upper part are the latitude/longitude of the vehicle, corresponding to the road stretch indicated in the lower part of the figure. When either the request or the reply is lost, the RTT is marked with a zero value and, at the same time, a packet loss is indicated. A binding registration success is plotted when the NEMO binding update (BU) and the corresponding binding acknowledgment (BA) are successfully processed. On the contrary, if either of them is lost, a binding registration fail is plotted at the position.

Figure 10 shows the same result of the test, but referred to the test time. The upper graph shows the RTT and the distance to the two ARs; the middle one

shows the PDR obtained with the two ARs; and, finally, the lower plot shows the status of the NEMO signaling. A NEMO success means that the binding registration has been successfully performed, and a fail indicates that either the BU or the BA has been lost.

As can be seen in Figure 9 and Figure 10, the RTT is stable at the beginning of the test near AR2, with a value of around five milliseconds. AR2 is installed at about 100 meters away the road. It sends constant BU messages and, consequently, the MR successfully performs the binding registration every twelve seconds, without any packet loss. Soon, after the vehicle turns the first corner (north west of the square), packets start to be dropped until the second corner. This is because a near building screens the wireless radio. The binding signaling is dropped as well in the period. Then it recovers when the vehicle comes to the straight road on the south. The mobility signaling is successfully sent again with a regular interval.

The lower straight road of the stretch is less stable than the one on the north, because of two reasons. First, the location of the south straight road is 250 meters further to AR2 than the one on the north. Thus the signal strength is weaker now. Second, the trees at this location interfere the wireless radio, especially at the end of this part of the circuit, as can be seen with the three consecutive binding registration fails. When the MR fails to receive a valid matching response within the selected initial retransmission interval, the MR should retransmit the message until a response is received. The retransmission by the MR must use an exponential back-off in which the timeout period is doubled upon each retransmission, until either the MR receives a response or the timeout period reaches the value of maximum timeout period as specified in ¹⁶). In our particular case the mobility daemon tries to deliver the BU one second after the first failure of the binding. Then, when it fails, it increases the retransmission time in two, four, eight seconds, and so on.

The performance in the final part of the testing circuit is more stable, and no binding messages are lost. In this period the vehicle approaches AR2 and then

** <http://umip.org>

*** <http://www.cargo6.org>

leaves it turning right at the end of the test.

The MR starts receiving router advertisement (RA) messages from AR1 when the distance to AR1 is 50 meters, however, the RA messages from AR2 also reaches the zone. As the result, the vehicle triggers the movement detection, and sends the mobility signaling via the AR where it receives the RA. When the MR associates with AR2 some ICMP packets and mobility signaling messages are lost because of the distance and a near building. When the MR later switches to AR1, the packets are more stably transmitted.

7.2 UDP evaluation in a handover scenario

The results collected in the UDP tests are plotted in Figure 11. UDP packets are sent from the MNN to the wired node at a rate of 1 Mbps and a length of 1250 bytes. The lower part of the figure shows the itinerary of the vehicle, and the upper part corresponds to the PDR obtained with the ARs and the binding registration results, as in the previous case. The road stretch is the same one used above, but the vehicle moves on the contrary direction in this case.

Figure 12 shows the time-mapped results of the same UDP test. The upper graph shows the UDP throughput from the MNN to the wired node, the middle part shows the PDR to the two ARs, and the lower plot includes the status of the NEMO signaling.

The throughput of the UDP traffic is below 30% of the sending rate of 1Mbps (*i.e.* 300Kbps), however the PDR with the two ARs reaches 100%. This is because the throughput is measured between end nodes (MNN and a node in the Internet) by *iperf* and the PDR in the wireless links are calculated hop-by-hop by AnaVANET. In this case, it shows that more than 70% of the UDP packets are dropped outside the wireless links. In fact, the CarGeo6 software experimented a bottleneck in the processing of so many UDP packets at that time. This also explains the phenomenon where the binding registration messages are lost while none of the UDP packets are lost (this can be seen in the straight road in the south part of the circuit). In this case, the BUs are lost in the CarGeo6 software and are not transmitted from the wireless interface. We

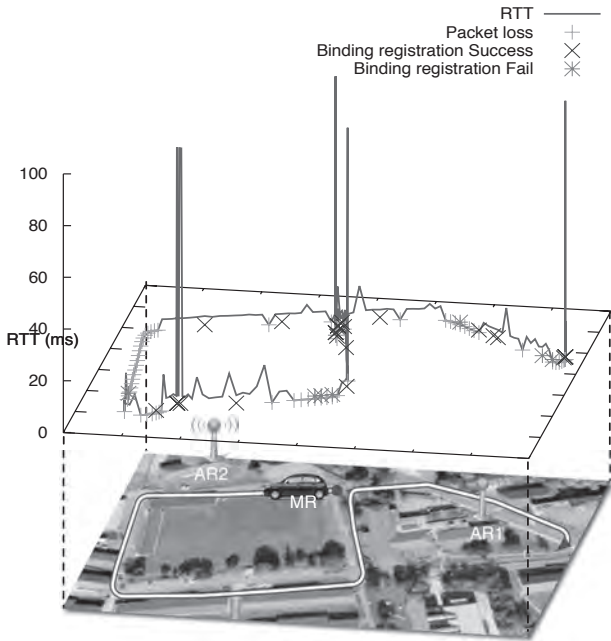


Fig. 9. Map-based RTT, packet losses and mobility signaling in an ICMP evaluation under a handover scenario.

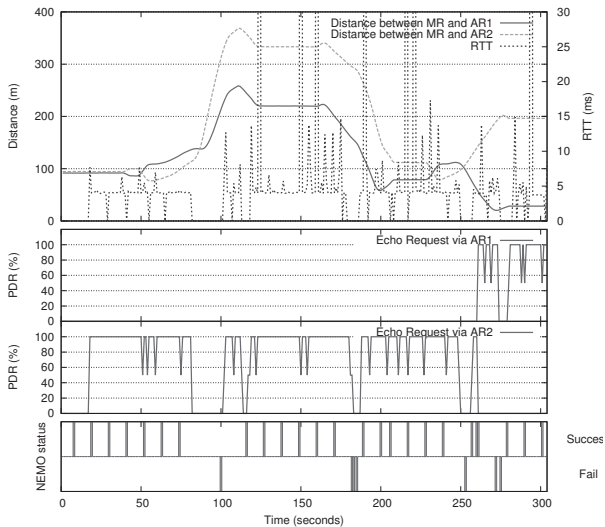


Fig. 10. RTT, packet losses and mobility signaling in an ICMP evaluation under a handover scenario.

can detect where a packet is lost, especially the loss in a wireless link, thanks to the AnaVANET system (although the cause of the packet losses was not in the wireless links in the present case). This is because AnaVANET is capable of measuring both the hop-by-hop network performance and the end-to-end one.

As can be seen in Figure 11, AR2 is available most of the test period (especially, around the square) except for the end of the test. When the vehicle moves in the first straight road in the east, the PDR to AR2 is almost 100%. During this period, no binding message is dropped. The BUs are sent regularly at intervals of twelve seconds.

The packets start being dropped on the west of the square because the building on the north west corner of the square blocks the wireless radio. When the beacons exchanged between GeoNetworking nodes twice in a second are dropped, the correspondent entry of the location table expires in five seconds.

As can be seen in Figure 12, after the southwest corner, the end-to-end throughput drops to zero and the binding registration fails, while the hop-by-hop PDR to AR2 is still almost 100%. This shows that the mobility signaling packets are lost in CarGeo6 as explained earlier. Since the binding life time is configured as 24 seconds, the binding entry in the HA expires 24 seconds after the last successful binding registration. After the expiration of the binding, HA discards all the packet from the MR. During the period, the MR try to send the BUs in exponentially increased interval from 1 second to 32 seconds (1, 2, 4, 8, 16 and 32 seconds).

Then, at time 139 seconds, when the vehicle is 20 meters away from AR1, the first binding registration through AR1 succeeds. UDP packets are switched to AR1 from this moment. Then at time 155 seconds, the binding registration is successfully performed via AR2 again. During the handover from AR1 to AR2, from time 155 seconds to time 158 seconds, three seconds of disconnection are present in the iperf log. At time 166 seconds, the path to the Internet is switched to AR1 again. In this handover, UDP packets are lost during four seconds from time 166 seconds.

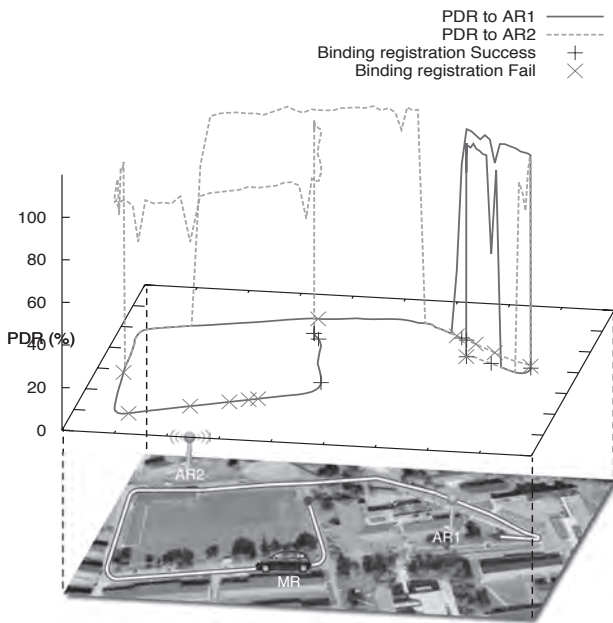


Fig. 11. Map-based PDR of UDP evaluation using NEMO over IPv6 GeoNetworking.

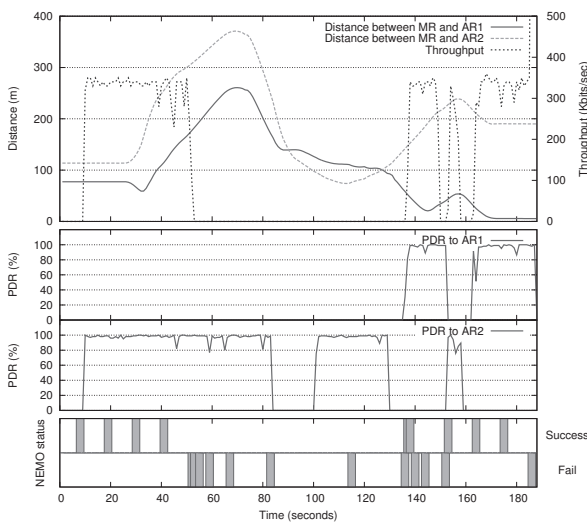


Fig. 12. PDR of UDP evaluation using NEMO over IPv6 GeoNetworking.

8 Qualitative evaluation of the system

As a result of the experience working with the recent version of AnaVANET, including the results presented above, we have revisited the requirements for an efficient testing environment in vehicular networks detailed in Section 4, with the aim of evaluating the advantages of the system. Table 1 summarizes the most important features, which demonstrate that AnaVANET fulfills the most important requirements and it is an efficient evaluation tool.

9 Conclusions and future work

The paper has presented the peculiarities of evaluating vehicular networks experimentally, through presenting the most used protocols and detailing the needs of the software tools to be used for this task. After that, the importance of the testing methodology is described, and a reference design of a vehicular network evaluation is used to exemplify it. The testbed design and implementation, testing scenarios, routing protocols and data flows, are found essential to be fixed beforehand to avoid improvisation during the testing campaign. The AnaVANET platform is then presented as an efficient evaluation software to process the data gathered by common testing tools, and then generate lots of performance indicators of the trials. All of these performance parameters are put in the spatio-temporal context, through the collection and correlation of GPS information, and most important figures of merit can be exported in the form of graphics or showed interactively in a web front-end.

The capabilities of AnaVANET are exploited in a novel evaluation of NEMO over IPv6 GeoNetworking, using the tool to gather RTT, PDR and channel throughput information. The results reveal that mobile IPv6 connectivity can be maintained in a V2I case using GeoNetworking over WiFi to pass NEMO IPv6 traffic between vehicles and infrastructure.

Our future work includes, first, a link layer extension of the system to analyze the channel quality (RSSI) and load ratio. This data will allow the development of

Requirement	Proposal
Path detection	AnaVANET can track the nodes of the communication path for each transmission
Communication performance in links	The system can measure the PDR of each link as well as the end-to-end PDR
Geographical awareness	The system outputs the performance indicators in a geo-referenced way, which facilitates the analysis of results
Intuitive visualization	The movement of vehicles is showed using Google Maps in a Web application, together with the graphs of the desired performance metrics. It allows a step-by-step visual analysis of the results.
Independence from network protocols	The system adopts the MAC address for packet tracing. Therefore any kind of network layer protocol can be evaluated.
Independent from devices	The system does not require specific hardware.
Adaptation to various scenarios	The system can be used in a number of scenarios, including distance, static, urban and highway tests. Also it allows both V2V and V2I tests.
Easiness for data collection	The system does not require special software to gather experimental data. Packet dumps are taken with <i>tcpdump</i> , and GPS NMEA data is obtained directly from a serial interface, to finally generate results.
Flexible experimental data format	We have adopted a structured and normalized format defining a three-layer model in order to increase the flexibility for future extension.

Table 1. Qualitative evaluation of the system.

coverage maps for the communication nodes. Second, it is considered the support for multicast data flows, since it is essential for the dissemination of events in vehicular networks. Third, we plan to evaluate a real application developed for cooperative ITS.

References

- 1) Action plan for the deployment of Intelligent Transport Systems in Europe, December 2008. COM(2008) 886 final.
- 2) Standardisation mandate addressed to CEN, CENELEC and ETSI in the field of information and communication technologies to support the interoperability of co-operative systems for intelligent transport in the european community, October 2009.
- 3) ISO 21217:2010 Intelligent transport systems – Communications access for land mobiles (CALM) – Architecture, April 2010.
- 4) Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture, September 2010. ETSI EN 302 665 V1.1.1 (2010-09).
- 5) C. Tschudin, H. Lundgren, and E. Nordstrom. Embedding MANETs in the real world. *Lecture notes in computer science*, 2775(1):578–589, September 2003.
- 6) T. Ernst, M. Goleva, I. Ben Jemaa, A. Kovacs, H. Menouar, C. Noguchi, S. Schulze, M. Tsukada, P. Zhang, and W. Zhang. GeoNet STREP No.216269 Deliverable 7.1 GeoNet Experimentation Results. 2010. GeoNet-D7.1-ExperimentationResults-v1.0.
- 7) J. Santa, A. Kovacs, A. Varadi, A.F. Skarmeta, P.J. Fernandez, F. Bernal, M. Tsukada, B. Cama, F. Pereniguez, R. Marin, C. Schulze, A. Fitzner, O. Shagdar, and Y. Bouchaala. ITSSv6 STREP Grant Agreement 210519 Deliverable 4.2 Final Validation & Evaluation Results. March 2014. ITSSv6-D4.2-FinalValidation&EvaluationResults-v1.1.
- 8) IETF: Mobile Ad-hoc Networks (MANET) Working Group, 1997. <http://datatracker.ietf.org/wg/manet/charter/>.
- 9) C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. RFC 3561 (Experimental), July 2003.
- 10) D. Johnson, Y. Hu, and D. Maltz. The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4. RFC 4728 (Experimental), February 2007.
- 11) T. Clausen and P. Jacquet. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626 (Experimental), October 2003.
- 12) R. Ogier, F. Templin, and M. Lewis. Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF). RFC 3684 (Experimental), February 2004.
- 13) Zygmunt J. Haas, Marc R. Pearlman, and Prince Samar. *The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks*, July 2002. IETF work in progress, draft-ietf-manet-zone-zrp-04.
- 14) Brad Karp and H. T. Kung. Gpsr: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom 2000, August 6.-11., 2000, Boston, Massachusetts, USA*, pages 243–254. ACM / IEEE, August 2000.
- 15) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Part 4: Geographical Addressing and Forwarding for Point-to-Point and Point-to-Multipoint Communications; Sub-part 1: Media-Independent Functionality, June 2011. ETSI TS 102 636-4-1 V1.1.1 (2011-06).
- 16) C. Perkins, D. Johnson, and J. Arkko. Mobility Support in IPv6. RFC 6275 (Proposed Standard), July 2011.
- 17) V. Devarapalli, R. Wakikawa, A. Petrescu, and P. Thubert. Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol. RFC 3963 (Proposed Standard), January 2005.
- 18) C. Wewetzer, M. Caliskan, K. Meier, and A. Luebke. Experimental evaluation of umts and wireless lan for inter-vehicle communication. In *Proc. 7th International Conference on ITS Telecommunications ITST '07*, pages 1–6, 6–8 June 2007.
- 19) F. Hui and P. Mohapatra. Experimental characterization of multi-hop communications in vehicular ad hoc network. In *ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 85–86, Cologne, Germany, September 2005.
- 20) A. Festag, H. Fußler, H. Hartenstein, A. Sarma, and R. Schmitz. FLEETNET: BRINGING CAR-TO-CAR COMMUNICATION INTO THE REAL WORLD. *Computer*, 4(L15):16, 2004.
- 21) Oyunchimeg Shagdar, Manabu Tsukada, Masatoshi Kakiuchi, Thouraya Toukabri, and Thierry Ernst. Experimentation Towards IPv6 over IEEE 802.11p with ITS Station Architecture. In *International Workshop on IPv6-based Vehicular Networks (colocated with IEEE Intelligent Vehicles Symposium)*, Alcalá de Henares, Spain, June 2012.
- 22) Jia-Chin Lin, Chi-Sheng Lin, Chih-Neng Liang, and Bo-Chiuan Chen. Wireless communication performance based on IEEE 802.11p R2V field trials. *IEEE Communications Magazine*, 50(5):184–191, may 2012.
- 23) J. Gozalvez, M. Sepulcre, and R. Bauza. IEEE

- 802.11p vehicle to infrastructure communications in urban environments. *IEEE Communications Magazine*, 50(5):176–183, may 2012.
- 24) Víctor González, Alberto Los Santos, Carolina Pinart, and Francisco Milagro. Experimental demonstration of the viability of ieee 802.11b based inter-vehicle communications. In *TridentCom 2008*, pages 1–7, ICST, Brussels, Belgium, Belgium, 2008. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- 25) M. Jerbi, S. M. Senouci, and M. Al Haj. Extensive experimental characterization of communications in vehicular ad hoc networks within different environments. In *Proc. VTC2007-Spring Vehicular Technology Conference IEEE 65th*, pages 2590–2594, 2007.
- 26) M. Jerbi and S. M. Senouci. Characterizing multi-hop communication in vehicular networks. In *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference WCNC 2008*, pages 3309–3313, 2008.
- 27) Manabu Tsukada, José Santa, Olivier Mehani, Yacine Khaled, and Thierry Ernst. Design and Experimental Evaluation of a Vehicular Network Based on NEMO and MANET. In *The special issue for Vehicular Ad Hoc Networks, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010.
- 28) Jose Santa, PedroJ. Fernandez, Fernando Pereniguez, Fernando Bernal, Antonio Moragon, and AntonioF. Skarmeta. Ipv6 communication stack for deploying cooperative vehicular services. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 12(2):48–60, 2014.
- 29) J. Santa, F. Pereniguez-Garcia, F. Bernal, P.J. Fernandez, R. Marin-Lopez, and A.F. Skarmeta. A framework for supporting network continuity in vehicular ipv6 communications. *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, 6(1):17–34, Spring 2014.
- 30) M. Tsukada, J. Santa, S. Matsuura, T. Ernst, and K. Fujikawa. Anavanet: an experiment and visualization tool for vehicular networks. In *9th International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities (TRIDENTCOM 2014)*, May 2014.
- 31) T. Bray. The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format. RFC 7159 (Proposed Standard), March 2014.
- 32) Jose Santa, Manabu Tsukada, Thierry Ernst, Olivier Mehani, and A. F. Gomez-Skarmeta. Assessment of vanet multi-hop routing over an experimental platform. *Int. J. Internet Protoc. Technol.*, 4(3):158–172, September 2009.
- 33) Manabu Tsukada, Ines Ben Jemaa, Hamid Menouar, Wenhui Zhang, Maria Goleva, and Thierry Ernst. Experimental evaluation for IPv6 over VANET geographic routing. In *IWCMC '10: Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pages 736–741, New York, NY, USA, 2010. ACM.

An Effective Geocast Distribution Method with Packet Multiplexing in VANET

Masanori Tada* and Kenya Sato**

(Received February 27, 2016)

In recent years, improving road safety is a subject of intense interest and research. Cooperative safety driving systems using vehicle to vehicle communication or VANET (Vehicular Ad-hoc Network) are being developed as a means of exchanging vehicle sensor information, road information, and other types of data. By growth of VANET systems that are enable to share information among vehicles, it can adapt to driving safety support at an area of low visibility. However, increase of number of relays for other vehicles data cause to communication unstably in high vehicle density. In this study, we performed reduction of number of relays by which each vehicle combines a number of packets of same destination area into one packet. In the evaluation by simulation, we confirmed that packet delivery rate increase compared with the exiting method in high vehicle density.

Key words : VANET, Geocast, Piggybacking

キーワード : 車車間通信, ジオキャスト, ピギーバック方式

車車間通信パケット多重化による効率的ジオキャスト配信手法

多田 正範, 佐藤 健哉

1 はじめに

近年, 道路交通における事故や渋滞, 環境問題など様々な課題解決を目的とした高度道路交通システム (ITS : Intelligent Transport Systems) の研究が活発化している。その中で, ドライバーのための安全運転支援システムを搭載した先進安全自動車 (ASV : Advanced Safety Vehicle) の開発・実用化が進められている。具体的には, 前方の障害物を検知して自動でブレーキ制御を行う衝突被害軽減ブレーキや, 前方との車間距離を一定に保つ機能を備えた ACC (Adaptive Cruise Control) などの技術が実用化されている。しかし, これらの技術はカメラやレーダーなどのセンサを用いて周辺環境状況を

把握するアプローチのため, 車両から見えない範囲ではセンサで検知することができない。そのため, 見通しの悪い交差点などで起こる出会い頭の衝突には対応できないという問題がある。この問題に対応するため, 無線通信技術を利用して周辺環境状況の把握を行う VANET (Vehicular Ad-hoc NETWORKS) の検討がなされている。VANET は無線通信機器を搭載した車両同士で車車間通信を行い, 自律的にネットワークを構成することでデータの送受信を行う通信方式であり, 他車両を経由することで電波の特性上通信が届かない車両に対してもデータの送受信が可能という特徴がある。これにより, 見通しの悪い交差点における安全運転支援にも対応することができる。また, 路側機といったインフラ設備を必要とし

* Graduate School of Computer and Information Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-7564, E-mail : g.securefalcon0724@gmail.com

** Mobility Research Center, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-6297, E-mail : ksato@mail.doshisha.ac.jp

ないため、そのような設備のない道路上でも利用可能であり、注目が集まっている。

VANET では車両が道路上を高速に移動するという特性から、車両間で車載情報（位置、速度など）を短い周期で定期的を送受信する必要がある。また、電波の届かない車両に対しても他車両を経由してデータを配信する必要がある。そのため、非効率なデータ中継処理がネットワークトラフィックを増加させ、車車間通信の安定性低下の原因となる。そこで、これらのトラフィック量の増加を抑えるべく効率的なデータ配信手法の提案が必要である。VANET では多くの配信手法が検討されているが¹⁾、データ配信の効率性からジオキャスト²⁾と呼ばれる配信手法が注目されている。ジオキャストは、宛先として特定の領域を指定することでその領域内に存在する全ての車両にデータを配信する手法であり、ネットワークトラフィックの削減に有効である。

本研究では、ジオキャストにおいて同じ領域宛のデータを一つの packets に統合し配信するピギーバック方式により packets を多重化することで、ネットワークトラフィックの削減と通信の安定性の向上を目指す。

2 関連研究

ジオキャストでは、ユニキャスト型とフラッディング型に大別される。ユニキャスト型は、情報源車両から宛先領域まで一本の経路で伝送していく方式であり、少ない送信回数で packets を伝送できるが、伝送途中で packet ロスし宛先まで packets が到達しない場合がある。代表的なプロトコルとして GF (Greedy Forwarding) や GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)³⁾ がある。一方、フラッディング型は情報源車両から宛先領域まで複数の経路で伝送していく方式であり、宛先領域まで packets が到達しやすいが、packet の送信回数が多いため車両密度の高い場所では安定した通信ができない。代表的なプロトコルとして LBM (Location Based Multicast)⁴⁾ や CBF (Contention Based Forwarding)⁵⁾ がある。

文献⁶⁾では、複数の宛先領域に向けて同じデータを配信する Geometry-driven Geocasting Protocol (GGP) を提案している。複数の宛先領域に向けてデータを配信する場合、一般的なジオキャストではデータを宛先領域の数だけ分割して配信するため、ネットワークトラ

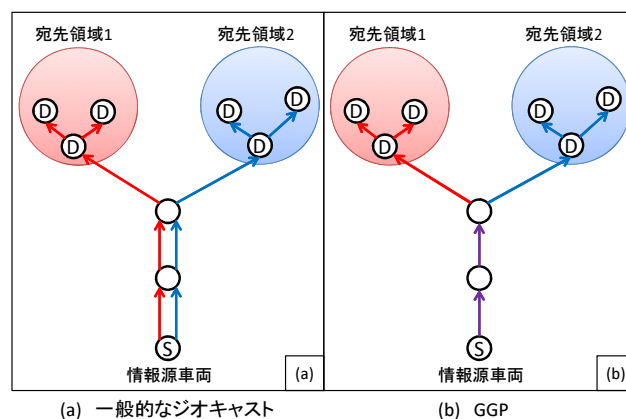


Fig. 1. Compare general Geocast with GGP.

フィックの増加が問題となる。GGP では、複数の宛先領域に配信する場合でも一つの packet で同時に配信するため、一般的なジオキャストと比べて配信効率が高くトラフィック量を削減することができる。図1では、2つの宛先領域に配信する場合における一般的なジオキャストと GGP との比較を示している。一般的なジオキャストでは、宛先領域数と同じ2回分 packets を送信しているのに対し GGP では1回のみ packets を送信しているため、図1では送信回数が合計2回削減されている。

既存のジオキャストでは、宛先領域内での中継処理の負荷が大きいことが問題点として挙げられる。ジオキャストでは、情報源車両からの packets が宛先領域内に存在する車両まで到達した時、その車両は同報通信を行う仕組みとなっている。その際、宛先領域内に存在するすべての車両が同報通信を行うため、宛先領域内に存在する車両台数が増加するほど同報通信を行う回数も増加してしまう。従って、渋滞などの車両密集時においてジオキャストを行うことは大幅なトラフィック量の増加を招く。

3 提案手法

3.1 概要

本研究では、既存のジオキャスト配信手法を改良し送信回数を減少させることでネットワークトラフィックの減少を図る。送信回数を減少させる方法として、ピギーバック方式による packets 多を重化することでジオキャスト配信手法を提案する。本稿で述べるピギーバック方式とは、複数の情報源車両のデータを一つの packets に結合することを示す。本提案では、中継候補となる packets を一時的に格納する中継バッファを用い、宛先領

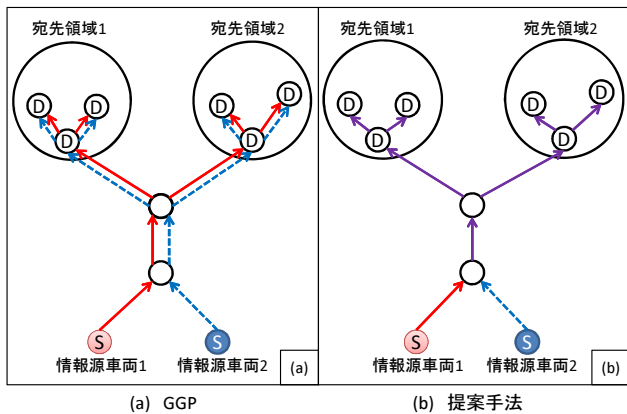


Fig. 2. Compare with exiting method.

域が同じパケットをピギーバック方式により多重化することでパケットの送信回数を抑制する。

提案手法では、同じ宛先領域に送信しようとする車両が複数存在する場合に有効である。図2では、既存手法であるGPPと提案手法の違いを示している。情報源車両1及び2が同じ宛先領域1及び2に向けてデータ配信する場合、GPPでは情報源車両の数だけパケットを中継するため、一台あたり2回の中継が必要となる。対して提案手法では、中継バッファを用いて情報源車両1及び2から届いたパケットを一つにまとめることで一台あたり一回の中継で済むようになる。

3.2 システム構成

各車両におけるシステムの構成を以下の図3に示す。システムは、安全運転アプリケーション、ネットワーク制御層、中継バッファ、車載情報管理テーブル、下位層から構成される。ネットワーク制御層では、3つの処理を行う。

1. 送信処理

自車両のパケットを配信する機能である。提案手法では、ネットワーク制御層によって定期的に配信するビーコンと、安全運転アプリケーションによって通信要求が行われた場合に配信するジオキャスト2種類の配信手法を状況に応じて使い分ける。ビーコン及びジオキャストにおけるヘッダの構成を図4に示す。ビーコンヘッダは共通ヘッダのみから構成され、ジオキャストヘッダは共通ヘッダに加えて拡張ヘッダ、情報源車両ヘッダ、宛先領域ヘッダから構成される。ジオキャストヘッダでは複数の宛先領域に向けてデータを配信できるのに加え、複数の情報源車両のデータを一つのパケットに乗せてデータを

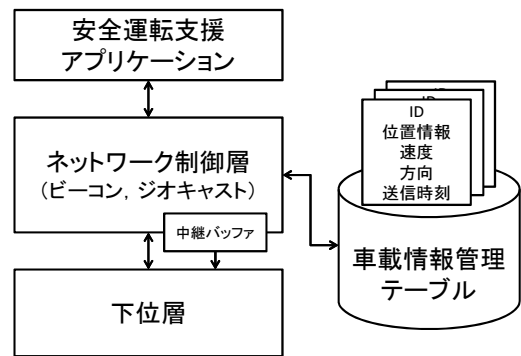


Fig. 3. System structure.

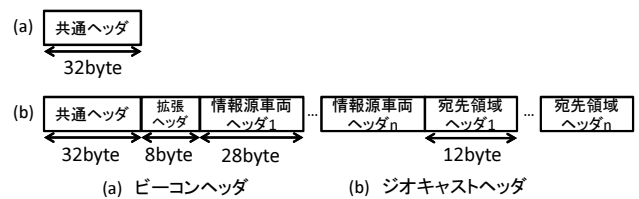


Fig. 4. Header structure.

配信することができる。

2. 受信処理

他車両から送信されたパケットを受信する機能である。受信パケットは下位層を経てネットワーク制御層へ伝送される。パケット受信時、ヘッダから車載情報(車両ID、位置情報、速度、方向、送信時刻)を取得し車載情報管理テーブルへ格納する。また、受信パケットを他車両へ中継する必要がある場合、そのパケットを中継バッファへ伝送する。

3. ピギーバック方式によるジオキャスト中継処理

他車両のパケットを中継車両として伝送する機能である。ピギーバック方式は、中継候補となる他車両のパケットを一時的に格納する中継バッファを用いて行われる。中継バッファはネットワーク制御層と下位層の間に位置し、ネットワーク制御層から送信されるすべての中継候補パケットはこの中継バッファを経由して下位層へ伝送される。詳細は3.3節に示す。

3.3 ピギーバック方式によるジオキャスト中継処理

ピギーバック方式のパケット多重化では、同じ宛先領域の持つ複数のパケット対象に一つのパケットに結合することで送信回数の削減を行う。これは、同じ宛先領域に向けたパケットがある場合は別々に送るのではなく、

一つにまとめて複数の情報源車両ヘッダを送信した方が効率が良いという考えである。本方式では中継の候補となるパケットを一時的に格納する中継バッファを用いる。これは、中継候補となるパケットをすぐに下位層へ伝送してしまうとパケットを結合することができないため、一時的に格納する中継バッファを設けることでパケットの結合を可能にしている。中継バッファでは、予め最大待機時間と最大結合数の2つのパラメータを設ける。最大待機時間は中継バッファにパケットを格納し待機できる最大時間を表し、最大結合数は一つのパケットに情報源車両ヘッダを結合できる最大数を表す。

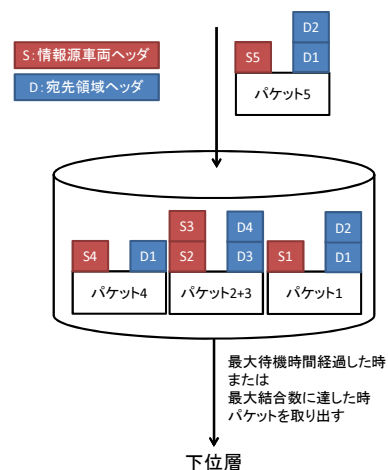


Fig. 5. Forwarding Buffer behavior.

ネットワーク制御層から中継候補のパケットが中継バッファへ届いた時、届いたパケットと中継バッファの中で同じ宛先領域を持つパケットが存在するか探索する。尚、複数の宛先領域を持つパケットの場合、すべての宛先領域が探索対象パケットと同じである必要がある。同じ宛先領域を持つパケットが見つかった場合、そのパケットと届いたパケットを一つのパケットに結合する。本提案のヘッダ構成では、拡張ヘッダの情報源車両数の値を変更することで動的に情報源車両ヘッダを追加することができるため、この仕組みを利用して複数の情報源車両ヘッダを一つのパケットに結合していく。また、結合する2つの共通ヘッダ、拡張ヘッダ、宛先領域ヘッダは一つにまとめることでヘッダサイズの削減を行う。同じ宛先領域を持つパケットが見つからなかった場合は、届いたパケットを中継バッファに格納する。そして、中継バッファに格納されたパケットは、格納されてから最大待機時間の時間分経過した場合もしくは最大結合数の数まで情報源車両ヘッダを結合した場合にバッファから取り出され、下位層へ伝送される。

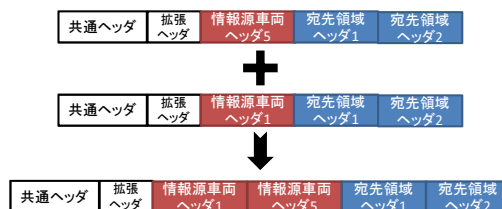


Fig. 6. Merge of packets.

4 評価

4.1 シミュレーション環境

本研究では、提案手法の性能評価にシミュレータとして Scenargie⁷⁾を用いる。本実験では平均遅延時間とパケット到達率を評価項目とし、中継バッファを考慮しない既存ジオキャスト配信手法と中継バッファを考慮する提案手法を比較することで提案手法の有効性を検証する。また、中継バッファにおける最大結合数を2~5に、最大待機時間を10ミリ秒、50ミリ秒、100ミリ秒に変化させることで性能の違いを確認する。尚、遅延時間は情報源車両がデータを配信してからそのデータを宛先領域内の車両が受信するまでの時間を示し、パケット到達率は、宛先領域内に存在する各車両の受信成功率を示す。

シミュレーション環境は、200mの道路から構成された見通しの悪い交差点とし、道路外には電波を遮断する障害物を設置する。各車両は、道路に沿って30km/h~70km/sの速度でランダムに走行するものとする。シミュレーション時間は100秒とし、車両台数が16台、32台、64台、128台の場合で実験を行う。

4.2 シミュレーション結果

評価モデルにおけるシミュレーション結果を図7~図14に示す。シミュレーション結果における横軸のパラメー

図5では中継バッファの動作手順を示している。図5では、バッファ内にパケット1~4のパケットが格納されている。パケット5が中継バッファへ伝送された時、中継バッファの中でパケット5と宛先領域が同じパケットを探索する。この場合、宛先領域が同じパケット1が見つかったためパケット5とパケット1を一つのパケットに結合する。パケットの結合は、図6に示すようにパケット1とパケット5の情報源車両ヘッダを追加する形となる。パケット1とパケット5の共通ヘッダ、拡張ヘッダ、宛先領域ヘッダは2つある必要がないため、一つにまとめることでそのヘッダ分サイズの削減ができる。

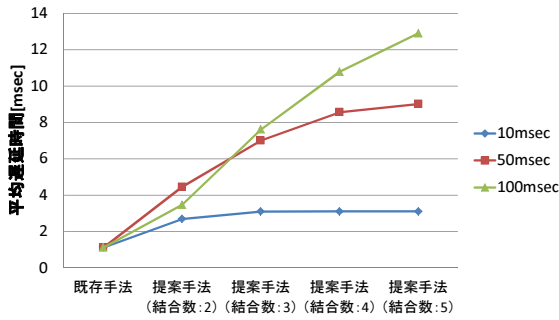


Fig. 7. Average delay time(number of vehicles:16 vehicles).

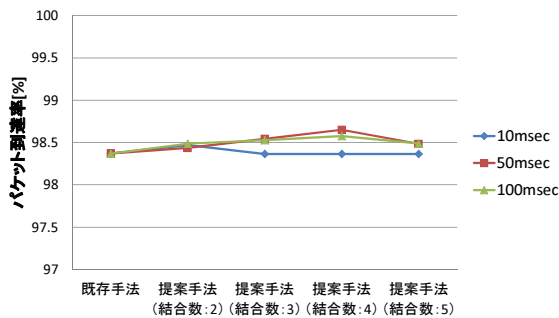


Fig. 8. Packet receive rate(number of vehicles:16 vehicles).

夕は、中継バッファにおける最大結合数を示す。折れ線グラフの 10msec, 50msec, 100msec は中継バッファにおける最大待機時間を示す。

4.3 平均遅延時間

まず、既存手法と提案手法との比較について考察する。車両台数が 16 台, 32 台, 64 台の場合に既存手法の方が提案手法よりも低遅延であることが確認できた。これは、既存手法では提案手法のように中継バッファによって一時的にパケットを格納する必要がないことが原因である。一方、車両台数が 128 台の場合に提案手法の方が既存手法よりも低遅延であることが確認できた。これは、提案手法の精度が向上したというよりはパケットの衝突によるものである。車車間通信では、アクセス方式として CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) を採用している。CSMA/CA では、パケットの衝突を検知した時にランダムな時間だけ待機してデータを送信する仕組みとなっている。128 台の場合に既存手法を用いるとパケットの衝突が発生しランダムな時間だけ待機した分遅延が発生した。提案手法では、ピギーバック方式によるパケット多重化によって既存手法よりもパケット送信回数が減少し、パケットの衝突を抑制することで CSMA/CA による待機時間を減少した。

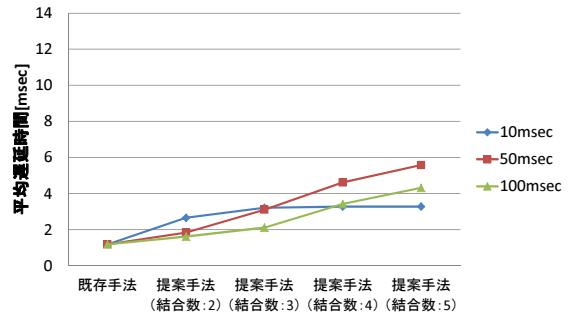


Fig. 9. Average delay time(number of vehicles:32 vehicles).

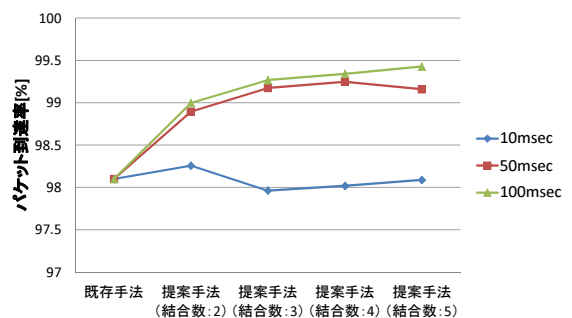


Fig. 10. Packet receive rate(number of vehicles:32 vehicles).

次に、中継バッファにおける最大結合数の変化について考察する。車両台数が 16 台, 32 台, 64 台の場合に最大結合数が増加するにつれ遅延時間が高くなることが確認できた。これは、最大結合数が増加するにつれ最大結合数に達するまでの待機時間が長くなってしまふことが原因である。一方、車両台数 128 台において最大結合数が増加するにつれ遅延時間が低くなることが確認できた。これは、最大結合数が増加するにつれパケット送信回数が減少していくため、上記で記述した CSMA/CA による待機時間が減少したことが原因である。

続いて、中継バッファにおける最大待機時間の変化について考察する。車両台数が 16 台の場合に最大待機時間が増加するにつれ遅延時間が高くなることが確認できた。16 台と車両台数が少ない場合では中継バッファへ挿入されるパケットが少なくなる傾向があり、最大待機時間が増加するにつれ最大結合数に達しないまま最大待機時間分バッファに待機してしまうため、遅延増加を招いた。しかしながら、車両台数 16 台の時遅延時間は最大 14 ミリ秒程度なので、100 ミリ秒間隔で送信している安全運転支援アプリケーションを想定しても許容できる範囲である。一方、車両台数が 32 台, 64 台, 128 台の場合に最大待機時間が増加するにつれ遅延時間が低

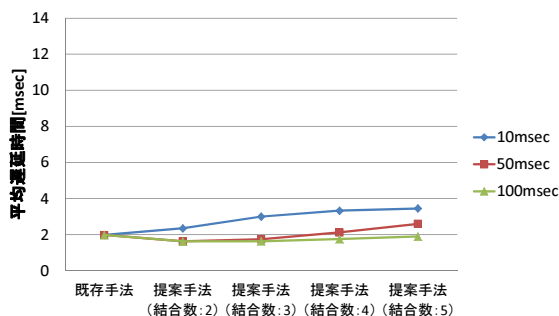


Fig. 11. Average delay time(number of vehicles:64 vehicles).

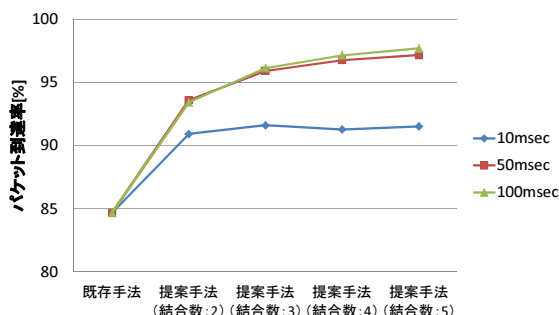


Fig. 12. Packet receive rate(number of vehicles:64 vehicles).

くなる事が確認できた。車両台数が多い場合には中継バッファへ挿入されるパケットが多くなる傾向があり、最大待機時間が増加するにつれ結合する確率が増加し最大結合数に達する回数が増加する。そして、最大結合数に達する回数が増加することで、最大待機時間まで待機せずに短い待機時間でパケットが取り出される回数が増加し、低遅延となった。

4.4 パケット到達率

まず、既存手法と提案手法との比較について考察する。車両台数が16台、32台で最大待機時間が10ミリ秒である場合に提案手法は既存手法よりも低いパケット到達率である事が確認できた。これは、最大待機時間が短いためにパケットが結合されないままバッファから取り出され、既存手法よりも遅延が増加したにもかかわらずパケット送信回数も削減されていないことが原因である。一方、それ以外の場合では提案手法の方が既存手法よりも高いパケット到達率である事が確認できた。これは、ピギーバック方式のパケット多重化によってパケット送信回数が減少し、既存手法よりもVANETの通信帯域に余裕ができたことでパケットが到達しやすくなったことが原因である。また、車両台数が大きくなるにつれパケット到達率の向上が確認できた。中でも、既存手法と

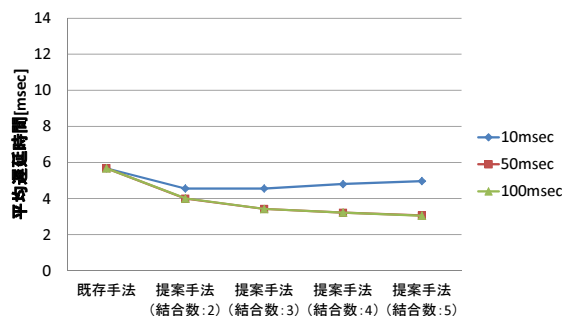


Fig. 13. Average delay time(number of vehicles:128 vehicles).

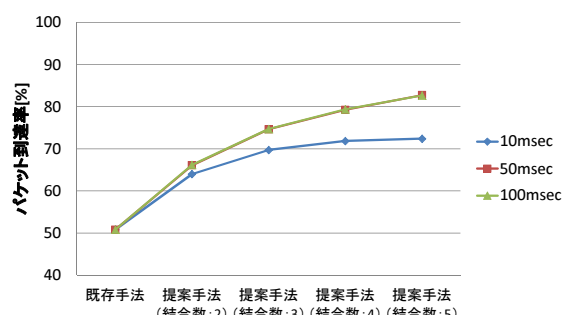


Fig. 14. Packet receive rate(number of vehicles:128 vehicles).

車両台数が128台且つ最大結合数5である場合の提案手法と比較すると31%向上した。車両密度が大きい場合は、中継バッファに多くの中継候補パケットが伝送され、パケットの結合が多く発生したことでVANETの通信帯域に余裕ができたためである。

次に、中継バッファにおける最大結合数・最大待機時間の変化について考察する。最大結合数が増加するにつれパケット到達率の向上が確認できた。これは、最大結合数が増加するにより1パケット当たりの結合数が増加しより多くのパケット送信回数が減少したためである。しかしながら、車両台数16台で最大待機時間が50,100ミリ秒の場合に最大結合数が4を境にパケット到達率が低下している事が確認できた。このことから、最大結合数が増加するにつれパケット到達率が向上するが、ある値を境にパケット到達率が低下する傾向にあることが確認できた。さらに、最大待機時間が増加するにつれパケット到達率の向上が確認できた。これは、最大結合数と同様に最大待機時間が増加することで1パケット当たりの結合数が増加しより多くのパケット送信回数が増えたためである。

提案手法では、ピギーバック方式による中継処理によって既存手法と比較して送信回数の削減及びトラフィック

量の削減を行った。その結果、遅延時間に関しては既存手法の方よりも長くなる結果となったが、提案手法の遅延時間が送信間隔である 100 ミリ秒以内に収まっているので許容範囲である。パケット到達率に関して、提案手法は既存手法よりも高くなる結果となり、最大結合数及び最大結合数の値を増加するにつれより高くなる結果となった。よって、提案手法は既存手法よりも低遅延且つ高パケット到達率が求められる安全運転支援アプリケーションで利用することに適している。

5 おわりに

本研究では既存のジオキャスト配信手法を改良し、ピギーバック方式によるパケット多重化により中継回数削減手法を提案した。ピギーバック方式は、中継候補となるパケットを一時的に格納する中継バッファを用いて宛先領域が同じパケットを結合する方式である。既存のジオキャスト配信手法では、同じ領域宛の複数の情報源車両のパケットが存在している場合でも別々にパケットを送信する必要があった。提案手法では、複数の情報源車両のパケットを一つにまとめて一度に送信することで中継回数を削減することができる。また、パケットを結合する際に不要な情報を削減することで1パケットあたりのパケットサイズを削減できる。さらに、中継バッファにおいてパケットがバッファ内に待機可能な最大待機時間を設けることで、長時間パケットがバッファに留まることを防ぎ遅延時間を最小限に抑えることができる。

提案手法の評価として、Scenargie を用いたシミュレーションにより既存ジオキャスト配信手法との比較を行った。提案手法では、既存手法よりも送信パケット数が減少しパケット到達率が向上することを確認した。また、中継バッファにおける最大結合数及び最大遅延時間の値が増加するにつれ、精度が良くなる結果となった。

参考文献

- 1) Kumar, R. and Dave, M.: A comparative study of Various Routing Protocols in VANET, *International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 8, No. 1, IJCSI, pp. 643–648 (2011).
- 2) Navas, J. C. and Imielinski, T.: GeoCast–geographic addressing and routing, *Proceedings of the 3rd annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, ACM, pp. 66–76 (1997).

- 3) Karp, B. and Kung, H.-T.: GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks, *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, ACM, pp. 243–254 (2000).
- 4) Ko, Y.-B. and Vaidya, N. H.: Geocasting in mobile ad hoc networks: Location-based multicast algorithms, *Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WMCSA'99. Second IEEE Workshop on*, IEEE, pp. 101–110 (1999).
- 5) Fùbler, H., Widmer, J., Käsemann, M., Mauve, M. and Hartenstein, H.: Contention-based forwarding for mobile ad hoc networks, *Ad Hoc Networks*, Vol. 1, No. 4, pp. 351–369 (2003).
- 6) Lee, S.-H. and Ko, Y.-B.: Geometry-driven scheme for geocast routing in mobile ad hoc networks, *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd*, Vol. 2, IEEE, pp. 638–642 (2006).
- 7) STE: Scenargie, SPACE-TIME Engineering (online), <http://www.spacetime-eng.com/jp/index.html> (2016-01-12).

Nonbinary Parallel Concatenated Code for Ergodic MIMO Channels

Jun CHENG*

(Received March 10, 2015)

Nonbinary parallel concatenated code (PCC) for ergodic MIMO channels is proposed. The nonbinary PCC is a parallel concatenation of a rate- $(1/r)$ q -ary repetition component code and M rate-1 q -ary accumulation component codes. The iterative receive between LMMSE detection and nonbinary decoding is employed. The numerical result of EXIT charts shows that the proposed code approaches the capacity of ergodic MIMO channels. The encoder of the proposed code is easily implemented, and has, shown by some of examples, the almost same decoding performance as conventional nonbinary LDPC codes.

Key words : 多元並列接続符号, EXIT チャート解析, エルゴード性 MIMO 通信路

キーワード : nonbinary parallel concatenated code, EXIT chart analysis, ergodic MIMO channels

エルゴード性 MIMO 通信路のための 多元並列接続符号

程 俊

1 はじめに

近年、無線通信において大容量通信を実現するために MIMO (Multiple Input Multiple Output) 通信が広く採用されている。MIMO システムは送信機側、受信機側両方で複数のアンテナを用いてデータを送受信することで伝送効率を向上させる技術である。1996 年に Bell 研究所の V-BLAST (Vertical Bell Laboratories Layered Space-Time)¹⁾ をきっかけに様々な研究が行われ、MIMO システムによって通信路容量が増加することが証明されている²⁾。また、近年ではより伝送効率を上げるために、数百のアンテナを用いて無線通信を行う Massive MIMO システムの研究が盛んに行われている。移動体通信においても、次世代規格の技術の一つとして Massive MIMO が検討されている。

一般的に MIMO システムは伝送効率の向上を目的と

しているが、伝送効率を向上させると信頼性が低減する。そこで、MIMO システムと通信路符号化を接続した研究が数多くなされてきた。その一つとして二元 Turbo 符号と接続したものが³⁾。二元 Turbo 符号は優れた誤り訂正能力をもつ符号と知られている。しかし、この二元 Turbo 符号と接続させた MIMO システムはシステムの全体の処理が低演算量で行えるが、シャノン限界に迫るものではなかった。シャノン限界に迫る通信路符号化と接続した MIMO システムとして、多元 LDPC (Low Density Parity Check) 符号と接続したものが⁴⁾。多元 LDPC 符号はガロア体 $GF(q)$ 上で符号化、復号を行う LDPC 符号である。二元 LDPC 符号と比べ中程度の符号長でも優れた誤り訂正能力を有する符号として知られている。MIMO システムとの接続においてもシャノン限界に迫る性能を示している。しかし、多元 LDPC 符

* Department of Intelligent Information Eng. and Sci., Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-6295, E-mail : jcheng@mail.doshisha.ac.jp

号は MIMO システムにおいて符号化率などのパラメータの設定を柔軟に変えることがやや困難であった．さらに，パリティ検査行列で符号を示しているため，符号器の構成が複雑である．

本論文では 多元並列接続符号化 MIMO システムを提案する．多元並列接続符号はガロア体 $GF(q)$ 上の反復処理と複数の累積処理を並列接続で構成する符号である．復号時に QSPA (q -ary Sum Product Algorithm) を用いて復号を行う．符号器は反復処理と累積処理によって容易に実現することが可能である．また，反復処理の反復回数と累積処理の数によって符号化率が決めることができるため，柔軟に符号化率のパラメータを決めることができる．本研究ではさらに，提案システムを EXIT (Extrinsic Information Transfer) チャート解析を用いて，送信アンテナ数が 4 本，受信アンテナ数が 1 本のととき，送信アンテナ数が 4 本，受信アンテナ数が 4 本のとときの，多元並列接続符号の多元反復処理の回数と多元累積処理の数を最適化する．EXIT チャート解析を用いて最適化した結果，それぞれの場合の MIMO 通信のシャノン限界に漸近することを示す．また，従来手法である MRNB LDPC 符号化 MIMO システム⁴⁾ と比べ，符号化が簡易であり，復号性能とほぼ同等の復号性能があることを示す．

2 システムモデル

本章では，多元並列接続符号を用いた MIMO システムの送信，受信側の各処理について説明する．

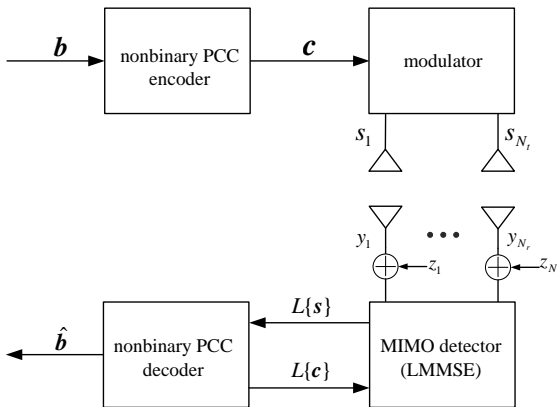


Fig. 1. 多元並列接続符号化 MIMO システムのシステムモデル．

2.1 送信

2.1.1 符号化

Fig. 2 で示す多元並列接続符号の符号器では情報ビット列 b で符号化され，ビット列 c を得る．多元並列接続符号は，ガロア体 $GF(q)$ ， $q = 2^m$ ，上の反復回数 r の多元拡散と M 個の累積処理をインタリーブを介して並列接続した符号である (Fig. 2)．多元拡散は $GF(q)$ 上での反復処理と積演算から構成されている．累積処理は遅延素子とガロア体 $GF(q)$ 上の排他的論理和で構成されている⁵⁾．多元並列接続符号の符号器に入力されたビッ

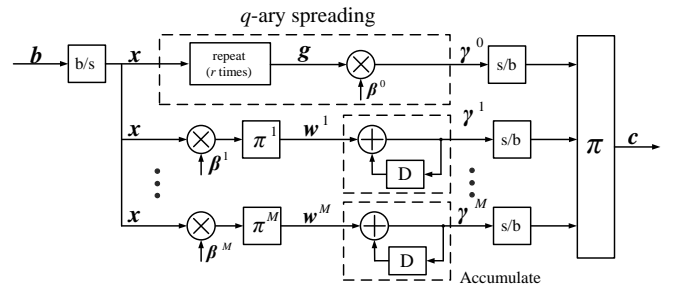


Fig. 2. 多元並列接続符号の符号器．

ト列 b はまず， b/s でシンボル列 $x = (x_1, \dots, x_N)^T$ ， $x_i \in GF(q)$ ，に変換される．シンボル列 x は，多元拡散側，累積処理側それぞれに送られる．多元拡散側ではまず，入力されたシンボル列 x が r 回の反復により，長さ rN のシンボル列 $g = (g_1, \dots, g_{rN})^T$ ， $g_i \in GF(q)$ ，になる．その後，あらかじめ用意されたランダムなシンボル列 $\beta^0 = (\beta_1^0, \dots, \beta_{rN}^0)^T$ ， $\beta_i^0 \in GF(q)$ ，とシンボル列 g でガロア体 $GF(q)$ 上の積演算 $\gamma_i^0 = \beta_i^0 g_i$ ，を行い，シンボル列 $\gamma^0 = (\gamma_1^0, \dots, \gamma_{rN}^0)^T$ ， $\gamma_i \in GF(q)$ ，を得る．

一方，累積処理側ではまず，あらかじめ用意されたランダムなシンボル列 $\beta^n = (\beta_1^n, \dots, \beta_N^n)^T$ ， $n = 1, \dots, M$ ， $\beta_i^n \in GF(q)$ ，とガロア体 $GF(q)$ 上の積演算 $\beta_i^n x_i$ ，を行う．各累積処理が相関を持たないようにするために，異なるインタリーブで並び変え， $w^n = (w_1^n, \dots, w_N^n)^T$ ， $w_i^n \in GF(q)$ ，となる．インタリーブでの並び変え後，累積処理で $GF(q)$ 上の排他的論理和でシンボル列 $\gamma^n = (\gamma_1^n, \dots, \gamma_N^n)^T$ ， $\gamma_i \in GF(q)$ ，を得る．最後に多元拡散，累積処理でそれぞれ符号化されたシンボルは s/b でビット列に変換する．ビット列に変換後インタリーブ π で並び変え，長さ $(r + M)mN$ のビット列 c となる．

多元並列接続符号の符号化率は $R = 1/(r + M)$ であり，多元拡散の反復回数 r と累積処理の数 M で決まる．

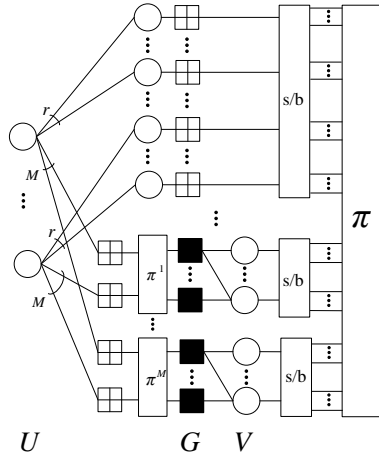


Fig. 3. 多元並列接続符号のファクターグラフ.

また, Fig. 2 の符号器から Fig. 3 のようなファクターグラフを示すことができる. Fig. 3 中の \circ が変数ノード, \blacksquare がチェックノードである. 多元並列接続符号ではさらにガロア体 $GF(q)$ 上の積演算に対応する復号処理としてパーミュテーションノード π が加わる.

2.1.2 マルチアンテナ送信

符号化されたビット列 c は変調し, 送信アンテナ数 N_t 本に並列分割され通信路に送られる. 送信信号を $s_j, j = 0, 1, \dots, \frac{rN}{N_t} - 1$, としたとき, 各アンテナから送信される信号は

$$s_j \triangleq (c'_{jN_t+1}, c'_{jN_t+2}, \dots, c'_{jN_t+N_t})^T \quad (1)$$

となる. BPSK 変調の場合, $c'_{jN_t+i} = 1 - 2c_{jN_t+i}$ である.

2.2 受信

Fig. 1 で示すように, 受信機は信号検出器と復号器から構成され, 信号検出器と復号器はそれぞれ L 回のやり取りを行っている. 信号検出器では LMMSE アルゴリズムを用いて, 受信アンテナ数 N_r 本で受信した信号 y から, 送信された信号 s を推定する⁶⁾⁷⁾. 復号器ではシンボル MAP 復号を行っている. シンボルごとの確率値を算出するために, FFT-QSPA を用いてシンボルごとの確率値を算出している⁸⁾⁹⁾.

3 EXIT チャート解析

本稿では EXIT チャート解析を用いて送信アンテナ数 $N_t = 4$, 受信アンテナ数 $N_r = 1$ のときと, 送信アンテナ数 $N_t = 4$, 受信アンテナ数 $N_r = 4$ のときの多元並

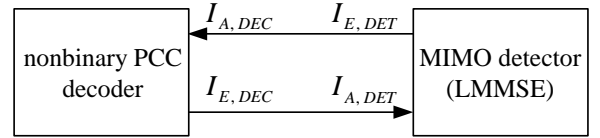


Fig. 4. EXIT チャートのモデル.

列接続符号化 MIMO システムの, 多元並列接続符号の反復処理の反復回数 r と累積処理の回数 M の最適なパラメータを導出する. EXIT チャート解析の方法をモデル化したのが Fig. 4 である. EXIT チャート解析は信号検出器と復号器との間で行われている LLR の交換を, 相互情報量に置き換え, 曲線と表し LLR の平均を追跡する. そして, それぞれの曲線を一つのグラフに表し, その二つの曲線の状態から最適なパラメータを導出する方法である¹⁰⁾¹¹⁾. 以下 LMMSE 検出器, 復号器それぞれの EXIT チャートの生成について述べる.

3.1 LMMSE の EXIT チャート生成

LMMSE 検出器の EXIT チャートは検出器アルゴリズムによって生成される. LMMSE 検出器の EXIT チャートの生成はまず, ガウス分布に従う事前 LLR A_{DET} を求める. 事前 LLR A_{DET} は

$$A_{DET} = \mu_{A,DET} c + n_{A,DET} \quad (2)$$

となる. $n_{A,DET}$ は平均 0, 分散 $\sigma_{A,DET}^2$ に従うガウス変数である. μ_A は $\mu_{A,DET} = \sigma_{A,DET}^2 / 2$ である. ここで, $\sigma_{A,DET}$ は $\sigma_{A,DET} = J^{-1}(I_{A,DET})$ であり, $J^{-1}(\cdot)$ は

$$J(\sigma) = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-((c-\sigma_A/2)^2/(2\sigma_A^2))}}{\sqrt{2\pi}\sigma_A} \log(1 + e^{-c}) dc \quad (3)$$

の逆関数である¹⁰⁾.

算出した事前 LLR A_{DET} と受信信号 y を入力し事後 LLR を求める⁷⁾ の式 (4) から事後 LLR E_{DET} を算出する. 事後 LLR E_{DET} がガウス分布に従うと考えると, 式 (3) と事後 LLR E_{DET} の平均 $E[*]$ を用いて出力相互情報量 $I_{E,DET}$ は

$$I_{E,DET} = J\left(\sqrt{2E[E_{DET}]}\right) \quad (4)$$

と計算ができる.

⁷⁾ の式 (4) から LMMSE 検出器の出力 LLR はチャンネル行列 H と雑音電力の分散 σ_z^2 に依存することがわかる. 本稿ではチャンネル行列 H は通信路がエルゴート性

フェージング環境下でのときの値とする．エルゴード性フェージング環境とはシンボルごとにフェージングの値が変化するフェージング環境である．

3.2 多元並列接続符号の EXIT チャート生成

多元並列接続符号の EXIT チャート生成は LMMSE 検出器のときと同様にまず，事前 LLR A_{DEC} を求める．事前 LLR A_{DEC} は

$$A_{DEC} = \mu_{A,DEC} c + n_{A,DEC} \quad (5)$$

となる． $n_{A,DEC}$ は平均 0，分散 $\sigma_{A,DEC}^2$ に従うガウス変数であり， $\sigma_{A,DEC} = J^{-1}(I_{A,DEC})$ である． $\mu_{A,DEC}$ は $\mu_{A,DEC} = \sigma_{A,DEC}^2/2$ である．

復号器にこの LLR A_{DEC} を入力し，¹²⁾ の式 (8)~(11) までを l 回繰り返し事後 LLR E_{DEC} を算出する．そして，LMMSE 検出器のときと同様に，式 (3) と事後 LLR E_{DEC} を用いて， $I_{E,DEC}$ を

$$I_{E,DEC} = J\left(\sqrt{2E[E_{DEC}]}\right) \quad (6)$$

と計算する．

4 計算機シミュレーション

まず送信機のアンテナ数 $N_t = 4$ ，受信機のアンテナ数 $N_r = 1$ で符号化率 $R = 1/8$ のときの EXIT チャート解析を行った．LMMSE の EXIT チャートは 3.1 節で述べた方法を用いて生成した．多元並列接続はガロア体 $GF(q = 64)$ ，復号器内部の繰り返し回数 $l = 100$ として EXIT チャートを 3.2 節で述べた方法を用いて生成した．復号性能の比較として，MRNB LDPC 符号¹³⁾ と多元 RA(NB RA) 符号¹⁴⁾ を用いた MIMO システムを，同様の符号化率で EXIT チャートを生成し比較を行った．MRNB LDPC 符号はパリティ検査行列の構成で PEG(progressive edge-growth) アルゴリズムにより，4 ループを発生しないようにパリティ検査行列を構成した¹⁵⁾．

Fig. 5 が各符号の EXIT チャートと各符号の閾値の LMMSE の EXIT チャートである．Fig. 5 より多元並列接続符号は多元 RA 符号と比較すると約 4.35[dB] 閾値が改善し，MRNB LDPC 符号の閾値に近いことがわかる．

Table. 1 は Fig. 5 の結果と多元並列接続符号化 MIMO システムの各パラメータ (r, M) ごとの閾値を表にした

ものである．Table. 1 より，送信アンテナ数 $N_t = 4$ ，受信アンテナ数 $N_r = 1$ のときはどのパラメータもシャノン限界に近いことがわかる

次に情報ビット数を 2400 bits とし，信号検出と復号器の繰り返し回数 $L = 10$ でモンテカルロシミュレーションを行った．Fig. 6 がビット誤り率による結果である．ビット誤り率が 10^{-4} に達する E_b/N_0 を見ると，多元 RA 符号が約 7.2[dB] で達しているのに対し，多元並列接続符号は約 4.0[dB] で達している．MRNB LDPC 符号は復号が行えなかったため，結果を載せていない．

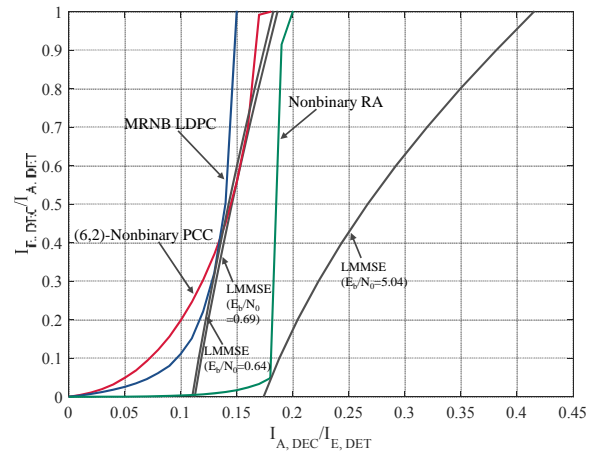


Fig. 5. $N_t = 4, N_r = 1, R = 1/8$ のときの EXIT チャート．

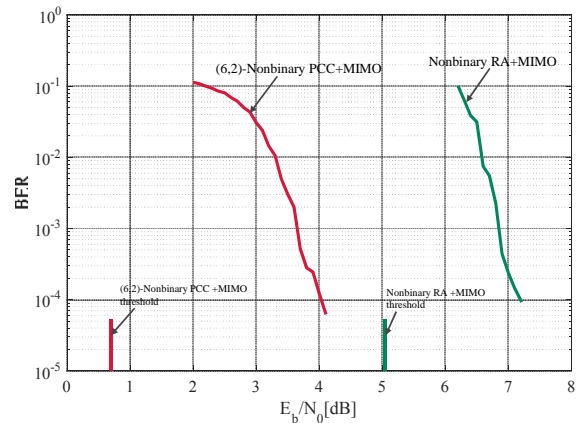


Fig. 6. $N_t = 4, N_r = 1, R = 1/8$ のときのビット誤り率．

次に送信機のアンテナ数 $N_t = 4$ と受信機のアンテナ数 $N_r = 4$ で符号化率 $R = 1/10$ のときのシミュレーションを行った．Fig. 7 がそのときの EXIT チャートである．Fig. 7 より MRNB LDPC 符号と比較すると閾値に近いことがわかる．各パラメータごとの閾値を

Table 1. $N_t = 4, N_r = 1, R = 1/8$ のときの閾値と MIMO 通信のシャノン限界 ($E_b N_0 = -0.69$ [dB]) との差.

	r	M	threshold [dB]	gap [dB]
NB PCC	3	5	1.84	2.53
	4	4	1.43	2.12
	5	3	0.95	1.64
	6	2	0.69	1.38
MRNB LDPC ¹³⁾	/	/	0.64	1.33
NB RA ¹⁴⁾	/	/	5.04	5.73

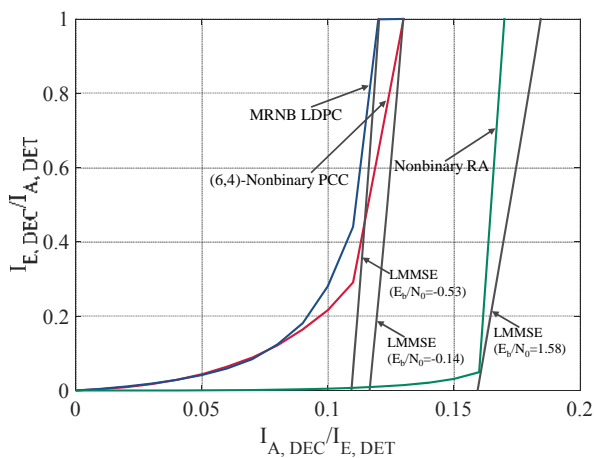


Fig. 7. $N_t = 4, N_r = 4, R = 1/10$ のときの EXIT チャート.

算出したのが Table 2 である. Table 2 より, $(r, M) = (5, 5), (6, 4), (7, 3)$ のとき最もシャノン限界に近くことがわかる.

モンテカルロシミュレーションを行った結果が Fig.8 である. 多元並列接続符号は $(r, M) = (6, 4)$ のとき 10^{-4} に達する E_b/N_0 が約 0.7 [dB] で MRNB LDPC 符号よりも約 0.2 [dB] の改善を得られた. これらの結果から多元並列接続符号は MRNB LDPC 符号とほぼ同等の復号性能がある. ここで強調したいのは, 2 章で述べたように, MRNB LDPC 符号と比べ符号化が容易な符号化である.

5 まとめ

本論文ではエルゴード性通信路における多元並列接続符号化 MIMO システムを提案した. 多元並列接続符号は r 回の反復処理と M 個の累積処理からなる符号であるため, 符号の構成が容易であり, r と M の数を変える

Table 2. $N_t = 4, N_r = 4, R = 1/10$ のときの閾値と MIMO 通信のシャノン限界 ($E_b N_0 = -1.28$ [dB]) との差.

	r	M	threshold [dB]	gap [dB]	
NB PCC	3	7	-0.12	1.16	
	4	6	-0.14	1.16	
	5	5	-0.14	1.14	
	6	4	-0.14	1.14	
	7	3	-0.14	1.14	
	8	2	-1.6	1.52	
	MRNB LDPC ¹³⁾	/	/	-0.53	0.75
	NB RA ¹⁴⁾	/	/	1.58	2.86

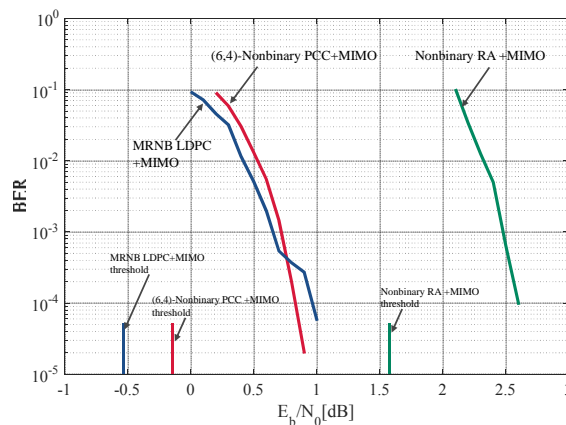


Fig. 8. $N_t = 4, N_r = 4, R = 1/10$ のときのビット誤り率.

ことでパラメータを柔軟に変えることができる. EXIT チャート解析を用いて, 送信アンテナ数が 4 本, 受信アンテナ数が 1 本のとときと, 送信アンテナ数が 4 本, 受信アンテナ数が 4 本のとときの, 多元並列接続符号の多元反復処理の回数と多元累積処理の数を最適化した. EXIT チャート解析を用いて最適化を行った結果, それぞれの場合のシャノン限界に漸近することがわかった. また, 従来手法である多元 LDPC 符号化 MIMO システムと比べ, 符号化が容易であり, 復号性能が多元 LDPC 符号とほぼ同等の復号性能を有していることがわかった.

謝辞

本研究の一部は科研費 JSPS (24300030) および文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (平成 26 年 ~ 平成 30 年, 事業番号 S1411030) の助成を受けたものである.

参考文献

- 1) G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas," *Bell Labs. Tech. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 41-59, 1996.
- 2) I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *European Trans. Telecommun.*, vol. 10, no. 6, pp. 585-595, Nov. 1999.
- 3) S. Mohanmmmed, A. Zaki, A. Chockalingm, and B. Rajan, "High-rate space-time coded large MIMO systems: low-complexity detection and channel estimation," *IEEE J. Select. Topics in Signal Proc.*, vol. 3, no. 6, pp. 958-974, Dec. 2009.
- 4) P. Suthisoparpan, K. Kasai, A. Meesomboon, and V. Imtawil, "Achieving near capacity of non-binary LDPC coded large MIMO systems with a novel ultra low-complexity soft-output detector," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 12, no. 10, pp 5185-5199, 2013.
- 5) H. Han, G. Song, M. Yoshida, and, J. Cheng, " K -user nonbinary parallel concatenated code for Gaussian multiple-access channel," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications*, 2014, pp. 2064-2069.
- 6) Z. Zhang, C. Xu, and, L. Ping, "Spatially coupled LDPC coding and linear precoding for MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 95 no. 12. pp 3663-3670, Dec. 2012.
- 7) X. Yuan, Q. Guo, X. Wang, and L. Ping, "Evolution analysis of low-cost iterative wqualization in coded linear systemas with cyclic prefixes," *IEEE J. Select. Areas Commun*, vol. 26, no 2, pp. 301-310, Feb. 2008.
- 8) D. Declercq and M. Fossorier, "Decoding algorithms for nonbinary LDPC codes over $GF(q)$," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 4, pp. 633-643, Apr. 2007.
- 9) W. E. Ryan and S. Lin, *Channel Codes*, Cambridge University, Press, Cambridge, 2009.
- 10) S. ten Brink, "Convergence behavior of iteratively decoded parallel concatenated codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 10, pp. 1727-1737, Oct. 2001
- 11) M. Tschler, R. Kowtter, and A. C. Singer, "Turbo equalization: principles and new result," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 5, pp. 754-767, May 2002.
- 12) 石田拓也, 宋光輝, 吉田雅一, 程俊, "Large MIMO における多元並列連接符号," 第 37 回情報理論とその応用シンポジウム, pp. 265-269, Dec. 09-12, 2014, 黒部市, 富山県.
- 13) K. Kasai, D. Declercq, C. Pouliat, and K. Sakaniwa, "Multiplicatively repeated nonbinary LDPC codes," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 57, no.10, pp. 6788-6795, Oct. 2011.
- 14) K. Yang, "Weighted nonbinary repeat-accumulate codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 3, pp. 527-531, Mar. 2004.
- 15) X. Y. Hu, E. Eleftheriou, and D. M. Arnold, "Regular and irregular progressive edge-growth Tanner graphs," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 51, no. 1, pp. 386-398, Jan. 2005.

Configuration of Quick Charging System having EDLC Charge Buffer for Micro EV

Seiya TANAKA^{*}, Nobuo FUKUJYU^{*} and Shigeo KANEDA^{**}

(Received March 10, 2016)

Recently, electric double-layer capacitors (EDLC) have gotten a lot of attention as a rechargeable battery. This paper focuses on the application of EDLC for the micro electric vehicles (μ EVs), because a micro EV has rather small power consumption. However, the capacity of EDLC is very small. Frequent re-charging and quick charging are required. To resolve the problem, this paper proposes two types of quick charging systems: 1) Use of the commercial power source with large capacity, 2) Combination of one or two EDLC charge buffers and low cost power source with limited capacity. These models of quick charging systems were evaluated by using queuing theory and software simulation. The evaluation shows that quick charging system having two EDLC buffers is the best solution. Even if the electric power source line has limited capacity, the proposed system has small waiting time.

Key words : Micro EV, Electric Double Layer Capacitor, Queuing Theory, Quick Charging System

キーワード : マイクロ EV, 電気 2 重層キャパシタ, 待ち行列理論, 間歇充電システム

マイクロ EV のための EDLC 蓄電バッファを備えた 急速充電システムの構成法

田中 聖也, 福壽 伸雄, 金田 重郎

1 まえがき

電気 2 重層キャパシタ (Electric Double-Layer Capacitor, 以下, EDLC) が, 交通手段の動力源として利用され始めている。化学反応を原理とする従来の二次電池とは異なり, 急速充電が可能であり, 充放電繰り返しに伴う性能劣化も少ない。しかし, エネルギー容量が小さく, 動力用として用いると, 頻繁な充電を必要とする。動力源としての EDLC の適用例としては, EU 圏で実用化されている Siemens 社製 LRT¹⁾ が知られている。停留所において架線から急速充電し, 停留所間は EDLC で走行する。停留所は近距離にあり, LRT は頻繁に充

電される。本稿では, この種のシステムを, 「EDLC 間歇充電システム」と呼ぶ。

EDLC 間歇充電システムの充電対象として, 本稿では, 超小型 EV (以下「 μ EV」) である 1 人乗り μ EV タウンカート (「タウンカート」はスズキ (株) の登録商標です) への適用を想定する。タウンカートは, 最大速度の 6km/h で走る場合, 電力消費量が $24\text{V}8\text{A}$ (200W) 程度である。それでも, 市販されている EDLC の容量を考えると, 頻繁な充電を必要とする。従って, 利便性を損なわないためには, タウンカートへの充電時間は短いことが望まれる (本稿では, 10 秒を要求条件

^{*} Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-6976, E-mail : skaneda@mail.doshisha.ac.jp

として設定した)。半面、充電時のピーク電力は大きくなる。

EDLC 間歇充電システムを構成する場合、アプローチは2つ考えられる。ひとつは、 μEV の充電に足る大きなピーク負荷電力を持つ商用電源を用いるアプローチである。一般に基本料金が高くなり、よほど多数の μEV が到着しない限り、電力消費の少ない μEV には有利とは言いがたい。もうひとつは、 μEV の充電に足る容量の EDLC によるバッファ(以下「蓄電用 EDLC」と呼ぶ)を準備しておき、充電が必要な際には、蓄電用 EDLC から急速充電するアプローチである。後者は、基本料金の安さから商用電力コストを低く押さえられる。反面、蓄電用 EDLC の設備コストがかかる。本稿では、EDLC のコストについては、検討対象外とする。

本稿では、最適なシステムの設計方法を明確化するために、複数の EDLC 間歇充電システムのモデルを作り、待ち行列理論による数値解析を用いて、電力コストと充電待ち時間の観点から比較検討する。以下、第2章では、 μEV の概要、また、EDLC と充電電力について述べる。第3章では、間歇充電システムの構成案と待ち行列モデルを提示する。第4章では、待ち行列理論に基づいて、EDLC 間歇充電システムの充電時間について検討する。第5章では、理論式をもとに待ち時間や電気料金を求めて、合わせてシミュレーション結果と比較する。第6章は、まとめである。



Fig. 1. スズキ タウンカート²⁾.

2 μEV と EDLC の適用可能性

2.1 スズキ・タウンカート

タウンカート²⁾ は、一人乗りであり、道路交通法上は歩行者である(図1)。タウンカート(以下、 μEV とする)の電源は24V の鉛蓄電池が2個であるが、消費電力は、平坦な道で最高時速6km/hを出した時に8A程度、多少の傾斜道路の上りは10A程度である。この電力を EDLC から供給することを考える。例えば、二

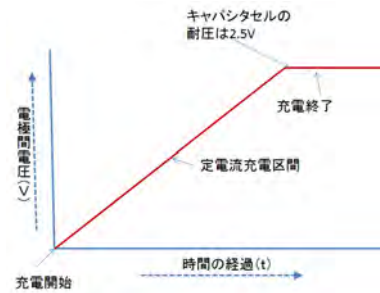


Fig. 2. EDLC の充電時の端子間電圧の推移.

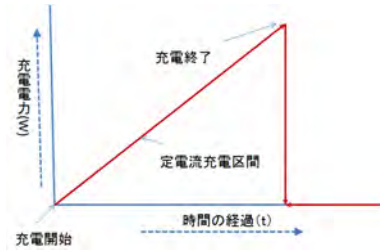


Fig. 3. EDLC の充電電力の推移.

チコン(株)の2,500F の EDLC³⁾ を10個直列接続し、25V250F の EDLC を作ったとする。このキャパシタが蓄積している電力量は、 $0.5 \times \text{容量} \times \text{電圧}^2$ から、

$$0.5 \times 250 [F] \times 25^2 [V^2] = 78,125 [Ws] \quad (1)$$

となる。ただし、現実の回路では、回路抵抗等の変換ロスがあり、エネルギーを100%使えるわけではない。しかし、本稿の議論では、そこには深入りせず、効率は100%であり、EDLC に蓄積した電力はそのまま取り出すことができ、DC-DC、あるいは AC-DC コンバータの効率も100%と仮定する。従って、 μEV の到達率 λ が与えれば電力消費量は一定であり、後述する方式1から方式3までの充電方式には依存しない。また、EDLC の直列接続には、電圧バランスの問題が存在するが、本稿では、それが達成されているものとする。

一方、 μEV を、例えば、250秒間、24V10A で走行させた場合の電力量は、

$$24 [V] \times 10 [A] \times 250 [sec] = 60,000 [Ws] = 16.7 [Wh] \quad (2)$$

であるので、式(1)より EDLC に蓄えられた電力量で賄える。

以上から、大容量 EDLC である 2.5V、2,500F、直径51mm 高さ150mm、重さ500g の製品を10本束ねて、 μEV のバッテリーとして利用した際には、4~5分間運転できる。EDLC の重量は5kg である。現状は2個の鉛

蓄電池*が搭載されており、重量は2個で18kgである。

次に、 μ EVが消費する電力量について考える。上記の例では、1回の充電で蓄積される電力量は、16.7Wh程度であった。通常の一般家庭の1日の消費電力量は10kWh~15kWh程度である。つまり、 μ EVは1日あたり、

$$10 [kWh] \div 16 [Wh] = 625 [\text{回}] \quad (3)$$

充電して、やっと一般家庭用の従量電灯A**が扱うべき電力量となる。

2.2 EDLCの充電制御

本節では、EDLCの充電電流について確認しておく。EDLCはキャパシタであるので、完全に放電すると、正負極間の電圧はゼロとなる。再充電するためには、定電流充電が必要であり、図2に示すような電圧経過を経て、蓄電される。また、例えば、充電システムから μ EVの間の充電における電力の推移は図3のようになる。ピーク時には、平均電力の2倍の電力となる。キャパシタには78,125 [Ws]の電力量が蓄積されている。これを10秒間に蓄積する場合、平均は、約7.8kWとなり、ピークは約15.6kWである。このピークは、6kVAを上限とする関西電力の家庭用電力契約の1つである従量電灯Aでは、カバーできない。

2.3 EDLC間歇充電システムの要件

μ EVにEDLCを適応した場合、その充電システムは、以下の要件を持つ必要がある。

【要件1】 μ EVは、電源であるEDLCの容量が小さいため、数分に1回というような頻繁な充電が必要となる。ユーザ利便性を考えると、できるだけ充電時間は短くする必要がある。本稿では、10秒を要求条件とする。

【要件2】 μ EVの蓄積できる電力量は限られている。このため、走行中に電力が切れてしまうことを防ぐために、充電ポイントを多数設置する必要がある。一方、消費される全体の電力量は限定される。よって複数の充電ポイントをまとめて、単一の商用電源(電力会社)から受電すべきである。

これら2つの要件より、 μ EVのEDLC間歇充電システムは、以下の3つの方式が想定される。

【方式1：蓄電用EDLC無し】

充電システム自体は、自力で電力を蓄積する機能を

* シールドタイプ SC24-12(12V・22Ah)を2個搭載。

** 関西電力における家庭用の標準的な契約の呼称⁴⁾。他の電力会社と同様の契約内容であるとは限らない。

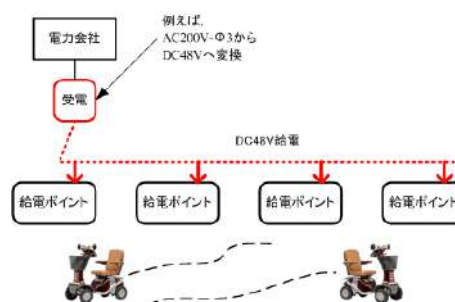


Fig. 4. 電力会社からの買電のみで充電する方式(方式1)。

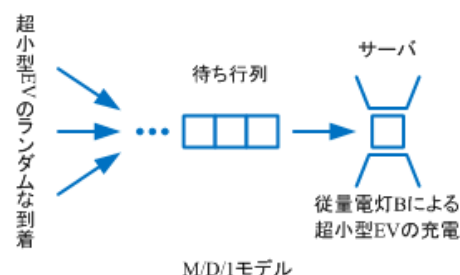


Fig. 5. 単一サーバ待ち行列(M/D/1)の概念(方式1)。

持たない場合(図4)である。要件1から、短時間で充電するためには、電力会社からは大きなピーク負荷に耐えられる契約で電気を受電したい。関西電力でいえば、従量電灯B⁴⁾の様な、大きなピーク負荷を許容する契約が望ましい。従量電灯Bのピーク負荷は、50kVAである。

【方式2：単一の蓄電用EDLC具備】

小口の電力会社との契約でも、短時間での μ EVへの充電を可能とするためには、図6に示すような、EDLCを用いた蓄電EDLCをEDLC間歇充電システム側に設け、充電時にはここから充電する方法が考えられる。この場合、ピーク電力を抑えることで、電力会社の基本料金を抑えることができる。関西電力では、従量電灯A⁴⁾が適用できる。ただし、 μ EVへの充電が終わると、蓄電用EDLCの再充電が必要であり、これが終わらない限り、次の μ EVには対応できない。

【方式3：複数台の蓄電用EDLC具備】

後述の図8のようなイメージであり、方式2と同様の条件で、2個以上の蓄電用EDLCを持つシステムである。現実には、方式2で大き目のEDLCを1個だけ設備するような構成も考えられるが、それも含めて、図8の構成となる。

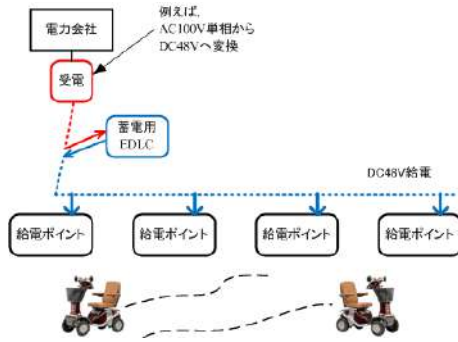


Fig. 6. 蓄電用 EDLC を使って、そこから充電する方式 (方式 2) .

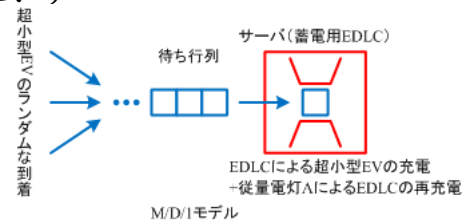


Fig. 7. 単一サーバ待ち行列 (M/D/1) の概念 (方式 2) .

3 システムの構成案と待ち行列モデル

本稿では、待ち行列理論モデルで、上述の 3 方式を比較検討する。まず、方式 1 (図 4) の待ち行列モデルは、図 5 に示すものとなる。サーバは 1 つしかなく、ここから 10 秒間で μEV を充電する。利用する契約は関西電力の従量電灯 B⁴⁾ を想定している。サーバのサイクルタイムは、 μEV の充電時間 (10 秒) である。この待ち行列は、容量に制限はない M/D/1 モデルとなる。

次に、方式 2 のイメージ図を図 6 に示す。方式 2 は、方式 1 の「ピーク負荷に耐えられる大口の契約を電力会社とする必要がある」という問題点を解決したものであり、電力会社からの電力は、一旦、蓄電用の EDLC に溜めておき、必要な場合、 μEV にこの蓄電用 EDLC から急速充電する。蓄電用 EDLC は、 μEV への充電後、電力会社からの電力によって充電される。

方式 2 の待ち行列モデルを図 7 に示す。図 7 は図 5 と同じ M/D/1 モデルであるが、図 7 では、待ち行列から出ると、最初の 10 秒間は蓄電用 EDLC から μEV に充電し、その後 25 秒かけて蓄電用 EDLC を再充電する。ここでの 25 秒とは、従量電灯 A⁴⁾ の最大電力が $6kVA$ であるため、力率を考慮せずに、ピーク電力を $6kW$ とし、その電力量を充電するために余裕を持たせた充電時間である。蓄電用 EDLC は 1 台のため、 μEV への充電が完了して、蓄電用 EDLC が空になると、再充電し

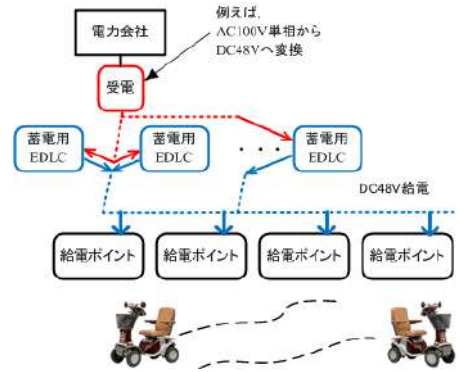


Fig. 8. 複数の蓄電用 EDLC を使って、そこから充電する方式 (方式 3) .

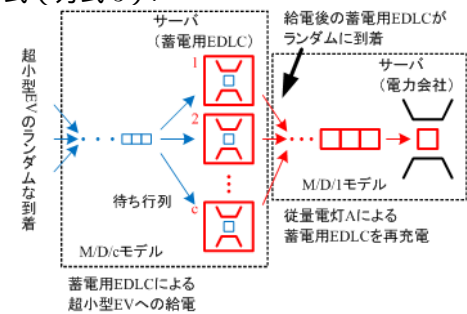


Fig. 9. 方式 3 の待ち行列モデル.

ないと、次の μEV への充電ができない。蓄電用 EDLC から μEV への充電時間 (10 秒) と電力会社からの受電による蓄電用 EDLC の再充電にかかる時間 (25 秒) は、常に連続する。なお、このモデルでは、蓄電用 EDLC から μEV への充電が行われている期間は、電力会社からの受電はないとしている***。

最後に、図 8 に、方式 3 のイメージ図を示す。蓄電用 EDLC を複数個準備して、方式 2 の構成が持つ欠点である「一度 μEV に充電を始めると、長時間、その蓄電 EDLC が使えなくなり、ボトルネックとなる点」を補ったものである。複数個の蓄電用 EDLC があるので、 μEV の充電のために、既に 1 個目の蓄電用 EDLC が利用されていても、2 個目の蓄電用 EDLC によって、 μEV への充電が可能である。図 6 の構成とは異なり、図 8 では、蓄電用 EDLC は、2 個以上ある。これらの蓄電用 EDLC は、単一の電力会社からの電力 (従量電灯 A) を取り合う。蓄電用 EDLC の個数が十分大きくないと、電力会社からの受電要求は、ランダム生起とはいえないが、本稿では、蓄電用 EDLC が 2 個しかないケースでも、電

*** これは本来は、無駄があり、蓄電用 EDLC から μEV の充電を行っている際にも、電力会社からの電力を供給するべきである。しかし、このような細かい制御は今後の課題としたい。

力会社への受電要求はランダム生起としてモデル化している。このような少ない蓄電用 EDLC 数では、後述の待ち行列モデルによる解析において、多少の誤差が生じる恐れがある。この点は、シミュレーションと比較して、確認していく。

方式 3 の待ち行列モデルを図 9 に示す。このモデルは大きく 2 つに分かれており、図 9 の左側のモデルでは、ランダム生起で次々と μEV が到着して、蓄電用 EDLC の電力で、 μEV が充電される。こちらでは、以下の式が成立する。

$$\begin{aligned} \text{サイクルタイム} = & \text{EDLC から } \mu EV \text{ への充電時間 (10sec)} \\ & + \text{図 9 の右側の待ち行列の待ち時間} \\ & + \text{蓄電用 EDLC の再充電時間 (sec)} \end{aligned} \quad (4)$$

図 9 の左側の待ち行列モデルにおけるサーバの数は、蓄電用 EDLC の数であり、待ち行列モデルは M/D/c である。一方、右側のモデルは、電力会社の電力による蓄電用 EDLC の充電待ち行列である。左側の待ち行列のサーバから、充電要求が発生し、サイクルタイムは蓄電用 EDLC への充電時間 (25 秒) である。

4 待ち行列理論による解析

本稿では、各方式の EDLC 間歇充電システムの待ち時間の解析にあたり、基本的に以下の変数を前提とする。但し、図 9 の右側のサーバについてはプライム「'」を付して区別する。

λ : 単位時間あたりの μEV の充電要求 (到着) 率 [1/sec]

τ : サーバのサイクルタイム [sec]

τ_{EV} : μEV への充電時間 [sec] (10 秒)

τ_{EDLC} : 蓄電用 EDLC の充電時間 [sec] (25 秒)

ρ : 商用電源利用率

W_q : 充電待ち時間 [sec]

W : μEV 利用者から見た充電待ち時間 [sec]

n : 単位時間あたりの μEV の平均到着台数 [台]

なお、本稿では、この μEV の平均到着台数は、複数箇所ある充電ポイントのうち、どこか 1 つの充電ポイントに μEV が到着した時にカウントするとしている。これは、本システムが複数個所の充電ポイントを想定しているが、1 度の充電は基本的に方式 3 以外 1 台の μEV にしかできないためである。したがって、上記の λ は、1 時間あたりに μEV がどこかの充電ポイント到着する平

均台数 (n) から、以下のように求める。

$$\lambda = n \div 3,600 \quad (5)$$

4.1 方式 1 の解析

図 4 の方式 1 については、ピーク負荷が約 13.7kW であり、関西電力の従量電灯 B を想定して、待ち時間の理論式を導く。タウンカーの到達は、ランダム生起 (ポアソン分布) で、充電ポイントの数は十分に多数存在するとする。この場合、単位時間あたり λ [1/sec] 個の到着があり、1 回で $\tau = \tau_{EV}$ [sec] 時間を占有するから、商用電源利用率 ρ は、次の式で与えられる。

$$\rho = \lambda \times \tau \quad (6)$$

待ち時間は、M/D/1 モデルの理論式から、定常状態では、以下の値となる¹。

$$W_q = 0.5 \times \tau \times \frac{\rho}{1 - \rho} \text{ [sec]} \quad (7)$$

ただし、 μEV 利用者から見た充電待ち時間 W は、以下の式となる。

$$W = W_q + \tau \text{ [sec]} \quad (8)$$

なお、従量電灯 B は、原則として、50kVA 未満のため、EDLC の充電電力のピーク負荷 13.7kVA から比べても、十分余裕であるが、ここでは、契約上の設備容量は 13.7kVA として、同時には 1 台の μEV しか充電できないものとした²。

4.2 方式 2 の解析

方式 2 では、方式 3 で蓄電 EDLC が 1 個のケースの様にも思えるが、方式 3 をそのまま表現できる待ち行列モデルが無く、2 つの待ち行列モデルを直列して計算している。この方式 3 のモデルは、方式 2 を表すためには必ずしも適切ではない。従って、本稿では、蓄電用 EDLC を 1 個だけしか認めない方式 2 を別途分析する。方式 2 では、蓄電用 EDLC による μEV への充電とその後の電力会社からの電力による蓄電用 EDLC を再充電するプロセスが、常に、接続して直列している。この待ち行列モデル (図 7) におけるサーバのサイクルタイム τ は、 μEV の充電時間と蓄電用 EDLC の充電時間より、以下のように定義する。

$$\tau = \tau_{EV} + \tau_{EDLC} \text{ [sec]} \quad (9)$$

¹ M/D/1 の待ち時間は文献⁶⁾p.213

² 正確には、関西電力では、この必要な設備容量に、ある係数を掛けて容量圧縮するため、12kVA となる⁴⁾

これにより，商用電源利用率 ρ は，以下の式となる．

$$\rho = \lambda \times \tau \quad (10)$$

待ち時間は M/D/1 モデルの理論式から，定常状態では，

$$W_q = 0.5 \times \tau \times \frac{\rho}{1-\rho} \text{ [sec]} \quad (11)$$

となる．ただし， μEV 利用者から見た充電待ち時間 W は，以下の式となる．

$$W = W_q + \tau_{EV} \text{ [sec]} \quad (12)$$

4.3 方式 3 の解析

最後に，方式 3 を解析する．関西電力との契約は，従量電灯 A とするが，蓄電用 EDLC の再充電には 25 秒必要となる．方式 3 については，既存の待ち行列モデルをそのまま適用することはできない．そこで，本稿では，図 9 に示す，2 段の待ち行列モデルを適用した．

【図 9 右側の M/D/1 モデルの分析】

図 9 の右側の待ち行列は，方式 1，方式 2 と同様の M/D/1 である．この待ち行列における待ち時間は， τ_{EDLC} とする．従量電灯 A の商用電源の占有発生は，単位時間あたり λ [1/sec] であり，1 回で τ_{EDLC} [sec] の間占有するため，商用電源利用率 ρ'_{EDLC} は，次の式の通りである．

$$\rho' = \lambda \times \tau_{EDLC} \quad (13)$$

よって，右側の待ち行列の待ち時間は，

$$W'_q = 0.5 \times \tau_{EDLC} \times \frac{\rho'}{1-\rho'} \text{ [sec]} \quad (14)$$

となる．なお，この待ち時間 W'_q と，蓄電用 EDLC を充電している時間 τ_{EDLC} の合計が，左側の M/D/c モデルのサーバの占有率計算に加算される．一方で， μEV への充電時間の終了タイミングに，この $W'_q + \tau_{EDLC}$ は加算されない．

【図 9 左側の M/D/c モデルの分析】

図 9 の左側の待ち行列は， c 個存在する蓄電用 EDLC により μEV が次々と充電されるモデルである．こちらの待ち行列は M/D/c モデルである．この c 個のサーバは μEV への充電が終わると， τ_{EDLC} で充電する．それが，図 9 の右側の待ち行列となるが，充電するための関

西電力の窓口は 1 つしかない．この 1 つしかない従量電灯 A のサーバを，左側の複数のサーバである蓄電用 EDLC が取り合う．

図 9 の左側は M/D/c モデルであるが，このモデルの待ち時間の厳密な理論式は得られていない．一般に，M/D/c の待ち時間は，Lee-Longton の近似式⁷⁾により，M/M/c の待ち時間の理論式から近似的に求められることが知られている³．そこで，まず，与えられた図 9 の左側のモデルで，M/M/c の待ち時間を計算する．蓄電用 EDLC は，はじめに， μEV を充電し，そのあとで図 9 の右側の待ち行列にリクエストを出して，蓄電用 EDLC の再充電を行う．つまり，当該サーバ (EDLC) が，再度，次の μEV への充電可能状態になるためのサイクルタイムの導出には，図 9 の右側の待ち行列モデルの W'_q ， τ_{EDLC} はそのまま継承し，しかも， μEV の充電時間 τ_{EV} も考慮する必要がある．以上を式に表すと，次のようになる．

$$\tau = W'_q + \tau_{EDLC} + \tau_{EV} \text{ [sec]} \quad (15)$$

図 9 の左側のサーバの占有率 ρ は，蓄電用 EDLC が c 個あることを考慮して，

$$\rho = \frac{\lambda \times \tau}{c} \quad (16)$$

である．M/M/c の待ち時間 $W_q(M/M/c)$ は， $c = 2$ の時，以下の式で与えられる．

$$\begin{aligned} W_q(M/M/2) &= \frac{\tau \times \rho^2}{(1-\rho^2) \times \frac{(1+2\rho+2\rho^2)}{(1-\rho)}} \\ &= \frac{\tau \times \rho^2}{(1+\rho)(1-\rho)} \text{ [sec]} \end{aligned} \quad (17)$$

これより， $W_q(M/D/2)$ は，以下の式で近似的に求められる．

$$W_q(M/D/2) = 0.5 \times \frac{\tau \times \rho^2}{(1+\rho)(1-\rho)} \text{ [sec]} \quad (18)$$

方式 3 では，上記の待ち時間 $W_q + \tau_{EV}$ が， μEV の充電が完了するまでユーザが待つ時間である．

ちなみに， $C=3$ の場合には，M/D/c の待ち時間 W_q は，以下の式で与えられる．

$$W_q(M/D/3) = 0.5 \times \frac{\tau \times \rho^3}{(\rho^2 + \frac{3}{4} \times \rho + \frac{2}{3})(1-\rho)} \text{ [sec]} \quad (19)$$

ただし，この様に C の値が小さい場合には，図 9 右側の待ち行列モデルをランダム到着とすることには無理

³ M/M/c の待ち時間は文献⁶⁾, p.153, p.156 による．

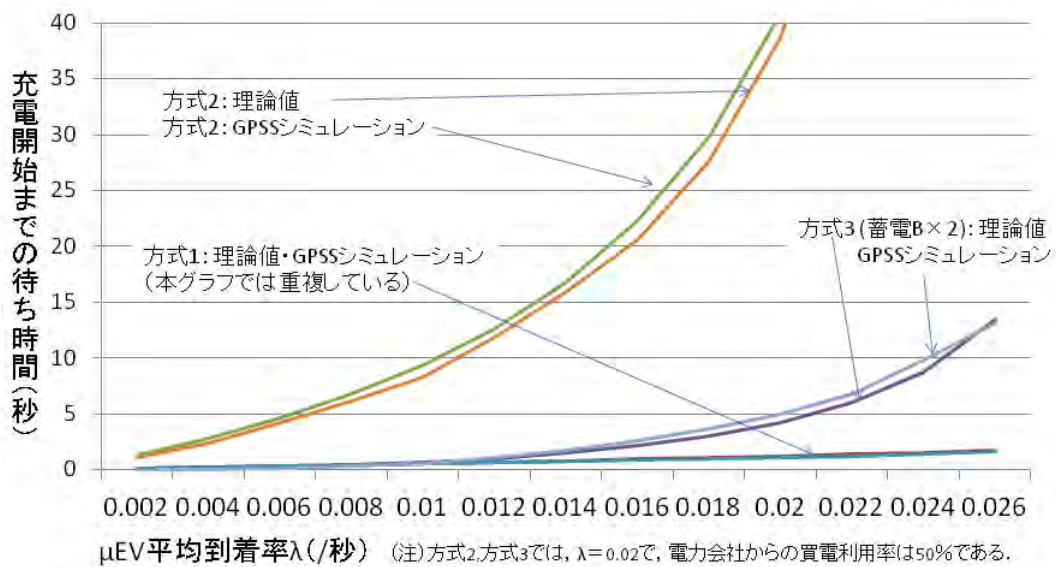


Fig. 10. μ EV の平均到着率と待ち時間.

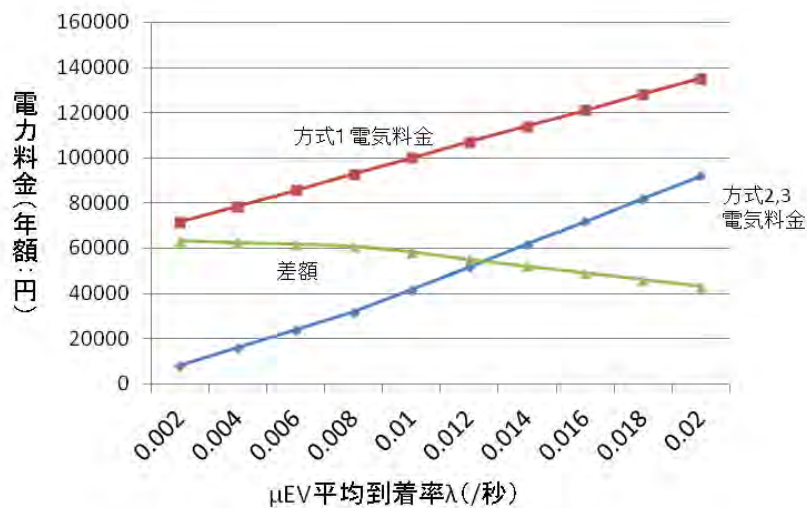


Fig. 11. 平均到着率と年間電力コスト.

がある。C=2 の場合に限って言えば、充電処理中の蓄電 EDLC からの再アクセスは有り得ない。つまり、自分自身と衝突することは皆無である。従って、M/D/2 の場合に限って言えば、図 9 右側の待ち行列の待ち時間を、更に 2 分の 1 にしても、大きな誤差は出ないと思われる。後述の評価では、この 2 分の 1 とした式を利用する。

5 評価

図 10 は、 μ EV の平均到着率に対する（到着後、充電開始までの）待ち時間を、方式 1～方式 3 の間で比較したものである。本稿で示した理論式と GPSS⁹⁾¹⁰⁾を用

いたシミュレーションの結果を示している。シミュレーションは、80 時間連続して動作させて、初期段階による待ち行列の誤差の影響を排除している。

方式 1 の待ち時間は非常に短く、この図では、理論式とシミュレーションは重複してしまっている。平均待ち時間は、2 秒以下と短い。従量電灯 B の電源供給力の高さから、待ち時間は殆ど無いと言って良い。方式 2 は待ち時間が大きい。もともと、周知の基本的な公式を利用しているので、シミュレーションと理論式は、一致度が高い。ただ、数値的にみて、実用性には疑問がある。10 秒の充電のために、20 秒近くも待たされてはかなわない。方式 3 (C=2) は、待ち時間に大きな効果を生む。この理論式は、図 9 右側の待ち行列モデルの待ち時間に 2

分の1を乗じたものを使っている。一致は、すくなくとも、このλの範囲では良好である。

方式2, 3で待ちを生じさせている最大の原因は、ボトルネックとなる従量電灯Aの電源利用率である。いくら多くの蓄電用EDLCを設けても、 μ EVの台数が多くなり、充電するチャンスが商用電源利用率で50%を越えようと、限界がある。一方で、ほどほどの平均到着率の場合には、蓄電EDLCを2個利用する方式3の待ち時間は短い。蓄電EDLCを2個利用する方式3のメリットが大きい。蓄電EDLCを3個以上設置すれば、更に、待ち時間は減少するが、メモリーインタリーブと同様に、個数を増やす効果は、個数が大きくなるにつれて効かなくなると推定される。更に、方式3でも、商用電源の利用率が高くなると図9右側の待ち行列モデルがその処理限界となる。

また、図11は、平均到着率λと電力料金(年間)を比較したものである。少なくとも、平均到着率が0.02以下では、従量電灯Aを用いる方式2, 方式3が有利である。しかし、その差額は(電力総額がそう大きくないこともあり)4万円~6万円である。10年利用しても、50万円程度である。このため、方式3(C=2)を採用しようとする、EDLCを含めた電子回路のコストはそれ以下に納める必要がある。現状では、2500FのEDLCの定価は2万3千円程度であり、これを、20本利用すると、それだけで、50万円近くなる。しかし、EDLCは鋭意研究野進められている技術分野であり、大量生産によるコスト低減と、新しい部品技術の登場に期待したい。

6 おわりに

本稿では、 μ EVのためのEDLC間歇充電システムについて定義し、待ち行列理論による待ち時間解析に加え、システムの各方式のモデルから消費電力量と電気料金の算出を行った。そして、得られたデータから、最適なEDLC間歇充電システムの構成法について考察した。結果としては、蓄電用EDLCという、電力会社からの電力を一時的に溜めておくバッファを2個設ける構成法が最適であるとの結論を得た。これにより、電力をあまり使用しないと考えられる μ EVに向ける間歇充電システムにおいて、電気をあまり使えない従量電灯A(関西電力)の様な電力契約でも μ EVの利用者の充電待ち時間を減らし、利便性を向上できるものとする。

本研究の一部は、「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」(平成26年~平成30年, 事業番号S1411030, 代表者・佐藤 健哉)「科学研究費補助金」, (平成27年~平成29年, 基盤C, 課題番号15K00322, 代表者・金田 重郎)の支援を受けている。

参考文献

- 1) 欧州におけるLRTへのEDLC適用例としては、Siemens社の製品が知られている。
<http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/urban-mobility/rail-solutions/trams-and-light-rail/pages/trams-and-light-rail.aspx>
- 2) SUZUKI Web サイト,
<http://www.suzuki.co.jp/welfare/tc1a/>
- 3) ニチコン JJD0E258MSEF, ニチコン株式会社 Web サイト,
http://products.nichicon.co.jp/ja/product_detail.cfm
- 4) 関西電力 Web サイト, <http://kepco.jp/ryokin/menu>
- 5) 岡崎迪夫, 電気2重層キャパシタと蓄電システム 第3版, 日刊工業新聞社, 東京, 2005
- 6) 北岡正敏, 例題で分かる 待ち行列理論入門, 日本理工出版会, 東京, 2010
- 7) 木村俊一, “M/G/s 待ち行列の近似式の有効性について”, オペレーションズリサーチ: 経営の科学 33(5), pp226-229, May.1988.
- 8) 高橋幸雄, “やさしい待ち行列 (3) ランダムネスと待ち時間”, オペレーションズリサーチ: 経営の科学 41(1), pp35-40, Jan.1996.
- 9) aGPSS Web-site, <http://agpss.com/>
- 10) Richard Born, Ingolf Stahl, “Modeling Business Processes with a General Purpose Simulation System”, Beliber, 2011.

A Path Loss Calculation Formula based on Ray-tracing Approach in Over-the-corner Vehicle to Vehicle Communication Environment

Ippei SUGAE*, Hisato IWAI* and Hideichi SASAOKA*

In propagation analysis in a wireless communication environment including vehicle-to-vehicle communication, the ray-tracing technique based on high frequency approximation is often used. At this moment, the ray-tracing is the only realistic propagation analysis method which can balance the tradeoff between a reality of a calculation and the calculation accuracy at a practical level. But, for instance, at the purpose for a simulation of a vehicle-to-vehicle communication system, simpler calculation method is required. In this paper, assuming a vehicle-to-vehicle communication environment at an NLOS (Non Line-of-Sight) as a target, the ray-tracing calculation is simplified to realize the simpler calculation. We propose a path loss calculation formula by which calculation of the same propagation loss as the 3D ray-tracing is obtained. The proposed method is based on the simplified method in the two-dimensional environment which has already been proposed. Three dimensional calculation is simply realized by considering a ground reflection path. Also the simplified assumptions in the conventional proposed are removed to realize higher accuracy. By the modifications and additions, closer approximation of the propagation loss to that by the 3D ray-tracing is obtained. The propagation loss calculated by the proposed method is compared with that by the 3D ray-tracing and the accuracy is evaluated.

Key words : ITS, Vehicle-to-Vehicle communication, Path loss, Simplified calculation formula, Ray-tracing

キーワード : ITS, 車車間通信, 伝搬損失, 簡易計算式, レイトレーシング

見通し外車車間通信環境におけるレイトレーシングに基づく 伝搬損失簡易計算式

菅江 一平, 岩井 誠人, 笹岡 秀一

1. まえがき

交通事故防止対策として, 安全性の高い運転支援システムの開発が求められている¹⁾. 中でも車車間通信や路車間通信を利用したインフラ協調システムの開発が盛んである. このような目的に対して日本では 760MHz 帯の割当が決定し, 2015 年にサービスが開始された²⁾. 北米においても 5.9GHz 帯を利用したサービスが 2016 年に開始予定である³⁾. このように近年様々な周波数を利用した ITS(Intelligent Transport System: 高度道路交通システム)のサービスが検討されているが, 無線通信に

基づくサービスの実現には伝搬特性の把握が必要である. 交通システムのような安全に関するアプリケーションには, 伝搬特性の把握・計算にも特に高い信頼性が要求される.

ITS 無線通信を含む移動通信環境の伝搬特性解析には, レイトレーシングが多用される. 近年 FDTD(Finite Difference Time Domain)のような電磁界解析手法を伝搬特性に用いる例⁴⁾も増えてきているが, FDTD が要求する計算量及びメモリ量を考慮すると, 現時点ではまだ必ずしも現実的ではない. それに対して, 高周波近似により電波を光線(レイ)

* Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan
Telephone: +81-774-65-6267, Fax: +81-774-65-6801, E-mail: euo1306@mail4.doshisha.ac.jp

として近似して幾何学的な伝搬経路を求め、送受信点間に存在する複数のレイを合成して伝搬特性を求めるレイトレーシングは、その計算量及び計算精度が、実用に十分なレベルでバランスが取れた方式である。移動通信環境の伝搬特性解析手法として、現状では唯一の現実的な方法であると言える。しかしながら、レイトレーシングを用いても、多量の無線チャンネルの計算を必要とするような目的に対しては、その計算量は現実的とは言えない。例えば ITS のシミュレーションでは、一つの街レベルの広がりを持つ空間を対象として多量の車両を道路上に配置し、すべての車両間の無線チャンネルの伝送特性を、車両位置の時間変化に対応しながら求める必要がある⁵⁾。そのようなチャンネル特性を計算し、有意なシミュレーション結果を得るには、レイトレーシングは必要とする計算量が明らかに大きすぎる。このような目的に対しては、道路形状パラメータの関数として伝搬損失が計算により求めることができるような、数式に基づく伝搬損失計算式が有効である。

レイトレーシングと同様の結果を数式で表す手法として、経験的アプローチと理論的アプローチの二つが提案されている。経験的なアプローチの代表例として、伊藤・多賀等による回帰モデル式がある⁶⁾⁷⁾。これは周波数や道路幅、交差点から送受信点までの距離、送受信アンテナ高、等をパラメータとしてレイトレーシング計算結果を重回帰分析して回帰モデル式を求めている。ITSシミュレーションの伝搬損失計算では多用されるモデルである。これに対し、理論的アプローチは、レイトレーシング結果を解析し、理論的に式を簡易化するものである。このアプローチは、レイトレーシングの解析等により伝搬損失が、反射波が支配的な領域と回折波が支配的な領域に分割されるということを利用し、反射波と回折波各々をレイトレーシング計算を簡易化することで数式化する。また数式化した波を合成することで全体の伝搬損失結果を得るという方法が良く用いられる。代表例としては、ITU-R 勧告モデルに規定されているマイクロセル移動通信におけるストリートキャニオン環境用の伝搬損失計算式(以後、ITU-R モデルと呼ぶ)⁸⁾⁹⁾が挙げられる。また

このモデルは ITS シミュレーションの中でも良く用いられている⁵⁾。この理論的アプローチは経験的アプローチに対して物理的根拠が有り、その結果として伝搬メカニズムを理解するために有用である。本稿において検討するアプローチは、この理論的アプローチである。

筆者らはこれまでに、対象環境を交差点越え車車間通信環境に限定することにより、レイトレーシング自体を簡易化し、理論的に伝搬損失の計算を可能とする式を提案した(以後、簡易計算式と呼ぶ)¹⁰⁾。簡易計算式は、対象を二次元環境に限定し、また送受信点を道路の中央に固定する、反射波は必ず交差点のある一地点を通過する、等の簡易化条件を付加することにより、処理負荷を低減し、他の手法に比べ、レイトレーシング計算に近い手法であり、精度良く二次元レイトレーシングを簡易している。この手法は交差点越え見通し外車車間通信環境の伝搬メカニズムを上手く捉えたもので、二次元レイトレーシングには精度良く一致したが、実際の環境である三次元レイトレーシングに対する一致度が高くないという問題がある。本稿では、三次元レイトレーシングによる計算結果に対する誤差を低減することを目的に、三次元空間に拡張した場合や送受信点が道路幅方向に移動した場合を想定し、簡易計算式を基本とした以下の 2 つの修正簡易計算式を提案する。

- ① 大地反射波を考慮した三次元環境を対象とする修正簡易計算式 1
- ② ①に加え、送受信点位置および反射波経路に関する条件を除外した修正簡易計算式 2

さらに、これらの計算式による伝搬損失の計算結果をレイトレーシングによる計算結果と比較し、その計算精度を評価する。また従来見通し外伝搬損失計算式として、理論的アプローチである ITU-R モデルによる計算結果とも比較する。

なお、本論文で対象とする車車間通信環境はマイクロセル移動通信のストリートセル環境と同じであるが、送受信点は共に低アンテナ高であり、建物上部による回り込み回折の影響は考慮しない。また、ITSシミュレーションに用いるためには、見通し内

伝搬モデルも必要であるが、本稿では見通し外に対象を限定する。見通し内伝搬モデルについては、伊藤・多賀等が提案している車車間通信環境における見通し内伝搬損失モデル⁶⁾や ITU-R 勧告モデルに規定されているマイクロセル移動通信におけるストリートキャニオン環境用の見通し内伝搬損失計算式⁸⁾等がある。

2. 交差点モデルと簡易計算式

2.1. 交差点モデル

本稿で想定する交差点モデルを Fig. 1 に示す。建物の壁面の高さは無限大とする。

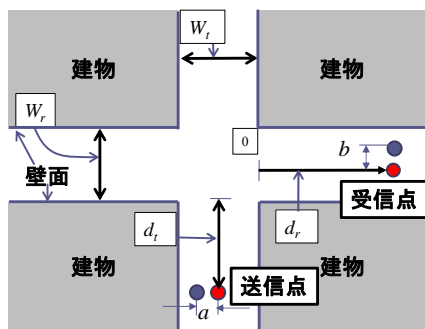


Fig. 1 Intersection model.

Table 1 Common parameters

周波数	760MHz, 5.9GHz		
偏波	垂直		
交差点から受信点までの距離 d_r	10-1000m		
材質	壁面 (コンクリート)	比誘電率	7.0
		比透磁率	1.0
		導電率	0.0023S/m
	地面 (アスファルト)	比誘電率	3.0
		比透磁率	1.0
		導電率	0.0001S/m

W_b, W_r は送受信側の道路幅, d_t, d_r は送受信点から交差点までの距離, a, b は送・受信点の道路中央からの変位量である。これ以後、レイトレーシングや伝搬損失計算式の計算に用いる共通のパラメータを Table 1 に示す。また、比誘電率等の電気定数は

周波数によらず定数として扱う。以後の定量的評価において示す特性は、全て横軸を d_r とした伝搬損失の距離特性である。 d_r は 0.4m 間隔で取得し、2m 間隔の短区間中央値処理をしている。

2.2. 簡易計算式

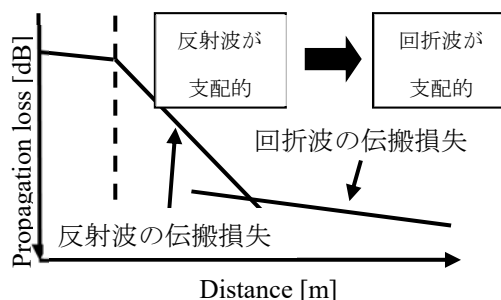


Fig. 2 General characteristics of propagation loss at an intersection.

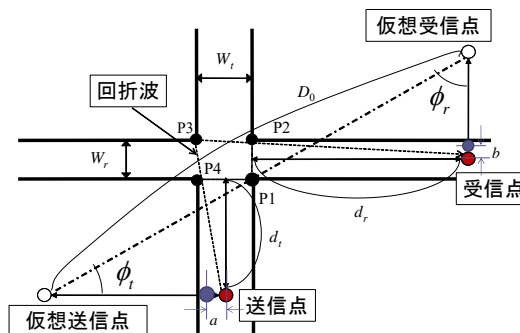


Fig. 3 Conceptual diagram of calculation method of simplified model.

車車間通信環境における見通し外の伝搬損失は、Fig. 2 に示すように、反射波が支配的な領域と回折波が支配的な領域に分けることができる¹¹⁻¹²⁾。筆者らが既に提案している車車間通信環境における伝搬損失計算式(簡易計算式)は、レイトレーシングにおける反射波が支配的な領域と回折波が支配的な領域における複数のパスを簡易な計算により計算し、その合成として受信電力を求め、伝搬損失を計算する手法である¹⁰⁾。

この手法は、送受信点は道路の中央に配置し、Fig. 3 に示すように反射波は必ず P1 を、回折波は必ず P3 を通るという条件を課し、大地反射波を考慮しない二次元環境で伝搬損失を求めることで計算の

簡易化を図っている。レイトレーシングでは反射回数は整数値であり、仮想送受信点を結んだ線が P1-P2 間のどの位置を通過するのかは道路幅等のパラメータに依存する。このモデルでは簡易化を目的として、仮想送信点を結んだ線が P1 を通ると仮定する。この場合、反射回数は非整数となる。反射波が P1 を必ず通るという条件により、送受信点の最短伝搬経路は送受信点の両側の壁面までの距離を最小反射回数分移動させた仮想送信点、仮想受信点の各点と P1 を結ぶ経路の合計により計算される。最小反射回数は道路幅や送・受信点と交差点までの距離によって一意に計算することができる。計算方法および各変数の詳細は文献¹⁰⁾を参照頂きたい。

○反射波の伝搬損失 L_R [dB] :

$$L_R = 20 \log \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) - 10 \log \left(\left(\frac{R(\phi_t)^+ R(\phi_r)^-}{D_0} \right)^2 + \left(\frac{R(\phi_t)^+ R(\phi_r)^-}{D_{t,r}} \right)^2 + \left(\frac{R(\phi_r)^- R(\phi_t)^+}{D_{r,t}} \right)^2 \right) \quad (1)$$

ただし、 λ は波長[m]、 $R(\phi)$ は壁面に対して角度 ϕ で入射する場合の反射係数である。偏波については、二次元環境であると仮定し、全て垂直偏波成分のみを対象とする。

式(1)によって与えられる L_R の構成は、第 1 項の自由空間伝搬損失の距離を除いた係数部と、第 2 項の伝搬距離損失および反射損失部である。第 2 項の $10 \log$ 内の第 1 項は、最小反射回数パスの送受信側壁面での反射損失(n 回の多重反射)と伝搬経路長に相当する距離損失である。また第 2 項の $10 \log$ 内の第 2 項および第 3 項は、第 1 項の最小反射回数パスから、送信側および受信側で反射回数を 1 回ずつ増加させ、もう一方を 1 回ずつ減少させたパスの同損失である。 L_R は、これら 3 パスを合成したものである。

・最小反射回数 n [回](送・受信側の壁面への反射回数的一方を増加、もう一方を減少させた場合の反射回数: n^+ [回], n^- [回]):

$$n = A - 1/2, \quad (A \equiv \sqrt{d_t d_r / W_t W_r}) \\ n^+ = A + 1/2, \quad n^- = A^2 / (A + 1) - 1/2$$

・最小反射回数パスの送受信側の壁面への入射角 ϕ , ϕ [rad] (送・受信側の反射回数的一方を増加、もう一方を減少させた場合の送・受信側の壁面への入射角: $\phi_{(t,r)^+}$ [rad], $\phi_{(r,t)^-}$ [rad]):

$$\phi_t = \arctan \left(\frac{d_r}{A W_t} \right), \quad \phi_r = \pi/2 - \phi_t$$

$$\phi_{(t,r)^+} = \arctan \left(\frac{d_{(t,r)}}{(A+1)W_{(t,r)}} \right), \quad \phi_{(r,t)^-} = \pi/2 - \phi_{(t,r)^+}$$

・送・受信点間距離 D_0 [m](送・受信側の反射回数的一方を増加、もう一方を減少させた場合の送受信点間距離: $D_{(t,r)^+}$ [m]):

$$D_0 = \sqrt{(A W_t + d_r)^2 + (A W_r + d_t)^2}, \\ D_{(t,r)^+} = \sqrt{\left((A+1)W_{(t,r)} + d_{(r,t)} \right)^2 + \left(\frac{A^2}{A+1} W_{(r,t)} + d_{(t,r)} \right)^2}$$

○回折波の伝搬損失 L_D [dB] :

$$L_D = 20 \log \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) + 20 \log \left(\frac{60\pi}{19\sqrt{3}\lambda} \right) - 10 \log \left(\sum_{n=0}^4 \sum_{n_r=0}^{4-n} \frac{(R^n(\theta_{n_r}) R^n(\theta_{n_t}))^2}{s_{1,n_r} s_{2,n_r} (s_{1,n_r} + s_{2,n_r})} \right) \quad (2)$$

Fig. 1 に示す交差点モデルにおいて回折波が支配的となる送受信点が交差点遠方となる環境では、交差点の 4 つのエッジで回折するパスの内、最も強度の大きいパスは点 P3 を通過するパスであり、この環境では点 P3 の入射角と出射角のなす角度は 90° に近い。この考えに基づき、式(2)ではこの角度を 90° に近似し、回折係数を固定値に近似している。式(2)で与えられる L_D の構成は、第 1 項の自由空間伝搬損失の距離を除いた係数部、第 2 項の近似した回折係数部と、第 3 項の回折前後に生じる道路壁での反射を最大 4 回まで考慮し、合計 15 パスの計算をしている反射損失および伝搬経路長に相当する距離損失である。

・送受信点から回折点までの伝搬距離 s_{1,n_r} , s_{2,n_r} [m]:

$$s_{1,n_r} = \sqrt{((n_r + 1/2)W_r)^2 + (W_r + d_r)^2},$$

$$s_{2,n_r} = \sqrt{((n_r + 1/2)W_r)^2 + (W_r + d_r)^2}$$

• 送受信側それぞれの道路壁への入射角 θ_{nr} , θ_{nr} [rad]:

$$\theta_{n_r} = \arctan\left(\frac{W_r/2 + d_r}{(n_r + 1/2)W_r}\right), \quad \theta_{n_r} = \arctan\left(\frac{W_r/2 + d_r}{(n_r + 1/2)W_r}\right)$$

○ 送受信点間の伝搬損失(反射波と回折波を合成した伝搬損失) L [dB]:

$$L = -10\log(10^{-L_n/10} + 10^{-L_d/10}) \quad (3)$$

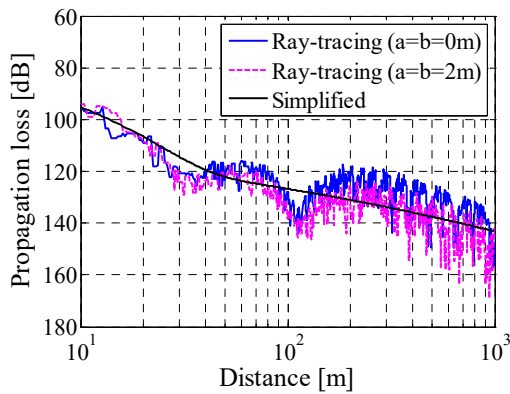


Fig. 4 Comparison between 3D ray-tracing and simplified method when transmitting and receiving points move to road width direction.

ここでは、この簡易計算式による計算結果と送受信点が道路幅方向に変位した場合の三次元のレイトレーシングによる計算結果を比較する。評価環境は、Fig. 1 の交差点モデル、Table 1 の共通パラメータを用い、周波数は 5.9GHz とする。送、受信側道路幅は 6m, 10m, 送信点から交差点までの距離は 30m, 送、受信アンテナ高は 2m, また送受信点の道路中心から道路幅方向への変位量 a , b をそれぞれ 0m, 0m と 2m, 2m の 2 パターンとする。レイトレーシング計算における最大反射回数は 6 回, 最大回折回数は 1 回として計算する。三次元レイトレーシングによる伝搬損失計算においては、受信点に到来する複数パスを、電界次元で合成する結果(図中:Ray-tracing)を示す。

Fig. 4 は、三次元レイトレーシングおよび簡易計算式によって得た受信点距離 d_r に対する伝搬損失特性を示している。また、簡易計算式による結果(図中:Simplified)を併せて示している。

Fig. 4 において簡易計算式と三次元のレイトレーシングの比較により、比較的交差点に近い領域で近い結果が得られ、交差点から遠方の領域において誤差が大きいことがわかる。これは、簡易計算式では考慮していない大地反射波が存在し、その影響により誤差が生じていると考えられる。これは、直接波と大地反射波による大地反射二波モデルと同じ現象である。また送受信点の道路幅方向への変位有無による、三次元のレイトレーシング結果を比較すると、Fig. 4 の 10-20m 付近においては、計算誤差が大きいことがわかる。これは、レイトレーシングでは送受信点の位置が変化することで、反射波の有無や経路が変化するため、伝搬損失が変化し、計算結果に誤差が生じたものと考えられる。

以上の結果より、簡易計算式で三次元空間を考慮する場合と送受信点の位置を道路中央より変更を考慮する場合は、簡易計算式を修正する必要があると考えられる。

3. 修正簡易計算式

本章では、まず大地反射波を考慮し、簡易計算式を三次元空間に拡張する。次に送受信点を交差点中央の固定、および反射波は P1 を必ず通るという制約条件を除外することで、計算精度のさらなる向上を図る。

3.1. 修正簡易計算式 1

大地反射波を考慮し、簡易計算式を三次元空間に拡張するため、大地反射二波モデルの考え方を適用する。つまり、簡易計算式の式(1)の 3 パス、(2)の 15 パスそれぞれに対して大地反射波を追加することによって、大地反射波を考慮した修正簡易計算式を構築する。送受信アンテナ高に比べて水平距離が十分に大きい環境では、大地反射波の伝搬距離は二次元で探索したパス(以後:二次元パス)とおおよそ等しく、交差点遠方になるにつれて、二次元パスと

大地反射波の位相関係は逆相に近い位相となり、これらを合成することによって、大地反射二波モデルとなる¹³⁻¹⁴⁾。一方、周囲の壁面による反射波間の伝搬距離差は波長に比べ十分に大きいと考えられ、それに伴う位相差は $0\sim 2\pi$ の範囲でランダムに分布すると考えられる。位相が無相関に変化する際には、空間的な平均電力は、各到来波の電力和で近似できる。大地反射二波モデルは、送受信点間を上空から俯瞰した二次元距離を d [m]とし、 d が送受信アンテナ高に対して十分大きい場合、送受信点間の直接波と大地反射波の伝搬距離の差は $2h_t h_r / d$ と近似できる¹⁵⁾。それ故、大地反射二波モデルによる受信レベルの減衰は、

$$\left| 1 - \exp\left(-jk_0 \frac{2h_t h_r}{d}\right) \right| \cong \left| 2 \sin \frac{k_0 h_t h_r}{d} \right| = \left| 2 \sin \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right| \quad (4)$$

と近似できる。 $k_0=2\pi/\lambda$ は波数である。そこで、二次元環境でのパスそれぞれを大地反射二波モデルで表し、それらを電力合成することで、簡易計算式を三次元空間に拡張する。このような考え方に基づいて拡張した修正簡易計算式1を以下に示す。

○反射波の伝搬損失 $L_{R,M1}$ [dB]:

$$L_{R,M1} = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) - 10 \log\left[\left| 2 \left(\frac{R(\phi_r) R(\phi_t)}{D_0} \right) \sin\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda D_0}\right) \right|^2 + \left| 2 \left(\frac{R(\phi_r)}{D_{r,1}} \right) \left(\frac{R(\phi_t)}{D_{t,1}} \right) \sin\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda D_{r,1}}\right) \right|^2 + \left| 2 \left(\frac{R(\phi_r)}{D_{r,2}} \right) \left(\frac{R(\phi_t)}{D_{t,2}} \right) \sin\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda D_{r,2}}\right) \right|^2 \right] \quad (5)$$

○回折波の伝搬損失 $L_{D,M1}$ [dB]:

$$L_{D,M1} = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 20 \log\left(\frac{60\pi}{19\sqrt{3}\lambda}\right) - 10 \log\left[\sum_{n_r=0}^4 \sum_{n_t=0}^{4-n_r} \left| \frac{2(R^n(\theta_{n_r}) R^n(\theta_{n_t})) \sin\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda(s_{1,n_r} + s_{2,n_t})}\right)}{s_{1,n_r} s_{2,n_t} (s_{1,n_r} + s_{2,n_t})} \right|^2 \right] \quad (6)$$

○送受信点間の伝搬損失 L_{M1} [dB]:

$$L_{M1} = -10 \log\left(10^{-L_{R,M1}/10} + 10^{-L_{D,M1}/10}\right) \quad (7)$$

式(5)や式(6)は、それらの水平伝搬距離から得られる直接波と大地反射波の距離差および大地反射係数(大地と水平に入射と近似し、-1)を考慮して得られる電界次元の増減係数である \sin の項を掛け合わせた表現となっている。

3.2. 修正簡易計算式 2

Fig. 3 に示すように、簡易計算式では反射波は P1 を通るという近似条件を課していた。この条件を除外し、Fig. 5 に示すように P1 と P2 の間を通過するという条件に変更する。反射波が P1 と P2 の間を通過する直前に反射する壁面は、必ず送信側道路の P4 側の壁面である。そのため、仮想送信点と P1, P2, P4 を結ぶ直線の発射角をそれぞれ ϕ_1, ϕ_2, ϕ_4 とした場合、P1 と P2 の間を通過する条件は、仮想送信点からの発射角、つまり送信側の道路壁面に対する入射角、 ϕ が $\phi_1 \leq \phi \leq \min(\phi_2, \phi_4)$ の条件を満たすことである。これに加えて、道路中心からの変位量 a, b ($-W_r/2 < a < W_r/2, -W_r/2 < b < W_r/2$) を送受信点位置のパラメータとして修正簡易計算式 1 に追加することで、修正簡易計算式 2 とする。

なお、簡易計算式や修正簡易計算式 1 では、 ϕ, ϕ_r は道路パラメータより一意に計算できるが、修正簡易計算式 2 では、反射回数を変化させて P1 と P2 の間を通過する条件に合う角度を求める計算が必要となる。修正簡易計算式 2 を以下に示す。

○反射波の伝搬損失 $L_{R,M2}$ [dB]:

$$L_{R,M2} = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) - 10 \log\left[\sum_{n_r=0}^N \sum_{n_t=0}^{N-n_r} \left| 2 \left(\frac{R(\phi_r)^{n_r} R(\phi_t)^{n_t}}{D} \right) \sin\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda D}\right) \right|^2 \right] \quad (8)$$

修正簡易計算式 2 の最大反射回数 N は、特に見通し外環境のように、反射回数が増加する傾向にある場合、反射波のパスの伝搬経路に影響を与え、伝搬損失が変化する。そのため、 N は、レイトレーシングの最大反射回数と一致させることで、パスの伝搬経路を同等のものとでき、推定精度を向上させることができる。

• 反射波の伝搬距離 D [m]:

$$D = \sqrt{\left(\left(n_r + \frac{1}{2} \right) W_r - (2 \bmod(n_r, 2) - 1) a + d_r \right)^2 + \left(\left(n_t + \frac{1}{2} \right) W_r - (2 \bmod(n_t, 2) - 1) b + d_t \right)^2}$$

• 送受信側の壁面への入射角 ϕ, ϕ_r [rad]:

$$\phi = \arctan \left[\frac{\left(\left(n_r + \frac{1}{2} \right) W_r - (2 \bmod(n_r, 2) - 1) b + d_t \right)}{\left(\left(n_t + \frac{1}{2} \right) W_r - (2 \bmod(n_t, 2) - 1) a + d_r \right)} \right], \quad \phi_r = \pi/2 - \phi$$

- 交差点通過条件

$$\phi_{p1} \leq \phi_t \leq \min(\phi_{p2}, \phi_{p4})$$

○回折波の伝搬損失 $L_{D,M2}$ [dB]:

$$L_{D,M2} = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 20 \log\left(\frac{60\pi}{19\sqrt{3}\lambda}\right) - 10 \log\left(\sum_{n_r=0}^4 \sum_{n_t=0}^{4-n_r} \frac{2(R^{n_r}(\theta_{nr})R^{n_t}(\theta_{nt}))\sin\left(\frac{2\pi h_r h_t}{\lambda(s_{1,nr} + s_{2,nr})}\right)}{(s_{1,nr}s_{2,nr}(s_{1,nr} + s_{2,nr}))^2}\right)^2 \quad (9)$$

- 送受信点から回折点までの距離 $s_{1,nr}, s_{2,nr}$ [m]:

$$s_{1,nr} = \sqrt{\left((n_r + 1/2)W_r + (2 \bmod(n_r, 2) - 1)a\right)^2 + (W_r + d_r)^2}$$

$$s_{2,nr} = \sqrt{\left((n_r + 1/2)W_r + (2 \bmod(n_r, 2) - 1)b\right)^2 + (W_r + d_r)^2}$$

- 送受信点と回折点の入射角 θ_{nr}, θ_{nr} [rad]:

$$\theta_{nr} = \arctan\left(\frac{W_r + d_r}{(n_r + 1/2)W_r + (2 \bmod(n_r, 2) - 1)a}\right)$$

$$\theta_{nr} = \arctan\left(\frac{W_r + d_r}{(n_r + 1/2)W_r + (2 \bmod(n_r, 2) - 1)b}\right)$$

○送受信点間の伝搬損失 L_{M2} :

$$L_{M2} = -10 \log\left(10^{-L_{R,M2}/10} + 10^{-L_{D,M2}/10}\right) \quad (10)$$

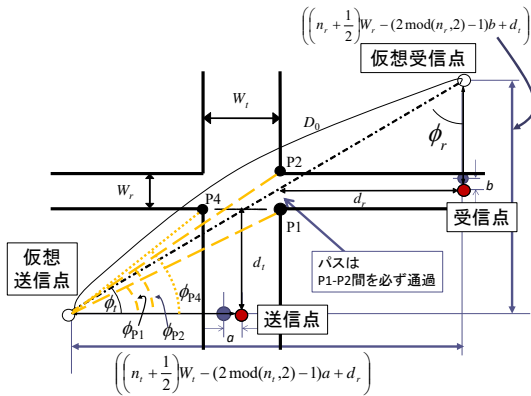


Fig. 5 Conceptual diagram of calculation method of modified model 2.

4. 修正簡易計算式の精度評価

4.1. 伝搬損失計算式とレイトレーシングの伝搬損失距離特性の比較

比較する環境のパラメータを Table 2 に示す. レイトレーシングの最大反射回数は 6 回, 最大回折回数は 1 回とする. 修正簡易計算式 2 の反射波のみで

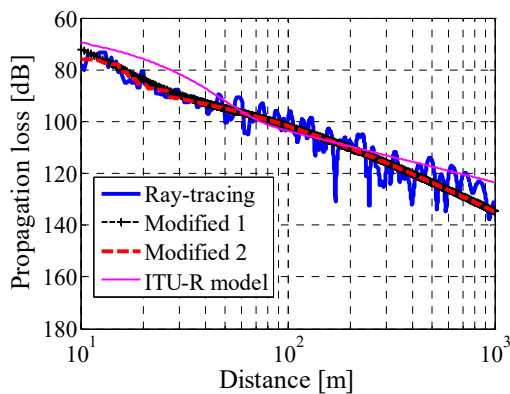
構成されるパスの最大反射回数 N は 6 回とする. 伝搬損失距離特性比較のため, 修正簡易計算式 1 (Modified 1) および修正簡易計算式 2 (Modified 2) と三次元レイトレーシングによる結果の比較を Fig. 6 に示す. またストリートキャニオン環境の伝搬損失計算式の中でも, 本稿の手法と比較的近い理論的モデルであり, ITU-R によって勧告化されている ITU-R モデル(図中: ITU-R model)⁸⁾による結果を同時に示す. このモデルは, 本稿と同様に反射波, 回折波が支配的な領域をそれぞれ計算し, それらの合成によって計算しているものである.

Fig. 6 より, 周波数や送信アンテナ高によらず修正簡易計算式 1 および 2 はレイトレーシング結果と良い一致を示すことがわかる. また修正簡易計算式 2 は修正簡易計算式 1 に比べ, レイトレーシングの結果と良い一致が見られた. これは, 修正簡易計算式 2 は, 交差点の固定点を通る, 送受信点を道路中心に固定するという簡易化条件を除外し, 交差点通過条件によってパスの有無を考慮していることから, レイトレーシングにより近い計算となるためであると考えられる. さらに Fig. 6(b) の 25-60m 付近において, 修正簡易計算式 1 に対し, レイトレーシングの伝搬損失が増加しているが, これは, レイトレーシングの最大反射回数の影響で, 反射波のみで構成されるパスが到達できないためであると考えられる. 修正簡易計算式 2 の最大反射回数 N が, レイトレーシングと同じ 6 回であるため, 修正簡易計算式 2 の結果が修正簡易推定式 1 の結果に対して, レイトレーシングの結果により一致させることができている. また修正簡易計算式 1 および 2 は, ITU-R モデルよりレイトレーシング結果により近い値を与えることがわかる.

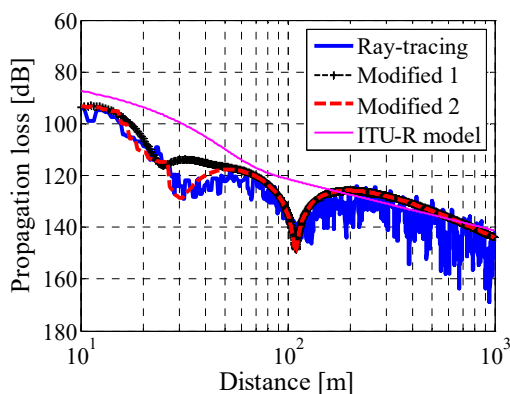
一方, 交差点より遠い回折波領域では, 修正簡易計算式 1 および 2 の計算結果がレイトレーシング結果に近い結果となっている. これは, 大地反射二波モデルを適用して, 三次元に拡張したためであると考えられる.

Table 2 Parameters of comparison environments

パラメータ	値
送信アンテナ高 h_t	2m
受信アンテナ高 h_r	2m
送信側道路幅 W_t	6m
受信側道路幅 W_r	10m
送信点から交差点までの距離 d_t	30m
送信点位置 a	2m
受信点位置 b	2m



(a) 760MHz



(b) 5.9GHz

Fig. 6 Comparison between ray-tracing and path loss calculation formulae.

4. 2. 伝搬損失計算式の定量的な精度評価

ここでは、レイトレーシング結果に対する各計算式の計算精度を定量的に評価する。比較する環境を Table 3 に示す。計算精度の指標としては、各計算式

により計算された伝搬損失とレイトレーシングによって計算された伝搬損失の dB 次元での二乗平均平方根誤差(Root Mean Square Error: RMSE)を用いる。これを Table 3 に示したパラメータの全ての組合せで求め、全体の RMSE を計算する。比較対象であるレイトレーシングの最大反射・回折回数をそれぞれ 6 回、1 回として計算する。

Table 3 に示した全ての組合せで求め、全体の RMSE を計算した結果を Table 4 に示す。

Table 4 の 760MHz において、簡易計算式よりも修正簡易計算式 1 および 2 は RMSE が 6dB 程度低減している。これは、修正簡易計算式 1 および 2 が大地反射波を考慮し、大地反射二波モデルを適用したことで、二次元環境では現れなかった直接波と大地反射波の打消しが発生し、簡易推定式よりも、三次元レイトレーシングの結果により近い計算結果となったと考えられる。5.9GHz において、修正簡易計算式 1 と簡易計算式が 1dB 以内の精度誤差であり、おおよそ同じ精度である。これは簡易計算式及び修正簡易計算式 1 は修正簡易計算式 2 とは異なり、反射波のみで構成されたパスが、必ず受信点に到達するため、エネルギーが大きくなっていると考えられる。それに対し、修正簡易計算式 2 は完全なレイトレーシングに近い計算手法であり、1.93dB の改善が見られた。

次に二つの修正簡易計算式の選択方法について述べる。出合い頭衝突事故防止の安全用途で車車間通信が利用される場合、求められる通信距離は、おおよそ 95m¹⁶⁾であり、比較的交差点から遠い領域であるが、二つの修正簡易計算式は共に有効である。修正簡易計算式 2 は送受信点の変位量及び、送受信点間のパスの到達有無、反射波のみで構成された最大反射回数まで考慮することが可能であり、よりレイトレーシングに近い計算手法であるため、走行車線等、厳密に伝搬損失を計算したい場合に選択する。また修正簡易計算式 1 は、従来の簡易計算式に大地反射波を考慮したモデルであり、修正簡易計算式 2 よりも簡易な計算式でありながら、修正簡易計算式

2 との相対誤差が 2dB 程度であるため、伝搬損失を簡易に計算したい場合に選択されたい。

Table 3 Parameters of comparison environments.

パラメータ	値
送信アンテナ高 h_t	1, 2, 5m
受信アンテナ高 h_r	1, 2m
送信側道路幅 W_t	6, 10, 20, 50m
受信側道路幅 W_r	6, 10, 20, 50m
送信点から交差点までの距離 d_t	10-100m(10m 間隔)
送, 受信点位置 (a, b)	(0m, 0m) (1m, 1m) (2m, 2m)

Table 4 RMSE of ray-tracing and proposed method.

伝搬損失計算式	760MHz	5.9GHz
簡易計算式	15.98dB	9.29dB
修正簡易計算式 1	9.72dB	9.57dB
修正簡易計算式 2	9.61dB	7.36dB
ITU-R モデル	18.40dB	16.86dB

5. まとめ

本稿では、筆者らが提案してきた交差点越え車車間通信環境における伝搬損失簡易計算式に、大地反射波を考慮した大地反射二波モデルを適用し三次元に拡張した修正簡易計算式 1 を提案した。さらに簡易計算式において簡易化のために設けた条件である、送受信点の道路中央への固定と、反射波は交差点の固定点を通過するという条件を除外し、よりレイトレーシング計算に近い修正簡易計算式 2 を構築した。次に、レイトレーシングに対する伝搬損失計算式の計算精度を比較した。修正簡易計算式 1 は、送受信点の位置を固定するなどの簡易化条件により、より簡易化された方法である。それに対し、修正簡易計算式 2 は完全なレイトレーシングに近い計算方法であるため、より計算精度が高くなることがわかった。また修正簡易計算式 1, 2 共に Σ や

不等式が入っており、単純な式計算ではないが、レイトレーシングと比較すると、格段に計算量は少なくなっているため、ITS シミュレーションにも十分に対応できる。さらにレイトレーシングは、計算機のプログラミングが避けられないが、これらの手法では表計算ソフトレベルで計算可能である。

参考文献

- 1) 小林茂男, “オープン ITS が拓く未来,” 情報管理, vol.56, no.6, pp.335-343, (2013).
- 2) トヨタ自動車株式会社, “ITS 専用周波数を活用した世界初の運転支援システム ITS Connect を新型車に採用,” <http://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/9652000/>, (2015).
- 3) General Motors Company, LLC, “Mary Barra Addresses Intelligent Transport Society,” <http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2014/Sep/0907-its-speech.html>, General Motors Company, LLC News Release, (2014).
- 4) 長谷川公嗣他, “FDTD 法を用いた複数形状の人体モデルによる伝搬損失特性の比較,” 日本シミュレーション学会論文誌, vol. 3, no.2, pp.24-35, (2011).
- 5) 財団法人 日本自動車研究所, “ITS 通信シミュレーション評価シナリオ (Ver 1.2),” <http://www.jari.or.jp/tabid/346/Default.aspx>, (2012).
- 6) 伊藤義信他, “車車間通信環境における見通し内伝搬損失推定,” 信学技報, AP2006-126, pp.95-100, (2007).
- 7) 伊藤義信他, “車車間通信環境における見通し外伝搬損失推定,” 2008 信学総大, B-1-61, (2008).
- 8) ITU-R, Rec. P.1411-8, “Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300MHz to 100GHz,” pp.11, (2015).
- 9) J. Wiart et al, “Analytical microcell path loss model at 2.2GHz,” Proc. PIMRC’93, pp.30-34, (1993).
- 10) 丹後俊宏他, “車々間通信における交差点見通し外環境での伝搬損失簡易推定法の検討,” 信学技報, AP2007-173, pp.1-6, (2008).
- 11) T. Tango, et al., “An analysis of propagation loss characteristics for inter-vehicle communications in non line-of-sight intersections using ray-tracing technique,” Proc. ISAP2007, POS1-19, (2007).
- 12) 秋元守他, “低基地局アンテナ高における道路曲がり角での電波伝搬に関する検討,” 信学’93 秋大, B-10, (1993).
- 13) V. Erceg et al, “Diffraction around corners and its effects on the microcell coverage area in urban and suburban environments at 900 MHz, 2 GHz, and 6 GHz,” IEEE Trans. Vehicle Technology, vol.43, no.3, pp.762-766, (1994).
- 14) J. S. Lu et al, “Site-specific model of the received power for radio communication in urban street canyons,” IEEE Trans. Antennas Propagation., vol.82, no.4, pp.2192-2200, (2014).
- 15) 進士昌明, 無線通信の電波伝搬, pp.269-273, (社)電子情報通信学会, (1992).
- 16) 総務省, “700MHz 帯安全運転支援システムについて,” http://www.soumu.go.jp/main_content/000281445.pdf, (2015).

Considering Query Processing and Optimization in RDBMS with Key-Value Store Function

Kenji HATANO* and Takamitsui SHIOI**

(Received April 30, 2015)

Currently, DBMSs being able to handle big data have two types of storages such as RDB and key-value storage. Conventional query optimizing approaches in the DBMSs usually classify issued queries according to their operation type (e.g. insert, delete, update, and so on), and select data storage to be used. In short, we have the potential to find other approach to improve query processing time if we focus on the type of each issued query to the DBMSs. In this paper, we propose a method for optimizing query processing in a RDBMS with key-value store function considering the type of each query to the DBMS.

Key words : Key-Value Store, RDBMS, Query Processing and Optimization

キーワード : Key-Value Store, RDBMS, 問合せ処理最適化

Key-Value ストア対応 RDBMS における問合せ処理最適化の一手法

波多野 賢治, 塩井 隆円

1 はじめに

近年, 様々なデバイスから多種多様なデータを収集し, それらをリアルタイム分析することで, 企業の経営戦略やコンシューマ向けの的確な情報提供を行うサービスに役立つビッグデータ分析が行われるようになった [1]. しかしながらビッグデータを利活用したいと考えている 70% の企業に対して, ビッグデータの利活用ができる企業は高等技術と大量資源を有する 1% のみと限られているのが現状である.

ビッグデータ分析を効率よく行うためには, 日々蓄積するデータを格納する機能と蓄積されたデータを分析するための機能が必要となるため, データを効率的に扱うためにデータベース管理システム (Database Management

System: DBMS) を用いることが一般的である. これまで DBMS は, 伝統的にリレーショナルデータベースシステム (Relational Database Management System: RDBMS) が用いられてきたが, ビッグデータ分析に必要となる DBMS の機能には, 処理分散のコストや負荷分散のし易さ, そしてシステムのサービスが提供できなくなる事態の発生頻度が少ないことを示す高可用性 (High Availability: HA) が挙げられるため, 最近ではキーバリューストア型データベースシステム (Key-Value Store Database Management System: KVSDBMS) が用いられるようになってきた [2].

KVSDBMS は RDBMS とは異なり, データの格納方式が行指向型ではなく列指向型を採用している. この列指向型データ格納方式は, プログラミング言語における連想配列や Map と同様, 単に Key と Value の

* Mobility Research Center, Doshisha University, Kyoto, Japan

Telephone : +81-774-65-7663, E-mail : khatano@mail.doshisha.ac.jp

** Graduate School of Culture and Information Science, Doshisha University, Kyoto, Japan

Telephone : +81-774-65-7656, E-mail : shioi@ilab.doshisha.ac.jp

ペアからなる非常に簡単なデータモデルに基づいているため、前述したビッグデータ解析に必要な機能をサポートできるようになっている。その反面、単純なデータモデルでしかないため、RDBMS で実現できている複雑なデータ検索や集計、またデータの一貫性保証といった機能に関しては、その実現が困難である。つまり、DBMS の機能の差を決定づけるのはデータ格納方式に依存していると言えるが、どちらかを用いているだけでは RDBMS/KVSDDBMS それぞれの問題に対応することができない。このことから、二種類の DBMS の得意とする処理を相互補完するためにこれらを組み合わせて運用する試みが始まっている [3-5]。

本稿では、こうした試みで未だ行われていない個々の問合せに対してどちらの DBMS を使用して問合せ処理を実行すべきかという点に着目し、列指向型データ格納可能な RDBMS (KVS-RDBMS) における問合せ最適化の一手法について検討する。

2 関連研究

1 節でも述べたように、昨今着目されているビッグデータを DBMS で扱うためには、RDBMS が得意とするオンライントランザクション処理 (Online Transaction Processing: OLTP) と KVSDDBMS が得意とするオンライン分析処理 (Online Analytical Processing: OLAP) の両方を一つのシステムで運用する必要がある。このような二つの処理の一体化はオンライントランザクション分析処理 (Online Transactional and Analytics Processing: OLTAP) と呼ばれており、実際に多くのデータベースベンダでもその採用が進んでいる [6-8]。本節では、この流れの先駆けとなった DBMS の研究をいくつか紹介する。

Fractured Mirrors は、多数列を利用する問合せの場合は RDBMS で、少数列を利用する問合せの場合は KVSDDBMS で処理を実行することで、効率的に問合せ処理が実行できるようになったものである [3]。当然、RDBMS/KVSDDBMS を共に利用する問合せでは、一方の DBMS を利用する問合せに比べて高速にクエリ処理を実行できるというメリットがある。また、データを RDBMS/KVSDDBMS それぞれのストレージに重複格納することによって、どちらか片方だけにデータアクセスが集中してしまった場合でも、アクセスを分散させるこ

とでそれぞれの問合せ処理の偏りにも対応できる。

C-store は、Fractured Mirrors と同様、RDBMS と KVSDDBMS それぞれが扱うデータストレージが存在するが、OLTP/OLAP それぞれの処理においてもさらに二種類のストレージを用意することで、データの更新処理をしながら参照処理も効率的に行う仕組みを確立している [4]。この仕組みは Tuple Mover と呼ばれているが、具体的には書込用ストレージに書き込まれた更新内容を、随時、読込指向ストレージへと更新していくというものである。つまり、データの挿入、削除、更新といった実際にディスクにアクセスされなければならない処理は負荷の高い書込用ストレージを、データの参照処理は読込用ストレージを使用するよう問合せ処理をそれぞれの DBMS に振り分けて運用するのである。

MicroSharding は NEC のスケールアウト型 DBMS である Inframe Relational Store (IRS)^{*} の中核となる技術であり、分散配置させてある KVSDDBMS のデータストレージにトランザクション機能を持たせることで、あたかも一つの RDBMS のデータストレージにデータが格納されているかのように振る舞わせるという機能を持っている [5]。したがって、Fractured Mirrors や C-store のように二種類のストレージを持っているのではない点がメリットとなっているが、RDBMS の適用領域すべてを網羅できない点が残っていることがデメリットとなっている。

3 提案手法

2 節で説明した関連研究では、主に RDBMS と KVSDDBMS が扱うデータストレージをどのように設計するのか、また、OLTP/OLAP それぞれの処理においてどちらの DBMS を利用するのかといった点に着目され、それぞれの研究が行われていた。そのため、更なる問合せ処理最適化を図るためには、問合せ個々に対してそれらの細部に着目した研究が行われるべきである。本稿では、それぞれのデータストレージの違いに着目し、既存の RDBMS の上で実装が進んでいる KVSDDBMS 用のストレージと従来のストレージをハイブリッドに運用する、KVS-RDBMS を用いた問合せ処理最適化について検討することにした^{**}。

^{*} NEC Inframe Relational Store: <http://jpn.nec.com/infotrame/relationalstore/>

^{**} 本提案の詳細は、文献 [9] を参照のこと。

KVSDBMS を用いることのメリットは、

- 分散化が容易かつ低コスト
- 高可用性

と 1 節でも述べたが、KVSDBMS 用のストレージはデータの圧縮が可能であるため、データを高速に検索するための索引機能が利用できないという制限が存在する。そのため、検索されるデータ数によっては KVSDBMS 用のストレージが RDBMS 用のストレージよりも性能が下がる可能性がある。このことを考慮し文献 [10] では、KVSDBMS 用ストレージを利用する条件を、

1. RDBMS 用ストレージを利用する際の結果件数が KVSDBMS 用ストレージのそれと比較して 60% 以下になった場合
2. RDBMS 用ストレージを利用する際に結合処理 3 回以上発生する場合

の二条件とし、それ以外の場合は RDBMS 用ストレージを使用するハイブリッド運用するようにしたが、相副問合せを含むような問合せの場合に処理速度が遅なってしまうことが分かった。これは、相副問合せ実行されると NestedLoop 結合が行われ、KVSDBMS 用のストレージ性能が下がることに起因すると推察される。このことから、上記条件を見直し、問合せ処理は基本的には KVSDBMS 用データストレージで行うが、相副問合せ処理を実行する場合にのみ RDBMS 用データストレージを用いるという、別形式のハイブリッド運用を行うこととした。

4 評価実験

提案手法の有用性を評価するために、DBMS の性能を評価するための組織であるトランザクション処理性能評議会 (Transaction Processing Performance Council: TPC) が提供する TPC-H ベンチマーク [11] のデータと問合せを用いた評価実験を行い、全 22 種類の各問合せに対して問合せ実行速度を計測した。TPC-H ベンチマークは意思決定支援システム用のベンチマークテストであり、ビッグデータの分析処理の性能を評価するために近年頻繁に用いられるものである。

本評価実験では、RDBMS/KVSDBMS 用ストレージ内に TPC-H ベンチマークで使用するデータをそれぞれ

格納し、RDBMS/KVSDBMS それぞれ単体で問合せ処理した時間と、3 節で提案した相副問合せ処理を実行する場合のみ RDBMS を、それ以外の場合は KVSDBMS を用いる手法の問合せ処理時間の結果を計測した。Table 1 と Fig. 1 は、全 22 種類の問合せ処理を 10 セット実行した平均実行時間である。

Table 1. Average Query Processing Times (sec.).

ストレージ	KVSDBMS	RDBMS	KVS-RDBMS
平均実行時間	106.02	9.17	6.88

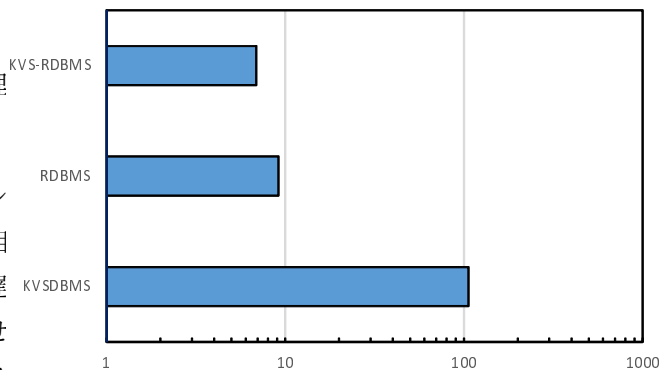


Fig. 1. Average Query Processing Times (sec.).

これらの結果から各 DBMS を単体で問合せ実行した場合に比べて、本提案手法である RDBMS/KVSDBMS をハイブリッド運用した KVS-RDBMS が最も高速に問合せ処理を実行可能であり、それぞれ 94%、25% 高速化が図れることが判明した。

5 おわりに

本稿では、KVS-RDBMS 上における問合せ処理最適化法の提案とその評価を行い、提案手法の有効性が判明した。

しかしながら、個々の問合せ、特に結合問合せに着目した場合、ハッシュ結合やマージ結合、ネステッド・ループ結合といった結合の種類によって、まだまだ処理の高速化が図れる部分が残されているように見受けられる。今後はさらに問合せの細部にまで着目し、更なる最適化を図っていく予定である。

また、今回の評価実験はデータベースサーバー一台で

行ったものだが，ビッグデータ分析を行う計算機環境は，基本，計算機の分散化が必須となる．したがって，そうした分散環境化での KVS-RDBMS 運用方法を検討する点が，今後検討すべき課題である．

本研究の一部は，文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 S1411030，および，科学研究費補助金 26280115 の支援を受けたものである．

参考文献

- 1) Adam Jacobs. The Pathologies of Big Data. *Communications of the ACM*, Vol. 52, No. 8, pp. 36–44, August 2009.
- 2) 首藤一幸. Key-Value ストアの基礎知識. *Software Design* 2010 年 2 月号, pp. 14–21. 技術評論社, January 2010.
- 3) Ravishankar Ramamurthy, David J. DeWitt, and Qi Su. A Case for Fractured Mirrors. In *Proceedings of the 28th International Conference on Very Large Data Bases*, pp. 430–441. VLDB Endowment, August 2002.
- 4) Mike Stonebraker, Daniel J. Asadi, Adam Batkin, Xuedong Chen, Mitch Cherniack, Miguel Ferreira, Edmond Lau, Amerson Lin, Sam Madden, Elizabeth O’Neil, Pat O’Neil, Alex Rasin, Nga Tran, and Stan Zdonik. C-Store: A Column-Oriented DBMS. In *Proceedings of the 31st International Conference on Very Large Data Bases*, pp. 553–564. VLDB Endowment, August 2005.
- 5) Junichi Tatemura, Oliver Po, and Hakan Hacgümiş. Microsharding: A Declarative Approach to Support Elastic OLTP Workloads. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, Vol. 46, No. 1, pp. 4–11, January 2012.
- 6) Roland Seiffert. Online Transactional and Analytics Processing using SPSS, DB2 z/OS, DB2 Analytics Accelerator, March 2013. http://www-304.ibm.com/connections/blogs/systemz/entry/online_transactional_and_analytics_processing.
- 7) Franz Färber, Sang-Kyun Cha, Jürgen Primsch, Christof Bornhövd, Stefan Sigg, and Wolfgang Lehner. SAP HANA Database: Data Management for Modern Business Applications. *ACM SIGMOD Record*, Vol. 40, No. 4, pp. 45–51, December 2011.
- 8) Maria Colgan, Jesse Kamp, and Sue Lee. *Oracle Database In-Memory*. Oracle Corporation, October 2014. An Oracle White Paper.
- 9) 塩井隆円, 波多野賢治. 列指向型データ格納 RDBMS の問合せ処理最適化の一検討. 電子情報通信学会総合大会講演論文集, March 2015. D-4-25.
- 10) 塩井隆円. ローストア型／カラムストア型構成データ基盤のハイブリッド運用に関する研究. 同志社大学文化情報学部卒業論文, December 2014.
- 11) TPC. *TPC Benchmark H Standard Specification Revision 2.16.0*, November 2013.

Developing an Evaluation Environment for Dynamic Maps and Cooperated Driving Assist Systems

Kentaro Takaki*, Yosuke Watanabe*, Kenya Sato***, Shigeharu Teshima* and Hiroaki Takada***

Intelligent Transport Systems (ITS) and autonomous driving systems have been studied. To make these systems more advanced level, information platforms which gather, integrate and provide dynamic information on roads, are needed. We have been developing road traffic dynamic map which is a prototype system for managing dynamic information. When evaluating the dynamic map, obtaining sensor information using real cars is needed. However, this method is expensive. So we need an evaluation environment with simulators. In this paper, first, we present requirements for the evaluation environment. Next, we explain the evaluation environment we developed. This environment has several features: using driver models, handling car tracks, controlling objects in the traffic simulator with a driving simulator, putting feedback from the dynamic map. Using this environment, we can know how the dynamic map is useful and tune applications using the dynamic map.

Keywords Dynamic map, Evaluation environment, Cooperated driving assist system

キーワード： ダイナミックマップ, 評価環境, 協調型運転支援

交通社会ダイナミックマップと強調運転支援の評価環境構築

高木 建太郎*, 渡辺 陽介*, 佐藤 健哉**, 手嶋 茂晴*, 高田 広章***

1. はじめに

国内外のカーメーカーを問わず、大衆的車両にクルーズコントロール、衝突被害軽減ブレーキ、車線逸脱警報といった安全運転支援システムが搭載されるようになった。これらの運転支援システムは、車両に搭載されたセンサから絶えず得られる情報を利用して実現されている。センサは、例えば、自車両位置を検出する GPS、周囲を認知するカメラ、ミリ波レーダ、ライダーなどが挙げられる。周囲を認知するセンサは、種々あるが、数 m から百数十 m の検知範囲を持つ。車両一台が認知できる周囲の状況は限定的ではあるが、カーメーカーは競って安全運転支援の高度化を

図っている。

我々の研究グループでも高度な安全運転支援システムを開発して、円滑な交通を実現することを目標にしている。例えば、高速道路の合流路において、合流する車両がスムーズに本線に進入できるように、本線を走行する車両に対して速度変更や車線変更の依頼を出すなどの調停を行う、といった運転支援を考えている (図 1)。さらに、都市全体の交通流をドライバーの特性や交通状況に基づいて最適化する、といった交通マネジメント視点でのアプリケーションも想定している。このような運転支援、交通マネジメントのアプリケーションを実現するためには、複数の車両

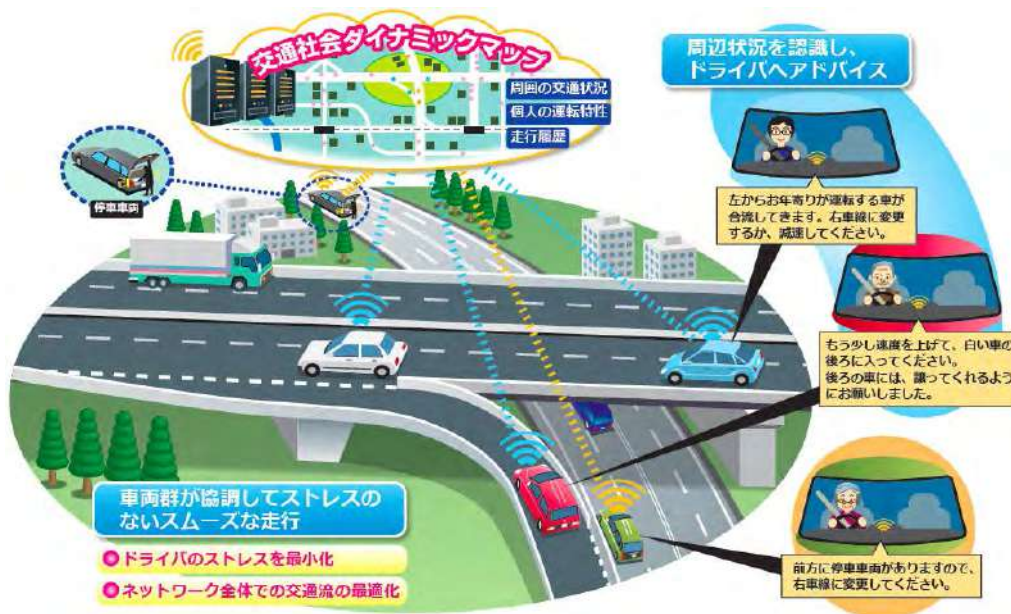


図 1. 交通社会ダイナミックマップ利用例

から得られるセンサデータを統合し、共有、検索するための仕組みが必要である。データ共有の仕組みとしてローカルダイナミックマップ(LDM)と呼ばれる技術が ISO などの国際仕様で検討されている[1][2]。LDMは静的で局所的な地図データに、車両の位置情報などのセンサデータをマッピングしたものである。しかしながら、LDMでは、局所的な情報しか管理できず、都市の交通マネジメントといったアプリケーションを実現することができない。このような技術課題を解決するために我々は、より広範囲のデータを取り扱うための交通社会ダイナミックマップを研究・開発している[3]。

ダイナミックマップの設計、実装方法には種々あるが、評価は実車走行などにより、センサデータを発生させ、入力情報とする必要がある。この評価方法は極めてコストが高い。また、ダイナミックマップを利用した車両間の調停を目的とした協調型運転支援は、支援の発生タイミングや文言等を繰り返し調整する必要があり、実車走行のみで評価を行うとコストが高く、安全面も欠ける。そのためシミュレータによる案内が体験可能な環境が必要となる。

ITS のアプリケーション評価用に評価環境[5][11][12]が種々開発されているが、ドライビングシミュレータの機能を備え且つ他車両を検知するセンサを表現できるものはなく、ダイナミックマップの評価に適した状況をシミュレ

ーション可能な環境は存在しない。

本論文では、まず、ダイナミックマップの評価に必要な環境の要件を整理、提示し、その後、2つのシミュレータを組み合わせることで、新規に開発した評価環境に関して説明する。この評価環境は、ドライバモデルによる交通流の生成、車線レベルでの道路ネットワークの表現、ドライビングシミュレータによる車両の制御、各車両に対するダイナミックマップからの案内情報の反映、を同時に実現することを特徴とする。

本稿の構成は以下のとおりである。2節では、ダイナミックマップの評価環境に求められる要求についての分析する。3節では、関連研究として高度運転支援システム(ADAS) 評価用の環境を紹介する。4節では、我々の研究グループが開発したダイナミックマップの評価環境に関して述べる。5節では、実際に評価環境上でサンプルアプリケーションを動作させた使用例を提示する。最後に6節では、まとめと今後の課題の整理を行う。

2. 評価環境への要求分析

この節では、まず我々の研究グループが研究・開発している交通ダイナミックマップについて述べる。次にダイナミックマップの評価に関して言及し、要件を提示する。

2.1 交通社会ダイナミックマップ

交通社会ダイナミックマップ[3]は、協調型運転支援システムや都市全体の交通流最適化、自動運転システムなどの実現に利用が期待される基盤システムであり、LDMよりも広域に、静的な地図データ上に紐付けて動的情報を管理する基盤システムである。

我々はダイナミックマップを以下機能を持つ論理的なデータの集合として定義している。

1. 道路地図など、論理的な位置関連情報を管理する機能
2. 車両や歩行者などの位置情報に代表される動的情報を管理する機能
3. アプリケーションやノード間で、データの同期や整合性を取る機能
4. アプリケーションから独立しており、論理的なデータストアとして問い合わせを受け付ける機能

交通社会ダイナミックマップの利用者は、ダイナミックマップにクエリ（条件）を登録すると、道路上の状態が条件にマッチした場合に検索結果を得ることができる。例えば、交差点に進入する車が、「交差点進入時に衝突する可能性のある車の検出」という条件を登録すれば、交通状況が変化する中で衝突の可能性のある車両がダイナミックマップの予測に基づいて検出されると、条件を登録した車に衝突対象の車両の情報を提供することができる。詳細は文献[3]を参照されたい。

2.2 ダイナミックマップの評価

ダイナミックマップの評価では、一般的に利用される指標やベンチマークがまだ存在していない。評価指標の一つとして、まず考えられるのは、センサデータ等の動的情報を用いたアプリケーションを開発するためのプラットフォームとして、アプリケーションの開発がどの程度楽になるか（開発効率）である。また先述のように、センサの普及率をパラメータとして、ダイナミックマップを利用したアプリケーションを評価することで、ダイナミックマップの有用性を評価する方法もある。我々の研究グループは、交通を円滑にすることを目標としているため、後者の評価

方法を重視し、ダイナミックマップに登録された条件の数に対して案内可能な割合、アプリケーションを導入した際の事故数、旅行時間、渋滞長などの数値を指標とした評価を目指すこととした。

現状ではセンサの普及率などが原因で、すべての車両が動的情報をダイナミックマップに送信することはできない。動的情報の欠落が起これば、ダイナミックマップが十分に機能しない可能性がある。一方で、車載・インフラセンサにはカメラなどの他者の情報を取得可能なセンサがある。このようなセンサが普及すれば、動的情報の欠落を補える可能性がある。ダイナミックマップの有用性はセンサの普及率、性能に依存しているため、これらを変化させた時の評価を行うことが求められる。

2.3 要求分析

ダイナミックマップから情報を取得する協調型運転支援を利用して評価を行うには、シミュレーション環境に以下の項目が求められる。

➤ 一台一台の車両を表現する交通シミュレータを用いること

交通流を再現するシミュレータは一台一台の車両を表現するマイクロモデルと交通流を密度で再現するメソモデルがある[4]。メソモデルの場合、交通流を密度で取り扱うため、車両一台一台の挙動は再現することができない。そのため、個々の車両からのセンサデータをダイナミックマップに入力するという状態を表現できない。

➤ 車線単位のネットワークが表現可能なこと

協調型の安全運転支援は、道路状況を車線単位で管理した情報を必要とする。例えば高速の合流路における運転支援では、合流路に隣接する本線の車線を走行する車両に対して調停の案内を行う。そのため、シミュレーション環境内の車両は、複数車線がある道路を再現する場合、各車線を認識して走行できなければならない。

➤ センサを表現可能なこと

センサには測定内容、精度ともに種々あるが、協調型運転支援のアプリケーションを実現するためのダイナミックマップへの最低限の入力として、GNSS等を再現するために自車両位置を生成可能で、かつ周囲を認識するセンサ

を表現するために有効範囲角や有効距離を設定可能で、他車両までの距離や相対速度などを生成可能なことが求められる。センサの検出範囲は、物体による遮蔽などが考慮されているものが望ましい。これは、現在のナビゲーションアプリなどは物体の位置情報を利用した案内がメインであるが、将来的には道路上で物体が何もないことを示す情報（エンプティオブジェクト[3]）を利用した案内が必要になると考えたことが理由である。例えば、何もない領域が判明していれば、自動運転車両に対して、遮蔽物のある交差点等で速度を落とさず進行する案内が可能となる。

▶ ドライビングシミュレータの機能

協調運転支援などのアプリケーションを開発する際に、メッセージの発生タイミング調整や、文言などの修正を繰り返すためには、運転手が評価環境内の走行を体験できる必要がある。そのため、ドライビングシミュレータの機能が必要となる。

▶ ドライバモデルによる車両の制御

協調型運転支援のアプリケーションを導入し、ダイナミックマップの評価を行う際に、シミュレータで発生させた車両の制御は、認知・判断・操作を表現可能なドライバモデルを用いて行うことが望ましい。例えば、シミュレータ内の仮想ドライバに車線の変更を求める協調型運転支援を行う場合に、ドライバモデルを利用すると、案内の指示が出た後に移動先のレーンを確認するなど車両の動きに説得力が増す。

▶ シミュレーション環境にアプリケーションからのフィードバックが可能なこと

運転支援アプリケーションからシミュレーション環境内の仮想ドライバへの案内情報の通知などが可能なように、シミュレータ内部に干渉するための公開 API が提供されている、もしくはソースコードを利用可能であることが求められる。

3. 関連研究

ADAS の評価環境が、さまざまなアプリケーション評価用に考案されている。例えば、欧州では EU における技術開発のための計画 FP7 の中で iTETRIS(An integrated

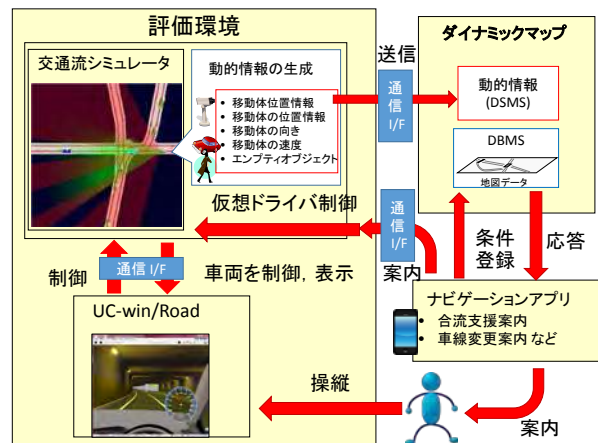


図 2. 評価環境全体像

wireless and traffic platform for real-time road traffic management solutions)[5]と呼ばれるプロジェクトが ADAS の評価環境を構築した。また、Schünemann からも独自の評価環境を開発している[12]。これらの評価環境は、交通流に加えて、車車間通信や路車間通信といった通信路を再現するために、電波伝搬シミュレータを構成要素としていることを特徴としている。両方とも SUMO[14]と呼ばれる交通流シミュレータを利用し、電波伝搬のシミュレータとして ns-3[7]を利用している。国内においては関らが評価の統合環境を開発している [11]。この環境に利用されている交通流シミュレータは MATES[13]で、電波伝搬のシミュレータは FUPM[8]を利用している。

ここまで紹介した評価環境に利用されている交通流シミュレータはマクロモデルで、車線単位のネットワークが設定可能である。しかしながら、車両に他車両を認識するためのセンサを設定することができず、「センサを表現可能なこと」という要件を満たすことができない。加えて、評価環境はドライビングシミュレータの機能を持っておらず、内部の仮想ドライバに変わって操縦を行うことができない。そこで、我々の研究グループは独自に評価環境を開発した。

4. ダイナミックマップの評価環境に関して

我々の研究グループが構築した評価環境の全体像を図 2 に示す。評価環境は生成した動的情報をダイナミックマップに送信が可能で、ナビゲーションアプリからの案内を

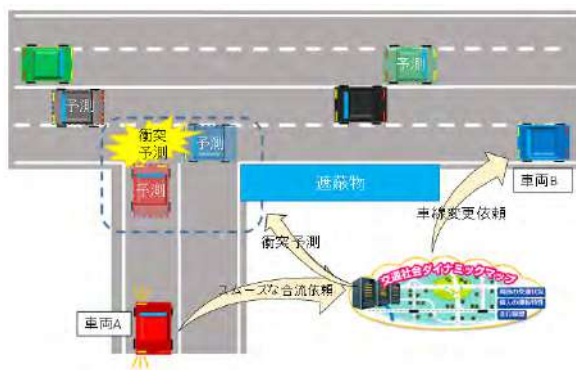


図 3. T字路における合流調停

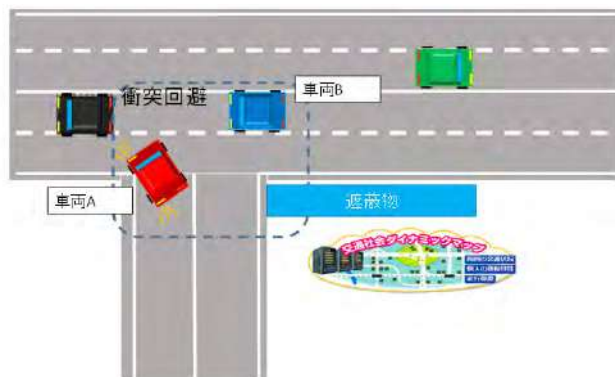


図 4. 調停後の道路状況

評価環境内部の仮想ドライバに通知して制御することが可能である。また、評価環境内の車両の1台に乗り操縦することが可能である。ダイナミックマップは交通流シミュレータから送付される動的情報の管理を行う。ナビゲーションアプリはダイナミックマップに対して条件を登録し、交通流シミュレータ内の交通状況が条件を満たした場合に検索結果を受け取り、ナビゲーションを行う。この機能を利用すればナビゲーションアプリの案内を実際に体感することが可能である。

評価環境に利用するシミュレータの選定に際して、3節からわかるように、シミュレータ内に他車両を認識するためのセンサを設定可能なシミュレータを用意する必要があった。また、交通流シミュレータは単独ではドライビングシミュレータの機能をもたないため、交通流シミュレータとの通信が開発可能なドライビングシミュレータが必要であった。

我々の研究グループでは、交通流シミュレータとして、文献[9]にある機能を用いることにした。また、ドライビングシミュレータとして、3DVRの表現力が豊富であることと、提供されているSDKの公開APIを利用したプラグインを作成することでカスタマイズすることが可能で他シミュレータとの連携が実現可能であるUC-win/Roadを選定した。

4.1. 交通流シミュレータ

評価環境内の交通流シミュレータは車両の制御に認知・判断・操作が可能なドライバモデルを採用したマクロモデルの交通シミュレータで、車線単位で道路ネットワー

クが表現可能である。また、車両に他車両を検知するための測定距離、測定角度をパラメータとして持つレーダセンサを設定することができる。

このセンサは、移動体が検知範囲に進入すると、移動体の絶対位置や検知車両からの相対位置、相対速度、進行方向などを検知することが可能である。

また、我々の研究グループでは独自に、センサの検知領域が移動体でさえぎられていない部分を抽出可能な処理を作成し、物体が存在しない領域もセンサで検知可能とした。交通流シミュレータとダイナミックマップ・

UC-win/Road・UC-win/Road・ナビゲーションアプリとの通信I/Fのプログラムも作成した。

4.2. UC-win/Road(ドライビングシミュレータ)

UC-win/Road[10]は、Forum8社が開発したドライビングシミュレータである。

評価環境内では、UC-win/Roadは、交通流シミュレータが生成した交通流を表示する。また交通流シミュレータ内の指定された車両を現実の人間がハンドル等を用いて操縦可能にする。

5. 提案評価環境の使用例

この節では、我々の研究グループが開発した、ダイナミックマップを利用した協調型運転支援のサンプルアプリケーションを評価環境で動作させた例を紹介する。本評価環境は、アプリケーションが交通に与える変化（渋滞長や字個数などの指標）とドライバから見たアプリケーション

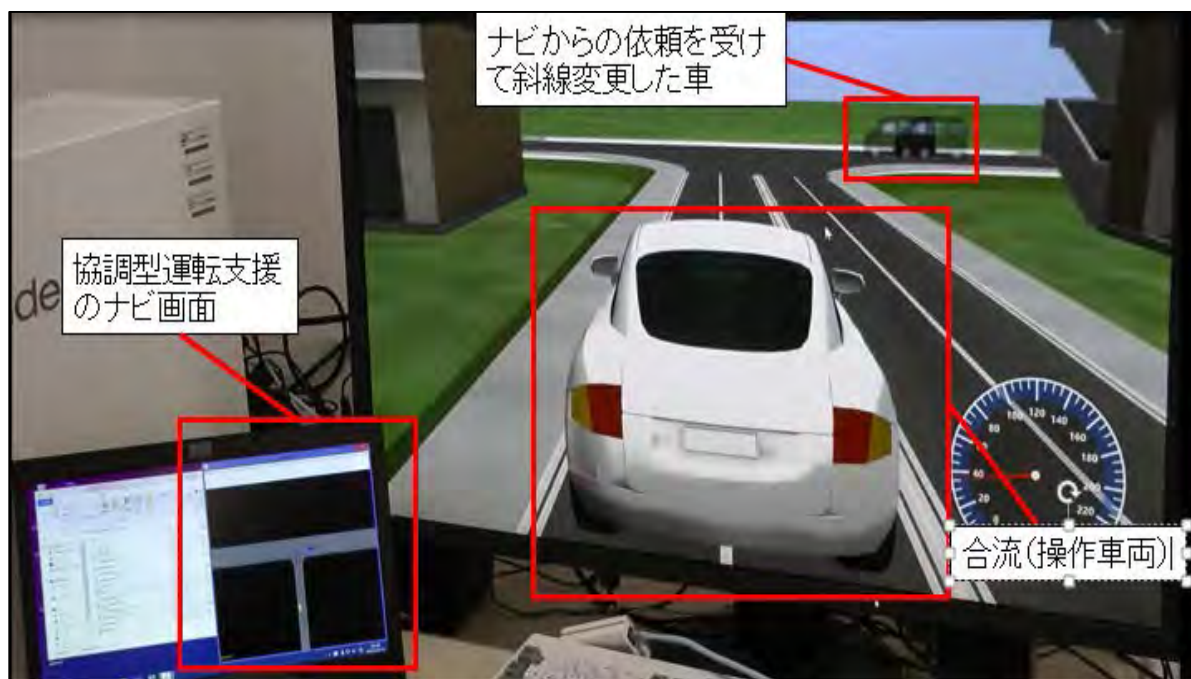


図 5. 評価環境の使用例

の受け入れやすさ、の2つが確認可能であるが、ここでは後者を取り上げる。

紹介するアプリケーションは、交差点進入時に視野に死角が存在し、他方向からの車両を認知しにくい場面を想定している。合流調停アプリケーションはお互いの存在を知らせるとともに、衝突を回避するための案内を行う。これによる衝突を事前交差点における衝突を事前に回避により、交差点における衝突を事前に回避することが可能である。

調停シーンのイメージは図 3 に示す通りである。車両 A は細い道から太い道路に合流を行う。車両 B は何も調停が行われないまま走行していると、車両 A がスムーズに合流できないタイミングで交差点に到達する。合流調停アプリケーションはダイナミックマップに数秒先の交通状況の予測を依頼し、衝突の可能性のある車両（車両 B）を検知し、車両 B に車線変更を依頼する。調停後の道路状況を図 4 に示す。

合流調停アプリケーションは車両 A、車両 B それぞれ別のメッセージを提示する。車両 A には「衝突する可能性のある車両があります。車線を譲ってもらうよう交渉します」、車両 B には「衝突する可能性のある車両があります。車線を

譲ってあげてください」と案内を行う。我々が開発した評価環境を利用すれば、このようなダイナミックマップを利用した協調型運転支援のアプリケーションをシミュレータ上で体感し、各パラメータを調整しながら開発することが可能である。例えば、我々の研究グループが作成したサンプルアプリケーションでは、車両 A 側に対する案内内容として合流車線上の競合相手に調停を依頼した旨の案内を行っている。実際に車両 A を操縦して交差点に近づくと、調停が終了したかどうかはわからず、合流先に不安が残る。このような状態に対処するためには、例えば、1. 競合相手が存在することを通知する 2. 競合相手に調停を依頼したことを通知する 3. 競合相手が道を明けたことを通知する という 3 段階に分けた案内が考えられる。3 段階に分けて通知するには、案内に必要な時間も多くなり、案内の開始タイミングなどの調整も必要になる。このような、アプリケーションの課題抽出、発生タイミングの調整をシミュレータで行うことができる。

実際にドライビングシミュレータで車両を運転しながら合流調停支援を受けている様子を図 5 に示す。

6. まとめと今後の課題

本稿では、ダイナミックマップを評価環境に対する要求を整理し、我々の研究グループが構築した評価環境を紹介した。本評価環境は、協調型運転支援による道路交通の改善具合や、アプリケーションがダイナミックマップに登録した条件数に対して案内ができる割合、を指標としてダイナミックマップの評価を行うことを目的とする。また、本評価環境を利用すると、協調型運転支援の評価をドライビングシミュレータ上で体感しながら開発ができ、実車走行を利用した開発に比べて、安全性を確保しつつコストを低減することができる。

今後の課題としては、本評価環境を利用してダイナミックマップの有用性を評価すること、シミュレータ間での地図共有のコストをさげるための地図データの変換ツールの開発が挙げられる。

文 献

- [1] ETSI TR 102 863 V1.1.1 (2011-06) “Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Local Dynamic Map (LDM); Rationale for and guidance on standardization”
- [2] ISO/TS 17931:2013 “Intelligent transport systems -- Extension of map database specifications for Local Dynamic Map for applications of Cooperative ITS”
- [3] 渡辺 陽介, 高木 建太郎, 手嶋 茂晴, 二宮 芳樹, 佐藤 健哉, 高田 広章, “協調型運転支援のための Forum 2015, F6-6 (2015.03)
- [4] 一般社団法人 交通工学研究会 “交通シミュレーション活用のおすすめ, pp.74-76, 丸善出版株式会社, 2012.
- [5] iTETRIS プロジェクト,
http://www.ict-itetris.eu/itetris_platform.html
- [6] FP7, https://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm
- [7] ns-3, <https://www.nsnam.org/>
- [8] FUPM <http://network.kke.co.jp/products/wi/>
- [9] 森 博子, 岩瀬 竜也, 北岡 広宣, “予防安全システム評価シミュレータ STREET”, 情報処理学会 ITS 研究会, Vol.2007-ITS-29, no.6, pp.35-42 (2007.06)
- [10] FORUM8 <http://www.forum8.co.jp/>
- [11] 関 馨, 高井 峰, “ITS 統合シミュレータのプロトタイプ”, 情報処理学会 ITS 研究会, 2010-ITS-42 no.11 , (2010.09).
- [12] Björn Schünemann, Realistic, Kay Massow, Ilja Radusch, “Simulation of Vehicular Communication and vehicle-2-X applications”, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, 2008
- [13] 吉村 忍, 西川 紘史, 守安 智, “知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発”, 日本シ

ミュレーション学会, シミュレーション 23(3), pp.228-237 (2004.09)

- [14] Michael Behrisch, Laura Bieker, Jakob Erdmann, Daniel Krajzewicz, “SUMO – Simulation of Urban MObility”, SIMUL 2011, pp.55-60

Combination of Experimentation and Simulation in VANET

Manabu TSUKADA* and YeTAO²

(Received February 2, 2015)

Vehicular Ad-hoc Network (VANET) is a type of Mobile Ad-hoc Network (MANET) which is specialized for vehicle communication. GeoNetworking is a new standardized network layer protocol for VANET which employs geolocation based routing. However, conducting large scale experiments in GeoNetworking softwares is extremely difficult, since it requires many extra factors such as vehicles, stuff, place, terrain, etc. In this paper, we propose a method to reproduce realistic results in simulation with the same software implementation. The key idea of the method is to calibrate simulator with the results of real world testbed experiments. After the simulator was calibrated, some extended experiments were carried out. Through these experiments, the fundamental functions of the GeoNetworking implementation (BTP, Greedy Forwarding, etc.) are verified, while an issue in algorithm was discovered and analyzed.

Key words F Experimental Evaluation, Vehicular Ad-hoc Networks, Wireless Multihop Communication, Network Mobility, Cooperative ITS, Intelligent Transportation Systems

1 Introduction

Intelligent Transportation Systems (ITS) aim at optimization of the road traffic by realizing safe, efficient and comfortable transportation. Within a number of research fields in ITS, Cooperative ITS and vehicular communications became essential for the cooperation of multiple entities in the road traffic (*i.e.* vehicles, roadside infrastructure, traffic control centers) in order to achieve shared objectives (safety, efficiency, and comfort).

In order to connect among vehicles and roadside units, GeoNetworking¹⁾ is employed as one of the network protocols in the ITS Station architecture²⁾, as shown in Figure 1, because the geolocation based routing features the strength in the network with dynamic topology compared with topology based routing.

In the literature, the evaluation of GeoNetworking can be performed in flexible and large scale simulated network with low cost. However mere simulations can-

not provide realistic evaluation results for a specific implementation of GeoNetworking. In contrast, the experimental evaluation using the implementation in a field operational testbed gives real results in the deployment phase of GeoNetworking. Though in practice, it requires heavy cost to conduct the experiments in terms of time, manpower, space and expense. In order to take the benefits of real field test and simulation, we reproduce the results of the field experimental evaluation in the simulated network with the same implementation.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 highlights the related works. In Section 3, we describe our objectives in the paper. In Section 4, the experimental evaluation in the real testbed is shown. Section 5 shows the work for the reproduction of the experimentation result in the simulated networks. Section 6 extends the reproduction to the various scenarios in the simulation, and analyses an issue in the algorithm. Finally, Section 7 concludes the paper by summarizing the main results and addressing future

* The University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan
Telephone : +81-3-5841-7465
E-mail : tsukada@hongo.wide.ad.jp

** E-mail : tydus@hongo.wide.ad.jp

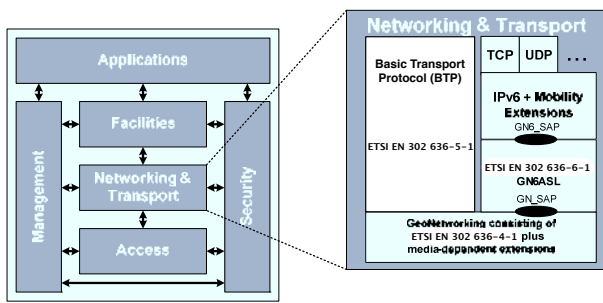


Fig. 1: GeoNetworking in ITS Station Architecture

works.

2 Related works

2.1 GeoNetworking and the Implementation

Vehicular ad-hoc network (VANET) is a particular case of Mobile Ad-hoc Network (MANET), which is not restricted by the battery consumption of the communication nodes and are also characterized by the high speed movement of nodes, the availability of GPS information, and a regular distribution and predictable movements. *Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)* ³⁾ employs GPS information to forward the packets in order to adapt VANET characteristic where routes become quickly unavailable in high mobility scenarios. In GPSR, the nodes do not need to maintain part of the network structure in order to forward packets towards the destination node, but make a forwarding decision based on the destination position and neighbor positions. Within the ITS standardization domain, GeoNetworking is being completed by ETSI at the moment, integrating several geo-aware strategies to route packets better in vehicular networks.

GeoNetworking ¹⁾ is standardized by ETSI as a network layer protocol as in Figure 1, integrating several geo-aware strategies including Greedy Forwarding (GF) ³⁾ (Also known as *GPSR*), which chooses an directly reachable node which is closest to the destination based on GPS location obtained by *Location Service (LS)* request action, to route packets better in vehicular networks. Above the GeoNetworking, there are two different layers. One is *Basic Transport Pro-*

ocol (BTP) ⁴⁾ which provides basic functions of the transport layer to GeoNetworking, the other is *GeoNetworking to IPv6 Adaptation Sub-Layer (GN6ASL)* ⁵⁾ in order to enable standard IPv6 over GeoNetworking.

All the GeoNetworking nodes send beacons in a specific interval, and the neighbor nodes maintain its latest geographical location in the *location table (LocT)* from the received beacons. Other GeoNetworking packets delivered in the network contain the location of *source (SO)*, *sender (SE)* and *destination (DE)*; in the case that the location information in the packet is newer than the one in the location table, the location table is updated. Each *location table entry (LocTE)* has a lifetime counter, and the entry is removed when it is reduced to 0. When the source node does not have location of the designation in its location table, the node triggers the *Location Service (LS)* request message in order to obtain the location of the destination. ETSI defines the flooding based request-reply location service to get the destination location.

More than fifteen software implementations of GeoNetworking join ETSI plugtest that provides interoperability test opportunity every year. The Car-Geo6 project ^{*} provides GeoNetworking implementation in open source ⁶⁾. The GeoNetworking function and the BTP function are implemented as daemons called *itsnet* and *btpecho*, respectively in the Car-Geo6 implementation as in the Figure 2. In source node, *btpecho* (client mode) sends a BTP packet via inter-process communication to *itsnet*. If the destination location is in *LocT*, *itsnet* forwards the packet to next hop selected by GF, otherwise it triggers an LS request. Finally, when the BTP echo request is forwarded to the destination, *itsnet* send the packet to *btpecho*. On the other hand, *btpecho* (reflector mode) in the destination node sends a BTP echo reply back to the source once it received a request. The echo reply is forwarded by GF too, thus the reply packet may be delivered via a different route from the request packet.

^{*} <http://www.cargeo6.org/>

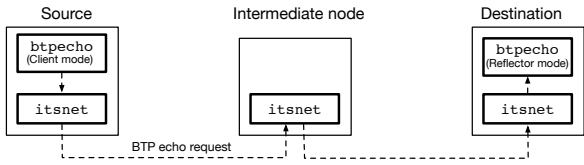


Fig. 2: Overview of CarGeo6 programs

2.2 Experimentation and Simulation

The evaluation of GeoNetworking is performed a number of times in the simulations ^{7, 8)}, because it is costly to make the experimentation in a field testbed with real vehicle integrations. There are a few experimental evaluations with real vehicles, however the number of vehicles is limited. For example, ^{9, 10, 11)} described a field experimental evaluation performed with up to four vehicles.

Network Simulator 3 (ns-3) is an open source programmable network simulator with many capabilities. Direct Code Execution (NS3-DCE, or DCE) is a module for ns-3 to provide the ability to run Linux programs directly in its simulated environment. It enables users to do experiments with their programs in the simulated network environment without doing major source code modifications. DCE supports several types of network software infrastructures, specifically, network protocol stacks Linux. One of them is the DCE-linux protocol stack, which adapts the protocol stack of real-world Linux kernel into DCE. It has much more Layer 3 and 4 facilities than the default ns-3 protocol stack, and allows program running on it to have direct access to the MAC Layer, which is required by CarGeo6. To explain in a technical way, DCE runs several Library Linux Operating Systems ^{12, 13)} in a single process, and connect its networking and timing backend to ns-3 facilities. The user programs can be executed in the simulated library OS efficiently.

3 Objective and Approach

Experimentation in real testbed using GeoNetworking implementation can provide very precise evaluation

result in the deployment phase of the implementation, however it requires heavy cost (*i.e.* vehicles, equipment, drivers, time, etc.). On the other hand, the simulation can provide the evaluation result in flexible networks with various scenarios in a low cost, however the result is based on the preconfigured model in the simulation and often diverse from the experimental evaluation in the real testbed.

Our objective is to investigate realistic behavior of GeoNetworking by simulation in various scenarios. To realize the objective, we take the benefits of both experimentation in real testbed and simulation in the following approach as in Figure 3. In this paper, we combine experimentation in real testbed and simulation. Firstly, we conduct experimentations in real testbed using an open source GeoNetworking implementation (Section 4). Secondly, we reproduce the experimental evaluation result of GeoNetworking in the simulated network using the same implementation (Section 5). Finally, we extend the simulation to a large scale network with various scenarios (Section 6).

The method developed in the paper has three aims. First, the developers of the GeoNetworking implementation can understand the realistic behavior of the software in large scale networks under various scenarios. Second, by understanding the behavior of the implementation, it eases the debugging and the performance improvement of the implementation. Last, it facilitates the development of ITS applications working on the GeoNetworking implementation.

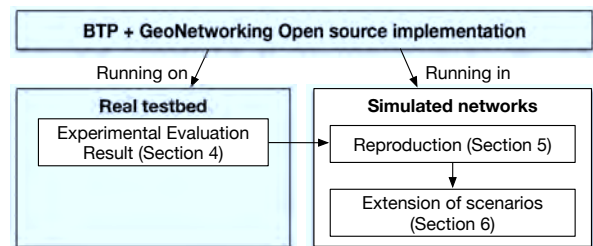


Fig. 3: Our approach

4 Experimental Evaluation in Real Testbed

We performed an experimental evaluation using Car-Geo6 version 0.9.9, on 4 ARM boxes with real hardware specifications as listed in Table 1. A mac filter was applied on each node, to limit the neighbour that it could communicate with adjacent nodes only, achieving an up to 3 hop topology as depicted in Figure 4(a).

Table 1: System configuration

Item	Specification
CPU	Dual Core ARM11 600MHz SoC
Memory	128 MB RAM
Storage	16 MB Flash
Kernel	Linux kernel 2.6.35.13
MAC protocol	IEEE 802.11p (ETSI G5)
Wireless Interface	Unex DCMA-86P2

The round-trip times (RTTs) are measured between the source and the destination in the case from single hop to 3 hops with various packet sizes (varying from 20 bytes to 1500 bytes by increasing the size by 20 bytes). The `btpecho` (client mode) sent the BTP echo request 100 times to the `btpecho` (reflector mode) in each test. There is no traffic besides the echo request, echo reply and the beacons during the tests.

Figure 6(a) shows the result of average RTT in the experimental evaluation (In order to save the space of the paper, the figure also shows the uncalibrated reproduction results which is explained in Section 5).

The RTT increases along with the packet size in all tests (from single hop to 3 hops). When the packet size is 20 bytes, RTT on 2 hop and RTT on 3 hop have 1.5 ms and 3.4 ms greater than the one in single hop, respectively; when packet size is 1380 bytes, they are 5.3 ms and 10.5 ms greater. BTP GeoNetworking does not process the packet bigger than the MTU because the fragmentation is not defined in the specification. Therefore all the packets bigger than 1380 bytes were lost in the experiments.

5 Reproduction of real testbed result in simulated networks

In the last section, we described how the experiments are done in the real testbed. Nevertheless, the real testbed has limitations: high cost, limited scale, inflexible in configuration, etc. In order to overcome these limitations, a realistic simulated environment called Direct Code Execution was employed. With minor and trivial modifications to the CarGeo6 source code as well as some parameter calibrations, we successfully reproduced the real testbed results in the simulated environment. In this section, we describe the successful reproduction of the real testbed results in the simulated environment.

5.1 Simulation configuration

Ns-3 and DCE has many parameters which can be tuned to reproduce the real testbed environment. In order to tune and calibrate the simulator, we use a simple linear topology which is shown in the Figure 4(a): all nodes are configured with the same Wi-Fi parameters, and kept in a same Ad-Hoc cell; each node are in a line with 300m distance to adjacent node. With a negative receiver antenna gain, the wireless radio range is adjusted to 300-400 meters. That means nearly all packets in 300m range can be delivered, yet nearly all packets from 400m away were lost. The configuration ensured each node can and can only reach the adjacent nodes. The detailed configuration in DCE is shown in Table 2.

Table 2: DCE network configuration

Item	Specification
Radio Frequency	5.9GHz
Wi-Fi Phy	ERP-OFDM, 6Mbps
Wi-Fi Mac	Ad-Hoc
Receiver Gain	-10dBi
Propagation Delay	Constant
Propagation Loss	Friis
Node Mobility Model	Static

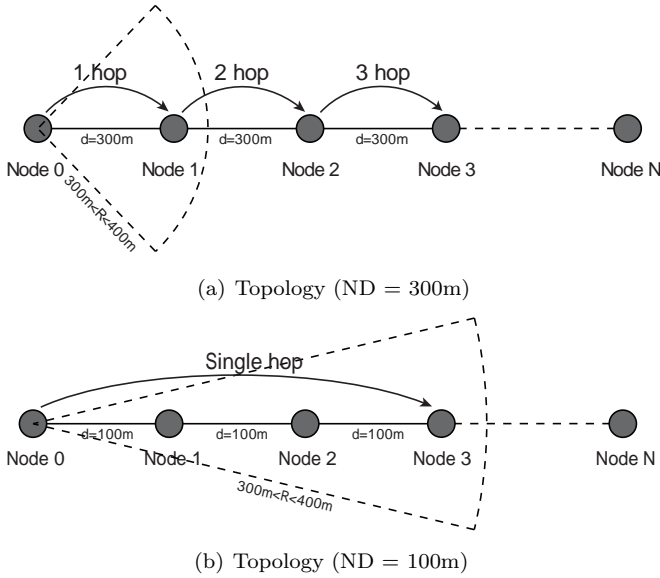


Fig. 4: Topologies

5.2 Modification of GeoNetworking implementation

Since the CarGeo6 is not fully compatible with libc and kernel used in DCE, some modifications in the code must be done. To Avoid messing up the original code and keeping backward compatibility, a separate module called *dce_compat* is employed. Most of the compatibility code goes to the compatibility module, and modifications in other modules are minimized and the backward compatibility are maintained. The modifications can be divided into 4 parts:

1. **Socket Incompatibilities** DCE provides a limited subset of socket features. However, several ones which used in CarGeo6 are not supported. Sequenced packet socket, which is one of it, must be modified to Streaming socket, with manually framing. Another one is peeking read in socket, which should be cared manually.
2. **Timing Function Incompatibilities** Another big issue is about timing. DCE does not support monotonic clock, which is considered rigorous in timing. Moreover, minimum resolution of is microsecond instead of nanosecond in modern operating systems. Some workarounds are employed in *dce_compat*. E.g., using real time clock instead of monotonic ones. Consequential bugs in CarGeo6

are fixed.

3. **Lack of Math Functions** Several math functions lacked in DCE are mandatory for geolocation calculation, which includes sine, cosine, arctangent, square root, absolute value, etc. These functions are implemented by hand in *dce_compat* module, and will be contributed to upstream of DCE.

4. **Lack of Other Functions** Besides math functions, DCE lacks some other functions such as BSD compatible functions, some of pthread features, etc. Some of them can be skipped safely, while the others are implemented manually in *dce_compat*.

5.3 Packet Size issue in DCE

During preliminary experiments, we noticed an issue regarding the RTT, which leads to the steps as depicted in Figure 5. We inspected this issue and found it is caused by a hack of link layer packet size, which is located in the Linux kernel of library OS used by DCE**. The hack is an attempt to solve an issue in TCP, therefore it is not needed for GeoNetworking reproduction. We had modified the code to bypass the hack, and got perfect results as shown in Figure 6.

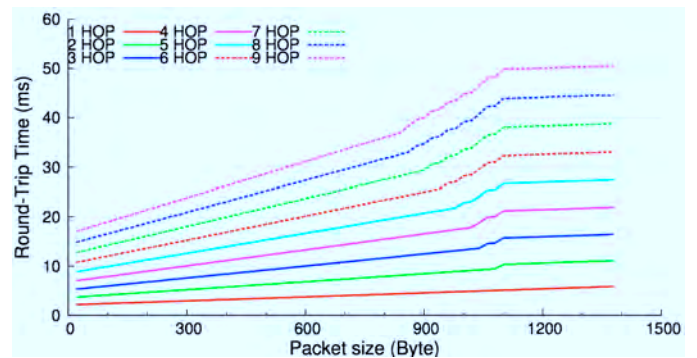


Fig. 5: Wrong RTTs cause by Packet Size issue

5.4 Processing Delay in DCE

In networking, processing delay means the time for a device to process a packet, which can affect the result

** <https://github.com/direct-code-execution/net-next-sim/blob/sim-ns3-3.14.0-branch/arch/sim/sim-device.c#L130>

of experiment. In Linux kernel, the cause of processing delay is rather complicated and can be affected by many factors, including task scheduling, interrupt handling, Wi-Fi antenna delay, etc. That means, fully modeling processing delay in DCE is impossible.

The result of CarGeo6 reproduction was greatly impacted by it. An approach must be carried out to calibrate it. DCE has some facilities to model the processing delay of each simulated operating system through the task scheduling. We simplified the model by aggregating other factors into task schedule delay.

Detection and Analysis The processing delay issue was first detected in preliminary experiments, when we were trying to reproduce the real testbed results in simulated environment. With the same hardware parameters, our experiments reproduced fairly realistic results, shown in Figure 6(a). However, a constant difference was observed between real and reproduction results.

In the figure, we noted that the delay is approximately in proportion to the number of nodes invoked. By this evidence, the possibility of propagation delay can be ruled out since it is related to number of hops. To classify, there are two types of nodes in these experiments which should be considered separately, as in Figure 2:

Intermediate node only executes `itsnet` program and in charge of packet routing and forwarding.

Terminal node invokes `itsnet` and `btpecho`, has evidently more work than **intermediate node**.

Define D_n as the total observed delay in n-hop case ($n + 1$ nodes in total), D_T , D_I as the proportion of observed value from **terminal node** and **intermediate node** respectively, while P_T , P_I for the parameters of internal task scheduling delay in DCE.

In the configuration of in Figure 4(a), the relationship among D_n , D_T and D_I should follow equa-

tion 1:

$$D_n = 2 \times D_T + (n - 1) \times D_I \quad (1)$$

Calibration Several steps are taken carefully to calibrate the processing delay in the nodes:

Pre-calibration Calculation Before calibration, we did a refined measurement and calculation on the observed difference in each experiment, which is shown in Figure 6(a). The result was slightly different from proportional expectation: $D_1 = 1700$ us, $D_2 = 2450$ us, $D_3 = 3200$ us. Thus $D_T = 850$ us, $D_I = 750$ us. With a preliminary test, we found there were no clear relationship between P_T and D_T , nor P_I and D_I .

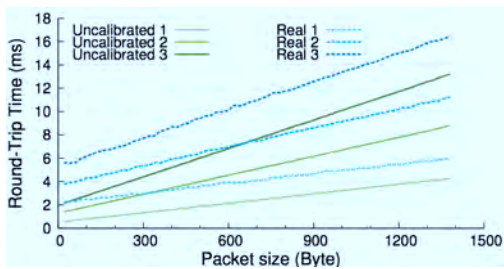
Step I: Calibration of terminal node

Calibrate the P_T on single-hop configuration. We did a binary search for the P_T , and evaluate the difference between simulation and testbed results. Optimal value were found at **200 microseconds**: in Figure 6(b), the simulation line overlaps with the testbed one.

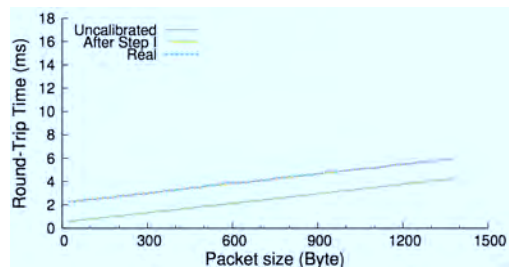
Step II: Calibration of intermediate node

After Step I, the shift distance of the simulation result of two-hop configuration is the same as one hop, as shown in Figure 6(c). Calibrate the P_I on two-hop configuration, with $P_T = 200$ us. Another binary search was carried out to find the optimal value: **540 microseconds**.

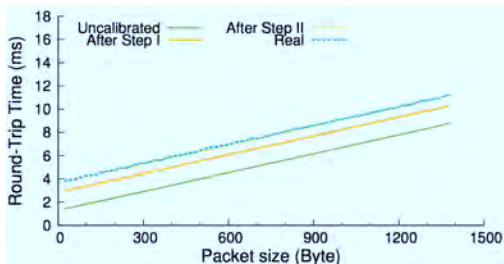
Post-Calibration Verification Verify the three-hop result with $P_T = 200$ us and $P_I = 540$ us, as shown in Figure 6(d). The simulation line is close to the testbed one, which verifies our conjecture. The fact that $P_T \ll P_I$ while $D_T > D_I$ is reasonable: the **terminal nodes** have heavier load than **intermediate nodes**, the Kernel scheduling was done more time, thus the delay should be lower.



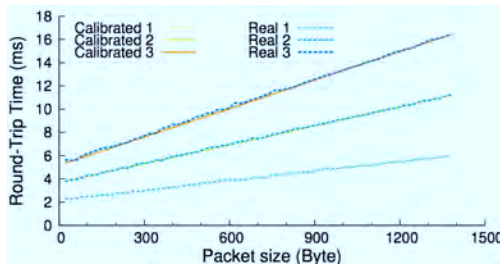
(a) Uncalibrated



(b) One-hop calibration



(c) Two-hop calibration



(d) Calibrated

Fig. 6: Processing Delay Calibration Steps

After proper calibration, the results practically overlap the real ones, with maximum absolute error of 60 microseconds. The results suggest that our reproduction with calibration is credible, thus it can be extended to large scale network scenarios.

6 Evaluation in large scale and flexible simulated networks

In this Section, we provide preliminary evaluation results regarding the performance of the implementation from the point of RTTs, with varied node distances, packet sizes and number of hops. We define Node distance (ND) as the distance between adjacent nodes, Terminal Distance (TD) as distance between destination and source nodes.

With the calibration made in Section 5, we conducted several experiments. First, experiments with customized number of hops were conducted to evaluate the Greedy Forwarding algorithm, which shows that the algorithm successfully to choose a multi-hop route to forward packets up to 9 hops. Then, ND and TD are modified to examine their impact on the net-

work, and we found there could be a extremely high packet loss under certain conditions.

We successfully extended the experiments in NS3-DCE with the topology as depicted in Figure 4(a), with any desired number of nodes (N), and varied ND s which is difficult under real testbed with limited manpower and resources. The topology with ND of 100m is shown in Figure 4(b), when it comes to 10m or 50m, the topologies will be slightly different. Thus we can examine how packet size and number of hops affect the results in reproductions, and whether the implementation can be properly functional with varied ND s and TD s. Therefore, the prediction of realistic behavior of the implementation is viable.

We first measured the network delay perceived by the `btpecho` initiator with packet size range from 20 bytes to 1380 bytes in a single hop. Then, extend to 2, 3 and finally 9 hops, and repeat the first experiment. Finally, compare and analyse the data obtained in reproduction to find out how packet size and number of hops impact the network delay. For all delay measurements we measured 1000 BTP echo Request RTTs between the two terminal nodes with interval time of 0.5 seconds.

6.1 More hops in Extended scenarios

RTTs of different hops and packet sizes were obtained from reproduction, as depicted in Figure 7. The RTT increases as the packet size increase as we have in the previous sections. With the packet size of 20 bytes, the RTT increases by 1.55ms each hop increase. When the packet size comes to 1380 bytes, the increment of RTT is 5.23ms each hop.

6.2 Different node distances in Extended scenarios

We select some data with some specific *NDs* and fixed packet size of 80 bytes, but with varied *TDs*, as depicted in Figure 8. Figure 4(b) depicts a specific scenario with $ND = 100m$. The impact of *ND* and *TD* on realistic behavior of the implementation can be predicted through the data.

With the 10m *ND*, it can be observed that RTTs are constant regardless of *TD*. It indicates the *GF* algorithm selected the terminal node directly, thus the number of hops is 1. With the 100m *ND*, when *TD* rises, a notable rise of RTT can be observed when *TD* rises from 300m to 400m, which indicates that the *GF* algorithm worked in the reproduction to forward the packets via a multi-hop route when the destination is out of its radio range. With the 300m *ND*, a tendency can be observed that, the network delay presents a perfect linear rise, with the growth of *TD*, which can be considered as the number of hops with such large enough *ND*. The result shows the tendency that how hop of the route changes with different *NDs* and *TDs*.

$$\text{MinimalRequiredHops} = \lceil TD / \text{RadioRange} \rceil \quad (2)$$

6.3 Packet loss issue in Greedy Forwarding algorithm

During experiments, a packet loss was detected when *Node 0* try to send BTP echo request to *Node 4*, same is the *Node 0* try to response, with a particular scenario that 4 nodes in a line, *ND* is 100m and *TD* is 400m. In this Section, we discuss the cause of the packet loss, and how to quantify it.

As described in Section 5, *Friis Propagation Loss Model* is employed in the reproduction, making the

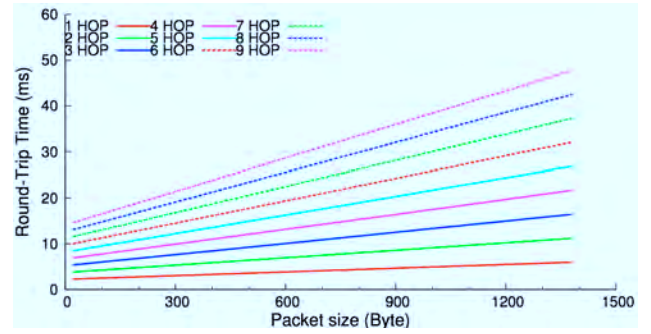


Fig. 7: Average RTT in Simulation

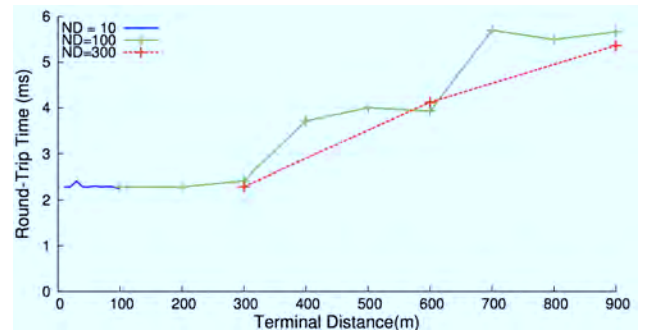


Fig. 8: RTT-Distance

communication channel unstable; this is the scenario we've not realized in the real testbed yet. In this reproduction, the maximum stable transmitting radius of a node is in the range from 300m to 400m. Thus *Node 4* is at the edge of the transmitting radius of *Node 0*, which means the communication channel between them is unstable. With an extremely unstable channel, beacon messages from *Node 4* to *Node 0* are unexpected. An unexpected beacon makes a location table entry that can hardly be reached as in Figure 9.

As depicted in Figure 9. Consider the following scenario:

Alice (*Node 0*) wants to communicate with *Bob* (*Node 4*), the channel between them is unstable due to the distance or obstacle. But *Carol* (an intermediate node) has good communication channels with *Alice* and *Bob* without message loss. The three repeatedly broadcast beacon message to inform each other their existence. However *Alice* still can receive some beacon messages from *Bob* randomly with a loss ratio of

PLR_B . When *Alice* gets any message (usually a beacon message) directly sent from *Bob*, she will instantly label *Bob* as her *Neighbour* in her *LocT* as an entry with a default lifetime ($T(LocTE)$) of 20s. And then, *Alice* will directly send messages to *Bob*; the packet could be lost, with a possibility of PLR_P . Otherwise, in order to reach *Bob*, *Alice* will deliver her message to *Carol*, letting her to forward the message to *Bob*, with no loss.

In a particular reproduction, *Alice* received 41 out of 3254 unexpected beacon messages from *Bob*, which is founded in the log file. 4 among the 41 total beacon messages from *Bob* is encountered during the BTP echo operation. Remember, PLR_P is the loss ratio of BTP echo packet, which is supposed to be higher than PLR_B due to different packet length. To simplify, assume that $PLR_P = 0$, and the unexpected beacon message effective periods(20s) on both sides do not collide or overlap with each other. With the BTP echo interval of 0.5s, there is supposed to be 40 packet losses every unexpected beacon message encountered. Thus, there is supposed to be $4 \times (20/0.5) = 160$ packet losses in the experiment, and it is in accordance with the result. With N as the total number of beacons from a sender (SE), N_d as the number of delivered beacons from a sender (SE). Then, do an preliminary calculation on the beacon packet lost ratio in equation 3:

$$PLR_B = 1 - (N_d/N) \quad (3)$$

With $N_d = 41$, $N = 3254$, we get a loss ratio of 98.7%.

In a statistics point of view, assume f_B as the frequency of beacon message, T as the lifetime of *LocTE*, then we have the expectation of loss ratio in total:

$$total\ loss = PLR_P \times (1 - PLR_B^{(T \times f_B)}) \quad (4)$$

To simplify again, assume $PLR_P = 100\%$ when PLR_B is close to 100%. Hence the loss ratio is only connected with f_B , PLR_B and T . According to the GeoNetworking implementation, each node broadcasts a beacon message every a little bit longer than 3 seconds. With $f_B = 1/3$ Hz, $PLR_B = 0.987$, $T = 20$ s, then we have the loss ratio of 8.35%. Recall the simplification

we made, the observed value may be slightly different. The observed value of 7.3% in the reproduction proved this point. According to the Equation 4, the packet loss could be extremely high under certain condition as depicted in Figure 9. Another reproduction proved it, and it will be discussed in further research.

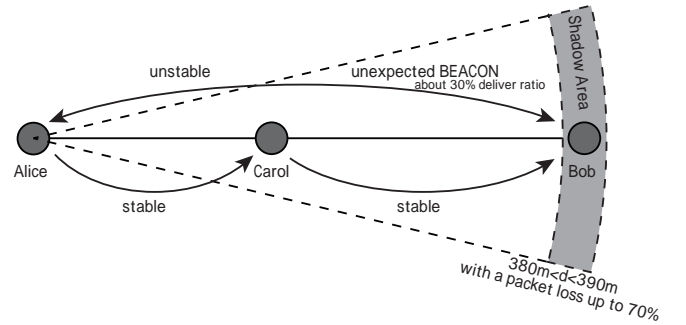


Fig. 9: Unexpected Beacon loss

7 Conclusions and future works

In this paper, we have successfully reproduced real testbed experiments in simulated network environment using NS3-DCE. With the proper wireless configuration and the calibrations, the reproduction produced realistic results, which can be used to predict the behavior of GeoNetworking implementation in real world. Based on the fact, several extended experiments of the GeoNetworking was conducted with NS3-DCE. The results indicate that, the implementation succeeded in delivering packets up to 9 hops with any desired number of nodes; meanwhile the *GF* algorithm functions properly; yet a packet loss is observed in configurations of a critical communication distance. Finally we quantified the packet loss, and found it is only related to 4 factors: beacon frequency, lifetime of *LocTE* and PLR of beacon and BTP; moreover, it could be extremely high under some certain conditions.

As a future work, we consider the followings: First, more factors should be introduced to the reproduction *E.g.*, a moving mobility model, a complicated 2D distribution of nodes, other communications modes. Second, IPv6 over GeoNetwork should be ported to NS3-DCE for more extended experiments. Last, more ef-

efficient routing strategy can be evaluated in the simulated networks, to solve the packet loss issue discovered in the extended scenarios. It is worth discussing whether the current routing strategy is the best and most efficient.

References

- 1) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical addressing and forwarding for point-to-point and point-to-multipoint communications; Sub-part 1: Media-Independent Functionality, July 2014.
- 2) ISO 21217:2010 Intelligent transport systems – Communications access for land mobiles (CALM) – Architecture, April 2010.
- 3) Brad Karp and H. T. Kung. Gpsr: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom 2000, August 6.-11., 2000, Boston, Massachusetts, USA*, pages 243–254. ACM / IEEE, August 2000.
- 4) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol, August 2014.
- 5) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 6: Internet Integration; Sub-part 1: Transmission of IPv6 Packets over GeoNetworking Protocols, May 2014.
- 6) Thouraya Toukabri, Manabu Tsukada, Thierry Ernst, and Lamjed Bettaieb. Experimental evaluation of an open source implementation of IPv6 GeoNetworking in VANETs. In *ITST 2011 : 11th International Conference on Intelligent Transport System Telecommunications*, Saint-Petersburg, Russia, August 2011. Conference is technically co-sponsored by IEEE Communications Society and co-organized by the Technical Sub-Committee on Vehicular Networks and Telematics (VNAT).
- 7) ZiyaCihan Taysi and AliGokhan Yavuz. Etsi compliant geonetworking protocol layer implementation for iverc simulations. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 3(1), 2013.
- 8) Victor Sandonis, Ignacio Soto, Maria Calderon, and Manuel Uruea. Vehicle to internet communications using the etsi its geonetworking protocol. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, pages n/a–n/a, 2014.
- 9) J.J. Anaya, E. Talavera, F. Jimenez, J.G. Zato, N. Gomez, and J.E. Naranjo. Geonetworking based v2v mesh communications over wsn. In *Intelligent Transportation Systems - (ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on*, pages 2421–2426, Oct 2013.
- 10) Manabu Tsukada, Jos Santa, Satoshi Matsuura, Thierry Ernst, and Kazutoshi Fujikawa. AnaVANET: an experiment and visualization tool for vehicular networks. In *9th International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities (TRIDENTCOM 2014)*, Guangzhou, China, May 2014.
- 11) Manabu Tsukada, Jos Santa, Satoshi Matsuura, Thierry Ernst, and Kazutoshi Fujikawa. On the experimental evaluation of vehicular networks: Issues, requirements and methodology applied to a real use case. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 14(1), 12 2014.
- 12) D. Camara, H. Tazaki, E. Mancini, T. Turletti, W. Dabbous, and M. Lacage. DCe: Test the real code of your protocols and applications over simulated networks. 52(3):104–110, 2014.
- 13) Hajime Tazaki, Frédéric Uarbani, Emilio Mancini, Mathieu Lacage, Daniel Camara, Thierry Turletti, and Walid Dabbous. Direct code execution: Revisiting library architecture for reproducible network experiments. In *Proceedings of the Ninth ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*, CoNEXT '13, pages 217–228, New York, NY, USA, 2013. ACM.

Dynamic Firewall for a Vehicle based on States of Controlled Side.

Asuka ONIKI* and Kenya SATO*

(Received November 21, 2016)

Recently, Attention has been paid to vehicles which the Internet connection function are mounted. And they will become popular and provide various services in public place. But there are some problems which provoke low acceptability of the society: worries about invasion of safety and privacy caused by unauthorized access or error in the operation of the vehicle.

The purpose of this research is to develop appropriate access control function for an vehicle which considers safety and privacy of the people being near the vehicle. We propose a firewall which can change its policy dynamically during remote control even the vehicle already authenticates its user.

As an example, we have made a prototype of proposed firewall for a miniture vehicle type robot. We also have evaluated the overhead of packet processing and the round trip time.

Key words : firewall, in-vehicle system, access control.

キーワード : ファイアーウォール, 車載システム, アクセス制御.

車両状態を考慮した 車載ダイナミックファイアウォール

鬼木 明日香, 佐藤 健哉

1 はじめに

近年, インターネットは情報システムだけでなく, 組込みシステムにおいても活用され始めている. 中でも自動車の情報化は最も注目を集めている分野の一つであり, 通信サービスの発展による社会変革が期待されている. しかし, インターネットに接続することで, 不正アクセスによるプライバシーの侵害や通信障害や操作ミスによる交通事故が起こることが懸念されており, 社会の受容性が低いことが問題となっている¹⁾.

この現状から, 車両を含めた組込みシステム向けの通信アクセス制御手法の研究²⁾³⁾が活発に行われている

が, 車両周辺の人々の安全やプライバシーを考慮した手法は確立されていない.

そこで本研究では, 車両自身が直接取得したセンサ情報やシステム情報をアクセス制御に反映させることで, 遠隔操作中においても車両および車両周辺の状態に応じて動的にアクセス制御を変更するファイアウォールを検討し, 車両所有者の被害だけでなく周囲の第三者への被害の防止を目指す.

* Department of Information Engineering, Graduate School of Science and Technology, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-7564, E-mail : asuka.oniki@nislabs.doshisha.ac.jp

2 問題点

情報端末で利用されている従来のアクセス制御は一般的に、事前登録したユーザを認証し、その認証に基づいてアクセス制御を行う。

この従来のアクセス制御をそのまま車両へ適用する場合、以下の問題が発生する。

周囲の人の安全やプライバシーを考慮していない

従来の情報システムでは被害対象はシステム所有者自身の情報資源のみであった。一方、公共の場で動作する車両の場合は、操作中に周囲にいる人々に及ぼす衝突への危険性や情報取得によるプライバシーの侵害について対策しなければならない。従って、サイバー攻撃などによる不正認証や正規ユーザの操作ミスによる被害への対策を強化する必要がある。

急な通信切断時の対策ができない

通信の障害及び妨害が発生した場合、突然操作不能の状態に陥ってしまう。車両では機器の物理動作を制御することが主な機能となるため、操作ユーザとの通信が切断された場合でも操作不能となることを防止する仕組みが必要となる。

3 提案システム

3.1 概要

被操作側である車両の状態を考慮することで、制御ポリシーを動的に最適化するファイアウォールを提案する。ユーザを認証し遠隔操作開始後、車両は自身が取得したセンサ情報やシステム情報をリアルタイムに参照し、遠隔操作中においても状態変化に応じて操作端末の権限や操作の自由度を制限する。

提案システムを導入することによって、Fig. 1のように、周辺の人と衝突しそうな時には認証ユーザであっても操作を制限することや、通信障害時や通信不良時には周辺にいる非認証のユーザによる操作を許可することが可能となる。ユーザの認証に依存しないアクセス制御となるため、2章で挙げた問題点への対策を施すことができる。

3.2 対象車両の要件

本提案ファイアウォールを導入対象の車両の要件を以下に示す。

- 公共の場で遠隔操作サービスを提供する。

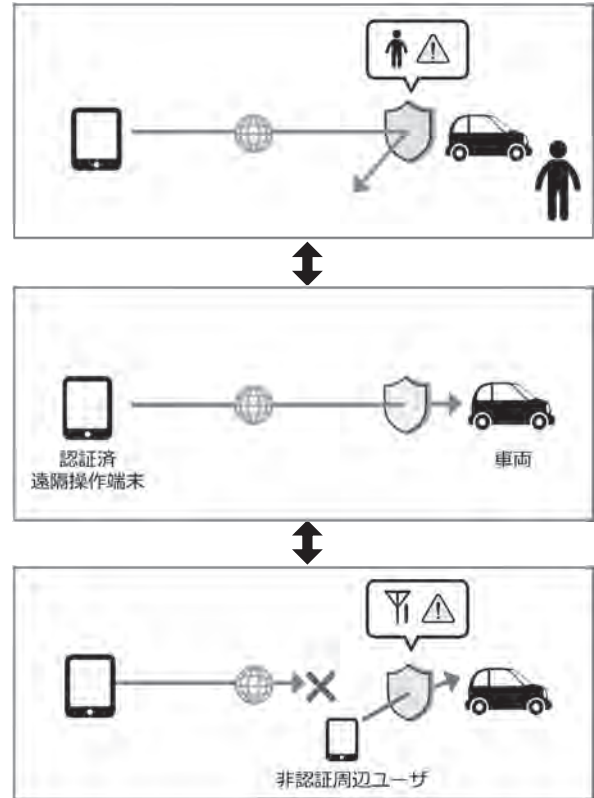


Fig. 1: 提案システムの概要

- センサが搭載されており、その制御が可能である。
- ベンダーと所有者が異なる。
- ベンダーによる悪意や設定ミスがないものとする。

3.3 提案ファイアウォールの仕様

提案ファイアウォールを導入した車両のシステム構成を Fig. 2 に示す。提案ファイアウォールは、監視項目・ポリシー変更条件・ポリシー群の3つのモジュールで構成される。以下に各モジュールの詳細を示す。また、提案するファイアウォールの動作フローを Fig. 3 に示す。

■ 監視項目

車両が常時監視する項目を設定する。接続されているセンサ情報やオペレーティングシステムの情報を一定の周期で取得するためのプログラムを記述する。一般的にはベンダーが動作仕様設計と共に記述しておくことを想定しており、ドライバ内に記述する。

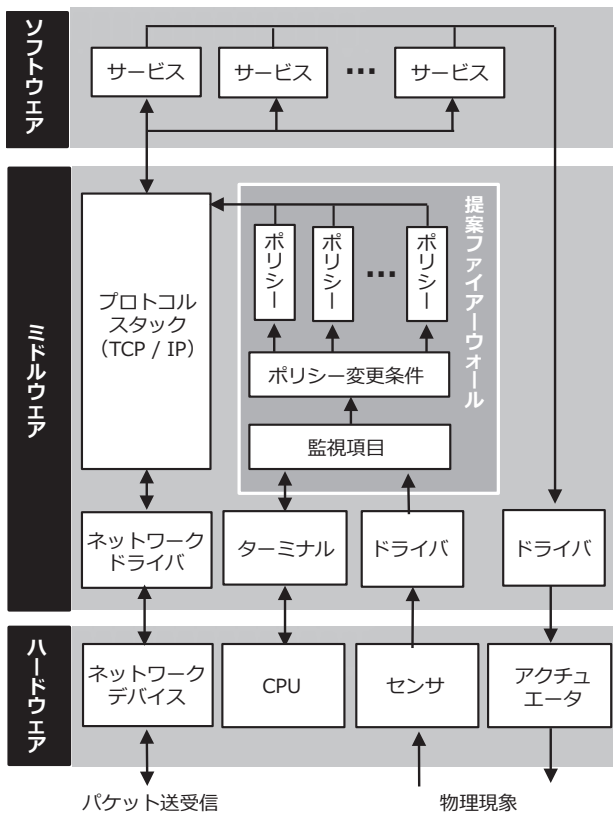


Fig. 2: 提案システムの構成

設定ファイルは以下の記述ルールに従う。

```
ITEM ( CYCLE ) { RULE }
```

- ITEM
ポリシー変更条件モジュールで参照するための監視項目名。
- CYCLE
ファイアーウォールがこのモジュールを参照する周期。単位はミリ秒。
- RULE
センサ値及びシステム情報を取得するためのプログラム。

■ ポリシー群

複数のポリシーを保持し、システム状態に応じて動的に有効・無効を切り替える。複数ファイルで構成され、ファイル名の昇順にポリシーの優先順位が高い。各ファイル内には TCP Wrapper⁴⁾ によるアクセス制御ポリシーを記述する。

各ポリシーの設定ファイルは以下の記述ルールに従う。

```
DAEMON : CLIENT : OPTION : CONTROL
```

- DAEMON
通信制御を行うプロセス名。
- CLIENT
通信を許可または拒否するホスト名または IP アドレス。
- OPTION
ログレベルの変更や実行したいコマンド。
- CONTROL
条件に該当する通信を許可する場合は allow、拒否する場合は deny と記述。

■ ポリシー変更条件

監視項目の値の条件と、それに応じた対象ポリシーの変更内容を設定する。

設定ファイルは以下の記述ルールに従う。

```
ITEM < [=, > ] VALUE : POLICY
```

- ITEM
参照する監視項目名。監視項目モジュールで定めた名前。
- VALUE
ポリシーを発火させる条件となる item の値。
- POLICY
条件に合った場合に有効にするポリシーのファイル名。

4 実装システム

4.1 実装環境

Fig. 4 に示す車両型ロボットに提案システムファイアーウォールを導入した。また、情報端末の Web ブラウザを経由し、モータを制御やセンサ値取得を行うアプリケーションを作成した。情報端末において表示されるアプリケーションは Fig. 5 のように、ファイアーウォールの適用ポリシーが変更されるたびに更新される。

実装環境を Table 1 に示す。

Table 1: 実装環境

遠隔操作アプリ	フレームワーク	WebIOPi
	プログラム言語	HTML5, JavaScript
	プロトコル	HTTP, HTTPS
ファイアウォール	プログラム言語	C 言語
OS	Debian / Linux	
ハードウェア	計算機	Raspberry Pi 2
	CPU	900MHz quad-core
	ネットデバイス	無線 LAN 子機 11g/b
	アクチュエータ	DC モーター
	搭載センサ	人感センサ, 電波センサ

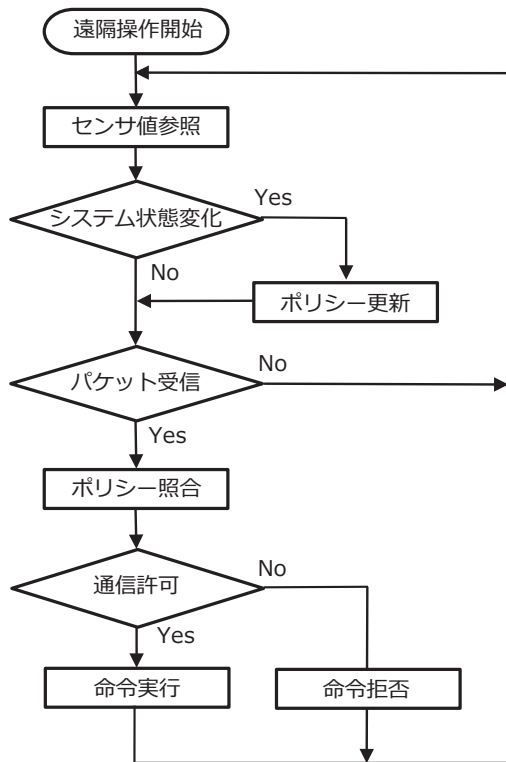


Fig. 3: 提案ファイアウォールの動作フロー

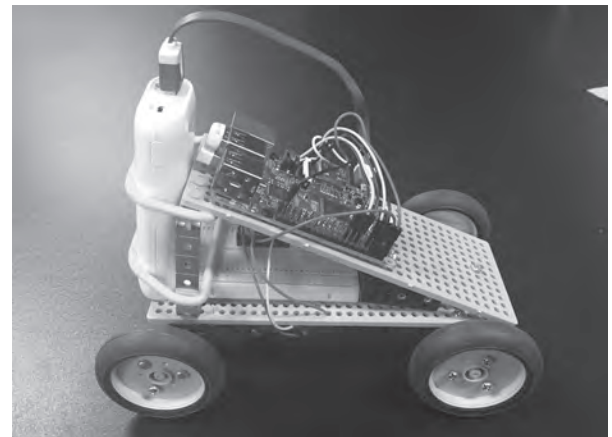


Fig. 4: 実装システム（車両型ロボット）

4.2 実装ポリシー

今回の実装システムにおいて、3種類のポリシー P1, P2, P3 を設定した。受信電波強度・CPU 使用率・人感センサ値の変化に応じて3種類のポリシーを入れ替える。各ポリシーの内容を以下に示し、それを実装するファイアウォールの設定ファイルを Fig. 6 に示す。なお、監視項目の rule に記述されるプログラムは省略している。

■ P1

遠隔操作ユーザとの通信電波強度が弱まると車両型ロボットの半径 10m 範囲以内の情報端末からのアクセスを許可する。

■ P2

通信電波が一定値以上あり、人物を検知していない時は認証ユーザに対する遠隔操作のみを許可する。

■ P3

人物を検知するとセンサやカメラモジュールへの操作を制限する。

5 評価

5.1 システム導入によるオーバーヘッド

提案システムを導入した際の1パケットの処理にかかる平均オーバーヘッドを算出した結果を Fig. 7 に示す。監視項目モジュールを動作させず、ポリシーを P2 に固定した場合を従来のアクセス制御とした。監視項目数を変化させてオーバーヘッドの増加量を比較した。

5.2 ポリシー切り替えとラウンドトリップタイム

情報端末から組み込みシステムへ命令を送信して実行結果の応答が返ってくるまでの時間（ラウンドトリップタイム）を算出した。5秒おきに平均ラウンドトリップタイムの平均値を計算し、時系列に並べた結果を Fig. 8 に示す。

PCの操作を伴う遠隔協調作業の伝送遅延に関する研究⁵⁾によると、ディスプレイ情報伝送方式によらず操作遅延が発生する環境において200ミリ秒以上

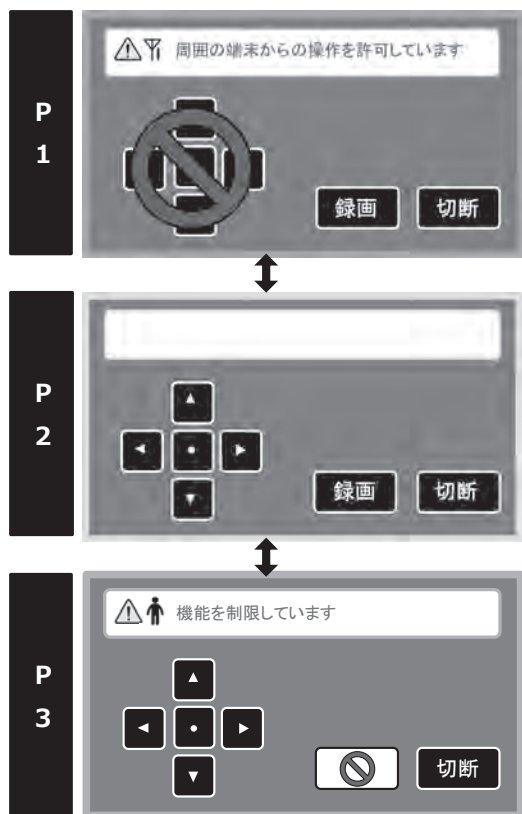


Fig. 5: 実装システム（制御用インターフェース）

の遅延が作業に影響を及ぼすと報告されている。従って今回は許容遅延時間を 200 ミリ秒と設定した。

6 考察

6.1 実験結果に対する考察

車両は情報端末と比較するとメモリや CPU の性能に限りがあり、リアルタイム性が重視されるという特徴がある。提案システムを導入した際の通信オーバーヘッドを算出した結果、3つの監視項目を動作させても通信処理はリアルタイム性を損なうことなく機能した。

ポリシー切り替えのオーバーヘッドが大きいことが分かった。センサ値の誤差によってポリシーが頻繁に変更されることが問題であったため、誤差の影響を軽減する工夫が必要となる。

提案ファイアウォールではポリシーの設定が複雑となる可能性があるが、車両は情報システムとは異なりシステムの利用用途が限定される上、一度ポリシー

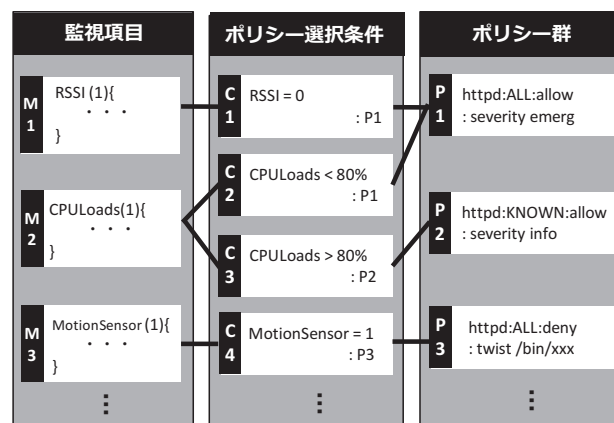


Fig. 6: 実装システムにおけるポリシー

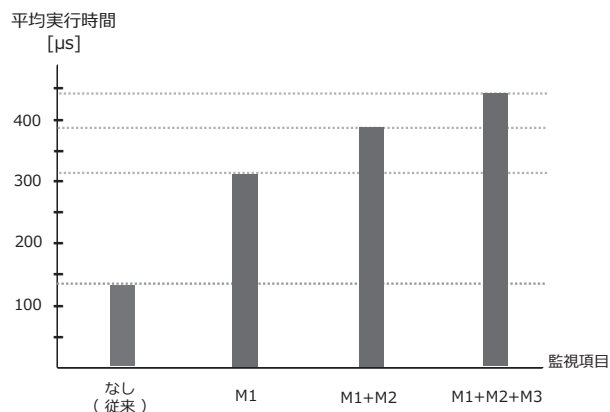


Fig. 7: 監視項目数とオーバーヘッド

を設定すると変更する必要はほとんどない。従って、ベンダーが設計段階で基礎的なポリシーをドライバと共に組み込むことでユーザの運用な煩雑さは軽減することが可能となる。

6.2 提案システムの特長

提案システムでは、車両周辺の人々の安全とプライバシーを考慮するという本来の研究目的に加え、以下に示すような特長がある。従来のファイアウォールと比較すると、車両により適したファイアウォールであると考察する。

ポリシー設定のモジュール化

提案システムは3層のモジュールで構成されており、細かいアクセス制御が設定可能である。各車両の利用用途やユーザの特性に応じて必要なポリシーを追加す

7 おわりに

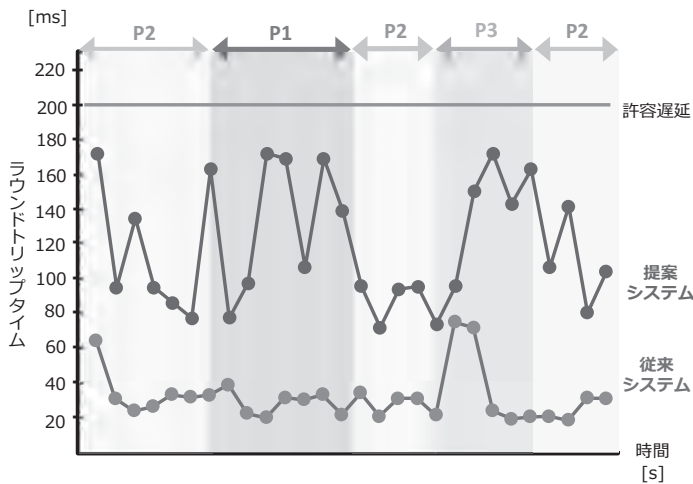


Fig. 8: ポリシー動的変更とラウンドトリップタイム

るなどのカスタマイズが容易なため、汎用性の高い機構を実現可能である。

新たなセンサを搭載する場合は、専用ドライバにベンダーが記述しておけば、ハードウェアの差異を気にすることなくポリシーを設定することが可能となる。

車両自身が取得したデータに基づくアクセス制御

提案システムは車両自身が直接取得したデータに基づいてアクセス制御ポリシーを変更する。そのため、従来のアクセス制御において問題となっている認証情報の偽装による不正なアクセスを防止することが可能である。

6.3 今後の展望

ポリシーの内容や実装システムの種類によって動作が大きく異なることが予想されるため、今後は様々な種類のポリシーや実装を試していきたいと考えている。

本提案システムは車両周辺の人々の安全性が向上する代わりに、操作ユーザの利便性が低下する。両者のバランスを最適化するためのアルゴリズムを考える必要がある。IoT時代に対応したシステム開発手法の国際規格である DAF for SSCD⁶⁾ に基づき、システムを安心して利用可能な度合い (ディペンダビリティ⁷⁾) において評価していく。

インターネット通信を活用し、車両を遠隔操作する場合において周囲の人々の安全とプライバシーを考慮するために、遠隔操作を行うユーザを認証後も常時、車両自身が取得したセンサ情報やシステム情報をリアルタイムに参照することで、状態変化に応じて操作端末の権限や操作の自由度を制限するファイアウォールを提案した。

車両型ロボットに提案ファイアウォールを導入して遠隔操作することで、パケット処理の平均オーバーヘッドと通信時のラウンドトリップタイムを算出して従来システムと比較した。その結果、3つの監視項目を動作させても通信処理は設定した許容遅延を下回り、リアルタイム性を損なうことなく機能した。

参考文献

- 1) 内閣府, 「インターネット上の安全・安心に関する世論調査」, (2015).
- 2) 熊谷康太, “組込みシステム向け軽量スクリプト言語へのアクセス制御機構の導入,” 情報処理学会技術研究報告, (2014).
- 3) 安積卓也, “コンポーネントシステムを用いた組込みシステム向けアクセス制御,” 電子情報通信学会論文誌, (2010).
- 4) “TCP Wrappers Configuration files,” https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_Linux/6/html/Security_Guide/sect-Security_Guide-TCP_Wrappers_and_xinetd-TCP_Wrappers_Configuration_Files.html, 参照 Oct. 10, 2016.
- 5) 北端 美紀, “遠隔協調作業環境において伝搬遅延が協調作業に及ぼす影響,” 電子情報通信学会技術研究報告, **113**, 5-10 (2013).
- 6) “Documents Associated With Dependability Assurance Framework For Safety-Sensitive Consumer Devices (DAF) Version1.0,” <http://www.omg.org/spec/DAF/1.0/>, 参照 Oct. 10, 2016.
- 7) “Dependability Engineering for Open Systems,” <http://deos.or.jp/technology/words/index-j.html#ta>, 参照 Oct. 10, 2016.

Achieving Multiple-Vehicle Message Exchange by Spatially Coupled Coding

Wei HOU* , Shan LU** and Jun CHENG*

(Received March 20, 2017)

In this paper, we focus on message exchange problem of multiple attachable vehicles: each vehicle want to transmit its message to all others. By using multiple access coding and two-way physical network coding techniques, needed slot of achieving message exchange can be a few. During message exchange, these are two communication types: no collision and two-user collision. A spatially coupled coding, repeater-combiner-convolutional coding, is used to protect messages in no collision case and two-user collision case. Analysis results show that the spatially coupled coding provide error-correcting performance approaching theoretical limit.

Key words : Multiple-vehicle, spatially coupled coding

1. Introduction

Vehicular communication network consists of some vehicles and roadside units that exchange safety warnings or traffic messages to avoid accidents and traffic congestion. Although roadside units have more powerful process ability, they are not very flexible due to their fixed positions. A rapid and reliable multiple-vehicle message exchange scheme is necessary sometimes.

To achieve exchange messages among multiple attachable vehicles, a random access scheme such as ALOHA can be used.¹⁾ However, communication time of random access scheme is uncertain. And, when multiple vehicles transmit in the same slot, a collision may take place. In practice, the probability is especially high in case of two-user collision that is usually not recovered.²⁾ This could result in quite a bit of communication delay. It is interesting to design more effective transmission scheme for multiple-vehicle message

exchange.

From multiple-access coding (MAC) standpoint, when collision occurs, rebuilding superimposed messages is actually detection and decoding issue³⁾⁻⁵⁾ A good multiple-access code may work out collision issue. If a two-user collision can be solved, it is possible that reducing communication time by establishing a message exchange scheme with two-way physical layer network coding (TWPLNC) technique^{6),7)}

Consider a vehicle-vehicle communication system consisting of multiple vehicles. Each vehicle can transmit its message within a certain radius. If three vehicles are in the same radius area, they automatically build a two-jump link. If more than three vehicles are in the same area, they can not build chain since there exists collision of three or more users. On this way, N vehicles may build a $(N - 1)$ -jump chain that is called N -vehicle chain. A 6-vehicle chain is illustrated in Fig. 1. In a N -vehicle chain, each vehicle want to transmit its message to all others. Assume that each vehicle is

* Department of Intelligent Information Engineering and Sciences, Doshisha University, Kyoto, 610-0321, Japan
E-mail : hou.ita@outlook.com, jcheng@mail.doshisha.ac.jp

** Dept. of Electrical, Electronic, and Computer Engineering, Gifu University, 501-1193 Japan
E-mail : shan.lu.jp@ieee.org

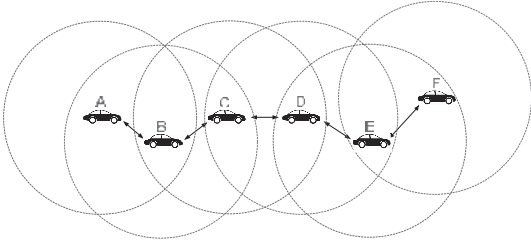


Fig. 1. Virtual communication chain of 6 vehicles..

full-duplex and two transmission frequencies are available. For saving communication time, two adjacent vehicles in a chain automatically choose different frequencies to transmit messages. In Fig. 1, vehicles A, C, and E adopt frequency f_1 , and vehicles B, D, and F adopt frequency f_2 . Set one unit transmission time be a slot. We can see that achieving message exchange in N -vehicle chain need at least $N - 1$ slots. In fact, it can be completed with least slots by using multiple access coding and two-way physical layer network coding (MAC-TWPLNC) techniques.

A message exchange scheme with $N - 1$ slots for N -vehicle chain is described as follows:

- Divide N vehicles into two type: end and middle. For example, in Fig. 1, A and F are end vehicles, others are middle vehicles.
- In the first slot, all vehicles transmit their own messages.
- From the second slot, each end vehicle not transmit.
- From the second slot, each of middle vehicles transmit newly received message(s). If a middle vehicle receive one new message, transmit the message. If a middle vehicle receive two new messages, transmit their module-2 sum.
- For all vehicles, own or received message is allowed only one time.

To facilitate the understanding, we show MAC-TWPLNC transmission scheme of 6-vehicle chain in

Table 1. For all vehicles, each row of 'message' illustrates currently owned messages and each row of 'slot' illustrates currently transmitted messages. For example, at slot 2, vehicles B, C, and D transmitted messages $a \oplus c$, $b \oplus d$, and $c \oplus e$ to their neighbours, respectively. Vehicle C receive $(a \oplus c) + (c \oplus e)$ and work out messages $a \oplus c$ and $c \oplus e$. Then a and e can be obtained due to known c . We see that 5 slots are used to achieve message exchange of the 6-vehicle chain.

In this MAC-TWPLNC based message exchange scheme, there are no-collision and two-user collision cases. But a good two-user code usually can not perform well for single-user (or no-collision) case. The design difficulty is to find out a error-correcting code that can universally achieve capacity over single user channel and two-user multiple-access channel.

Spatially coupled codes are research hot spot in past few years. They are constructed by associating multiple identical codes.⁸⁾ It is proven that spatially coupled codes can universally achieve capacity limit for various channels⁹⁾⁻¹²⁾ Due to this reason, we tend to choose spatially coupled codes in multiple-vehicle message exchange scheme.

In this paper, we use our proposed spatially coupled repeater-combiner-convolutional (SC-RCC) code as error-correcting code on MAC-TWPLNC message exchange scheme. The extrinsic information transfer (EXIT) evolution is employed to analyze the belief propagation (BP) iterative detection and decoding on Gaussian noisy point-to-point and multiple access channels. Numerical results show that SC-RCC code ensemble has theoretical-limit-approaching ability to protect messages on no collision case and two-user collision case.

2. SC-RCC Coding

In above section, we present MAC-TWPLNC based transmission scheme for message exchange of N -vehicle chain. However, in practical communications, there exist noise and interference in transmission channel. We assume that the interferences from non-

Table 1. MAC-TWPLNC transmission scheme of 6-vehicle chain.

	A	B	C	D	E	F
message	a	b	c	d	e	f
slot 1	a	b	c	d	e	f
message	ab	abc	bcd	cde	def	ef
slot 2		$a \oplus c$	$b \oplus d$	$c \oplus e$	$d \oplus f$	
message	abc	abcd	abcde	bcdef	cdef	def
slot 3		d	$a \oplus e$	$b \oplus f$	c	
message	abcd	abcde	abcdef	abcdef	bcdef	cdef
slot 4		e	f	a	b	
message	abcde	abcdef	abcdef	abcdef	abcdef	bcdef
slot 5		f			a	
message	abcdef	abcdef	abcdef	abcdef	abcdef	abcdef

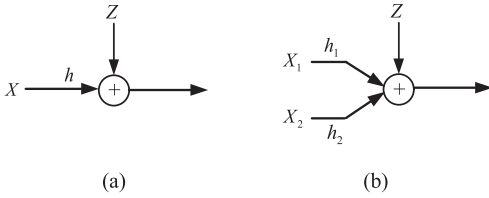


Fig. 2. Channel models of (a) point-to-point channel and (b) multiple access channel..

neighbour terminals are not dominant. For protecting against noise, we should use a kind of error correcting codes that have excellent decoding performance in both point-to-point channel and multiple access channel. Figure 2 illustrate these two types channel models. Here, transmitted symbols $X, X_1, X_2 \in \{\pm 1\}$, channel coefficients $h, h_1, h_2 \in [0, +\infty)$, and Gaussian noise $Z \sim \mathcal{N}(0, 1)$.

To perform well for the two channels, spatially coupled coding is a solution due to its universality. In this work, we use spatially coupled repeater-combiner-convolutional (SC-RCC) coding¹³⁾ to fit the MAC-TWPLNC based transmission scheme. The iterative BP decoding is analysed by EXIT evolution.

2.1 Code Construction

Denote by SC-RCC code $\mathcal{S}(Q, L, \mathcal{C}, M, N)$. The vector-wise factor graph of an example $\mathcal{S}(3, 6, \mathcal{C}, M, N)$ is shown in Fig. 3. The squares with equal sign, plus sign and \mathcal{C} sign are equation constraint (EC),

single-parity constraint (SPC), and convolutional code constraint (CCC), respectively. Besides, small filled squares are interleavers.

In SC-RCC encoding, the message μ_t of the t -th terminal, $t = 0, 1, \dots, N - 1$, is divided into L message block. We have $\mu_t = \{\mu_{t,0}, \mu_{t,1}, \dots, \mu_{t,L-1}\}$, $\mu_{t,i} \in \{0, 1\}^M$, $0 \leq i \leq L - 1$. Each $\mu_{t,i}$ is input into an EC that is actually a repeater, and then is repeatedly output Q times. Through interleavers, we get $\alpha_{t,iq} \in \{0, 1\}^M$, $0 \leq q \leq Q - 1$. Note that, for the purpose of spatial coupling, it should be that $Q \geq 3$. For an SPC that is actually a combiner, all of input bit vectors are mapped into one output bit vector that is bitwise modulo-2 sum of those input vectors. Through interleavers, we get $\beta_{t,j} \in \{0, 1\}^M$, $0 \leq j \leq L + q - 2$. Each $\beta_{t,j}$ is input into a CCC that is a convolutional component code \mathcal{C} with M bits input and N bits output. Then we obtain parity bit vector $\nu_t = (\nu_{t,0}, \nu_{t,1}, \dots, \nu_{t,L+Q-2})$, $\nu_{t,j} \in \{0, 1\}^N$. Message vector μ and parity vector ν will be mapped and transmitted. We get the t -th source's codeword

$$\mathbf{c}_t = \{\mu_{t,0}, \mu_{t,1}, \dots, \mu_{t,L-1}, \nu_{t,0}, \nu_{t,1}, \dots, \nu_{t,L+q-2}\}.$$

Through mapper of $\{0, 1\} \rightarrow \{+1, -1\}$, we get the t -th source's symbol vector

$$\mathbf{x}_t = \{\mathbf{u}_{t,0}, \mathbf{u}_{t,1}, \dots, \mathbf{u}_{t,L-1}, \mathbf{v}_{t,0}, \mathbf{v}_{t,1}, \dots, \mathbf{v}_{t,L+q-2}\}$$

where symbol blocks $\mathbf{u}_{t,i} \in \{\pm 1\}^M$ and $\mathbf{v}_{t,i'} \in \{\pm 1\}^N$.

The coding rate of the SC-RCC code

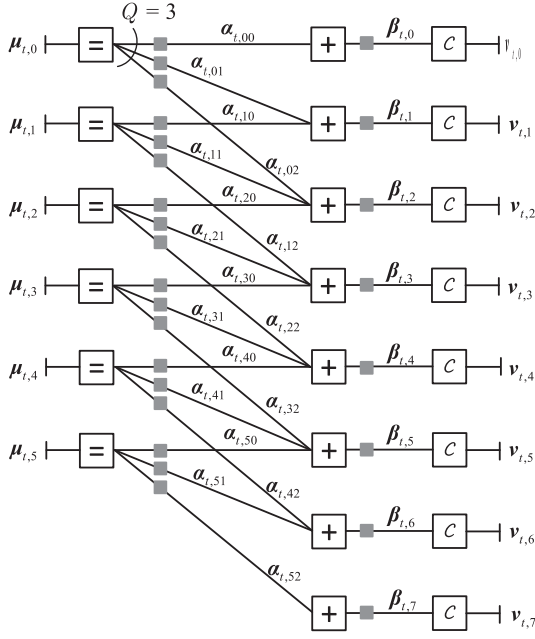


Fig. 3. Vector-wise factor graph of $\mathcal{S}(Q = 3, L = 6, \mathcal{C}, M, N)$.

$\mathcal{S}(Q, L, \mathcal{C}, M, N)$ is given by

$$r = \frac{LM}{LM + (L + Q - 1)N} = \frac{Lrc}{L(rc + 1) + Q - 1} \quad (1)$$

where $r_c = M/N$ is coding rate of convolutional component codes. When $L \gg Q$, $r \approx r_c/(rc + 1)$.

2.2 No Collision Case

In MAC-TWPLNC based transmission, a vehicle may only receive a message from its one-side neighbour. This case is just like a point-to-point communication with channel coding. We simple called no collision case.

For single message case, vehicle decode the received signal vector by iterative belief propagation (BP) algorithm on vector-wise factor graph. In a iteration, the constraints EC, SPC, and CCC process channel received signal information and *a priori* information on adjacent edges similar to variable node of LDPC code, check node of LDPC code, and BCJR decoder of convolutional code, respectively. Then, the constrains obtain extrinsic information for their adjacent edges. These current extrinsic information are used as *a priori* information for next iteration. After finishing iteration, message vector is worked out by

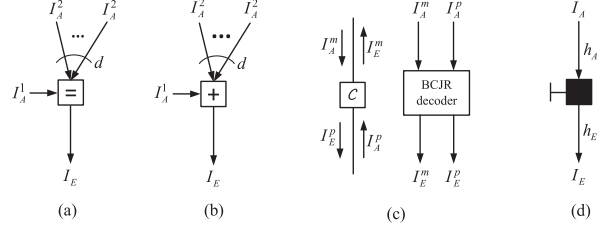


Fig. 4. EXIT illustration of (a) EC, (b) SPC, (c) CCC, and (d) MACC..

corresponding decision operation.

Using EXIT function analysis, we can determine the BP thresholds of SC-RCC code ensembles. Because BP threshold is for code ensemble with infinite code length, we denote SC-RCC code ensemble by $\mathcal{S}(Q, L, \mathcal{C})$. Before deriving EXIT evolution of $\mathcal{S}(Q, L, \mathcal{C})$, we first give local EXIT functions of EC, SPC, and CCC.¹⁴⁾

Let f and g denote EXIT Functions of EC and SPC, respectively. For a general local EC (or SPC) matching the proposed scheme, its extrinsic information I_E depends on a single *a priori* information I_A^1 and d identical *a priori* information I_A^2 , as shown in Fig. 4(a) (or Fig. 4(b)). From the computation of variable and check nodes' EXIT function,¹⁵⁾ the EXIT function of the local EC and SPC are given by

$$I_E \triangleq f(I_A^1, I_A^2, d) = J\left(\sqrt{[(J^{-1}(I_A^1)]^2 + d \cdot [(J^{-1}(I_A^2)]^2)}\right) \quad (2)$$

$$I_E \triangleq g(I_A^1, I_A^2, d) = 1 - J\left(\sqrt{[(J^{-1}(1 - I_A^1)]^2 + d \cdot [(J^{-1}(1 - I_A^2)]^2)}\right) \quad (3)$$

where the J -function is given in.¹⁵⁾

A local CCC is actually a convolutional code. It is decoded by a BCJR decoder. As a component processor matching the proposed scheme, the BCJR decoder can rebuild both the message part (input of CCC) and parity part (output of CCC). Let *a priori* information of the two parts are I_A^m and I_A^p , corresponding extrinsic information are I_E^m and I_E^p . Their relation is illustrated in Fig. 4(c). The EXIT functions of the two parts are

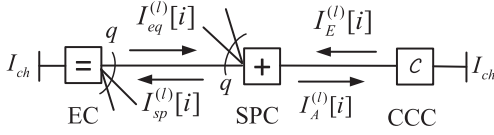


Fig. 5. The message passing at the i -th coupled position of $\mathcal{S}(q, L, \mathcal{C}, w)$.

defined by

$$I_E^m \triangleq \lambda(I_A^m, I_A^p) \quad (4)$$

$$I_E^p \triangleq \rho(I_A^m, I_A^p) \quad (5)$$

where the function λ and ρ can be determined by the Monte Carlo method.¹⁵⁾

Fig. 5 shows the l -th round message update at position i of the factor graph of $\mathcal{S}(Q, L, \mathcal{C})$, $0 \leq i \leq L-1$. Let I_{ch} be channel information. Let $I_{eq}^{(l)}[i]$, $I_{sp}^{(l)}[i]$, $I_A^{(l)}[i]$, and $I_E^{(l)}[i]$ be extrinsic information transferred from EC to SPC, SPC to EC, SPC to CCC, and CCC to SPC, respectively.

In order to simply analysis, we adopt the simple method introduced in.⁹⁾ By averaging *a priori* information, the EXIT update equations in $\mathcal{S}(Q, L, \mathcal{C})$ at coupling position i are given by

$$I_{eq}^{(l)}[i] = f\left(I_{ch}, \frac{1}{Q} \sum_{j=0}^{Q-1} g\left(I_E^{(l-1)}[i+j], \frac{1}{Q} \sum_{k=0}^{Q-1} I_{eq}^{(l-1)}[i+j-k], Q-1\right), Q-1\right) \quad (6)$$

$$I_E^{(l)}[i+j] = \lambda\left(g\left(1, \frac{1}{Q} \sum_{k=0}^{Q-1} I_{eq}^{(l-1)}[i+j-k], Q\right), I_{ch}\right) \quad (7)$$

By updating 式 (6) and 式 (7) with initial values $I_{eq}^{(0)}[i] = I_{ch}$, $0 \leq i \leq L-1$, we determine the BP threshold of the mutual information of SC-RCC code ensemble $\mathcal{S}(Q, L, \mathcal{C})$. The BP threshold is defined by

$$I^{BP}(Q, L, \mathcal{C}) \triangleq \inf\{I_{ch} \in [0, 1] : \mathbf{I}_{eq}^{(l)} \xrightarrow{l \rightarrow \infty} \mathbf{1}\} \quad (8)$$

where $\mathbf{I}_{eq}^{(l)} = (I_{eq}^{(l)}[0], \dots, I_{eq}^{(l)}[L-1])$. From I^{BP} , we can obtain the corresponding BP threshold of h .

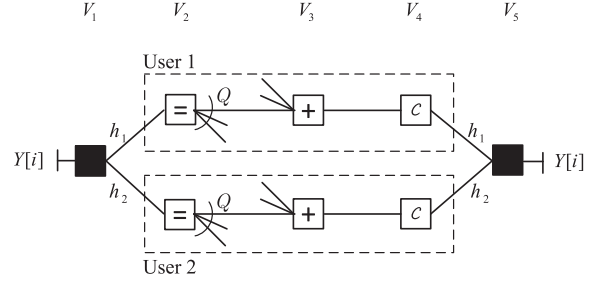


Fig. 6. The factor graph representation of 2-user MAC at the i -th coupling position.

2.3 Two-User Collision Case

In MAC-PLNC based transmission, a vehicle may receive superimposed message from its two neighbours. This case is just like two-user multiple access communication. We called two-user collision case.

As shown in Fig. 6, we see the factor graph representation of 2-user MAC at the i -th coupling position. The filled squares are multiple access channel constraints (MACC). We also use EXIT evolution to analyse iterative detection-decoding. Before deriving the EXIT evolution of the 2-user coding system, we first give local EXIT function of MACC.

Let ϕ denote EXIT Function of MACC. For a general local MACC, as shown in Fig. 4(a), extrinsic information I_E depends on *a priori* information I_A , *a priori* message power h_A , and extrinsic message power h_2 . The EXIT function of general MACC is defined by

$$I_E \triangleq \phi(I_A, h_A, h_E). \quad (9)$$

We employ a MAP detection at MACC. The ϕ -function can be calculated by.¹⁵⁾

For ease of description, we label MACC sets connected to ECs and CCCs by V_1 and V_5 , respectively. Besides, we label EC, SPC, and CCC sets by V_2 , V_3 , and V_4 , respectively. Let $I_{t,uv}[i]$ be the τ -th user's extrinsic information passed from a constraint in set V_u to a constraint in set V_v at the i -th coupling position, where $uv \in \{12, 23, 34, 45, 54, 43, 32, 21\}$. At l -th iteration, the τ -th user's update equations of extrinsic

information are given by

$$I_{\tau,12}^{(l+1)}[i] = \phi\left(I_{\tau',21}^{(l)}[i], h_{\tau'}, h_{\tau}\right) \quad (10)$$

$$I_{\tau,23}^{(l+1)}[i] = f\left(I_{\tau,12}^{(l)}[i], \frac{1}{Q} \sum_{j=0}^{Q-1} I_{\tau,32}^{(l)}[i+j], Q-1\right) \quad (11)$$

$$I_{\tau,34}^{(l+1)}[i] = g\left(1, \frac{1}{Q} \sum_{k=0}^{Q-1} I_{\tau,23}^{(l)}[i-k], Q\right) \quad (12)$$

$$I_{\tau,45}^{(l+1)}[i] = \rho\left(I_{\tau,34}^{(l)}[i], I_{\tau,54}^{(l)}[i]\right) \quad (13)$$

$$I_{\tau,54}^{(l+1)}[i] = \phi\left(I_{\tau',45}^{(l)}[i], h_{\tau'}, h_{\tau}\right) \quad (14)$$

$$I_{\tau,43}^{(l+1)}[i] = \lambda\left(I_{\tau,34}^{(l)}[i], I_{\tau,54}^{(l)}[i]\right) \quad (15)$$

$$I_{\tau,32}^{(l+1)}[i] = g\left(I_{\tau,43}^{(l)}[i], \frac{1}{Q} \sum_{k=0}^{Q-1} I_{\tau,23}^{(l)}[i-k], Q-1\right) \quad (16)$$

$$I_{\tau,21}^{(l+1)}[i] = f\left(0, \frac{1}{Q} \sum_{j=0}^{Q-1} I_{\tau,32}^{(l)}[i+j], Q\right) \quad (17)$$

where $\tau = 1, 2$ and $\tau' = 3 - t$.

By updating \mathfrak{A} (10) to \mathfrak{A} (17) with initial value $I_{\tau,uv}^{(0)}[l] = 0$, we can obtain the BP achievable power region (BP-APR). The BP-APR is defined as the set of all power tuples (h_1, h_2) such that all related $I_{\tau,uv}^{(\infty)}[l] \rightarrow 1$.

3. Numerical Results

In this section, we give some BP threshold performance of a rate 0.4839 SC-RCC code ensemble $\mathcal{S}(3, 30, \mathcal{C}(1/5))$, a rate 0.5 irregular LDPC code ensemble \mathcal{L}_1 with degree distributions $\lambda(x) = 0.267x + 0.176x^2 + 0.127x^3 + 0.43x^9$ and $\rho(x) = 0.113x^4 + 0.887x^7$, and a rate 0.5 irregular LDPC code ensemble \mathcal{L}_2 with degree distributions $\lambda(x) = 0.315434x + 0.242272x^2 + 0.0988336x^{16} + 0.05x^{17} + 0.293462x^{99}$ and $\rho(x) = x^7$. Here, \mathcal{L}_1 and \mathcal{L}_2 are optimal LDPC codes for one-user channel and two-user multiple access channel, respectively.

By using EXIT evolution analysis, we obtain the BP threshold of $\mathcal{S}(3, 30, \mathcal{C}(1/5))$, \mathcal{L}_1 , and \mathcal{L}_2 for no collision case are $h = 1.11, 1.06$, and 1.17 , respectively. For rate 0.5 codes, Shannon capacity limit is $h = 1.02$. We see that BP thresholds of SC-RCC code ensemble

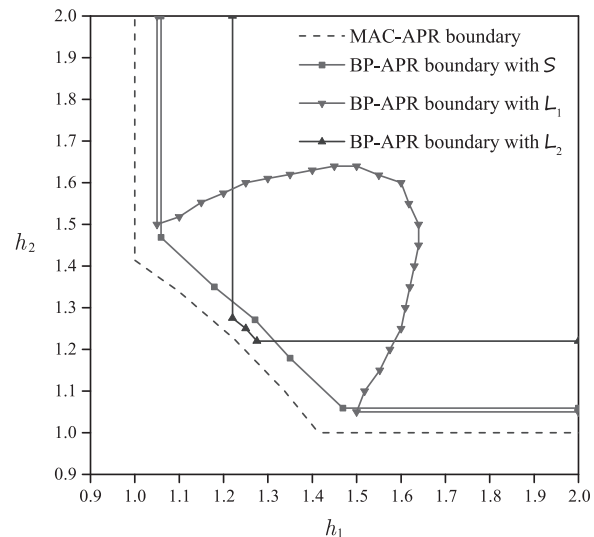


Fig. 7. BP-APR of $\mathcal{S}(3, 30, \mathcal{C}(1/5))$, \mathcal{L}_1 , and \mathcal{L}_2 for two-user collision case..

and one-user optimal LDPC code ensemble are more close to capacity limit. But two-user optimal code ensemble is not very good.

On the other hand, for two-user collision case, we illustrate BP decoding achievable power region (BP-APR) boundary of (h_1, h_2) of these three code ensembles in Fig. 7. The top right part of a boundary is BP-APR. We see that the boundary of SC-RCC code ensemble's BP-APR is universally near to that of multiple access channel achievable power region (MAC-APR). The boundaries of the two LDPC code ensembles are just partly close to that of MAC-APR.

4. Conclusion

We have used SC-RCC code as error-correcting code for MAC-TWPLNC based message exchange scheme and have investigated the belief propagation iterative detection and decoding performance with EXIT evolution analysis. Numerical results shown that SC-RCC code ensemble has theoretical limit approaching capacity to protect messages in both no collision case and two-user collision case.

This work was supported in part by the Japan Society for the Promotion of Science through the

Grant-in-Aid for Scientific Research (C) under Grant 16K06373, and in part by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology through the Strategic Research Foundation at Private Universities (2014-2018) under Grant S1411030.

References

- 1) D. Bertsekas, R. Gallager, and P. Humblet, *Data Networks*, vol. 2, Prentice-Hall International, 1992.
- 2) J. Metzner, "On improving utilization in ALOHA networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 24, no. 4, pp. 447-448, 1976.
- 3) T. Cover and J. Thomas, *Elements of Information Theory*, Wiley Press, 2006.
- 4) D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.
- 5) L. Li, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Outage capacities and optimal power allocation for fading multiple-access channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 4, pp. 1326-1347, 2005.
- 6) S. Zhang, S. C. Liew, and P. P. Lam, "Hot topic: physical layer network coding," Proc. 12th Annual International Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'06), pp. 358-365, Los Angeles, USA, Sep. 2006.
- 7) S. Zhang and S. C. Liew, "Channel coding and decoding in a relay system operated with physical-layer network coding," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 7, no. 5, pp. 88-796, Jun. 2009.
- 8) A. J. Felström and K. S. Zigangirov, "Time-varying periodic convolutional codes with low-density parity-check matrices," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 45, no. 6, pp. 2181-2191, Sep. 1999.
- 9) S. Kudekar, T. Richardson, and R. Urbanke, "Threshold saturation via spatial coupling: why convolutional LDPC ensembles perform so well over the BEC," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 2, pp. 803-834, Feb. 2011.
- 10) S. Kudekar, T. Richardson, and R. Urbanke, "Spatially coupled ensembles universally achieve capacity under belief propagation," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, no. 12, pp. 7761-7813, Dec. 2013.
- 11) A. Yedla, P. S. Nguyen, H. D. Pfister, and K. R. Narayanan, "Universal codes for the Gaussian MAC via spatial coupling," in *Proc. 49th Annual Allerton Conf. on Commun., Control, and Comp.*, Monticello, IL, Sept. 2011, pp. 1801-1808.
- 12) A. Yedla, Y. Jian, P. Nguyen, and H. D. Pfister, "A simple proof of Maxwell saturation for coupled scalar recursions," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 60, no. 11, pp. 6943-6965, Nov. 2014.
- 13) W. Hou, S. Lu, and J. Cheng, "Spatially coupled repeater-combiner-convolutional codes," *IEEE Commun. Letters*, vol. 20, no. 1, pp. 21-24, Jan. 2016.
- 14) S. ten Brink, "Convergence behavior of iteratively decoded parallel concatenated codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 10, pp. 1727-1737, Oct. 2001.
- 15) S. J. Johnson, *Iterative Error Correction*, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2010.

Visualization Method of Bicycle Riding Situations using Center of Curvature

Ryoichi TKAHASHI^{*}, Hajime KATO^{*}, Yuto SKAJYO^{*} and Shigeo KANEDA^{*}

(Received May 8, 2017)

Bicycles are a low-cost and popular form of transportation, and the age distribution of bicycle riders ranges from young children to senior citizens. Naturally, the age of a rider influences his/her bicycle control ability. For example, senior citizens often ride with a slight wobble. However, no current tool visualizes the bicycle control ability of individual riders. To resolve this problem, this paper proposes a new visualization method of bicycle riding situations that traces the steering angle of orientation. The trajectory of the angle of orientation is generated and the center of curvature is calculated from it. This paper clarifies that the center of curvature forms a v-formation pattern when the rider makes a turn. Since the angle trajectory basically equals the vehicular sweep path of the front wheel, the v-formation's angle equals the angle of the bicycle's turn, and the v-formation distribution on the horizontal surface describes the level of the steering control. We developed a prototype system using smartphone sensors and generated the center of curvature from the azimuth angle of an Android smartphone. We experimentally compared both young and senior riders on a slalom test course and conclude that the latter make turns with angles that are too sharp.

Key words : L^AT_EX, Bicycle, Smart-phone, Drive, Visualization, Curvature.

キーワード : L^AT_EX, 自転車, スマートフォン, 運転, 可視化, 曲率.

スマートフォンセンサを用いた自転車挙動表示法の提案

高橋 遼一, 加藤 一, 坂上 友都, 金田 重郎

1 はじめに

自転車は、身近な乗り物だけに、幅広い年齢層に利用されている。しかし、街角を走る自転車を見ていると、若者の運転には機敏さを感じ得ても、高齢者の運転には、ぎこちなさを感じることもある。では、若者の操縦と、高齢者の操縦はどこがどう違うのであろうか。この様に、若者と高齢者の違いにとどまらず、自転車の操縦の態様を可視化して、安定状態を直感的に読み取ることが出来ないか、と言うのが本稿の問題意識である。

上記課題を達成するため、本稿では、自転車のハンド

ル方位角を用いた、近似的な前輪の移動軌跡から、自転車挙動を「見える化」する。具体的には、1) 東西南北を示す方位角センサーを用いてハンドル方位角をサンプリングし、得られたデータから、ハンドル方位角の示す方向に、自転車(前輪)が一定速度で進んでいるとして得られる前輪の移動軌跡を作成するステップと、2) この移動軌跡上の各サンプリングポイント(それぞれ方位角を持つ)と隣のサンプリングポイントとの位置関係と方位角の違いから、曲率中心を計算するステップと、3) 得られた曲率中心を2次元平面にプロットして、曲率中心

^{*} Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe-city, 610-0321, Japan
Telephone : +81-774-65-6976, E-mail : skaneda@mail.doshisha.ac.jp

のプロット軌跡（以下、曲率中心軌跡）を求めるステップ、から構成される。

上記手順により、自転車操縦者の旋回行為が、曲率中心軌跡上に、V字型軌跡として現れることを著者らは見出した。上記移動軌跡は、正確には、自転車の走行軌跡*とは一致しない。しかし、近似的に似た形となる。このため、V字型の広がり角（挟角）は、自転車の旋回角に一致し、V字型の発生分布から、運転挙動が統制されたものであるか否かを読み取ることができる。

以下、第2章では、自転車方程式を簡単に紹介し、スマホセンサーから自転車の位置を計算することのむづかしさを説明する。第3章は移動軌跡を用いた可視化手法とプロトタイプの概要を述べ、第4章では、プロトタイプシステムによる、若者と高齢者のスラローム走行実験について述べる。第5章では既存研究に触れ、第6章は結論である。

2 自転車の挙動

2.1 自転車方程式

自転車の挙動に関する運動方程式の研究は、数多く知られている。本節では、ハンドル角と旋回半径の関係を、文献¹⁾を用いて紹介する。

旋回時における、後輪の移動軌跡を円弧とみなした時の半径を R 、曲率を σ 、前輪の実効的な角度（進行方向右が正、自転車の構造上、これはハンドル回転角とは一致しない）を β 、前輪・後輪間のホイールベース長を L とする時、以下の関係が成立する。

$$\sigma = \frac{1}{R} = \frac{\tan(\beta)}{L} \quad (1)$$

また、ハンドル回転角を ϕ 、車体の傾斜角（後輪の傾斜角であり進行方向右側が正）を θ 、そしてキャスト角（前輪のハンドル回転軸の水平面からの傾き）を η とする時、以下の式が成立する。

$$\tan(\beta)\cos(\theta) = \tan(\phi)\sin(\eta) \quad (2)$$

式(1)、式(2)から、 $\tan(\beta)$ を消去すると、

$$R = \frac{L}{\tan(\beta)} = \frac{L \times \cos(\theta)}{\tan(\phi)\sin(\eta)} \quad (3)$$

式(3)で、 L と η は自転車固有の定数なので、旋回時の半径 R を決めるのは、ハンドル回転角 (ϕ)と自転車自

体の傾き (θ)である。 θ と ϕ がゼロの時には、曲率中心が無限の遠方にある状態となり、上式(3)は無限大となる。自転車が正確に直立・直進した状態である。

式(3)は、我々の日ごろの実感と合致する。ハンドルを切りつつ、すこし体を傾けて、旋回遠心力と体の傾きがバランスしている姿勢のまま、旋回を続ける。ただし、バランスが取れる傾き θ は、車速に依存する**。同じ旋回半径であれば、高速で走るほど、傾きを大きくしないと釣り合わない。即ち、速度が正確に分からない限り、ハンドル角から車体の傾きを求めることはできない。結果的に、実効的な前輪の方向もわからない。

以上の状況から、本稿では、正確な実効ハンドル角 (β)を求めたり、ホイールベースの影響まで考慮したアプローチは採用を見送ることとする。そして、本稿では、スマートフォン内臓のセンシング機能の範囲で、自転車の安定状態をモニタリングする手法を検討する。

2.2 アジマス角への着目

スマートフォンを用いる場合、本来であれば、自転車の速度が知りたいところである。速度を求めるには、理論的には、加速度を時間方向に1回積分すれば良い。スマートフォンは、加速度3軸、角速度3軸、地磁気3軸のセンサーを持っている。しかし、この様な、安価なセンサーでは、ノイズ等の影響もあり、正確な自転車の進行方向加速度の測定は困難である。結果的に、加速度を積分しても、正確な速度は出せない。特に、自転車にスマートフォンを取り付けると、地面からの強烈な振動(=加速度)を受けるだけではなく、スマートフォンが傾くので、強大な地球の重力加速度の分力の影響を受ける。これらを完全に除去するのは難しい。加速度センサーは細かい運動を正確に追跡するためのトランスデューサとは言い難い。

それに対して、地磁気センサーは直接的に地球磁場を観測している。地球磁場の強さは、そのまま東西南北の方位角に、微分・積分なしに変換できる。結果的に、ノイズやオフセットの影響を受けにくい。スマートフォンをハンドルに水平方向に取り付けておけば、ハンドルが水平方向でどちらを向いているかが分かる。現実には自転車は左右に傾くが、スマートフォンの内部で、端末座標でのセンサー出力に対して、回転マトリックスをかけて、世界座標での東西南北方向の絶対方位角（アジマス

* 本来の走行軌跡は、重心位置で計算され、車体の傾きやタイヤ滑り等も考慮しなくてはならない。

** 通称「ピザ屋のバイク」や「高齢者向け3輪自転車」が、車体の前部分が容易に傾くようになっているのも、体を傾けてバランスを取り、スムーズな旋回を実現するためと思われる。

角)が出力されている。前輪とハンドルは一体となって、ハンドル軸を中心に回転している。このため、ハンドルに水平に取り付けたスマートフォンの地磁気センサーで、前輪の方向がほぼ正確に求められることになる。

本稿では、上記の問題意識から、スマートフォンにおいて、世界座標で出力されているアジマス角(北をゼロとして、時計回りに0度から360度^{***})を用いる。市販のツールで、ハンドルの上にほぼ水平方向にスマートフォンをとりつけ¹、得られたアジマス角を前輪の進む方向と近似的に解釈する。これによって、スマートフォンのセンサーのみで、近似的に、前輪の移動軌跡を導出し、自転車の走行状態を把握する。

3 自転車走行状態可視化手法の提案

3.1 基本的な構成

提案手法の自転車走行状態可視化手法は、以下の3ステップから構成される。

【STEP1】: 前輪の移動軌跡作成

サンプリング周期 $\tau(sec)$ で、ハンドルが水平面上で東西南北のどちらを向いているかの方位角 θ_i ($i = 0, 1, 2, 3 \dots n, n$ は正整数) をサンプリングする。方位角は、真北をゼロとして、時計回りに0度から360度とする。ただし、この角度の定義は、後述のプロトタイプで利用した Android の仕様であり、他の角度表現でも類似の式となる。ただし、角度の向きによっては、後述の(4)(5)式が変更されることがある。本稿では、この θ_i が自転車前輪の進む方向であるとする。

自転車の前輪は、タイミング i と $i + 1$ ($i = 0, 1, 2, 3 \dots n - 1$) の間では、上記方位角 θ_i を保ち、タイヤの滑りもなく走行しているとする。

(X, Y)2次元座標軸上で、前輪の初期位置座標を(0, 0)とすると、自転車の前輪の位置 (x_k, y_k) ($k = 0, 1, 2, \dots, n - 1$) は、以下の式で計算できる。ただし、Y座標が北向き、X座標が東向きとしている。更に、 δ_i は、タイミング i と $i + 1$ との間で自転車が進む距離を示す。自転車の速度が分からない時に

は、一定値をわりつける。本稿では一定としている。

$$x_k = \sum_{i=0}^{k-1} \delta_i \times \sin(\theta_i) \quad (4)$$

$$y_k = \sum_{i=0}^{k-1} \delta_i \times \cos(\theta_i) \quad (5)$$

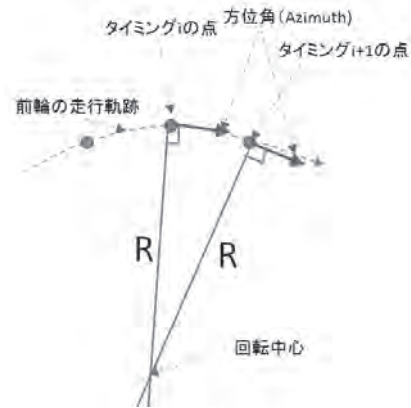


Fig. 1. 隣接したサンプリング点からの曲率中心の求め方.

【STEP2】: 移動軌跡から曲率中心の計算

前輪の移動軌跡の曲率中心は、隣接した2つの測定点の方位角から計算できる。タイミング i と $i + 1$ との方位角をそれぞれ、 θ_i と θ_{i+1} とする時、曲率中心は、 θ_i に直交した直線と、 θ_{i+1} に直交した直線の交点として求まる。図1には、この曲率中心の求め方を図示している。すべてのサンプリングタイミングの隣接したペアに対して、曲率中心を求める。ただし、一定の値以上に曲率半径が大きい場合には、つぎのSTEP3のプロット生成では無視する。つまり、完全に自転車が直進している時、後述のV字型は、進行方向の左右には現れないことになる。

【STEP3】 曲率中心軌跡の作成

次に、上記STEP2で、前輪の移動軌跡から得られた曲率中心を2次元平面上にプロットしてゆく。そうすると、移動軌跡の両側にV字型の曲率中心軌跡が出現する。

図2は、実際にV字型の曲率中心軌跡がどのような順序で発生するかを示している。最上部の図では、旋回を始めるために、無限遠にあった曲率中心を操縦者は引き寄せている。上から2番目の図では、旋回中心となる目標点(以下「目標旋回中心」)

^{***} 今回実験に用いた Android 端末の場合。

¹ 著者らの実験では、センサーはハンドルではなく、自転車の車体(サドル下)に取り付けても、後述のV字型が得られることを確認している。しかし、ハンドルに装着した時の方が詳細に描写できる。おそらく、運転者の意志が、直接的に、ハンドルに反映されるためと思われる。

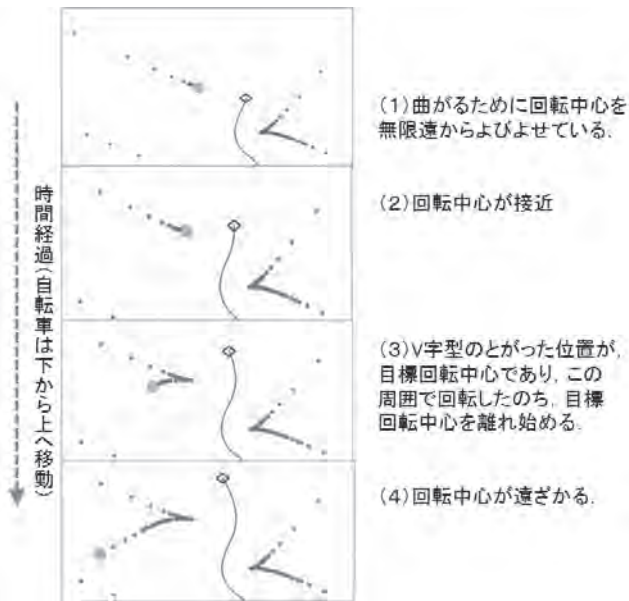


Fig. 2. V字型プロット結果の生成過程.

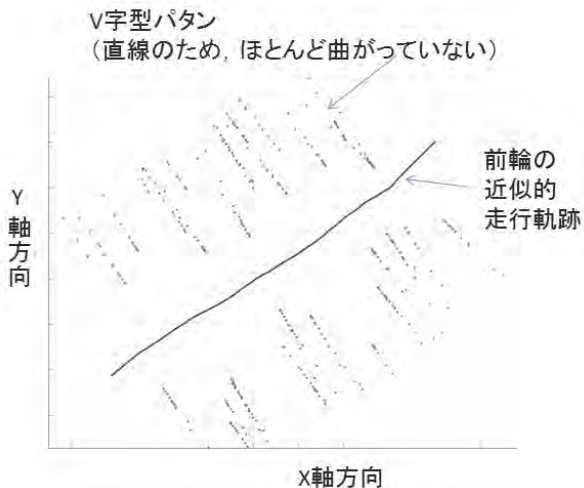


Fig. 3. 直進時の曲率中心プロット結果.

を目指して、プロットされる曲率中心が更に接近している。この直後、目標旋回中心の周囲を、自転車は一定時間走行し、旋回することになる。意図した角度の旋回が終わると、ふたたび、曲率中心は移動軌跡を離れてゆき、自転車は直進走行に戻る。この曲率中心軌跡が興味深いのは、人間が自転車の操縦をする際に、このような目標旋回中心を無意識に設定し、その周りを正確に回っている点である。逆に言えば、目標旋回中心がつぎつぎと変更される様な走行には問題がある。

次に、図3は、自転車がまっすぐに走っている時の、曲率中心のプロット図である。ほとんどハンドル角

は変化しないので、V字型の挟角は極めて小さい。また、走行のメリハリがある場合には、左右にV字型は交代して、規則的に出現する。しかし、フラフラした運転だと、V字型が一方にしか出なかったり、一方の側に連続する等、規則性がなくなる。

3.2 スマートフォンによる実装

図2, 図3は、実際の自転車にスマートフォンを装着して得られたデータである。プロトタイプシステムの具体的な構成を以下に説明する。

STEP1 の方位角の取得には、スマートフォン (Android) を用いた。具体的には、SONY 製 Xperia Z3 である。絶対方位角としては、アジマス角を用いる。サンプリング周期は $20ms$ である。アンドロイド端末は、安価な、市販のスマートフォン用装着ツールで、できるだけ水平にして、ハンドルに取り付けている。実際の走行時は、ハンドルの進行方向左右への傾きの影響をうけて、スマートフォン自体も傾くことになる。スマートフォンでは、端末の傾きの影響は補正され、世界座標でのアジマス角が出力される。このアジマス角を前輪の方向として利用する。前輪の移動軌跡の計算は、(4) 式, (5) 式を利用したが、速度が不明なので、本稿では、 δ は一定値を利用している。このため、最終的な曲率中心軌跡から、V字型までの物理的な実距離を計算することはできない。ただし、移動軌跡は、一定速度で進行している時の実移動軌跡とかなり似たものとなる。

STEP2 は図1の手法で計算した²。ただし、あらかじめ定めた値以上に、曲率中心が移動軌跡から離れた場合には、プロットをしない。

STEP3では、上記の曲率中心を、移動軌跡と一緒に2次元平面状にプロットする。結果の例は、すでに、図2, 図3に例示した通りである。データ処理にはMATLABを用いた。現在までに行った実験を見る限り、曲率中心のプロット結果には、以下の傾向が観測される。

- V字型の挟角は、実際に自転車が旋回した角度に対応している。ただし、安定した旋回走行の場合には、V字型は、ひとつの旋回に一個のみ出現するが、不安定な旋回を行った場合には、V字型の形が乱れたり、同じ場所に、何個もV字型が出現する。
- 直進運動では、左右に交代にV字型が出現するの

² 隣り合う2つのサンプリングポイントではなく、間に一つ置いた2つのサンプリングポイントから、曲率中心を求めてもよい。ただし、著者らの実験では、結果は大きな差ではなかった。

が普通である。この場合、V字型の挟角は限りなく小さく、V字型というより、I字型の曲率中心軌跡が出現する。一方、直線的走行でも、ふらふらした走り方になると、V字型は、不規則に出現する。

以上から、本提案の手法によれば、自転車走行の安定状態を、レントゲン写真の様に観測可能と考える。

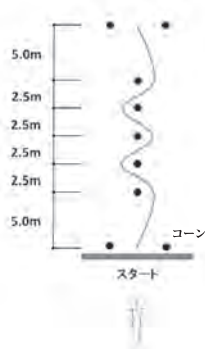


Fig. 4. 設定されたスラロームコース1 (実験コース1).

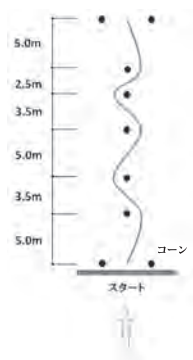


Fig. 5. 設定されたスラロームコース2 (実験コース2).

4 提案手法の有効性の評価

提案手法が、実際に運転者の特性判定に利用できることを確認するため、評価実験を行った。実験には、前述した Android(SONY Xperia Z3) を用いたプロトタイプを利用した。具体的には、高齢者と若者で自転車運転時の軌跡・挙動の違いを調査した。

実験コースは、セーフティコーン³を並べて、2通りのスラロームコースを設置した。実験コース1(図4)は、等間隔(2.5m)にセーフティコーンを並べている。実験コース2(図5)は、コーンは直線的に並んでいるが、不規則間隔(2.5m~5m)である。図6は実験コース1を

³ 円推型のコーン。実際の道路工事で使われるサイズより、はるかに小型である。

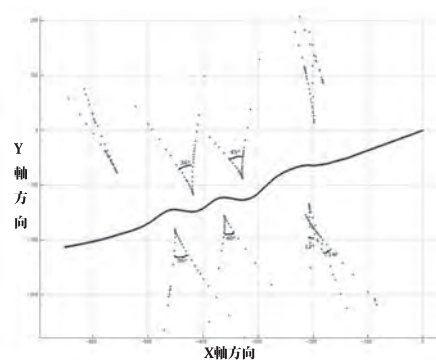


Fig. 6. 若者(25歳)による実験コース1の走行例.

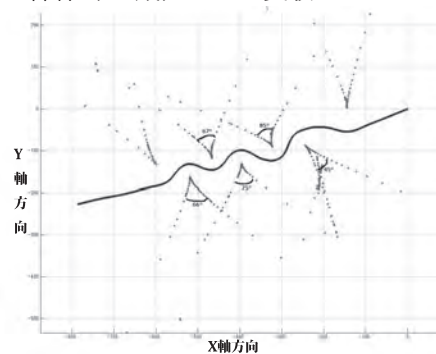


Fig. 7. 高齢者(65歳)による実験コース1の走行例.

若い学生が走行した場合、図7は、高齢者が同じコースを走行した例である。スラローム上の障害物の間隔が一定で、走りやすいのか、この例を見る限り、V字型の出現分布に、年齢による差異は観察されない。ただし、旋回については、高齢者の方が、大きく回っている様にも見えるが、あまり顕著ではない。

一方、図8は、若者(学生)が実験コース2を回った結果であり、図9は、高齢者が同じ実験コース2を回ったケースである。この図では、明らかに、高齢者の方が回転角が大きく、全体に、V字の分布も乱れた印象を受ける。図10は実験参加者6名(若者3名、高齢者3名)の実際の回転角度である。例外はあるが、高齢者のほうが、回転角度が大きく、若者は小さい。

提案手法は、この様に、レントゲン写真の様に、運転者の挙動を可視化して、確認することを可能とする。なお、今回の実験では、若者も高齢者も3名で、実験コース走行も各人1回のみ限定された実験である。しかし、その範囲でも、表1に示す様に、有意水準5%のt検定で、実験コース1では、若者と高齢者の回転角に差は出ないものの、実験コース2では、高齢者と若者の差がでている。高齢者は、回り込みすぎている。この原因

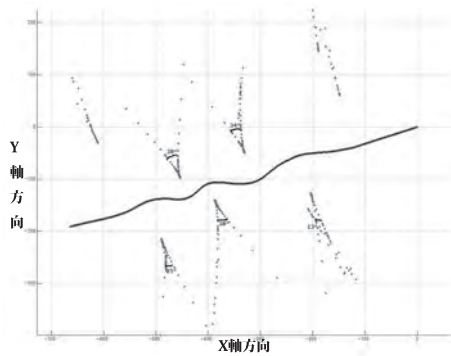


Fig. 8. 若者（25歳）による実験コース2の走行例.

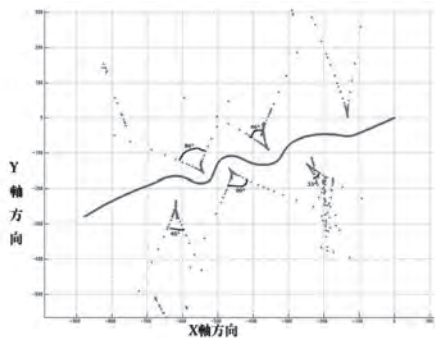


Fig. 9. 高齢者（65歳）による実験コース2の走行例.

分析は、本稿が扱うべき主旨の範囲を超えるが、提案手法は、高齢者と若者の自転車操縦能力のスクリーニングに、一定の効用を期待できると考えられる。

5 関連研究

エネルギー資源保全の意識や健康志向の高まりなどにより、移動手段として、またはスポーツ目的での自転車の利用が増加傾向にある。これに伴い、自転車の種類や用途も多様化してきている。自転車のフレーム形状や車輪の大きさが異なることで、各種類の自転車についての走行時の安定状態も異なってくる。

このため、自転車メーカーの中には、自転車の安定状態の測定方法を検討しているところがある。例えば、ブリヂストンサイクル（株）による公開特許公報²⁾では、自転車の重心位置をあらかじめ測定し、その場所にマーカーをとりつけて、画像処理によるマーカートラッキングで、重心位置の移動を測定している。同一出願人の公開特許公報³⁾においても、2台の撮像装置を導入し、設置点の位置情報を取得して、重心位置の移動を把握するという複雑なシステム構成を採用している。

更に、同一出願人の公開特許公報⁴⁾は、本稿の手法

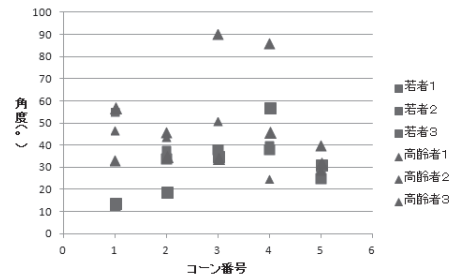


Fig. 10. 実験コース2の若者3名、高齢者3名の回転角度.

t

Table 1. 実験コース2の統計的検定結果.

項目	若者の回転角	高齢者の回転角
平均	31.4度	46.3度
サンプル個数	15	15
$P(T \leq t)$ 片側	0.00777	—
t 境界値片側	1.71	—
$P(T \leq t)$ 両側	0.0155	—
t 境界値両側	2.07	—

と類似した点を持つ。すなわち、測定に、9軸センサーを想定している。しかし、センサーは、ハンドル舵角センサー、設置点センサー、重心センサーなど、多数のセンサーを必要とし、また、あくまでも、重心移動を見て、安定性を判断している。

また、日産自動車（株）が開示した公開特許公報⁵⁾では、自転車がリスクを持つ走行をしたことを検知する方法を提示しているが、一旦停止を無視した、急ハンドルを切った等の、自転車の異常な走行を自動判定する方法を開示しているのみである。

これらに対して、本稿で開示した手法は、ハンドル上に水平方向に取り付けたセンサー（実際にはスマートフォンのアジマス角）のみを利用しており、このアジマス角を前輪の近似的な方位として、前輪の移動軌跡を可視化している。重心の移動については、考慮していない。しかし、重心が左右に移動すれば、当然、車体の立て直し動作が入るため、重心の移動箇所には、V字型が出現することが想定される。議論としては直感的すぎるかもしれないが、本稿の手法は、重心の左右への移動状況を直感的に把握できる手法であるとも言える。

一方、文献⁶⁾は、スマートフォンと隠れマルコフモデルを用いて、自転車の走行状態（直進、左折、右折、

停止、蛇行運転等)を判別しているが、本稿で開示した技術の様に、運転者の特性を可視化するものではない。また、文献⁷⁾は、3軸の角度、角速度、加速度を測定することができる慣性センサを自転車に取り付けて、操縦者の熟練度等を測定しようとしているが、基本的にセンサー出力波形による分析にとどまっている。更に、著者らの文献⁸⁾、⁹⁾、¹⁰⁾、¹¹⁾も、自転車やあるいは自転車の走行環境をセンシングしているが、本稿の提案とは主旨が異なっている。

6 終わりに

本稿では、自転車のハンドルの水平方向の向き(東西南北の絶対方位角)のみを測定するだけで、自転車の走行状態を可視化できる手法を開示した。具体的には、1) ハンドルの水平方向の向きを方位角センサーからサンプリングし、その向きに前輪が進行すると見なして、近似的に前輪の移動軌跡を得るステップと⁴⁾、2) 移動軌跡からサンプル毎に曲率中心を求めるステップと、3) 得られた測定サンプル毎の曲率中心を2次元上にプロットして可視化するステップ⁵⁾、から構成される。但し、移動軌跡の作成には、自転車の速度情報は必ずしも必要なく⁶⁾、速度が不明であれば、一定の速度で進行しているとしてよい。

上記移動軌跡の左右には、V字型の曲率中心軌跡が出現する。このV字型は、1) 遠方にあった曲率中心を、(これから行う旋回の際の目標として操縦者に設定されているものと思われる)目標旋回中心に引き寄せるフェーズと、2) 目標旋回中心を中心としてそのまま旋回するフェーズと、3) 旋回を終了して、その目標旋回中心をはなれて、直線走行に戻すために、移動軌跡の曲率中心を遠方に追いやるフェーズ、から構成される。結果的に、V字型の2本の直線のなす角は、自転車が曲がった角度である。すなわち、直線走行の際には、V字型の挟角はほとんど0となる。これは、左右にわずかにハンドルを向けながら、直線を走行する安定した走行状態である。しかし、フラフラする運転をすると、V字型の挟角は大きくなり、また、V字の発生個所も非規則的な分布に

なったり、複数のV字型が同一箇所に重複して出現する。この可視化結果から自転車の走行状態を判定できる。

実際にスマートフォン(Android)のアジマス角のみを用いてプロトタイプシステムを構築し、簡単なスラロームコースを設定し、若者(学生)と60歳以上の高齢者数名を対象として、V字型の挟角の差異を分析した。その結果、障害物の間隔が変化しないスラロームでは有意な差が出なかったが、障害物の間隔が変化するスラロームにおいては、統計的に有意に、高齢者はV字型の挟角(旋回角度)が大きかった。つまり、高齢者のほうが、「条件が変化する走行環境ではハンドルさばきが適切ではなく回りすぎる」ことを示唆する。このように、V字型の挟角や分布は、乗り手の運転能力をある程度推定してゆく手法に発展できる可能性もある。今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Jingang Yi, Dezhen Song, Anthony Levandowski, and Suhada Jaysuriya: "Trajectory Tracking and Balance Stabilization Control of Autonomous Motorcycles", Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2583-2589 (2006, May)
- 2) (株)ブリヂストン, ブリヂストンサイクル(株), 公開特許公報, 特開 2013-252779, 「自転車, 重心計測システム, および重心計測方法」, 2013年12月19日公開
- 3) (株)ブリヂストン, ブリヂストンサイクル(株), 公開特許公報, 特開 2014-84033, 「自転車」, 2014年5月12日公開
- 4) (株)ブリヂストン, ブリヂストンサイクル(株), 公開特許公報, 特開 2014-162260, 「安定性評価システム, 及び安定性評価方法」, 2014年9月8日公開
- 5) 日産自動車(株), 公開特許公報, 特開 2015-125560, 「運転診断装置および運転診断方法」, 2015年7月6日公開
- 6) 齊藤裕樹, 菅生啓示, 間博人, テープウィロージャーナポンニワット, 戸辺 義人, 「sBike: 参加型センシングを志向したモバイルセンシングによる自転車走行状態収集・共有機構」, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.2, pp.770-782, (2012, 2月)
- 7) 松澤俊介, 大野寛和, 岩瀬将美, 畠山省四朗, 貞弘晃宜, 「自転車乗車熟達過程の解析と支援システムの開発」, 第51回自動制御連合講演会, 1028, (2008, 11月)
- 8) 加藤一, 山本光, 河内雄太, 金田重郎, 「スマートフォン内蔵センサを利用した自転車走行状態推定環境の提案」, 信学技報 115(231), pp.7-12, (2015年9月)
- 9) 河内雄太, 加藤一, 金田重郎, 「スマートフォンセンサを用いた自転車走行状態推定環境の提案」, 電子情報通信学会総合大会, D-13-1, (2015年2月)

⁴⁾ ハンドルではなく、車体にセンサーを取り付けても同様の可視化は可能であるが、著者らの実験では、V字型の出現頻度が低下した。旋回意図が第一義的に反映されているのはハンドルと考えたい。

⁵⁾ 曲率中心が、移動軌跡から見て、あらかじめ定めた一定距離を超える場合には、プロットしない。

⁶⁾ 自転車の速度が求めれば適用することに問題はない。

- 10) 田端祐介, 河内雄太, 金田重郎, 「速度と舵角に基づく自転車走行状態の高精度推定法」, 情報科学技術フォーラム (FIT), M-001, (2013 年 8 月)
- 11) 河内雄太, 田端祐介, 金田重郎, 「自転車センサを用いた市街地走行環境と阻害度の測定」, 情報処理学会, 第 75 回全国大会論文集, 2013(1),pp.165-166, (2013 年 3 月)

Evaluation of Required Time for Key Generation in Secret Key Agreement Scheme Based on Radio Wave Propagation Characteristics in V2V Communication Environment

Tomoya SUGIMOTO*, Hisato IWAI* and Hideichi SASAOKA*

(Received March 28, 2016)

As a security technique, a secret key agreement scheme based on radio wave propagation characteristics has been studied. In the scheme, the key used for encryption is shared between a transmitter and a distant receiver without communicating through a public channel based on the reciprocity and the locality of multipath fading. For example, a binary key is generated based on a variation of a signal intensity in a multipath fading environment. In the conventional studies, we supposed that radio waves arrive at a receiver from all direction uniformly as the multipath fading environment. However, in the case of a vehicle-to-vehicle (V2V) communication environment where buildings compose “street canyon” environment, it is expected that dispersion of the arriving directions of the radio waves becomes smaller and spatial variation of the multipath fading does slower. As a result, a required time for key generation in the secret key agreement scheme is expected to increase. In this paper, we calculate the propagation characteristics over non line-of-sight intersections in the V2V communication environment using the ray-tracing technique and evaluate the required time for key generation in the environment quantitatively.

Key words : ITS, Vehicle-to-vehicle communication, Ray-tracing, secret key agreement, radio propagation

キーワード :ITS, 車車間通信, レイトレーシング, 秘密鍵共有, 電波伝搬

車車間通信環境における電波伝搬特性に基づく 秘密鍵共有方式の鍵生成所要時間の評価

杉本 智哉, 岩井 誠人, 笹岡 秀一

1. まえがき

近年, 携帯電話や無線 LAN 等の, 無線通信を用いた様々な応用技術が急速に普及している. しかし, 無線通信は公開された空間の中で電波の送受信を行うため, 盗聴や不正アクセスを受けるなど, 情報セキュリティ面での危険性が問題となっている. こ

のため, 無線通信の普及に伴い, 盗聴対策などのセキュリティ対策が重要となっている. 一般的な盗聴対策として, 情報を暗号鍵によって暗号化して伝送する手法が知られており, 送信局と受信局が共通の暗号鍵を用いる秘密鍵暗号方式^{1,2)}がよく用いられている. 秘密鍵暗号方式では暗号化と復号に要する

* Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan
Telephone: +81-774-65-6267, Fax: +81-774-65-6801, E-mail: duq0363@mail4.doshisha.ac.jp

計算量が少ないという利点があるが、通信を行う前に送信局と受信局の間で秘密鍵を共有しておく必要がある。一般には無線通信によりこの鍵配送を行うことが多いが、その過程で秘密鍵が盗聴される可能性があるため、安全な秘密鍵共有法が重要となる。また、共有された秘密鍵を長期にわたって使用すると、暗号化情報のパターンから秘密鍵を解読される危険性もある。

これらの危険性に対して、送受信局間の伝搬路がマルチパスフェージングとなる場合の電波伝搬特性を基に暗号鍵を生成する方式^{3,7)}が検討されている。一般にマルチパスフェージング環境における電波伝搬特性は相反性と局所性を持ち、送受信局が互いに信号の送受信を行う場合は、それぞれの伝搬特性は相関の高いものとなるが、送受信局から離れた盗聴局では伝搬特性とは相関が低くなる⁸⁾。これにより、送受信局でそれぞれの受信信号強度などから得られた情報から、送受信局間のみで共有可能な秘密鍵を生成することができる。この秘密鍵を用いて情報の暗号化を行うことで、盗聴局に秘密鍵を知られることなく暗号化通信を行うことができる。また、電波伝搬特性に基づいた秘密鍵は生成や共有が用意であるため、秘密鍵の使い捨ても可能である。

電波伝搬特性に基づく秘密鍵共有方式では、受信局の周囲の全方位から一様に電波が到来するようなマルチパスフェージング環境を想定することが一般的である。これに対して、建物が密集するような都市街環境における車車間通信環境を考える場合^{9,10)}、電波の到来方向の広がりが小さく、その結果として、マルチパスフェージングの空間的な変動が緩慢となると予想される。このような場合には、電波伝搬特性に基づく秘密鍵共有方式による鍵生成の所要時間が増大するものと予想される。

本稿では、車車間通信環境として重要となる交差点越え見通し外環境を想定し、レイトレーシング¹¹⁾を用いて伝搬特性を解析する。そして、この環境における電波伝搬特性に基づく秘密鍵共有方式による鍵生成の所要時間を定量的に評価する。

2. 電波伝搬特性に基づく秘密鍵共有方式

電波伝搬特性に基づく秘密鍵共有方式の基本原則を Fig. 1 に模式的に示す。無線通信チャネルにおいて A 局から B 局への電波の伝搬経路と B 局から A 局への電波の伝搬経路は同じ経路となる。これにより、2 つの経路の電波伝搬特性の相関は大きくなる。これを電波伝搬特性の相反性と呼ぶ。一方、マルチパス環境において A, B 局の一方もしくは両方の位置が変化する前と電波の伝搬経路が変化し、両局間の電波伝搬特性は位置が変わる前と異なるものとなる。したがって、A, B 局間の伝搬特性と、A 局と盗聴局の間の伝搬特性の相関は小さくなる。これを電波伝搬特性の局所性と呼ぶ。この電波伝搬特性の相反性と局所性を用いることで、A, B 局間のみで共有可能な秘密鍵を生成することができる。

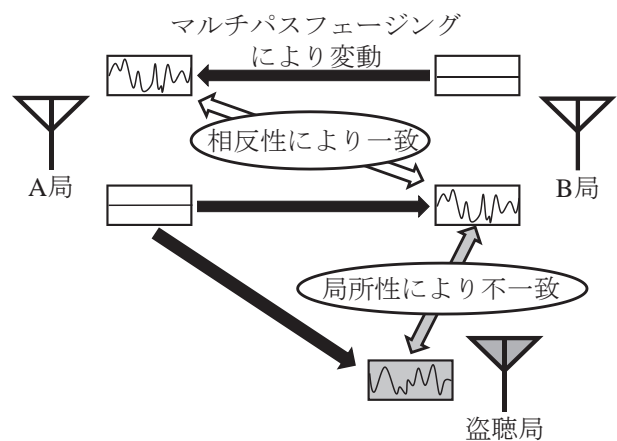


Fig. 1. Principle of secret key agreement scheme based on radio wave propagation characteristics.

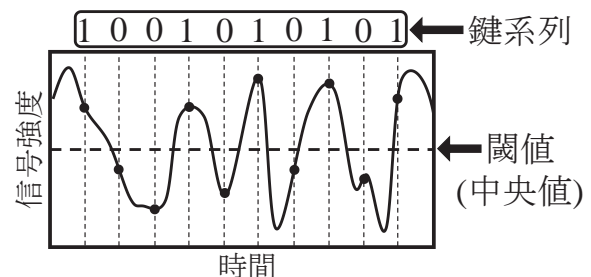


Fig. 2. Example of key generation.

鍵生成のための共有情報として、本稿では受信局

の移動による受信信号の強度変動を用いる. 具体的には Fig. 2 のように, 受信信号強度に対して鍵長分のサンプリングを行い, 得られた強度変動サンプルの中央値を閾値として二値化処理を行うことで二値の鍵系列を生成する.

3. 交差点見え見通し外環境の鍵生成時間

3.1. 想定環境

本稿で想定する交差点見え見通し外環境の交差点モデルを Fig. 3 に示す. 図に示すような建物によって形成された直交交差点を考える. 建物面は完全平面とし, 半無限の長さがあるものとする. d_t , d_r は送受信点から交差点入り口までの距離, W_t , W_r は送受信点のあるそれぞれの道路の幅である. 送信点の位置は固定とし, 受信点は道路に沿って移動するものとする. 特に示さない限り, レイトレーシングによる計算では Table 1 に示す基本パラメータを用いる.

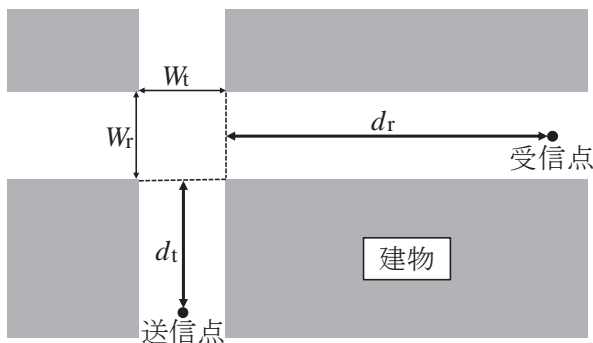


Fig. 3. Intersection model.

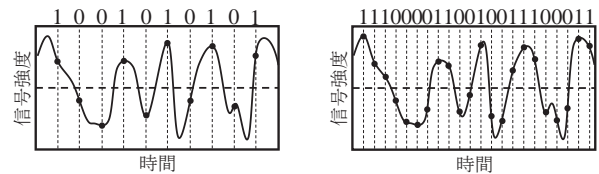
Table 1. Reference parameters.

周波数	5.9GHz	
送信距離 d_t	50m	
受信距離 d_r	0~150m	
道路幅 W_t , W_r	16, 16m	
車(受信点)の移動速度	40km/h	
アンテナ高	1.5m	
鍵の長さ(最大)	256 ビット	
レイトレーシング	最大反射回数	6 回
	最大回折回数	1 回

	数	
--	---	--

3.2. 空間相関特性

一般に, 鍵生成時間は小さいことが望ましい. 電波伝搬特性に基づく秘密鍵共有方式の鍵生成時間には信号強度変動のサンプリング周期が大きく影響し, サンプリング周期が小さいほど鍵生成時間は小さくなる. しかし, Fig. 4(b)のように, 強度変動に対するサンプリング周期が小さ過ぎる場合, 生成された鍵系列には同じ値が連続して発生し, ランダム性の低いものとなる. このような鍵系列は盗聴局において総当たりによる解読が容易になる可能性がある¹²⁾. ランダム性の高い鍵系列の生成のためには, 強度変動の連続するサンプル同士の相関が小さくなるように, ある程度の時間間隔を空けてサンプリングを行う必要がある.



(a) Slow sampling

(b) Frequent sampling

Fig. 4. Comparison of sampling period.

サンプル同士の相関を議論するために, ここではフェージングの空間相関特性を用いる. まず, 二組の系列 $x(n) = x(1), x(2), \dots$ と $y(n) = y(1), y(2), \dots$ に対して, 下式で与えられる相関係数 ρ ¹³⁾ を考える.

$$\rho = \frac{\overline{x(n)y(n)}}{\sqrt{\overline{\{x(n)\}^2}} \sqrt{\overline{\{y(n)\}^2}}} \quad (1)$$

ここで, \bar{x} は x の期待値を示している. ある点と, そこから Δx だけ離れた点の間の信号強度変動の相関係数を空間相関係数と呼ぶ. ある空間変位 Δx に対する空間相関係数が小さい場合, その Δx だけ距離間隔を空けたサンプル同士の相関は小さく, 生成される鍵系列のランダム性が確保されていると考えられる.

ここで, 水平面内全方向から一様の確率で電波が到来する環境(これをここでは全周同様環境と呼ぶ)の空間相関特性について考える. このような環境は, 送受信局が見通し外にある場合に想定されること

が多い。全周一樣環境における空間変位 Δx に対する受信信号強度の空間相関係数は、下式で与えられる¹³⁾。

$$\rho_R(\Delta x) = \left\{ J_0 \left(\frac{2\pi\Delta x}{\lambda} \right) \right\}^2 \quad (2)$$

ここで、 $J_0(x)$ は第一種零次ベッセル関数を表し、 λ は波長を表す。

本稿で想定する交差点見え見通し外環境における空間相関特性と、全周一樣環境における空間変位に対するそれぞれの空間相関係数を Fig. 5 に示す。周波数は 5.9GHz としている。交差点見え見通し外環境については、送信点を $d_t=50m$ に固定し、 $d_r=50m$ にある受信点の前後 0.5m の受信信号強度をレイトラッキングにより計算し、式(1)を用いて空間相関係数を求めた。

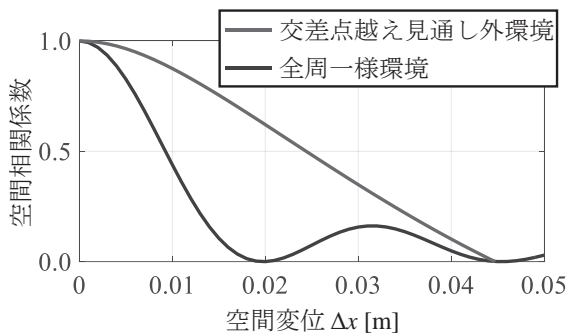


Fig. 5. Spatial correlation characteristics in ITS NLOS and whole-direction arrival environment.

Fig. 5 から、想定する交差点見え見通し外環境は、全周一樣環境と比べて、ある空間相関係数の低下を達成するために必要な空間変位が大きいことがわかる。例えば、空間相関係数が 0.5 となる距離(一般にこれを相関距離と呼ぶ)は、全周一樣環境では 0.009m 程度であるが、交差点見え見通し外環境では 0.024m 程度となる。これは、電波の到来方向の広がりがない原因であると考えられる。例えば、Fig. 6(a)に示すような全周一樣環境では、受信局の移動方向に対して様々な方向から電波が到来する。各到来波の受信位相は、受信局の移動によりそれぞれの到来方向に応じて異なる周期の位相回転を示す。その結果、それらが干渉し合うことにより生じるフェージ

ング変動は、小さな周期の変動を示す。それに対し、Fig. 6(b)のような交差点見え見通し外環境では電波の到来方向が限定される。この場合、受信局の移動による各到来波の位相回転の差は小さく、その干渉によるフェージング変動は全周一樣環境に比べて大きな周期となる。その結果、交差点見え見通し外環境では、ランダム性の高い鍵系列生成のために、比較的大きい時間間隔を空けてサンプリングを行う必要があり、全体的な鍵生成時間が増大すると考えられる。

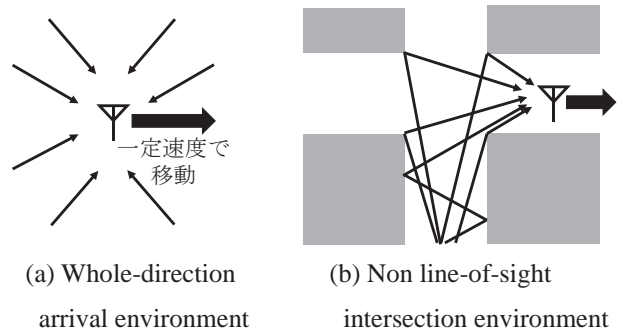


Fig. 6. Arrival directions of radio waves.

3. 3. 鍵生成所要時間

本稿では、生成される鍵系列のランダム性が確保されるための要求条件として、隣接するサンプル間の空間相関係数が 0.5 以下となることを前提とし、所要長さの鍵を生成するための必要時間(鍵生成所要時間)について検討する。受信点の前後 0.5m の空間相関係数を計算し、空間相関係数が 0.5 以下となる空間変位 Δx を車が移動するのにかかる時間をサンプリング周期とする。送信距離を $d_t=50m$ 、受信距離を $d_r=50m$ とし、車の移動速度を 40km/h とした場合の相関距離とサンプリング周期を Table 2 に示す。

Table 2. Correlation distance and sampling period.

	交差点見え見通し外環境	全周一樣環境
相関距離	0.0245m	0.0093m
サンプリング周期	0.0022s	0.0008s

サンプリング周期は鍵系列の中の 1 つの値を得る

ための所要時間に等しい. よって所要鍵長が変化した場合の鍵生成所要時間は Fig. 7 に示す結果となる.

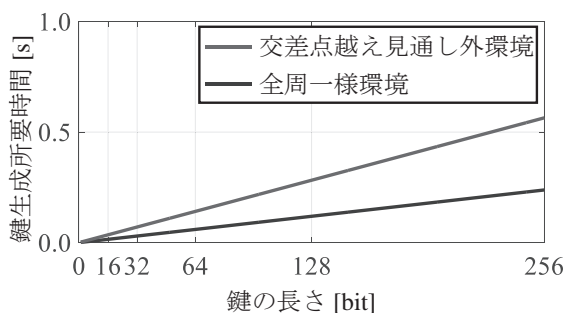
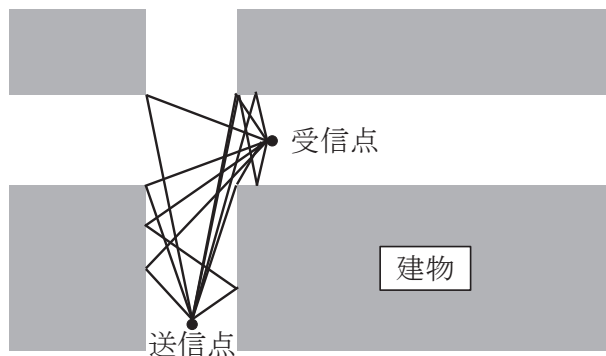
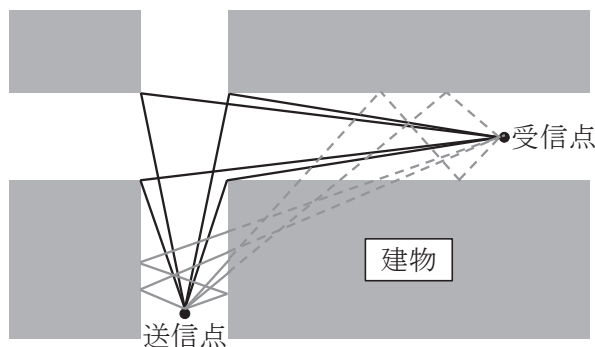


Fig. 7. Required time for key generation.

全周一樣環境においては, 256 ビットの鍵系列を生成するための所要時間が 0.2 秒程度であるのに対し, 交差点越え見通し外環境では 0.5 秒以上となっており, 交差点越え見通し外環境において鍵生成所要時間が増大することが確認できる. また, 交差点越え見通し外環境において, 交差点遠方では電波の到来方向が限定されることが考えられる. 受信点が交差点付近にある場合, Fig. 8(a)のように, 少数の反射のみで電波が受信点に到達する経路が多く存在する. これにより, 比較的強度の大きい電波が広い範囲の方向から到来するため, 信号強度変動の周期が小さくなると考えられる. それに対して, 交差点遠方では Fig. 8(b)のように, 少数の反射のみで受信点に到達する経路は建物に遮られ, 交差点を形成する建物エッジで一度回折を経た経路が主要な経路となる. この場合, 強度の大きい電波がいずれも受信側道路に沿う方向で到来するため, フェージング変動の周期が大きくなると考えられる. 受信距離に対する相関距離の変化を Fig. 9 に示す. 相関距離は受信局が定速で移動する場合には鍵生成所要時間に比例する値であるので, 同図には, 40km/h 走行を想定した場合の鍵生成所要時間の軸も併せて表示している. 受信点が交差点から遠ざかるにつれて相関距離が大きくなり, 鍵生成所要時間が増大することがわかる. 受信距離 70m 付近以降は鍵生成所要時間が 1 秒以上となっており, 実際の無線通信で用いるには鍵生成の時間が大きすぎる. そのため, 鍵生成所要時間を短縮する必要がある.



(a) Close to intersection



(b) Distant from intersection

Fig. 8. Arriving directions of dominant waves.

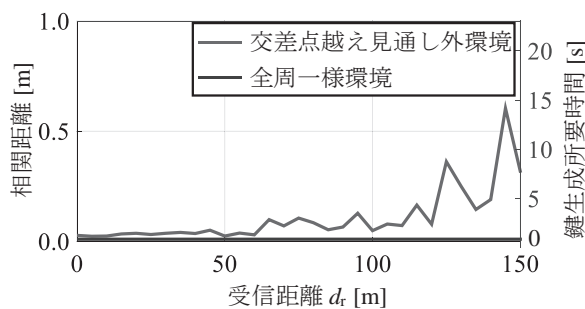


Fig. 9 Characteristics of correlation distance and required time for key generation.

4. 複数チャネルを用いた鍵生成

4.1. 複数チャネルの利用

鍵生成所要時間の短縮のため, 複数のチャネルを利用した鍵生成を考える. すなわち, 複数のチャネルで分割して鍵を生成し, その後それらを合成することで一つのチャネルあたりの所要の鍵長を小さく

くし、全体的な鍵生成所要時間を短縮する。例えば、路車間通信や車車間通信に特化して用いられる DSRC(Dedicated Short Range Communications)には上り方向と下り方向でそれぞれ 35MHz が割り当てられている¹⁴⁾。各チャンネルの帯域幅は 5MHz であり、片方向につき 7 つのチャンネルが存在する。この場合、片方向のチャンネル全てを同時に利用すると、単一チャンネルの場合の 1/7 の時間で鍵生成が可能となる。

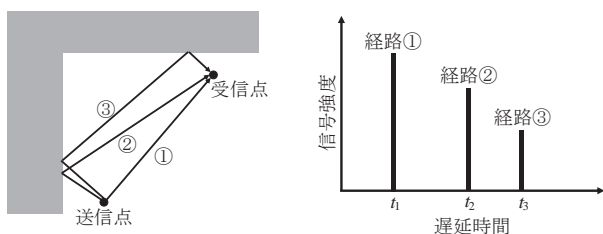
ここで、複数チャンネル同士のフェージング変動が高い相関を持つ場合、各チャンネルでは同様の鍵が生成されるため、それらを合成して得られる鍵のランダム性は低くなる。ランダムな鍵を生成するためには各チャンネル間が低相関となる必要がある。

4. 2. 周波数相関特性

複数チャンネルを用いた鍵の生成においては、鍵のランダム性を確保するためにフェージング環境の周波数相関特性について考慮する必要がある。周波数相関特性は、ある受信点でのインパルス応答から与えられる遅延プロファイルを基に求めることができる¹⁵⁾。

インパルス応答 $h(t)$ は Fig. 10(b) のように、伝搬路の遅延特性を遅延時間 t に対する関数として表したものである。また、遅延プロファイル $p(t)$ はインパルス応答を用いて下式で与えられる。

$$p(t) = \overline{\{h(t) * h(t)\}} \quad (3)$$



(a) Propagation path (b) Impulse response

Fig. 10. Propagation delay.

周波数相関特性 $\rho(\Delta f)$ は Δf を周波数差として、遅延プロファイルを用いて下式のように表される。

$$\rho(\Delta f) = \frac{1}{P_R} \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \exp(j2\pi\Delta f t) dt \quad (4)$$

ここで、 P_R は受信電力をあらわす。相関距離と同様に、この相関係数の絶対値が 0.5 以下となる周波数差は相関帯域幅と言われる。送信点を $d_t=50\text{m}$ に固定した場合の、各受信距離における遅延プロファイルをレイトレーシングで計算し、相関帯域幅を式(4)によって求めた結果を Fig. 11 に示す。見通し内となる $d_r=0\text{m}$ を除いて、相関帯域幅は 10MHz 程度となっている。各受信距離において相関帯域幅離れた周波数にチャンネルを設定することにより、相関の低い独立なチャンネルが確保できるものとする。

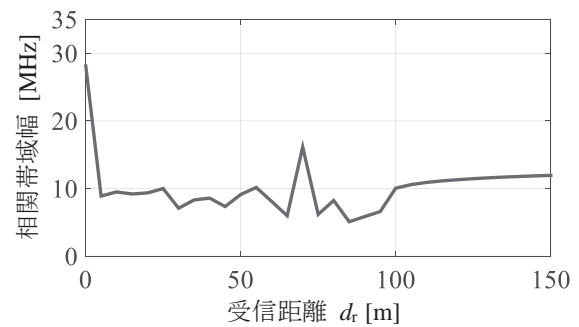


Fig. 11. Characteristics of correlation bandwidth.

4. 3. 複数チャンネルを用いた場合の鍵生成所要時間

DSRC の帯域幅は上り方向下り方向でそれぞれ 35MHz であることから、片方向につき利用可能なチャンネル数を (35MHz/相関帯域幅) と考えると、鍵生成所要時間は単一チャンネルの場合に対して、(相関帯域幅/35MHz) 倍となる。Fig. 9 と Fig. 11 より、複数チャンネルを用いた場合の、受信距離ごとの鍵生成所要時間を Fig. 12 に示す。一般に DSRC は 5MHz ごとにチャンネルが設定されるため、全周一樣環境では片方向につき 7ch が確保できるものとする。複数チャンネルを用いることにより、交差点付近では単一チャンネルの全周一樣環境よりも鍵生成所要時間が小さくなっている。また、片方向帯域の利用、両方向帯域の利用共に受信距離 120m 程度まで鍵生成所要時間が 1 秒以下となっており、複数チャンネルの利用による鍵生成所要時間の短縮が確認できる。

Fig. 13 に両方向帯域を利用した場合の、車の移動

速度に対する鍵生成所要時間を示す。車の移動速度が大きいくほど鍵生成所要時間は短縮されることがわかる。これは、車の移動速度が大きいく程、相関距離分の移動にかかる時間が小さいためである。また、送信距離、受信距離共に交差点から離れるほど、鍵生成所要時間が増大していることがわかる。送受信点が共に交差点から 150m 離れた場合では、両方向帯域を用いた場合でも、鍵生成所要時間は 3 秒以上となっている。

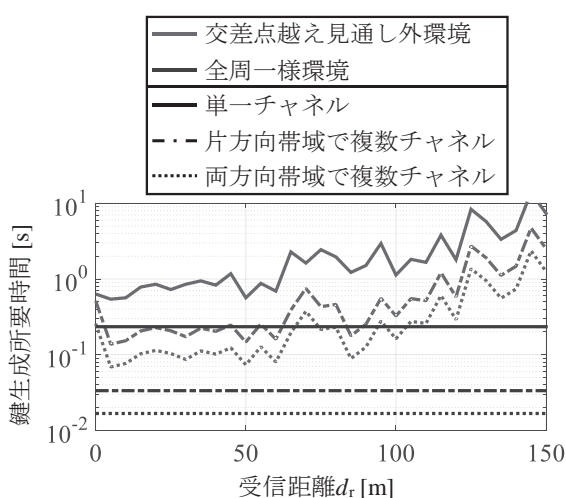


Fig. 12. Characteristics of required time for key generation using multiple channels.

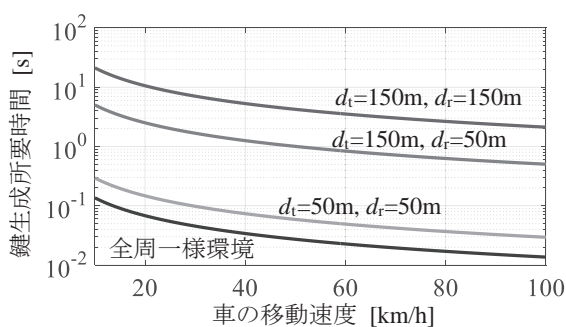


Fig. 13. Characteristics of required time for key generation for receiver speed.

5. まとめ

本稿では、鍵を配送することなく共有可能とする電波伝搬特性に基づく秘密鍵共有方式の鍵生成所要時間の評価を行った。想定環境は車車間通信環境

として重要となる交差点見え見通し外環境とし、鍵生成所要時間の計算にはレイトレーシングによる計算結果を用いた。フェージングの空間相関特性から、鍵系列のランダム性を確保するためのサンプリング周期を求めた。その結果、交差点の遠方ではフェージングの変動が緩慢になることから、相関距離が大きくなり、鍵生成所要時間が増大することがわかった。これに対し、DSRCの周波数帯域において、複数チャンネルを同時利用して鍵生成を行うことで鍵生成所要時間を短縮できることがわかった。しかし、送受信点が共に交差点の遠方にある場合は、複数チャンネルを利用しても鍵生成所要時間が 3 秒以上となる。今後の課題として、複数アンテナの利用等による鍵生成所要時間の短縮が挙げられる。

参考文献

- 岡本龍明, 山本博資, 現代暗号, (産業図書, 東京, 1997).
- 笠原正雄, 堺隆一, 暗号-ネットワーク社会の安全を守る鍵, (共立出版, 東京, 2002).
- 岩井誠人, 笹岡秀一, "電波伝搬特性を活用した秘密鍵情報の伝送・共有技術," 信学論(B), vol.J90-B, no.9, pp.770-783, (2007).
- 笹岡秀一, "電波を用いた物理層における無線通信セキュリティ," 信学技報, RCS2011-10, pp.53-58, (2011).
- J. E. Hershey, A. A. Hassan and R. Yarlalagadda, "Unconventional cryptographic keying variable management," IEEE Trans. Commun., vol.43, pp.1-6, (1995).
- L. Dong, Z. Han, A. P. Petropulu, and H. V. Poor, "Improving wireless physical layer security via cooperating relays," IEEE Trans. Signal Processing, vol.58, no.3, pp.1875-1888, (2010).
- T. Shimizu, H. Iwai, and H. Sasaoka, "Physical-layer secret key agreement in two-way wireless relaying systems," IEEE Trans. Inf. Forensics Security, vol.6, no.3, pp.650-660, (2011).
- 唐沢好男, デジタル移動通信の電波伝搬基礎, (コロナ社, 東京, 2003).
- 丹後俊宏, 岩井誠人, 村上裕一, 佐々木邦彦, 堀松哲夫, "レイトレーシングを用いた車々間通信における交差点見え見通し外での伝搬損失特性解析," 信学技報, AP2007-6, pp.31-36, (2007).
- 菅江一平, 岩井誠人, 笹岡秀一, "見通し外車車間通信環境におけるレイトレーシングに基づく伝搬損失簡易計算式," 信学論(B), vol.J99-B, no.7, pp.515-524, (2016).
- 今井哲朗, 電波伝搬解析のためのレイトレーシング法, (コロナ社, 東京, 2016).
- 北野隆康, 岩井誠人, 笹岡秀一, "陸上移動通信におけるビット誤り率変動に基づく秘密鍵共有方式," 同志

- 社大学理工学研究報告, 50 卷 1 号, pp.35-42, (2009).
- 13) 三瓶政一, ワイヤレス通信工学, (オーム社, 東京, 2014).
 - 14) 総務省, "ITS 無線システムの現状と課題, "http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/its/pdf/081029_2_si1-3.pdf, (2008).
 - 15) 岩井誠人, 移動通信における電波伝搬, (コロナ社, 東京, 2012).

A Node Access Frequency Based Graph Partitioning Approach for Efficient All Node Scan

Kenji HATANO* Kazuma KUSU**

(Received April 29, 2017)

The graph structure enables representing almost data including relationship such as social networks, geography, www, etc. The edge in graph data express the relationship, and traversing it allow us to efficiently search the entity related certain relationship and certain pattern of entities and relationships. However, it is difficult that existing techniques of graph processing deal with all elements one by one in graph data, because almost graph processing is to search certain pattern in graph data. We give a dependency analysis as a example in software engineering. Dependency analysis is indispensable for efficient debug supporting, and it needs history of a program execution for analyzing a cause of bug. Program execution traces (simply “traces” for short) contain data/control dependency information, and instructions such as method invocation, conditional branching, and so on, and values such as constant value, object. However, traces easily become large and complicated, and its structure is graph structure because instructions, values and dependencies,. Moreover, dependency analysis using trace cannot avoid analyzing all instructions and values one by one. We propose an approach that involves storing graphs in a database that reduces the number of attributes in the main memory during dependency analysis. We also introduce a criterion for the application of this approach that can maximize its effectiveness. Finally, we conduct experiments to assess its effectiveness for efficient dependency analysis.

Key words : Graph Database, Graph Traversal, Back-In-Time debugger, Dyanamic Analysis, Java

キーワード : グラフデータベース, グラフ走査, Back-In-Time デバッガ, 動的解析, Java

全節点走査を対象としたグラフ処理効率化のための節点属性分割法

波多野賢治・楠和馬

1. はじめに

近年の情報システムが生成するデータの構造は表構造のものだけではなく、データ間に何らかの関係性をもつグラフ構造のデータとして表現できるデータが数多く存在する。グラフデータに対する処理効率化を図る手法はグラフの構成要素である節点と辺のパターンを検索することにより実現されている。しかし、これらの技術ではグラフの要素を逐次的に処理することが避けられない問題

では応用することができない。

以上のような処理の事例としてソフトウェア工学における動的解析を一例として挙げる。デバッグではプログラムの実行時の状態と依存関係の調査が不可欠とされてきた [1,2]。現在普及しているデバッガはブレークポイントによって指定された箇所でプログラムを停止させ、その時点での状態の調査を可能とする。しかし、ブレークポイント以前の実行内容は参照できないため、依存関係を逆に辿り不正な状態の原因を特定する作業を効率的に

* Faculty of Culture and Information Science, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-774-65-7656, Fax:+81-774-65-7656, E-mail:khatano@mail.doshisha.ac.jp

** Graduate School of Culture and Information Science, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-774-65-7656, Fax:+81-774-65-7656, E-mail:kusu@ilab.doshisha.ac.jp

実施できない [3].

10年前からこうした既存のデバッガの問題を解決するために、依存関係を情報として含むトレースを利用した逆回しデバッガ (Back-In-Time デバッガ) と呼ばれる新しい方式のデバッガが開発されてきた [4-6]. 依存関係を含むトレースを利用することで、これらのデバッガは変数の値を代入した命令の特定や [4], 命令が実行された (あるいはされなかった) 理由の調査 [5], また、既に呼出し完了したメソッドの実行内容の調査 [6] のように、局所的な視点での依存関係の解析を実現する。

一般に依存関係を含むトレースの処理に関しては動的解析の解析範囲への対応の問題が指摘されている [3]. 近年のハードウェアおよびソフトウェア環境の急速な進歩がこの問題の解決を容易にしつつある。実際、我々の先行研究 [7] では不具合を含む実用的な Java のフレームワークアプリケーションに対してその感染を示唆する兆候を特定する動的解析を実現している。

このように我々の先行研究 [7] はトレースに含まれている依存関係に関する動的解析の規模の問題解決に明るい見通しを与えるものであるが、一方でその実行効率に関しては大きな課題を残している。実行効率の低下の主な原因はトレースのモデルに豊富なデータが含まれているところに存在する。我々のトレースはバグの原因となるような兆候の特定以外の側面で解析する際の要求を満たすために、Wang 等の研究 [8] のようにトレースのデータ量の抑制を目指す代わりにデータの豊富さを追求している。

既存のデバッガ [4-6] は特定の命令に関する局所的な動的解析を実行しているが、我々の先行研究 [7] ではプログラム実行時の全ての状態変更命令*を解析の対象としている。そのため、規模の対応は可能であっても実行効率に関しては良い結果が得られていない。この問題を解決するためには、動的解析の基本的な処理である参照関係や依存関係のような依存関係を辿るパフォーマンスを向上させる必要がある。

そこで本研究では、我々の提案する動的解析のような

解析範囲がトレース全体におよぶ動的解析をより実用的に実行するために、動的解析処理の効率を考慮した動的解析環境を構築する。また、構築した動的解析環境において解析処理の効率性を損なう要因を明確化し、その要因を解消するためのグラフの管理方法および処理方法を提案する。さらに、本研究で提案した手法を適用後の解析の処理パフォーマンスに関する評価を行う。

2. 関連研究

現在広く使われているデバッガはプログラムコード中のブレークポイントで指定された箇所でプログラム実行を停止させ、作業者が停止時の状態を調査するための機能を提供している。この時点で既に呼出しが完了したメソッドの実行内容はデバッガに記録されていない。プログラムの不具合や感染**はしばしば既に呼出しが完了したメソッド内に発見される [6]. 既存のデバッガでこうしたメソッド呼出しを調査するためにはブレークポイントの設定と実行のやり直しが必要とされ、これがデバッグ作業の効率性を阻害する大きな要因となっている [3].

プログラムの実行履歴を利用することによってこうした既存のデバッガの限界を克服しようとする研究が最近の10年間で進められている。これらの研究の発端となった全知デバッガ [4] はある実行時点の変数の値に対してそれを代入した命令文を特定する機能を実装している。また、Koらによる Whyline [5] はある命令文が実行された、あるいはされなかった過程を対話的に再現することを可能としている。

Lienhardらによる Dynamic Object Flow 解析 [9] はオブジェクトの視点から依存関係を解析、可視化する機能を実現している。Object Flow 解析はオブジェクトに対する参照に焦点を置いておりメソッドの依存関係解析 [10] であると同時にデバッガの利用を念頭に置いたオブジェクトの流れを表現している。

全知デバッガや Whyline による支援はある特定の命令文に対してその関連する依存関係を辿る機能によって実装される。こうした支援を必要とする作業者の関心は特

* インスタンス変数, クラス変数, 配列への代入

** 不具合はプログラムコードの誤りを, 感染は不具合箇所の実行に起因する実行時の誤りを意味する [1].

定の命令に限定されており，作業者の関心の範囲が反映される形で制御やデータに関する局所的な依存関係が解析される．一方で制御やデータに関してトレース全体を解析する動的解析は我々の過去の研究 [7] 以外のものは我々の知る限りでは存在せず，メソッド呼出しか Object Flow 解析のようなオブジェクトの参照程度しか扱われていない．

局所的な解析に基づく支援は感染が疑われる変数値のようにデバッグの問題解決に直接寄与する状態を発見した場合には有効である．しかし，現実のデバッグ作業の作業者はこうした情報を発見するためにプログラムの実行過程全体を対象に状態を把握し実行の挙動を理解することが求められる [11]．我々の過去の研究 [7] は解析範囲がトレース全体におよぶ制御と値の依存性の解析によってこの種の要求を満たすことが目的である．

文献 [7] では動的解析の一つである Outdated-State 解析手法を提案している．この動的解析手法は同じオブジェクトの異なる二つ以上の状態に影響を受け実行された命令を検出する．このような実行過程のパターンはオブジェクトのコレクションの状態を参照して繰返し制御を行う時の事例がある．この実行過程のパターンは直接不具合の要因となることや潜在的な不具合の原因となるため，このパターンは検出されれば修正すべき実行パターンの一つとなる．従来の動的解析を実行する環境で上記のようなトレースの全体を解析対象とする動的解析を行う場合，トレースの節点をメモリ上に読み込んだ上で依存性解析を行うため，トレースのデータ量が大きくなると実行ができない問題があった．また，依存性解析を行うと多数の節点同士の比較や，トレースに記録された依存関係をもとに一つないしは多数の節点の導出が効率的に実行できない問題もある．これら問題を解決するためには，トレースのデータ構造を把握した上でより効率的な解析を支援できる動的解析環境を構築する必要がある．

3. 動的解析環境の構築

本研究ではデバッグにはさまざまな種類の動的解析を実行することが必要であると想定しており，実際に過去

の研究でも複数の解析手法を開発している [7]．

さまざまな動的解析手法の適用を可能にするために我々のトレースにはあらゆる動的解析にも対応することができるデータモデルが採用されている．その代償として実用的なプログラムのトレースは膨大かつ複雑になり易く，それが解析の効率の大きな妨げとなり易い．したがって，効率的な動的解析の実現にはトレースに対する動的解析を効率的に実行する動的解析環境が要求される．

図 1 に Java プログラムの実行から動的解析までを実施する動的解析環境の概要を示す．図中のトレース生成部は Java Bytecode instrumentation 技法を利用することによってトレースを生成する．トレース処理部は生成されたトレースをグラフデータベース (GDB) に格納し，関係性を用いた解析の効率的な実装を支援する．

3.1 動的解析環境に必要な機能

先行研究 [7] では，図 2 のような動的解析環境を構築している．図 2 の動的解析環境ではデバッグ対象のプログラムを実行し，そのプログラムの実行過程を記録したトレースを生成する．ここで記録されているトレースに含まれている命令や値，依存関係は POJO (Plain Old Java Object)*** のオブジェクトとして生成しメモリ上に格納する．また，動的解析中において，メモリに格納されたトレースを参照し，命令や値，依存関係を調査することにより動的解析を実行している．2. で述べたように，トレースの局所的な範囲を解析する手法とトレース全体を解析範囲とする手法が提案されており，当然ながら後者の手法は解析にメモリを多く消費する．したがって，既存の動的解析環境においてトレースのデータ量が大きくなるほど解析に利用できるメモリ領域が不足することになり，膨大なトレースに対して解析範囲がトレース全体に及ぶ動的解析手法は実行することができない．

以上より動的解析環境に要求されることとしては，あるデータから特定の関係性を辿り別のデータを取得する処理 (グラフ走査) を高速に行える必要が第一にある．また，トレースのデータ量の大小にかかわらず，解析範

*** フレームワークのような規約に縛られないように設計した Java オブジェクトのこと．

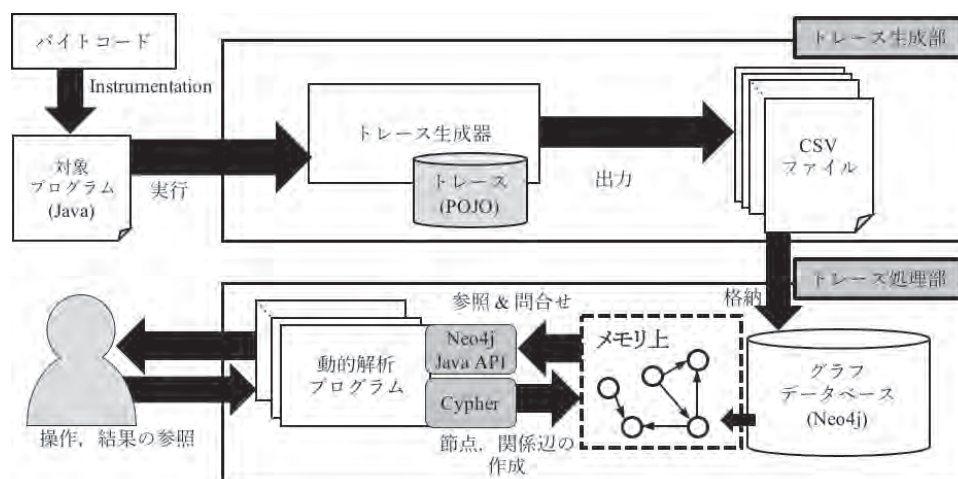


Fig. 1: 本研究で構築する動的解析環境

囲がトレース全体に及ぶ動的解析手法を実行可能にするためには、トレースの管理や解析処理で消費するメモリを削減する必要がある。さらに、本研究で取り扱う動的解析手法では必要ないが、異なるトレース同士を比較することでプログラムの挙動を解析する手法も存在するため、それら手法を将来的に適用することを想定する必要がある。

3.2 トレースのデータモデル

我々が開発した動的解析 [7] は個別のメソッド内部およびメソッド間に跨る依存関係を解析の対象とする。この時、値を生成および参照する命令や、これらの命令が実行されるメソッドに関する情報も解析に利用される。我々は更にある特定の条件を満たすデータに依存する動的解析手法も現在開発中である。

こうしたさまざまな解析の要求に答えるために我々のトレースには以下の概念を表現する要素が含まれている。

- メソッド呼出し構造
- メソッドで実行されたバイトコード命令
- バイトコード命令による値の生成参照
- 参照される値

それぞれの要素が表現している概念から要素間にさまざまな関係が導かれる。メソッド呼出しに関しては呼出

し側と被呼出し側の関係が導かれる。条件分岐命令やメソッド呼出しのように「制御する」命令とそれらによって実行される命令の間には制御の依存関係（制御依存関係）が形成される。また値の生成と参照の関係を通じて命令同士にデータの依存関係（データ依存関係）が形成される。値とその生成は一对一関係を形成し、値とその参照の間には一对多関係が生成される。トレースはこれらの要素を節点、要素間に導入された関係を辺とする有向グラフとして表現される。

まず、我々のトレース生成手法により生成されるトレースは各構成要素に行番号やスレッド番号のような属性を持つため、図 3 のようなプロパティグラフモデルで表現できる [12]。プロパティグラフモデルは Apache の TinkerPop プロジェクトで定義されているデータモデルである¹。また、これら属性は動的解析の際に参照されるデータや、動的解析の結果として理解されやすいように表示の際に参照されるデータが含まれている。

動的解析を行う際には、オブジェクトの状態の変遷やプログラムのエラーを追跡など、命令や値の依存関係を辿ることになる。したがって、動的解析では制御依存関係やデータ依存関係などの依存関係を辿る（グラフ走査）処理が頻繁に行われることが想定され、グラフ走査処理の効率化が要求される。

¹ Apache TinkerPop: <https://tinkerpop.apache.org/> (閲覧日: 2017-01-16)

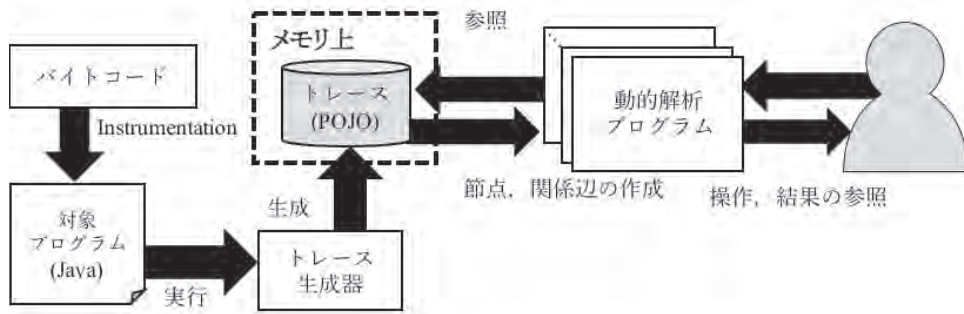


Fig. 2: 先行研究の動的解析環境

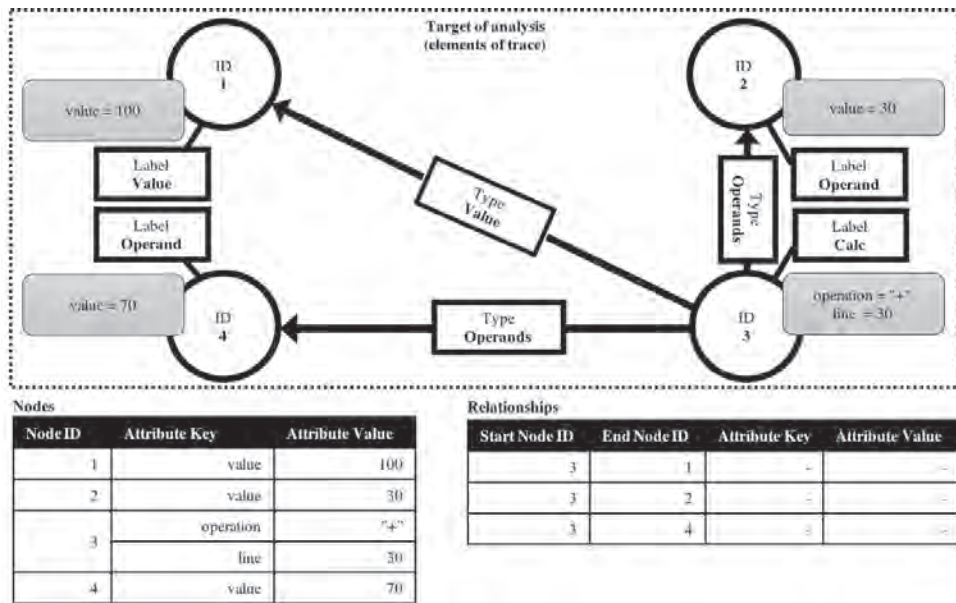


Fig. 3: プロパティグラフモデル

3.3 動的解析の処理方法

動的解析は解析範囲の広狭に関わらず解析の起点となる命令や値からデータ依存関係や制御依存関係などの依存関係を辿ることによって行うことができる。したがって、グラフ走査の起点となる節点（走査開始節点）を取得後は依存関係を辿りながらトレースを調査していくため、グラフ走査処理の効率化を図ることが動的解析の効率化につながる。また従来の場合、解析中は全てのトレースの要素がメモリ上に読み込まれ、その上、トレースの要素の依存関係を解析するため組合せ爆発のような問題が発生し、トレースの全体を解析対象とする動的解析に対応できなかった。そのため、膨大なトレースに対する解析を可能にするために、メモリ上に読み込まれるのは解

析に必要なデータのみにする必要がある。

そこで、本研究ではグラフ走査処理のパフォーマンス向上やディスク上での管理といった二点の必要性を考慮して、トレース処理部の基盤にはオンディスクデータベースである GDB を用いる。GDB にはさまざまなソフトウェアが存在するが、本研究では Neo4j² を採用することにした。これは、Neo4j がトレースを格納するのに適したプロパティグラフモデルを採用しており、同時に GDB の中でグラフ走査処理の性能が高いことが示されていたからである [13, 14]。また、GDB の中でも関係性を利用したグラフ解析に最適化している GDB はグラフ走査の対象となっている節点に直接関係がないデータを読み込

² Neo4j HP. <http://neo4j.com/> (閲覧日: 2017-01-16)

まずに解析を行うことができるため、データ量が膨大なトレースに対しても全体的に解析範囲がおよぶ動的解析手法の適用を可能にする。

Neo4j のデータベースに格納されたトレースに対する動的解析の実装は Java のグラフ走査処理を実装するライブラリである Neo4j Traversal API および、グラフ問合せ用のクエリ言語 Cypher を用いることにより行う。Cypher により解析の起点となるデータを問合せを行い、Neo4j Traversal API を用いることにより命令や値の種類に合わせて条件付けしたグラフ走査を実現することができる。

4. 属性参照の頻度を考慮した節点属性の分割

3. では、GDB の Neo4j を用いたトレースの格納方法、処理方法について説明した。データをディスク上で管理することにより、動的解析に必要なデータはメモリ上に存在しないため、メモリ消費量の削減につながっている。しかし、我々の動的解析環境ではグラフ走査の際に動的解析に不要な命令や値の属性を読み込んでいることにより、無駄なディスクアクセスが増えていることがボトルネックになっていると考えられる。そこで、本節ではこのボトルネックを改善するグラフの変換方法について提案する。

4.1 オンディスクデータベースの挙動

Neo4j のデータベースに格納されているデータに対して問合せを行う際には Cypher による問合せ、もしくは Neo4j Traversal API によるグラフ走査によらず、まず、走査開始節点の問合せから開始される。次に、走査開始節点から関係性を辿ることによって次の節点を取得することを繰り返すことでメモリ上にグラフデータを展開している。そのため、グラフ走査がデータベースに格納されている全データに対して行われる際には、ほとんど全ての節点や関係辺がメモリ上に読み込まれることになる。

また、メモリ上へ節点や関係辺を読み込む際にはそれらデータを取得するためにディスクアクセスが発生していると考えられる。したがって、トレースに対して全体的に動的解析を実行する場合、ほとんどのトレースのデータをディスク上から取得しようとし、グラフ走査が非効

率になる。他にも以上の問題はメモリへ読み込むデータ量が多くなることから、動的解析に要するメモリ領域を確保するためにも無駄なトレースの要素の読み込みは削減できるべきである。

4.2 メモリ消費量削減のための節点属性の分割

本研究で構築する動的解析環境は GDB を利用することにより、動的解析の基本的な処理である依存性の解析を効率化するだけでなく、解析に必要な節点のみをメモリ上に読み込むため膨大なトレースに対しても解析範囲が全体的な動的解析に対応することも可能になる。節点の読み込みと一緒にその節点の属性もメモリに読み込まれるといった、本研究で構築する動的解析環境のボトルネックは、不要な属性を異なる節点に格納しておくことにより削減できるものと考えられる。

そこで、解析の対象となる節点（解析対象節点）とその節点の属性が格納されている節点（属性用節点）の二つに分けて管理することで上記のボトルネックを除去する方法を提案する。また、解析対象節点に対応する属性用節点を取得できるようにするために、図4のようにそれらの間には関係辺（属性辺）を作成する。そのため、トレースの全要素に適用すると次のようなグラフ構造の変更点が発生する。

1. GDB に格納されている節点数は元の倍になる。
2. 各節点に接続辺が一つ増える。

しかし、Neo4j のようなネイティブグラフデータベースではグラフの走査はある節点に接続している節点のみを対象とするため、変更点 (1) のような節点の増加の影響はほとんど受けない [15, 16]。また、変更点 (2) により、解析に不要な節点の属性の読み込みを削減できる代わりに、属性辺が一つ読み込まれるようになる。さらに、グラフ走査の際に辿る必要のある辺を確認する対象が全節点で一つ増加するが、ほとんどのグラフ走査は関係性を指定するため、関係辺の候補は実質増えずグラフ走査の効率への影響はほとんど無い。ただ、動的解析において必ず属性の参照が必要な節点ラベルが存在するため、全に対して属性の分割を適用することはグラフ走査の処理を

Algorithm 1 属性を分割する節点の自動決定アルゴリズム

Require: $N_{node}, N_{load}, N_{trav}$

```
for each  $l \in L$  do
   $f[l] \leftarrow \text{false}$ 
end for
for each  $l \in L$  do
   $before \leftarrow S_{load}(f, N_{load}, N_{node})$ 
   $f[l] \leftarrow \text{true}$ 
   $after \leftarrow S_{load}(f, N_{load}, N_{node})$ 
   $traversal \leftarrow S_{trav}(f, N_{trav}, N_{node})$ 
  if  $before > after$  and  $traversal = 0$  then
    continue
  else
     $f[l] \leftarrow \text{false}$ 
  end if
end for
return  $f$ 
```

増やすことになり非効率化につながる。したがって、各節点ラベルに対して節点属性の分割を適用するか適用しないかを判断する基準を設ける必要がある。

4.3 節点属性の分割が必要な節点の導出方法

本研究の提案手法の目的は節点に付随する属性のメモリへの読み込みを削減することで、グラフ走査の効率性を向上させることである。一方、節点の分割を施すことにより懸念される解析の非効率化の要因としては、解析時に属性が必要な節点に対しても節点属性の分割を行うことで属性辺を辿る処理が発生することである。属性辺のグラフ走査は元々のトレースの構造に対する解析時には発生しない処理であるため、属性辺を辿る処理が発生するほど解析の非効率化につながる。これらのことから、動的解析中に発生する節点属性の読み込み数および属性辺のグラフ走査回数を最小にできるようにグラフ変換する節点を決定する必要がある。

節点属性を分割する節点の自動決定には動的解析環境に実装されている動的解析手法の解析アルゴリズムを事前に分析しておく必要がある。すなわち動的解析手法ご

とに、節点ラベル別に依存関係を辿る処理や節点属性の取得する処理などが定義されており、それらを事前に集計しておく必要がある。本節で導入する節点属性を分割する節点の自動決定では、ある節点ラベルの依存性を解析する際に発生する属性読み込みの情報を用意しておく必要がある。ただ、依存性解析は基本的に節点属性の値によって場合分けされる可能性があり正確に測ることができない。そのため、解析されるかどうかわからない対象も依存性解析がなされると仮定することで最悪の場合を想定する。事前に用意した節点ラベル別に解析時に発生する属性読み込みの情報をもとに、属性読み込みが発生する可能性がない場合はその節点の属性を分割するが、属性読み込みが発生する可能性がある場合は節点の属性を分割しないようにする。

以上の節点属性の分割を行う節点の自動決定方法を実現したアルゴリズムを Algorithm 1 に示す。Algorithm 1 では、節点ラベルの集合を L としている。このとき、 $N_{node}(l)$ は GDB に格納されている節点ラベル $l \in L$ ごとの個数であり、 $N_{load}(l)$ は節点ラベル $l \in L$ の節点が共通して持ちうる属性の個数である。また N_{trav} は、節点ラベル $l \in L$ に到達した際に発生する節点ラベル $m \in L$ に対する属性の読み込み回数である。ただし、節点ラベル l, m は同一な節点ラベルの場合 ($l = m$) も考慮する。

次に、節点の属性を分割する基準となる $S_{load}(L)$, $S_{trav}(L)$ はそれぞれ解析を実行後の属性の累計読み込み回数、属性辺のグラフ走査累計回数である。これらは、 N_{node} , N_{load} , N_{trav} により推定することが可能である。 $S_{load}(L)$, $S_{trav}(L)$ の算出方法は式 (1), (2) に示す。また、式中の f はラベルごとに節点属性を分割するかしないかを区別する辞書型データであり、節点ラベル名ごとに属性を分割するのであれば $true$ 、属性を分割しない場合は $false$ としている。

$$S_{load}(L) = \sum_{l \in L} S_{load}(l, f[l]) \quad (1)$$

ただし

$$S_{load}(l, f[l]) = \begin{cases} N_{load}(l) \cdot N_{node}(l) & \text{if } f[l] = \text{false} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

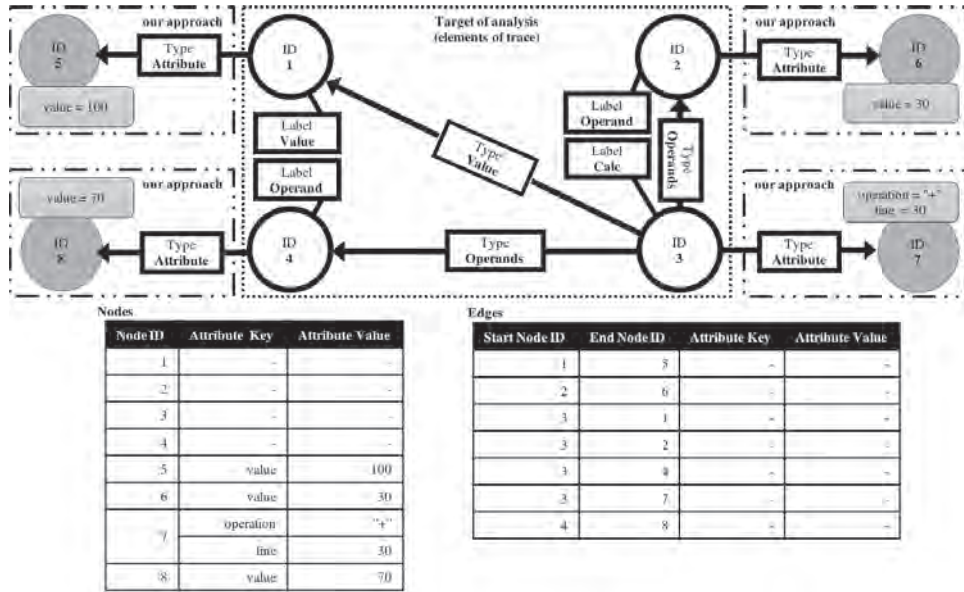


Fig. 4: 節点属性の分割後のトレース

$$S_{trav}(L) = \sum_{l \in L} s_{trav}(l, f)$$

(2)

ただし

$$s_{trav}(l, f) = \begin{cases} \sum_{m \in L} N_{trav}(l, m) \cdot N_{node}(m) & \text{if } f[m] = true \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

式 (1) 中の $s_{load}(l, f[l])$ は節点ラベル l の節点を読み込んだ際に同時に読み込まれる節点属性の個数を、GDB に格納されている節点ラベル l である節点の個数で掛けた値である。式 (2) 中の $s_{trav}(l, f)$ は節点ラベル l, m において、節点ラベル l の依存性を解析する際に節点ラベル m の節点属性を読み込む回数を、GDB に格納されている節点ラベル m である節点の個数と掛けることを全ての組合せで行い、それらを総和した値である。ただし、 $s_{load}(l, f[l])$ は節点属性の分割が適用されている節点に対しては節点属性の読み込みが発生しないため 0 となり、 $s_{trav}(l, f)$ は節点属性の分割が適用されていない節点に対しては属性辺のグラフ走査が発生しないため 0 となることに注意する。

属性辺のグラフ走査回数 $S_{trav}(L)$ を 0 回に維持しながら、属性の読み込み回数 $S_{load}(L)$ を最小にする節点属性の分割を適用する節点ラベルの組合せ f を導出し、トレースのグラフ構造の変換時に利用する。

5. 評価実験

4.1 で示したグラフ走査の際に不要なデータでさえもメモリに読み込まれるといったボトルネックを解消する方法を 4.2 で提案した。本節では本提案手法がグラフ走査の処理パフォーマンスにどのように効果をもたらすのか明らかにするため実験を行う。トレースの全域を対象とする動的解析は解析時間だけでなく、メモリを効率的に利用できているか評価する必要がある。本研究の提案手法を適用することで解析範囲がトレース全体に及ぶ動的解析の処理パフォーマンスが改善されているかどうかについて評価を行う。この実験ではトレースの構造ごとに処理パフォーマンスの比較を行うために、トレース全体を解析対象とする動的解析の解析時間、動的解析実行中のメモリ消費量を計測する。本実験は OS: Linux³, CPU: 2.26 GHz 4 core⁴, RAM: 64GB の Kernel-based Virtual Machine の環境で行う。

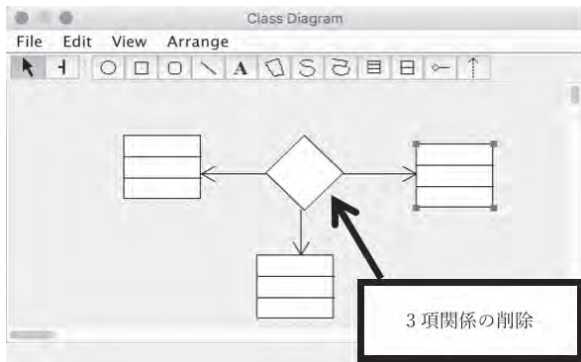
5.1 UML エディタ “GEFDemo”

5.2 の解析に利用するトレースには Graph Editing Framework のデモプログラム (GEFDemo)⁵ の実行に関

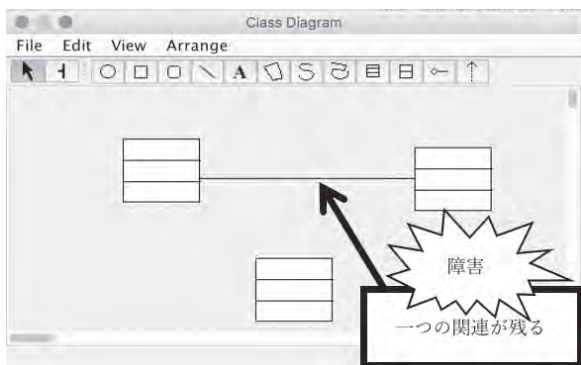
³ CentOS 7.2-1511

⁴ QEMU Virtual CPU ver. 0.9.1

⁵ GEFDemoUML-0.10.5beta-src.zip を実行。http://gefdemo.stage.tigris.org/. (閲覧日: 2017-01-16)



(a) クラスと3項関係の作成



(b) 3項関係の削除と例外の発生

Fig. 5: GEFDemo の操作

するトレースを用いる。GEFDemo は図 5 に示すようなアプリケーションフレームワークを用いた簡易な UML エディタである。GEFDemo にはプログラムの実装に欠陥があり、3 項関係を削除する操作を行うと図 5(b) のような障害が発生することが知られている。

また、図 5(b) に示すような障害が発生する原因は手作業により確認されているため [7]、動的解析の実装が正確かどうかについて検証が可能である。本実験において利用するトレースは図 5 のように、以下の手順で故意に例外を発生させたプログラムの実行過程を記録している。

1. エディタ上にクラスを三つ作成する。
2. 一つのクラスから他のクラスに対して関連を作成する。
3. 関連を作成していないクラスから関連の線に対して関連を作成する。
4. 3 項関係を削除する。

5.2 Outdated-State 解析

5.1 で述べた GEFDemo の障害の原因は Java プログラムのコレクションの状態を参照した繰り返し命令の途中でコレクションの状態が変更されたため発生している。本研究では GEFDemo の障害の原因を検出するため、命令で同じオブジェクトの異なる状態を利用している命令を検出することができる動的解析の一つである Outdated-State 解析を用いる。

動的解析環境において、以下の手順で Outdated-State 解析を実行する。

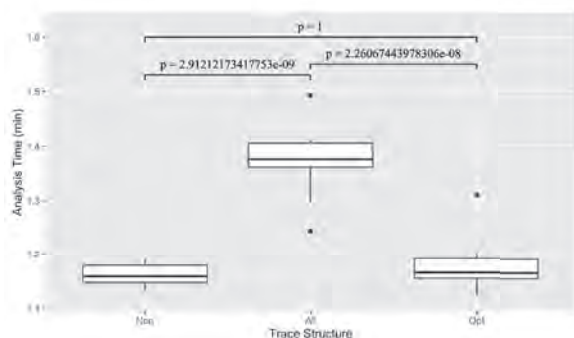
1. メソッド呼出しを実行順に一つずつ調査する。
2. 一つのメソッド呼出しに対して、そのメソッドで実行されている複数の命令の種類ごとにオブジェクトの状態との依存関係を調査する。
3. 状態変更命令を解析した際に、その値の変更が何回目か記録した節点を GDB に作成する。
4. 手順 (3) で作成した節点から同じオブジェクトの新しい状態と古い状態の組合せと依存関係を持つ命令が存在するか調査する。

Outdated-State 解析は手順 (1) で示すように、プログラムの実行全体を解析する必要があるため、通常の実装では動的解析にメモリ空間が多く必要となる。

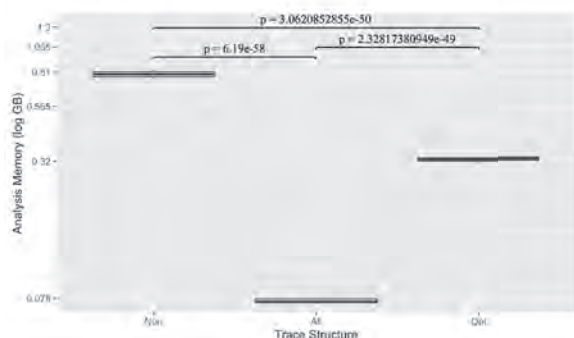
5.3 動的解析の処理パフォーマンスの評価と考察

動的解析の処理パフォーマンスを評価するために、評価項目として動的解析時間およびメモリ消費量の計測を行う。動的解析時間は解析時間の開始時と終了時の時間を記録して差分を算出する。一方、動的解析中の最大メモリ消費量は UNIX コマンドの `vmstat` で実行中の毎秒のメモリ消費量を計測することで、その最大値と動的解析実行前のメモリ消費量の差分を算出する。

以上の実験を 10 回試行し、動的解析時間の算出結果を図 6(a)、最大メモリ使用量の算出結果を図 6(b) に示す。図中の p 値は対応のある t 検定により導出した値であり、有意水準 5% としたときにこの水準を下回らなければ帰無仮説 (H_0) 「2 群間の平均値に差はない」を採択し、下



(a) 動的解析の平均解析時間



(b) 動的解析の平均メモリ消費量

Fig. 6: 動的解析パフォーマンスの評価

回る場合は帰無仮説を棄却し対立仮説 (H_1) 「2 群間の平均値に差がある」を採択する。

図 6(a) より、トレースの全ての節点に対して属性分割を適用した場合 (All), グラフの構造を変換しなかった場合 (Non) と比べて統計的に差が見られ All は非効率化につながっている。属性分割を適用する節点ラベルを 4.3 で導入した Algorithm 1 により自動決定した場合 (Opt), Non と同等の解析時間で解析を実行することができていることが分かる。All では、属性辺を辿るグラフ走査が多数発生することにより解析時間を悪化させていたが、Opt では Algorithm 1 の効果により属性辺のグラフ走査が発生しない Non と同様な解析時間で実行することができていることが確認できた。次に図 6(b) ではトレース構造ごとに最大メモリ使用量に大きく差が出たため、便宜上 y 軸は対数軸にしている。図 6(b) より All はどのグラフ構造よりもメモリ消費量を大きく削減できている。これは、本研究で提案した手法を全ての節点に対して適用したこ

とにより、節点属性の読み込みが全く発生しなくなったことによる結果である。一方、Opt ではメモリ消費量の削減に関して All よりも劣るものの Non の平均メモリ消費量 15.77 GB から 43.1% 削減することができ、動的解析を効率的に実行することが実現できた。以上をまとめると本研究で導入した Algorithm 1 の効果により、属性辺のグラフ走査を発生させずに節点属性の読み込みを削減でき、元々のトレース構造に対する動的解析の速度を維持しつつ、大幅にメモリ消費量を削減すること可能にした。

本研究における提案により、グラフ走査により到達した節点に付随する属性の読み込み時に発生すると想定していた、ディスクアクセスおよびメモリへの属性の読み込みのうち後者は改善することができていることが実験で確認できた。前者のディスクアクセスの削減により処理時間を短くできなかったのは Neo4j の実装において節点の属性をディスクから取得する処理が最適化されていることにより、処理の遅延に大きく影響していなかったと判断できる。

6. おわりに

本研究では膨大で複雑なトレースの処理の効率化のために、依存関係を辿ることにより解析する動的解析の特徴に着目し、グラフ走査の処理が最適化された GDB を用いて動的解析環境を構築した。また、動的解析において解析に不要なデータも一緒にメモリに読み込まれるといった非効率的な処理を抑制するために、節点の属性の読み込みを削減する格納方法を提案した。さらに、本手法は全ての節点に対して適用すると動的解析の非効率化につながるため、節点に対して提案手法を適用するか適用しないか自動決定する方法を導入した。動的解析時間およびメモリ消費量の観点から動的解析パフォーマンスの評価実験を行った結果、本研究で提案した非効率化を抑制するように工夫したトレースの節点属性を分割する手法は元々のトレース構造の場合よりも動的解析時間を維持しつつ、メモリ消費量はトレースの構造を変化しない場合よりも 43.1% 削減することを可能にした。

今後の課題としては、今回は Outdated-State 解析のみ

適用した場合を考えているため、他の動的解析手法を適用した際の効果検証も行う必要がある。また、本研究で提案した手法が動的解析の高速化には寄与できなかったため、動的解析中に多数発生している命令や値の比較回数を少なくする必要がある。

謝辞

本研究の一部は文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 S1411030 および同志社大学ハリス理化学研究所研究助成事業、日本学術振興会科学研究費助成事業 25240014 および 26280115 の助成を受けて遂行された。

参考文献

- 1) Andreas Zeller, *Why Programs Fail, Second Edition: A Guide to Systematic Debugging*, Morgan Kaufmann, 2009.
- 2) Mark Weiser, "Program Slicing", In *International Conference on Software Engineering*, pages 439–449, 1981.
- 3) Jorge Ressaia, Alexandre Bergel, and Oscar Nierstrasz, "Object-Centric Debugging", In *International Conference on Software Engineering*, pages 485–495, 2012.
- 4) Bil Lewis, "Debugging Backwards in Time", In *Proceedings of the Fifth International Workshop on Automated Debugging*, 2003.
- 5) Andrew J. Ko and Brad A. Myers, "Designing the Whyline: a Debugging Interface for Asking Questions about Program Behavior", In *SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 151–158, 2004.
- 6) Adrian Lienhard, Tudor Gîrba, and Oscar Nierstrasz, *Practical Object-Oriented Back-in-Time Debugging*, 2008.
- 7) Izuru Kume, Masahide Nakamura, Naoya Nitta, and Etsuya Shibayama, "A Case Study of Dynamic Analysis to Locate Unexpected Side Effects Inside of Frameworks", *International Journal of Software Innovation*, 3(3), 2015.
- 8) Tao Wang and Abhik Roychoudhury, "Using Compressed Bytecode Traces for Slicing Java Programs", In *International Conference on Software Engineering*, pages 512–521, 2004.
- 9) Adrian Lienhard, *Dynamic Object Flow Analysis*, Lulu.com, 2009.
- 10) Adrian Lienhard, Tudor Gîrba, Orla Greevy, and Oscar Nierstrasz, "Exposing Side Effects in Execution Traces", In *International Workshop on Program Comprehension through Dynamic Analysis*, pages 11–17, 2007.
- 11) David J. Agans, *Debugging: The 9 Indispensable Rules for Finding Even the Most Elusive Software and Hardware Problems*, Amacom, 2002.
- 12) Marko A. Rodriguez and Peter Neubauer, "Constructions from Dots and Lines", *Computing Research Repository*, abs/1006.2361, 2010.
- 13) Vojtěch Kolomičenko, Martin Svoboda, and Irena Holubová Mlýnková, "Experimental Comparison of Graph Databases", In *Proceedings of International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services, IIWAS '13*, 2013.
- 14) Salim Jouili and Valentin Vansteenbergh, "An Empirical Comparison of Graph Databases", In *Proceedings of the 2013 International Conference on Social Computing, SOCIALCOM '13*, pages 708–715. IEEE Computer Society, 2013.
- 15) Ian Robinson, Jim Webber, and Emil Eifrem, *Graph Databases*, 2015.
- 16) Sonal Raj, *Neo4J High Performance*, Packt Publishing, 2015.

An Infrastructure-Assisted V2V Messaging based on ITS Station Architecture

Manabu TSUKADA*

(Received May 11, 2017)

Cooperative Intelligent Transportation Systems (CITS) are being developed to make road traffic safer and more efficient. Vehicle to vehicle (V2V) communication plays an important role for the cooperative awareness of vehicles in all the CITS standards in EU, US, and Japan. Essentially the CITS application relies on the exchanged data by V2V messages (called Cooperative Awareness Message (CAM) in EU). However, the V2V communication suffers from two significant problems: 1) mixed environment and 2) obstacle interference. First, the CITS application cannot be aware of a non-CAM-aware vehicle because of low market penetration ratio of the V2V message transmitter in the early deployment phase. Second, the V2V messages may not reach the receivers because of interference by the obstacle between the vehicles. To solve these problems, the proposed system called Proxy CAM generates the necessary V2V messages in the roadside unit on behalf of sender vehicles (or non-CAM-aware vehicle) by sensing the vehicle. We design the system based on the ITS Station architecture standardized in ISO/ETSI, working with any vehicle sensing technology. Moreover, we implement the prototype system with a stereo vision for the vehicle sensing. The prototype system is evaluated in an indoor test and also validated in a field test in Tokyo with some modifications in the link layer to adapt the Japanese regulation. The results show that Proxy CAM significantly improves the coverage of V2V messaging while the system overhead is limited.

Key words F Vehicular Ad-hoc Networks, Cooperative ITS, Intelligent Transportation Systems, ITS Station Architecture, Wireless Multihop Communication

1 Introduction

Road transportation is one of the most important services for human mobility since ancient times. Intelligent Transportation Systems (ITS) aim at optimization of the road traffic by realizing safe, efficient and comfortable transportation. Within some research fields in ITS, Cooperative ITS, and vehicular communications became essential for the cooperation of multiple entities in the road traffic to achieve shared objectives (safety, efficiency, and comfort). Application of Cooperative ITS includes driver assistance in the near future. However, the vehicular communication also remains essential in autonomous driving to support the

wider perception of the other vehicles around a vehicle that cannot be detected by the sensors equipped in the vehicle.

The International Organization for Standardization (ISO) Technical Committee 204 Working Group 16 (TC204 WG16) (also known as Communications Architecture for Land Mobile (CALM)) is developing a standard architecture for Cooperative ITS, called ITS Station reference architecture with coordination with the European Telecommunications Standards Institute (ETSI) TC ITS^{1, 2)}. In the US, the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) is standardizing Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) architecture in IEEE 1609 family of standards³⁾ as well as IEEE802.11 variant for vehicular commu-

* The University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan
Telephone : +81-3-5841-7465
E-mail : tsukada@hongo.wide.ad.jp

** E-mail : tydus@hongo.wide.ad.jp

nication as IEEE802.11p.

In these standards for Cooperative ITS, wireless one hop Vehicle-to-Vehicle (V2V) broadcast is one of the fundamental techniques; that is defined as Cooperative Awareness Message (CAM) ⁴⁾ in the ITS Station Architecture. The driver or the autonomous vehicle, in theory, can be aware of the other vehicle out of sight thanks to the V2V messages using wireless one-hop broadcast. However, there are potential issues of the penetration ratio of the V2V devices. To the remedy, the US National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) studies the possibility of regulatory work to require V2V devices in new light vehicles ⁵⁾. Despite the effort of the deployment, it is hard to imagine deploying the V2V devices at once in all the vehicles including old vehicles. Thus, we should consider the mixed environment with V2V-enable vehicles and the legacy vehicles. Besides the issue of the penetration ratio, the reachability of the V2V message exchange is also key issues. The messages may be lost because of the interference of wireless radio or the blocking of obstacles such as building and large vehicles.

The objective of the paper is to solve these issues of the V2V message by the assistance of roadside infrastructure with sensors. To solve these problems, the proposed system called Proxy CAM generates the necessary V2V messages in the roadside unit on behalf of sender vehicles (or non-CAM-aware vehicle) by sensing the vehicle. We design the system based on the ITS Station architecture standardized in ISO/ETSI, working with any vehicle sensing technology. Moreover, we implement the prototype system with a stereo vision for the vehicle sensing. The prototype system is evaluated in an indoor test and also validated in a field test. The results show that Proxy CAM significantly improves the coverage of V2V messaging while the system overhead is limited.

The contributions of this work are:

- Analysis of problems of V2V communications,
- Proposal of platform for infrastructure assisted CAM for the solution

- Prototype implementation of the proposed system, and
- Experimental evaluation of prototype of infrastructure assisted CAM system.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 highlights the related works and section 3 analyzes the issues of V2V messages and summarizes the requirements of the solution. Section 4 presents the system requirements and design. Section 5 demonstrates and evaluates our implementation. Finally, Section 6 concludes our paper.

2 Related Works

The V2V messages exchanged among vehicles using wireless one-hop broadcast are often called “I am here” messages, which notify the sender vehicle positions and additional information. The “I am here” message using wireless one-hop V2V broadcast is standardized as CAM in EU in the ITS Station architecture. A similar concept is specified in the US as Basic Safety Message (BSM) ⁶⁾ in the WAVE architecture. Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MILT) also has the specification of the similar concept called the Advanced Safety Vehicle (ASV) V2V message.

In the ITS Station architecture, CAM is standardized in the facilities layer that provides a set of common functionalities for several ITS applications. CAM is sent to provide information of sender vehicle including time, position, motion state, and activated systems. On the reception of CAM, the information is stored in Local Dynamic Map (LDM) ^{7, 8)} that is also standardized in the facilities layer. LDM supports various ITS applications by maintaining the information on objects of traffic entities including highly dynamic information such as vehicles, roadside, traffic conditions and accidents.

As an infrastructure assisted CITS, the Japan Metropolitan Police Department develops Driving Safety Support Systems (DSSS) for accident reduction ⁹⁾. DSSS experimented three systems: rear-end collision prevention system at entering to traffic jam

which hides behind obstacles, collision prevention system at turning right at the intersection, and collision prevention system at the intersection in a bad view. The infrastructure assisted CITS using beacons and FM broadcasting are implemented on the highways in Japan.

It is analyzed that performance of Vehicular Ad-Hoc Network (VANET) depends on TX power, frequency of transmission, and the lifetime of messages in V2V communications and V2I communications ¹⁰⁾. Furthermore, it is known that performance of V2V messages and V2I messages strongly depends on the link quality and the propagation conditions ¹¹⁾. ¹¹⁾ demonstrates that awareness levels for V2I communications are better than V2V communications if the roadside units are implemented on advantageous positions. ¹¹⁾ also explains that TX power is more important than frequency of transmission for V2X communications.

There are many ways of sensing which are useful for road traffic. Vision-based vehicle detection and tracking techniques are summarized in ¹²⁾. In vision-based technics, Millimeter-wave radar and a camera are important equipment for sensing vehicles. Millimeter-wave radar can be used for measuring target range and speed. Police use Millimeter-wave radar in traffic speed regulation ¹²⁾. Millimeter-wave radar is available with a poor view in a bad weather. Stereo cameras are very effective way to sensing vehicles. Stereo cameras can detect a vehicle and, sense vehicle's position and velocity ¹³⁾.

Cloud-based cooperative awareness between vehicles and pedestrians are proposed in ¹⁴⁾. The pedestrians send their positions to the cloud regularly from smartphones, and the cloud alerts to the vehicles in the case that the cloud finds an approach of a pedestrian to the vehicles. Vehicle-to-Pedestrian (V2P) communication is also investigated in ¹⁵⁾. In the work, pedestrians receive CAMs on their smartphones from invisible vehicles behind an obstacle.

3 Problem Statement

In this section, we explain the issues of CAM in detail. Then we analyze the design requirement for the solution.

3.1 Issues

Mixed Environment 3.1.1 I

In order to detect the vehicle using CAM, all vehicles must be equipped with a V2V device, at least the sender device. Thus, the penetration ratio of the V2V device is the key factor for the cooperative ITS. Despite the regulatory works, it is not possible to deploy the devices to all the vehicles at once, because the legacy vehicles are already on the road. In the current assumption of CAM, these non-CAM-aware nodes are excluded and therefore their presence information are not notified to the vehicle. CAM needs to adapt to the mixed environment where CAM-supported vehicles and non-CAM-aware node (legacy vehicles, pedestrians, and bicycles) coexist.

Message Loss 3.1.2 C

CAM is broadcasted over an ITS-5G network within a single hop distance. The message may be lost in the delivery because the existence of obstacles between the nodes may screen the wireless radio propagation. Obstacles in the road include the building, bridge, tunnel, hill, and heavy vehicles.

Also, CAM cannot be delivered beyond the range of wireless radio propagation from the sender vehicle. This range is often referred from around 500 meters to 1000 meters using ITS-5G. The vehicle information exchange using CAM is limited to the distance of wireless radio propagation.

In the above case that CAM does not reach the receiver, the receiver is not aware of the other vehicle's presence or it is only aware of the old information. CAM needs the solution to enhance the message delivery.

3.2 Requirements

We design infrastructure assisted proxy system for the solution for the issues of the mixed environment. The infrastructure detects a vehicle and sends the V2V

message on behalf of the vehicle. We analyze the design requirements for the system.

Coexistence with the CITS Standards 3.2.1 F

For the interoperability among the countries, CITS is developed based on the same architecture, protocols, and technologies. The solution must adopt the CITS standards techniques, for example, the Standard V2V messages such as CAM in EU, BSM in the US and ASV in Japan. In the ITS Station architecture, the facilities layer functionalities have particular importance because the application developed in the architecture access the function via the standard API. Thus, the solution must not require any extension to the facilities layer such as LDM.

Sensor independence 3.2.2 T

The solution uses roadside sensors to obtain vehicles' data such as the position and the velocity. As we stated in section 2, there are many types of sensors for this use. The solution should not depend on particular types of the sensors and be designed as a platform for infrastructure assisted V2V messages that support any kinds of sensors.

Real-time delivery of messages 3.2.3 T

The status of vehicles are always changing such as positions, velocities, accelerations, and the frequent transmission of V2V messages handles these changes. For example, genuine CAMs are transmitted 1 - 10 times a second. The solution should also send information about vehicles frequently. Moreover, delay in sensing and message transmission must be minimized.

Multiple Distributed sensors 3.2.4 T

The sensors may get a real-time data of many vehicles in the urban scenario or traffic jam. Hence, the sensors may be installed in multiple distributed locations in order to obtain wider coverage. The solution must have the capacity to handle the real-time big data from the distributed sensors.

4 Proxy CAM

We propose the system which solves the issues and satisfies all requirements, called Proxy CAM. We de-

sign the system compliant with CAM, however, the proposition potentially can be adapted to other V2V message standards listed in section 2. The system design of Proxy CAM and the current implementation of the system are described in the section.

4.1 System Design

The overview of the system is shown in Fig. 1. First, the roadside sensors detect vehicles and get the information of the vehicles such as positions, velocities, and accelerations. Second, the vehicle information from the sensors is sent to the server in the infrastructure and stored in a database. Third, it generates CAMs from the data stored in the database. Finally, it broadcasts CAMs from the roadside transmitters. The CAM-supported vehicles receive these CAMs and store information into their own LDMs without any difference from the reception procedure of the genuine CAM. By this way, ITS application of the receiver vehicle can access the data from the Proxy CAM. In the following sections, we describe the system in detail by the functions.

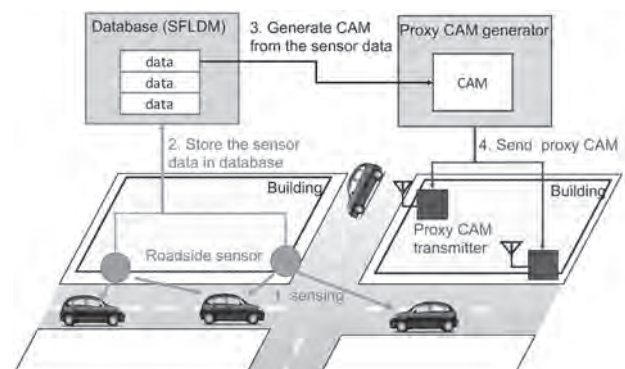


Fig. 1. System Design of Proxy CAM.

Roadside Sensor 4.1.1 P

Proxy CAM uses any sensors listed in section 2 on a roadside to detect vehicles and to get vehicles' information. In addition to the vehicle position, speed, and acceleration, roadside sensors may take the optional data to fill the CAM format if available (*i.e.* lane position, steering wheel angle). The data taken from the sensors are sent to the database in the infrastructure with the vehicles' IDs. The sensor determines the vehicle's ID from an identifiable number of the vehicle

if available (*i.e.* ID in vehicle license plate). If such identifiable number is unavailable, the sensor assigns a random ID. At the same time, the sensor assigns the same ID to the same vehicle when it identifies the same vehicle by object tracking in different times.

Sensor Fusion Database 4.1.2 T

The vehicle data from the sensors are stored in a database, we name this database after Sensor Fusion Local Dynamic Map (SFLDM). SFLDM is not only a database but also a data integrator. SFLDM identifies the same vehicles data sent from multi-sensors and integrates the data by matching vehicle data such as position, speed, and heading.

Proxy CAM generator 4.1.3 P

Proxy CAM generator composes proxy CAMs by filling up the field of CAM from integrated data in SFLDM. The ITS PUD Header and the Generation Delta Time fields are filled with the same way as genuine CAM. In the case that the data are not available to filling up some fields, the fields remain 'unknown'. CAM has 32 bits of Station ID field which presents the sender of CAM. When the CAM generator fills up the proxy CAM field, it masks the first 24bits prefix of the Station ID field by '1'. We define the CAM with this prefix is originated from the Proxy CAM system, to distinguish from genuine CAM that does not have this prefix by the specification. The last 8 bits of the Station ID is filled by random numbers. When the same vehicle is identified, the same Station ID is used for the CAMs.

Proxy CAM transmitter 4.1.4 P

Proxy CAM transmitters broadcast generated proxy CAMs using the ETSI standard protocols. Proxy CAM transmitters use IEEE 802.11p as the physical access, GeoNetworking as the networking layer, and Basic Transport Protocol (BTP) as the transport layer. The installation place should be on the place where transmitters can have a good line of sight (*i.e.* on the intersection). Moreover, the Proxy CAM system can install multiple transmitters in distributed location to cover the wider transmission range.

4.2 System Implementation

We implemented Proxy CAM using a stereo camera for the roadside sensor as in Fig. 2. CAM generator and CAM transmitter are combined in the same embedded Linux box (LGN-20-00) with radio equipment in this implementation. SFLDM is implemented as simple FIFO because the implementation does not have multi-sensors and does not require the data integration.

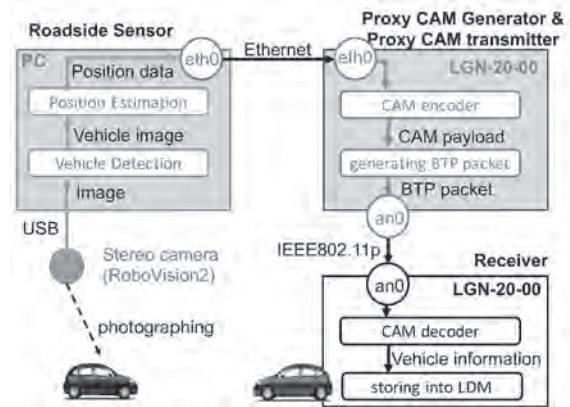


Fig. 2. Implementation Overview of Proxy CAM.

Roadside Sensor 4.2.1 W

We used a ZMP stereo camera (RoboVision2) as a sensor. RoboVision2 can take 30 frames whose size is 1280 x 960 pixels per second. RoboVision2 is connected to a Windows PC via USB, and the PC detects the target vehicle with the image from the stereo camera. First, the PC detects vehicles on a road. In order to detect vehicles, we made a vehicle detector which extracts Haar-like features by a function of OpenCV. Second, the PC estimates the distance between the stereo camera and vehicles from the stereo image. We estimate the distance using block matching provided by RoboVision2 SDK. Finally, the PC can calculate the position of vehicle-based on the fixed position and angle of the stereo camera and sends 64 bits of positions (32 bits of latitude and 32 bits of longitude) to the CAM generator with the Ethernet using IPv4 + UDP.

CAM Generator 4.2.2 W

We used a Linux-based radio equipment (Commsigna LGN-20-00) for the CAM generator. The CAM generator has a reception thread which waits for data

from the roadside sensor. When it receives the data, it encodes CAM with the format of the CAM standard. The CAM generator fills the data into fields of the header, the generation time, the latitude, and the longitude while it fills 'unknown' to the other fields. We use the current version of CAM in the protocol version field, and the message ID that has the prefix to distinguish the message is from Proxy CAM as described in section 4.1. The Generation Delta Time is filled with the time as the CAM specification. Station Type is filled with five which means passenger car. Latitude and longitude are filled with the values received from sensors. The total size of CAM is 54 byte including extensional field. The CAM transmitter broadcasts the generated CAMs.

CAM Transmitter 4.2.3 T

The CAM transmitter is also implemented in the same Commsignia LGN-20-00 as CAM generator. The CAM transmitter broadcasts the generated CAMs with IEEE 802.11p, GeoNetworking, and BTP for the access layer, the networking layer, and the transport layer, respectively. For the GeoNetworking and BTP, we introduce CarGeo6¹⁶⁾ that is an open source software of GeoNetworking. The CAM transmitter loads the generated CAMs on the payloads of BTP packets. Moreover, it transmits them by single-hop broadcast. Proxy CAM sends the message from port 2001 of BTP that is compliant to the CAM specification. We set the lifetime of CAMs for 950 milliseconds.

CAM Decoder 4.2.4 W

We used another Commsignia LGN-20-00 for the receiver. The receiver decodes the CAMs using the functions provided by Commsignia SDK. The SDK also stores the decoded vehicle information to the LDM.

5 Evaluation

We evaluate Proxy CAM with the implementation described in the previous section. First, we conducted two experimental evaluations for measuring the message delivery ratio of Proxy CAM and message delay of the Proxy CAMs. The above two evaluations are

done in an anechoic chamber (indoor test) to avoid the interference of IEEE 802.11p. Also, we used the anechoic chamber because IEEE 802.11p is prohibited to be used in outdoor in Japan. Then, we performed experimental validation and evaluation of Proxy CAM in the field test. Because of the Japanese regulation, IEEE 802.11b/g Ad-Hoc mode is used for the field test.

5.1 Indoor Test : Measuring message delivery ratio

We prepare a Linux PC to generate fake big sensor data in place of the roadside sensor. The Linux PC is connected with Ethernet to the LGN-20-00 as a CAM generator and a CAM transmitter. This Linux PC generates 1000 fake sensor data of vehicles' positions in various frequency and sends to the LGN-20-00. Then, the LGN-20-00 transmitter sends the CAM using BTP + GeoNetworking to the LGN-20-00 receiver. The two LGN-20-00 were connected with IEEE 802.11p. The MCS index was 0, the bandwidth was 10MHz, the bitrate was 6 Mbps and the TX power was 30 dBm. Fig. 3(a) shows the message delivery ratio that reaches the CAM generator (via Ethernet) and to the LGN-20-00 receiver (via IEEE 802.11p). We observe that there was no loss in the frequency lower than 20 times a second in IEEE 802.11p, and there was no loss in the frequency lower than 50 times a second in Ethernet. So we see that the bottleneck of communication of Proxy CAM is in IEEE 802.11p. Proxy CAM can manage 20 data a second. GPS update positions of vehicles once a second. In this experiment, we measured the performance of the situation when only one transmitter is used. We consider that if multi-transmitters are used, the performance will be improved. Then we need to consider the strategy of CAM transmission, for example, which channel will we use, how to decide the order of information to broadcast, the coverages of each transmitter.

5.2 Indoor Test : Measuring Delay

Proxy CAM must be real-time because the status of vehicles is always changing. Thus, we evaluate message delay of Proxy CAM. We measure the time from vehicle detection to reception of CAMs in the receiver.

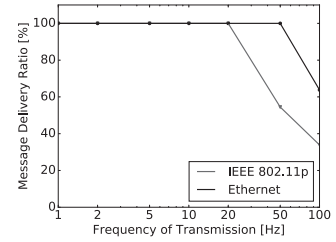
To break down the delay, we separate the total delay into two parts and measure them separately. One is the delay in the roadside sensor, and the other is the delay in the CAM generator and the CAM transmitter.

First, we explain the measurement of delay in the roadside sensor. We use a stereo camera and a Windows PC for a roadside sensor. The PC has Intel core i7 CPU and NVIDIA GTX980M GPU for image processing. The PC detects vehicles with CPU and estimates the position with the CPU and the GPU. We define the delay in the roadside sensor as the time between acquisition of a frame and the end of calculation of the position of the vehicle. We test for 1000 frames. As a result, it constantly takes about 0.12 seconds for the image processing per a frame in the roadside sensor.

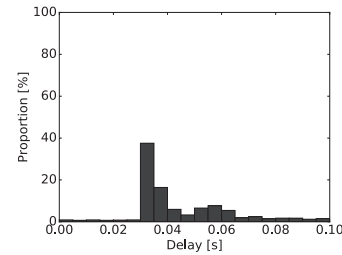
Second, we explain the measurement of delay in the CAM generator and the CAM transmitter in the anechoic chamber. We prepare a Linux PC to generate fake data in place of the roadside sensor. This time, the Linux PC is connected to both the transmitter LGN-20-00 and the receiver LGN-20-00 with Ethernet. Then the Linux PC generated a same 8 bytes data to both the transmitter and the receiver at the same time. The receiver measures the time gap between the reception of the data from the Linux PC and the reception of CAM from the transmitter. The two LGN-20-00 were connected with IEEE 802.11p as same wireless configuration as the previous section. We tested 1000 times, and the results are shown in Fig. 3(b). Fig. 3(b) shows that delay in the CAM generator and the CAM transmitter varied widely. The maximum delay is about 0.1 seconds, and this means the maximum of total delay (with the delay of image processing) in Proxy CAM is about 0.22 seconds. This value is small enough to use for CITS applications like collision prevention. For example, a vehicle which driving 60 kilometers an hour per hour will proceed about only 3 meters.

5.3 Field Test

In the field test, we validated that Proxy CAM can send information of non-CAM-aware vehicles and that Proxy CAM can transmit messages to dead space. And we evaluated the performance of Proxy CAM with



((a)) Message Delivery Ratio



((b)) Message Delay

Fig. 3. Indoor Test: Result.

IEEE 802.11b/g. We perform the experimental evaluation at Hongo campus of The University of Tokyo. The installation of the Proxy CAM implementation is shown in Fig. 4. We installed RoboVision2 as a roadside sensor at the intersection; that detects the target vehicle is approaching the intersection. Then the image processing Windows PC calculates the position of the vehicle. The LGN-20-00 transmitter also locates at the same intersection. It receives the data of the vehicle position from the Windows PC and broadcasts a CAM. Then the LGN-20-00 receiver on the other road receives the message from the Proxy CAM.

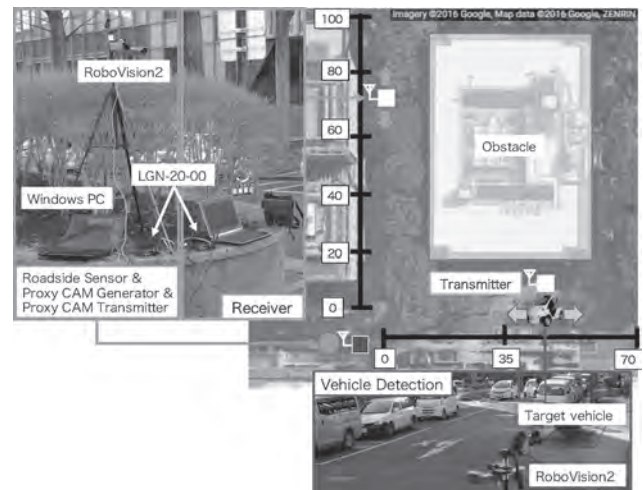


Fig. 4. Test Environment of Field Test.

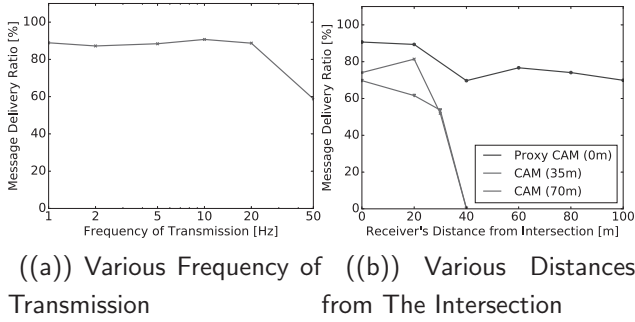


Fig. 5. Field Test: Result.

First, we measured the range of detection area of the sensor. As a result, the sensor can detect the vehicles as far as 70 meters. Then, we measured message delivery ratio from the sensor to the receiver by putting the LGN-20-00 transmitter and the LGN-20-00 receiver side by side as shown the left picture in Fig. 4. The CAM transmitter sends 1000 CAMs to the receiver in various frequency by IEEE 802.11b/g with TX power was 13 dBm; then we counted how many CAMs reached the receiver. Fig. 5(a) shows the result. About 90% of CAMs reached the receiver when the frequency of transmission is less than 20 times a second. And we see that delivery ratio largely decreased when the frequency is more than 20 times a second.

Then, the transmitter moves at the places where the distances from the intersection are 0, 35, or 70 meters. And the receiver is installed at the places where the distances from the intersection are 0, 20, 30, or 40 until 100 meters. We sent 1000 CAMs as frequent as ten times a second and measured how many CAMs reached the receiver in all the combinations. Fig. 5(b) shows the results of this experiment. The horizontal axis shows the distance between the receiver and the intersection. The vertical axis shows the reception ratio of CAMs from the transmitter which locates 0, 35, 70 meters away from the intersection. The lines of *CAM (35m)* and *CAM (70m)* represent the case of the CAM-supported vehicle approaching the intersection while the line of *Proxy CAM (0m)* represents the case that the proposed system is installed in the intersection. The results show that delivery ratio is good when sender locates on the intersection because of its

line of sight. However, the delivery ratio degrades, when both the transmitter and the receiver locates far from the intersection more than 30 meters. We can see that Proxy CAM is useful if its CAM transmitter is at an intersection.

We will consider the mixed environment problem described in section 3 with the results of field tests. If Proxy CAM does not exist in the intersection, the receiver cannot discover the approaching vehicles before entering the intersection. The result of the experimental evaluation suggests that thanks to Proxy CAM, a CAM-supported vehicle can be aware of the approaching vehicle 100 meters away from the intersection. The CAM-supported vehicles can stop before the intersection with the warning because the stopping distance of a vehicle which drives 60 kilometers an hour is 44 meters. Proxy CAM makes traffic safer in a mixed environment. Proxy CAM also solves the obstacles' interference problem. Assume the situation where two CAM-supported vehicles are approaching the intersection. One is on the priority road, and another is on the non-priority road. When obstacles interfere with V2V communication, vehicles are aware of each other 30 meters away from the intersection without Proxy CAM. Thanks to Proxy CAM, the vehicles are aware of each other 70 meters away from the intersection. As 70 meters is longer than the stopping distance of a vehicle which drives 60 kilometers, the vehicle can be aware of the other approaching vehicle before entering the stopping distance from the intersection. Thus, Proxy CAM can help road safety in a dangerous intersection.

6 Conclusion and Future Works

We proposed the system named Proxy CAM, which generated CAMs from roadside sensors data and broadcasted CAMs with roadside transmitters to the problems of V2V messages. Then we implemented the prototype of Proxy CAM with a stereo camera. We validated the function of the prototype of Proxy CAM and evaluated its performance. We measured the message delivery ratio with various frequency and message

delay of this system. As a result, the system could send 20 CAMs a second, and the maximum delay in this system was 0.22 seconds. These results show the usefulness of Proxy CAM. CITS applications perform better as the amount of information which the application uses become bigger. CITS will make road traffic safer and more efficient by utilizing Proxy CAM.

We have four future works. First, the evaluation is necessary for Proxy CAM that has multiple sensors and multiple transmitters. This requires the development of a database for storing and processing sensor data. Second, Proxy CAM needs the algorithm of message dissemination strategy (frequency, message order, and determination area) for multi-transmitter scenarios. Third, the proposed system can potentially be adapted to the other V2V standards. Thus, we need to clarify the details. Fourth, the system must be aware of the V2V message capability of the target vehicle for the proxy message transmission. The system estimates the original message delivery area and it transmits the proxy message to the wider area that the original message does not reach.

References

- 1) ISO 21217:2010 Intelligent transport systems – Communications access for land mobiles (CALM) – Architecture, April 2010.
- 2) Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture, September 2010. ETSI EN 302 665 V1.1.1 (2010-09).
- 3) IEEE 1609.0 Draft Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture, April 2010.
- 4) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, December 2014. ETSI EN 302 637-2 V1.3.2 (2014-11).
- 5) U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration. Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application. pages 1–327, August 2014.
- 6) J2735: Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary, November 2009.
- 7) Intelligent transport systems – Cooperative systems – Definition of a global concept for Local Dynamic Maps, November 2014. ISO/PRF TS 18750.
- 8) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Local Dynamic Map (LDM), September 2014. ETSI EN 302 895 V1.1.1 (2014-09).
- 9) Nakagawa Atsushi, Nakano Tsuyoshi, and Okamoto Yasukazu. Demonstration Experiments of Driving Safety Support Systems Using Vehicle-to-Infrastructure Communications Systems (Japanese), 2009.
- 10) Martijn Van Eenennaam, Wouter Klein Wolterink, Georgios Karagiannis, and Geert Heijenk. Exploring the solution space of beaconing in vanets. In *Vehicular Networking Conference (VNC), 2009 IEEE*, pages 1–8. IEEE, 2009.
- 11) Mate Boban and Pedro M. d’Orey. Exploring the practical limits of cooperative awareness in vehicular communications. March 2015.
- 12) S. Sivaraman and M. M. Trivedi. Looking at vehicles on the road: A survey of vision-based vehicle detection, tracking, and behavior analysis. 14(4):1773–1795, December 2013.
- 13) M. Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli, and S. Nichele. Stereo vision-based vehicle detection. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2000. IV 2000. Proceedings of the IEEE*, pages 39–44, 2000.
- 14) M. Bagheri, M. Siekkinen, and J. K. Nurminen. Cellular-based vehicle to pedestrian (v2p) adaptive communication for collision avoidance. In *Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2014 International Conference on*, pages 450–456, November 2014.
- 15) P. Merdrignac, O. Shagdar, I. B. Jemaa, and F. Nashashibi. Study on perception and communication systems for safety of vulnerable road users. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on*, pages 1876–1881, September 2015.
- 16) T. Toukabri, M. Tsukada, T. Ernst, and L. Beltaieb. Experimental evaluation of an open source implementation of IPv6 geonetworking in vanets. In *ITS Telecommunications (ITST), 2011 11th International Conference on*, pages 237–245, August 2011.

Design and Evaluation of Driving Simulator Environment Based on Data Flow Model

Asahi Aono* and Kenya SATO*

(Received January 1, 2018)

In recent years, by combining a plurality of information devices and sensor devices, it is possible to perform a pseudo realistic experience on the simulator. As one of such feeling simulators, a driving simulator can be cited. Conventionally, the vehicle model on the simulator was only controlled by the input device, but the system configuration has diversified due to an increase in peripheral devices. In existing research, focus is on reducing data loss and communication delay. Since it is a system configuration with the main process as the main axis, when incorporating new functions into the system, it is necessary to design according to the interface. In this research, I designed a driving simulator using a data flow model that excludes the main process and communication between modules by sending and receiving data files. It showed superiority compared with existing driving simulator. In addition, as a result of measuring the communication delay time of the proposed system, data loss occurred. However, I confirmed that it does not affect the average viewpoint.

Key words : Driving Simulator, Data Flow Model, Inter-Module Communication

キーワード : Driving Simulator, Data Flow Model, Inter-Module Communication

データフローモデルを基盤とした ドライビングシミュレータ構築環境の設計と評価

青野 朝日, 佐藤 健哉

1 はじめに

近年, 複数の情報機器やセンサデバイスを組み合わせることで, シミュレータ上で擬似的な現実体験を行うことが可能である. あらゆる機器を用いたシミュレータが企業フォーラムにおける製品デモやアミューズメントに活用されている. 主な利用例として, ドライビングシミュレータ¹⁾が挙げられる. 従来, 自動車の展示場において, 視覚的な情報と静止状態の車内を実際に触れて車両の情報を得ていた. しかし, VR(Virtual Reality)などの周辺機器の多様化により, 前述した情報に加えて車

両のハンドル・アクセル・ブレーキペダルを操作し, 擬似的に動作状態の車両情報を得ることが可能になった. ここで, 複数の機器を組み合わせたシミュレータ²⁾を構築する際には, 以下の問題が発生する.

◇ システム構成の複雑化

擬似的な現実体験, あらゆる場面を想定した多様なシミュレータを構築する際, 追加するモジュールが増加するほどシステム全体の構成が複雑化³⁾する. 例えば, モジュールを組み込むほど指数関数的にソースコードの総量が増加する. また, システム

* Mobility Research Center, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-6297, E-mail : ksato@mail.doshisha.ac.jp

構成の変更や新たに情報機器の追加を行うことは困難である。

◇ インタフェース依存

販売、提供されているドライビングシミュレータを基盤として利用する場合、使用可能な機器やソフトウェアが制限される。提供者があらかじめ用意している選択肢からドライビングシミュレータを構築する必要がある。また、システムにおけるメインプロセスのインタフェースに合わせて設計を行うため、別の環境での動作を想定して作成されたソフトウェアなどをシステムに組み込む際、大幅な仕様変更を伴う。このように、インタフェースに依存した構築環境では、システム構築における自由度が損なわれる。

◇ 処理負荷の増加

処理負荷の原因として、新たな機器、ソフトウェアをシミュレータに組み込むとその分処理量が増加する⁴⁾。また、Google社が自動で3Dマップを作成するソフトウェア⁵⁾を開発するなど、今後大きな処理負荷が予想される。処理負荷の問題を解消するためには、計算機の処理能力向上及び、分散処理環境⁶⁾へ遷移する必要がある。

以上から、システムの複雑性と処理負荷の増加を解消し、急速に進歩する技術に対して柔軟に対応可能なシミュレータ構築環境を考察する。通信方法にデータフローモデルを利用し、その有用性を評価する。

本研究の目的は、自動車に関する展示会、フォーラムで擬似的に運転を体験することを主体とし、通信遅延時間やデータの欠損を許容可能な環境に最適な、ドライビングシミュレータ構築環境の設計、評価を行うことである。既存の環境は、メインプロセスが存在するため、メインプロセスのインタフェースに合わせたシステム設計が必要である。提案する環境は、インタフェースに対する考慮を最小限に抑えるため、メインプロセスを排除し、独立化したモジュール同士のデータファイル送受信のみでシステム全体を構成する。

2 問題提起

2.1 MOVIC-T4

平田らの研究⁷⁾⁸⁾では、都市内地下道路の走行安全性分析を様々な視点から行うために、体感加速度模擬を行う小型2軸 Motion-base、走行画面表示にヘッドマウントディスプレイを組み込んだ、新しいコンセプトのドライビングシミュレータの設計・開発する。さらに、MOVIC-T4のパフォーマンスを評価する。システム構成の特徴として、Motion-baseを主軸としたソフトウェア設計である。自車の走行状態データを扱い、Motion-base制御プログラムでハードウェアであるモーションベースの制御を行う。また、走行状態や道路データベースと視界計算プログラムを接続し、ヘッドマウントディスプレイへ出力している。

2.2 UC-win/Road

株式会社フォーラムエイトが開発したドライビングシミュレータ⁹⁾は、提供されたテクスチャから地形ファイルを作成し、道路定義を行い、道路生成と交通流を設定した上でシミュレータとしての基盤準備が完了する。そして、提供された天候やモデルなどの中から必要な要素を選択し、実行することでシミュレータの動作を開始する。動作可能OSはWindowsのみであり、VRなどの機器のプラグインが別途提供されている。

運転者が様々な状況に対してどのような影響を与えるかといった検証を目的として作成されている。鉄道やバイクといった代表的なシチュエーションを想定した機器は提供されているが、任意の機器をシステムに組み込むことはできない。また、リアルタイム性を保持し、最適な運転シミュレーションを行うためにシステム構成にメインプロセスが存在し、メインプロセス内でシステムの構造が最適化されている。

シミュレータ使用者は、開発元より与えられたインタフェースの範囲でドライビングシミュレータの設計を行うことが可能である。

2.3 既存システムの問題点

既存システムに共通する点は、運転者に違和感を与えないために遅延時間の削減、データの整合性を保つシステム設計を行なっている。構成モジュール同士が互いに認識しているため、システム内の一部のエラーがシステム全体の停止に繋がる。また、ドライビングシミュレータの構成を変更する場合、インタフェースに合わせた変

更，開発元が提供するモジュールの追加のみを行うことが可能で，自由なシステム変更には高い技術力と時間が要求される。

UC-win/Road といった製品としてのシミュレータに関しては，メインシステムがブラックボックス化され，シミュレータのコース作成や 3D モデル変更といったメインシステムに直接触れない変更を行う。しかし，運転のシチュエーションだけでなく，ハンドルなどの制御機器，出力装置，ソフトウェアなどがあらゆる形状，方式を伴って開発されている。

これらのことから，開発元から提供されたシステム構成に捉われず，シミュレータ利用者が使用したい機器，ソフトウェアを任意に組み込むことが可能な環境が必要である。

3 提案システム

3.1 概要

提案システムでは，ドライビングシミュレータを構成するモジュールを独立化し，モジュール間のデータ受け渡しによってシステム全体を構成する。シミュレーションにおいて最も重要な要素をデータと捉え，データ通信に重点を置いたシステム環境をデータフローモデルとする。データの整合性を保ち，遅延の少ないシステム環境を提供する既存システムが抱える，システムの複雑化，インタフェース依存，処理負荷の増加に着目し，これらの問題点を解決する。

提案システムのシステム概念図を Fig.1 に示す。提案システムを説明するために，既存システムと提案システムをロボットに置き換え，提案システムの特徴を明示する。既存システムは，ロボットの本体であるシステム基盤に合わせて，部品を設計する必要がある。また，開発元より提供された部品を組み込む。一方で，提案システムは，部品が個々に動作することを前提とし，他の処理の影響を受けない構造をとる。部品同士がデータを送受信することで擬似的に一体のロボットとして扱う。図に示した接合部は，部品同士を固定することを表す。

様々な機器やソフトウェアを柔軟にシステムへ組み込み，インタフェースに捉われないことなく，システム構成を自由に変更可能な柔軟性を持った環境の提案と評価を行う。

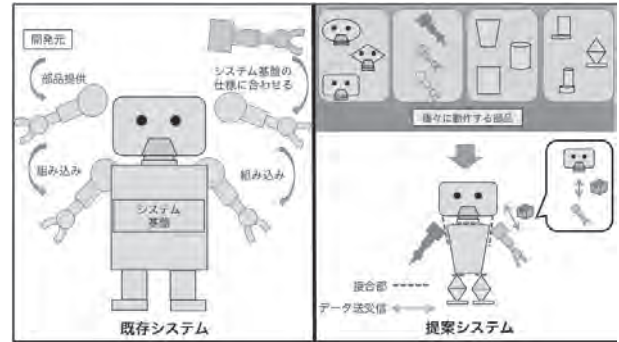


Fig. 1. 提案システムの概念図。

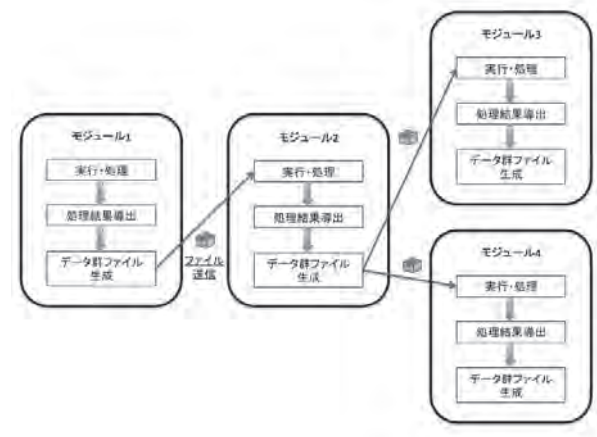


Fig. 2. データフローモデル。

3.2 データフローモデル

3.2.1 データフローモデル

本研究におけるデータフローモデルは，モジュール間のデータ送受信に重点を置いたモデルである。システムを構成する全てのモジュールは，独立化し，プロセスの処理タイミングや順序を考慮しない。この条件の元で，データを送受信する動作を一定の間隔で繰り返すことにより，入力から出力までの一連の処理を実現する。データフローモデルを Fig.2 に示す。また，各モジュールは，以下の手順で動作する。

1. 実行開始
2. 処理 (初期値及び受信データファイルを利用)
3. 処理結果導出 (初期値及び受信データファイルから処理結果データを取得)
4. データ群ファイル作成 (処理結果データのファイルを作成)

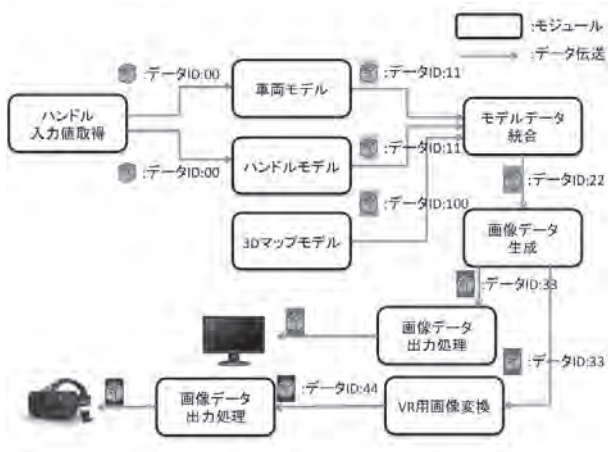


Fig. 3. データ通信例.

5. データ群ファイルを対象モジュールに送信

各モジュールは全て同一タイミングで実行し、上記の手順を一定の間隔で行う。手順2において、受信データが届く前は扱うデータが無く、動作しないため、初期値を設定しておき、動作状態にする。手順3で導出されたデータを手順4で一つのファイルに統合する。データ群ファイルに記載されるのは、データID、各データ変数、データ値である。手順5で、作成したデータ群ファイルを目的のモジュールへ送信する。送信したデータが正しく受信されたか確認することなく、手順1に戻る。受信したモジュールは、必要なデータを読み取り、処理を開始する。

ここで、本システムの実現には、データを識別するデータIDを送信データに添付するか、モジュール間の通信経路を確保する手法が必要である。実装において、データIDを振り分ける仕組みを利用し、データフローモデルを実現する。

3.2.2 データ通信例

データフローモデルを利用した、データ通信の例をFig.3に示す。ハンドル機器よりハンドル角を取得し、データIDを添付して、データファイルを車両モデル、ハンドルモデルに送信する。受信データを利用してモデルデータを生成し、新たなデータIDを添付して、モデル統合モジュールへ送信する。受信したモデルを同一環境に配置し、画像生成モジュールへ送信する。生成した画像データを別々の方法で出力するため、異なる出力処理モジュールで処理を行い、各機器へ出力する。

モジュール同士を直接接続せずに独立化し、送信側モ

ジュールは、送信データファイルとデータIDを対象モジュールへ送信する。送信タイミングはシステム内の他の要素に関わらず、モジュール内のプログラムで指定した送信間隔で送信し続ける。モジュールを同時に実行することで、各モジュールは任意のタイミングでデータを取得し、処理結果データを送信するのみであるが、システム全体の視点で見ると、入力から出力にかけてデータが変化し、一方通行で伝達されていく。

3.3 問題点へのアプローチ

3.3.1 システム構成の複雑化

本提案システムにおけるデータフローモデルは、システムを構成するプログラムを細分化し、モジュール単位で管理する。設計を行う際、モジュールの認識する必要がある要素は、送受信データの形式及び変数名と型である。記述言語、動作環境に捉われず必要なデータを取得し、モジュール単体で動作する。既存シミュレータに存在するメインプロセスを排除することで、新たなソフトウェアや機器をシステムに組み込む際に、変更する箇所が減少する。提案システムの構造として、データを伝送していくのみなので、システム実行開始から終了まで一方通行である。

このようにデータに重点を置き、モジュール同士の関わりを制限することでシステム構造の複雑性を取り除くことが可能である。

3.3.2 インタフェース依存

システムに対して新たにモジュールを組み込む場合、データ送信部分のコードを変更するとシステムの一部として扱うことが可能である。メインとなるモジュールがなく、モジュールが独立しているため、システムのインタフェースがほとんど存在しない。受信データファイルの形式を使用可能であればよい。インタフェースに依存しない利点として、導入モジュールの記述言語、動作環境を自由に選択できる。外部が提供しているソフトウェアをほとんどそのままの状態ドライビングシミュレータに組み込むことが可能となる。

3.3.3 処理負荷の増加

システムを構成するモジュール数を増やすと、処理するプロセスが増加し、負荷がかかる。負荷を減少する方法として、計算機の処理性能を向上したり、計算機を複数台利用して分散処理などがある。本提案手法のデータフローモデルにおいては、分散処理を行うことで処理負

荷を低減する。モジュール同士が独立で存在し、データバスに対してデータを送受信するため、あらかじめ他の計算機をデータバスへ接続可能状態にしておく、分散処理を行うことが可能である。

しかし、処理負荷の低減は可能であるが、インターネット接続を行っているため、回線に依存した通信遅延時間が発生する。

4 実装

4.1 実装環境

本研究では、表 4.1 に示す環境でシステム構築を行う。データフローモデルにおけるデータの分類を実現するために、ミドルウェアである ROS(Robot Operating System)¹⁰⁾ を導入し、パラメータサーバを活用する。今回実装するモジュールは全て ROS 上で動作する。

また、実装に使用した言語は表 4.2 であり、複数モジュールが動作する ROS とシミュレータに関しては、C++を基礎とし、車両モデルなどの 3D モデルを制御するモジュールは python で記述している。入出力機器の処理モジュールに関しては、C++で実装を行った。

4.2 ROS

ROS¹¹⁾ は、OSRF(Open Source Robotics Foundation) が開発・メンテナンスしているロボット用 OS である。ROS 通信には返答を待たない topic と返答を待つ service の通信方法がある。この 2 つの通信方法は併用することが可能である。パラメータサーバを利用する通信方法は topic に該当し、モジュール間をトピックと呼ばれるデータを分類し、系統ごとに作成される論理チャネルのデータバスで接続し、発信側モジュールがトピック上にメッセージを発行し、受信側モジュールが、このメッセージを受信することにより通信を行う。

メッセージはトピックへ情報を流すためのデータ群である。標準的なメッセージは ROS で定義されているが、ユーザー固有のメッセージ形式にも対応している。パラメータサーバを介してメッセージの通信を行う為、1 対多の通信を実現することが可能である。ただし、送信側ノードがメッセージを送信した後、受信側ノードからの受信確認が無い非同期通信となる。また、モジュールは、Linux におけるプロセスに相当し、モジュール毎の独立したメモリ空間内でプログラムが動作する。

それぞれ割り当てられたメモリ空間で処理を行う為、

Table 1. 実装環境.

構成要素	機種	OS/Software	Version
サーバ	ASUS X550V	Ubuntu ROS Gazebo	14.04 Indigo 6.00
入力装置	Driving Force GT	-	-
出力装置	Oculus Rift 液晶ディスプレイ	-	Developer Kit 2 -
センサデバイス	Leap Motion	Leap Motion SDK	2.3.1

Table 2. 実装環境.

構成要素	プログラミング言語
サーバ (ROS)	C++, python
シミュレータ	C++, python
3D モデル	C++, python
入力装置, 出力装置	C++
センサデバイス	C++

同時に複数のモジュールを動作させることが可能である。

4.3 設計

4.3.1 パラメータサーバによるデータ分類

本提案システムでは、モジュール同士が認識することがなく、データバスへデータを送信及び受信する。受信側が受信したいデータを認識する仕組みが必要であるため、ROS のパラメータサーバを利用する。

あらかじめ、実装システムで扱うデータの変数名をメッセージ名としてパラメータサーバに登録することで、ピアアドレスが自動割り当てされ、通信経路を確保する。グローバル変数のような扱いをすることが可能である。パラメータサーバの実装例を Fig.4 に示す。

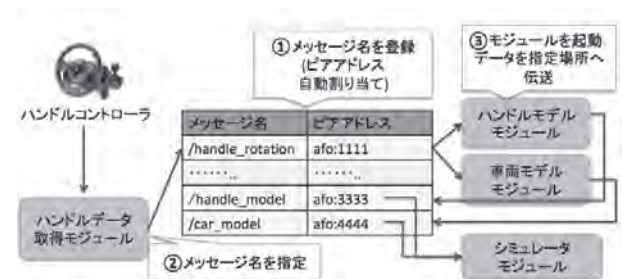


Fig. 4. パラメータサーバ.

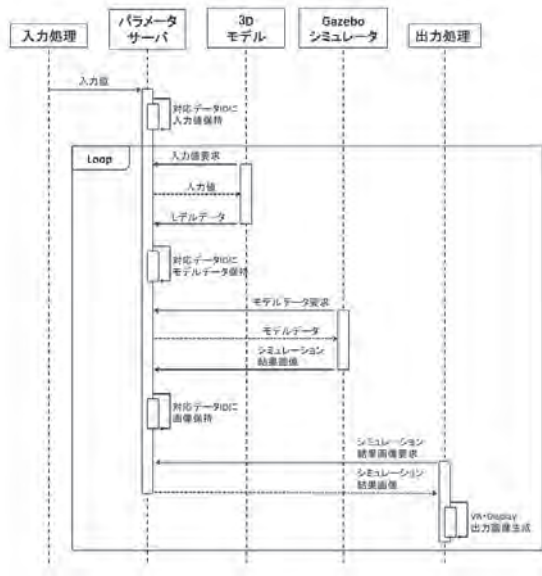


Fig. 5. システムの動作手順.

4.3.2 構成モジュール

本提案システムでは、以下の構成で行う。またシステムの動作手順を Fig.5 に示す。

◇ シミュレータ

ハンドル、運転者の手形状、車両モデル、コースモデルを 3D モデルによって表現する。各モデルを生成するモジュールから送信されているモデルデータを読み込み、Gazebo シミュレータ上に配置する。

◇ 手形状、身体動作認識

VR ヘッドセットをドライビングシミュレータに利用するため、自分の手を見ることができない。現実における運転に近い体験の実現、システムを構成するモジュール数を増加させる目的から、小型のセンサデバイスを VR ヘッドセットに取り付ける。そして、シミュレータ上で擬似的な手を表現する¹²⁾。また、視点情報を利用するために、加速度センサを導入する。形状取得センサデータと加速度センサデータの 2 種類のデータを 3D モデルを生成するモジュールが受け取る。

◇ 入力データ取得

ハンドルとアクセル・ブレーキペダルを利用し、シミュレータ上の車両モデルを操作する。入力機器によって得られたデータは、車両モデルを処理

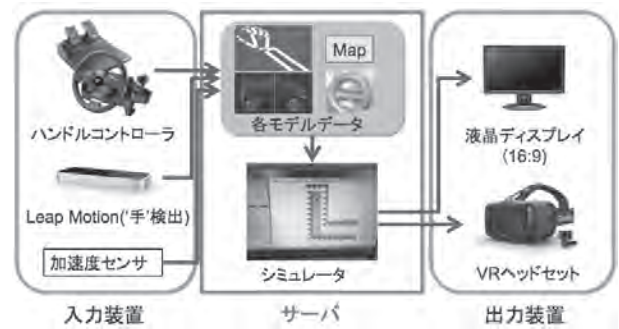


Fig. 6. ドライビングシミュレータの構成.



Fig. 7. ドライビングシミュレータの動作風景.

するプロセスが受信を行う。車両モデルは複数のモジュールで構成され、車体と車輪は独立している。

◇ ディスプレイ出力

シミュレータによって生成された画像データを 30fps¹³⁾ でデータバスへ送信する。画像データをディスプレイ出力モジュールと VR ヘッドセット出力モジュールが受信する。VR ヘッドセット出力モジュールでは、視覚的な立体感を生み出すために、同一画像を横に 2 毎並べ、一枚の画像として VR ヘッドセットへ出力する。

4.4 プロトタイプ実装

Fig.6 に、実装したドライビングシミュレータのシステム構成を示す。また、Fig.7 に、ドライビングシミュレータの動作風景を示す。

5 評価

5.1 評価方法

本研究における評価は、2 種類行う。1 つ目の評価として、実装システムの構成モジュール数及び、データ量における通信遅延時間を測定し、それらがシステムに与え

る影響について評価した。実装システムのモジュールは全て動作状態とし、システムを構成するモジュール数を増加させた。モジュール数を増加させると比例してデータ量も増加するが、データ量に着目して評価を行うために数値データ、画像データの2種類で通信遅延時間の測定を行った。

2つ目の評価として、既存システムとの構造比較を行った。機器をシステムへ組み込む際に考慮する必要がある要素、通信遅延時間の原因、データの整合性について違いを示した。

5.2 通信遅延時間

5.2.1 数値データ

センサデバイスから数値データを取得し、取得データを利用するモジュールを1-100まで10ごとに増加させた。送信データの送信を開始し、受信モジュールがデータを取得するまでの時間を通信遅延時間とし、測定を行った。増加モジュール数における通信遅延時間をFig.8に示す。モジュール数が増加するほど、最大遅延時間が長くなる結果となった。送信データは全て受信データに届き、通信遅延時間は増加したものの、欠損データは見られなかった。シミュレータ使用時には、モジュール数増加前と変わらない動作状況であった。

5.2.2 画像データ

シミュレータから生成された画像データを取得し、取得データを利用するモジュールを1-100まで10ごとに増加させた。送信データの送信を開始し、受信モジュールがデータを取得するまでの時間を通信遅延時間とし、測定を行った。増加モジュール数における通信遅延時間をFig.9に示す。モジュール数が増加すると、最大遅延時間が増加する結果となった。また、モジュール数が50を超えると欠損データが発生し、通信遅延時間がかなり長くなるデータが発生した。

サンプル取得数が100である為、50モジュールを超えてもデータの欠損が見られないパターンも存在した。シミュレータ使用時には、モジュール数増加前と変わらない動作状況であった。

5.3 既存システムとの比較

システムを構成するモジュールを変更する際、設計時に考慮する必要がある要素を比較した。既存システムはUC-winRoad、MOVIC-T4を示しており、メインプロセスが存在するので、メインプロセスのインタフェース

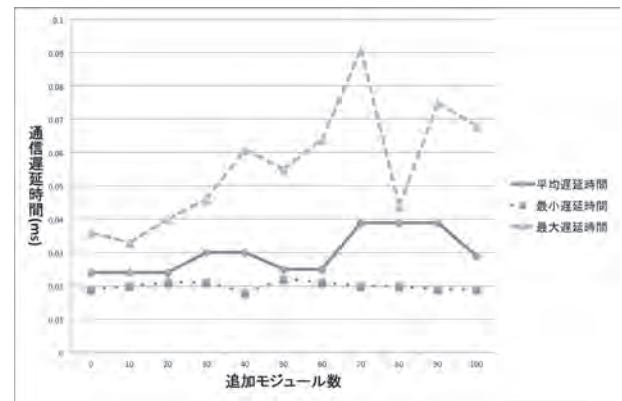


Fig. 8. 数値データの評価結果.

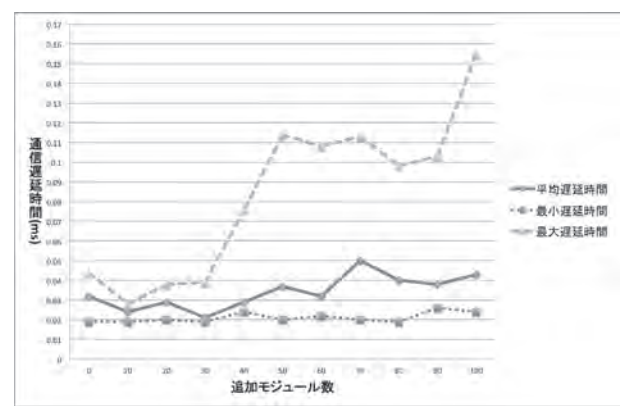


Fig. 9. 画像データの評価結果.

に合わせて設計を行う必要があった。一方、提案システムは、独立したモジュールを動作させ、メインプロセスを持たない。以上の構造を基本にして着目した。既存システムは、通信遅延やデータ欠損を無くすため、膨大な処理、実行順序を管理し、複雑な構造をとっている。仕様書、参考文献より変更の必要な箇所の調査を行った。また、提案システムは実装したプロトタイプを元とするため、ROSの動作環境下での評価結果である。

また、通信遅延の原因とデータの整合性について評価を行った。既存システムは、メインプロセスで全ての処理を管理し、運転が運転者に与える影響といった実験を行うことを目的として構築されたドライビングシミュレータであった。一方で、提案システムは、無造作にモジュールを実行して、パラメータサーバにてデータ群をメッセージとして保持し、受信モジュールが実行タイミングでメッセージを取得する。メッセージの受信結果を送信側は得ることが出来ないため、モジュール間を非同期通信で繋ぐ環境であった。表5.1に既存システムと提

Table 3. 既存システムと提案システムの比較.

	既存システム	提案システム
モジュール変更時 考慮要素	動作環境 開発言語 システム構成 実行順序 データ形式	データファイル形式
通信遅延の原因	処理量	処理量, 動作モジュール数
データ整合性	○	×

案システムの比較結果を示す。

6 考察

6.1 通信遅延時間に関する考察

数値データ、画像データ共に平均的に見ると、モジュール数の増加は通信遅延時間に影響していなかった。さらに、データ量が増えなくても平均遅延時間に変化は見られなかった。モジュール数によって通信遅延時間に差が生まれたのが最大遅延時間である。最大遅延時間がモジュール数によって増加した原因について考察する。本実装システムは、ROSのパラメータサーバを経由してモジュール間のデータ通信を実現している。送信モジュールより送信されたデータはパラメータサーバに一旦保持される。そのデータを要求する受信モジュールが複数ある時、順番に処理する必要があるため、長い遅延時間が発生する可能性がある。

次に、画像データ通信に発生したデータの欠損原因について考察する。評価の結果、モジュール数が50を超えると受信側モジュールにデータが伝送されていない事象が見られた。Linuxサーバを利用しているため、プロセスは順番に実行され、実行中のプロセス以外は待ち状態となるが、各モジュールにはメモリ空間が割り当てられる。そのため、複数のモジュールを同時に実行可能である。しかし、パラメータサーバから同一メッセージにアクセスしているため、順番待ちが発生していた。既存システムであれば、メインプロセスが存在し、実行順序が定められ、通信遅延を抑えるために最適化された構造をとっている。しかし、提案システムは、無造作に大量のモジュールを動作させるため、実行中に実行時間が経過してしまい、データを取得することなく新たに処理を

開始する場合が発生した。対策として、計算機の処理能力を向上する方法や実行プロセスを一定量に留め、分散環境への遷移を検討する方法がある。

6.2 既存システムとの比較

6.2.1 モジュール変更時の比較

既存システムと提案システムのモジュール変更時における考慮要素について考察する。既存システムを持つメインプロセスは、固有のインタフェースを持つ。全ての処理を管理するため、新たに機器やソフトウェアを組み込む場合は、メインプロセスの動作環境、開発言語、システム全体の構成を考慮する必要がある。また、システム全体としての処理を最適化するため、実行順序が定められている。無造作に実行せず、動作手順を定めてシミュレーションを行うため、データの整合性を保つことが保証される。ただし、一箇所でエラーが発生すると、全体が動作不可となる。

一方、提案システムは、独立で動作するモジュール間をパラメータサーバを経由して、非同期通信を行うため、モジュールのデータ送受信部にてデータを読み込むことが可能であれば良い。データファイルさえ扱うことが可能であれば、システムに固有のインタフェースが存在しないため、異なる環境での使用を想定して作成された機器、ソフトウェアを使用することができる。

6.2.2 通信遅延とデータ整合性

既存システムは、マルチスレッドであるが、メインプロセスによってシステム動作を管理している。そのため、システム全体としての処理量が増加するほど通信遅延時間も増加する。また、実行順序が定められ、実行モジュール間でデータ通信を行う場合は同期通信を行っている。データの整合性が保証され、確実に入力値を出力結果へ反映させる。

一方、提案システムは、モジュールを無造作に一定間隔で動作させている。複数モジュールを独立して同時に実行させるため、メモリ空間を各モジュールへ提供しているが、資源には限りがあるため、一定値の処理量を越えると、通信遅延が増加する。また、データを受信するモジュールは、パラメータサーバに対して同時にアクセスするため、構成モジュール数が増加するほど待ち時間が発生する。待ち時間が経過するとパラメータサーバへのアクセスは行われず、次の動作を開始する。この時、データは伝達されないため、データの整合性は保たれない。そして、モジュール数の増加に伴い、通信遅延時間

が発生する。

6.3 提案システムの特徴

通信遅延時間の評価結果より、実行プロセス数に応じて、データ通信遅延やデータの欠損が発生した。これより、研究活動に使用するシミュレータ、教習所の訓練用シミュレータといったデータの整合性、リアルタイム性が必須である環境には適していない。しかし、システム構成は既存システムと比較して単純な構造である。システムに組み込む機器、ソフトウェアを任意に選択し、自由なシミュレータを作成することが可能である。

提案システムのデータフローモデルが適しているシチュエーションとして、研究展示会、企業フォーラムが挙げられる。ユーザに研究成果や製品の体験してもらうことを第一の目的とし、一定量の遅延やデータの欠損を許容できる環境に適している。乗り物を例に挙げると、形は一つに定まらない。今後、新たな乗り物が開発され、一般社会に普及する可能性もある。本提案システムは、シミュレーションとしての初期段階における最適なシステム構築環境である。

7 おわりに

近年、複数の情報機器やセンサデバイスを組み合わせることにより、シミュレータ上で現実に近い体験を行うことが可能である。このような体感シミュレータとしてドライビングシミュレータが挙げられる。現実環境における自動車やバイクは形状が変化せず、固定化された運転を想定したシミュレーション環境が基本的に提供されている。基礎の入出力の概念が変化しないため、通信遅延の低減やデータの整合性を保持に着眼し、シミュレータとしての品質向上に重点を置いた研究が行われている。品質を向上させるほどシステムの構造が複雑化し、閉鎖的になる。新たな要素をシミュレータに追加する際、システムのインタフェースに合わせた設計をしなければならない。しかし、乗り物の多様化、ヘッドマウントディスプレイといった入出力機器の増加、3D マップを生成するソフトウェアといった様々な機器が研究開発されているため、柔軟にシミュレータの構成を変更可能な環境が必要である。

そこで本研究では、データフローモデルを基盤としたドライビングシミュレータの構築環境を提案した。シミュレーションにおいて最も重要な要素をデータと捉え、

ドライビングシミュレータを構成するモジュールを独立化し、モジュール間のデータ受け渡しによってシステム全体を構成する。モジュールが送受信するデータを識別する方法として、ROSのパラメータサーバを利用した。データにデータIDをピアアドレスとして振り分け、メッセージとして送信モジュールからのデータ群を保持する役割を担う。そして、既存システムとの構築面における評価を行い、本研究の優位性を示した。また、提案手法を用いて実装したプロトタイプシステムの通信遅延時間を測定し、モジュール数及びデータ量がシステムに与える影響に関して評価を行った。

通信遅延やデータの整合性を考慮する場合、既存ドライビングシミュレータの利用が適している。しかし、研究フォーラムや展示会のシミュレータを体験してもらうことが目的で、多少の遅延やデータ漏れを許容できる環境であれば、提案ドライビングシミュレータの利用が適している。

参考文献

- 1) 相原 泉太郎, 野村 亮太, 砂田 哲也, 熊谷 正朗, 江村 超, "ドライビングシミュレータ用仮想環境の構築", 計測自動制御学会東北支部第 197 回研究集会, 資料番号 197-12, 2001
- 2) 山口 大助, 須田 義大, 大貫 正明, 織田 利彦, 石川 裕記, "ユニバーサルドライビングシミュレータの臨場感向上の取り組み", 生産研究, Vol.60, No.4, 2008
- 3) 金刺 宏樹, 鈴木 豊太郎, 松岡 聡. "並列分散システムにおける大規模交通シミュレーションの性能最適化" 研究報告ハイパフォーマンスコピューティング (HPC), Vol. 2015-HPC-148 (28), pp.1-6, 2015
- 4) 福山 大輔, 兵藤 俊輔, 高取 祐介, 狩野 芳郎, 清原 良三, "車載情報機器評価のためのシミュレータ間通信量の削減方式", 情報処理学会研究報告, Vol.2014-MBL-73, No.17, 2014
- 5) 3D マップ 自動 生成. 入手先 <http://s-max.jp/archives/1602802.html> (参照 2017-12-15)
- 6) 濱野 拓人, 小野里 雅彦, 田中 文基, "レスキューロボットとがれきの相互作用を評価可能なリアルタイムシミュレーション環境の構築", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2017(0), 1P2-O03, 2017
- 7) 平田 照満, 山口 晋弘, 屋井 鉄雄, 高川 剛, "小型可動式ドライビングシミュレーションシステム MOVIC-T4 の開発", 土木計画学研究・講演集 No.30, 2004
- 8) 潘 為淵, 箕 捷彦, "ヘッドマウントディスプレイを用いたドライビングシミュレーションの作成", 情報処理学会

第 77 回全国大会, 2ZC-06

- 9) UC-winRoad.
<http://www.forum8.co.jp/product/ucwin/road/ucwin-road-1.htm> (参照 2017-12-15)
- 10) ROS. 入手先;<http://www.ros.org/> (参照 2017-12-15)
- 11) Codd-Downey, R., et al. "From ROS to unity: Leveraging robot and virtual environment middleware for immersive teleoperation." Information and Automation (ICIA), 2014 IEEE International Conference on. IEEE, 2014.
- 12) 盛川 浩志, 太田 文也, 金 相賢, 河合 隆史, "現実空間での身体状況が仮想空間の接触感に与える影響", TVRSJ, Vol.21, No.4, pp.617-625, 2016
- 13) Meehan, M., Insko, B., Whitton, M. Brooks, F.P. "Physiological measures of presence in stressful virtual environments." Acn Transactions on Graphics 21, 645-652 2002.

Iterative Collision Cancellation for Slotted ALOHA with Link Fading

Guanghai SONG,^{*} Shan LU,^{**} and Jun CHENG^{*}

Recently, a graph-based iterative collision cancellation policy is proposed to improve the system throughput of uncoordinated networks with potentially near-infinity number of users. The scheme leverages an irregularly repeated data transmission with an optimized repetition profile that permits the receiver efficiently eliminate the data collisions based on a bipartite graph. In this paper, the scheme is considered in a more practical network with an unknown Rayleigh fading at each link, which means transmission may randomly drops due to fading. An asymptotic analysis of system throughput as well as a transmission strategy optimization is proposed.

Key words : slotted ALOHA, random access, uncoordinated network, coding

1. Introduction

Along with the development of auto-control techniques and emergences of new communication services, such as Internet of Things (IoT) and Machine-to-Machine (M2M) communications, random access becomes an appealing technique for the future wireless communication systems. A main feature is that a significantly large number of users coexist in a system who have the need for information exchanging, so that it is a great waste of resources to build a centralized control to coordinate the user transmission. Therefore, in this case users are permitted to transmit messages according to its own policy without a central control. Collision and mutual interference become the main problems and our objective is to develop efficient transmission strategies to deal with these problem and improve the system throughput.

Conventional solutions for random access problem should be back to the slotted ALOHA scheme¹⁾, where the total available transmission time of the K -user communication system is split into time slots with equal durations, and at each time slot, users attempt to transmit a burst of message referred to as a packet with probability p . A feedback followed by a retransmission mechanism is required if a collision occurred. However, the maximum throughput of this scheme as

the number of users approaches infinity is $1/e \approx 0.37$.

As an improvement of slotted ALOHA, a repeated transmission with a graph-based iterative interference cancellation scheme is proposed in²⁾, where users randomly and repeatedly transmit their message at several slots and the receiver could iteratively cancelate the interference on a bipartite graph based on the observations of M time slots. This scheme significantly improves the throughput of slotted ALOHA and with the assumption of ideal single-link connections, the successful probability of multi-user decoding could approach 1 so that the ARQ feedback mechanism is not required. The repetition coded transmission is further extended to a general parity check coded transmission in³⁾ for an energy constraint system. The authors in⁴⁾ strictly prove that using the density evolution theory, the maximum achievable asymptotic throughput as the number of users approaches infinity is 1, which could be achieved by simple irregularly repeated transmission. However, all of the above works are with the assumption of an error-free single-link transmission.

In this paper, we consider a more practical network with single-link errors, that is, each link may face an unknown Rayleigh fading so that transmission may randomly drops at each slot even without collision. We still consider the irregularly repeated transmission strategy, while at the receiver side, a more sophisticated

^{*} Department of Intelligent Information Engineering and Sciences
Doshisha University, gsong2017@gmail.com, jcheng@ieee.org

^{**} Department of Electrical, Electronic, and Computer Engineering
Gifu University, slu@ieee.org

interference cancellation based on the fading gain is proposed to improve the throughput efficiency. A convex optimization method is proposed to optimize the degree distribution of irregular repetition. We show that even though there is a constant error probability due to the link fading, with the proposed interference cancellation scheme system throughput could be improved.

2. System Model

2.1 Transmission

Consider a multi-user communication system with K users transmitting messages to a central receiver. At the beginning, we assume that each user has one packet to be transmitted. Following the basic idea of slotted ALOHA scheme, the total communication time available is split into M time slots and each packet is repeatedly transmitted in several time slots. There is no coordination between the users, and each user independently uses its own policy to determine which time slots to be used. The number of repetitions for the packet of each user is determined randomly according to the same distribution $L(x) = \sum_{i=1}^N L_i x^i$, where L_i is the probability of the repetition number being i and N is a maximum possible repetition number of the transmission strategy. Moreover, the time slots used by each user are selected randomly with a uniform distribution. We assume that each transmission experiences a random Rayleigh fading, which is unknown at the transmitter but perfectly known at the receiver. We further assume that a user identity is contained in the packet so that the receiver knows its origin after recovery of the packet.

It is convenient to think of the transmission using a bipartite graph with two sets of nodes (V, C) and an edge set E in Fig. 1, where $V = \{v_1, v_2, \dots, v_K\}$ denotes the set of users and $C = \{c_1, \dots, c_M\}$ denotes the set of time slots. An edge $e_{k,j} \in E$ is placed between v_k and c_j if user k transmitted its packet in the j -th slot. In Fig. 1, variable (circle) node v_k is associated to a message packet x_k that needs to be transmitted by user k . We assume that each packet has the same power and is protected by the same channel code with encoding rate R . In this paper, we assume an ideal channel code is employed for each packet. At the receiver, a channel decoding with error correction is needed for

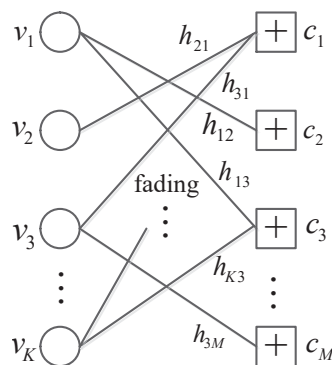


Fig. 1. A bipartite graph representation of a K -user random access with irregularly repeated transmission. A circle node is referred to as a variable node and a square node is referred to as a sum node.

the recovery of the packet. Sum (square) node c_j is associated to a received signal y_j during time slot j with $y_j = \sum_{k:e_{k,j} \in E} h_{k,j} x_k + z_j$ being a superposition of the simultaneously transmitted packets in the time slot. Here $h_{k,j}$ is the channel fading factor when user k transmits at time slot j and z_j is a Gaussian noise. In this paper, we assume that the channel fading factors of two different transmissions are mutual independent and obey Rayleigh distribution and remains during the transmission of each packet. Moreover, the noise power is assumed to be constant during the whole communication process.

As K and M approach infinity, we know that the asymptotic variable node degree distribution from the edge perspective is $\lambda(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i x^{i-1}$ with $\lambda(x) = \frac{L'(x)}{L'(1)}$, and the asymptotic sum node degree distribution is Poisson⁴⁾ with $\rho(x) = e^{-\eta L'(1)(1-x)}$, where $\eta = \frac{K}{M}$ is the overload or efficiency of the system.

2.2 Decoding

Following works²⁾ and⁴⁾, an iterative message-passing decoding on bipartite graph could be employed to gradually cancelate the interference and recover each user's packet.

The decoding includes variable and sum node processing and their message exchanging. Specifically, at each iteration, each sum node performs a decoding based on the incoming message from variable nodes and sends an outgoing message to each of the variable node who has an edge connection with it. So that each variable node could update its output. The message is

either an erasure or a decoded message for the associated packet.

The sum node processing could be specified respectively for the following three cases.

Case 1: If there is only one erased incoming message from the neighbouring variable nodes, we can subtract the recovered packets from the receive signal at the sum node and perform a single-user decoding for the residual user. The successful probability for this decoding is $P_a = \Pr(R < C(|h|^2\gamma))$, where $|h| \sim \text{Rayleigh}(\sigma)$ is the corresponding channel gain; γ is the signal-to-noise ratio (SNR); and $C(x) = \log(1+x)$ is the capacity limit of the employed encoding scheme with SNR x . If the decoding is successful the sum node will output the decoded packet to the associate variable node, otherwise, it will declare an erasure.

Case 2: If there are two erased incoming message from the neighbouring variable nodes. We can subtract the recovered packets from the receive signal at the sum node and perform a single-user decoding for one of the residual users by regarding the other one as noise. The successful probability for each of the decoding is $P_b = \Pr\left(R < C\left(\frac{|h|^2\gamma}{|h'|^2\gamma+1}\right)\right)$, where h and h' are two independent channel gains of the two residual users. If any of the decodings is successful the sum node will output the decoded packet to the associate variable node, otherwise, it will declare an erasure.

Case 3: If there are more than two erased incoming message, the sum node will declare an erasure to each of its neighbouring variable node.

At a variable node, the outgoing message is an erasure if all the incoming message are erasures, otherwise, a packet message will be output.

3. Density Evolution and Degree Optimization

Each user randomly selects the time slots and repeatedly transmits its packet based on the predetermined probability distribution $L(x)$. The decoding performance is determined by the actually formulated bipartite graph during each communication realization. As K and M approach infinity, this bipartite graph becomes tree-like in large probability. In this case, density evolution is applied to determine an average decoding performance of all the tree-like bipartite graph realizations by tracking the erasure probability during the message passing⁵⁾.

Let p_ℓ and q_ℓ be the message erasure probabilities of the variable and sum node output at each edge at iteration ℓ , we have

$$p_\ell = \lambda(q_\ell) \quad (1)$$

$$q_{\ell+1} = 1 - \rho(1 - p_\ell)P_a - p_\ell\rho'(1 - p_\ell)P_b. \quad (2)$$

With the assumption of ideal channel code with link Rayleigh fading, we have

$$\begin{aligned} P_a &= \Pr(R < C(|h|^2\gamma)) \\ &= \Pr(|h|^2 > (e^R - 1)/\gamma) \\ &= e^{-\frac{1-e^R}{2\gamma\sigma^2}} \\ P_b &= \Pr\left(R < C\left(\frac{|h|^2\gamma}{|h'|^2\gamma+1}\right)\right) \\ &= \Pr(|h|^2\gamma/(|h'|^2\gamma+1) > e^R - 1) \\ &= e^{-\frac{1-e^R}{2\gamma\sigma^2} - R}. \end{aligned}$$

It is easy to show that $q_\ell > 1 - P_a$ always holds, which means that there is always a decoding error rate due to fading. For a target error rate ϵ , it requires $\lim_{\ell \rightarrow \infty} q_\ell < \epsilon$, which is equivalent to

$$\begin{aligned} q > 1 - \rho(1 - \lambda(q))P_a - \lambda(q)\rho'(1 - \lambda(q))P_b \\ &= 1 - e^{-\eta L'(1)\lambda(q)} e^{-\frac{1-e^R}{2\gamma\sigma^2}} - \eta L'(1)\lambda(q) e^{-\eta L'(1)\lambda(q)} e^{-\frac{1-e^R}{2\gamma\sigma^2} - R} \\ &= 1 - e^{-\eta L'(1)\lambda(q) + \frac{1-e^R}{2\gamma\sigma^2}} (1 + \eta L'(1)\lambda(q)e^{-R}), \epsilon < q \leq 1. \end{aligned}$$

Therefore, given channel code rate R , the optimal degree distribution that maximum the system efficiency could be obtained by solving

$$\begin{aligned} &\max \eta \\ &\eta L'(1)\lambda(q) - \ln(1 + \eta L'(1)\lambda(q)e^{-R}) < \frac{1 - e^R}{2\gamma\sigma^2} - \ln(1 - q) \\ &\text{for } \epsilon < q \leq 1 \\ &0 \leq \lambda_i \leq 1, i = 1, \dots, N \\ &\lambda(1) = 1 \end{aligned}$$

where $L'(1) = \frac{1}{\int_{x=0}^1 \lambda(x)dx} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \lambda_i/i}$. Letting $\tilde{\lambda}_i = \eta L'(1)\lambda_i, i = 1, \dots, N$ and using $\eta = \eta L'(1) \sum_{i=1}^N \lambda_i/i = \sum_{i=1}^N \tilde{\lambda}_i/i$, the above problem is transformed to

$$\begin{aligned} &\max \sum_{i=1}^N \tilde{\lambda}_i/i \\ &\sum_{i=1}^N \tilde{\lambda}_i q^{i-1} - \ln\left(1 + \sum_{i=1}^N \tilde{\lambda}_i q^{i-1} e^{-R}\right) < \frac{1 - e^R}{2\gamma\sigma^2} - \ln(1 - q) \\ &\text{for } \epsilon < q \leq 1 \\ &\tilde{\lambda} \geq 0, i = 1, \dots, N. \end{aligned}$$

Since both the objective and constraints are convex functions of $\tilde{\lambda}_i$, the above is a convex optimization problem which could be solved easily. Thus, we have the optimal degree distribution with $\lambda(x) = \frac{\tilde{\lambda}(x)}{\int_{x=0}^1 \tilde{\lambda}(x) dx}$.

Note that the target error rate used in degree optimization is the error rate of the message output of a sum node in edge perspective. The real communication error should be the error rate of the decision on a variable node given by

$$P_e = L'(1) \int_{x=0}^{\epsilon} \lambda(x) dx$$

for the designed target error rate ϵ .

4. Numerical Results

In this section, we give some numerical results of degree distributions obtained using our optimization procedure. Moreover, since our analysis and optimization are with the assumption of infinite large of K and M , we simulate the proposed transmission strategy in finite length systems.

Fixing SNR $\gamma = 10$ dB and fading parameter $\sigma = 1$, we give the optimal variable node degree distribution for several cases.

Example 1 ($R = 1, N = 100$) For $R = 1$, we have $P_a = 0.0823$. Fixing the target error rate $\epsilon = 0.2$, we have the optimal variable node degree distribution $\lambda(x) = 0.08429x + 0.31578x^2 + 0.02926x^{10} + 0.20310x^{11} + 0.12944x^{33} + 0.23812x^{99}$, which support the overload of $\eta = 1.2479$ and the communication error rate $P_e = 1.46 \times 10^{-2}$. \square

Let I_A^v and I_E^v be the input and output of variable node processing in the mutual information measure. Using the variable node update function (1), we have the extrinsic information transfer (EXIT) function of variable processing: $I_E^v = 1 - \lambda(1 - I_A^v)$. Similarly, we have the EXIT function of sum node processing $I_E^s = \rho(I_A^s)P_a + (1 - I_A^s)\rho'(I_A^s)P_b$. We plot this two curves in Fig. 2. We see that the EXIT curves of variable node processing and sum node processing match well with an intersection at $I_E^s = 0.8$ due to our setting of target error of $\epsilon = 0.2$.

Example 2 ($R = 0.5, N = 100$) For $R = 0.5$, we have $P_a = 0.0319$. Fixing the target error rate $\epsilon =$

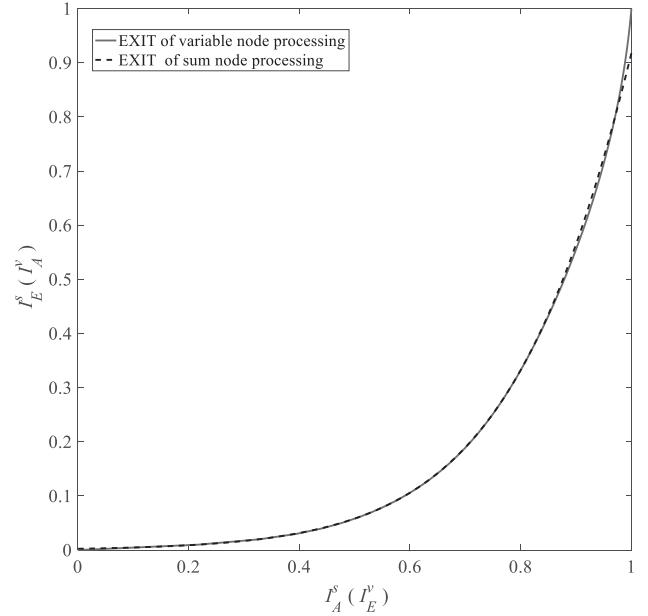


Fig. 2. EXIT curves of variable node processing with degree distribution $\lambda(x) = 0.08429x + 0.31578x^2 + 0.02926x^{10} + 0.20310x^{11} + 0.12944x^{33} + 0.23812x^{99}$ and sum node processing with Poisson distribution $\rho(x) = e^{-7.206(1-x)}$ under SNR $\gamma = 10$ dB and channel code rate $R = 1$.

0.0319, we have the optimal variable node degree distribution $\lambda(x) = 0.0094x^2 + 0.5990x^3 + 0.1620x^{43} + 0.0982x^{44} + 0.1315x^{99}$, which support the overload of $\eta = 0.6061$ and the communication error rate $P_e = 1.606 \times 10^{-6}$. \square

In above examples, we considered large maximum degree N to obtain the limit system throughput. Since the proposed transmission strategy could only be used in a system with $N \leq M$, in the following, we fix $N = 10$ and design degree distributions that could be used in a system with few users.

Example 3 ($R = 1, N = 10$) Fixing the target error rate $\epsilon = 0.2$, we have the optimal variable node degree distribution $\lambda(x) = 0.1451x + 0.4799x^2 + 0.3751x^9$, which support the overload of $\eta = 1.19$ and the communication error rate $P_e = 1.55 \times 10^{-2}$. \square

Example 4 ($R = 0.5, N = 10$) Fixing the target error rate $\epsilon = 0.0319$, we have the optimal variable node degree distribution $\lambda(x) = 0.0153x^2 + 0.9847x^3$ with $\eta = 0.5809$ and the communication error rate $P_e = 1.674 \times 10^{-6}$. \square

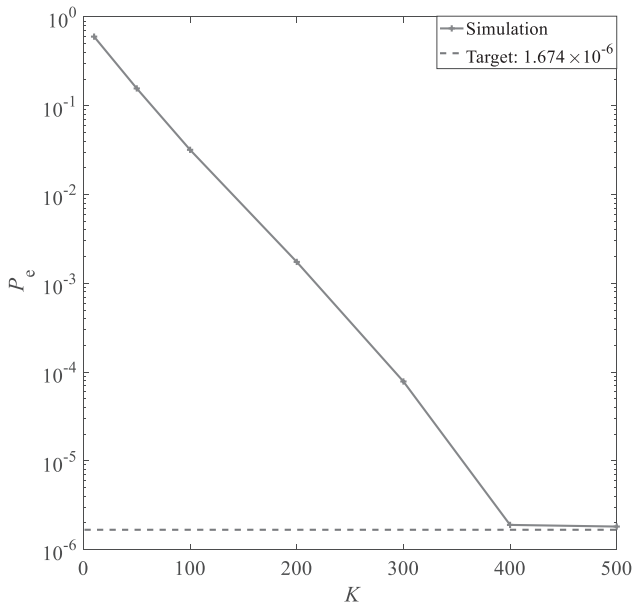


Fig. 3. Error rate simulation of the degree distribution given by Example 4: $\lambda(x) = 0.0153x^2 + 0.9847x^3$ with finite transmission users. The channel SNR is $\gamma = 10$ dB with Rayleigh fading $\sigma = 1$ for each link and channel code rate is $R = 0.5$.

The degree distributions of Examples 1 and 3 could be used in a systems with high throughput and low reliability requirements. On the other hand, degree distributions of Examples 2 and 4 could be used in a systems with low throughput but high reliability requirements. Moreover, comparing Examples 1, 2 and Examples 3, 4, we can see that there is a very small performance, in term of the throughput or error rate, loss due to the use of a smaller maximum repetition number N .

For the transmission strategies corresponding to the degree distributions obtained in Example 4, we give finite-length simulations in Fig. 3 with finite user number K and slot number M . We still consider ideal channel code with code rate $R = 0.5$ as designated in the design. It could be observed that as the considered user number increases, the system error rate converges to the target error rate that predicted based on density evolutions. For $K > 400$, the gap between the simulated error rate and theoretical prediction is very small, which verifies that density evolution is accurate for system performance prediction and design.

5. Conclusion

We considered the graph-based iterative collision cancellation scheme for uncoordinated networks with link fading. We proposed a convex optimization method to obtain the optimal transmission strategy based on density evolution. Finite-length system simulation is provided to verify the proposed optimization.

References

- 1) N. Abramson, "The ALOHA system - another alternative for computer communications," in Proc. 1970 Fall Joint Computer Conf, vol. 37, AFIPS Press, 1970, pp. 281–285.
- 2) G. Liva, "Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA," IEEE Trans. on Commun., vol. 59, no. 2, pp. 477–487, Feb. 2011.
- 3) E. Paolini, G. Liva, and M. Chiani, "Graph-based random access for the collision channel without feedback: capacity bound," in Proc. IEEE Globecom 2011, pp. 1–5.
- 4) K. Narayanan and H. Pfister, "Iterative collision resolution for slotted ALOHA: an optimal uncoordinated transmission polic," in Proc. ISTC2012, pp. 136–139.
- 5) T. J. Richardson and R. L. Urbanke, "The capacity of low-density parity-check codes under message-passing decoding," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 47, no. 2, pp. 599–618, Feb. 2011.

Development of Bicycle Simulator having Ability to control Tilt Angle

Tetsuji YAMAGUCHI,^{*} Akira YAMADA^{*} and Takeshi FUJIWARA^{**}, Ryo-ichi TAKAHASHI^{***}, Tetsuya SHIMADA^{***}, Yu-ki ISHIDA^{***} and Shigeo KANEDA^{***}

(Received April 23, 2018)

Bicycles are healthy and friendly vehicles. The information concerning dangerous points (hazards) on the road is expected for the bicycle safety riding. The authors proposed a method to detect hazards on roads by sensors attached to the bicycle in the conventional study. The conventional approach requires training data for machine learning. The bicycle runs on the dangerous places repeatedly. This is dangerous and it is difficult to collect large amounts of data. To resolve this problems, the bicycle simulator is one of the solutions. A Japanese company has a commercial based bicycle simulator. However, the bicycle body is fixed. The ride feeling is unnatural. This type of the bicycle simulator is not suitable to gather the hazard data. Thus, this paper proposes a bicycle simulator having ability of tilt angle control and running in the 3D virtual space. The built-in bicycle sends the speed and front wheel angle to the control unit. The new tilt angle is calculated by the control unit and the information is sent to the AC servomotor to realize new tilt angle. Simultaneously the 3D view of a virtual town is generated by using the calculated results. By using the rotation center tracking method already proposed by the authors, the steering actions to the left and right can be observed by the system. By the system, dangerous situations can be easily and repeatedly realized and the rider has no danger.

Key words : Bicycle Simulator, Tilt Angle, AC Servo Motor, Running Trajectory, hazards, Bicycle Riding

キーワード : 自転車シミュレータ, 傾き角, ACサーボ, 走行軌跡, ハザード, 自転車操縦

傾きを許容する自転車シミュレータの開発

山口 哲治, 山田 憲, 藤原 武, 高橋 遼一, 島田 哲哉, 石田 雄紀, 金田 重郎

1 はじめに

近年日本では、自転車の普及が進んでいる。自転車はコストが低く、環境にも優しい便利な乗り物である。しかし、普及する弊害として、交通事故が懸念される。事故を減らすためには、自転車に対する危険要素などの分析が不可欠である。

そのため従来研究でも、走行軌跡を取得するためのセ

ンサを取り付けた自転車(以下プローブ自転車と呼ぶ)を実地走行させて、自転車運転に関するハザードマップを作成することなどに取り組んできた¹⁾²⁾。しかし、このような研究は、搭乗者に危険が伴う可能性があること、危険な状況の再現が困難であることなどの問題点を抱えている。

これに対して、ひとつの解決法は、自転車シミュレータの利用である。自転車シミュレータを用いれば、危険

^{*} Faculty of Science and Engineering, Doshisha Univ., Kyoto
E-mail : tyamaguchi@mail.doshisha.ac.jp

^{**} Kyoto Shisaku Corp., Kyoto

^{***} Graduate School of Science and Engineering, Doshisha Univ., Kyoto
E-mail : skaneda@mail.doshisha.ac.jp

な状況や、再現性が低く現実では実験しにくいような状況でも作り出せるため、これを用いる事で社会実験では困難な自転車運転実験を実現できる。

そこで、著者らは、理想的な環境を作成し、走行実験を行うため、自転車シミュレータの開発を行ってきた³⁾。この従来研究では、車体を左右に傾斜させる機能を入れているが、傾斜に対する反力は、バネに依存しており、自然な走行感とは言えなかった。

自転車シミュレータの提案は既に、いくつか知られている。一番商品化が進んでいるのは、小学生等への交通法規教育目的のシミュレータである⁴⁾。しかし、自転車の車体は固定であり、走行感は限定されている。自転車は操舵制御などの特徴的な技術を必要とする乗り物であり、自転車の傾斜は重要と思われる。

それ以外にも、自転車シミュレータに関する報告はある⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。しかし、自転車を傾斜させて制御しようとする試みは、著者らの知る限り、韓国の研究¹⁰⁾のみである。このKAISTの研究は、大がかりなものであり、これを除くと、自転車の物理挙動を再現しようという試みはあまり行われていない。本稿で報告する自転車シミュレータは、簡便なものであり、しかも、著者らの提案による走行軌跡の回転中心¹¹⁾¹³⁾¹²⁾¹⁴⁾を採用して特徴としている。以下、2章では研究背景と研究目的、3章で提案手法、4章で実験と評価、5章で考察、6章で結言を述べる。

2 提案手法

2.1 自転車シミュレータの概要

PC上に仮想の自転車を作成し、それを搭乗者によるシミュレータ装置からの実際の操作を入力として動かす。そして、挙動をシミュレートした結果の軌跡と傾きを搭乗者に視覚と傾き情報としてフィードバックするシステムを提案する(図1)。このシステムを構築すれば、計算に基づく傾きの物理挙動をシミュレーション自転車で表現できると考えた。図2に今回作成したシミュレータの外観を示す。

シミュレータ装置からの操作を入力させるシステムとしては、マイクロコントローラ(Arduino)で舵角や後輪速度などの情報をセンシングし、その結果をコンピュータへシリアル通信を用いて送信する。傾きフィードバックシステムにおいては、工業用のACサーボモータを

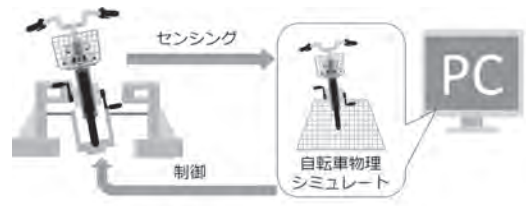


Fig. 1. シミュレータのシステム概要.



Fig. 2. シミュレータの外観.

用いて自転車を直接傾かせることが可能である。サーボモータの制御装置にはインターフェースボードを導入した。これはPCIバスを経由してPCから直接かつ高速にI/Oを操作できる装置である。視覚のフィードバックはプロジェクタを用いてUnityで生成された映像を自転車の前方と左右に配置した3面のスクリーンに投影する形で表現している。概要図を図3に示す。

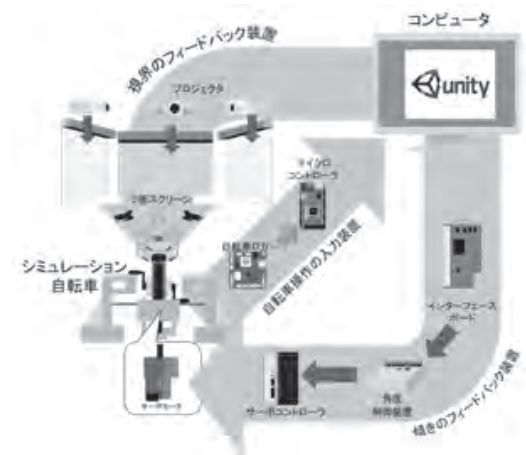


Fig. 3. ハードウェアの構成.

自転車の傾きを任意に設定できるようにするため、シミュレーション自転車の後方部に工業用のサーボモータ

(NXM920A-PS25) を取り付け、ホイールベースを軸の左右 15 度の任意角度に自転車を傾斜させ得る構造とした。取り付けられているサーボモータを図 4 に、その構造を俯瞰視点から記した様子を図 5 に示す。

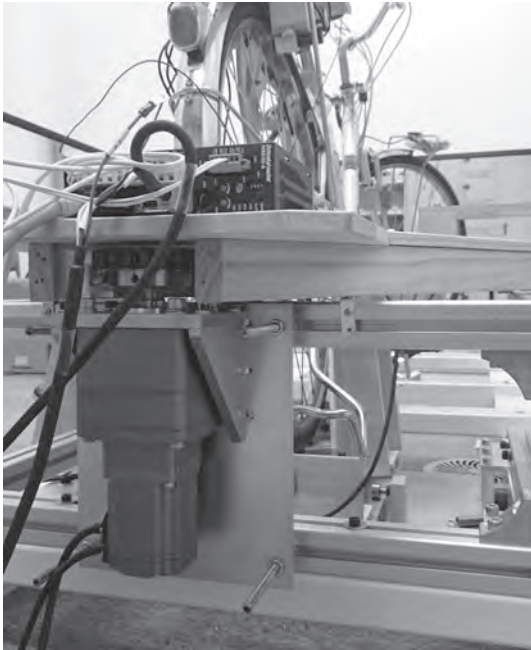


Fig. 4. 自転車後部に設置されたサーボモータ。

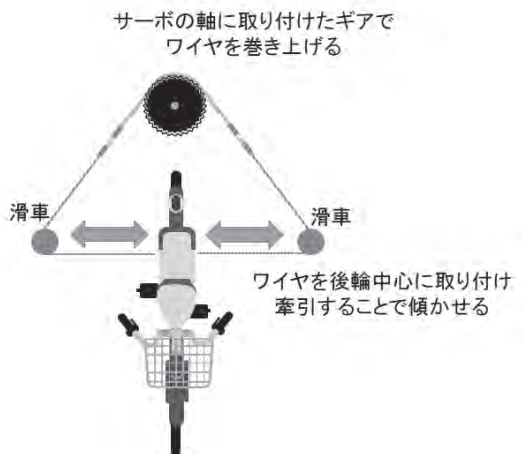


Fig. 5. サーボモータによる傾きフィードバック機構の俯瞰図。

この機構であれば、搭乗者を乗せ自転車を傾かせるのに十分なトルクを確保できる。しかし、サーボモータの回転角度から自転車本体の姿勢を把握することが困難であるという問題を抱えていた。そのため、操作に関しては中間デバイスとして角度制御装置を取り付けることとした (図 6)。このデバイスは外部から入力されたアナロ

グ電圧と自転車軸部に取り付けた姿勢状態を計測する可変抵抗からのアナログ電圧を比較し、回転方向の決定及びモータ制御を行う装置である。



Fig. 6. 角度制御装置。

PC からアナログ電圧を送信する方法としてはインタフェース社の LPC-361116 を使用した。このモジュールは PCI バスを通じて高速な I/O 制御を可能とする装置であり、C# から制御することも可能なため、今回使用している Unity 上でも容易に動作させられることが出来る。

2.2 実装

今回提案するシミュレータでは、舵角と後輪速度の 2 つのパラメータから傾きの値を予測する手法を取った。本シミュレータにおける挙動再現システムの概要図を以下図 7 に示す。

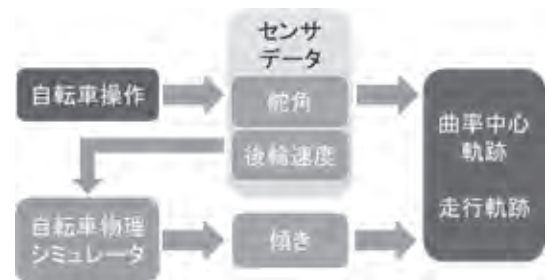


Fig. 7. 自転車挙動再現の概要図。

従来のシミュレータでは、傾きの値に固定値を与えることで、方位角の導出を行っていた。しかし、自転車を運転する時、人はハンドルだけでなく、傾きを利用して操縦している。傾きは自転車挙動にとって重要な要素である。そのため、自転車の物理挙動をより忠実に再現するためには、傾きの要素を固定せず、状況に応じた値を推測する必要がある。

しかし、シミュレータ上で傾き挙動を推測するためには、リアルタイムに取得可能な舵角や後輪速度から、そ

Table 1. 動力学のパラメータ.

名称	記号	単位
方位角・角速度	Φ	rad/s
キャスト角	η	rad
車体傾き角	θ	rad
ハンドル舵角	ϕ	rad
後輪接地点速度	v	m/s
ホイールベース	L	m
曲率半径	r	m
曲率	σ	—
時間	t	sec
質量	m	kg
重力加速度	g	m/s^2

れらを導出しなければならない。今回のシミュレータでは、遠心力と重力のモーメントがつり合っていると仮定することで傾きを推測する手法を採用した。これにより、自転車の挙動把握に利用できる走行軌跡や曲率中心軌跡などをリアルタイムに推測することが可能となると考えた。

2.3 車体傾きの推測

自転車で曲がるとき、人は無意識に車体を傾けている。遠心力と重力を均衡させるように車体を傾けることで自転車はバランスを保って走行できる。すなわち、重力によるモーメントと遠心力によるモーメントがつり合う姿勢を導出することで、理想的な車体傾きを推測することが可能であると考えた。使用するパラメータを図8、表1に示す¹⁰⁾。モーメントの関係図を図9に示す。

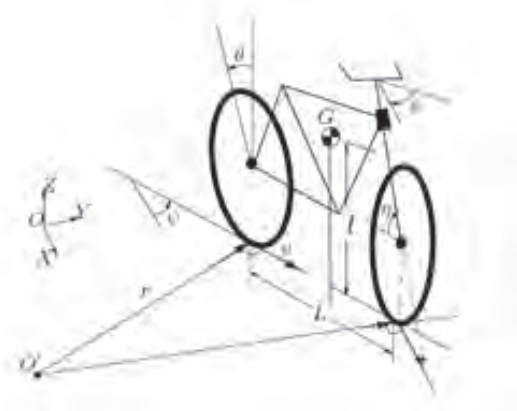


Fig. 8. 動力学のパラメータを自転車図上であらわしたもの (G: 重心).

自転車の質量と重力による力は mg 、遠心力による力

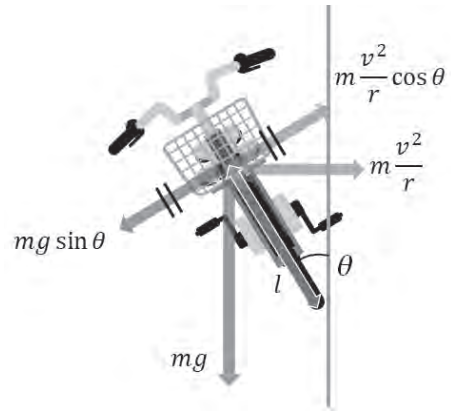


Fig. 9. モーメントの関係図.

は $m \times \frac{v^2}{r}$ で表される。これらの分力を回転モーメントとして考え、つり合いの状態にあるときは式(1)が成り立つ。式(1)から式(2)が求まる。

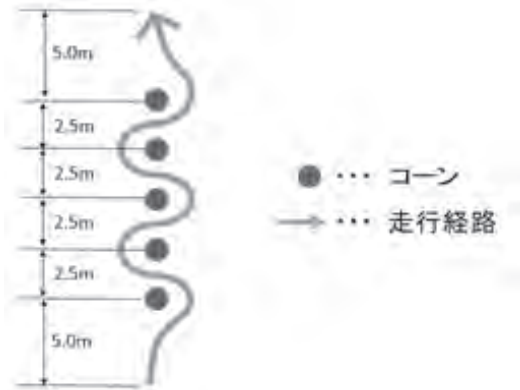


Fig. 10. 実験環境の俯瞰図.

$$mg \sin(\theta) \times l = m \times \frac{v^2}{r} \times \cos(\theta) \times l \quad (1)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{v^2}{gr}\right) \quad (2)$$

上記のように、つり合いの式から傾きを求めることができる。ここで、必要な値 r は、文献¹⁰⁾より、以下のように求める。

$$r = \frac{1}{\sigma} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1}{v} \times \frac{v \sin(\eta)}{L} \times \frac{\tan(\phi)}{\cos(\theta)} \quad (4)$$

ここで、 σ の導出に θ が必要になるため、 θ は1つ前の取得値を利用することにする。1つ前の取得値を利用することは、すなわち約17[ms]のズレが生じるが、こ

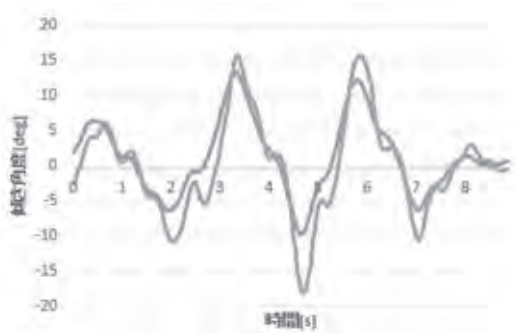


Fig. 11. ジャイロセンサから求めた傾き (青) と、式 (2) により求めた傾き (橙) を比較したものの。



Fig. 12. 自転車モデルの走行している様子 (青：後輪軌跡，緑：前輪軌跡，赤：曲率中心軌跡)。

ここでは近似できるものとする。この近似と式 (2) の妥当性の検証は次節で行う。

また、自転車の方位角の各速度は以下の式により導出する。

$$\Psi = \frac{v \times \sin(\eta)}{L} \times \frac{\tan(\phi)}{\cos(\theta)} \quad (5)$$

今回は式 (1) の角速度を台形積分して方位角を算出する。

$$\psi = \frac{\sin(\eta)}{L} \times \left(\frac{\tan(\theta_2) \times v_2}{\cos(\theta_2)} + \frac{\tan(\theta_1) \times v_1}{\cos(\theta_1)} \right) \times \frac{1}{2} \times dt \quad (6)$$

ここで dt は 1 つ前と現在取得した時間の差である。また、 θ_1 と v_1 は 1 つ前の取得値を表し、 θ_2 と v_2 は現在の取得値を表す。そして従来は考慮していなかった車体の傾き θ は、式 (2) を用いて実装する。

3 傾きを推測する式の検証

前節で述べた傾き導出式 (式 (2)) についての検証を行う。検証は、プローブ自転車をを用いてスラローム走行実

験を行い、被験者毎に下記の 2 通りの方法で傾きを求め、それらを比較する。比較する 2 つの値は、ジャイロセンサから求めた傾きの値と、式 (2) により後輪速度と舵角から推測した傾きの値である。実験環境の俯瞰図を図 10、被験者 2 人の実験データを利用し、それぞれ上記の 2 つの方法で求めた値を比較したものを図 11 に示す。なお、この実験環境については、文献¹²⁾ から引用したものである。



Fig. 13. スラローム走行時のシミュレータ環境の様子。

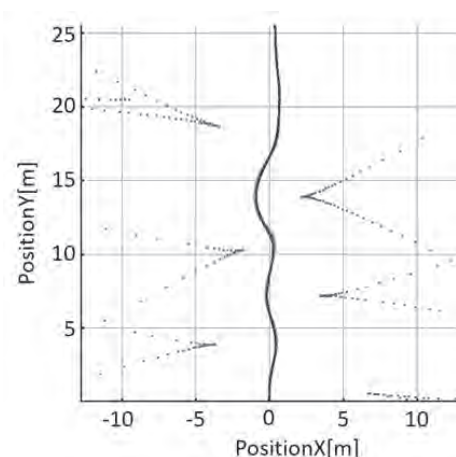


Fig. 14. シミュレータ実験でのスラロームの走行軌跡と曲率中心軌跡 (傾きフィードバック無し) (青：後輪軌跡，緑：前輪軌跡，赤：曲率中心軌跡)。

図 11 を見ると、傾きの値が極大・極小をとるときは、2 つの値の誤差が大きい傾向がみられるが、傾きが微小な範囲では、誤差は小さく、式 (2) により、実際の自転車走行での傾きをほぼ近似できると考えられる。

4 3D 自転車モデルの作成

物理挙動を実装するにあたり、従来では十分に考慮していなかった自転車の寸法について調整を行い、3D の

5 提案シミュレータの走行実験

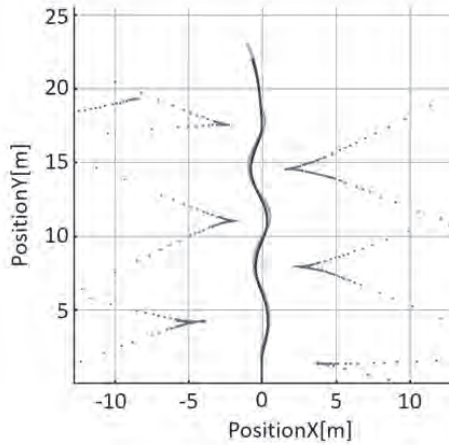


Fig. 15. シミュレータ実験でのスラロームの走行軌跡と曲率中心軌跡(傾きフィードバック有り)(青:後輪軌跡, 緑:前輪軌跡, 赤:曲率中心軌跡).

情報としての可視化を行うため, Unity 上に自転車のモデルを作成した. センサデータの値と計算により求めた自転車の挙動を, このモデルに反映しシミュレートする. 図 12 は, 当モデルを用いて前後輪それぞれの中心点の軌跡と, 曲率中心軌跡を描画している様子である.

シリアル通信を経由して送られてくるシミュレータ装置からのデータは図 7 の手順に従い処理を行った. まず光電センサから後輪速度, ハンドルの回転軸に取り付けたロータリエンコーダから舵角の情報を取得する. そして取得した後輪速度, 舵角から, 式 (2), 式 (6) を用いることで, 車体傾き, 方位角を約 17[ms] 毎, リアルタイムに導出する. これらの値から, 走行軌跡, 曲率中心軌跡の値を導出し, シミュレーション空間での自転車の座標と装置の傾きを反映させる.

プローブ自転車を用いた社会実験のデータとの比較も可能にするため, 計測済の csv ファイルを入力とする機能も作成した. プローブ自転車のデータは, ジャイロセンサを用いて, 実際に走行した場合の傾きやそれらによって求めた軌跡の結果も含まれているため, 両データを比較することで今回取り入れた傾き導出式(式 (2)) の評価などに利用できると考えている. また, シミュレータ自転車による走行データも同フォーマットで csv ファイルに記録しているため, 走行した本人が, 後から客観的に 3D モデルを通して自分の運転を見ることも可能である.

本研究における提案シミュレータについての評価方法を述べる. 本実験では直進や右左折など, 各操作が要求され得る局面に対し, 搭乗者にサーボモータを用いた傾きフィードバックが有る場合と無い場合による走行軌跡と曲率中心軌跡を求め, 比較することとした. 軌跡の比較は文献¹²⁾のように, 意識して旋回していることを示す V 字型の曲率中心軌跡と, 舵角や傾きを微調節していることを示す I 字型の曲率中心軌跡の分布を見ることとする. 実験はスラロームと右折路(直進→右折→直進)の 2 つの環境で行う.

5.1 スラロームコースの実験

まず, スラローム実験コース(図 10)の縮尺や状況をシミュレータ上で再現し, 今回のシステムを用いて曲率中心の分布図の作成を行った. 仮想空間での走行している様子を図 13, 走行した結果の走行軌跡と曲率中心軌跡を図 14(傾きフィードバック無し), 図 15(傾きフィードバック有り)に示す.

図 14, 15 から, 以下のことが分かった.

- 意識して曲がっていることを示す V 字型の曲率中心軌跡が 5 箇所において観測でき, これはコース上のコーンの個数と一致している
- I 字型の曲率中心軌跡は走行中には発生せず, 安定した走行ができていていることを示している

これらの点から, シミュレータ上でのスラロームの走行軌跡は傾きの有無に関わらず社会実験の走行軌跡で観測されているものと類似することがわかる. 社会実験における走行軌跡の例を図 16 に示す.

5.2 曲がり角(直進 → 右折 → 直進)での走行実験

次に右折時の走行をシミュレートしてみた. 右折時のシミュレートを行う理由としては, スラロームでは見られなかった直進と長時間の旋回動作が含まれるためである. 作成した環境の様子を以下の図 17 に, 走行した結果の走行軌跡と曲率中心軌跡を図 18(傾きフィードバック無し), 図 19(傾きフィードバック有り)に示す.

図 18 のように傾きフィードバック無しの時には右折直後の走行には I 字型の曲率中心軌跡の発生が少なく走行状態が安定しているのに対し, 図 19 のように傾きを有効にした時の結果は右折後に I 字型の曲率中心軌跡が複数個でき, 走行状態が不安定になった. 以下に仮想空

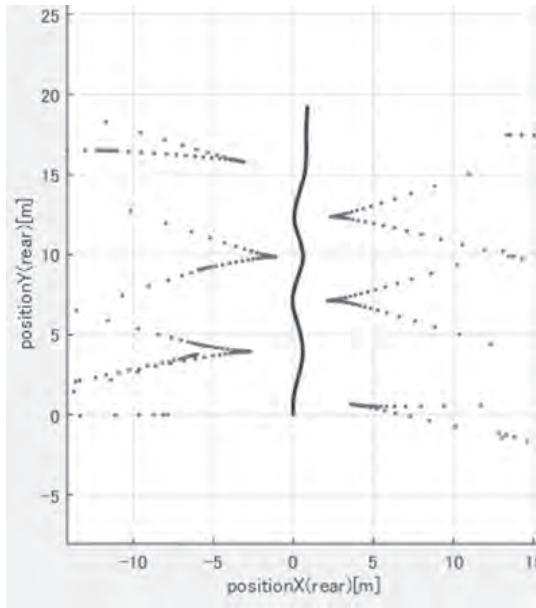


Fig. 16. 実車（プローブ自転車）でのスラロームの走行軌跡と曲率中心軌跡の例（青色：後輪軌跡，赤色：曲率中心）。

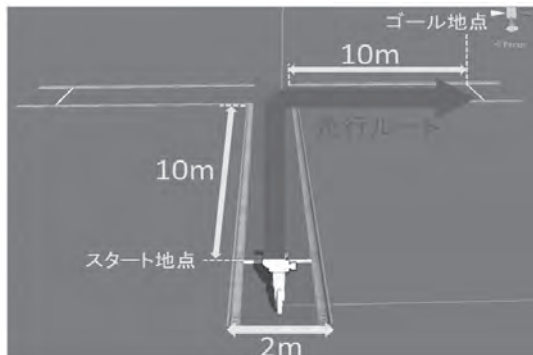


Fig. 17. 走行環境の様子.

間上での車体の傾きを表したグラフを示す（図 20：傾きフィードバック無し，図 21：傾きフィードバック有り）。

図 20, 21 によると，傾きフィードバック有りの場合は，右折直後の 6~7 秒の間に，より大きくハンドルを切り返していることがわかる．図 19 に見られた I 字型の曲率中心軌跡はこの過程で発生したものであることが見てとれる．また，安定後の 8~9 秒の間も，傾きフィードバック無しの場合に対し，傾きフィードバック有りの場合は車体の傾きを 0 度に戻そうと小刻みに調節していることが見て取れる．

実験の結果，スラロームコースにおいては傾きの有無にかかわらずコーンを曲がる直前の位置で曲率中心が密集し，社会実験に類似した曲率中心軌跡が観測された．

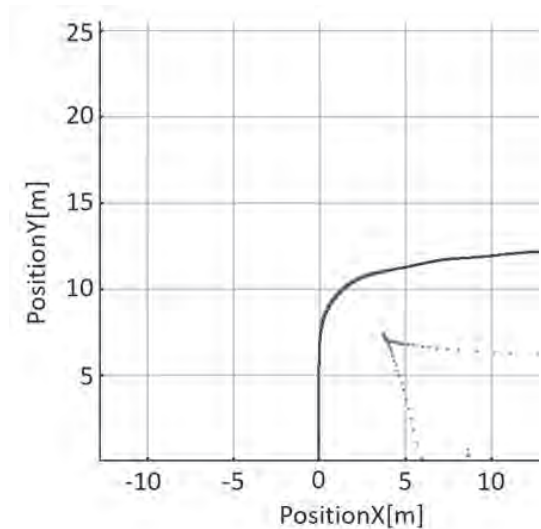


Fig. 18. シミュレータ実験での右折時の走行軌跡と曲率中心軌跡（傾きフィードバック無し）(青：後輪軌跡，緑：前輪軌跡，赤：曲率中心軌跡)。

一方で，直進 → 右折 → 直進のコースを走行した際の挙動は，傾きフィードバックの有無により，走行状態が異なる結果となった．傾きフィードバック有りの場合は，旋回から直進に変わった直後に曲率中心軌跡から見た走行状態が不安定になり，傾き角度を 0 度に持っていきようとして微調整している．傾きフィードバック無しの場合はこのような傾向はみられなかった．

このようになった理由としては，傾きフィードバック無しの場合，走行時の転倒するリスクを自覚できないからだと考えられる．本来自転車は，右折後の直進では車体を直立状態に戻さなければ転倒してしまうが，その感覚が伝わらない傾きフィードバック無しのシミュレータでは，意識して車体を直立状態に持っていきこうとする反射的な動作が働かないのではないかと考察した．右折直後に小刻みな I 字型曲率中心軌跡が出るという傾向は，社会実験で同様の実験を行った際にも観測されるもので，傾きフィードバック有りの場合の方がより忠実に走行状態を表現できていると考えられる．社会実験における右折時の走行軌跡の例を図 22 に示す．

また，前ページのスラロームコースでは傾きフィードバックの有無にかかわらず，車体が安定した走行を行うことができた．その理由としては，直進時間が短く，各方向への旋回が頻繁かつ交互に繰り返されるため，車体が大きく傾かないことが原因ではないかと考察した．

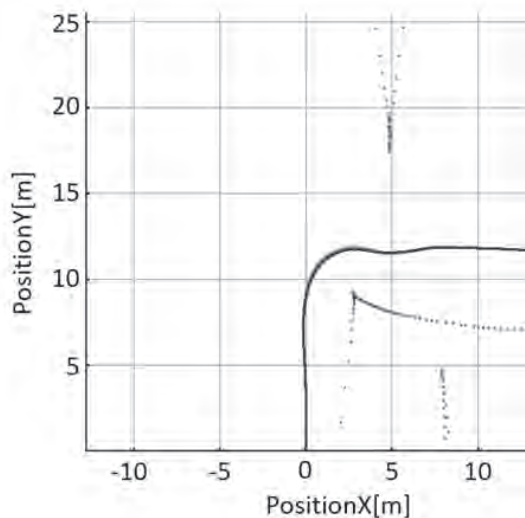


Fig. 19. シミュレータ実験での右折時の走行軌跡と曲率中心軌跡 (傾きフィードバック有り)(青:後輪軌跡, 緑:前輪軌跡, 赤:曲率中心軌跡).

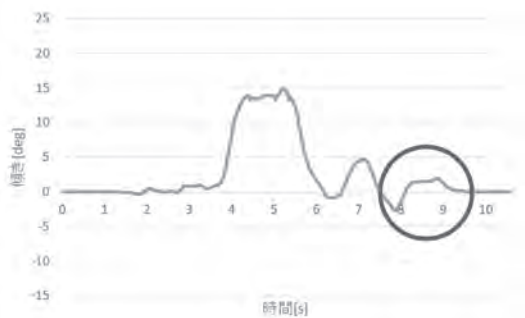


Fig. 20. 仮想空間上での車体の傾き (傾きフィードバック無し).

6 終わりに

本稿では、車体傾き制御システムを導入した自転車シミュレータを提案した。現実世界で困難な自転車実験も、シミュレータを用いることで安全に走行データを収集することが可能となる。本システムは前と左右の3方向のスクリーン、シミュレータ車体部、そして、走行環境管理用PCによって構成されている。シミュレータ車体部には光電センサとロータリエンコーダ、サーボモータを搭載している。

センサから得られたデータをArduinoで取得し、そこから得られた舵角と速度を用いて傾きと方位角を推測することにより、走行環境プログラムに反映させている。また、推測した傾きをサーボモータにより車体部の傾きとしてフィードバックすることで、自転車傾きを表現し

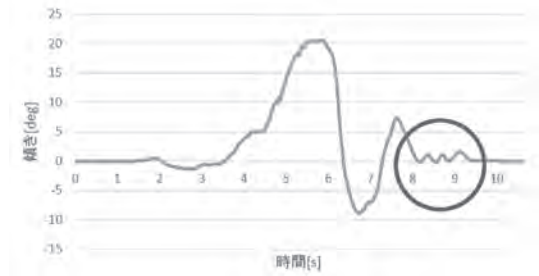


Fig. 21. 仮想空間上での車体の傾き (傾きフィードバック有り).

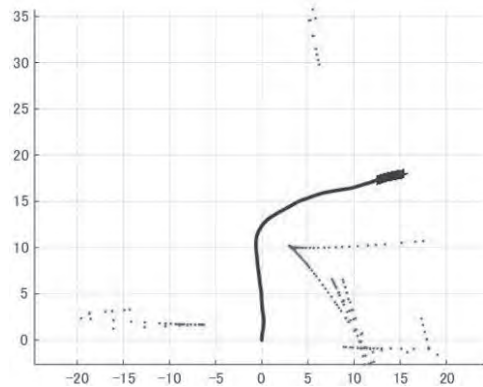


Fig. 22. 社会実験での右折時の走行軌跡と曲率中心軌跡の例 (青色:後輪軌跡, 赤色:曲率中心).

ている。

実験では提案したシミュレータを用いて、傾きフィードバックの有効と無効を切り替え、スラロームと右折を行うコースでの走行軌跡と曲率中心軌跡を求めた。結果、傾きが実装されたシミュレータでは、旋回から直進に切り替わる際の走行状態が不安定となり、社会実験での挙動により近いものとなったことが分かった。

提案シミュレータでは、舵角と後輪速度から傾きを推測する手法を行ったが、実際に傾きに影響を与える要素としては、搭乗者の重力感覚という要素は無視することが出来ない。前節でも述べたように、傾きが極大な際、特に搭乗者は重心を移動させ、バランスを取ろうとすることが考えられるため、今後仮想空間におけるさらに厳密な自転車挙動を実現するためには、搭乗者の姿勢情報を取得し、重心移動を考慮するシステムを開発していく必要がある。

また、自転車の姿勢に関係する力は、重心と遠心力の他にもジャイロ効果や段差なども関係してくるため、それらを計算に入れることでどのように搭乗

者の挙動が変わるかも調べる必要があると考えている。

参考文献

- 1) 浅田翔平, 田端佑介, 河内雄太, 山本光, 金田重郎, 「自転車の走行状態推定を加味したハザードマップの提案」, 第9回情報システム学会全国大会・研究発表大会, 2013年11月
- 2) Shigeo Kaneda, Shohei Asada, Akira Yamamoto, Yuta Kawachi, Yusuke Tabata, “A Hazard Detection Method for Bicycles by using Probe Bicycle”, Proc. of CDS2014 (The 2nd IEEE International Workshop on Consumer Devices and Systems), pp.547-551 2014, July
- 3) 石田雄紀, 島田哲哉, 植田晃一郎, 金田重郎, “車体傾きを許容した自転車シミュレータの提案”, 情報処理学会・第79回全国大会, 3T-05
- 4) Honda bicycle simulator, Websites, <http://www.honda.co.jp/safetyinfo/simulator/bicycle/> (In Japanese), <http://www.bikeradar.com/news/article/honda-to-launch-bicycle-simulator-24117/>
- 5) Sung Hwan Jeong, Yong Jun Piao, Woo Suk Chong, Yong Yook Kim, Sang Min Lee, Tae Kyu Kwon, Chul Un Hong, and Nam Gyun Kim, “The Development of a New Training System for Improving Equilibrium Sense Using a Virtual Bicycle Simulator,” Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference Shanghai, China, vol. 3, pp. 2567-2570, Sept., 2005
- 6) Greg Byrd, “Cycling Through Cyberspace,” Computer, vol. 48, issue 8, pp. 72-75, Aug., 2015
- 7) Miguel Melo, Tania Rocha, Luis Barbosa, and Maximino Bessa, “Presence in Virtual Environments: Objective Metrics vs. Subjective Metrics - A Pilot Study,” 2016 23rd Encontro Portugues de Computacao Grafica e Interacao (EPCGI), Feb., 2017
- 8) Dong-Soo Kwon, Gi-Hun Yang, Youngjin Park, Sunmin Kim, Chong-Won Lee, Jae-Cheol Shin, Soonhung Han, Jonghwan Lee, Kwangyun Wohn, Sehoon Kim, Doo Yong Lee, Kyungno Lee, Jae-Heon Yang, and Yun-Mook Choi, “KAIST Interactive Bicycle Racing Simulator: The 2nd Version with Advanced Features,” Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2961-2966, 2002
- 9) Jingang Yi, Dezhen Song, Anthony Levandowski, and Suhada Jaysuriya, “Trajectory Tracking and Balance Stabilization Control of Autonomous Motorcycles,” Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2583-589, May, 2006
- 10) Jingang Yi, Dezhen Song, Anthony Levandowski, and Suhadav Jaysuriya: “Trajectory Tracking and Balance Stabilization Control of Autonomous Motorcycles”, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May, 2006, pp.2583-589
- 11) 高橋遼一, 金田重郎, 「曲率中心を用いた自転車走行状況の数値化とスラロームコースへの適応」, 電子情報通信学会・知能ソフトウェア研究会, 2018年3月
- 12) Hajime Kato, Yuto Sakajyo, Shigeo Kaneda, “Visualization Method for Bicycle Rider Behavior Analysis Using a Smartphone”, 2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC) Year: 2017, Volume: 2, Pages: 354 - 359, DOI: 10.1109/COMPSAC.2017.262 2017年7月
- 13) Ryoichi Takahashi, Kazuki Miki, Shigeo Kaneda, “Visualization Method Using Probe Bicycle to Analyze Bicycle Rider's Control Behavior”, 2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC) Year: 2017, Volume: 2, Pages: 360 - 365, DOI: 10.1109/COMPSAC.2017.263 2017年7月
- 14) 高橋遼一, 坂上友都, 加藤一, 金田重郎, 「スマートフォンセンサを用いた自転車挙動表示法の提案」, 情報処理学会, 研究報告コンシューマ・デバイス&システム (CDS), Vol.2017-CDS-18, No.30, pp.1-7, 2017年1月

Evaluation of Estimation Accuracy for Position of Human Bodies in Surrounding Environment of Vehicles

Yuki ITO *, Hisato IWAI* and Hideichi SASAOKA*

(Received March 28, 2018)

As a method of sensing position of a human body around a vehicle, technologies using radio wave have been considered. As an example of such radio sensing, we study a method to detect position of a human body using transmitting and receiving antennas installed on the side of a vehicle in this paper. The position is estimated based on reflected waves from the human body. We assume the environment where the human body exists in a surrounding environment of vehicles and obtained the propagation characteristics by FDTD. In addition, we estimate the human body position using the Beamformer method and the MUSIC method from the obtained propagation characteristics. As a result of the analysis, we obtain sufficient estimation accuracy in the angular direction by both methods. But it is found that the accuracy for the range direction needs improvement.

Key words : Human body position estimation, Beamformer method, MUSIC method, FDTD

キーワード : 人体位置推定, Beamformer 法, MUSIC 法, FDTD

車両周辺環境における人体位置推定精度の評価

伊藤 優希, 岩井 誠人, 笹岡 秀一

1. まえがき

近年, 様々なモノ, ヒトがつながる IoT(Internet of Things)が注目されており, 自動車技術の分野においては自動ブレーキなどの先進運転支援システム(ADAS:Advanced Driver Assistance Systems)や自動運転, 車両オーナーに対するサービス向上(位置, 接近方向検出)の実用化に向けて様々な研究が行われている. 車載センサは, これらの新しい技術・サービス実用化のキーである. センシング技術には, 一般に画像処理を用いた光学センサ, 無線通信電波を送信し反射波を受信することによりセンシングする

電波センサ, の2種類がある. 電波センサは, 昼夜天候に左右されないという特徴がある. 例えば, 光学センサに関する研究として, 車載カメラ画像に基づいた自動運転支援¹⁾, 別車両や歩行者の検出^{2,3)}, 車載カメラ性能向上⁴⁾, などがある. 一方, 電波センサに関する研究として, 簡易な車両モデルによる伝搬特性解析⁵⁾, 車車間通信方式の検討⁶⁾, レーダーシステムのモデル化⁷⁾, 車載センサの最適材質の検討^{8,9)}, などがある. しかし, 車両を詳細にモデル化し, 周辺の伝搬特性を解析したものは少ない. 実環境を想定した車両周辺の伝搬特性を明らかにす

* Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan
Telephone: +81-774-65-6267, Fax: +81-774-65-6801, E-mail: ctwb0315@mail4.doshisha.ac.jp

ることは、人体を正確に検出する技術の開発には重要である。

そこで、本稿では車両(詳細にモデル化)周辺に人体が存在する環境を想定し、FDTD (Finite-Difference Time-Domain method) 法により伝搬特性を求め、Beamformer 法, MUSIC (Multiple Signal Classification) 法を用いて人体位置推定を行った結果を報告する。

2. 人体位置推定システムモデル

本稿では、車両側面のアレー配置した単一アンテナから電波を送信し、人体からの反射波を複数アンテナで受信し、その受信信号から人体位置推定を行った。この車両周辺環境の電波伝搬解析としてはFDTD法を用い、人体からの反射波を以下の方法で求めた。人体位置推定法としては、2.3節に示す近距離 Beamformer 法, 近距離 MUSIC 法を用いた。

2.1. FDTD 法

FDTD 法は、マクスウェルの微分方程式を直接時間・空間領域で差分化し、更新式を繰り返し計算することで、電磁界を求める手法である。計算メモリが大きくなるが、波源を囲む解析領域を分割する微小直方体(セル)の大きさを細かくできれば精度の高い解が得られる¹⁰⁾。本稿では、車両を詳細にモデル化する必要があるためレイトレーシングと比較して解析対象を詳細にモデル化することが可能である FDTD 法を用いた。

2.2. 人体からの反射波による伝搬チャネル係数計算手法

はじめに、送信アンテナから一方向の電界を励振し、FDTD 計算により得られた受信アンテナでの励振同一方向の電界との振幅比(位相を含む)をチャネル係数とした。次に、車両のみの環境(Fig. 1 (a))の各受信点でのチャネル係数(h_1)、車両および人体モデルを配置した環境(Fig. 1 (b))のチャネル係数(h_2)、をそれぞれ求める。そして h_2-h_1 を人体反射によるチャネル係数とする。Fig. 2 に人体反射による伝搬チャネル係数計算の模式図を示す。

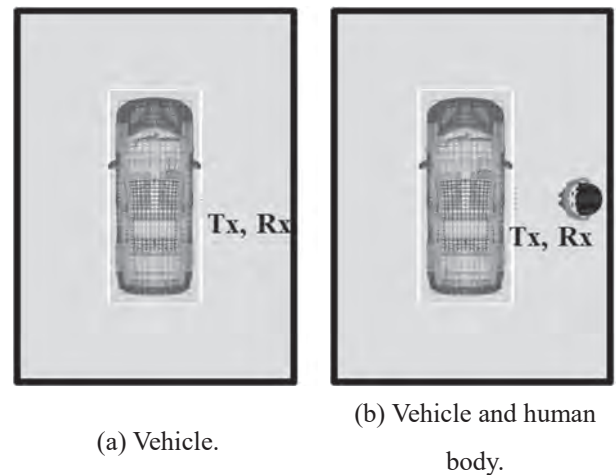


Fig. 1. Environment model.

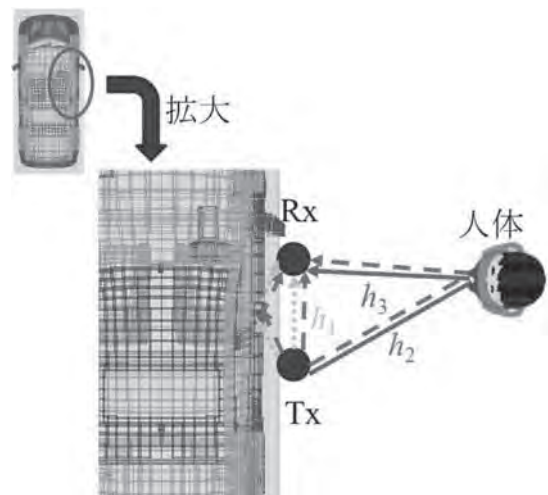


Fig. 2. Calculation model of propagation channel coefficient by human body reflection wave.

2.3. 波源位置推定法

2.3.1. 近距離 Beamformer 法

Beamformer 法とは、アレーアンテナのメインローブを走査する手法である。なお、到来角度を推定対象とする通常の Beamformer 法に対して、本稿では波源が比較的近距离であり距離方向の推定も可能である近距離 Beamformer 法¹¹⁾を用いた。Fig. 3 に近距離にある波源とアレーアンテナによる波源位置推定のモデル図を示す。波源による伝搬チャネル係数, ステアリングベクトル, 相関行列を用いた Beamformer スペクトルは以下の式で表される。本稿では、2.2 節の方法より人体反射波の伝搬チャネル係数を取得し Beamformer スペクトルの値がピーク

となる点を人体の推定位置とした。

$$\mathbf{a}(\theta, r) = \left[\frac{r}{r_{-p}} \exp(-j\tau_{-p}), \dots, \frac{r}{r_p} \exp(-j\tau_p) \right]^T$$

$$r_k = r \sqrt{1 + \left(\frac{kd}{r}\right)^2 - \frac{2kdsin\theta}{r}} \quad (1)$$

$$\tau_k = \frac{2\pi}{\lambda}(r_k - r)$$

$$\mathbf{h} = [h_{-p}, \dots, h_0, \dots, h_p]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_{hh} = [\mathbf{h}\mathbf{h}^H] \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_B(\theta, r) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta, r)\mathbf{R}_{hh}\mathbf{a}(\theta, r)}{\mathbf{a}^H(\theta, r)\mathbf{a}(\theta, r)} \quad (4)$$

ただし、アレーアンテナの中心から最も離れたアンテナを p 番目のアンテナ、アレーアンテナの中心と波源の距離を r 、アレーアンテナの中心から k 番目のアンテナと波源の距離を r_k 、アレーアンテナ中心においてアンテナ配列に垂直な線と波源がなす角を θ 、アンテナ間隔を d 、アンテナ数を N 、波長を λ 、ステアリングベクトルを $\mathbf{a}(\theta, r)$ 、伝搬チャネルベクトルを \mathbf{h} 、アレーアンテナの中心から k 番目のアンテナの伝搬チャネル係数を h_k 、 $(\cdot)^H$ はエルミート転置、相関行列を \mathbf{R}_{hh} 、Beamformer スペクトルを $\mathbf{P}_B(\theta, r)$ とする。

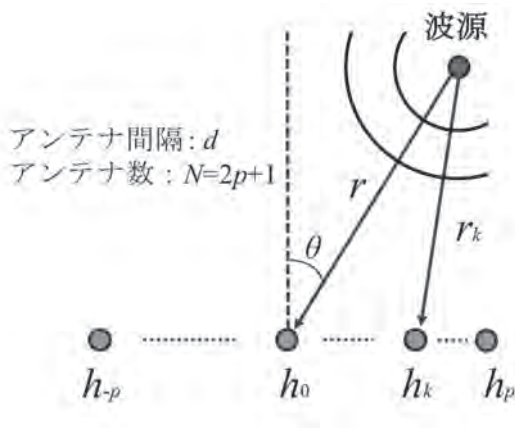


Fig. 3. System model of using array antenna.

2.3.2. 近距離 MUSIC 法

MUSIC 法とは、相関行列の固有値・固有ベクトルを用いて、ヌル走査する手法である。波源による伝搬チャネル係数、ステアリングベクトル、相関行

列の固有ベクトルのうち到来波と直交するすべての固有値を用いた MUSIC スペクトルは以下の式で表される。Beamformer 法と同様に人体反射波の伝搬チャネル係数を取得し MUSIC スペクトルの値がピークとなる点を人体の推定位置とした。

$$\min(\mathbf{e}^H \mathbf{R}_{hh} \mathbf{e}), \mathbf{e}^H \mathbf{e} = 1 \quad (5)$$

を満たすウェイトベクトル \mathbf{e}_i

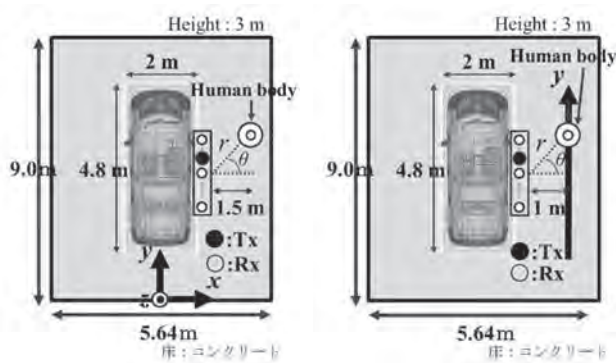
$$\mathbf{P}_M(\theta, r) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta, r)\mathbf{a}(\theta, r)}{\mathbf{a}^H(\theta, r)\mathbf{E}_N\mathbf{E}_N^H\mathbf{a}(\theta, r)} \quad (6)$$

$$\mathbf{E}_N = [\mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_N]$$

ただし、ステアリングベクトル、相関行列は Beamformer 法と同様、相関行列の到来波以外に対応する固有ベクトルを \mathbf{E}_N 、MUSIC スペクトルを $\mathbf{P}_M(\theta, r)$ とする。また、本稿では到来波数を 1 と仮定したため、 \mathbf{E}_N は $N-1$ 個の要素を持つ。

3. 人体位置推定評価環境

本稿で想定する車両周辺に存在する人体の位置推定を行った二種類の環境モデルを Fig. 4 に示す。それぞれ人体の位置 ($r = 2.12$ m, $\theta = 45^\circ$) を固定させた場合 (Fig. 4 (a)), 人体の位置を 0.1 m 間隔で y 軸上に配置した場合 (Fig. 4 (b)) を示している。Fig. 4 に示すように、詳細にモデル化した車両 (Fig. 5)、車両側面から 0.12 m 離れた位置に送受信アンテナ、人体モデル (直径 0.35 m および 0.1 m の円柱: Fig. 6) を設置した。送信アンテナは複数アンテナのうちの 1 つと仮定し、その座標は (1.0, 5.01, 0.8) とした。人体位置は、送受信アレーアンテナの中心からの距離 r と角度 θ とした。電波の周波数は 2.5 GHz とし、受信アンテナ間隔は 0.06 m ($\lambda/2$) とした。下面 (床) はコンクリート、上面および側面は吸収境界 PML (Perfectly Matched Layer) とした。今回は雑音は考慮していない。Table 1 に FDTD 計算に用いた各種諸元を示す。なお、Beamformer 法、MUSIC 法では、距離は 0 m から 5 m、角度は -75 から 75° で二次元探索を行った。



(a) Fixed human model. (b) Moved human model.

Fig. 4. Evaluation environment.



Fig. 5. Car model.



Fig. 6. Human body model.

Table 1. Specifications of FDTD calculation.

解析領域	5.64 m×9.0 m×3.2 m
励振信号周波数	2.5 GHz
励振方向	y 方向(水平励振)
セルサイズ	0.012 m 立方
吸収境界	PML
雑音	考慮なし
送信アンテナ座標	(1.0, 5.01, 0.8)
受信アンテナ数 N	3 ~ 31
受信アンテナ間隔	0.06 m
中心受信アンテナ座標	(1.0, 4.5, 0.8)

4. 人体位置推定結果

4.1. 人体位置を固定($r = 2.12$ m, $\theta = 45^\circ$)した場合

人体位置を固定した場合の Beamformer 法, MUSIC 法による二次元探索結果を Fig. 7, 8 に示す. 横軸および縦軸は, それぞれ探索した角度および距離を示している. Beamformer, MUSIC スペクトルであるスペクトル(P_B および P_M)の値は探索範囲内の最大電力で正規化している. 黒丸は実際の人体モ

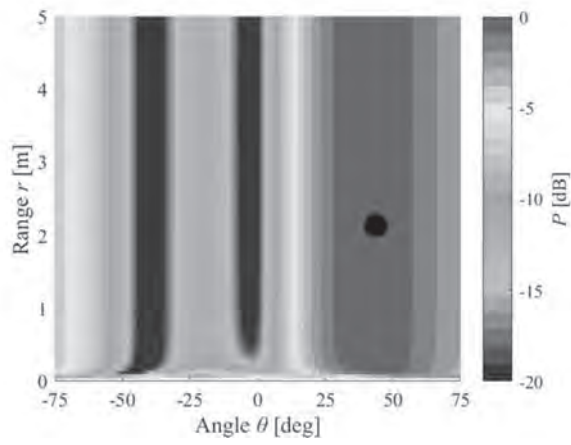
デルの位置を示している. また, 受信アンテナ数変化に対する人体位置推定精度の変化を確認するため受信アンテナ数 N を 3, 11, 31 と変化させている. Fig. 7, 8 から両手法において角度方向については, スペクトルの値が -5 dB 以上となる範囲は 45° を中心として 5° 未満であり, 十分な推定精度が期待される. これに対して距離方向については, ピーク検出の感度が鈍く, 雑音の影響がある場合などには推定精度が大きく劣化することが予想される. これに対しては, 受信アンテナ数を増加させアンテナの等価的な開口を大きくとれば推定性能は改善されると考えられる.

また, MUSIC 法では Fig. 8(a)から受信アンテナ数が 3 と比較的少ない場合においても角度方向に対してスペクトルの値が -1 dB 以上となる範囲は 45° を中心として 5° 未満である. つまり, Beamformer 法での受信アンテナ数が 31 の場合と同等の推定精度であることがわかる.

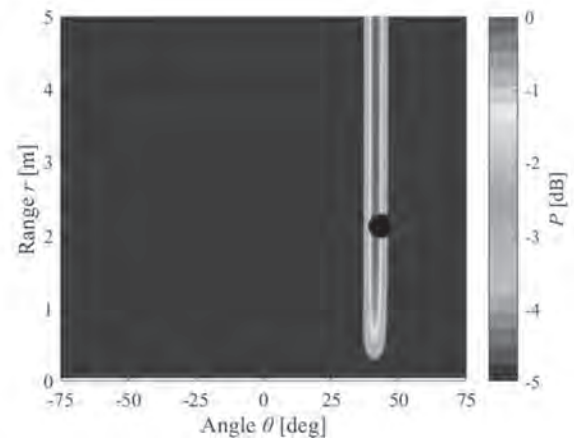
4.2. 人体位置を y 軸上移動させた場合

人体を移動させた場合の Beamformer 法, MUSIC 法による二次元探索結果の例を Fig. 10, 11 に示す. 中心受信アンテナからみた人体位置の角度(Fig. 3 における θ)を変化させた場合の推定精度の変化を確認するため人体位置が $\theta = -67.4^\circ, 0^\circ, 67.4^\circ$ の結果を示している. なお, 受信アンテナ数 N は 11 とした.

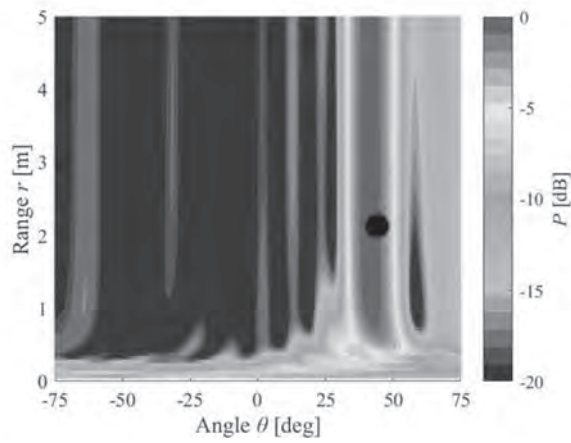
両手法において, 中心受信アンテナからみた人体位置の角度が小さい Fig. 10, 11(b) の場合では, 角度方向の推定誤差は 10° 前後であることがわかる. それに対し, 中心受信アンテナからみた人体位置の角度が小さい Fig. 10, 11(a) および(c) の場合では, 推定誤差は 20° 前後である. よって, 中心受信アンテナからみた人体位置の角度が大きい場合, 誤差が大きくなる. また, 距離方向に関して受信アンテナ数 11 と少ないためにピーク検出の感度が鈍く, 推定精度が低い. これは 4.1 節でも示したように受信アンテナ数を増やすことで推定精度改善が期待される.



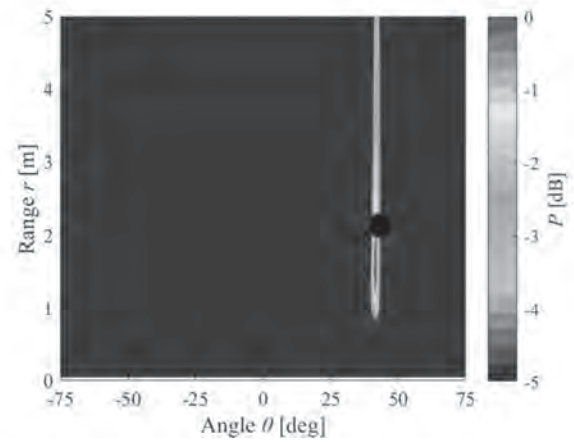
(a) $N=3$.



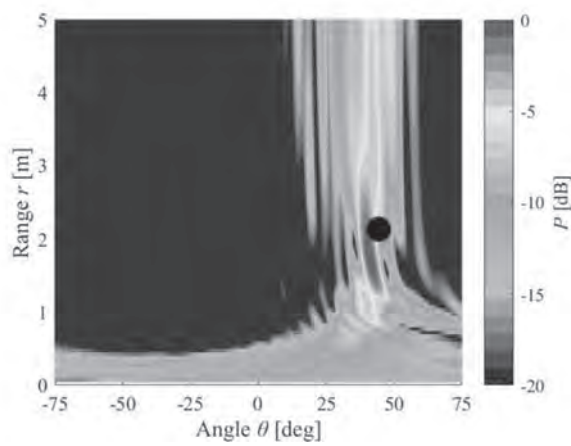
(a) $N=3$.



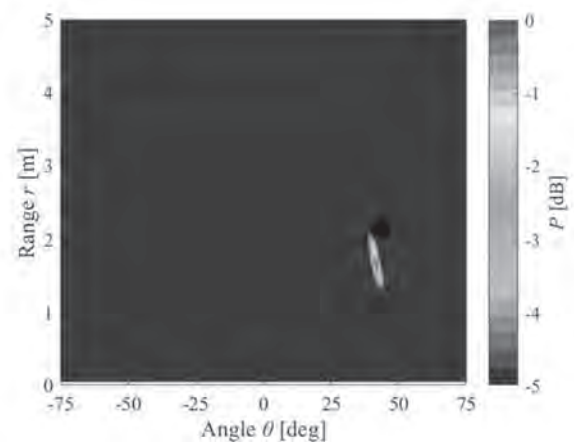
(b) $N=11$



(b) $N=11$



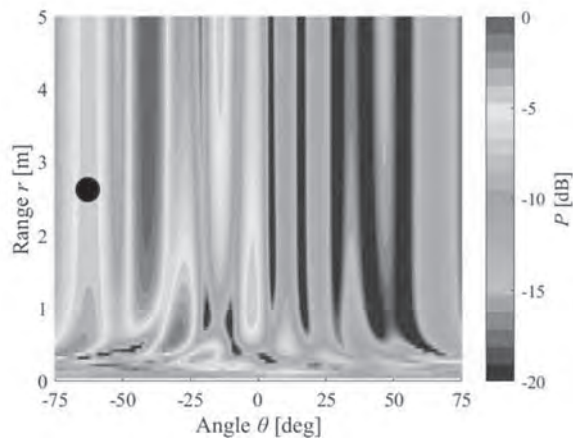
(c) $N=31$



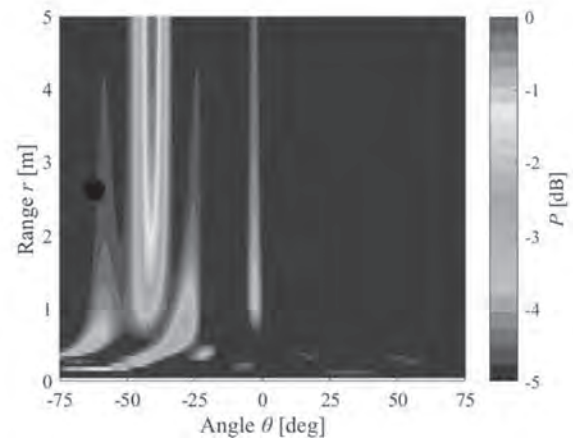
(c) $N=31$

Fig. 7. Beamformer spectrum for fixed human model.

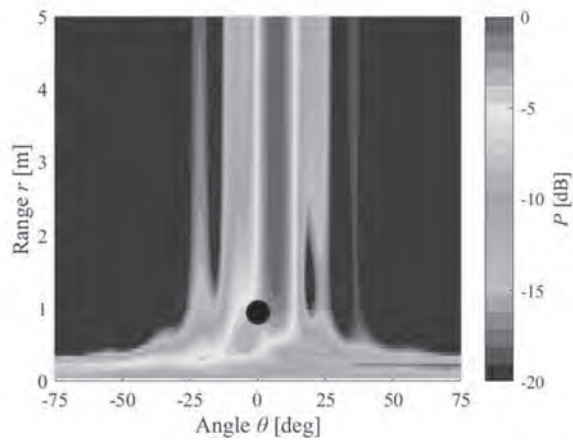
Fig. 8. MUSIC spectrum for fixed human model.



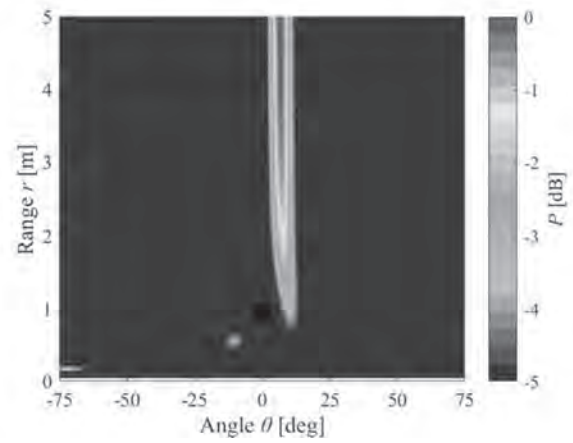
(a) $r = 2.6, \theta = -67.4^\circ$



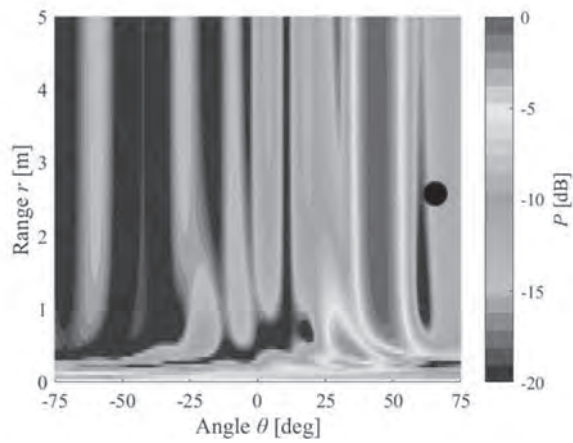
(d) $r = 2.6, \theta = -67.4^\circ$



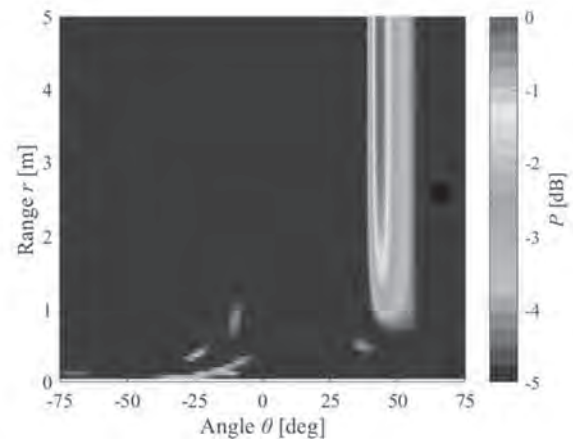
(b) $r = 1, \theta = 0^\circ$



(e) $r = 1, \theta = 0^\circ$



(c) $r = 2.6, \theta = 67.4^\circ$



(f) $r = 2.6, \theta = 67.4^\circ$

Fig. 10. Beamformer spectrum for moved human model.

Fig. 11. MUSIC spectrum for moved human model.

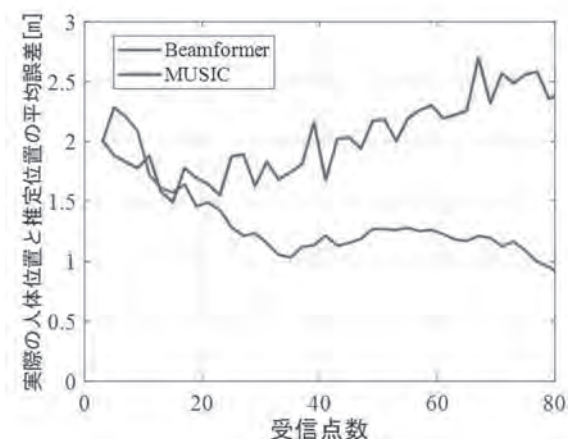


Fig. 12. Average error value for variation of number of receiving antennas.

次に、Beamformer 法、MUSIC 法を用いた二次元探索による推定位置と実際の人体の位置との平均誤差結果を Fig. 12 に示す。横軸は受信アンテナ数、縦軸は平均誤差を示している。平均誤差は、人体を y 軸上 0.1 m 間隔で移動させた 49 環境それぞれにおいて、推定位置と実際の人体の位置との距離の誤差を求め、平均化したものである。

Fig. 12 より、Beamformer 法では受信アンテナ増加により平均誤差を低減することが可能であるが、MUSIC 法では推定精度の改善は見られなかった。この原因としては、スペクトルの値の範囲について Beamformer 法では 0 dB から -20 dB に対して MUSIC 法では 0 dB から -5 dB と小さく、より感度が高い。また、車両を除いた環境において同様の人体位置推定を行ったところ Beamformer 法、MUSIC 法において受信アンテナ増加により平均誤差を低減可能であった。これらの理由から、車両による複雑な反射波の影響により感度が高い MUSIC 法では推定精度の改善は見られなかったと考えられる。

5. まとめ

本稿では、車両周辺に人体が存在する環境において、詳細に車両をモデル化し、伝搬特性を FDTD 法により求め、その結果を用いて Beamformer 法、MUSIC 法により人体位置推定を行った。

人体位置を固定した場合の推定誤差は、角度に関して両手法において $\pm 5^\circ$ 未満であった。また、受信アンテナを増加させれば推定精度向上可能であると考えられる。中心受信アンテナからみた人体位置の角度が比較的大きい場合、角度、距離方向ともに推定精度は低い。また、平均推定誤差は、Beamformer 法では受信アンテナ増加により小さくすることが可能であるが、MUSIC 法では推定精度の改善は見られなかった。今後の課題として、より現実的な車両周囲環境(駐車場環境)、雑音の考慮、などを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 小越咲子, 小越康宏, 木村春彦, 広瀬貞樹, "COD カメラ画像に基づいた自動車の車庫入れの自動化," 信学論(A), vol.J87-A, no.2, pp.253-264, (2004).
- 2) 鈴木秀和, 見浪護, "車載カメラを用いた複数歩行者の実時間認識," 信学論(A), vol.J88-A, no.2, pp.131-141, (2005).
- 3) M. Mody, P. Swami, K. Chitnis, *et al.*, "High performance front camera ADAS application on TI's TDA3X platform," High Performance Computing (HiPC), 2015 IEEE 22nd International Conference, Bangalore, (2015).
- 4) 小野晋太郎, 平原清隆, 影沢政隆, 池内克史, "車載レンジセンサを利用した路上駐車車両の自動検出," 信学論(A), vol.J88-A, no.2, pp.247-256, (2005).
- 5) 柏達也, 田口健治, 今井卓, "IOT 時代の字度運転通信を目的とした電波伝搬解析—交差点出会い頭衝突防止のための車車間通信の実現に向けて—," 信学論(C), vol.J99-C, no.10, pp.468-475, (2016).
- 6) 伊藤健二, 伊藤修朗, 三田勝史, 唐沢好男, "交差点付近の伝搬特性を対象とする判定帰還型チャネル推定法による MIMO-STBC 車車間通信方式," 信学論(B), vol.J89-B, no.9, pp.1776-1788, (2006).
- 7) L. Huang, J. Bai, H. Chen, "Millimeter-wave automotive radar with PLL-generated ramps modelling by using SystemVue and MATLAB," 2016 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Cocoa Beach, (2007).
- 8) E. Adas, F. D. Flaviis, N. G. Alexopoulos, "Mode-free radiating electromagnetic bandgap materials as phased array antenna elements," 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (AP-S), San Diego, (2017).
- 9) L. Maurer, G. Haider, H. Knapp, "77 GHz SiGe based bipolar transceivers for automotive radar applications-An industrial perspective," New Circuits and Systems Conference(NEWCAS), Bordeaux, (2011).
- 10) 宇野亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, (コロナ社, 1998).
- 11) 菊間信良, 田中健佑, 柳原久二男, "アレーアンテナを用いた電波源位置推定の今昔物語," 信学技報, vol.117, no.150, AP-2017-61, pp.87-92, (2017).

A Graph Partitioning Approach for Efficient Dependency Analysis using a Graph Database System

Kazuma KUSU* and Kenji HATANO**

(Received May 28, 2018)

Program execution traces, which include data/control dependency information, are indispensable for new types of debugging such as back-in-time techniques. In this study, we implement a dependency environment for the Java programming language focusing on tracing the relationships in dependency analyses, using the graph database (Neo4j) optimized for tracing graph edges. In the dependency analysis environment, we propose an efficient approach for handling the traces on a graph database system by evaluating memory usage and analysis time. Traces of practical programs are prone to have vast complex data, making it difficult to develop practical back-in-time debuggers. To address this challenge, our dependency environment enables an efficient analysis of the traces. The trace in our dependency analysis environment has a graph structure whose nodes denote executed Java bytecode instructions, and edge that represent data/control dependencies between the nodes. By a simple implementation of our dependency analysis environment, we confirm the existence of bottlenecks through evaluation experiments, which are then remedied in order to improve the performance of the technique's memory usage and analysis time. As a result, our environment enabled efficient process dependency analysis, reducing memory usage by 43.1% and analysis time by 4.3%. Therefore, our approach enables to efficiently manage all kinds of data with graph structures.

Key words : Dependency Analysis, Back-in-time Debugger, Debugging Support, Graph Database, Graph Search, Java

1 Introduction

The examination of runtime states and their dependencies are indispensable to program debugging [1, 2]. Debuggers that are currently in use allow maintainers to suspend program execution at specified break points and examine the runtime states at these points. However, such debuggers do not have a provision for maintainers to examine states prior to the designated points for the suspension of execution. Therefore, they cannot trace backwards to detect causes of erroneous states by following the dependency of statements [3].

In the last decade, so-called *back-in-time debuggers* have emerged as a new kind of debugging support tools.

These debuggers use traces containing dependency information [4–6]. Such debuggers analyze dependencies to determine the operation that assigns value to a referenced variable [4], to examine the reasons why a given statement is or is not executed [5], and what happens during the execution of a method that has already been successfully invoked [6]. This kind of dependency analysis is useful for the examination of a particular instruction.

The scalability of process traces containing dependency information has been discussed in the literature [3]. We believe that the recent, rapid developments in hardware and software technologies have made it possible to process the traces of a certain scale

* Graduate School of Culture and Information Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-7656, E-mail : kusu@ilab.doshisha.ac.jp

** Faculty of Culture and Information Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-7663, E-mail : khatano@mail.doshisha.ac.jp

of software products. In previous work [7], we demonstrated two kinds of dependency analysis that detect symptoms of a malfunction caused by defects in the application of the Java framework application [8].

Although our previous study raised the prospect of a solution to the scalability problem, the implementation of our dependency analysis remained inefficient. The main cause of this was the richness of the data in the model of our traces. The design of our trace proposed here aims not only at the requirements of symptom detection [7], but also at the analysis of other aspects of program execution. Therefore, our trace design incorporates the richness of data to enable various kinds of dependency analysis instead of reducing the amount of data, such as in the approach proposed by Wang et al. [9].

In addition to back-in-time Debuggers [4–6], which aim at a microscopic perspective for the dependency analysis of a specific statement, our previous study [7] dealt with all-state updates via *persistent variables* and their value dependency across the entire trace. A persistent variable is either a class variable, an instance variable, or an array component. It implements a state that persists after the invocation of a method is completed [10]. This macroscopic nature of our dependency analysis renders it inefficient, although the algorithm works in practice. In order to solve this problem, an approach is needed to support the efficient analysis of dependency in a large trace.

In this paper, we implement an efficient dependency analysis environment to perform out the trace studies as done previously [7]. Moreover, we clarify the inefficiency factor in our dependency analysis environment, and suggest an approach to address this factor. Furthermore, we evaluate our approach for improving the processing of analysis results after applying our approach. According to this, we clarify bottlenecks in our dependency analysis environment that need to be resolved. Previously, we identified the factors affecting efficiency in our dependency analysis environment and expanded a trace-partitioning approach for use in our study [11]. Moreover, we proposed an extension

of a previous approach [12] for partitioning trace. We reduced memory consumption in a dependency analysis, but did not reduce the processing time. Therefore, we propose an approach for efficiently traversing our trace in this paper. Finally, we conduct an experiment characterizing the effectiveness of our approach.

We introduce concepts related to dependency analysis, and describe demands for dependency analysis environments in Section 2. Then, in Section 3, we illustrate our implementation of a dependency analysis environment that consists of trace generation and a trace processing parts using a graph database system (GDB). In Section 4, we propose a naïve trace-partitioning approach based on the characteristics of the GDB for efficient dependency analysis. We conduct a preliminary experiment for evaluating dependency analysis performance on our environment in Section 5. In Section 6, we reconsider a trace-partitioning approach guided by an analysis of the bottleneck in our dependency analysis environment clarified during the preliminary experiment. In Section 7, we conduct an evaluation of the efficiency and scalability of our expanded approach. Finally, in Section 8, we consider our contribution for efficient dependency analysis as indicated by the experiment.

2 Related Work

Debuggers widely used in software development projects support a common feature to suspend program execution at a specified *break point* and show the runtime state at that point. They do not record the execution and, thus, have the common drawback that there is no way to examine the execution of a method whose invocation has been already completed. This is a serious problem because defects and infections are often found in methods that have been completed before the program fails [6]. A defect is an error in program code while an infection, in software engineering, is a runtime error caused by the execution of a defect [1].

Maintainers using a debugger must repeat a task to specify a breakpoint, as it is usually very difficult to

find a suitable breakpoint in the program code, and re-execute the program to examine the executions of methods that have been completed. Such a debugging style, forced by the common limitation in current of existing debuggers, leads to inefficient debugging [3].

Using traces for debugging support is a natural idea to overcome the above limitation in existing debuggers [4, 5, 13]. An omniscient debugger [4] examined assignment operations with set values referenced from variables. If a maintainer wanted to determine why a statement has or has not been executed, Whyline [5] analyzed related dependencies and generated the results of the analysis using sophisticated Graphical User Interfaces (GUI).

Dynamic Object Flow Analysis [13] aims to understand program execution from the aspect of object references. Its area of application ranges from dependency analysis of methods for software testing [14] to performance engineering for a back-in-time debugger [6].

To the best of our knowledge, no existing dependency analysis approaches to debugging support are aimed at macroscopic dependency analysis except for our previous proposal [7]. An omniscient debugger deals with only the correspondence between the value of a variable and the assignment operation that has sets this value. Whyline navigated a maintainer to the dependencies among statements to the extent of his/her manual examination. Dynamic object flow analysis performs macroscopic analysis but only deals with object references.

The above approaches to microscopic dependency analysis provide useful debugging aids. However, understanding a program from a macroscopic viewpoint is necessary for debugging [15]; therefore, maintainers have to spend time and effort to obtain this perspective through manual dependency analysis.

We studied several kinds of macroscopic dependency analysis in this context in our last study [7]. Of these, *outdated-state* analysis aims to identify symptoms to suggest possible infections incurred by the accidental use of an old value of a field or array component along

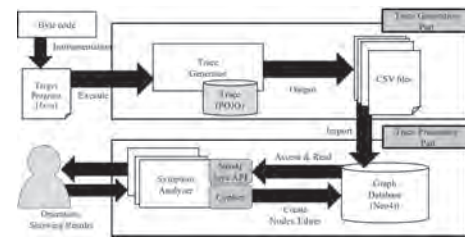


Fig. 1. Our dependency analysis environment.

with its updated value.

3 Dependency Analysis Environment

Debugging a program requires various analyses of statement dependencies. Therefore, we developed two kinds of techniques for analyzing the relevant symptoms in our previous study [7]. The proposed trace was designed to execute such dependency analyses. For this reason, our trace tended to be large and complex, and to be usually led to inefficient processing of dependency analysis. In order to conduct an efficient dependency analysis, an analysis environment is needed that enable to handle our trace efficiently.

Fig. 1 illustrates the entire process, which involves the execution of a Java program under instrumentation and several sub-processes of symptom analysis in our dependency analysis environment. In the trace generation portion, our system generates a trace using Java byte-code instrumentation technologies. The trace processing portion, on the other hand, stores the generated trace in a GDB and supports its efficient processing of various kinds of dependency analysis.

3.1 Trace Data Model

Dependency analysis approaches from various aspects of execution are necessary for practical debugging support. In previous work, we developed two kinds of dependency analysis algorithms to detect symptoms that indicate infections in a failed execution [7].

Both of the proposed algorithms process control data dependency across the entire extent of an execution. One algorithm checks a complex condition that specifies data flow to associate operations in a class instance caused by the invocation of a certain kind of method.

The other algorithm keeps track of side effects via fields and array components. We propose a new kind of dependency analysis that aims to abstract the effects of methods and operations on objects based on inputs by the debugger users.

In order to satisfy the above requirements, we defined our trace model as the following basic elements of program executions:

- Method execution
- Execution of abstracted byte code instructions to represent statements.
- Creation and reference of values by instructions.
- Values to be created or referenced.

Some abstracted instructions represent “control statements,” such as conditional statements, method invocations, and throw and catch. Abstracted instructions contain assignment operations on local variables, fields, and array components. The instruction set also contains constants, instance creations, and array creations, as well as various calculation operations. Values created, calculated, and assigned are referenced by the instructions that use them.

For each instruction in an execution, its trace records the control instruction under which it is executed. If the instruction references a value, the trace records from the instruction from which the value originates. In this way, we can obtain control and data dependency information among instructions, including a method invocation structure.

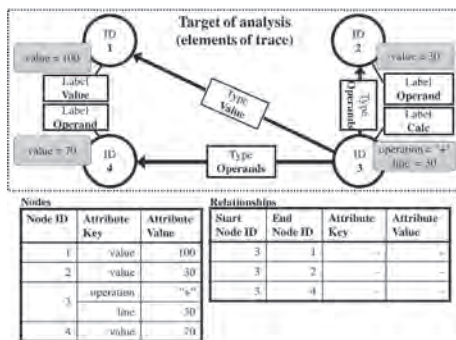


Fig. 2. Property graph model.

A trace generated by our approach enables to first be represented using the property graph model shown in

Fig. 2. This is a data model defined in the TinkerPop project in Apache [16]. This data model features good descriptive capability, and hence can represent various kinds of data.

Our trace model allows programs to check data/control dependency for a large number of instructions in order to examine state changes on some objects or to find the cause of an infection. Algorithms to check such dependencies, represented by links among graph nodes, should be efficient.

3.2 Trace Processing

The requirements stated in Section 3.1 make it difficult to reduce trace size. Traces are needed not for a particular dependency analysis, but for various kinds of analysis dealing with the conditions of such program elements as classes, fields, and methods related to the four elements described in Section 3.1. Therefore, rich data is required for the proposed trace model for such additional information.

For dependency analysis purposes, the instructions between, which the analysis is performed cannot be predicted. Therefore, for a failed execution, the trace of the entire extent of execution is first needed. Our algorithms then search for instructions that are the targets of dependency analysis.

Dependency analysis usually requires checking of complex conditions for the above four kinds of elements one by one along with their dependency relationships. Furthermore, the results of past condition checks must be stored for reference.

A situation sometimes arises where the Java virtual machine is quite inefficient, or even runs out of memory when applying dependency analysis to the execution of a software. Hence, data engineering approaches are needed to build a framework that enables efficient access to and processing of massive traces.

In this study, we develop a dependency analysis environment on the GDB to improve analysis performance. This paper uses a GDB called Neo4j following the property graph model [17] because it is suitable for storing traces with complex data structures. Moreover, Neo4j have considered the best for handling graph data for

existing GDBs [18,19].

In order to handle our trace, our dependency analysis environment was implemented using the native Java Application Program Interface(API) of Neo4j and its query language named Cypher.

4 A Trace-partitioning Approach

In Section 3, we described how to store and process our trace on our dependency analysis environment using Neo4j. Our trace is expressed as graph data, which consists of nodes and edges. Therefore, the nodes and the edges unrelated to the graph data trace are not loaded into main memory when the dependency analysis is conducted. In short, memory efficiency of our dependency analysis environment is high. However, the size of the properties of a node or an edge that is loaded in main memory is large, this may likely to become a bottleneck of our dependency analysis environment. Especially, it goes double for becoming the bottleneck if the attribute is not related to dependency analysis. Therefore, we propose an approach for fixing this bottleneck.

4.1 Characteristics of Graph Database System

Initially, Neo4j manages graph data on hard disk drives until a query is issued. Once, a query is issued, Neo4j accesses the hard disk drive to load nodes and edges related to the query, into the main memory. Usually, nodes and edges not related to the query are not loaded.

If the nodes and the edges are loaded into main memory, their properties are also automatically loaded. Therefore, loading the properties into main memory is not efficient if the property is not related to an issued query. Moreover, this problem becomes a factor to produce useless disk access.

4.2 A Trace-partitioning for Memory Reduction

As we described in Section 4.1, loading properties unrelated to an issued query leads to the potential for memory inefficiency of GDB. Nodes and properties, which are not the target of dependency analysis, will not be loaded in the main memory while conduct-

ing the analysis. This is the characteristic of GDB, which is supported by the native graph engine.

We deal with this bottleneck by simply storing an extra node in GDB. The extra node is to store properties of node, which is the target of the dependency analysis. In this way, it is possible to load only nodes and its properties, which are targets of dependency analysis, and eliminate the unnecessary ones from the dependency analysis. We believe that this is the best way as it is more frequent to distinguish the kind of a node than to acquire properties of nodes.

We illustrate our proposed approach in using Fig. 3. At first, it is necessary to create a node and an edge. A

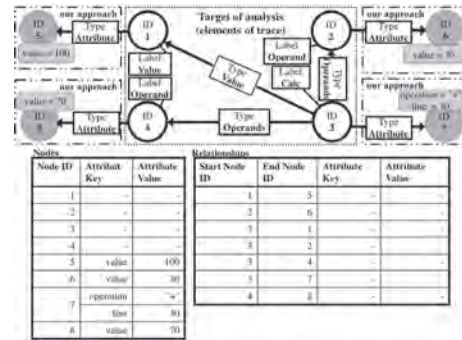


Fig. 3. Graph partitioning approach for proposed trace..

node plays the role of storing properties of node (node ID is 5, 6, 7, 8 in Fig. 3.), which is trace elements (node ID is 1, 2, 3, 4 in shown Fig. 3.) An edge plays the role of distinguishing certain node, which is an extra node for storing properties. We describe this node as a property-node, and this edge as a property-edge in this paper. Therefore, a change of the following graph structure occurs.

1. The number of nodes stored in a graph database system doubles.
2. One edge connecting with each nodes of the trace increases.

We assume that the time required for import processing of our trace increases by 1. However, graph traversal performance is influenced by the increase of the nodes, such as 1), intended only for the node where the graph traversal is connected to a certain node on

the native GDB such as Neo4j [20,21]. Then, instead of being able to reduce the loading of the properties of a node that is unnecessary for dependency analysis, one property-edge comes to is loaded with change 2). The specifications of Neo4j have a bigger fixed-length data size of the edge than the node on the disk [20,21]. However, we assume that a data size of edges loaded in the memory is low, because the number of edges such as references and dependencies is less than that of nodes. In addition, the time for confirming edges with the need to follow in the graph traversal by 2) increases once in all nodes and we predict that it makes the performance of graph traversal inefficient. Since our approach has a factor that can promote and not promote efficiency of dependency analysis as described above.

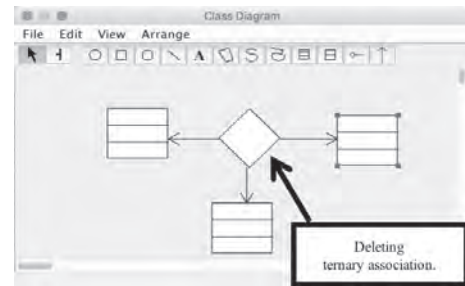
5 Preliminary Experiment

We propose a trace-partitioning approach for efficient dependency analysis in Section 4. In this section, we conduct a preliminary experiment for confirming the change of the analysis performance for an approximate application of our approach. We conduct this preliminary experiment on a kernel-based virtual machine with 64 GB RAM and the Cent OS 7 operating system.

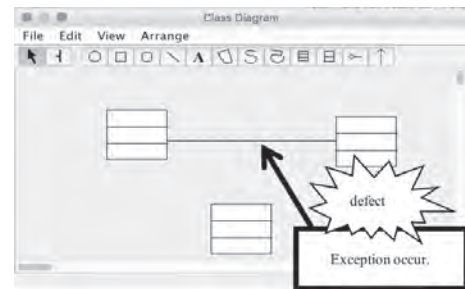
5.1 UML Editor “GEFDemo”

We used our trace for the execution of the demonstration program on the Graph Editing Framework (GEFDemo) [8] for dependency analysis in Section 5.2. GEFDemo is a simple Unified Modeling Language (UML) editor program that uses the application framework as shown in Fig. 4(a). A flaw, such as in Fig. 4(b), is known to occur during the delete operation, a ternary association, which is a defect in implementation of the GEFDemo.

Accurate inspection of the analysis program was possible because the cause of the defect shown in Fig. 4 was manually confirmed. The trace used in this experiment recorded the execution process of GEFDemo that intentionally produced an exception, as shown in



(a) Creating three Classes and a Ternary Association.



(b) Deleting a Ternary Association.

Fig. 4. Operating the GEFDemo Program.

Fig. 4 in the following procedure:

1. Creating three classes on the editor.
2. Creating an association for other classes from one class.
3. Creating an association for another association from the class that does not create an association.
4. A diamond object expressing the occurrence of a ternary connection occurs.
5. Deleting the diamond object.

The number of nodes in this trace was 510,370 and the number of relationships 4,437,367. Moreover, the trace into the GEFDemo contained 45 kinds of labels for nodes and 22 kinds of relationships. Furthermore, the amount of this trace was 292.63 MB.

5.2 Outdated-state Analysis

As described in Section 5.1, a defect of the GEFDemo was caused by changes in the process of execution of the program during the collection state, which is an object of Java. We used an outdated-state analysis, which is the approach of dependency analysis proposed by Kume et al. [7]. It can detect instructions that use different states of a specified object.

We executed the outdated-state analysis in a depen-

dependency analysis environment as described below:

1. Investigating method called in execution order one by one.
2. Investigating dependencies with state of objects with many instructions occurring in each method.
3. When analyzing an instrument concerning the change in the state of the object, a node was created to record the frequency of change of the object for a GDB.
4. Investigating instructions dependence on the combination of a new state and old states of the same object from nodes that we created by Procedure 3).

In Procedure 1), the outdated-state analysis consumed a large amount of memory because it was necessary to analyze instruments and values in a trace. Moreover, outdated-state analysis is a two-step process: (1) analyzing the trace, (2) creating the nodes and edges to record the status of objects (data generated during dependency analysis) on GDB in Procedure 1). Finally, it analyzes data generated in Procedure 3).

5.3 Effects on Entire Dependency Analysis

In this section, we measured the method’s time and memory consumption in order to evaluate the effectiveness of our approach for efficient dependency analysis in Section 4. Memory consumptions per second were recorded using vmstat, which is a UNIX command that can report information related to memory, paging, CPU activity, and so on, and can calculate the basic statistics of memory consumption. We conducted dependency analysis ten times as we described above.

Fig. 5 shows the results of two trace formats as the following:

NON: a non-transformational trace

ALL: a trace partitioned properties of each node in our trace using 4

Fig. 5(a) and Fig 8(b) show the average of memory consumption in the dependency analysis. In these

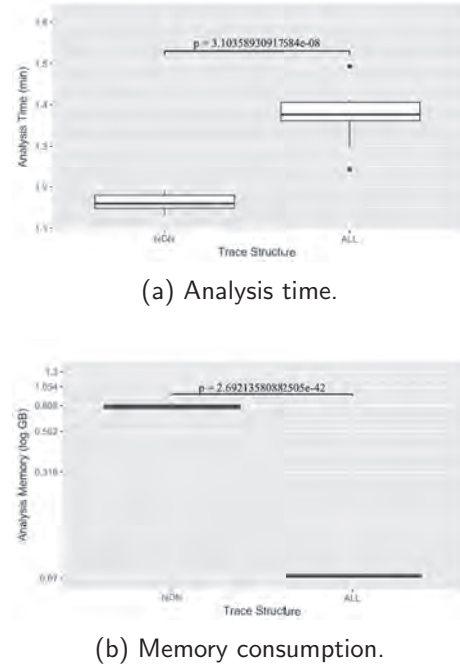


Fig. 5. Dependency analysis performance..

figures, NON represents our previously approach proposed in literature [7]. ALL refers to the naïve approach proposed in Section 4 and literature [12].

We conduct an independent t-test in order to confirm whether there are significant differences between average of the time consumption and average of the memory consumption. We calculate a t-value by Formula (1):

$$t = \frac{\bar{x}_{NON} - \bar{x}_{ALL}}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (1)$$

where x_{NON} denotes ten values of time consumption or memory consumption in a case of NON, \bar{x}_{NON} denotes the mean of x_{NON} , x_{ALL} denotes ten values of time consumption or memory consumption in a case of ALL, \bar{x}_{ALL} denotes the mean of x_{ALL} , n_{NON} and n_{ALL} are sample size of x_{NON} and x_{ALL} , and s is pooled variance with x_{NON} and x_{ALL} .

The two p-values in Fig. 5 indicated that ALL could not reduce time consumption and memory consumption for dependency analysis compared with those of NON. On the contrary, our naïve approach worsen this performance.

5.4 Inefficient Processing in our Approach

We assume that the time required for importing a trace increases due to the above sorting 1). However,

graph traversal performance is not influenced by the increase in the number of nodes; it is intended only for the node where graph traversal is connected to a certain node in Neo4j. On the other hand, instead of preventing the loading of property of a node that is unnecessary for analysis, a property-relationship is loaded with sorting 2). The fixed-length data size of edge on the Neo4j is larger than that of the node. However, we can assume that the data size of edges loaded in the memory is small because the size of a property of the edges, such as references and dependencies, is less than that of the nodes. The time needed to confirm the edges needed to traverse the graph traversal by sorting 2) increases in all nodes, and we predict that it leads to inefficient graph traversal performance.

Moreover, if it is necessary to access a property, the property-relationship is traversed during dependency analysis. Since traversing property-relationship is not necessary in the case of an original trace, as the number of processes increases, efficiency worsens.

Furthermore, there are difference instructions referred same object, same variable, and same element of array in runtime program. In this case, the trace has many pair of nodes; one is different two node implied instructions, other is same node implied object. Then, it is inefficient to traverse same node many times during dependency analysis.

6 Improving and Extending our Approach

The loading nodes, the edges, and their properties used for dependency analysis are very important for the efficient use of the main memory. Neo4j supported on-disk-database, which loads the properties of node and edge when the nodes and edges are loaded. However, not all of the loaded properties are used for all dependency analyses. Therefore, we focused on the selection of loading properties.

In the previous study [12], we proposed an approach for partitioning our trace that can load properties as needed. However, this did not help improve the dependency analysis performance. Therefore, we formulate a

```

Require:  $N_{node}, N_{attr}, N_{trav}$ 
for each  $l \in L$  do
    {Not applying proposed approach to all
    labels of the node.}
    {Initializing  $f$  of the dictionary type.}
    {The key of  $f$  is  $l \in L$ , and let the value be
    false.}
     $f[l] \leftarrow$  false
end for
for each  $l \in L$  do
     $before \leftarrow S_{attr}(f, N_{attr}, N_{node})$ 
     $f[l] \leftarrow$  true {Applying our approach to  $l$ .}
     $after \leftarrow S_{attr}(f, N_{attr}, N_{node})$ 
     $traversal \leftarrow S_{trav}(f, N_{trav}, N_{node})$ 
    if  $before > after$  and  $traversal = 0$  then
        continue
    else
         $f[l] \leftarrow$  false {Not applying our approach
        to  $l$ .}
    end if
end for
return  $f$ 

```

Fig. 6. Optimization algorithm for the proposed approach..

rule in this section to determine whether a given property should be loaded for a given trace in literature [11].

Moreover, we extend our approach to enable rapid access to a node, which is accessed once during dependency analysis.

6.1 Optimization Algorithm for our Approach

The purpose of this approach is to reduce the memory consumed by the properties of the nodes to improve the efficiency of graph traversal. However, our previous approach [12] has been unable to improve the effectiveness of traversing the proposed trace because we had not considered the situation where the properties of each node are loaded into the main memory. As a result, the previous approach made additional traversals to analyze property-relationships. The traversal of property-relationships does not occur in the original structure of the trace; hence, we propose an algorithm to automatically determine the node needed for the approach in order to avoid creating properties over and above those that are required. If a minimum number

of such properties can be loaded into the main memory, the effectiveness of the proposed approach will improve.

To automatically determine the node in this approach, the analytical algorithm of our dependency analysis environment needs to be recognized. That is to say, one needs to understand that the algorithm traverses nodes and loads their properties in the trace using our approach. In this case, our approach requires knowing the number of properties loaded from all nodes, with each node labeled as N_{trav} . At the same time, it also requires knowing the number of properties denoted by N_{attr} .

However, we cannot correctly estimate N_{trav} because the dependency analysis is dynamically executed depending on the value of the property in the trace. Hence, we assume that all nodes of the trace can be traversed, and the maximum number of loading properties of nodes is N_{trav} . In short, we decide to partition the properties of node into extra node when a loading property has the potential to obtain the property of node.

We developed an algorithm for the automatic application of our approach, as stated above. This algorithm is shown in Fig. 6. Given a set of labels of nodes as L , every node is labelled $l \in L$ as $N_{node}(l)$ in Fig. 6, and every property is labelled as N_{attr} . We also represent the frequency of the properties of loading nodes with label $m \in L$ when reaching label $l \in L$ of a node. Note that we take into account the identification of these labels ($l = m$).

We now introduce criteria for applying the proposed approach. S_{attr} is the sum of the number of loading properties while conducting dependency analysis, and S_{trav} is the sum of the number of traversing property-relationships. We can estimate these criteria using N_{node} , N_{attr} and N_{trav} , respectively. $S_{attr}(L)$ and $S_{trav}(L)$ can be calculated as Formula (2), Formula (3):

$$S_{attr}(L) = \sum_{l \in L} s_{attr}(l, \mathbf{f}[l]) \quad (2)$$

where :

$$s_{attr}(l, \mathbf{f}[l]) = \begin{cases} N_{attr}(l) \cdot N_{node}(l) & \text{if } \mathbf{f}[l] = \text{false} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$S_{trav}(L) = \sum_{l \in L} s_{trav}(l, \mathbf{f}) \quad (3)$$

where :

$$s_{trav}(l, \mathbf{f}) = \begin{cases} \sum_{m \in L} N_{trav}(l, m) \cdot N_{node}(m) & \text{if } \mathbf{f}[m] = \text{true} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

In Formula (2), $s_{attr}(l, \mathbf{f}[l])$ is calculated to multiply the number of loading properties of nodes labeled l by the number of nodes labeled l in GDB. In Formula (3), we also calculate $s_{trav}(l, \mathbf{f})$ to multiply the number of traversing property-relationships connected with nodes labeled m when reaching nodes labeled l . Note that the value of $s_{attr}(l, \mathbf{f}[l])$ is zero if the label l is applied because it does not obtain the traversal of a property-relationship.

Finally, our algorithm produces \mathbf{f} , which is a combination of whether the proposed approach is applied. This \mathbf{f} allows for dependency analysis without traversing property-relationships and minimizes the sum of loading properties S_{attr} .

6.2 Reducing Frequency to Traverse Same Node

In a trace, there are many instructions, which refer to the same variables and objects. As described above, a trace have many-to-one relationships between instructions and object. For example, instructions 1 and 2 refer and use same object in Fig. 7. Our dependency analysis environment traverses nodes and relationships one by one as we described in Section 3.2. Thus, our environment loads the same node many times during dependency analysis when traversing many-to-one relationships. We have to solve this inefficiency of our environment as a way to keep loading nodes, which have many-to-one relationships when the node are loading to main memory in the first time.

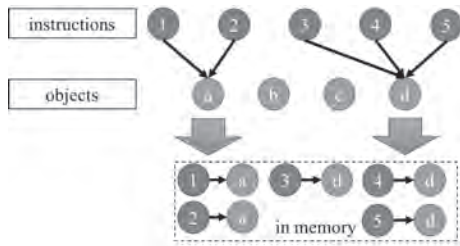


Fig. 7. Target combinations of instruction and object in this approach.

In this paper, therefore, we solve the problem as described above by loading a pair of nodes, which have many-to-one relationship if traversed in the algorithm of dependency analysis. For example, our environment keep loading combination of instruction and object such as instruction 1 to object a, 2 to a, 3 to d, 4 to d, and 5 to d, to main memory in the case of Fig. 7. However, if many-to-one relationships are not traversed in algorithm of dependency analysis, our environment does not load it to the main memory.

7 Experimental Evaluations

As described in Section 4.2, we proposed an approach for solving the bottleneck in memory consumption in dependency analysis environments. In this section, we report an experiment to verify the effectiveness of our approach. For the assessment of macroscopic dependency analysis, not only is it necessary that memory consumption be evaluated, the time consumed for it is also a crucial factor to bear in mind. We assessed the improvement in analysis performance using the proposed approach by measuring the memory consumption and analysis time needed for dependency analysis.

We compared the experimental results with the following trace conditions:

NON: a non-transformational trace

ALL: a trace partitioned properties of each node in our trace using our previous approach as we described in Section 4

OPT: a trace employed partitioning approach for a few nodes selected by the rule as we described in

Section 6.1.

We conducted experimental evaluations on same machine in Section 5.

7.1 Comparing our Approaches

We conducted same experimental evaluation with NON, ALL, and OPT in Section 7.1.

As a result, our approach employed proposed rules in Section 6.1 labeled OPT worsen the memory efficiency compared with naïve approach for partitioning property of all nodes labeled ALL as suspected. However, OPT enables to massively reduce 43.1% of memory consumption compared with original trace format as NON. The six p-values in Fig. 8 indicated that OPT could reduce time consumption and memory consumption of dependency analysis compared with those of ALL; however, we could not find any difference in traversal times for dependency analysis. In short, OPT can conduct dependency analysis with the same efficiency as NON but consumes less memory using Fig. 6. On the other hand, ALL could not conduct dependency analysis with the same efficiency and memory consumption as NON and OPT. Therefore, it can be concluded that Fig. 6 can help considerably improve memory consumption for dependency analysis with the same efficiency as NON.

7.2 Evaluation for Scalability and Analysis Speed

In this experiment, we evaluate the scalability and analysis speed of our approach as described in Section 6. We prepare four programs of Ashes2 [22] as the following list:

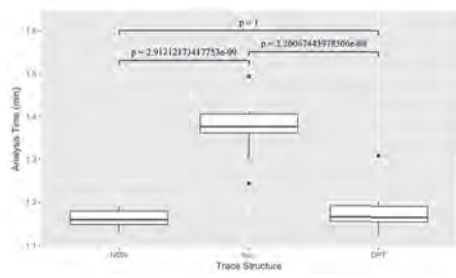
BiSort: a program to conduct Bitonic Sort [23]

Em3d: an integrated software application designed to facilitate the analysis and visualization of electron microscope tomography data [24]

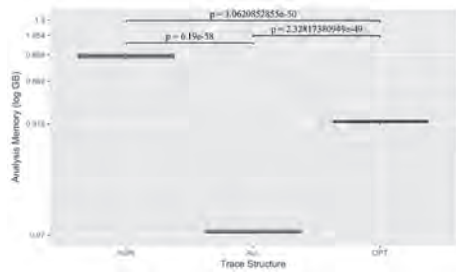
MST: a program to find Minimum Spanning Tree

TreeAdd: a program to recursively traverse a tree by depth-first

These programs enable us to set a few options for adjusting the amount of calculation. We set up options of each program as shown Table 1 in order to prepare traces in various data amount. In this experiment, we



(a) Analysis time.



(b) Memory consumption.

Fig. 8. Dependency analysis performance compared with NON, ALL, and OPT..

conduct dependency analysis with six situations; this is combination of three types trace format and two cases whether or not our approach is employed. We label six situations as “NON non-approach”, “NON approach”, “ALL non-approach”, “ALL approach”, “OPT non-approach”, and “OPT approach”. We conducted dependency analysis 20 times with these traces in TABLE 1.

We show the result of this experiment TABLE 2, TABLE 3, and TABLE 4. TABLE 2 shows the averages of time consumption in the case of a trace formatted NON, TABLE 3 shows one in the case of a trace formatted ALL, and TABLE 4 shows one in the case of a trace formatted OPT.

Moreover, we conducted a paired t-test with the result of experimental evaluation as shown TABLE 2, TABLE 3, and TABLE 4. We calculated a t-value by Formula (4):

$$t = \frac{\bar{d} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (4)$$

where \bar{d} denotes the mean of differences among two samples, μ denotes the population mean value, s denotes variance of d , and n denotes a sample size, in short, $n = 20$.

Table 1. A list of programs in Ashes2.

program	options	data amount [MB]
BiSort	-s 0025	2.0
	-s 0100	12.0
	-s 0250	31.0
	-s 0400	68.0
	-s 0550	141.0
	-s 0700	150.0
	-s 0850	163.0
Em3d	-n 0050 -d 005	23.0
	-n 0100 -d 005	46.0
	-n 0150 -d 005	69.0
	-n 0200 -d 005	93.0
	-n 0250 -d 005	117.0
	-n 0300 -d 005	141.0
	-n 0350 -d 005	166.0
Mst	-v 0016	7.0
	-v 0024	15.0
	-v 0032	28.0
	-v 0040	44.0
	-v 0048	63.0
	-v 0064	113.0
TreeAdd	-l 05	0.3
	-l 10	7.6
	-l 11	16.0
	-l 12	33.0
	-l 13	69.0
	-l 14	142.0

As a result, our approach labeled “OPT approach” enables reduce nine seconds on average compared with the situation labeled “NON non-approach”. The sum of time consumptions in the situation labeled “OPT approach” was 4.3% lower than the situation labeled “NON non-approach”. Moreover, the result of paired t-test shows there is significant difference of time consumption between “NON non-approach” and “OPT approach” as shown TABLE 5. Furthermore, the situation labeled “OPT approach” has the best performance in all situations.

Then, we draw two line graphs as shown Fig. 9(a) and Fig. 9(b). Fig. 9(a) shows the result in the situation labeled “NON non-approach”, and Fig. 9(b) shows the result in the situation labeled “OPT approach”. As shown Fig. 9(a) and Fig. 9(b), we can reduce the time

Table 2. The average of analysis time with NON.

trace	NON	
	non-approach mean (\pm SD) [msec.]	NON approach mean (\pm SD) [msec.]
bisort-s0025	0.17 (\pm 0.03)	0.17 (\pm 0.03)
bisort-s0250	0.96 (\pm 0.04)	0.93 (\pm 0.03)
bisort-s0550	3.85 (\pm 0.12)	3.81 (\pm 0.09)
bisort-s0700	4.03 (\pm 0.12)	3.93 (\pm 0.11)
bisort-s0850	4.15 (\pm 0.09)	4.02 (\pm 0.10)
em3d-n0050d005	0.96 (\pm 0.03)	0.93 (\pm 0.04)
em3d-n0100d005	2.17 (\pm 0.16)	2.05 (\pm 0.13)
em3d-n0150d005	3.78 (\pm 0.34)	3.69 (\pm 0.22)
em3d-n0200d005	6.39 (\pm 0.55)	5.99 (\pm 0.47)
em3d-n0250d005	9.59 (\pm 0.40)	9.22 (\pm 0.45)
em3d-n0300d005	12.46 (\pm 0.67)	12.44 (\pm 0.61)
em3d-n0350d005	16.72 (\pm 0.59)	16.74 (\pm 0.80)
mst-v0016	0.48 (\pm 0.02)	0.45 (\pm 0.05)
mst-v0024	0.86 (\pm 0.03)	0.85 (\pm 0.03)
mst-v0032	1.59 (\pm 0.09)	1.51 (\pm 0.05)
mst-v0040	2.65 (\pm 0.08)	2.56 (\pm 0.12)
mst-v0048	4.21 (\pm 0.09)	4.04 (\pm 0.09)
mst-v0064	9.80 (\pm 0.37)	9.89 (\pm 0.26)
treeadd-l05	0.12 (\pm 0.01)	0.11 (\pm 0.01)
treeadd-l10	0.47 (\pm 0.03)	0.39 (\pm 0.04)
treeadd-l11	0.70 (\pm 0.02)	0.68 (\pm 0.03)
treeadd-l12	1.14 (\pm 0.03)	1.14 (\pm 0.06)
treeadd-l13	2.14 (\pm 0.08)	2.15 (\pm 0.09)
treeadd-l14	4.33 (\pm 0.21)	4.27 (\pm 0.12)

SD: standard deviation

consumed for processing dependency analysis. However, in every situation, there is big difference of the time consumption for processing of dependency analysis even if there is a the difference in the trace.

8 Consideration

In this section, we consider the performance and the scalability of our approach. Our approach labeled “OPT approach” is the best performance in six situations from the aspect of the memory consumption and the time consumption for processing dependency analysis. Our approach in Section 6.1 avoids loading properties of the accessed node, leading to reduced memory consumption for processing dependency analysis. However, we cannot reduce time consumption for processing dependency analysis because it is less time-consuming to access a property of node. On the other hand, our expanded approach as described in Section 6.2 enables to reduce the time consumption for processing dependency analysis. The reason is that

Table 3. The result of analysis time with ALL.

trace	ALL	
	non-approach mean (\pm SD) [msec.]	ALL approach mean (\pm SD) [msec.]
bisort-s0025	0.08 (\pm 0.01)	0.09 (\pm 0.01)
bisort-s0250	0.97 (\pm 0.03)	0.95 (\pm 0.05)
bisort-s0550	4.11 (\pm 0.17)	4.10 (\pm 0.10)
bisort-s0700	4.51 (\pm 0.17)	4.37 (\pm 0.15)
bisort-s0850	4.69 (\pm 0.14)	4.68 (\pm 0.23)
em3d-n0050d005	0.90 (\pm 0.06)	0.99 (\pm 0.05)
em3d-n0100d005	2.19 (\pm 0.13)	2.18 (\pm 0.15)
em3d-n0150d005	3.90 (\pm 0.23)	3.84 (\pm 0.24)
em3d-n0200d005	6.73 (\pm 0.63)	6.56 (\pm 0.47)
em3d-n0250d005	9.71 (\pm 0.60)	9.73 (\pm 0.52)
em3d-n0300d005	13.41 (\pm 0.63)	12.91 (\pm 0.68)
em3d-n0350d005	17.49 (\pm 0.71)	16.69 (\pm 0.95)
mst-v0016	0.32 (\pm 0.01)	0.32 (\pm 0.01)
mst-v0024	0.76 (\pm 0.04)	0.74 (\pm 0.04)
mst-v0032	1.59 (\pm 0.07)	1.56 (\pm 0.05)
mst-v0040	2.84 (\pm 0.14)	2.78 (\pm 0.17)
mst-v0048	4.53 (\pm 0.15)	4.39 (\pm 0.13)
mst-v0064	10.39 (\pm 0.22)	10.37 (\pm 0.22)
treeadd-l05	0.02 (\pm 0.00)	0.02 (\pm 0.00)
treeadd-l10	0.30 (\pm 0.01)	0.30 (\pm 0.02)
treeadd-l11	0.63 (\pm 0.04)	0.62 (\pm 0.04)
treeadd-l12	1.23 (\pm 0.06)	1.17 (\pm 0.05)
treeadd-l13	2.33 (\pm 0.09)	2.30 (\pm 0.08)
treeadd-l14	4.87 (\pm 0.09)	4.80 (\pm 0.13)

accessing to main memory is more efficient than accessing to GDB after all.

However, our approach was better but by no means great. Our approach enabled to improve the efficiency of graph traverse, but our approach did not reduce the number of graph traversal during dependency analysis. Moreover, our approach did not account for the difference of characteristic of program. Therefore, it led to a major difference in time consumed even if traces are same amount as described in Section . In order to close the difference among different traces, we have to take in to account the structure of programs.

9 Conclusion

In this paper, we developed a prototype dependency analysis environment for efficient dependency analysis of large traces using complex graph structures. Our analysis environment is built on a graph database system that can efficiently traverse large and complex graph data. For efficient dependency analysis, moreover, we proposed trace partitioning based on the graph structure, and introduced a policy to restrict the

Table 4. The result of analysis time with OPT.

trace	OPT	OPT
	non-approach	approach
	mean (\pm SD) [msec.]	mean (\pm SD) [msec.]
bisort-s0025	0.07 (\pm 0.00)	0.07 (\pm 0.01)
bisort-s0250	0.79 (\pm 0.05)	0.76 (\pm 0.05)
bisort-s0550	3.88 (\pm 0.12)	3.81 (\pm 0.12)
bisort-s0700	4.14 (\pm 0.13)	3.90 (\pm 0.18)
bisort-s0850	4.14 (\pm 0.13)	4.09 (\pm 0.17)
em3d-n0050d005	0.73 (\pm 0.06)	0.71 (\pm 0.06)
em3d-n0100d005	2.06 (\pm 0.16)	2.02 (\pm 0.15)
em3d-n0150d005	3.86 (\pm 0.25)	3.63 (\pm 0.33)
em3d-n0200d005	6.18 (\pm 0.51)	6.11 (\pm 0.45)
em3d-n0250d005	9.85 (\pm 0.53)	9.48 (\pm 0.54)
em3d-n0300d005	12.38 (\pm 0.90)	12.40 (\pm 0.90)
em3d-n0350d005	16.49 (\pm 0.81)	16.19 (\pm 0.64)
mst-v0016	0.29 (\pm 0.01)	0.28 (\pm 0.01)
mst-v0024	0.65 (\pm 0.04)	0.63 (\pm 0.03)
mst-v0032	1.36 (\pm 0.05)	1.32 (\pm 0.05)
mst-v0040	2.52 (\pm 0.07)	2.53 (\pm 0.09)
mst-v0048	4.09 (\pm 0.10)	4.09 (\pm 0.22)
mst-v0064	9.79 (\pm 0.22)	9.72 (\pm 0.23)
treadd-l05	0.02 (\pm 0.00)	0.02 (\pm 0.00)
treadd-l10	0.27 (\pm 0.02)	0.26 (\pm 0.01)
treadd-l11	0.50 (\pm 0.01)	0.49 (\pm 0.03)
treadd-l12	0.99 (\pm 0.03)	0.95 (\pm 0.04)
treadd-l13	2.11 (\pm 0.07)	2.09 (\pm 0.10)
treadd-l14	4.47 (\pm 0.10)	4.37 (\pm 0.09)

number of loading operations on a node’s properties to the main memory in order to improve the effect of our approach. Furthermore, we proposed an approach to reduce loading same node to main memory during dependency analysis.

In an experimental evaluation, our approach performed best in all situations. Our approach reduced time consumption 4.3% for processing dependency analysis compared to techniques not employing our approach.

In future work, we are going to develop an original GDB applying our approach in this paper. This is because the GDB has a possibility of the reduction of the memory consumption for analyzing graph data. That is to say, our GDB may efficiently manage all kinds of data with graph structures in the near future.

References

- 1) Andreas Zeller. *Why Programs Fail, Second Edition: A Guide to Systematic Debugging*. Morgan Kaufmann, 2009.
- 2) Mark Weiser. Program slicing. In *International Conference on Software Engineering*, pp. 439–449. IEEE,

Table 5. The mean of difference calculated by paired t-test [sec.].

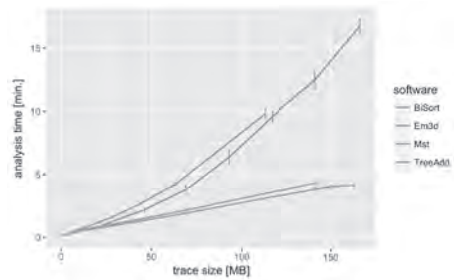
	2)	3)	4)	5)	6)
1) NON non-approach	** 4.41	** -11.33	* 5.66	-0.74	** 9.55
2) NON approach	–	** -15.73	-5.15	1.25	** 5.14
3) ALL non-approach	–	–	* 10.59	** 16.99	** 20.88
4) ALL approach	–	–	–	6.40	10.29
5) OPT non-approach	–	–	–	–	** 3.89
6) OPT approach	–	–	–	–	–

*: five percent level of significance

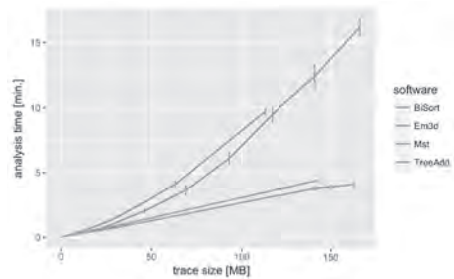
** : one percent level of significance

1981.

- 3) Jorge Ressoa, Alexandre Bergel, and Oscar Nierstrasz. Object-centric debugging. In *International Conference on Software Engineering*, pp. 485–495. IEEE, 2012.
- 4) Bil Lewis. Debugging backwards in time. In *In Proceedings of the Fifth International Workshop on Automated Debugging*, pp. 225–235, 2003.
- 5) Andrew J. Ko and Brad A. Myers. Designing the why-line: a debugging interface for asking questions about program behavior. In *SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 151–158. ACM, 2004.
- 6) Adrian Lienhard, Tudor Girba, and Oscar Nierstrasz. *Practical Object-Oriented Back-in-Time Debugging*, pp. 592–615. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- 7) Izuru Kume, Masahide Nakamura, Naoya Nitta, and Etsuya Shibayama. A Case Study of Dynamic Analysis to Locate Unexpected Side Effects Inside of Frameworks. *International Journal of Software Innovation*, Vol. 3, No. 3, pp. 26–40, 2015.
- 8) gefdemo project. <http://gefdemo.tigris.org/>. [retrieved: 1 Mar. 2017].
- 9) Tao Wang and Abhik Roychoudhury. Using compressed bytecode traces for slicing java programs. In *International Conference on Software Engineering*, pp. 512–521. IEEE, 2004.
- 10) John Hogg. Islands: Aliasing protection in object-oriented languages. In *OOPSLA*, pp. 271–285, 1991.
- 11) Kazuma Kusu, Izuru Kume, and Kenji Hatano. A node access frequency based graph partitioning technique for efficient dynamic dependency analysis. In *Proceedings of The Ninth International Conferences on Advances in Multimedia*, pp. 73 – 78, 2017.



(a) Not our approach with trace formatted NON



(b) Our approach with trace formatted OPT

Fig. 9. Dependency analysis performance..

- 12) Kazuma Kusu, Izuru Kume, and Kenji Hatano. A trace partitioning approach for efficient trace analysis. In *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Computing & Information Technology, 2016 4th Intl Conf on Applied Computing and Information Technology / 3rd Intl Conf on Computational Science/Intelligence and Applied Informatics / 1st Intl Conf on Big Data, Cloud Computing, Data Science & Engineering*, pp. 133 – 140, 2016.
- 13) Adrian Lienhard. *Dynamic Object Flow Analysis*. Lulu.com, 2008.
- 14) Adrian Lienhard, Tudor Gîrba, Orla Greevy, and Oscar Nierstrasz. Exposing side effects in execution traces. In *International Workshop on Program Comprehension through Dynamic Analysis*, pp. 11–17, 2007.
- 15) David J. Agans. *Debugging: the 9 Indispensable Rules for Finding Even the Most Elusive Software and Hardware Problems*. AMACOM, 2002.
- 16) The property graph model. <http://github.com/tinkerpop/blueprints/wiki/Property-Graph-Model>. [retrieved: March 2017].
- 17) Graph database neo4j. <http://neo4j.com/>. [retrieved: 1 Mar. 2017].
- 18) Vojtěch Kolomičenko, Martin Svoboda, and Irena Holubová Mlýnková. Experimental comparison of graph databases. In *Proceedings of International Conference on Information Integration and Web-based Ap-*

plications & Services, IIWAS '13, pp. 115:115–115:124. ACM, 2013.

- 19) Salim Jouili and Valentin Vansteenbergh. An empirical comparison of graph databases. In *Proceedings of the 2013 International Conference on Social Computing, SOCIALCOM '13*, pp. 708–715. IEEE Computer Society, 2013.
- 20) Ian Robinson, Jim Webber, and Emil Eifrem. *Graph Databases*. O'Reilly Media, Inc., 2015.
- 21) Sonal Raj. *Neo4J High Performance*. Packt Publishing, 2015.
- 22) Benchmark programs named ashes2. <http://www.sable.mcgill.ca/~bdufou1/ashes2/>. [retrieved: September 2017].
- 23) Kenneth E. Batcher. Sorting networks and their applications. In *Proceedings of the April 30–May 2, 1968, Spring Joint Computer Conference, AFIPS'68*, pp. 307–314. ACM, 1968.
- 24) Em3d. <http://em3d.stanford.edu/about.html>. [retrieved: September 2017].

Roadside-Assisted V2V Messaging for Connected Autonomous Vehicle

Manabu TSUKADA*

(Received April 24, 2018)

Vehicle-to-vehicle (V2V) messaging is an indispensable tool for real-time dynamic information sharing in cooperative Intelligent Transportation Systems (ITSs). Although V2V standards are specified in the European Union, United States, and Japan, all such standards suffer from a set of common drawbacks. In this paper, we first analyze these issues and derive a problem statement. We then propose a roadside-assisted V2V messaging scheme in which roadside units construct a database of dynamic information obtained from sensors and transmit data to nearby and remote vehicles. We also design a common solution to the problem of differing regional standards by making the system independent of any specific set of standards. Finally, we analyze the potential requirements for designing a specification of roadside-assisted V2V messaging. The proposed system is designed to be technically compatible with 5G mobile edge computing.

Key words F Cooperative ITS; Vehicle-to-Vehicle; Standard; VANET; Internet

1 Introduction

Road transport is an essential infrastructure for supporting human activity; at the same time, it introduces many problems, including traffic accidents and congestion, air pollution, and increased energy consumption. Solving the problems of road transport is therefore a key to making road travel safer, more efficient, and more pleasant. Autonomous vehicles are currently attracting the attention of researchers and engineers; however, stand-alone autonomous vehicles simply replace human perception, decision-making, and maneuvering with computer control. Taking the concept one step further, Intelligent Transportation Systems (ITSs) can, for example, improve perception where there are blind spots in vehicle sensors by connecting vehicles to roadside units.

Road networks are interconnected among countries and, in the many cases where there are insignificant barriers, vehicles can easily cross country borders. To enable interoperability among countries, cooperative

ITS need to be developed based on universal architecture, protocols, and technologies. To standardize cooperative ITS, the International Organization for Standardization (ISO) Technical Committee 204 Working Group 16 (TC204 WG16) (also known as Communications Architecture for Land Mobile (CALM)), in coordination with the European Telecommunications Standards Institute (ETSI) TC ITS, is developing a standard architecture for cooperative ITS called the ITS Station reference architecture^{1, 2)}. In the US, the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) is standardizing a Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) architecture in the IEEE 1609 family of standards³⁾ as well as an IEEE802.11 variant for vehicular communication, IEEE802.11p⁴⁾.

Vehicle-to-vehicle (V2V) messaging is indispensable for implementing cooperative ITS involving real-time information sharing among vehicles of, for example, vehicle position data. As V2V message standards, the Cooperative Awareness Message (CAM)⁵⁾, Basic Safety Message (BSM)⁶⁾, and Advanced Safety Vehicle (ASV) have been specified in the EU, US, and Japan,

* The University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan
Telephone : +81-3-5841-7465
E-mail : tsukada@hongo.wide.ad.jp

respectively. Messages are transmitted by single-hop broadcasting via 5.8 ~ 5.9Ghz ITS wireless media (i.e. IEEE802.11p⁴⁾) under the EU and US standards and by 760 Mhz ITS wireless media in Japan.

In theory, connected autonomous vehicles can be made aware via wireless single-hop V2V messaging of other, out-of-sight vehicles. However, the three schema described above have four potential problem areas: 1) mixed environments in which V2V message receivers cannot receive messages from vehicle without V2V transmitters; 2) V2V messages may be lost because of interference and obstacles filtering wireless communication; 3) communication ranges are limited to within the wireless range; and 4) V2V message exchange systems are vulnerable to malfunctions in sender vehicles and to malicious messaging.

In this paper, we first present an analysis of a problem statement on the above issues. To develop a potential solution addressing all the problems, we investigate a roadside-assisted V2V messaging scheme embodying a real-time cyber-physical system (CPS) comprising sensing technology and a V2V and Vehicle-to-Infrastructure (V2I) network. To take advantages of these technologies, we design a system that employs ITS dedicated media, cellular media, and IPv6. As V2V messaging systems under the EU, US, and Japanese share the four problems above, we investigate a common solution for all standards and propose adapting a layer of localization to the standards in each country.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 describes the problem statement on V2V message exchange. Section 3 presents details of our potential solution, called roadside-assisted V2V messaging. Section 4 analyzes the requirements for the potential solution. Section 5 introduces related works. Finally, Section 6 concludes the paper by summarizing the main discussion and addressing future work.

2 Problem Statement

In this section, we first describe a general scenario using the V2V messaging. Then, we analyse four potential issues arisen in the scenario.

2.1 Scenarios

In the ITS station reference architecture, neighboring vehicle information obtained by V2V messaging is stored in the Local Dynamic Map (LDM)⁷⁾⁸⁾ specified in the facilities layer, which provides a set of common functionalities shared by several applications for various tasks. The LDM supports various ITS applications by maintaining information on objects influencing or comprising the traffic, including highly dynamic data such as vehicle, roadside, and traffic conditions and the presence of accidents.

The LDM data, as updated by the V2V messaging, enables a connected autonomous vehicle to be aware of other vehicles out of the line of sight. Figure 1 illustrates a case in which the LDM provides accurate information to vehicles near an intersection. The lower layer of Figure 1 shows the physical space in which the road, vehicles, and a pedestrian are located, while the upper layer represents the parallel cyber space in which networked computers maintaining data that can be modified, exchanged, and shared. In the ITS station architecture, digital data received as CAMs from neighboring vehicles are stored in the LDM. In the following, we describe the protocol used the EU; however, the scenario described below applies in the US and Japan as well.

In the case shown in Figure 1, vehicle 1 is made aware via a driver assistance alert of other vehicles behind the building. If the LDM provides accurate information that the other vehicles are not on a collision course, vehicle 1 does not need to stop before the intersection.

2.2 Issues

The above scenario assumes that all cyber-physical systems are working correctly, that V2V messages from all of the vehicles and the pedestrian are successfully delivered to vehicle 1, and that the LDM of the vehicle is kept up-to-date with respect to the surrounding

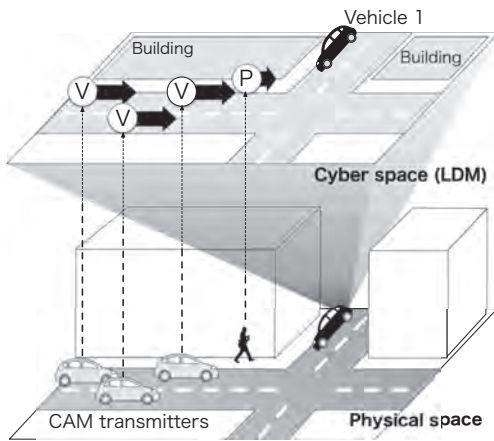


Fig. 1. LDM and V2V messaging.

environment.

In real situations, however, physical space information is often not projected correctly into cyber space. In the section, we describe the issues of cyber physical projection using V2V messaging.

- **Mixed Environment**

To detect all vehicles using V2V messaging, all vehicles must be equipped with at least sender-side V2V device functionality. In this regard, the penetration of V2V devices is the key factor to enabling cooperative ITS. The US National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) had studied the possibility of implementing regulation to require V2V devices in new light vehicles ⁹⁾. However, regardless of the level of such deployment old vehicles will likely lack V2V devices, and thus we should consider mixed environments in which V2V-enabled vehicles operate among legacy vehicles.

Beyond legacy vehicles, it is important for cooperative ITS to accommodate pedestrians and bicycles, which are also generally not equipped with V2V sender devices. The current assumption of V2V messaging excludes such non-V2V aware nodes and therefore their presence is not projected into cyber space. Again, this strongly suggests that V2V messaging requires adaptation to mixed environments in which V2V-aware vehi-

cles and non-aware nodes (legacy vehicles, pedestrians, and cyclists) coexist.

- **Interference and Obstacle**

V2V messages are broadcast over ITS-dedicated media (ITS-5G or 760Mhz) within a single-hop distance. Messages may be lost in delivery if there are obstacles between the nodes that screen wireless radio propagation. On the road, such obstacles would include buildings, bridges, tunnels, hills, and heavy vehicles. In the above case that the V2V message does not reach the receiver, the physical information is not reflected accurately to the cyber space. The V2V receiver (Vehicle 1 in Figure 1) is not aware of the other vehicles presence or it is only aware of the old information. V2V messaging needs the solution to ensure message delivery.

- **Limited wireless range**

V2V messages cannot be delivered beyond the range of wireless radio propagation from the sender vehicle. This range is often described as being from 500 m to 1 km when using ITS-5G in an ideal environment with a clear line of sight; however, the distance often becomes shorter in non-line-of-sight scenarios.

- **Malfunctioning and malicious message**

In V2V systems, physical information is projected into cyber space based on data obtained from received V2V messages. In such cases, the receiver must be able to trust the sent information. To ensure trust, NHTSA's current research is based on the assumption that V2V systems will use Public Key Infrastructure (PKI) to authenticate messages ⁹⁾. However, such V2V systems would still be vulnerable to malfunctions of sender vehicles in which senders broadcast incorrect information (e.g., position, time, or speed). Such situations can be caused by GPS signal loss or metering device hardware problems. Alternatively, senders may broadcast V2V messages with incorrect in-

formation generated by software bugs or even false information generated by malicious software.

In the cases above, a receiver will generally not have the capability of validating the information in the V2V messages and incorrect physical data will be projected into cyber space. This underscores the importance of identifying and excluding incorrect or falsified physical information in the V2V message exchange process.

3 On the Design of Roadside-assisted V2V messaging

To solve the issues of 1) mixed environments and 2) interference and obstacles described in Section 2, we previously proposed a roadside assisted V2V messaging scheme called Proxy CAM. The system is compliant with EU V2V message standards (CAM) and can be adapted to the other standards (US and Japan) by adopting their V2V message formats (BSM and ASV, respectively). With some extension, the scheme represents a potential solution to all of the issues raised in Section 2.

In this section, we briefly describe our previous work (Proxy CAM¹⁰) and then propose some extensions to Proxy CAM for a complete solution to all four issues raised in the preceding section.

3.1 Proxy Cooperative Awareness Message

An overview of Proxy CAM¹⁰ is shown in Fig. 2. In the system, roadside sensors detect vehicles and obtain relevant information for each vehicle including position, velocity, and acceleration. The vehicle information obtained from the sensors is then sent to a server located in the system infrastructure and stored in a database. The database generates CAMs from its stored data and broadcasts these from roadside transmitters. CAM-supported vehicles receive the CAMs and store the information in their LDMS following a reception procedure identical to that involved in the baseline CAM process (Proxy CAM), and receiver vehicles' ITS applications can access the data from this Proxy CAM.

In the following sections, we describe the system in detail by function.

To test the roadside system, it was implemented on Linux-based systems and evaluated in indoor and field tests.

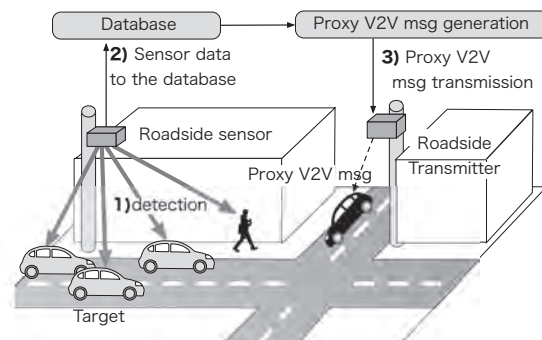


Fig. 2. Overview of Proxy CAM.

3.2 Roadside Station for Proxy V2V Messaging

Although Proxy CAM solves issues 1) and 2) in section 2, issues 3), limited wireless range, and 4), malicious messaging, remain unsolved. In this section, we propose an additional functionality for the Proxy CAM roadside system to solve the all four issues.

- Overview of proposed system

An overview of the proposed system is shown in Figure 3. In the system, roadside stations are installed at distributed locations, with each station detecting objects (vehicles, pedestrians, and bicycles) in the target area using sensors and wireless message receivers. The detected objects' information is stored in real-time in the database (a). Data processing includes malicious message detection through comparisons between sensor data and received V2V messages (b). The roadside station then advertises its proxy V2V messages from its database over ITS-dedicated media, sharing its dynamic information on the target area (c). The remote proxy messaging system delivers this dynamic information on demand using a cellular network such as LTE (d). Receiver vehicles can obtain this dynamic information from a combination of genuine and proxy V2V messaging and remote

messaging. In this manner, fresh, dynamic information is available over a wider area.

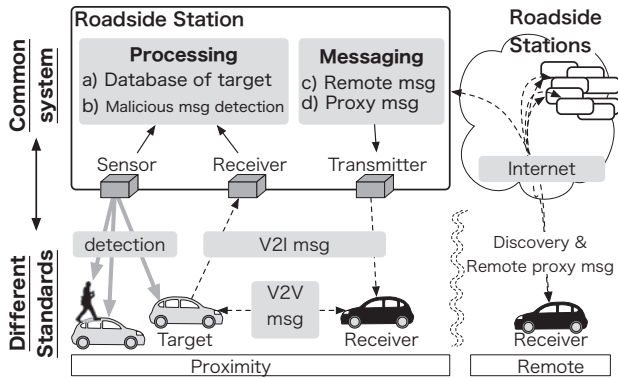


Fig. 3. Roadside Station for Proxy V2V Messaging.

- Malicious message detection

Each roadside station detects target objects from both sensors and vehicle-sent V2V messages. The station can therefore check the correctness of received V2V messages by comparing their content with the sensor information during database processing (function b in Figure 3). If the location data (position, speed, direction) of the received message match the sensor data, the roadside sensor can trust that the information is correct and add the corresponding entry to the database. Data mismatching occurrences can follow two cases: 1) there are no V2V message data but there are sensor data at the location, or; 2) there are V2V message data but no sensor data at the location.

In the first case, if an object is in the target position of the sensor but no relevant V2V messages have been received, the system must add the object's information to the database. This is the normal procedure used in cases in which a vehicle is not equipped with a V2V transmitter. In the second case, if there is no object at the position indicated by a V2V message, it is highly likely that the message sender is disseminating false information. The system must therefore not include such data in its database and it must identify the

sender as a malicious node. However, the manner in which malicious node alerts are sent to other nodes is outside the focus of this paper because, as mentioned in section 4.8, the dissemination of trusted information must be considered carefully for security reasons.

Conceptually, the roadside station regularly checks the consistency of physical space with cyber space and eliminates incorrect physical information projected to cyber space. To do so, the system must preferentially trust its sensor data over received messages data, following the principle generally used in connected autonomous vehicle systems.

- Remote Proxy Messaging

A roadside station maintaining a database of dynamic information for its respective area can generate proxy informational V2V messages on behalf of target vehicles. Such messages are disseminated over the ITS media in addition to the flow of genuine V2V messages at, i.e., 760 Mhz in Japan, 5.8 ~ 5.9Ghz in the EU and United States. As illustrated in Figure 4, in Japan ASV messages are transmitted directly over ITS media. In the EU and United States, V2V messages are transmitted using transport and network layer technologies, namely, CAM, which is transmitted over the Basic Transport Protocol (BTP), and GeoNetworking (GN). In addition, BSM is transmitted over the WAVE Short Message Protocol (WSMP).

To overcome wireless range limitations, we apply remote proxy V2V messaging via roadside stations, as described above. To assess this scheme, we performed a preliminary evaluation using UDP/IPv6 over LTE in ¹¹⁾.

As shown in Figure 4, we propose remote proxy V2V messaging as a common solution usable by standards in Japan, EU, and the United States. We designed this system to use IPv6 for remote proxy V2V messaging because it fulfils cooperative ITS requirements as a result of its extended

address space, embedded security, enhanced mobility support, and ease of configuration. The proposed system also uses UDP because this enables delivery of messages involving real-time data. Using UDP/IPv6, packets can be transmitted over general wireless media such as LTE, 3G, etc., in cases in which the delay is not too long for real-time data transmission.

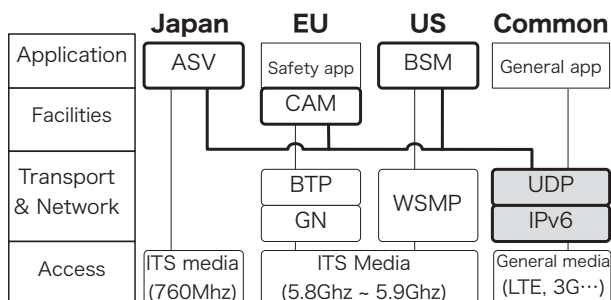


Fig. 4. Remote Proxy V2V messaging.

Remote proxy V2V messages are sent on-demand from vehicles arriving in a target area, e.g., an intersection, according to the requirements of the ITS application, e.g., a navigation system. The application requests dynamic information regarding future vehicle positions in advance. Note that, although IP address discovery of roadside stations is outside the focus of this paper, possible solutions for discovery include embedding IP addresses into the digital map, downloading static lists of IP addresses, or resolving the IPv6 address from geographical information using a DNS-like system¹²⁾, etc.

The remote proxy V2V messaging capability is considered to be an additional feature of the roadside station system. As such, vehicles arriving simultaneously at an intersection receive both proxy messages over the ITS media and remote messages over general media. Depending on the freshness of the data, the receiver side can then decide which data to use.

4 Requirements for the solution

In this section, we analyse the design requirements for the roadside-assisted V2V messaging.

4.1 Coexistence with the CITS Standards

To enable interoperability among countries, a cooperative ITS (CITS) must be developed based on universal architecture, protocols, and technologies. Such a solution must adopt techniques for standardized V2V messages such as CAM in the EU, BSM in the United States, and ASV in Japan. Facilities layer functionalities are of particular importance in ITS Station architecture because applications developed in the architecture access functions via a standard API; correspondingly, any solution for interoperability must not require extensions such as an LDM to the facilities layer.

4.2 Sensor independence

The solution proposed in this paper uses roadside sensors to obtain vehicle data within the target area with regard to, e.g., position and the velocity. Many types of sensors can be applied in this manner, including image sensors, LiDAR, induction loops, infrared sensors, and microwave radar. However, the implementation should not depend on a particular type of sensor because sensor requirements will vary by environment and purpose, e.g., urban environments or highways and budget or policy drivers. To enable versatility, therefore, roadside assisted V2V platform should support many types of sensors.

4.3 Distributed sensors

Sensors may be installed in multiple distributed locations to obtain wider coverage depending on need. For example, sensors may be placed to obtain real-time data from many vehicles in an urban scenario or traffic jam. Any implemented solution must have the capacity to handle large real-time data from distributed sensors.

4.4 Optimized Transmission Coverage

Depending on its configuration, a roadside system must be able to handle installation of multiple transmitters in distributed locations to cover a wider transmission range. It is necessary to consider strategic

placement of transmitters, possibly employing message dissemination strategy algorithms for determining, for example, frequency use, message ordering, and area determination, to enable multi-transmitter scenarios. Moreover, the roadside system must be aware of the V2V messaging capabilities of target vehicles to eliminate duplicate message delivery via the genuine and proxy V2V messaging systems. The system must also estimate the original message delivery area and transmit proxy messages to the wider area not reached by the original message transmission.

4.5 Multi-path Message Delivery

Genuine V2V messaging provides the most accurate real-time dissemination of information on target vehicles; however, it is susceptible to the four problems described in Section 2. Proxy V2V messaging is efficient in cases in which the target vehicle does not have V2V sender functionality. However, its wireless coverage is limited. Remote V2V messaging can deliver dynamic messages anywhere, although with deteriorating latency. Correspondingly, the receiver should be able to combine genuine V2V messaging, proxy V2V messaging, and remote V2V messaging functionality into a combined functionality.

4.6 Real-time delivery of messages

Frequent transmission of V2V messages allows for the tracking of highly dynamic vehicle status information such as position, velocity, and acceleration. Genuine CAMs, for example, are transmitted 1~10 times per second. A solution should also send dynamic vehicle information frequently. Overall, delays in message sensing and transmission must be minimized.

4.7 Scalability

In typical urban scenarios or traffic jams, a few hundred vehicles will occupy the target area of a roadside station. The generation of proxy V2V messages to and from hundreds of vehicles ten times per second can cause serious interference, leading to the potential dropping off of several hundred potential remote V2V message receivers with interest in the target area dynamic information. To avoid communication conges-

tion, the solution must transmit dynamic information efficiently to allow for a scalable system.

4.8 Security Consideration

There are three security considerations relating to the proposed scheme. The first is how to maintain information on vehicles sending incorrect information as detected by the malicious message detection system. A trust model for information dissemination is necessary. Because roadside stations will be operated by public agencies, malicious node information can be shared with the public by such authorities. However, more consideration would be necessary in sharing such information with other administrative domains. Second, the V2V system was designed to send "I am here" messages. However, using proxy messaging changes the scheme to "he is there" messaging. Any potential security concerns arising from this introduction of proxy messaging should therefore be carefully analyzed. Third, the roadside stations send dynamic information via the Internet instead of by V2V single-hop broadcasting. Thus, messages must be encrypted between the roadside station and the requested vehicle to protect their data against tapping and falsification.

5 Related works

the Japanese Metropolitan Police Department developed the Driving Safety Support Systems (DSSS) as an infrastructure assisted CITS for accident reduction¹³⁾. DSSS tested three experimental systems: a rear-end collision prevention system for use upon entering traffic jams in which the car is positioned in front of protective obstacles; a collision prevention system for use when turning right at intersections; and a collision prevention system for use at intersections with poor sight lines. Infrastructure-assisted CITS using beacons and FM broadcasting have been implemented on highways across Japan.

It has been shown that the performance of Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs) depends on the transmission power, frequency of transmission, and the V2V and V2I message lifetimes¹⁴⁾. In turn, it is under-

stood that the performance of V2V and V2I messages depends strongly on the link quality and the propagation conditions ¹⁵⁾. ¹⁵⁾ demonstrated that awareness levels for V2I communication are better than those for V2V communication if roadside units are located in an advantageous manner. ¹⁵⁾ also explained that transmission power is more important than frequency of transmission in V2X communication.

¹⁶⁾ demonstrated how multi-sensor data fusion can leverage consistency and plausibility checking for perception sensor data. In particular, the contents of CAMs as delivered by connected vehicles with on-board perceptions sensors can be independently validated.

A wide variety of sensing modes can be implemented for use in road traffic. Vision-based vehicle detection and tracking techniques are summarized in ¹⁷⁾. Millimeter-wave radar and cameras are important equipment for sensing vehicles using vision-based systems. Millimeter-wave radar can also be used for measuring target range and speed, as is currently done by police in traffic speed regulation ¹⁷⁾. Furthermore, millimeter-wave radar can be used under poor viewing conditions in bad weather. Stereo cameras are another very effective method for sensing vehicles. Such cameras can sense both a vehicle position and velocity ¹⁸⁾.

One approach to creating messages for sharing object perceptions relayed from sensors is Cooperative Perception Messaging (CPM), which is specified in Ko-PER as a method for sharing perceived dynamic objects in equipped vehicle or roadside station environments ¹⁹⁾²⁰⁾. Environmental Perception Messaging (EPM) uses proprietary messages that contain lists of all perceived objects and carry unique IDs for vehicles registered by local perception sensors ²¹⁾²²⁾ Sensory Observation Messaging (SOM) is a proposed method for sharing infrastructure sensor information with potentially vulnerable road users ²³⁾.

Cloud-based cooperative awareness between vehicles and pedestrians was proposed in ²⁴⁾. Under the scheme, pedestrians repeatedly send their positions to the cloud from their smartphones, allowing the cloud to

alert vehicles to the approach of pedestrians. Vehicle-to-Pedestrian (V2P) communication was also investigated in ²⁵⁾, who proposed a scheme in which pedestrians receive CAMs on their smartphones from vehicles hidden behind obstacles.

In the field of cooperative autonomous driving, ²⁶⁾ introduced a method of occupancy grid map merging dedicated to multivehicle cooperative local mapping purposes in outdoor environments. ²⁷⁾²⁸⁾ proposed a multimodal cooperative perception system that provides see-through, lifted-seat, satellite, and all-around views to drivers. The features of the system were validated in real-world experiments involving four vehicles sharing a road.

Traffic lights have long been used to coordinate traffic flows at intersections. To update traffic management to the connected autonomous vehicle age, ²⁹⁾ proposed autonomous intersection management in which vehicles coming to an intersection connect to a dedicated intersection controller that schedules transfer through the intersection. ³⁰⁾ extended the priority-based coordination approach at an intersection to support both autonomous and legacy vehicles.

6 Conclusion and Future work

We have found that the V2V messaging standards in the EU, US, and Japan all suffer from four general shortcomings. To overcome these, we proposed a roadside-assisted V2V messaging system. The proposed system is a real-time cyber-physical system that integrates sensing technology with V2V and V2I networks and combines ITS and cellular media with IPv6 to disseminate dynamic, fresh information to a wider area. The proposed system also presents a common solution for differing national and regional standards, such as those in the EU, US, and Japan, as it is independent of any specific standards. We further analyzed the potential requirements for designing a specification for roadside-assisted V2V messaging.

In future work, we will need to fully implement the proposed system and validate it in field operational

tests. We are also planning to evaluate the large-scale performance of the system using simulation. In the development of the fifth-generation mobile network (5G), mobile edge computing will play an important role in achieving ultra-low latency between V2V messaging. Because edge stations must be located in positions with good visibility such as intersections if they are to cover wider areas, our aim is to ensure that the proposed roadside system has high technical compatibility needed to co-locate with 5G edge stations. To this end, further study on the integration of 5G systems will be necessary.

References

- 1) ISO 21217:2010 Intelligent transport systems – Communications access for land mobiles (CALM) – Architecture, April 2010.
- 2) Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture, September 2010. ETSI EN 302 665 V1.1.1 (2010-09).
- 3) IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture, April 2013. IEEE 1609.0-2013.
- 4) IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirement, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, July 2010. IEEE Std 802.11p-2010.
- 5) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, December 2014. ETSI EN 302 637-2 V1.3.2 (2014-11).
- 6) SAE J2735 Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary, November 2009.
- 7) Intelligent transport systems – Cooperative systems – Definition of a global concept for Local Dynamic Maps, November 2014. ISO/PRF TS 18750.
- 8) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Local Dynamic Map (LDM), September 2014. ETSI EN 302 895 V1.1.1 (2014-09).
- 9) U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration. Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application. pages 1–327, August 2014.
- 10) T. Kitazato, M. Tsukada, H. Ochiai, and H. Esaki. Proxy cooperative awareness message: an infrastructure-assisted v2v messaging. In *2016 Ninth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU)*, pages 1–6, Oct 2016.
- 11) Masahiro Kitazawa, Manabu Tsukada, Kei Morino, Hideya Ochiai, and Hiroshi Esaki. Remote Proxy V2V Messaging using IPv6 and GeoNetworking. In *Vehicular 2017*, July 2017.
- 12) Tiago Fioreze and Geert Heijenk. Extending the domain name system (dns) to provide geographical addressing towards vehicular ad-hoc networks (vanets). In *Vehicular Networking Conference (VNC), 2011 IEEE*, pages 70–77. IEEE, 2011.
- 13) Nakagawa Atsushi, Nakano Tsuyoshi, and Okamoto Yasukazu. Demonstration Experiments of Driving Safety Support Systems Using Vehicle-to-Infrastructure Communications Systems (Japanese), 2009.
- 14) Martijn Van Eenennaam, Wouter Klein Wolterink, Georgios Karagiannis, and Geert Heijenk. Exploring the solution space of beaconing in vanets. In *Vehicular Networking Conference (VNC), 2009 IEEE*, pages 1–8. IEEE, 2009.
- 15) Mate Boban and Pedro M. d’Orey. Exploring the practical limits of cooperative awareness in vehicular communications. March 2015.
- 16) Marcus Obst, Laurens Hobert, and Pierre Reisdorf. Multi-sensor data fusion for checking plausibility of v2v communications by vision-based multiple-object tracking. In *Vehicular Networking Conference (VNC), 2014 IEEE*, pages 143–150. IEEE, 2014.
- 17) S. Sivaraman and M. M. Trivedi. Looking at vehicles on the road: A survey of vision-based vehicle detection, tracking, and behavior analysis. 14(4):1773–1795, December 2013.
- 18) M. Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli, and S. Nichele. Stereo vision-based vehicle detection. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2000. IV 2000. Proceedings of the IEEE*, pages 39–44, 2000.
- 19) Andreas Rauch, Felix Klanner, and Klaus Dietmayer. Analysis of v2x communication parameters for the development of a fusion architecture for cooperative perception systems. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE*, pages 685–690. IEEE, 2011.
- 20) Andreas Rauch, Stefan Maier, Felix Klanner, and Klaus Dietmayer. Inter-vehicle object association for cooperative perception systems. In *Intelligent Transportation Systems-(ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on*, pages 893–898. IEEE, 2013.
- 21) Hendrik-jorn Gunther, Oliver Trauer, and Lars Wolf.

- The potential of collective perception in vehicular ad-hoc networks. In *ITS Telecommunications (ITST), 2015 14th International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2015.
- 22) Hendrik-Jörn Günther, Björn Mennenga, Oliver Trauer, Raphael Riebl, and Lars Wolf. Realizing collective perception in a vehicle. In *Vehicular Networking Conference (VNC), 2016 IEEE*, pages 1–8. IEEE, 2016.
 - 23) Robbin Blokpoel and Arjan Stuiver. Sensory observation message and cam extensions for vru safety.
 - 24) M. Bagheri, M. Siekkinen, and J. K. Nurminen. Cellular-based vehicle to pedestrian (v2p) adaptive communication for collision avoidance. In *Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2014 International Conference on*, pages 450–456, November 2014.
 - 25) P. Merdrignac, O. Shagdar, I. B. Jemaa, and F. Nashashibi. Study on perception and communication systems for safety of vulnerable road users. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on*, pages 1876–1881, September 2015.
 - 26) Hao Li, M Tsukada, F Nashashibi, and M Parent. Multivehicle Cooperative Local Mapping: A Methodology Based on Occupancy Grid Map Merging. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 15(5):2089–2100, October 2014.
 - 27) Seong-Woo Kim, Zhuang Jie Chong, Baoxing Qin, Xiaotong Shen, Zhuoqi Cheng, Wei Liu, and Marcelo H Ang. Cooperative perception for autonomous vehicle control on the road: Motivation and experimental results. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 5059–5066. IEEE, 2013.
 - 28) Seong-Woo Kim, Baoxing Qin, Zhuang Jie Chong, Xiaotong Shen, Wei Liu, Marcelo H Ang, Emilio Frazzoli, and Daniela Rus. Multivehicle cooperative driving using cooperative perception: Design and experimental validation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2):663–680, 2015.
 - 29) Kurt Dresner and Peter Stone. A multiagent approach to autonomous intersection management. *Journal of artificial intelligence research*, 31:591–656, 2008.
 - 30) Xiangjun Qian, Jean Gregoire, Fabien Moutarde, and Arnaud De La Fortelle. Priority-based coordination of autonomous and legacy vehicles at intersection. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on*, pages 1166–1171. IEEE, 2014.

Improvement of Misbehavior Detection for V2X Communication

Shuntaro AZUMA^{*}, Manabu TSUKADA^{**} and Kenya SATO^{*}

(Received March 30, 2019)

By faking vehicle information on cloud servers, an adversary may deliberately cause traffic congestion and/or accidents. Misbehavior means sending masqueraded data to cloud servers in this paper. In our previous research, we proposed "A Method of Detecting Camouflage Data with Mutual Position Monitoring". Cloud servers can detect masqueraded position data from malicious vehicles by increasing the threshold value of our detecting method. However, there are some problems. In this paper, we clarify what kind of malicious behavior is targeted, and we propose two new measures to address the false positives problem. First, we weight for public vehicles such as police cars, and cloud servers can trust vehicles even if they below the threshold value. Second, we dynamically determine the threshold value with consideration of vehicle density. Next, we evaluate the two methods. We find that the method of weighting for each vehicle was very effective, and the method of dynamic determination also showed good results. There is not much difference between our previous method and weighting for each vehicle at low threshold value, but this new one helps considerably suppress false positives at high threshold. The advantage of the dynamic determination model is that false positives do not depend on each base station, because the threshold is dynamically determined. This works more effectively in lower vehicle densities. Our results indicated that these two countermeasures was practical against false positives.

Key words : V2X Communication, Security, Misbehavior.

1 INTRODUCTION

In recent years, research on autonomous driving and vehicle-to-vehicle (V2V) communication have been conducted in the Intelligent Transport Systems (ITS) field. In addition, vehicles have vehicle-to-cloud (V2C) communication with cloud servers using mobile lines. When vehicles are connected to various targets, malicious acts have enormous impact. This paper represents further work on our previous publication "A Method of Detecting Camouflage Data with Mutual Position Monitoring"¹⁾. In our previous research, we proposed how to detect malicious vehicles which sent masqueraded data of their positions. We evaluated the detection rates and received good results. We found

that we could detect completely malicious vehicles by increasing the threshold value of our detecting method. However, we have some problems. We especially considered the false positives problem in our previous research. We thought that vehicle densities affect false positives, so we calculated them in high vehicle densities. We could find high vehicle densities help suppress false positives, but this countermeasure is effective in only this situation. We should address the false positives problem in low vehicle densities. In this paper, we will reveal our research's target at first. Next, we will describe the operation of proposed method. Then, we will describe improvements of previous research, which are methods of weighting for each vehicle and dynamic determination, and then we will describe the evaluation of these methods.

^{*} Mobility Research Center, Doshisha University, Kyoto

E-mail : syuntaro.azuma@nislab.doshisha.ac.jp, ksato@mail.doshisha.ac.jp

^{**} Graduate School of Information Science and Technology, Tokyo University, Tokyo

E-mail : tsukada@hongo.wide.ad.jp

2 THREAT ANALYSIS OF TRANSMISSION DATA

There exists previous works researching the detection of malicious vehicles in V2X communication^{2) 3)}, as a matter of fact, the definition of a malicious vehicle is ambiguous. In this section, we analyze attacks on vehicle communication and clarify what kind of malicious vehicles are

2.1 Threat Analysis of Transmission Data

Table 1 shows the threat analysis of data transmitted to a cloud server. These threats include eavesdropping attacks, falsifications, and spoofing. Spoofing attacks are divided into vehicle impersonation and data masquerade. Vehicle impersonation means that attackers pretend to be other vehicles. For example, even though one vehicle does not have any trouble, an attacker pretends to be another vehicle and then calls the police lying that it had an accident. An example of data masquerade is when a vehicle's own position information or status is masked.

Security requirements regarding these threats include confidentiality, completeness, node reliability, and data reliability. To supply confidentiality and completeness, data encryption is proposed and can be done by a secret key or an ID base cipher. Node reliability identifies vehicles that are pretending to be other vehicles. The Public Key Infrastructure (PKI) method, which is adapted by the vehicles, is one good resolution because certificates guarantee vehicles. Data reliability prevents attackers from masquerading data. However, this is not effective for all spoofing acts.

2.2 Difference Between Node and Data Reliability

Node reliability means that a cloud server trusts a particular vehicle and believes that it is not pretending to be a different vehicle. The previous section showed that the PKI method can be adapted by vehicles to resolve this problem. A cloud may be able to verify the electronic certification and confirm the transmitter's information by the mechanism shown in Figure 1.

However, this research focuses on data masquerade,

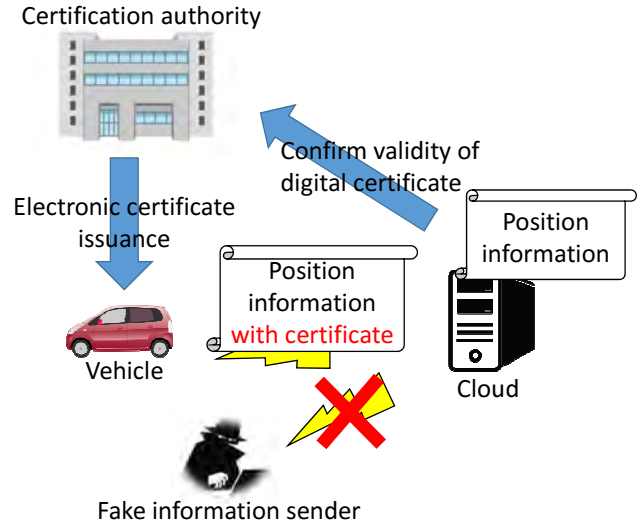


Fig. 1. PKI to adapt to vehicles.

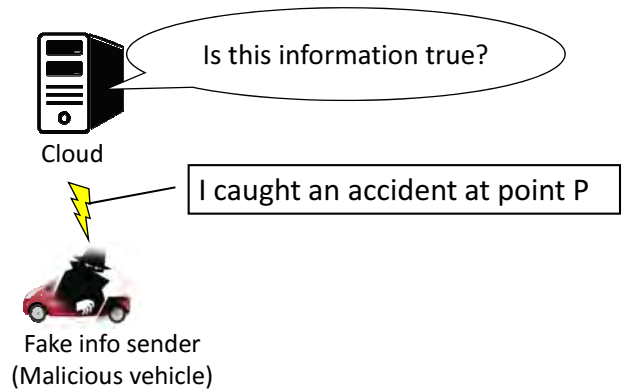


Fig. 2. Problem of settling by this research. as described in Figure 2. Since data encryption and PKI do not confirm whether the received data are masqueraded, data masquerade is inherently different from node reliability which can be resolved by these methods. We will propose a method that can handle such example, which guarantees the reliability of the data.

3 OUR PREVIOUS RESEARCH

In this section, we will explain our previous research again. We use vehicle-to-everything (V2X) communication and detect masqueraded data of vehicle's position.

3.1 Pre-suppositions

1. A safe channel has been secured by relationships of mutual trust among all vehicles and cloud servers.
2. Vehicles and cloud servers have been mutually certified beforehand.

Table 1. THREATS ANALYSIS ABOUT TRANSMISSION DATA.

THREAT		REQUIREMENT	COUNTERMEASURE
Eavesdropping		Confidentiality	Encryption
Falsification		Completeness	Encryption
Spoofing	Vehicle impersonation	Node reliability	PKI
	Data masquerade	Date reliability	Target of this research

3. Relationships between cloud servers and base stations have been built.

3.2 Definition of Terminology in Proposed Method

- Vehicle ID

This ID is used by vehicles in V2V communication, and this is a different public ID for each vehicle.

- V2C Vehicle ID

This ID is used for a unique key in V2C communication. This secret ID is not available to others. V2C Vehicle ID and Vehicle ID is uniquely related.

- Via Base Station (Via BS) ID

This ID is used in V2C communication, and this is a different ID for each base station.

- Peripheral Vehicle (PV) ID

This ID is a received vehicle ID from other vehicles in V2V communication.

3.3 Outline

Vehicles can use V2X communication. When they send their position information to a cloud server, they also send other information in addition to their position. In this research, a cloud server detects masqueraded data from transmitted data by using the relay base station information in vehicle-to-cloud (V2C) communication and peripheral vehicles in vehicle-to-vehicle (V2V) communication.

Figure 3 shows the picture of misbehavior detection in our previous research, and Figure 4 shows how to detect masqueraded data in a cloud. A cloud receives not only position information or VehicleID but also peripheral vehicle's and relay base station's information.

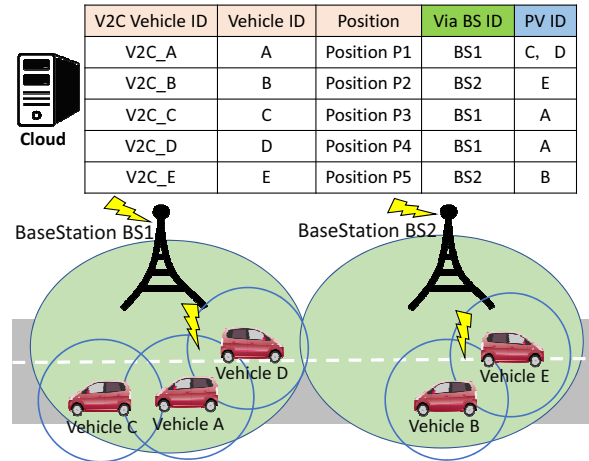


Fig. 3. Use example of peripheral vehicle information in V2X communication.

3.4 How to Detect Misbehavior data

V2CVehicleID is used in the first step on Figure 4. Cloud servers confirm whether received data is sent from vehicles or not. Second, cloud servers compare Via Base Station ID (ViaBSID) with received position information to confirm whether a sending vehicle exists in relay base station's coverage area. When the received position information exceeds this area, we assume that it can't be consistent and that received information was regarded as masqueraded data. This step helps detect data masquerade toward other base station's coverage area. At the third and fourth step, cloud servers detect masqueraded data by using peripheral vehicle IDs (PVIDs). Third, cloud servers search vehicles corresponding to sending vehicle's PVID. Firth, cloud servers compare the received position with peripheral vehicle's position corresponding to PVID. If the distance between two vehicle's position exceeds V2V communication coverage, we assume that it can't be consistent and that received information was regarded as masqueraded data. This oper-

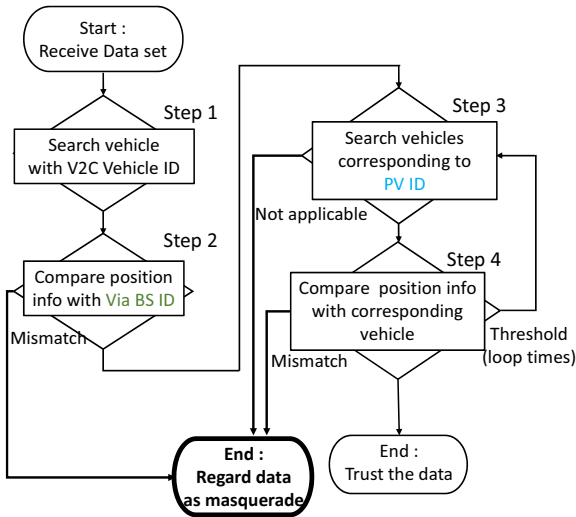


Fig. 4. Misbehavior data detection procedure.

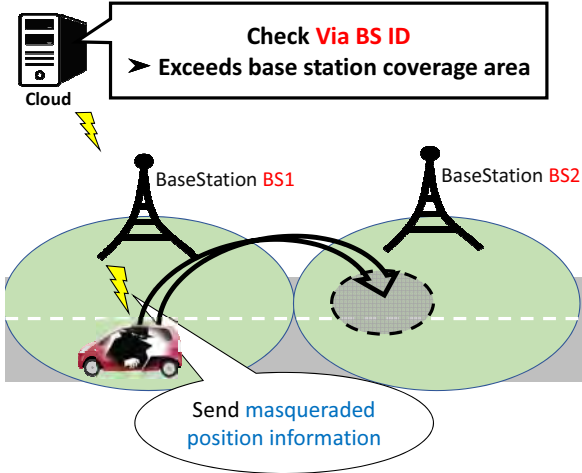


Fig. 5. Advantage of using base station information.

ation is performed a predetermined number of times. In the proposed method, a predetermined number of times means the number of PVIDs which is necessary for cloud servers to trust. This is a so-called threshold value. By setting this threshold, we can assure more reliable data.

3.5 Advantage of This Proposal

Figure 5 shows a countermeasure example of position data masquerade. We can detect masqueraded position information toward another base station using relay base station's information in V2C communication. In addition, Figure 6 shows a countermeasure example of position data masquerade. We assume that a malicious vehicle masquerades its own position information. A cloud confirms PVIDs sent from a vehicle and compares received position information with peripheral

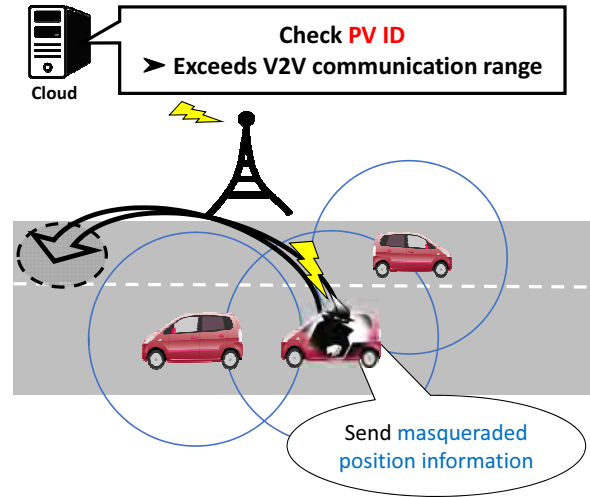


Fig. 6. Advantage of using peripheral vehicle information.

vehicle's positions which are relevant to PVIDs. When a cloud finds that transmitted position information is outside V2V communication coverage with peripheral vehicles, the cloud determines that the received position information has been masqueraded. However when this information does not exceed the coverage area, the cloud trusts the received position information. Vehicles acquire peripheral vehicle information in V2V communication and mutually monitor them. This helps cloud servers detect masqueraded data.

4 DEVELOPMENT OF OUR PROPOSED METHOD

We have some problems, especially false positives. Therefore, we propose here two new points to solve them.

1. We weight the public vehicles and trust cloud servers more even for vehicles below the threshold.
2. We dynamically determine the threshold value with consideration of vehicle density.

4.1 False Positives

We know that increasing the threshold in our method can help detect masqueraded data. However, when we increased threshold values, false positive rates dramatically increased. Therefore, we considered the

Table 2. PREVIOUS SIMULATION PARAMETER.

Simulator	Scenargie2.0	
Vehicle number	158 [cars] (five of the send masquerade positions.)	
Area	1000 [m] × 1000 [m]	
Communication mode	ARIB STD T109	LTE
Use frequency band	700 [Mhz]	2.5 [GHz]
Communication interval	100 [ms]	1.0 [s]
Radio spread model	ITU-R P.1411	LTE-Macro
Base station ground clearance	1.5 [m]	

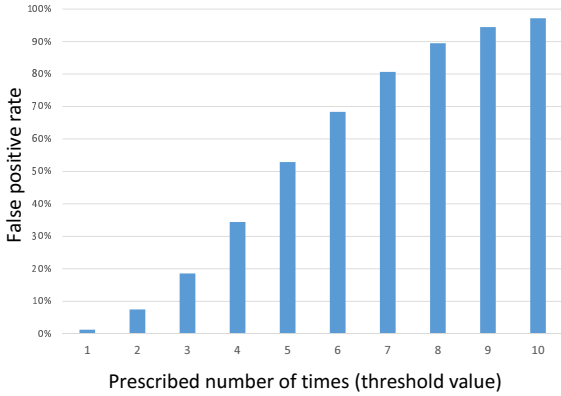


Fig. 7. False positives by threshold value under Japanese average vehicle density (158[cars/km²]) environment.

false positives problem in our previous research. Figure 7 shows false detection rates (false positives) of our proposed method, which is based on the average vehicle density in Japan. The method’s threshold is the number of PVIDs, which is necessary for cloud servers to trust. In the previous simulation environment shown in Table 2, Figure 7 shows the false positives when all 158 cars are not misbehaving. By increasing the threshold value, false positive rates increased. By increasing the threshold value under Japanese average vehicle density, cloud servers erroneously detect normal communication as abnormal.

Then, the false positive rates under the average vehicle density environment in urban city (Osaka), which has the highest average car density in Japan, are shown in Figure 8. In a high vehicle density area, since vehicles can acquire a lot of peripheral vehicle information in V2V communication, even if the threshold is increased, an increase of the false detection rate can be suppressed. Tables 3 and 4 show precision, recall,

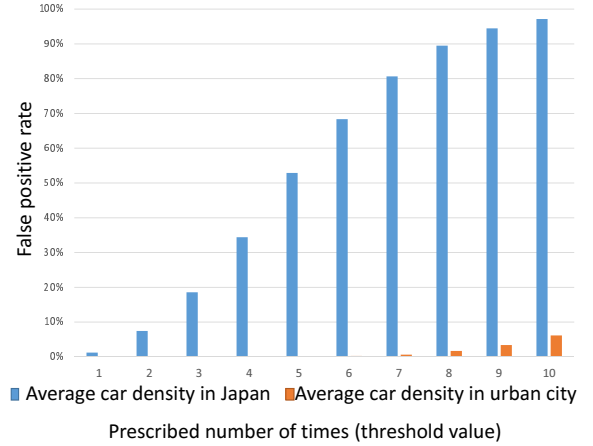


Fig. 8. False positives comparison with urban area average vehicle density (1128 [cars/km²]) environment. and F-measure in our proposed method. Even looking at these tables, we can make the same statement as above.

4.2 Weighting for Each Vehicle

This good result (Figure 8) only applies in the urban area. We need to take another measure under the environment of Japanese average car density. In addition, we must consider the lesser number of cars in the streets at nighttime and the lower density environment. Figure 10 shows our new countermeasure to the false positives. We give more weight to public vehicles such as police vehicles and buses than normal vehicles. Even if the vehicle communicating with the public vehicle (that is, the vehicle including the public vehicle in peripheral vehicle information) does not exceed the threshold value, this one is trusted by a cloud. We consider the environment shown in Figure 9. This case is that the threshold required for the cloud to trust is 5. Vehicle A has only three peripheral vehicles. But because there are a police vehicle in them, a cloud trusts

Table 3. F-MEASURE UNDER 158[cars/km²] ENVIRONMENT.

Threshold	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precision	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Recall	0.99	0.93	0.81	0.66	0.47	0.32	0.19	0.11	0.056	0.029
F-measure	0.99	0.96	0.90	0.79	0.64	0.48	0.32	0.19	0.11	0.056

Table 4. F-MEASURE UNDER 1128[cars/km²] ENVIRONMENT.

Threshold	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precision	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Recall	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.94
F-measure	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97

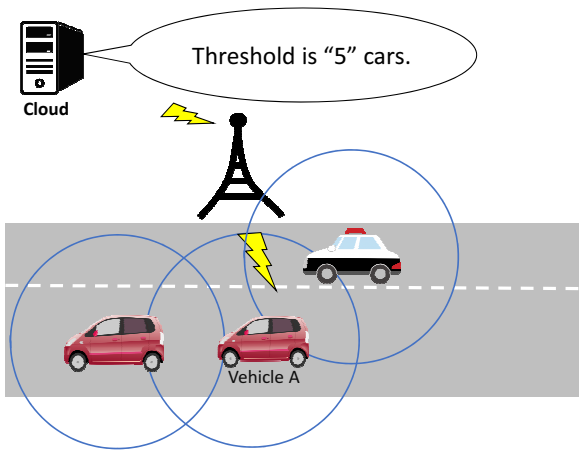


Fig. 9. Examples when using a method of weighting for each vehicle.

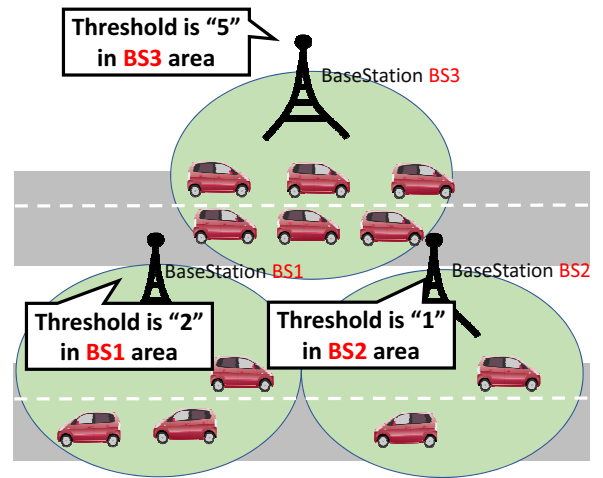


Fig. 11. Examples when using dynamically threshold determination.

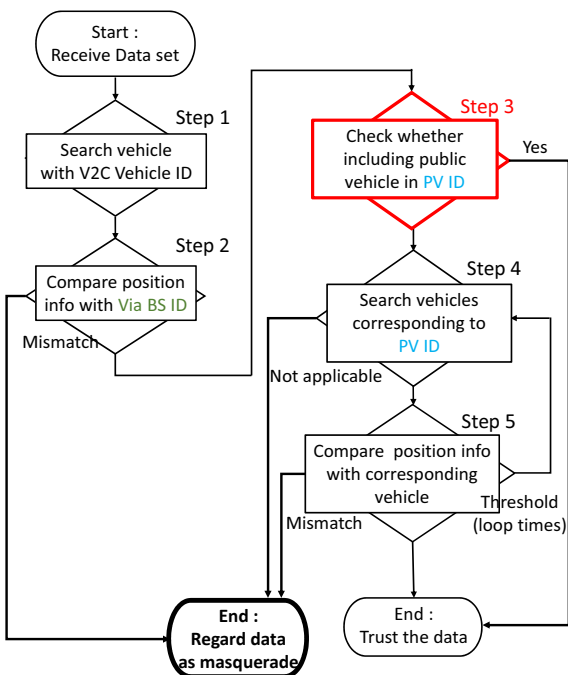


Fig. 10. New flowchart of weighting for each vehicle.

vehicle A. We think that this method will reduce the false positives if public vehicles are running even in low vehicle density areas.

4.3 Dynamic Determination of Threshold

Based on the results (shown in Figures 7 and 8), we calculate vehicle density for each base station and change the threshold value for each base station. Figure 11 shows the overall picture. We set a prescribed percentage as the threshold value. When vehicle densities in base stations change, the threshold also changes for each base station. We think that this method is effective in solving the false positives problem because we can adjust the threshold dynamically in areas where a vehicle density is low, or during times when there are few vehicles.

5 EVALUATION AND CONSIDERATION

We will calculate false positive rates to evaluate our new points. Next, we will consider the practicality of our new points from the evaluation obtained.

5.1 Simulator

In this paper, we use Scenargie ⁴⁾ as a simulator to evaluate the performance of our proposed method. Scenargie is a network simulator developed by Space-Time Engineering (STE). By combining expansion modules, such as LTE, V2V communication and multi-agent, we can construct a realistic simulation. In addition, since communication systems and evaluation scenarios are becoming more complicated, this ingenious simulation has greatly reduced the effort required to create scenarios.

5.2 Evaluation Model

For an evaluation environment, we use one square kilometer Manhattan model and use simulation parameters shown in Table 5. We set the number of vehicles to 158 [cars] and the range to 1 [km^2] because the average car density in Japan is 158 [cars/ km^2]. ITU-R P.1411 model is a radio wave propagation scheme that considers road map information, and radio waves are attenuated based on the shape of the road, so we compared with a two-ray model, which includes direct waves and reflected waves from the ground, this model is close to reality. ITU-R P.1411 model is a radio wave propagation scheme that considers road map information, and radio waves are attenuated based on the shape of the road, so we compared with a two-ray model, which includes direct waves and reflected waves from the ground, this model is close to reality.

5.3 Evaluation of Weighting for Each Vehicle

Figure 12 shows false positive rates when using a method of weighting for each vehicle, and Table 6 shows precision, recall, and F-measure. Comparing to Figure 7, we can find that false positives are considerably suppressed at high threshold values. When the threshold is low, we do not find much difference. Therefore, we say that public vehicles have little influ-

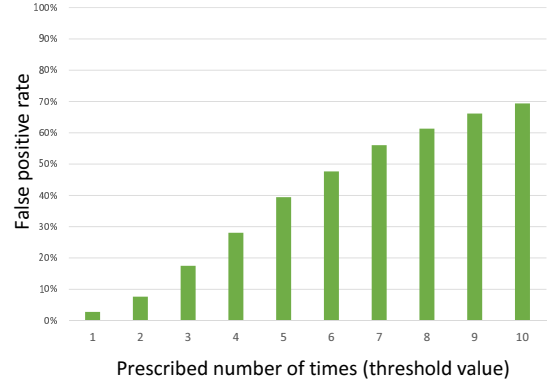


Fig. 12. False positives by threshold value when using a method of weighting for each vehicle.

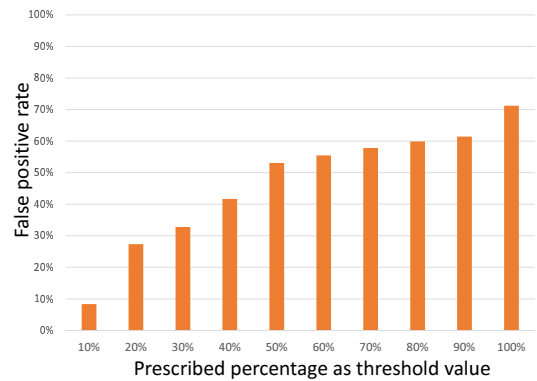


Fig. 13. False positives by prescribed percentage when using dynamic threshold determination.

ence on false positives at low threshold values. However, when a vehicle communicates with a public vehicle in this method, cloud servers can trust this one even if its own PVID has not reached the threshold value. Even if there are no peripheral vehicles around vehicles which send their position data to cloud server, but public vehicles driving around them, they can be trusted by cloud servers. Our proposed method works more effectively at high threshold. We focused on police cars as public vehicles in this paper, but we guess that we further suppress false positives by weighting buses or taxis running throughout the city.

5.4 Evaluation of Dynamically Threshold Determination

Cloud servers dynamically determine threshold values at each base station by confirming vehicle densities in base station's coverage area. We calculate false positive rates with this method. Figure 13 shows false positives when using dynamic determination of threshold.

Table 5. SIMULATION PARAMETER.

Simulator	Scenargie2.0	
Vehicle number	158 [cars] (including two police cars.)	
Area	1000 [m] \times 1000 [m]	
Communication mode	ARIB STD T109	LTE
Use frequency band	700 [Mhz]	2.5 [GHz]
Communication interval	100 [ms]	1.0 [s]
Radio spread model	ITU-R P.1411	LTE-Macro
Base station ground clearance	1.5 [m]	

Table 6. F-MEASURE WITH A METHOD OF WEIGHTING FOR EACH VEHICLE.

Threshold	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precision	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Recall	0.97	0.92	0.83	0.72	0.61	0.52	0.44	0.39	0.34	0.31
F-measure	0.99	0.96	0.90	0.84	0.75	0.69	0.61	0.56	0.51	0.47

This graph's horizontal axis is the ratio of base station's vehicle density as the threshold. It means that cloud servers calculate the number of vehicles traveling in the base station, and we consider the predetermined percentage as the threshold value. Therefore, we do not know the accurate threshold value because there are different vehicle densities for each base station. At low percentage of Figure 13, because the threshold value is lower in each base station, we can suppress false positive rates. For example, when there are 30 vehicles in a base station's coverage area and prescribed percentage is 10%, the threshold value becomes 3. Therefore, cloud servers trust vehicles which have three PVIDs. However, when we set 100% as prescribed percentage in 30 driving vehicles environment, the threshold value becomes 30, so vehicles should communicate with other thirty vehicles for cloud servers trusting them. As the percentage increases, the threshold increases, therefore false positives increase. The advantage of this method is that false positives do not depend on each base station, because the threshold is dynamically determined. If we decide on a single threshold, cloud servers will not respond flexibly.

6 CONCLUSION

In the Intelligent Transport Systems (ITS), using cloud servers is inevitable. In our previous research, we used V2X communication, obtained information from various objects, and described measures against data masquerade. We could not completely detect masqueraded data by increasing threshold values. However, we have some problems, which are false positives especially. We proposed two countermeasures against the false positives problem. First, we weight the public vehicles and trust more on cloud servers even for vehicles below the threshold. Second, we dynamically determine the threshold value with consideration of vehicle density. As a result of evaluating these, we succeeded in suppressing false positives. In particular, the method of weighting each vehicle has proven more effective. There is not much difference between previous results and this paper's results at low threshold values, but at high threshold values, this method helps suppress false positive rates. The second measure means that cloud servers calculate the number of vehicles traveling in the base station, and we consider the predetermined percentage as the threshold value. The advantage of this method is that false positives do not depend on each base station, because the threshold is dynamically determined. In this research, we think that we have

Table 7. F-MEASURE WITH A METHOD OF DYNAMIC THRESHOLD DETERMINATION.

Threshold	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precision	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Recall	0.92	0.73	0.67	0.58	0.47	0.45	0.42	0.40	0.39	0.29
F-measure	0.96	0.84	0.80	0.74	0.64	0.62	0.59	0.57	0.56	0.45

improved considerably the false positives problem. In the future, we will propose a method combining both methods or a completely new method, and we would like to conduct a demonstration experiment that also cooperates with Local Dynamic Map (LDM).

References

- 1) Shuntaro Azuma, Manabu Tsukada, and Kenya Sato, “A Method of Detecting Camouflage Data with Mutual Vehicle Position Monitoring,” VEHICULAR 2017, July 2017.
- 2) Yang, Yuchen Ou, Dongxiu Xue, Lixia Dong, and Decun, “Infrastructure-based Detection Scheme of Malicious Vehicles for Urban Vehicular Network,” Transportation Research Board 96th Annual Meeting, January 2017.
- 3) Gongjun Yan, Stephan Olariu, and Michele C. Weigle, “Providing VANET security through active position detection,” Computer Communications, vol. 31, pp. 2883-2897, July 2008.
- 4) SPACE-TIME Engineering. Available from: <https://www.spacetime-eng.com/en/> 2017.07.07

Throughput Analysis of Interference Cancellation-Based Random Access with Feedback

Guanghai SONG,^{*} Kui Cai,^{*} Yuhao Chi,^{**} and Jun CHENG^{***}

We consider interference cancellation-based random access for scenarios of multiple users communicating with a common receiver. An instant feedback is assumed to inform the users whether their packets were correctly recovered. Users update their transmission packets once recovered, or a retransmission process is triggered. At the receiver, interference cancellation decoding is employed to resolve packet collisions. By modeling the transmission and packet recovery as a Markov process, a throughput analysis is provided, based on which the optimal transmission probability is derived.

Key words: Random access, slotted ALOHA, interference cancellation

1. Introduction

Random access is a crucial technique in Internet of Things (IoT) and Machine-to-Machine (M2M) communications. In this scenario, multiple users spontaneously transmit data packets to a common receiver without central coordination. If two or more users accidentally send their packets at the same time, a collision occurs. Slotted ALOHA is a conventional solution of transmission strategy for random access.

Since the original slotted ALOHA discards all the conflict packets without recovery, its asymptotic throughput is limited by $1/e \approx 0.37$. A main technique widely used to improve system throughput is interference cancellation (IC)^{1)–8)}, where the conflict packets are recovered based on IC decoding. Regular/irregular coded slotted ALOHA was previously addressed^{2)–6)}, where users repeatedly transmit their packets at several randomly selected time slots and the receiver can iteratively recover the conflict packets with IC decoding over a bipartite graph. With deliberately designed degree distributions of the repetition profile, an asymptotical system's throughput can arbitrarily approach near 1 when the user number is large⁴⁾. Inspired by the idea of rateless code, a frameless slotted ALOHA

was proposed⁷⁾⁸⁾. In this scheme, the contention period duration is not predetermined but is terminated when the fraction of resolved users reaches a certain threshold. A primary assumption in the above schemes is that in one contention period, each user only deals with one packet. Since no feedback message exists (in frameless slotted ALOHA, only one bit of feedback is used to terminate the contention period) to inform the users in real time about the recovered packets, a packet will be redundantly transmitted even though it might already have been recovered at a former time slot. Although this transmission strategy is shown to be asymptotically optimal when the user number and transmission length are very large, there is no performance guarantee for finite systems with few users. On the other hand, there are actually cases with fewer than 100 (or even fewer than 10) concurrent users at a certain period of time in a practical IoT system.

In this paper, we propose a random access scheme to improve the system throughput when it has few concurrent users. At each time slot, each user decides whether to transmit its packet based on a certain probability. At the receiver, real-time IC decoding is performed to recover the user's packets. For the recovered packets, instant feedback is assumed to inform the users in real-time to update their transmission. Therefore, there is never any redundant

^{*} Science and Math Cluster, Singapore University of Technology and Design, gsong2017@gmail.com, cai_kui@sutd.edu.sg

^{**} Stat Key Lab. of Integrated Services Networks, Xidian University, chiyuhao1990@163.com

^{***} Department of Intelligent Information Engineering and Sciences, Doshisha University, jcheng@ieee.org

transmission of these recovered packets. By modeling the packet recovery process as a Markov process, we theoretically analyze the system throughput and derive the optimal transmission/retransmission probability for few users. By theoretical analysis and computer simulations, our proposed random access scheme achieves an obvious throughput gain over such non-feedback schemes as regular/irregular repetition slotted ALOHA and frameless slotted ALOHA for fewer than 100 users.

2. Random Access Scheme

Consider a multi-user communication system with K users transmitting messages to a central receiver. We assume that each user has its own packet stream to be transmitted. Following the basic idea of slotted ALOHA, the total communication time available is split into time slots and the duration of each time slot is adequate for only one packet transmission. We assume no coordination among users and each user transmits its packet randomly with a certain probability.

We assume each user has a data buffer with a packet to be transmitted at the current time slot. Each user transmits its packet with a certain probability. If only one packet is received at the current time slot, the slot is said to be decodable and a successful decoding is assumed; if more than one packet is received, a collision occurs and data cannot be recovered directly. For simplicity, if k packets are simultaneously received at a certain time slot, we call it a k -collision. Unlike the conventional slotted ALOHA scheme where conflict signals are simply discarded, we assume infinite buffers at the receiver that can retain all the colliding signals so that IC decoding can be implemented based on future receivings.

For any recovered packet, if it is a first time transmission, no further processing is needed; if it is a retransmission, the interference caused by this packet will be removed from the collision buffer so that re-decodings can be performed for the colliding signals. For any recovered packet, the receiver will feed back an ACK message to the users so that they can update their buffer with a new packet. If any signals in the collision buffers are fully recovered by IC decoding, the receiver will clear the buffer's corresponding part. Note that to implement these processings, the receiver has to know

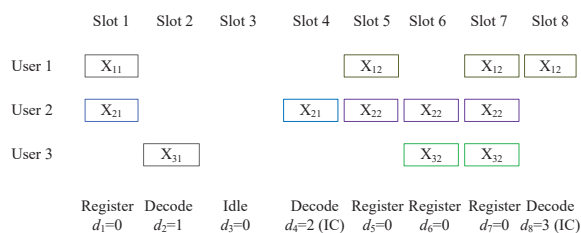


Fig. 1. Example of signal detection in three-user random access with 8-slot transmission. X_{kt} denotes the t -th transmitted packet of user k . The slot is notated as “Register” at the bottom if a collision occurs and if it is decodable it is notated as “Decode”. d_t denotes the number of recovered packets at time t including those recovered by IC decoding. Note that IC decoding is performed at slots 4 and 8 when 2 and 3 packets are recovered.

to which user a packet belongs once it is recovered and also know its transmission history. We assume this information is available in the packet header.

The above transmission and decoding procedures are summarized in Algorithm 1.

Algorithm 1 Transmission and decoding procedure

- 1: **for** Slot $t = 1, 2, \dots, n$ **do**
 - 2: Each user transmits its packet with certain probability;
 (p for first transmission, q for re-transmission)
 - 3: **if** Slot- t is decodable **then**
 - 4: Recover the packet;
 - 5: Remove it from collision buffer (if any);
 - 6: Feed back an ACK;
 - 7: **for** New decodable signal in collision buffer **do**
 - 8: Recover the packet;
 - 9: Remove it from collision buffer;
 - 10: Feed back an ACK;
 - 11: **end for**
 - 12: **else**
 - 13: Put the slot (signal) into a collision buffer;
 - 14: **end if**
 - 15: Update the user buffers for the recovered packets;
 - 16: **end for**
-

In Fig. 1, an example is given of transmission signal detection in three-user random access with 8-slot transmission. The IC decoding is performed at slots 4 and 8. At slot 4, after recovery of packet X_{21} , it was removed from colliding signal $X_{11} + X_{21}$ at slot 1, which is maintained in the collision buffer. X_{11} is hence recovered. Therefore, two packets (X_{11} and X_{21}) are recovered at slot 4, denoted as $d_4 = 2$. Similarly, at slot 8, X_{12} is first recovered and thus IC decodings are performed for colliding signal $X_{12} + X_{22}$ of slot 5

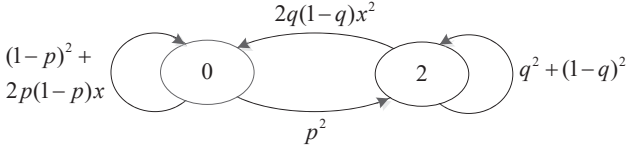


Fig. 2. State diagram of Markov process for two-user random access with IC decoding.

and for $X_{22} + X_{32}$ of slot 6 to further recover X_{22} and X_{32} . Therefore, three packets are recovered at slot 8.

3. Throughput Analysis of Two-User Random Access

In this section, we model the detection of two-user random access transmission with IC as a Markov process and propose a throughput analysis, based on which the optimal transmission and retransmission probabilities are derived. This analysis can be extended to a system with an arbitrary finite number of users.

The state of the collision buffer describes the profile of all the collision types contained in the collision buffer. Let \mathcal{S}_K be the set that includes all the possible states in the collision buffer of a K -user random access system. Let $s_t \in \mathcal{S}_K$ be the state of the collision buffer at time t , and let d_t be the number of recovered packets at time t including the packets recovered by IC decoding. Similarly, we define \mathcal{D}_K as the set that includes all the possible number of packet recoveries. For the two-user case, we have $\mathcal{S}_2 = \{0, 2\}$, where 0 is the state when the collision buffer is empty, i.e., no undecoded packet, and 2 is the state with a 2-collision in the collision buffer. Note that the same 2-collision may successively occur, while in our analysis we assume the receiver only maintains the first and discards the others without affecting the decoding performance. Thus, the possible number of recovered packets at each slot is $d_t \in \mathcal{D}_2 = \{0, 1, 2\}$.

The receiver can be modeled as a Markov process with the state diagram in Fig. 2. There is a directed edge from state s' to state s if there is a state transition. The edge is hence labeled as

$$p_{s',s}(x) \triangleq \sum_{d \in \mathcal{D}_2} \Pr(s_t = s, d_t = d | s_{t-1} = s') x^d$$

where $\Pr(s_t = s, d_t = d | s_{t-1} = s')$ is the probability of the state transition from s' to s and d packets are

recovered along with this state transition. Thus, we have the following transition matrix

$$\begin{aligned} P(x) &\triangleq \begin{bmatrix} p_{0,0}(x) & p_{0,2}(x) \\ p_{2,0}(x) & p_{2,2}(x) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (1-p)^2 + 2p(1-p)x & p^2 \\ 2q(1-q)x^2 & q^2 + (1-q)^2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

For $x = 1$, using

$$\sum_{d \in \mathcal{D}_2} \Pr(s_t = s, d_t = d | s_{t-1} = s') = \Pr(s_t = s | s_{t-1} = s')$$

we obtain $P \triangleq P(1)$ as the conventional transition matrix of the Markov process.

We define

$$T_n(x) \triangleq \sum_{\substack{s_t \in \mathcal{S}_2 \\ d_t \in \mathcal{D}_2 \\ t=1, \dots, n}} \Pr(s_1, \dots, s_n, d_1, \dots, d_n | s_0 = 0) x^{\sum_{t=1}^n d_t}$$

and calculate it using the Markov property:

$$\begin{aligned} T_n(x) &= \sum_{\substack{s_0=0 \\ s_t \in \mathcal{S}_2 \\ d_t \in \mathcal{D}_2 \\ t=1, \dots, n}} \prod_{t=1}^n \Pr(s_t, d_t | s_{t-1}) x^{d_t} \\ &= \prod_{t=1}^n \sum_{\substack{s_0=0 \\ s_t \in \mathcal{S}_2 \\ d_t \in \mathcal{D}_2 \\ t=1, \dots, n}} \Pr(s_t, d_t | s_{t-1}) x^{d_t} \\ &= \sum_{s_n \in \mathcal{S}_2} \sum_{s_{n-1} \in \mathcal{S}_2} \sum_{d_n \in \mathcal{D}_2} \Pr(s_n, d_n | s_{n-1}) x^{d_n} \dots \\ &\quad \times \sum_{s_1 \in \mathcal{S}_2} \sum_{d_2 \in \mathcal{D}_2} \Pr(s_2, d_2 | s_1) x^{d_2} \\ &\quad \times \sum_{d_1 \in \mathcal{D}_2} \Pr(s_1, d_1 | s_0) x^{d_1} \\ &= \sum_{s_n \in \mathcal{S}_2} \sum_{s_{n-1} \in \mathcal{S}_2} p_{s_{n-1}, s_n}(x) \dots \sum_{s_1 \in \mathcal{S}_2} p_{s_1, s_2}(x) p_{0, s_1}(x) \\ &= \mathbf{p}_0 P(x)^n \mathbf{b} \end{aligned}$$

where $\mathbf{p}_0 \triangleq [1, 0]$ is the initial probability distribution and $\mathbf{b} \triangleq [1, 1]^T$, where $(\cdot)^T$ is the transpose of a matrix. Thus, the expected total number of recovered packets after n transmissions is

$$\begin{aligned} E\left[\sum_{t=1}^n d_t\right] &= \left. \frac{\partial T_n(x)}{\partial x} \right|_{x=1} \\ &= \mathbf{p}_0 \sum_{i=0}^{n-1} P(x)^i \frac{\partial P(x)}{\partial x} P(x)^{n-i-1} \mathbf{b} \Big|_{x=1} \\ &= \mathbf{p}_0 \sum_{i=0}^{n-1} P(x)^i \frac{\partial P(x)}{\partial x} \Big|_{x=1} P^{n-i-1} \mathbf{b} \end{aligned}$$

$$= \mathbf{p}_0 \sum_{i=0}^{n-1} P^i P' \mathbf{b}$$

where we used $P^{n-i-1} \mathbf{b} = \mathbf{b}$ since

$$\sum_{s \in \mathcal{S}_2} \Pr(s_t = s | s_{t-1} = s') = 1$$

holds for any s' and

$$P' \triangleq \left. \frac{\partial P(x)}{\partial x} \right|_{x=1} = \begin{bmatrix} 2p(1-p) & 0 \\ 4q(1-q) & 0 \end{bmatrix}.$$

We have asymptotic system throughput as $n \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned} \eta &\triangleq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} E \left[\sum_{t=1}^n d_t \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \mathbf{p}_0 \sum_{i=0}^{n-1} P^i P' \mathbf{b} \\ &= \mathbf{p}^\infty P' \mathbf{b} \end{aligned} \quad (1)$$

where \mathbf{p}^∞ is the stationary distribution of the Markov process. We did the last step of the above derivation because

$$\frac{1}{n} \mathbf{p}_0 \sum_{i=0}^{n-1} P^i = \frac{1}{n} \sum_{i < \sqrt{n}} \mathbf{p}_0 P^i + \frac{1}{n} \sum_{i \geq \sqrt{n}} \mathbf{p}_0 P^i$$

where the first term is

$$\frac{1}{n} \sum_{i < \sqrt{n}} \mathbf{p}_0 P^i \rightarrow [0, 0]$$

and the second term is

$$\frac{1}{n} \sum_{i \geq \sqrt{n}} \mathbf{p}_0 P^i \rightarrow \frac{n - \sqrt{n}}{n} \mathbf{p}^\infty \rightarrow \mathbf{p}^\infty.$$

By solving $\mathbf{p}^\infty P = \mathbf{p}^\infty$ with constraint $\mathbf{p}^\infty \mathbf{b} = 1$, we obtain

$$\mathbf{p}^\infty = \left[\frac{2q(1-q)}{p^2 + 2q(1-q)}, \frac{p^2}{p^2 + 2q(1-q)} \right]$$

and hence

$$\eta = \frac{4pq(1-q)}{p^2 + 2q(1-q)}.$$

When $q = 0.5$, $p = \sqrt{2q(1-q)} = \frac{1}{\sqrt{2}}$, the throughput is maximized with $\eta = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$. If we consider equiprobable transmission with $q = p$, the throughput is maximized when

$$p_{\text{opt}} = 2 - \sqrt{2}$$

with

$$\eta_{\text{max}} = 12 - 8\sqrt{2} \approx 0.688.$$

There is performance loss of about 0.02 packet/slot if we consider equiprobable transmission.

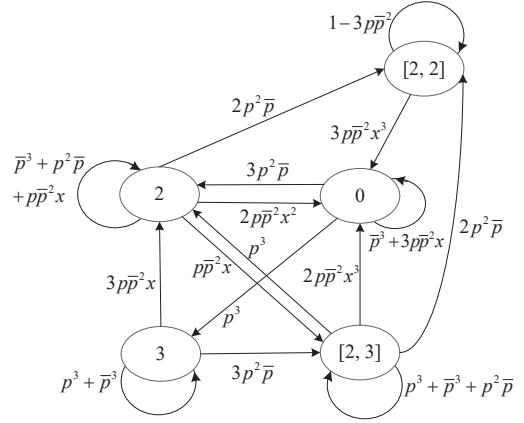


Fig. 3. State diagram of Markov process for three-user random access with IC decoding.

4. Throughput Analysis of Three-User Random Access

The results of Eq. (1) can be extended to systems with more than two users by adjusting the matrix dimension. However, the number of states will increase significantly with an increase of the number of users. In this section, we focus on equiprobable transmission $q = p$ and derive the asymptotic throughput of three-user random access.

For $K = 3$, the collision buffer has five states, $\mathcal{S}_3 = \{0, 2, 3, [2, 2], [2, 3]\}$, where 0 denotes empty, 3 denotes a 3-collision; [2, 2] denotes that there are two different 2-collisions in the form $X_i + X_j, X_i + X_k$, and [2, 3] denotes one 2-collision and one 3-collision in the collision buffer. In this case, $\mathcal{D}_3 = \{0, 1, 2, 3\}$ (Fig. 1). Note that here we only consider those effective states, even though there are actually more states that the collision buffer can have. For example, there may be three different 2-collisions in the collision buffer, $X_i + X_j, X_i + X_k$, and $X_j + X_k$ (the packets cannot be recovered by equation-solving because these equations are invisible at the receiver before the packets are recovered). However, this situation is equivalent to $X_i + X_j, X_i + X_k$ from the IC decoding viewpoint; that is, all the other packets can be recovered if and only if one of the packets is recovered in the future slots. In this case, since $X_j + X_k$ is just redundant, we still consider [2, 2, 2] as state [2, 2]. Similarly, the collision form of [2, 2, 3] is also regarded as state [2, 2].

With notation $\bar{p} = 1 - p$, we have the state diagram of

three-user random access in Fig. 3. Its state transition matrix is hence given by

$$P(x) = \begin{bmatrix} \bar{p}^3 + 3p\bar{p}^2x & 3p^2\bar{p} & p^3 & 0 & 0 \\ 2p\bar{p}^2x^2 & \bar{p}^3 + p^2\bar{p} + p\bar{p}^2x & 0 & 2p^2\bar{p} & p^3 \\ 0 & 3p\bar{p}^2x & p^3 + \bar{p}^3 & 0 & 3p^2\bar{p} \\ 3p\bar{p}^2x^3 & 0 & 0 & 1 - 3p\bar{p}^2 & 0 \\ 2p\bar{p}^2x^3 & p\bar{p}^2x & 0 & 2p^2\bar{p} & p^3 + \bar{p}^3 + p^2\bar{p} \end{bmatrix}$$

$$P' = \begin{bmatrix} 3p\bar{p}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4p\bar{p}^2 & p\bar{p}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3p\bar{p}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 9p\bar{p}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6p\bar{p}^2 & p\bar{p}^2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

We solve the stationary distribution as

$$p^\infty = \begin{bmatrix} \frac{6\bar{p}^2}{6 - 3p - p^2}, & \frac{27p\bar{p}^3}{(3 - 4p + 2p^2)(6 - 3p - p^2)}, \\ \frac{2p^2\bar{p}}{6 - 3p - p^2}, & \frac{2p^2(3 - 2p)}{6 - 3p - p^2}, \\ & \frac{3p^3\bar{p}(5 - 4p)}{(3 - 4p + 2p^2)(6 - 3p - p^2)} \end{bmatrix}.$$

Applying (1), we have

$$\eta = \frac{9p(1-p)^2(2-p)(3-p)}{(3-4p+2p^2)(6-3p-p^2)}$$

which is maximized when

$$p_{\text{opt}} = 0.4322$$

with

$$\eta_{\text{max}} = 0.6796.$$

Compared with $K = 2$, the optimal transmission probability decreases but the system throughput is not reduced very much since IC decoding was used.

5. Simulation Results of K -User Random Access

When K is large, formulating the transition matrix is difficult. Therefore, we need to rely on computer simulation. In this section, we consider equiprobable transmission with $p = q$ and give some simulation results of the optimal transmission probability and the maximum throughput for multiple users.

Figure 4 gives the results for $K = 2, 3, 5, 10, 20, 50, 70$, and 100 by computer simulation with $n = 500$ and 10000 transmissions. The results for $K = 2, 3$ obtained by computer are identical to our theoretical analysis. The numerical results show that the optimal transmission probability decreases as the user number increases, while the throughput increases slowly due to the use of IC decoding. This is opposite from the conventional slotted ALOHA without IC where the system

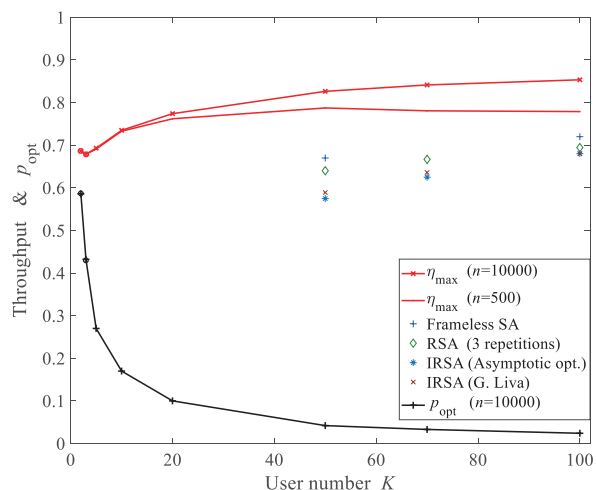


Fig. 4. Maximum throughput and optimal transmission probability of K -user random access with IC decoding obtained by computer simulation for $K \in \{2, 3, 5, 10, 20, 50, 70, 100\}$. Theoretical values for $K = 2, 3$ are labeled by \circ . Throughput achieved by RSA/IRSA is given with a toleration of decoding error rate of 10^{-2} . The throughput of the frameless SA is a theoretically maximum value achieved by optimal transmission probability with packet error rates of about 10^{-1} for $K = 50$ and 10^{-2} for $K = 100$.

throughput decreased as the number of users increased. There is a throughput loss with shorter transmission $n = 500$ for $K > 10$. Note that our retransmission scheme guarantees a very low decoding error rate when n is large.

For reference, we also provided the system throughput of a regular/irregular repetition slotted ALOHA (RSA/IRSA) and a frameless slotted ALOHA with IC decodings. The considered repetition number in RSA was 3. For the IRSA, we investigated the asymptotic optimal degree distribution⁴⁾ that can achieve a maximum throughput of 1, and the degree distribution (with the maximum degree of 16) proposed by G. Liva²⁾ that achieves an asymptotic throughput of 0.965 when the number of users approaches infinity. Note that since the original proposed degree distribution⁴⁾ has asymptotic infinite terms, it should be truncated to be applied to finite systems. In our simulation, we truncated the distribution to maintain a maximum repetition degree of 50. Although we truncated the high order terms, the theoretical achievable system throughput still remains 0.97. However, practical throughput

in finite systems is far from this theoretical value. The throughput of systems with 50, 70, and 100 users is less than 0.7, even though a decoding error rate of 10^{-2} is permitted. The throughput of RSA is even better than IRSA for finite-user systems. Based on the corresponding transmission mechanisms, the frame length of RSA and IRSA is given by K/η , where η is the achievable system throughput with decoding error rate of 10^{-2} . The throughput of a frameless slotted ALOHA for $K = 50, 100$ is a theoretically maximum value achieved by the optimal transmission probability given in previous work ⁹⁾, where the packet error rate is about 10^{-1} for $K = 50$ and 6×10^{-2} for $K = 100$. Our proposed random access scheme achieves throughput gains of $0.16 \sim 0.2$ packet/slot over RSA and about 0.15 packet/slot over the frameless SA for $50 \sim 100$ users since the real-time feedback with instantaneous updating of the transmission packet list lead to more packet recoveries.

6. Conclusion

We considered interference cancellation-based random access with feedback. The system has high throughput and high reliability due to instantaneous retransmission based on feedback. We modeled the transmission and packet recovery process as a Markov process and theoretically analyzed the system throughput for a finite number of users. Based on the analysis, we derived the optimal transmission probability.

In our analysis, we assumed error-free decoding for non-conflict packets. An interesting future work is to relax this assumption and consider recovery failures for non-conflict receiving.

References

- 1) Y. Yu and G. B. Giannakis, "High-throughput random access using successive interference cancellation in a tree algorithm," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 12, pp.4628–4639, Dec. 2007.
- 2) G. Liva, "Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 59, no. 2, pp. 477–487, Feb. 2011.
- 3) E. Paolini, G. Liva, and M. Chiani, "Graph-based random access for the collision channel without feedback: capacity bound," in *Proc. IEEE Globecom 2011*, pp. 1–5.
- 4) K. Narayanan and H. Pfister, "Iterative collision resolution for slotted ALOHA: an optimal uncoordinated transmission policy," in *Proc. ISTC2012*, pp. 136–139.
- 5) E. Paolini, G. Liva, and M. Chiani, "Coded slotted ALOHA: a graph-based method for uncoordinated multiple access," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 12, pp. 6815–6832, Dec. 2015
- 6) F. Clazzer, E. Paolini, I. Mambelli, and C. Stefanovic, "Irregular repetition slotted ALOHA over the Rayleigh block fading channel with capture," in *Proc. ICC2017*, pp. 1–6.
- 7) C. Stefanovic, P. Popovski, and D. Vukobratovic, "Frameless ALOHA protocol for wireless networks," *IEEE Comm. Lett.*, vol. 16, no. 12, pp. 2087–2090, Dec. 2012
- 8) C. Stefanovic and P. Popovski, "Random Access that operates as a rateless code," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 11, pp. 4653–4662, Nov. 2013.
- 9) F. Lazaro and C. Stefanovic "Finite-length analysis of frameless ALOHA," *Proc. IEEE SCC*, Feb. 2017, [online] Available: <https://arxiv.org/abs/1610.09182>.

Community Energy Management System to Encourage Power Saving Competition

Takahiro FUJIWARA^{*}, Kai TAKASHIMA^{*} and Shigeo KANEDA^{*}

(Received March 31, 2019)

In Japan, solid oxide fuel cells (SOFCs) are proliferating as highly efficient domestic fuel cells. To fully utilize SOFCs, we proposed a small CEMS (community energy management system) in a conventional study. However, in that study, electricity generation was evenly allocated into each of three houses with no competition among the homes. In addition, the graphic user interface (GUI) lacked an element to reduce energy consumption. We therefore propose a small-scale CEMS that includes a mechanism for competition among the homes and through which a home can profit from low energy consumption. Specially, this paper theoretically clarifies that the power generation of each home's SOFC should be equal to the average of all the other homes. This amount is a mathematical bound. We designed an experimental prototype of the proposed CEMS using goal-oriented analysis with the goal of encouraging users to save electricity. We implemented and evaluated the small-scale CEMS system based on this design policy in three real homes over a two month period. Our experimental evaluation clarified the cost reduction effect of the proposed CEMS and the GUI's ability to engender a competitive consciousness for energy saving among the homes.

Key words : SOFC, CEMS, Energy, Electric power, Smart grid, Goal-oriented analysis, Community

キーワード : 固体酸化燃料電池, 省エネルギー, 家庭, スマートグリッド, ゴール指向分析, CEMS, HEMS, コミュニティ

節電競争を促す小規模CEMSの提案

藤原 孝浩, 高島 海, 金田 重郎

1 はじめに

我が国では、家庭用燃料電池として固体酸化燃料電池 (SOFC : Solid Oxide Fuel Cell) の普及が進んでいる¹⁾。現在、市販家庭用 SOFC の最大出力は 700W である。家庭用 SOFC は、「エネファーム Type S」として、アイシン精機の製品のみが各ガス会社から提供されている。700W は、アイシン精機製 SOFC の仕様である。SOFC は数年に一度、改良されている様であり、現行 Type S は、それまでの Type S の貯湯タンクを小型化して、マンションへの設置を容易化している。本論

文では、データが入手できなかった最新の Type S ではなく、2016 年 3 月迄販売されていた、発電効率データが公開されている²⁾ 旧型エネファーム Type S を対象とする。現行 Type S に関しては、詳細な旧型との差異が公開されていないので、軽々に断ずることはできないが、旧型の小規模改良版と思われ、本論文の結果は、現行 Type S に対しても、ほぼ、そのまま適用されと考えている。

これに対して、一般家庭における 1 時間あたりの平均消費電力は 400W 程度にすぎず³⁾、SOFC の能力を十分

^{*} Graduate School of Science and Engineering, Doshisha Univ., Kyoto
E-mail : skaneda@mail.doshisha.ac.jp

には活用できない。この問題に対する一つの解決策は、SOFCを最高効率となるフルパワー(700W)で常に稼働させ、余剰分の電力をガス会社が買い取る方法であり、すでに、制度化されている*。

上記課題に対するもう一つのアプローチは、SOFCを設置した家同士で電力を融通しあうことによって、SOFCの能力をより活用する地域エネルギーマネジメントシステム(CEMS: Community Energy Management System)の導入である。この種のCEMSについては、既に、マンションを対象とする社会実験が知られている。大阪ガスは、自社の実験住宅NEXT21⁵⁾において、複数家庭を対象とするCEMSを実装している。また、静岡ガスは、マンションを対象とするCEMS実験「T-グリッドシステム⁶⁾」を構築している。著者らも、複数の家庭間で、SOFCの発電力を融通する小規模のCEMS構成を提案している⁷⁾。しかし、これら従来のCEMSシステムは、SOFCの能力を活用することに力点を置いたシステムであり、節電を促すという要素は希薄であった。

そこで、本論文では、利用者に節電を促すことを狙いとして、「節約すればするほど、その家の売電収入が多くなる」制御構成を提案する。また、省エネルギー化は、システムとしては非機能要求と考えられる。そこで、「利用者に節電を促す」をゴールとするゴール指向分析を併用した。上記の設計方針のもとに小規模CEMSシステムを、SOFCはシミュレーションで実装して、約2か月間、実家庭での運用を行った。その結果、非機能要求である利用者に節電を促す役割を確認できた。

以下、第2章では、SOFCの動特性について著者らの分析結果を示す⁸⁾。次に、第3章では、「節約をすればするほど、その家の発電量が多くなる」本提案のCEMS構成について概要を示す。第4章では、実際に3戸の家庭にシステムを導入した評価結果を示す。第5章はまとめである。

2 SOFC 動特性について

2.1 SOFC の特徴

我が国では、世界に先駆けて、家庭用燃料電池の普及が進んでいる。市販家庭用燃料電池には、2種類ある。固体高分子形燃料電池(PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell)と、本論文で扱う固体酸化物燃料電池(SOFC)で

ある。

PEFCは、SOFCに比べて発電効率が低く、消費ガスが熱に変化する割合が高いため、お湯が多めに生成される。この為、従来は、貯湯タンクが満タンとなると、発電を停止せざるを得なかった。また、急激な発電量の増減が難しく、AI機能等で、必要電力を予測して発電させる必要がある。但し、機能的に停止可能であり、発電が不要な際には、出力を絞り込む事ができる。

これに対して、SOFCは、発電量の時間的応答が速い。また、貯湯タンクが満タンとなっても、発電を停止する必要はない。このため、基本的には、「電主熱従」(必要発電量によって出力を制御し、貯湯タンクのお湯の量は無視する)制御を採用している。但し、PEFCとは異なり、SOFCは、停止させる事が出来ない。これは、燃料電池セルを常に高温(摂氏700~900度)に保つ必要があるためである。最低でも、50W程度の電力消費を必要とするが、この値は、一般の家庭では、常に消費している電力量である。

2.2 ガス消費量の線形性

著者らは、SOFCに関して、発電した電力量とその発電の際に消費するガス量の関係は、線形式で近似できることを既に明らかにしている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。1時間当たりの発電量を $P_{electric}[kWh]$ 、消費するガスのカロリー量を $C_{gass}[kWh]$ とすると、以下の式が得られる。

$$C_{gass} = 1.52 \times P_{electric} + 0.4282 \quad [kWh] \quad (1)$$

また、1時間当たりの発電量を $P_{electric}[kWh]$ 、お湯タンクの加温に回る熱量を $H_{heat}[kWh]$ とすると、以下の式が得られる。

$$H_{heat} = 0.68 \times P_{electric} + 0.161 \quad [kWh] \quad (2)$$

上記の式(1)式の線形性から、次のことが言える。

定理 1 (消費ガス量の定理). SOFCの消費ガス量は、期間中に発電した総電力量によって決定され、発電量の時間的経緯(発電量カーブ)には無関係である。

定理1の証明. 式(1)の定数項は、発電カーブに無関係に、期間幅が決まればガス量への寄与は決まる。発電量に応じて変動するガス量も、発電量にのみ比例するので、発電カーブに無関係に、ガス量への寄与は決まる。したがって、それらの和も、総発電量のみ依存する。□

上記の定理1から、次の性質が導かれる。

* 買取りのKWh単価は、9円程度と安く⁴⁾、ガス原価から見て、各家庭にとって、大きなメリットがある制度ではないと思われる。

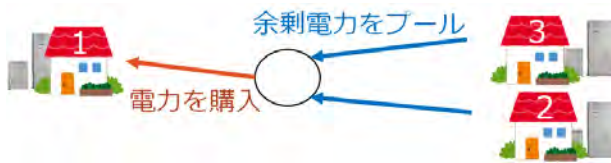


Fig. 1. CEMS 内部での電力共有.

定理 2 (発電量の最適分割). 複数の SOFC を連携動作させる場合, どのように出力を個々の SOFC に配分しようとも, 消費されるガス総量は, 総発電量のみ依存し, 配分率には無関係である.

定理 2 の証明. 証明略 □

上記定理 2 から, 複数家庭間の CEMS 構成においても, 各 SOFC にどのように発電量を配賦しても, 常に, 消費される総ガス量からすれば最適解である. このため, CEMS の各 SOFC への発電量配賦は, 別の観点から定めて良いことになる.

2.3 従来研究の課題

前述した様に, SOFC を共用した形式の CEMS は, すでに, 社会実験やシミュレーション評価が行われている⁵⁾⁶⁾¹¹⁾. 例えば, 大阪ガスの NEXT21⁵⁾ では, 実験的な集合住宅に SOFC を設置し, フロア内で融通している. 各家庭には, HEMS (Home Energy Management System) 端末を設置して「部屋・用途毎のエネルギー使用量の詳細データの見える化」を図ったとある¹²⁾. しかし, 目標値との比較など, 「見える化」であり, 積極的に家庭間での競争の促進の視点は見られない. 静岡ガスの T-グリッドシステム⁶⁾ も, 同様に, マンションの中で, SOFC の電力を融通する. ここでも, 発電量は一律に各戸に配賦されており¹³⁾, 積極的に, 各家庭が競争する仕組みは導入されていない. 一つには, これら社会実験やシミュレーションの多くが, ガス会社により行われており, ガスの消費量を下げることへのインセンティブが弱いとも理解できる.

また, 著者らの既存研究⁷⁾ でも, SOFC を最大限活用することに力点を置いていたため, 省エネルギーを促す仕組みになっていなかった. また, 電力を融通する際に, 具体的な金銭のやり取りのルールが存在しなかった. そのため, 利用者に具体的な料金を示すことができず, CEMS 内の電力売買について具体的な金額で検証を行うことができなかった.

以上から, 本論文では, 「省エネを行った家庭がより儲

かる」仕組みを組み込んだ, CEMS システムの構築を目指す. なお, CEMS では, 各家庭の消費電力が他戸に漏れることは, 防犯やプライバシー保護の観点から望ましくない. このため, 2 戸による CEMS はあり得ない. 最低でも 3 戸の家庭を連携させる必要がある. その意味で, 本論文では, 理論面は任意の個数 n に対して検討するが, 実験は, 3 戸で行うこととしている.

3 本提案の CEMS システム

本章では, 「節電した家庭ほど儲かる CEMS」を提案する¹⁴⁾¹⁵⁾.

3.1 設計段階におけるゴール指向分析の採用

本論文では, 各家庭に 1 台ずつ SOFC を設置し, 発電量から自宅の消費電力量を差し引いた余剰電力を家庭間で互いに融通しあう CEMS を前提とする. 図 1 に CEMS 内での電力共有のイメージを示す. 但し, 「ユーザが節電する」は, 実装すべきシステムそのものが実現すべき「機能」ではなく, 非機能要求と思われる. 非機能要求であるなら, それに即した分析ツールが必要である. そこで, 「CEMS 利用者に節電を促す」をゴールとする D-Case¹⁶⁾ を用いたゴール指向分析を行った. 図 2 に D-Case を用いたゴール指向分析の結果を示す. 「各家庭の消費電力削減意識を高める」というゴールは, 大きく分けると, 「比較を行う対象が存在し, 競争意識が生まれる (ゴール G.2)」と, 「消費電力の削減がコスト削減につながる (ゴール G.3)」というゴールに分割された.

上記ゴール指向分析の結果である「消費電力の削減がコスト削減につながる (ゴール G.3)」については, 「節電している家庭の SOFC による発電量が多くなり, より多くの電力を他家庭に売却できる仕組み」とした. 節電すればするほど, SOFC の発電量が増える仕組みを採用する. また, 各家庭に配置される UI (User Interface) についても, ゴール指向分析結果に対応した画面 (複数) から構成し, 評価の中で, その有効性を検証する.

3.2 料金制度の設定

まず, 従来研究⁷⁾ で不明確になっていた CEMS 内における電力売買の際の料金負担制度を明確に定めた. 節電した電力をまず自宅で消費し, 余剰電力は他家庭に売却する. 電力が不足する家庭は, 他家庭の SOFC で発電した余剰電力を買電する. なお, すべての家庭の SOFC

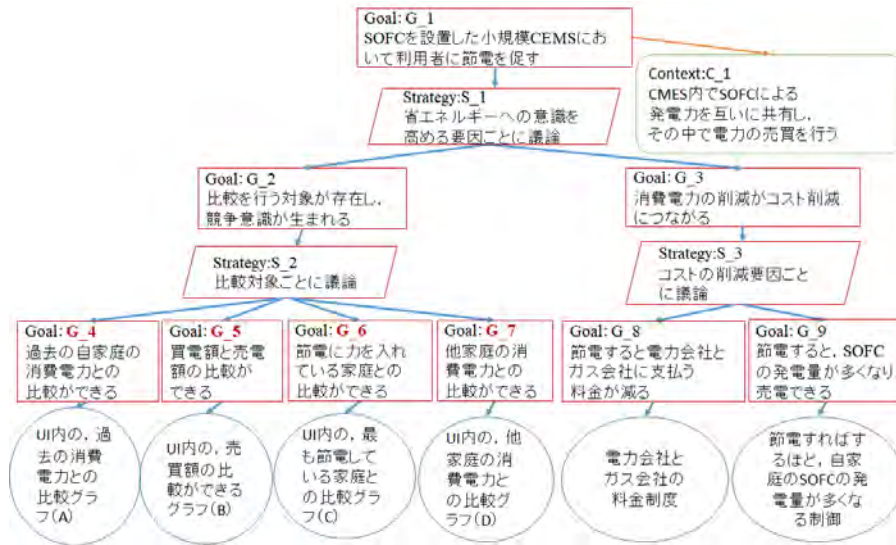


Fig. 2. ゴール指向分析の結果.

を最大限稼働させても電力が不足する場合は、不足分を電力会社から購入する。なお、電力会社の電力が20円/kWh前後であるのに対し、SOFCによって1kWh発電するために必要なガス料金が約10円である。本研究では、中間を取り、家庭間で電力を売買する際のkWh単価を15円と定めた。合計消費電力量に合わせて発電量を調節するため、全家庭の発電余剰電力量と不足する電力量は等しくなる。

発電余剰電力を各家庭に分配する際は、いったん余剰電力をすべて一カ所に集めてプールし、電力が不足している家庭がそこから電力を購入する。この際、発電量と消費電力量が等しいのでプールに電力量が余ることはない。そのため、すべての家庭の消費電力とSOFCの発電量を記録して発電余剰と不足する電力を求めることにより、他家から購入した電力量と、他家に売却した電力量を把握できる。その情報を用いて発電余剰を売却した家庭は金銭を受け取り、購入した家庭は金銭を支払う制度とする。プールから電力を購入する際、購入した分の電力量に単価15円を乗じた金額をプールに入れ、余剰電力をプールに入れた家庭が、プールに入れた電力量に単価15円を乗じた金額をプールから受け取る。

3.3 各家庭への発電量配賦

提案システムでは、 n 戸の家庭のそれぞれにSOFCを設置し、 n 戸の間で、電力をやり取りする方式を前提とする。ゴール指向分析の結果から、「発電余力は、その家庭が節電するほど、大きくなる」枠組みを持ち込む必要がある。そこで、各家庭($i = 1, 2, \dots, n$)のSOFC

発電量を $G_i[W]$ 、消費電力を $C_i[W]$ とし、 C_i の係数を $L(> 0)$ 、定数項を $A(> 0)$ として、消費電力 C_i が減るほどそれに反比例して発電量 G_i が増加する以下の(3)式の関係を前提とする**。

$$G_i = -L \times C_i + A \quad [W] \quad (3)$$

総発電量 T_{power} については、以下の式が成立する。

$$T_{power} = \sum_{i=1}^n G_i = \sum_{i=1}^n C_i \quad [W] \quad (4)$$

上記の式(3)(4)から、 A は以下のように求まる。

$$A = \frac{(1+L) \times T_{power}}{n} \quad (5)$$

式(5)を式(3)へ戻すと次式を得る。

$$G_i = -L \times C_i + \frac{(1+L) \times \sum_{k=1}^n C_k}{n} \quad [W] \quad (6)$$

上式で、 C_k の係数は、 $k = i$ なる C_k を除いて、以下の式(7)で表される。

$$\frac{1+L}{n} \quad (7)$$

この式は常に正である。つまり、 $k = i$ なる C_k を除いて、各戸の消費電力量は、発電量 G_i を増加させる。 $k = i$ の発電量 G_i を最小化するのは、 $k = i$ を除いて、各 C_k がゼロの時である。

** 線形関係としているのは、モデルの簡明さを狙ったものであり、更に大きな限界値を持つ形式もあり得るかもしれないが、本論文では、線形にとどめている。

Table 1. UI と分割されたゴールとの対応表.

図1のゴール	図4の個別画面	ゴール	表示内容
G_4	画面 A	過去の自家庭の消費電力との比較ができる	自宅の1週間前の消費電力との比較グラフ
G_5	画面 B	買電額と売電額の比較ができる	過去1週間の CEMS 内での電力売買額グラフ
G_6	画面 C	節電に力をいれている家庭との比較ができる	1週間前同曜日に最も消費電力の少なかった家庭との消費電力比較グラフ
G_7	画面 D	他家庭の消費電力との比較ができる	現在の3戸の消費電力のうち自宅が占める割合を表すグラフ

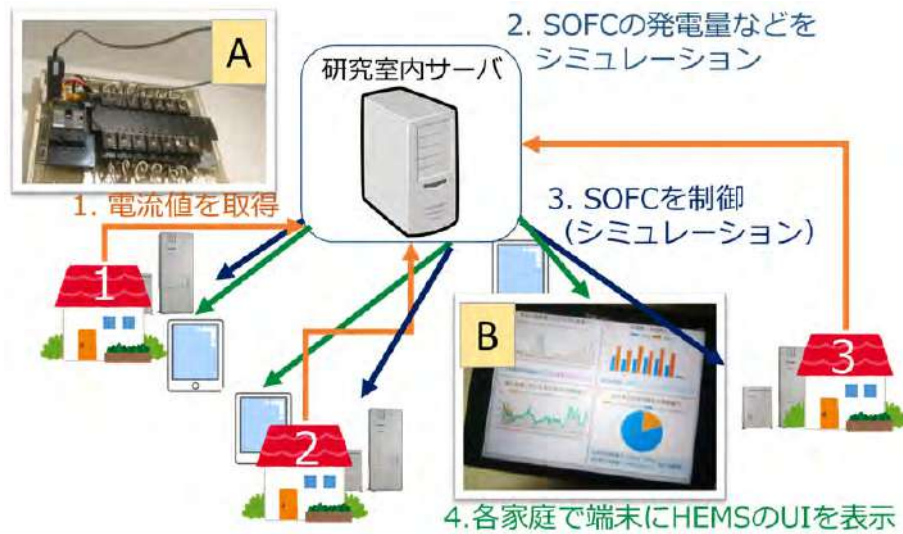


Fig. 3. プロトタイプシステム概要.

一方, C_i の係数は, 以下の式となる.

$$\frac{1 - (n-1)L}{n} \quad (8)$$

この式は, L の値によっては負となる. 分子が負となると, $k = i$ の C_k の値にかかわらず, $k = i$ を除くすべての C_k がゼロの時, 発電量が負となり不合理である. 従って, L の最大値は, 次式で与えられる.

$$L = \frac{1}{n-1} \quad (9)$$

これを式 (6) に戻すと, 最終的に以下の値を得る.

$$G_i = -\frac{1}{n-1} \times C_i + \frac{1}{n-1} \times \sum_{k=1}^n C_k \quad [W] \quad (10)$$

この式は, 明らかに以下のことを示している.

定理 3 (各戸に許容される最大発電量). 自戸の消費電力が少ない程, より多くの発電量を配賦されることが, 式

(3) の線形関係で表される場合, 各戸への発電量配賦の最大値は, 自戸以外の各戸の消費電力の平均値である.

なお, SOFC が発電できる電力は最大 $700[W]$ であるため, 式 (10) の結果, $G_i > 700[W]$ となる家庭が存在する場合は, 発電電力に余剰のある他家庭の SOFC でカバーする. 具体的には次のような制御を行う. $G_i > 700[W]$ となる家庭が m 戸ある場合, それらの家庭の SOFC で賄えない電力が合計で以下の式になる.

$$\sum_{j=1}^m (G_j - 700) \quad [W] \quad (11)$$

これを, 発電電力に余剰のある他家庭の SOFC に均等に割り振る. その場合, 発電電力の余剰のある家庭の SOFC の発電量は以下ようになる.

$$G_k = \frac{\sum_{i=1}^n C_i - C_k}{n-1} + \frac{\sum_{j=1}^m (G_j - 700)}{n-m} \quad [W] \quad (12)$$

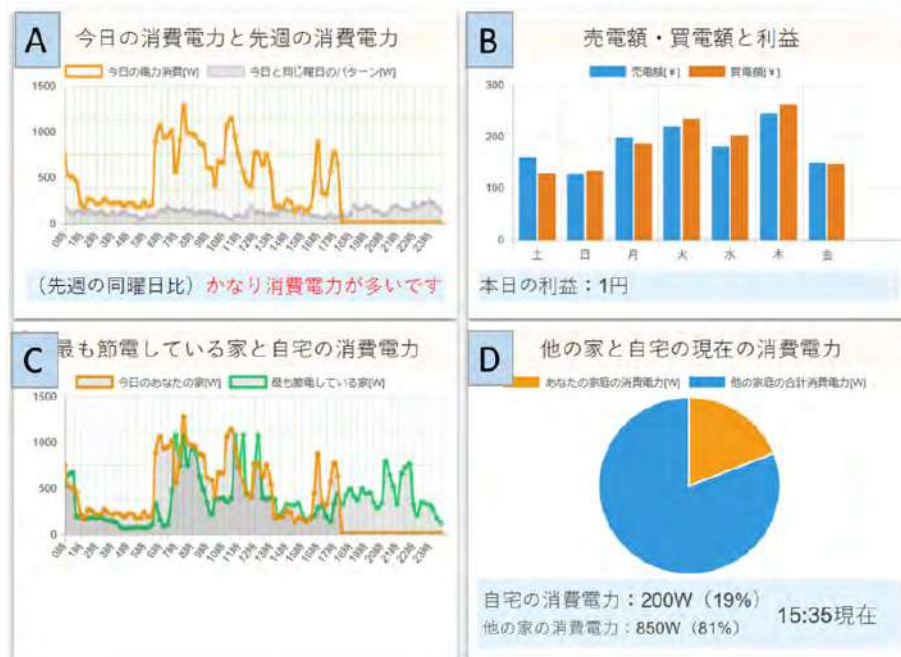


Fig. 4. HEMS の UI(User Interface).

同様の処理を、全ての k について $G_k < 700[W]$ となるまで繰り返し行う。以上の発電制御を行うことで、各家庭の合計発電量と合計消費電力量は等しくなる。また、すべての k について $G_k > 700[W]$ となる場合は、すべての家庭で $700[W]$ を発電する。不足電力は、電力会社からの購入となる。

3.4 システム実装

以上の CEMS の有効性を検証するため、3 戸の家庭を対象とする社会実験を行った。ただし、被験家庭は燃料電池を導入していなかったため、各家庭の実際の消費電力情報からシミュレーションで燃料電池の稼働状況、売電・買電額の導出を行うこととした。

図 3 に実装システムの概要を示す。消費電力量の測定は各家庭のブレーカーからクランプオンセンサ (カレント・トランス) を用いた。電流値は被験家庭側の PC に CSV ファイルで保存され、FTP を利用して、サーバに転送した。各家庭から転送されたデータを用いて C 言語のプログラムにより、シミュレーションを行い、そのデータを HTML, CSS, および JavaScript を用いて作成した Web 画面に反映させた。図 3 の A は電流計測の様子、図 3 の B は家庭に設置した HEMS (Home Energy Management System) である。

基本的には、分電盤から消費電力を測定し、それをサーバへリアルタイムに送信して、SOFC の動作を C

言語でシミュレートし、結果を、後述の HEMS 端末へフィードバックしている。サーバ内では、線形近似式 (1), (2) を用い、各家庭に SOFC を設置したと仮定した場合の発電量、他家庭と売買する電力量などを算出した。

3.5 HEMS

CEMS を利用している家庭に HEMS 端末として、タブレット端末を設置した。節電を促すような情報を表示しておくことで、利用者に節電を促すことを目的とする。図 4 に、タブレット端末に表示する UI を示す。4 面の画面は、それぞれ図 2 のゴール指向分析によって分割されたゴールと対応している。その対応を表 1 に示す。各画面について説明する。

画面 A のグラフは 1 週間前の同曜日の消費電力推移と、当日の消費電力推移を表示し、比較することによって、1 週間前の自宅よりも節電しようという意識を高める役割がある。

画面 B のグラフには、1 日単位で、本研究で用いる発電制御による発電量 G_k に単価を乗じた額を売電額、及び自宅の消費電力 C_k に、単価を乗じた額を買電額として表示している。節電への意識を高めるため、電力量として表示するのではなく、具体的な金額として表示している。また、下部には、売電額から買電額を減じた金額を表示している。これらの表示によって、節電している家庭の発電量が多くなり、多くの電力を売却できる仕組

Table 2. 各家庭の消費電力量 (/月) .

	家 1	家 2	家 3
消費電力量/月 [kWh]	672	243	338

Table 3. 電力会社から電力を購入する場合 (SOFC 無し) の月額料金.

	家 1	家 2	家 3
電気料金	18,264 円	5,628 円	8,269 円
ガス料金	1,337 円	1,337 円	1,337 円
総支払額	19,601 円	6,965 円	9,606 円

Table 4. SOFC 戸別導入時の月額料金 (ガス会社への余剰電力売電) .

	家 1	家 2	家 3
ガス会社へ売電	867 円	2,281 円	1,887 円
電気料金	5,417 円	117 円	1,104 円
ガス料金	7,766 円	7,766 円	7,766 円
実質支払額	12,315 円	5601 円	6,983 円

Table 5. SOFC と CEMS を導入した場合の月額料金.

	家 1	家 2	家 3
他戸へ売電	-3,367 円	2,363 円	1,004 円
電気料金	2,300 円	69 円	518 円
ガス料金	6,509 円	6,974 円	6,838 円
実質支払額	12,175 円	4,681 円	6,352 円

みになっていることを分かりやすく示し、節電を促す役割がある。

画面 C のグラフは、1 週間前の同曜日の 1 日間で、最も消費電力の少なかった家庭のグラフを「手本」として表示し、節電を促す役割がある。

画面 D のグラフは、3 戸の家庭のうち自宅の消費電力がどの程度の割合を占めているかを表示することで、現在の自宅の消費電力が他家庭と比べて多いか少ないかを直感的に理解できるようにする役割がある。

4 評価実験

4.1 概要

提案システム・UI が省エネルギーにつながるのか、そして省エネルギーへの利用者のインセンティブが高まるのか否かを検証するため、2017 年 11 月 16 日から翌年 1 月 19 日までの約 2 ヶ月間、大阪市内において評価実験を行った。戸数は、プライバシー保護の観点から、最低

Table 6. コスト削減効果 (月額) .

	家 1	家 2	家 3
SOFC 未導入と比較した、SOFC 導入 (ガス会社余剰買取有) によるコスト削減	7,286 円	1,364 円	2,623 円
SOFC 未導入と比較した、SOFC+CEMS(余剰買取無) 採用によるコスト削減	7,426 円	2,284 円	3,254 円
SOFC 導入 (ガス会社余剰買取有) と比較した、CEMS 採用 (余剰買取無) によるコスト削減	140 円	920 円	631 円

数の 3 戸とした。3 戸とも一戸建てである。1 戸は本論文著者の一人の実家、他 2 戸は研究室内の学生の実家である。後述の様に、評価を目的にヒアリングを実施したが、被験者数は 3 戸から均等に 3 名ずつ、合計 9 名である。

省エネルギー効果の検証で、一番重要なのは実際の各家庭の消費電力量である。2 か月間の各家庭の日毎の消費電力量を図 5 に示す。気温変化の大きな時期だったので、平均気温の推移とともにグラフ化している。

図 5 に示した通り、評価期間中、気温がどんどん低下した。このため、エアコン需要が増えて、期間中、消費電力量はむしろ増加した。消費電力量データからでは、プロトタイプシステムの UI が節電に役立つとの検証は得られなかった。そこで、提案システムの有効性を確認するため、以下の 3 種類の評価を行うこととした。以下、順に結果を報告する。

- エネルギーコスト評価：各家庭におけるエネルギーコストが、CEMS 導入によりいかに変化したかの分析。
- 単独画面評価：節電を促す内容に設定した、画面 A から画面 D を、それぞれ単独で被験者に見てもらい、節電インセンティブをヒアリングして判定。
- 行動要因分析：、被験者の UI に対する認識が、表面的なレベルではなく、深い理解に基づいているか否かの検証。Ajzen により提唱された計画的行動理論¹⁷⁾¹⁸⁾に着目し、画面設計時の意図が、正しく、

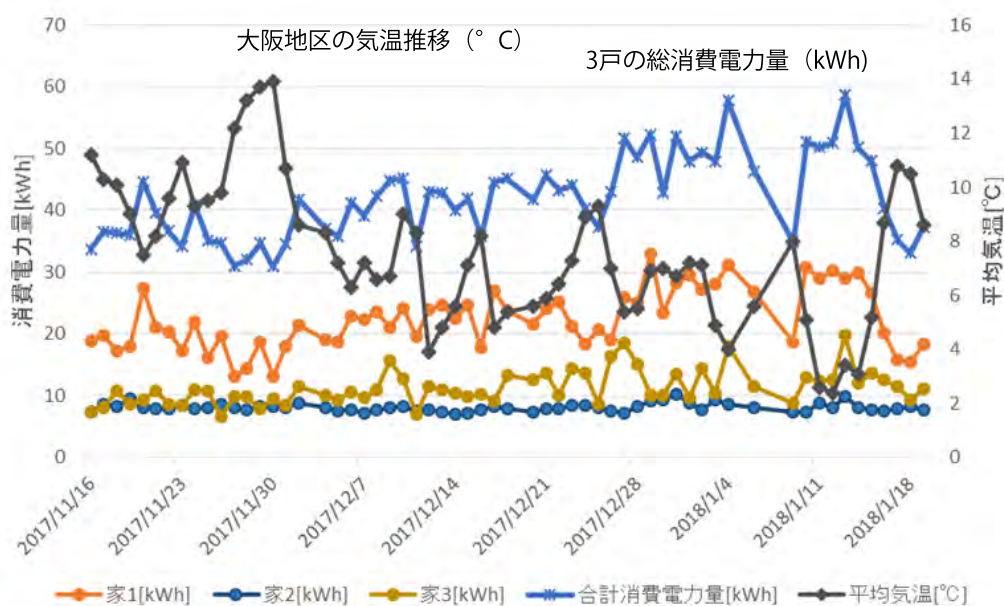


Fig. 5. 消費電力と気温の推移.

被験者に認識されているか否かを確認する。

4.2 支払額による提案方式の評価

まず、基礎データとして、3戸の各家庭の1ヵ月あたりの消費電力量を表2に示す。消費電力に大きな差があるのは、恐らくは（消費電力量の少ない家庭では）暖房に石油ストーブを利用している点が影響していると思われる。上記の消費電力量の下、1) SOFC導入前の通常の戸別契約、2) 戸別にSOFCを入れて、ガス会社による余剰電力全量買い取りを適用、3) 本提案のCEMS導入（SOFCを各戸に設置、ガス会社の余剰買取無し）、の間でエネルギーコストを比較する。

SOFC導入前の通常の戸別ガス契約の状況を表3に示す。金額はすべて、2ヵ月間の支払額の平均から算出した1ヵ月あたりの金額である。なお、一般的な家庭のガス使用量を考慮し、ガス会社としては、大阪ガスの一般B料金を計算に用いている。

表4はSOFCのみを3戸に戸別に導入して、常時、SOFCで最大発電量の700[W]を発電するケースである。余剰電力を大阪ガスが約8.6円で買い取る制度を利用した。大阪ガスの「ガス得プランマイホーム発電料金」の11月、12月、1月料金に基づき、著者らの線形近似式(1)(2)を利用してガス量・加温量を算出した。なお、基本料金と単価は家庭ごとに該当する料金プランを用いている。さらに、SOFCが発電する際に発生する副生成熱を活用できることを考慮し、ガス料金のうち、お

湯を生成するために使用したコストは差し引いている。表4における実質支払額とは、支払額から大阪ガスへの売電によって受け取ることでできる金額を減じたものである。

次に、SOFCに加えて本研究のCEMSを導入し、余剰電力の共有を行った場合の支払額を以下の表5に示す。計算方法は表4と同様である。なお、表5における売電額とは、発電した電力を他家庭に売却することで得られた金額から、他家庭から購入した電力の金額を減じた金額である。他家庭から購入した電力の方が多い場合は、売電額を負として示している。

以上の表3～表5の結果を、比較する。各家庭でどの程度コスト削減効果があるのかをまとめて表6に示す。SOFC単独導入では、消費電力の多い家庭ほど導入効果が大きい。消費電力が多いほどコスト削減効果が高いため、節電に対する意識を低下させることも考えられる。

一方、本研究のCEMSを導入することで、CEMSでは、フルパワー運転していないにも関わらず、フルパワー運転のSOFC戸別導入（ガス会社による余剰買取制度有）に比較して、どの家庭も、コストメリットがある。特に、電力消費の少ない家2のメリットは大きい。もともと、エネルギーコストが月額6,000円程度の家庭で、制御方式を連携させただけで、総コストの15%に近いコストメリットを得ているのは注目値する。100～200万円のプライスであるエネファームを導入して、余剰を

Table 7. 単独画面ヒアリングの選択肢.

選択肢	内容
I	強く節電しようと感じた
II	少し節電しようと感じた
III	あまり節電しようと感じなかった
IV	まったく節電しようと感じなかった

Table 8. 単独画面時の節電意識 (画面 A~画面 D).

節電意識	画面 A	画面 B	画面 C	画面 D
(I) 強く節電を意識	0	3	0	0
(II) 少し節電を意識	7	5	7	7
(III) あまり意識せず	2	1	2	2
(IV) 節電意識生まれず	0	0	0	0

全量、ガス会社に買い取ってもらっても、コストメリットは月額 1,400 円弱であったことに留意されたい。

消費電力の最も多かった家 1 についても、月額 140 円のコスト削減効果がある。ただし、こうなると、「エネルギー消費の大きな家庭」は、CEMS から離脱することも考えられ、本提案のひとつの課題であろう。本提案の「省エネへの競争」は、同程度の消費電力の家庭間で実施すべきことを示唆している。

4.3 単独画面評価

画面 A から画面 D の節電インセンティブを調査するため、画面 A から画面 D をそれぞれ一つ一つ切り出して、そこに、節電を促すデータ状態を作った。これを被験者に見てもらい、節電意欲が沸いたか否かを、表 7 の選択肢で回答してもらった。回答結果を表 8 に示す。画面 B の評価が高く、残りの 3 画面のスコアは同一である。強く節電を意識した被験者が居るのは、画面 B のみであり、他の 3 画面は、「少し意識」とインパクトが弱い。

注意しなければならないのは、今回の様に、身内に近い被験者に PBL で構築したシステムの評価をお願いした場合、「学生さんが頑張っているから、そこそこの評価をしてあげよう」との配慮が働く恐れがある。その意味で、表 8 における画面 A、画面 C、画面 D の評価は似すぎていて、節電インセンティブがあると判断するのは危険である。より深いレベルで、UI 設計者の意図が、被験者に伝わっているか否かを評価する必要があると判断した。それが、次の行動要因分析である。尚、自由記述の

アンケートも月毎に実施して、分析の参考としている。

4.4 行動要因分析

本評価では、UI の設計意図が、正しく、被験者に認識されているか否かを評価する。このため、Ajzen により提唱された計画的行動理論の人間が行動を引き起こす 4 つの要因、(主観的規範、行動制御感、態度、道徳的規範)に着目した¹⁷⁾¹⁸⁾。計画的行動理論では、これら要因は、行動意図に変化し、行動意図が行動へとつながる事で、結果的に人間が行動するとされている。

具体的には、各画面について、「この画面ならユーザには、この行動要因が生成される筈」というデータ状態を設定しておき、1) 4 画面中の 1 画面をターゲット画面として、4 面表示の UI において、ターゲット画面が目されるか否かをヒアリングし、次に、2) 正しくターゲット画面を認識した被験者に、行動要因のいずれによるかを選択してもらい、というステップを踏んだ。以下の手順を、ターゲット画面として、画面 A から画面 D について、9 名の被験者に対して、4 回実行した。

1. ターゲット画面のみが節電を促す表示になっている UI 画面を作成して***被験者に見せる。表 9 の「実際のデータ状態」には、実際に各画面に対して設定されたデータ状態を示す。
2. 被験者が画面 A~画面 D のどの画面によって最も節電を促されていると感じたかを聞きだし、もし、それがターゲット画面なら次のステップを実施する。ターゲット画面でない場合には、当該ターゲット画面については、ヒアリング終了。
3. その画面を選んだのは、どのような要因かを被験者にヒアリングする。この際、表 9 の 4 種類の行動要因から、その説明を読みながら、インセンティブの原因を回答してもらった。

表 10 に、各ターゲット画面毎の回答結果を示す。ターゲット画面を正しく認識したのは、画面 A が 4 名、画面 B が 5 名、画面 C が 8 名、画面 D が 6 名である。表 8 とは異なり、画面 A の評価が低い。

4.5 画面 A から画面 D の有効性分析結果

本節では、単独画面によるヒアリング、行動要因分析、及び自由記述のアンケート結果 (付録参照) の結果から各画面の有効性を分析する。

*** 図 4 は、この評価のために用いたサンプルであり、画面 A のみが節電を促す表示となっている。

Table 9. 人間が行動を引き起こす要因.

行動要因	本来の意味	画面	内容説明	実際のデータ状態
①主観的規範	重要な人からの圧力	画面 C 及び画面 D	他の家庭の消費電力が自宅と比べて多いか少ないかを意識した	画面 C : 最も節電している家より消費電力量が多い時 画面 D:現在の自宅の消費電力量が CEMS 全体の中で多い時
②行動制御感	実際に行うことができそうか	画面 A	与えられた情報から、自宅はまだ節電する余地があると感じた	画面 A : 自戸の 1 週間前の電力消費量データより多い時
③態度	経済的メリット	画面 B	電気料金の負担など経済的要因を意識した	画面 B : 当日の買電額が売電額より多い時
④道徳的規範	社会的に正しいと認められるか否か	(該当画面無し)	二酸化炭素の削減の必要性など、社会的責任を意識した	(該当画面なし)

Table 10. 行動要因ヒアリング結果.

行動要因	画面 A 回答内訳 (人) 計 4 名	画面 B 回答内訳 (人) 計 5 名	画面 C 回答内訳 (人) 計 8 名	画面 D 回答内訳 (人) 計 6 名
①主観的規範	2	2	6	5
②行動制御感	2	0	2	1
③態度	0	3	0	0
④道徳的規範	0	0	0	0

画面 A については、行動要因として、自家庭との比較によって節電の余地を意識すると想定していたが、表 10 の通り、「主観的規範（他との比較）」、「行動制御感（実現可能性）」が同スコアであり、画面 A には他家庭との比較は何も表示されていないにもかかわらず、被験者は他家庭を意識している。画面 A については、利用者に対して明確に節電を促すことができているとは言えない。自由記述アンケート（付録参照）から見ると、先週とは気温などの条件が異なったり、先週は留守であった、等の外部事情もあり、画面 A は、比較対象として適切ではないという意見が多い。今後の検討課題である。

画面 B については、単独画面評価でも、「強く節電を意識」「少し節電を意識」と回答したのは 9 名中 8 名に

及ぶ（表 8）。また、行動要因分析（表 10）では、画面 B を「節電しなければならない」と認識した被験者は、5 名と半数を超えた。この 5 名の行動要因については、「態度（経済的メリット）」のスコアが最も高く、次いで「主観的規範（他との比較）」のスコアが高かった。これは、自由記述のアンケートにもあるように、UI に具体的な金額を表示していることと、節電している家庭のコストメリットがより大きくなることを意識しているため、経済的要因と、他家庭の消費電力を意識したと考えられる。以上より、画面 B が被験者にコストなどの経済的な要因と、他家庭の消費電力を意識させ、節電を促していると判断する。

画面 C については、単独画面評価（表 8）で、「少し節電を意識」の選択肢に 9 名中 7 名が回答した。また、行動要因調査（表 10）では、ターゲット画面が画面 C であったデータ状態で、「画面 C」と回答したのは 8 名に達した。行動要因については、「主観的規範」、つまり「他の家庭の消費電力が自宅と比べて多いか少ないかを意識した」が最も高いスコアとなった。自由記述アンケートにもあるように、具体的に他家庭の消費電力を把握できることから、他家庭を強く意識し、競争心を生み出すものと考えられる。以上より、画面 C は他家庭との競争意識を生み出し節電を促していると判断する。

画面 D については、単独画面評価では、表 8 の通り、「少し節電を意識」の選択肢に 9 名中 7 名が回答した。また、行動要因調査（表 10）では、ターゲット画面が

画面 D であったデータ状態で、画面 D と回答したのは 6 名であった。行動要因については、「主観的規範」、つまり「他の家庭の消費電力が自宅と比べて多いか少ないかを意識した」という回答が最も高いスコアとなった。画面 C と同様、自由記述アンケートから、競争心が芽生えていることが読み取れる。リアルタイムの消費電力で比較を行い、円グラフという視覚的にわかりやすい表示を行うことでそのような意識を生み出す効果があると考えられる。以上より、自家庭と他家庭の円グラフでの割合の表示は、節電を促している。

以上の考察により、図 1 のゴール指向分析結果に基づく図 4 の UI のうち、画面 B、画面 C、画面 D は利用者に節電を促すために役立っていると判断した。画面 A については気温や、在宅か留守かなどの条件の違いを全く考慮できておらず、比較対象が適切でないことから、節電を促すことができなかった。さらに、自由記述アンケートで HEMS への「飽き」「競争への疲れ」を指摘する意見があった。この「飽き」に対してどのような対策を行うかも今後の課題である。

5 まとめ

本論文では、SOFC を設置した複数の家庭が連携して、発電能力の余裕分を他の家庭に融通する、小規模な CEMS 構成を提案した。本 CEMS の特徴は、「節電を促す」を狙いとしている点にある。ただし、「節電を促す」は、ソフトウェアの機能としては、非機能要求である。そこで、プロトタイプ的设计に際しては、ゴール指向分析を採用した。ゴール指向分析の結果から、「節電するほど SOFC 発電量が増加して、売電量が増える」構成が適切と判断した。

「節電するほど SOFC 発電量が増加して、売電量が増える」制御方式としては、各家庭の SOFC 発電量が、当該家庭の電力消費量の一次関数（電力消費量に対する係数は負）となる条件を前提として設定し、理論的に、「CEMS の他家庭の消費電力の平均値を SOFC 発電量とする」が限界値であることを明らかにした。

提案システムのプロトタイプを構築し、3 戸の協力を得て、2 か月間の社会実験を行った。ただし、SOFC はソフトウェアによるシミュレーションである。社会実験を実施した時期が、冬期に向かう時期であったので、エアコンの稼働が日々増加する時期であり、提案システムの

省エネルギー効果の確認はできなかった。しかし、ゴール指向分析により得られたゴールに対応した HEMS ユーザインタフェースは、利用者に、節電のインセンティブになることを、ヒアリングにより確認できた。また、家庭の支払いコストとしては、本 HEMS 構成によれば、各戸に SOFC を入れて、余剰電力をガス会社が買い取る場合よりも、コストダウンできることを確認した。

参考文献

- 1) 大阪ガスの家庭用固体酸化物形燃料電池 (SOFC) システム
<http://www.osakagas.co.jp/rd/fuelcell/sofc/index.html>
2018.7.28 確認)
- 2) 新エネルギー財団 (NEF), 平成 22 年度・固体酸化物形燃料電池実証研究成果報告会報告書, p.96, 2011 年 3 月
- 3) 電気事業連合会, “日本の電力消費”
<http://www.fepc.or.jp/enterprise/jigyuu/japan/>(2018.7.28 確認)
- 4) 大阪ガス, 余剰電力買取について
<http://home.osakagas.co.jp/search.buy/enefarm/about/purchas.html>(2018.7.28 確認)
- 5) 大阪ガス実験集合住宅 NEXT21
<http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/next21/>(2018.7.28 確認)
<http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/next21/system/system5.html>(2018.7.28 確認)
- 6) 静岡ガス「T-グリッドシステム」
<https://response.jp/article/2014/02/04/216388.html>
(2018.7.28 確認)
- 7) Takaaki Ushioda, Motomu Toyokawa, Shigeo Kaneda, “Proposal of Linear Approximation of Household Fuel Cells and Small-Scale Community Energy Management System”, Proc. of 2015 IEEE 39th Annual Computer Software and Applications Conference, Vol.3, pp. 194-199, July, 2015, DOI:10.1109/COMPSAC.2015.232
- 8) 金田 重郎, 井上 怜, 柴野 直人: 家庭用燃料電池 (SOFC) 導入効果に関する近似分析, 同志社政策科学研究 (同志社大学大学院総合政策科学研究科・紀要), Vol.15, No.2, pp.41-58 2014 年 3 月
- 9) 柴野 直人, 井上 怜, 金田 重郎: 家庭用燃料電池における導入効果の推定が可能な線形近似式の提案, 電気学会研究会資料. 情報システム研究会, Vol.2013, No.37, pp.1-6, 2013 年 9 月
- 10) 井上 怜, 柴野 直人, 金田 重郎: 共通負荷線方式に基づく燃料電池制御手法の提案, 電気学会研究会資料. 情報システム研究会, Vol.2013, No.37, pp.7-12, 2013 年 9 月
- 11) 坂倉 淳, 十河 直人, 宮崎 隆彦, 上田 祐樹, 秋澤 淳:

8-4-1 集合住宅における燃料電池の複数住戸共有による経済性向上, 日本エネルギー学会大会講演要旨集, 日本エネルギー学会, Vol.19, pp.370-371, 2010

- 12) 大阪ガス実験集合住宅「NEXT21」第4フェーズ居住実験の中間結果の概要
http://www.osakagas.co.jp/company/press/pr_2015/_icsFiles/afieldfile/2015/11/11/151112_1.pdf
- 13) 静岡ガスのスマートコミュニティに対する取り組み～「T-グリッドシステム」によるマンション内電力融通技術の開発～, 静岡ガス株式会社, 2017年6月,
http://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/smacom/data/smacom2017_02shizuokagas.pdf(2018.8.6 確認)
- 14) 藤原 孝浩, 田中 稔彦, 高島 海, 金田 重郎:固体酸化物燃料電池(SOFC)の発電量を節電により増加させる小規模CEMS構成の提案, 情報処理学会, 情報システムと社会環境研究会, 2018年3月
- 15) Takahiro Fujiwara, Toshihiko Tanaka, Kai Takashima, Shigeo Kaneda, “Community Energy Management System To Encourage Power Saving Competition”, 2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), Vol.2, pp.241-246, July, 2018, DOI: 10.1109/COMPSAC.2018.10237
- 16) D-Case 委員会, “D-Case の必要性”,
<http://www.dcase.jp/p/jintro2.html>(2018.7.28 確認)
- 17) 環境省, “CO2削減行動を促進するインセンティブ付与の仕組みの検討について,”
https://www.env.go.jp/earth/house/conf/hems_h25_01/mat03.pdf(2018年8月3日確認)
- 18) I. Ajzen, “Behavioral Interventions Based on the Theory of Planned Behavior”
<https://people.umass.edu/ajzen/pdf/tpb.intervention.pdf>
(2018年8月3日確認)

付録

本付録では、評価の家庭で被験者から提示された自由記述コメントについて、まとめて示す。

【画面 A に関する意見】

- 先週と比べ赤字で「かなり消費電力が多いです」とあるが寒くなったから仕方がない。圧力を感じる。
- 時間毎の消費電力から何が電力を多く消費しているか考えることができている。

【画面 B に関する意見】

- 具体的金額で示されると心中穏やかでいられない。圧力を感じる。

- 電気を売電したことがないので少し実感が湧きにくい。価格まで表示されているので数値的にはよくわかった。

【画面 C に関する意見】

- 最も節電している家がどのような生活をしているか疑問。
- 意識しなくても他家と比較しているところが気になってしまうから効果的だと思う。負けていたら悔しい。

【画面 D に関する意見】

- 円グラフは一目で勝負が判明する。勝った、負けたの変化が面白い。暖房止めようと決心するきっかけが起る。
- 一番、目が行く。訴える力が大きい。
- 一番比較しやすくわかりやすい。

【全般的意見】

- 自宅の消費電力と向き合うことができた。
- 画面 A と画面 C において1週間前のデータと比較をしているが比較対象の環境(気温など)が揃っていない。
- 三週間経て見ることに飽きた。

以上

A Simplified Estimation Method of Propagation Loss considering Blocking Vehicles in V2V Communication Environments

Kentaro YAMANE*, Hisato IWAI* and Hideichi SASAOKA*

(Received May 7, 2019)

In V2V (Vehicle to Vehicle) communication environments, existence of the other vehicles in the surrounding area influences the propagation characteristics. However, most of reports on the propagation analysis did not consider the blocking vehicles. It is because the consideration of the influence of the surrounding vehicles greatly increases the computational cost in numerical analyses. For instance in the ray tracing method, which is popular as an analysis method of the propagation characteristics in various wireless communications, it is general to use UTD (Uniform Theory of Diffraction) for considering blocking vehicles but it requires explosive increase of amount of calculation load. On the other hand, in the past research on human body blocking, it is shown that good agreement is found between the blocking ratio of the area of the first Fresnel zone and the increase of the propagation loss due to the human body blocking. In this paper, based on this idea, we propose a new method to consider the effect of the blocking vehicles in V2V communication environments. The assumed situation is a non-line-of-sight environment over an intersection.

Key words : V2V communication, propagation loss, ray tracing, Fresnel zone, blocking vehicles

キーワード : 車車間通信, 伝搬損失, レイトレーシング, フレネルゾーン, 遮蔽車両

車車間通信環境における遮蔽車両を考慮した 伝搬損失の簡易推定法

山根 健太郎, 岩井 誠人, 笹岡 秀一

1. はじめに

近年, 自動車の安全運転支援を目的として様々な研究開発が進められている. その 1 つとして車車間通信が挙げられる¹⁾. 車車間通信とは, 自動車同士が, 自車の速度, 位置等の情報を無線通信により共有することによって, 追突事故の防止等が可能となる技術であり, 自動車の自動運転技術においても重要な役割を果たすと考えられている. このような車車間通信の信頼性を向上させるためには, 実際にこ

のシステムを用いる環境下における電波伝搬特性の把握が重要である. 特に, 無線システムのサービスエリアの把握・設計のためには, 伝搬損失特性が重要となる. 車車間通信で想定される交差点見え見通し外環境では, 送受信を行う車両の他に, 電波を遮蔽する車両が存在する. したがって, 伝搬損失特性を把握するためには, 遮蔽車両の影響の考慮が必要である.

一般に, 無線システムの伝搬損失特性の解析手法

* Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-68xx E-mail: ctwd0397@mail4.doshisha.ac.jp

としてレイトレーシングを用いることが多い。レイトレーシングとは、電波を幾何学的なレイとして取り扱い、壁面等による反射や回折を取り扱う手法である。レイトレーシングは、計算精度、計算負荷の点で、現時点で最も現実的な方法であると考えられている²⁾。本研究でも、車車間通信の伝搬損失解析において、レイトレーシングによる計算を前提とする。レイトレーシングを用いて遮蔽車両の影響を考慮する場合、車両エッジによる回折波として遮蔽領域に到達する電波経路を UTD (Uniform Theory of Diffraction: 均一光学回折理論)等の方法により計算することが一般的である。しかし、このような計算方法では、考慮する遮蔽車両の数が増加すると計算負荷が大きくなるという問題が生じる。

一方、人体遮蔽に関する過去の研究において、第1フレネルゾーンの遮蔽割合と遮蔽による伝搬損失の増加との間によい一致が存在することが示されている³⁾。本研究では、この考え方を交差点見え見通し外環境における遮蔽車両を考慮した伝搬損失計算に適用する。1つのレイの振幅を周辺車両による第1フレネルゾーンの遮蔽の割合に基づいて減少させる方法を提案し、UTD を用いた場合の伝搬損失との差を示すことで、計算精度を評価する。さらに、この手法を元として、遮蔽車両が存在する交差点見え見通し外環境における伝搬損失を、送信点までの距離や受信点までの距離などの環境パラメータを変数とする式表現で簡易に計算することができる簡易推定式を構築する。

2. 第1フレネルゾーンの遮蔽割合を用いた伝搬損失の推定

2.1 フレネルゾーン

Fig. 1 に示す送受信点が見通し内となる環境において、直接波の伝搬経路以外に任意の点(たとえば同図中の点 K)を二次波源とする伝搬経路を考える。この伝搬経路の経路長を l_2 、直接波の伝搬経路の経路長を l_1 とした場合、次式を満たすような二次波源の軌跡とその内側をフレネルゾーンという。

$$l_2 - l_1 = \frac{n\lambda}{2} \quad (1)$$

ここで、 λ は波長、 n は自然数である。フレネルゾーンの形状は送受信点を焦点とする回転楕円体となる。特に直接波に対する経路長差が半波長以内($n = 1$)となる領域を第1フレネルゾーンという。第1フレネルゾーン断面の円の半径 r_F は Fig. 1 における D_1 、 D_2 を用いて、次式で表される。

$$r_F \approx \sqrt{\frac{D_1 D_2}{D_1 + D_2}} \lambda \quad (2)$$

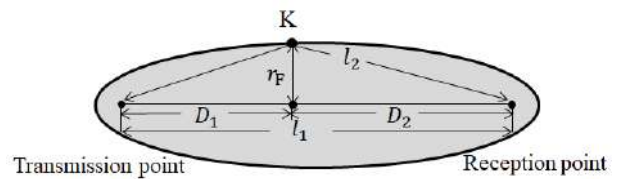


Fig. 1. The first Fresnel zone.

この領域における伝搬経路は、送受信点間の支配的な伝搬経路となることから、第1フレネルゾーン内の遮蔽物の存在は伝搬損失に大きな影響を及ぼす⁴⁾。

第1フレネルゾーンにおける遮蔽割合と遮蔽物による伝搬損失の増加の関係を Fig. 2 に示す。

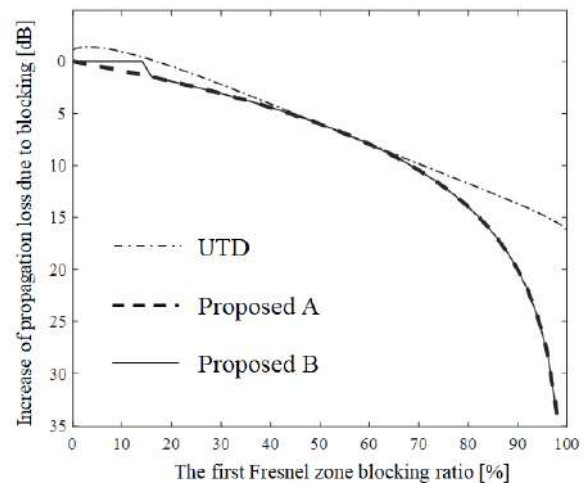


Fig. 2. Increase of propagation loss due to blocking for blocking ratio of the first Fresnel zone.

ここでは、遮蔽物は、薄さが無視できる無限半平面の板であり、これが送受信点間を結ぶ線に対して、垂直に存在すると考えている。Fig. 2 において、提案手法 A (Proposed A) は第1フレネルゾーン全体で遮蔽物による損失の増加を考慮した場合、提案手法 B

(Proposed B)は第1フレネルゾーンの中心から半径の6割の範囲に遮蔽物が存在しない場合に遮蔽物による損失の増加を無視した場合である。同図より、提案手法AとUTD計算の伝搬損失の変化は、大きく遮蔽された場合を除き、近い傾向を示していることがわかる。したがって、第1フレネルゾーンの遮蔽割合により、遮蔽物による伝搬損失の増加を近似的に表すことができる可能性がある。なお、同図には提案手法Bも示しているが、これについては4.1節にて詳しく述べる。

2.2 第1フレネルゾーンの遮蔽割合を用いた伝搬損失の計算方法

以下に第1フレネルゾーンの遮蔽割合を用いた遮蔽車両の影響の考慮方法を詳細に述べる。

初めに、交差点見え見通し外環境における、遮蔽車両が存在しない場合のレイをレイトレーシング計算により求める。そして、そのレイについて第1フレネルゾーンを考える。次に、Fig. 3に示すように、その第1フレネルゾーンにおける非遮蔽割合 p を求め、この割合を次式に示すように、そのレイの振幅に乗じることで遮蔽車両の影響を受けたレイの振幅 E を求める。

$$E = pE_0 \quad (3)$$

ここで、 E_0 は遮蔽車両の影響を受ける前のレイの振幅である。なお、本研究では、遮蔽車両の形状は直方体としている。Fig. 4に交差点環境におけるレイのトレース例を示す。

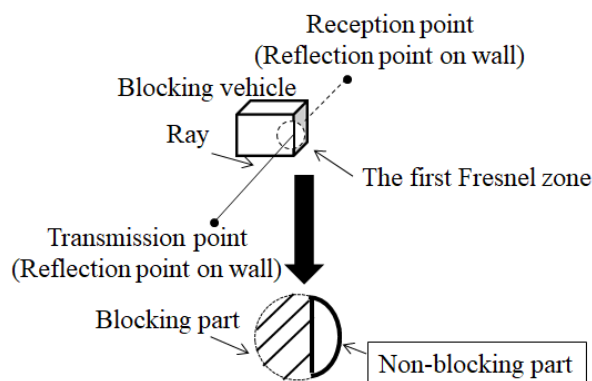


Fig. 3. Conceptual view of calculation method of electric field strength of a ray affected by a blocking vehicle.

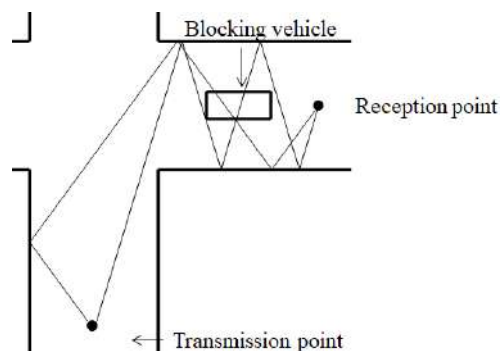


Fig. 4. An example of traced rays.

以下に、第1フレネルゾーンの遮蔽割合 p を求める方法を示す。第1フレネルゾーンの遮蔽割合は、それぞれのレイの遮蔽車両への最近傍点における第1フレネルゾーンによって決定される。そこで以下では、遮蔽車両に対するレイの最近傍点の決定方法を具体的に示す。なお、本研究では、送信点と受信点の高さを同一としているため、以下の説明では、検討を2次元にて行う。実際の環境を想定すると、送受信点の高さが異なる環境の検討も今後必要である。また、Fig. 3では、第1フレネルゾーンの半径が遮蔽車両の大きさに対して小さい場合を示している。今回は、このケースに該当するレイが多い計算条件のため、これを前提とする。しかし、実際の通信環境では送受信点間距離が大きくなり第1フレネルゾーン半径が増大する場合もあると考えられることから、今後は、この条件に該当しない場合についても検討が必要である。

最近傍点の決定方法は、レイが遮蔽車両を通る場合(Case Iとする)、および通らない場合(Case IIとする)の2通りに分けて考える。さらにレイが遮蔽車両を通る場合は、直方体車両の入射点に対して出射点が対辺を通る場合(Case I(a)とする)、出射点が対辺を通らない場合(Case I(b)とする)の2通りに分類する。

Case I(a): 直方体車両の入射点に対して出射点が対辺を通る場合には、最近傍点は、レイが遮蔽車両と重なる点のうち、入射辺と出射辺の中点を結んだ線に対する距離が最も近い点となる。Fig. 5では●が最近傍点を表している(Fig. 6および7でも同様)。

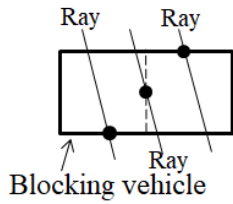


Fig. 5. Case I(a).

Case I(b): 入射点に対して出射点がお互いを通らない場合には、最近傍点は、レイが遮蔽車両と重なる点のうち、入射辺、出射辺の双方に接する頂点(Fig. 6では左下)に対する距離が最も近い点となる。

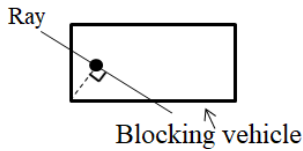


Fig. 6. Case I(b).

Case II: レイが遮蔽車両を通らない場合には、最近傍点は、遮蔽車両に対して最も近い点となる。

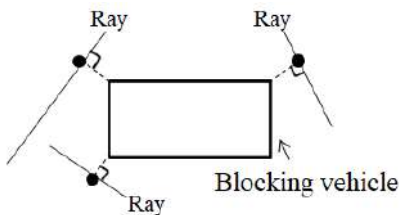


Fig. 7. Case II.

また、Fig. 4にも示されているように、レイが反射等により遮蔽車両の影響を2度以上受ける場合がある。この場合は2通りの方法で遮蔽車両の影響を考える。方法1は、遮蔽車両の影響を受ける度個別の第1フレネルゾーンを考えて、その非遮蔽割合をレイの振幅にそれぞれ乗算する方法、方法2は、1つの第1フレネルゾーンに、それぞれの第1フレネルゾーンの遮蔽部分を投影して、その非遮蔽割合をレイに乗算する方法である。

3. 提案手法の評価環境

3.1 UTD 計算に対する計算精度の評価環境

提案手法のUTD計算に対する計算精度をFig. 8に示す交差点十字路モデルを対象として評価する。交差点十字路を構成する建物壁面は無限に高いものと

し大地反射は考慮しない。また、送受信車両は考慮しない。

計算精度の評価は、遮蔽車両の影響を車両エッジのUTD回折により求めた結果(UTD計算と呼ぶ)を真値として⁵⁾、提案手法とUTD計算の伝搬損失を比較することにより行う。

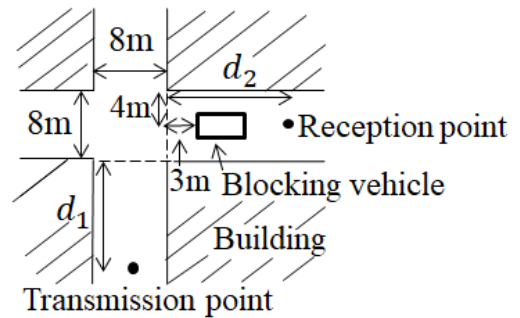


Fig. 8. Intersection crossroad model.

レイトレーシングのパラメータをTable 1に示す。また、遮蔽車両のモデルをFig. 9に示す。建物壁面の材質はコンクリート、遮蔽車両の材質は金属とした。

Table 1. Ray tracing parameters.

Maximum number of reflections		10
Maximum number of diffractions		1
Frequency		700MHz
Height of transmission point		1m
Height of receiving point		1m
Material of blocking vehicle		Metal
Wall material constant	Relative permittivity	6.76
	Conductivity	0.0023S/m

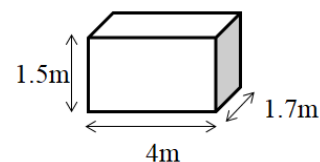


Fig. 9. Blocking vehicle model.

3.2 伝搬損失簡易推定式の構築環境

Fig. 10に、伝搬損失簡易推定式の構築環境を示す。提案手法の精度の基本的な評価は、より簡易な環境

での評価を目的として、道路中央に1台の車両が存在する状況で行ったが、簡易推定式の構築は、より実際的な環境を想定して、両方向の車両の通行を想定した片側1車線の道路において行う。遮蔽車両はそれぞれの車線の中央に存在するものとする。

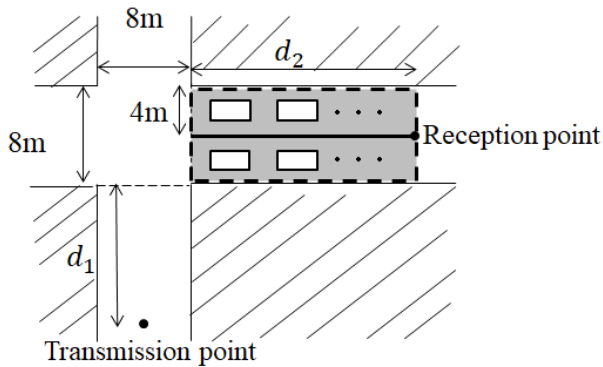


Fig. 10. Environment for estimation formula.

この環境において、提案手法を用いて求めた伝搬損失 $L[\text{dB}]$ を目的変数、 d_1 、 d_2 、遮蔽車両の密度 ρ を説明変数として重回帰分析を行うことで推定式を構築する。

遮蔽車両の密度 ρ は、 N を受信点が存在する道路 (Fig. 10 の破線内部) における遮蔽車両の台数として次式のように定義する。なお、今回は受信点側の道路のみ遮蔽車両を考慮しているが、今後は送信点側の道路についても車両の考慮が必要である。

$$\rho = \frac{N}{8d_2} \quad (4)$$

重回帰分析を行うにあたって、各説明変数はそれぞれ Table 2 に示す範囲で値を変化させる。

Table 2. Ranges of explanatory variables.

Explanatory variables	Range
d_1	10~50m
d_2	10~100m
ρ	0.0005~0.005 Pieces /m ²

4. 精度評価結果

4.1 提案手法の計算精度の評価結果

$d_1 = 10\text{m}$ の場合の UTD 計算、提案手法 A(方法1 および方法2)の d_2 の変化に対する伝搬損失を Fig. 11 に示す。同図には遮蔽車両が存在しない場合の特性もあわせて示している。Fig. 12 は、提案手法 A(方法1)と UTD 計算との伝搬損失の差を求めたものである。

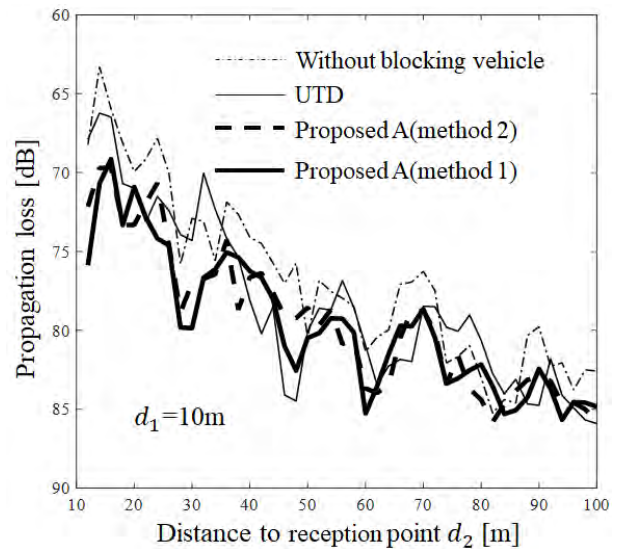


Fig. 11. Propagation loss with respect to change of d_2 (Proposed A).

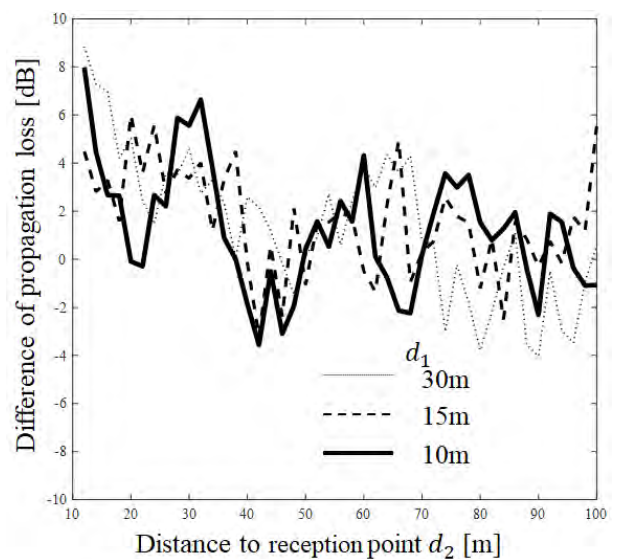


Fig. 12. Difference of propagation loss with change of d_1 (Proposed A).

Fig. 11 では、提案手法 A(方法 1)と UTD 計算の伝搬損失の変化は、近い傾向が見られたものの、遮蔽車両がない場合からの付加損失に差が見られる。また、提案手法における方法 1 と方法 2 の差は大きくない。

Fig. 12 より、 d_1 の値にかかわらず、 d_2 が小さい場合、つまり遮蔽車両が受信点に対して近い位置に存在する場合に、差が大きくなり、 d_2 が大きい場合には差は 5dB 以内となっている。 d_2 が小さい場合に差が大きくなるのは、第 1 フレネルゾーンの半径が小さくなり遮蔽割合が大きいレイが増加したためと思われる。これは、Fig. 2 において遮蔽割合が大きくなると提案手法と UTD 計算の差が大きくなることからそのような影響があると推定できる。

ここで、UTD 計算との誤差を改善するために提案手法 B を用いる。提案手法 B では、第 1 フレネルゾーンの中心から半径の 6 割の範囲に遮蔽車両が存在しない場合に遮蔽車両による損失の増加を無視する。Fig. 2 からも、提案手法 B を用いることにより、UTD 計算との伝搬損失差が小さくなることが予想できる。

ここで、ナイフエッジ回折における、送受信点間を結んだ線からエッジの先端までの距離 h と遮蔽物による伝搬損失の増加の関係を Fig. 13 に示す⁶⁾。

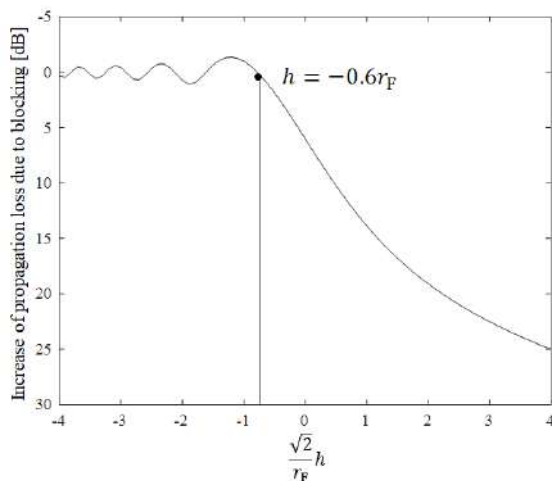


Fig. 13. Relation between h and increase of propagation loss due to blocking.

Fig. 13 より、 h が $-0.6 r_F$ の場合に伝搬損失の増加は 0dB となり、 h がそれよりも小さくなると、振動的

に変化するがその変化は次第に小さくなる。この結果から、遮蔽物による影響を無視できる条件を与える 1 つの目安として、第 1 フレネルゾーンの中心から半径の 6 割の範囲に存在しない場合を考える。

提案手法 B を用いて Fig. 11, Fig. 12 と同様の計算を行った。その結果を Fig. 14 および Fig. 15 に示す。

Fig. 14 を Fig. 11 と比較すると、提案手法と UTD 計算の差が減少していることがわかる。また、Fig. 15 と Fig. 12 の比較から、特に d_2 が小さい領域における伝搬損失差が低下し、 d_1 , d_2 の値にかかわらず損失差は 5dB 以内となった。

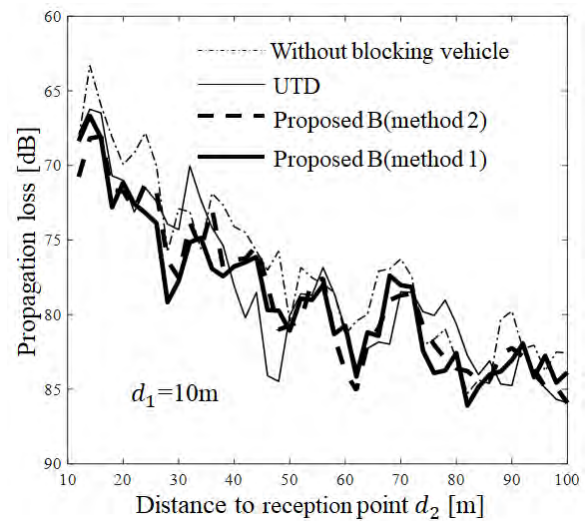


Fig. 14. Propagation loss with respect to change of d_2 (Proposed B).

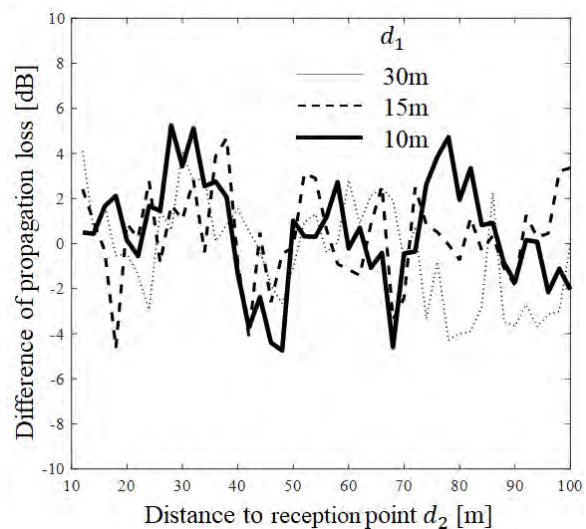


Fig. 15. Difference of propagation loss with change of d_1 (Proposed B).

4.2 伝搬損失簡易推定式の構築結果

Fig. 10 の環境において、伝搬損失推定式の構築のために重回帰分析を行った結果、遮蔽車両が存在する交差点見え見通し外環境における伝搬損失推定式として次式が得られた。なお、次式では、 d_1 、 d_2 、 ρ に対してそれぞれ対数をとった関数形としている。それぞれの変数を変化させて伝搬損失を計算した結果、対数関数での近似がより妥当であると判断した。

$$L = 46.156 + 40.537 \log_{10} d_1 + 32.333 \log_{10} d_2 + 29.819 \log_{10} \rho \quad (5)$$

Fig. 16 の環境において、 x (遮蔽車両の間隔)を 5m、 d_1 を 10m とした場合の、計算値(提案手法)と推定式の伝搬損失を Fig. 17 に示す。同図には、 x を変化させた場合の、計算値と推定式の伝搬損失差もあわせて示している。

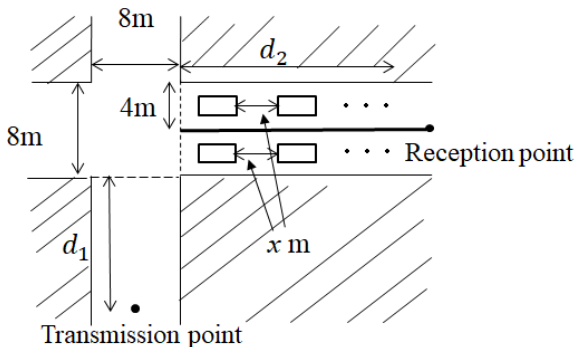


Fig. 16. Evaluation environment of estimation formula.

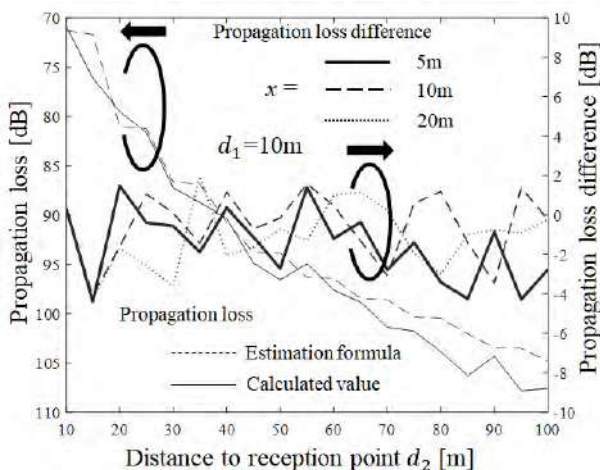


Fig. 17. Propagation loss and difference of propagation loss of calculated value and estimation formula.

Fig. 17 では、計算値と推定式の d_2 の変化に対する伝搬損失の変化の傾向は近い特性を示している。損失差は d_2 および遮蔽車両の間隔、つまり ρ の変化によらず 4dB 以内であることがわかる。

また、 d_1 、 d_2 、および ρ をそれぞれ Table 2 に示す範囲で変化させて、計算値と推定式の RMSE を求めた結果 4.3dB であった。

5. まとめ

本研究では、遮蔽車両が存在する交差点見え見通し外環境の伝搬損失を求める際、遮蔽車両の影響を簡易に考慮できる方法を提案した。今回評価対象とした環境では、提案手法を用いた伝搬損失が UTD 計算との伝搬損失差が 5dB 以内となった。

また、提案手法を用いて複数の遮蔽車両が存在する交差点見え見通し外環境における伝搬損失を簡易に推定する推定式の構築を行った。その結果、計算値と推定式の RMSE が 4.3 dB となった。

参考文献

- 1) Ken Nakaoka, Mamoru Yokota, Kunihiko Sasaki, Tetsuo Horimatu, "A feasibility study on inter-vehicle communication system for practical use in urban area based on multi-vehicle experiment," IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E93-A, No.4, pp.689-699, April 2010.
- 2) 今井哲朗, "電波伝搬解析のためのレイトレーシング法," コロナ社, 2016.
- 3) 伊藤優希, 岩井誠人, 笹岡秀一, "室内環境におけるフレネルゾーンに基づく人体遮蔽損失特性の評価," 信学論 B, Vol.J101-B, No.9, pp.696-705, Sep. 2018.
- 4) 前田憲一, 木村磐根, "電磁波動論," オーム社, 1970.
- 5) 片岡亮, 多賀登喜雄, "車車間通信における交差点内車両による遮蔽損失の周波数特性," 信学技報, AP2008-191, pp.13-18, Feb. 2009.
- 6) 北直樹, "VHF 帯, UHF 帯の電波伝搬," 映像情報メディア学会誌, Vol.70, No.4, pp.603-608, 2016.

Combined Approach of Two Graph Database Systems for Searching Relational Data Efficient

Kazuma KUSU* and Kenji HATANO**

(Received May 14, 2019)

Relational data, such as social networks on social networking services and transaction data on e-commerce services, could be represented a graph. Moreover, the graph has property information for every graph element. Graph database systems make it easy to search nodes, edges, and its properties in the graph data. However, conventional graph database systems have a bottleneck on searching graph elements under specifying its property. This is because conventional graph database needs to scan graph elements for evaluating whether a graph element has a specifying property in a query or not. In this study, we propose an architecture of graph database system combined two types of a graph data model for resolving the problem on the query performance.

Key words : Graph Database System, Property Graph Model, Hypergraph Model

キーワード : グラフデータベースシステム, プロパティグラフモデル, ハイパーグラフモデル

属性付き関係データの検索効率化に向けたグラフデータベースの併用

楠 和馬, 波多野 賢治

1 はじめに

近年におけるスマートフォン端末の普及により, 電子商取引 (以下, EC) サイトやソーシャルネットワークワーキングサービス (以下, SNS), 地図検索サービス (以下, GIS) が多くの人々に利用されている. これらサービスを運営

する企業は膨大で複雑なデータを保有しており, 単に属性情報のみを管理および分析が行えるだけでは要求を満たせなくなっている. グラフは, データ内で実体のある事物 (エンティティ, 節点) およびエンティティ間に存在する関係 (リレーション, 辺) で表現することができる. またグラフは, 他のデータモデルでは直接的に表現できない関係を扱えるため, EC サイトにおけるトランザクションデータや SNS 上の人間関係をデータ化したソーシャルグラフなどの多様な分野でグラフが扱われている. このような巨大で複雑なグラフデータに対して問合せや分析を行うことで, 新たなビジネス機会に繋げることが可能になる. そのため, グラフの問合せや分析の高速化への需要が高まっているため, 多くのグラフデータベースシステム (以下, GDB) が開発されている.

汎用的にグラフデータを扱うことが可能な GDB はプロパティグラフモデル (以下, PG モデル) と呼ばれるグラフモデルでデータを格納している. PG モデルは

* Graduate School of Culture and Information Science,
Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-7656,
E-mail : kusu@ilab.doshisha.ac.jp

** Faculty of Culture and Information Science,
Doshisha University, Kyoto
Telephone : +81-774-65-7663,
E-mail : khatano@mail.doshisha.ac.jp

節点および辺に属性を持つグラフデータを柔軟に表現することができるため、多様な分野におけるグラフデータに適用可能なグラフモデルである。また、PGQL¹⁾やCypher²⁾、GCORE³⁾のようなPGモデル専用の問合せ言語が提案されており、それら問合せ言語を統合する方策も立てられている⁴⁾。このように、汎用的なグラフデータ管理を行うGDBではPGモデルでグラフデータを管理することが一般的になっている。

しかし、既存GDBでは、節点や辺に付随している属性を各要素に付随する形で格納されているため、特定の属性を持つか否か判断するにはグラフ要素を読み込んだ上で確認する必要がある。したがって、PGモデルを採用しているGDBは、グラフの属性に対して節点の読み込みを高速化可能な索引を構築しない限り、任意の属性を持っている節点を効率的に読み込むことができない。それゆえに、属性を利用したグラフ問合せの性能を向上させるためには、問合せの中で指定された属性を持つグラフ要素を直接的にGDBから読み込み可能にする必要がある。

そこで本研究では、節点・辺情報と属性情報を分割して管理することにより、特定の属性を保有している節点を直接的に読み込み可能なGDBアーキテクチャを提案する。

2 グラフデータベースのグラフモデル

1節で述べたように、グラフデータを扱っているアプリケーションは、SNSやECサイトなどのように数多く存在している。多様なアプリケーションが存在する中で、アプリケーションにおいて必要な機能に合わせて、グラフの種類も多数存在している⁵⁾。

Multi-graph: 一つの節点対の間で複数の辺を持つことが許されているグラフである。

Vertex-labeled graph: エンティティの種別を意味するラベルが節点に付いているグラフである。

Edge-labeled graph: リレーションの種別を意味するラベルが辺に付いているグラフである。

Vertex-attributed graph: エンティティに関する属性情報が節点に付随しているグラフである。

Edge-attributed graph: リレーションに関する属性情報が辺に付随しているグラフである。

Directed graph: リレーションに方向性を有する辺から成るグラフである。

Resource description framework (以下, RDF) :

World Wide Web コンソーシアム⁶⁾により開発されたグラフ標準であり、節点や辺をUniform Resource Identifiers (以下, URI) で表したグラフである。

Hypergraph: 任意数の節点間でリレーションを定義可能なハイパエッジから成るグラフである。

このように、グラフの形状がアプリケーションに合わせて定義されてきており、グラフ処理だけではなく効果的な管理方法に関する要求も徐々に高まりつつある。グラフデータの管理および処理に特化したデータベースであるGDBは、基本的に以下のモデルが採用されている⁷⁾。

Property Graph Model (以下, PGモデル) : PGモデルはMulti-graph, Vertex/Edge labeled graph, Vertex/Edge attributed graph, Directed graphの複合グラフモデルである。このモデルはデータの表現能力が高いため、汎用的にグラフデータを格納可能にするGDBにおいて採用されている。

RDF: Linked Open Dataのデータ記述方法として、W3Cにより標準化されている。前述の通り、節点や辺の記述方法がW3Cにより厳格に定められているため、データ定義を厳密に行える一方で、データ表現力が低くなる。また、節点自体がエンティティではなく、属性値を表現することもあり、その値の数だけ節点や辺の数が増加する。

Hyper Graph Model (以下, HGモデル) : HGモデルはグラフの定義を一般化しており、構成要素の一つであるハイパエッジは任意数の節点集合と定義されている。そのため、同一の関係性を持つ任意数の節点に対して、その関係性を一つのハイパーエッジで表現することができる。また、データ管理において辺の数を削減することができ、ハイパーエッジ同士の集合演算を実行することが可能である。しかし、ハイパーエッジ内の節点間で属性情報の違いを表現することは不可能である。そのため、節点が保有する属性値の違いを表現したい数だけハイパーエッジを作成する必要がある。

3 提案手法

既存 GDB は、グラフ問合せの中で属性値を指定するか否かに関係なく、問合せ対象に該当する節点を全節点集合から読み込んでいる。そのため既存 GDB では、グラフ問合せ内で指定された属性値を持つことのない節点集合に対しても計算機の主記憶に読み込まれている。これにより、グラフ問合せ結果の導出は GDB が管理されているグラフ要素数に依存した性能になり、データ量に対してグラフ走査や分析の処理時間はスケールしないと考えられる。この問題を解決するためには、GDB はグラフ問合せ内で指定されている属性値を持つ節点の読み込みが直接的に行える必要がある。

2 節で述べたように、PG モデルは多様なグラフデータを表現することができ、効率的なグラフ走査を可能にする。PG モデルを利用したグラフ走査は、大規模なグラフにおいても効率的に実行することができることから、その性能をスケールすることが可能になる⁸⁾。グラフデータの属性情報の管理については、問合せ内で指定された属性を持つ節点を直接的に読み込めるように設計可能なグラフモデルを選択する必要がある。また、属性を利用したグラフ分析の性能を向上させることが可能なグラフの管理方法である必要がある。2 節で紹介した中から本研究では、上記の要件を満たすグラフモデルとして、ハイパーエッジにより節点集合を管理可能で、集合演算を適用可能な HG モデルを選択する。HG モデルを採用することにより、問合せ内で実行される集約演算を集合演算で効率的に実行可能にする。

したがって本研究では、PG モデルと HG モデルの GDB を併用することで、属性を利用したグラフ問合せ性能の効率化が可能な GDB アーキテクチャを提案する。

3.1 節点および辺情報のデータ管理

節点および辺情報のデータ管理には、グラフ走査の性能の高い GDB を扱う。そのため本研究では、他の GDB よりもグラフ走査の性能が高いと報告されている Neo4j を用いる^{9, 10)}。Neo4j で管理するグラフ要素は、管理対象としているグラフデータの節点、辺、及びこれらのラベルと属性を格納する。基本的に全てのデータを格納するが、Neo4j 上での属性へのアクセスは、グラフ問合せの結果を表示する際に要求された節点および辺の属性を表示するときのみである。

また、グラフ問合せを向上させる方策として、インデックスの構築を行う必要がある。Neo4j で管理するグラフデータに対しては、属性に基づく検索処理に関しては HG モデルの GDB により行う。そのため、Neo4j の仕様によって生成される、節点や辺のラベルに対するインデックスのみを利用する。

したがって本手法では、グラフ問合せの際にグラフ要素の属性を利用する場合に、グラフ走査に必要な開始節点の読み込みは HG モデルで行い、それを基に Neo4j でグラフ走査処理を実行する。一方、属性を利用しないグラフ問合せの場合、グラフ走査に関連する全処理を Neo4j で実行する。つまり、属性を利用しないグラフ問合せの場合、グラフ走査処理は Neo4j の性能に近似する。

3.2 属性情報のデータ管理

本手法では、グラフ問合せで指定された属性を持つ節点や属性を利用したグラフ分析を効率に行えるようにする。その実現には、2 節で紹介した、ハイパーエッジにより節点集合を定義でき、集合演算の適用が可能な HG モデルの GDB を用いる。HG モデルを採用した既存の GDB は HyperGraphDB のみであるため、本手法では HyperGraphDB をグラフ要素の属性情報を管理する GDB として利用する¹¹⁾。HyperGraphDB は Java 言語で実装された GDB であり、格納できる要素として `atom` と `link` を定義している。`atom` は HyperGraphDB における用語で、Java 言語における基本値やクラスのインスタンスを `atom` として格納することが可能である。2 節で説明した多項関係性の存在を実現するために、HyperGraphDB では `link` で多項関係を表現することが可能になる。つまり、`link` の構成要素は `atom` であり、任意の数を `link` に含めることが可能である。また、この `link` は一つの `atom` として定義されているため、関係の関係という高次の関係性を表現することが可能になる。

そこで、本手法では Neo4j 社が提供する Java API を用いて、節点の Java オブジェクトを HyperGraphDB に `atom` として管理する。また、`link` に含まれる `atom` の意味合いを「ある属性の特定値を保有する節点」となるように、HyperGraphDB に `link` を格納する。

4 評価実験

本節では、本研究で提案する手法の有用性を評価するための実験方法について説明する。本研究で提案する

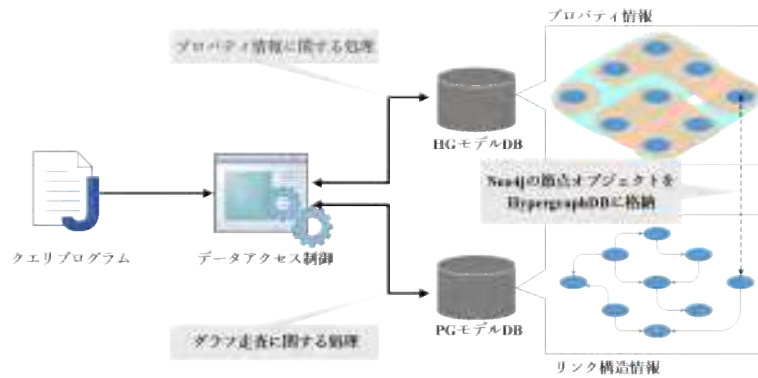


Fig.1. 2種 GDB を併用した GDB アーキテクチャ.



Fig.2. LDBC SNB データのグラフモデル.

GDB のスケーラビリティを保証するために、さまざまなデータ量のデータセットを生成でき、具体的なグラフ問合せが用意されているベンチマークを利用する。

4.1 データセット

本研究では、データ量をスケールさせることが可能で、グラフデータに対する問合せの実例が用意されている、非営利団体の Linked Data Benchmark Council (以下, LDBC) が提供する Social Network Benchmark (以下, SNB) を用いる。LDBC は、近年におけるデータの膨大化・分散化・複雑化に伴い、要求が高まりつつあるグラフ処理および分析の性能を計測可能にすることを目的としている。LDBC が提供している SNB は、グラフを取り扱うサービスとして代表的な SNS サイトで管理されるようなデータをモデル化したものである。LDBC SNB のグラフモデルを図 2 に示す¹²⁾。また、さまざま

Table1. Graph datasets.

dataset & SF	#nodes	#edges	#properties
LDBCSNB-SF0.1	327,588	1,477,965	1,866,081
LDBCSNB-SF1	3,181,724	17,256,038	18,998,125
LDBCSNB-SF10	29,987,835	176,623,445	180,532,296

なデータ規模での問合せ性能の計測を可能にするため、Scale Factor (以下, SF) の値によってデータ量を制御することが可能になる。さらに SNB のグラフ問合せには、Interactive Workload¹³⁾ と Business Intelligence Workload¹⁴⁾ の 2 種類が用意されている。Interactive Workload は、サービス上でユーザが扱う情報の検索および更新に関するトランザクションのテストセットであり、その中に簡単なグラフ走査を行う Interactive Short (以下, IS) Workload が 7 種類、複雑なグラフ走査や分析を行う Interactive Complex (以下, IC) Workload が 14 種類、グラフ要素の追加・削除・更新を行う命令が 8 種類用意されている。Business Intelligence Workload は、サービス運営者がビジネスに役立つ情報を得る目的で行うようなデータ分析に関するトランザクションのテストセットであり、分析的なグラフパタン検索が 25 種用意されている。このように、LDBC SNB には計 54 種類のグラフ問合せが用意されている。

本研究では、LDBC SNB のデータ生成プログラム¹⁵⁾ を用いて、SF 値が 0.1, 1, 10 に対応するデータセットを生成する。次に、生成した LDBC SNB データセットは、LDBC SNB のデータ格納および問合せパラメタ検証用プログラム¹⁶⁾ を用いて、データセットを Neo4j へ格納し、有効な問合せパラメタの生成を行う。

各 SF 値の LDBC SNB データセットを Neo4j に格納し、節点・辺・プロパティそれぞれの数を表 1 に示す。

4.2 ベンチマークの実行方法

本実験では、4.1 節で挙げた LDBC SNB に用意されている Interactive Workload を実行することで、本研究で提案する GDB アーキテクチャのグラフ走査およびグラフ分析の性能を評価する。4.1 節で述べた通り、Interactive Workload には IS Workload と IC Workload があり、これらを Neo4j および HyperGraphDB の Java API^{17, 18)} によって実装する。

4.3 事前実験

本実験を実施する前に、グラフ走査の性能を悪化させずに、PG モデル GDB と HG モデル GDB を併用することが可能か検証するために、Interactive Workload の Interactive Short クエリを実行する。この Short クエリは節点 ID による読み込み後、単一の節点に接続する辺をいくつか走査するクエリであるため、純粋なグラフ走査性能を計測することができる。

Short クエリの実行結果を図 3 に示す。この結果より、IS1 から IS3 に関してはデータ量が指数関数的に増加しているが問合せ性能への影響は小さかったが、IS4 から IS7 に関しては問合せ性能もデータ量の増加に従って指数関数的に悪化していることが分かる。これは、IS1 から IS3 は LDBC SNB データセットの Person ラベルが付いた節点に対してグラフ走査を行う問合せであり、IS4 から IS7 は Message ラベルが付いた節点に対してグラフ走査を行う問合せである。Message ラベルの付いた節点は Person ラベルの付いた節点に比例して増大していくため、SF 値の増加に従って指数関数的に問合せ性能が悪化したといえる。Neo4j 単体の場合と Neo4j と HyperGraphDB 併用の場合での問合せ実行に差は生じなかった。その理由としては、本研究の提案手法では HyperGraphDB へのアクセスは節点の属性を利用する場合のみであるため、節点 ID による節点読み込みのみの Short クエリでは HyperGraphDB を利用した節点読み込みは行われなかったためである。したがって、グラフ問合せの性能を悪化させることは生じなかったといえる。

5 おわりに

本研究では、PG モデルのグラフデータを効率的に管理するために、2 種類の GDB を併用することで節点と辺情報およびそれらの属性情報を分割して管理する GDB

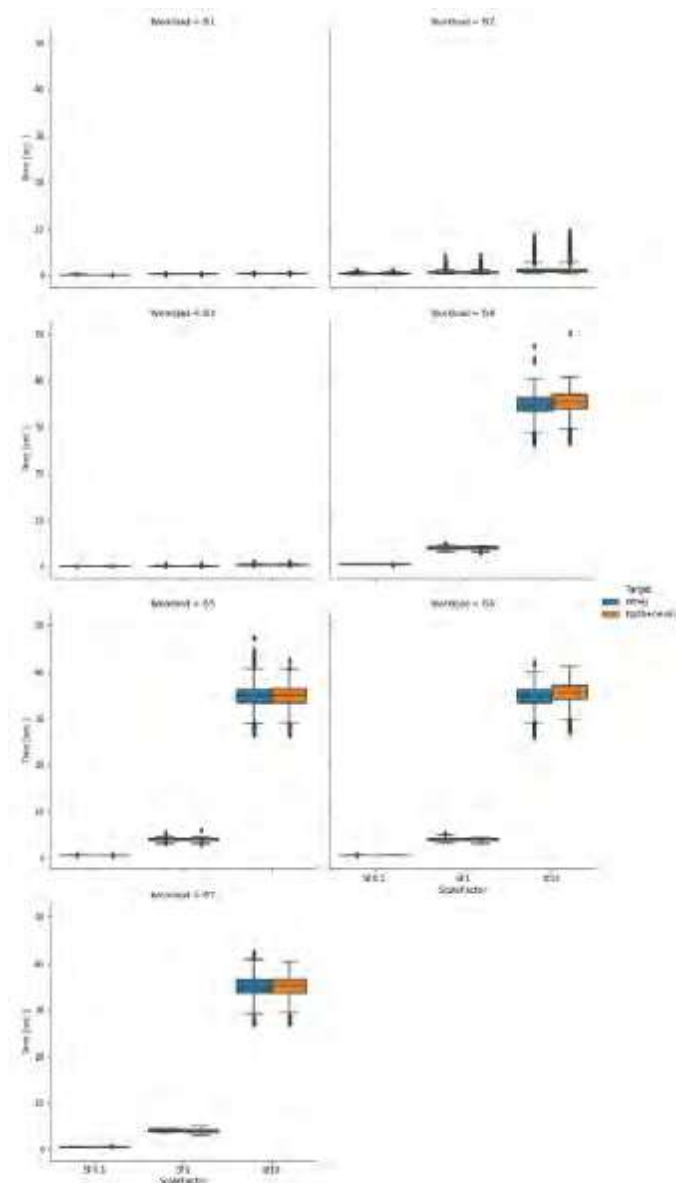


Fig.3. Interactive Workload のクエリ性能。

アーキテクチャを提案した。また、本研究で提案する手法の有用性を評価するため、LDBC SNB を利用したグラフ問合せの性能評価に関する実験の方法についても説明した。さらに、LDBC SNB に用意されている Short クエリを実行し、グラフ走査性能を悪化させることなく 2 種類の GDB を併用可能か検証する簡易な実験を行った。その結果としては、本研究の提案手法は Neo4j と同等の性能でグラフ走査を行うことが可能であったが、問合せ性能がスケールしない問合せが存在していた。

今後の課題は、LDBC SNB の IC Workload および Business Workload を実行し、提案手法のグラフ問合せおよび分析性能に関する評価実験を行い、有用性について検証していく必要がある。また、本稿では SF 値を 100

に設定してデータセットを生成し、大規模のデータセットに対する評価実験も行う必要がある。さらに、本稿で行った予備実験により、属性を利用しない問合せの場合には性能の向上に全く貢献することができていないため、属性を利用しない場合に HG モデルの GDB をどのように活用していくか模索する必要がある。

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」(平成 26 年～平成 30 年, 事業番号 S1411030), JSPS 科研費 JP18H03242/JP18H03342 の助成を受けて遂行された。

参考文献

- 1) Oskar van Rest, Sungpack Hong, Jinha Kim, Xuming Meng, and Hassan Chafi. Pqql: A property graph query language. In *Proceedings of the Fourth International Workshop on Graph Data Management Experiences and Systems*, GRADES '16, pp. 7:1–7:6. ACM, 2016.
- 2) Nadime Francis, Alastair Green, Paolo Guagliardo, Leonid Libkin, Tobias Lindaaker, Victor Marsault, Stefan Plantikow, Mats Rydberg, Petra Selmer, and Andrés Taylor. Cypher: An evolving query language for property graphs. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Management of Data*, SIGMOD '18, pp. 1433–1445. ACM, 2018.
- 3) Renzo Angles, Marcelo Arenas, Pablo Barcelo, Peter Boncz, George Fletcher, Claudio Gutierrez, Tobias Lindaaker, Marcus Paradies, Stefan Plantikow, Juan Sequeda, Oskar van Rest, and Hannes Voigt. G-core: A core for future graph query languages. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Management of Data*, SIGMOD '18, pp. 1421–1432. ACM, 2018.
- 4) The GQL Manifest. One property graph query language. URL: <https://gql.today/>, accessed on May. 15, 2019.
- 5) Marko A. Rodriguez and Peter Neubauer. Constructions from dots and lines. *Bulletin of the American Society for Information Science and Technology*, Vol. 36, No. 6, pp. 35–41, 2010.
- 6) W3C. W3c. URL: <https://www.w3.org>, accessed on May. 15, 2019.
- 7) Ian Robinson, Jim Webber, and Emil Eifrem. *Graph Databases*. O'Reilly Media, Inc., 2015.
- 8) Sherif Sakr and Eric Pardede. *Graph Data Management: Techniques and Applications*. IGI Global, 2011.
- 9) Vojtěch Kolomičenko, Martin Svoboda, and Irena Holubová Mlýnková. Experimental comparison of graph databases. In *Proceedings of International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services*, IIWAS'13, pp. 115:115–115:124. ACM, 2013.
- 10) Salim Jouili and Valentin Vansteenbergh. An empirical comparison of graph databases. In *Proceedings of the 2013 International Conference on Social Computing*, SOCIALCOM '13, pp. 708–715. IEEE Computer Society, 2013.
- 11) Borislav Iordanov. Hypergraphdb: A generalized graph database. In *International Conference on Web-Age Information Management*, pp. 25–36. Springer, 2010.
- 12) Linked Data Benchmark Council. *LDBC The graph & RDF benchmark reference The LDBC Social Network Benchmark (version 0.3.1)*.
- 13) Orri Erling, Alex Averbuch, Josep Larriba-Pey, Hassan Chafi, Andrey Gubichev, Arnau Prat, Minh-Duc Pham, and Peter Boncz. The ldbc social network benchmark: Interactive workload. In *Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, SIGMOD '15, pp. 619–630, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- 14) Gábor Szárnyas, Arnau Prat-Pérez, Alex Averbuch, József Marton, Marcus Paradies, Moritz Kaufmann, Orri Erling, Peter Boncz, Vlad Haprian, and János Antal Benjamin. An early look at the ldbc social network benchmark's business intelligence workload. In *Proceedings of the 1st ACM SIGMOD Joint International Workshop on Graph Data Management Experiences & Systems (GRADES) and Network Data Analytics (NDA)*, GRADES-NDA '18, pp. 9:1–9:11, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- 15) LDBC. ldbc_snb_datagen.git. URL: https://github.com/ldbc/ldbc_snb_implementation, accessed on May. 15, 2019.
- 16) LDBC. ldbc_snb_implementation.git. URL: https://github.com/ldbc/ldbc_snb_implementation, accessed on May. 15, 2019.
- 17) Inc. Neo4j. Package org.neo4j.graphdb.traversal. URL: <https://neo4j.com/docs/java-reference/3.5/javadocs/org/neo4j/graphdb/traversal/package-summary.html>, accessed on May. 15, 2019.
- 18) Inc. Kobrix Software. Hypergraphdb core 1.3-snapshot api. URL: <http://hypergraphdb.org/docs/javadoc/>, accessed on May. 15, 2019.

Empty probability distribution considering measurement characteristics of two-dimensional LRF for autonomous mobile robots

Shunya YAMADA^{*}, Yousuke WATANABE^{**} and Hiroaki TAKADA^{**}

(Received ,)

A wide range of accurate environmental information is needed in order for autonomous mobile robots to move safely. An intelligent space, which contains multiple sensors attached to the environment, is useful for information provision. Many optical sensors such as Laser Range Finders (LRFs) are placed to monitor fixed areas. But, LRFs occasionally miss objects due to distance attenuation of lasers, irregular reflection of lasers, and gaps between lasers. Thus, possibility of these detection failures of LRFs should be considered. In this paper, a novel measurement model with properties of the two-dimensional LRFs is constructed, and the empty probability distribution created by the model are proposed. We set two-dimensional LRFs up on a roadside, and calculated an empty probability distribution to evaluate the utility of the proposed model. In addition, since intelligent spaces often contain multiple LRFs, data measured from different viewpoints can be fused to improve data accuracy. We also evaluated sensor-fusion of multiple empty probability distributions obtained from individual LRFs. The fusion result grasps a location at which a detection failure of LRF has occurred. The usefulness of the proposed method was confirmed in our experimental evaluation.

Key words : Intelligent space, Space detection, Laser range finder, Sensor fusion

キーワード : 空間知能化, 空間検知, レーザーレンジファインダ, センサフュージョン

自律移動ロボットのための2次元LRFの計測特性を考慮した Empty 確率分布

山田 峻也, 渡辺 陽介, 高田 広章

1 はじめに

近年, 人が生活する空間内を自律移動するロボットの開発が積極的に行われている¹⁾. ロボットが安全に自律移動するためには, 周囲環境を正確に検知する必要がある. さらには目的地への経路に走行が困難な場所を含めないためにも, より広範囲の環境情報が必要となる. しかしながら, ロボットに搭載されているセンサのみで検知できる情報にはオクルージョンや誤検知, センサの

検出範囲の上限により限界が存在する. この問題の解決策として空間知能化が提案されている²⁾. 空間知能化とは, 環境側にも固定センサを設置して環境情報を取得し, 必要に応じてネットワークを介してロボットにその情報を送信するシステムである. これにより, ロボットは様々な視点から広範囲の環境情報を観測することができる.

このシステムの一例として, 環境側にレーザーレンジファインダ (以降, LRF) を設置して環境情報を取得す

^{*} Graduate School of Infomatics, Nagoya University, Nagoya
Telephone : +81-52-789-5887, E-mail : s_yamada@ertl.jp

^{**} Institutes for Innovation for Future Society, Nagoya University, Nagoya
Telephone : +81-52-789-5887, E-mail : watanabe@coi.nagoya-u.ac.jp, hiro@ertl.jp

る方法が提案されている³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。LRFは、周囲へ放射線状に指向性のあるレーザー光を発射して、オブジェクトに当たって反射してきたレーザー光から、周囲にあるオブジェクトの位置を計測するセンサである。またオブジェクトが存在しない領域はレーザー光が通過する特徴から、空間をオブジェクトが存在しない領域 (Empty 領域)、オブジェクトが存在する領域 (Occupy 領域)、未探索領域 (Unknown 領域) に区別することができる。これにより、自律移動ロボットへ行動可能領域を伝えることが可能となる。しかしながら、LRFによる計測では検出可能範囲内にオブジェクトがあるにも関わらず検出漏れが発生する危険性がある。Fig. 1は2次元LRFを定点設置して環境情報を取得している様子とその時に得られた点群データである。LRFから約28m離れた場所に4本の車両の通行を制限するためのポール (以降、ポール)があるが、LRFが一番右端のポールを検出できていない。このような検出漏れが発生する原因は主に3つある。1つ目は、LRFはある決まった角度毎に指向性のあるレーザー光を照射して計測を行っていることから、隣合うレーザー光の間にはどうしても隙間が発生する。その隙間にオブジェクトが入ってしまうとレーザー光が当たらないので計測することができない。2つ目は、オブジェクトの材質や表面特性により、レーザー光がオブジェクトに当たった際に減衰し、LRFの受光部で受光できないことがある。3つ目は、レーザー光がオブジェクトへ当たった際に別の方向へレーザー光が反射したり、オブジェクトを透過することによりLRFの受信部にレーザー光が返ってこないことがある。上記でまとめた検出漏れの原因は、レーザー光がオブジェクトを透過する以外、いずれもLRFとオブジェクトの位置関係によるものである。そのため自律移動ロボットでは移動することでオブジェクトの位置関係が変化するため、ある時点では検出漏れをしているオブジェクトが発生していたとしても、オブジェクトとの適切な位置関係がとれた時に検出されるため問題とされてこなかった。しかしながら、定点設置したLRFによる計測ではオブジェクトが移動しない限り位置関係は変わらないため、検出漏れは常に発生し続ける。上記でも述べた通り、環境設置のセンサに検出漏れが発生してもロボット側のセンサが目前で検知すれば安全な走行には影響が発生しないが、目的地への経路選択の段階では通行が困難な場所や通行できない場所を含めてしまう可能性がある。この場合、

目的地までの到着時間が厳格に定められているロボットの運用には影響が発生すると考えられる。これまでは、LRFで検知したオブジェクトの存在を確率的に扱った研究⁷⁾はあるが、オブジェクトが存在しない領域を確率で表現する上で、LRFの計測特性を考慮した研究はされていない。

そこで本研究では、従来よりもLRFの計測特性に踏み込んだ手法を提案する。本研究の新規性は以下の2点である。

(1) 2次元LRFの計測特性を考慮した計測モデル

(2) Empty確率分布の有用性の評価

(1)では、LRFの検出可能範囲について、Empty領域、Occupy領域、Unknown領域の確率を算出する際に、レーザー光の距離減衰や反射、レーザー光の間隔の広がりなどの性質を加味する。これにより、特にEmpty領域を確率値で表現した環境地図 (Empty確率分布)が、LRFの見落としの可能性を反映したより安全なものにできる。(2)では、路側に定点設置した2次元LRFセンサから得られたEmpty確率分布を評価する。またLRF単体での計測ではオクルージョンや誤情報が発生してしまうので、空間知能化では多くの場合、視点が異なる複数のLRFの情報をセンサフュージョンする。そのため、センサフュージョンをしてもEmpty確率分布の有用性が損なわれないか評価する必要がある。そこで Dempster 結合則を用いてセンサフュージョンしたEmpty確率分布が、検出範囲の拡大やそれぞれが出力した誤情報を補正できているかを評価した。これらの評価実験により、本研究で提案するEmpty確率分布は、検出漏れが発生している可能性がある箇所を把握できるだけでなく、センサフュージョンにより検出範囲の拡大と誤情報の補正ができるため、ロボットの行動選択のための新たな判断材料として利用できると考えられる。

本稿では、第2章で本研究で想定している情報システム、第3章でLRFの計測特性、第4章でLRFの計測特性に基づいたEmpty領域の計測モデル、第5章で評価実験、第6章で評価実験の考察を述べる。

2 本研究で想定している情報システム

本研究では、病院やショッピングモールなどの施設に2次元LRFが分散配置されている環境内をロボットが自

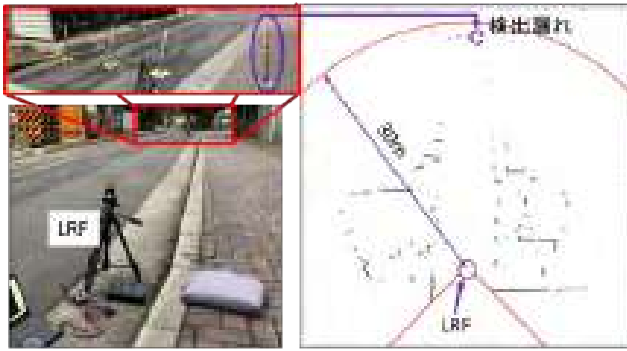


Fig. 1: LRF の検出漏れの様子

律移動する状況を想定している。空間は占有格子地図によって管理されており、LRF が検出した環境情報をもとに各グリッドを、オブジェクトが存在する確率 (Occupancy 確率)、オブジェクトが存在しない確率 (Empty 確率)、オブジェクトが存在するかが不明である確率 (Unknown 確率) という 3 つの確率値で表現する。ただし、Occupancy 確率、Empty 確率、Unknown 確率の和が 1 となるように各確率を設定する。また空間内にはガラスなどの透明な物体は存在せず、オブジェクトの最小サイズを既知とする。

3 LRF の計測特性

LRF は、一定の角度分解能で指向性のあるレーザー光を周囲へ放射線状に照射して、反射光から周囲にあるオブジェクトの位置を計測するセンサである。LRF の計測特性として、距離計測と測域計測の 2 つの点で以下の特徴が確認されている。

3.1 距離計測の特徴

LRF の距離計測の特徴として、LRF から計測値が出力される場合と出力されない場合に分けることができる。計測値が出力される場合は 2 つあり、(a) 正しく計測できている場合、(b) 誤情報を出力している場合である。一方で、計測値が出力されない場合は 3 つあり、(c) データが欠損している場合、(d) 計測可能範囲内にオブジェクトが存在しない場合、(e) LRF の反射光が受光部に届かなかった場合である。このうち (e) は、(e-1) オブジェクトの材質や表面特性によって反射光が減衰する場合と、(e-2) 反射光が別の方向へ反射した場合に発生する⁹⁾。また (c) は LRF から明らかな異常値が出力されるため、データ取得の段階で除去する。

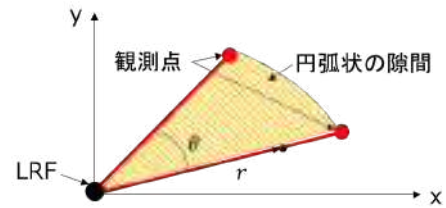


Fig. 2: 隣合うレーザーの間に発生する円弧状の隙間

3.2 測域計測の特徴

LRF は、一定の角度分解能で指向性のあるレーザー光を周囲へ放射線状に照射していることから、Fig. 2 の斜線部のように隣合うレーザーの間には円弧状の隙間が発生する。この隙間にオブジェクトが入ってしまうと LRF から照射されたレーザー光が当たらないため、オブジェクトを検出することができない。この隙間の大きさは LRF の角度分解能 θ とセンサからの距離 r に依存しており、 θ と r が大きいほどこのレーザー間の隙間も大きくなる。

4 LRF の計測特性を考慮した計測モデル

占有格子地図の生成アルゴリズムでは多くの場合、逆センサアルゴリズムが利用される⁹⁾。このアルゴリズムでは、センサ中心からレーザー光を模擬した直線を LRF の検出可能範囲上限まで伸ばし、LRF 中心からオブジェクトに衝突せずに通過したグリッドを Empty 領域、オブジェクトに衝突したグリッドとその周辺のグリッドを Occupancy 領域、それ以上先のグリッドを Unknown 領域として設定する。本研究においても、事前に LRF の計測特性を考慮した計測モデルを作成しておき、逆センサアルゴリズムを利用して、レーザー光が通過した各グリッドに計測モデルより算出した Empty 確率、Occupancy 確率、Unknown 確率を設定する。

4.1 距離計測の特徴を考慮した計測モデル

第 3 章で述べた通り、LRF の距離計測の特徴は、LRF から計測値が出力される場合と出力されない場合に分けることができる。この 2 つの現象は発生する原因が異なるため、計測モデルも計測値が出力された場合と出力されない場合に分けて構築する。

4.1.1 計測値が出力される場合

Empty 領域の計測モデルを構築するために、まずは Occupy 領域の計測モデルを定義する。先行研究として、Moravec らは Occupy 領域を確率値で表現する上で、以下の計測モデルを構築している¹⁰⁾。

$$p_o(r) = 1 - \left(\frac{r-d}{\sigma}\right)^2 \quad (1)$$

ただし、 $p_o(r)$ は LRF から r 離れた位置の Occupy 確率、 r は LRF からの距離であり、 d は計測値、 σ は計測誤差である。この計測モデルにおける Occupy 確率は $d-\sigma$ から上昇し始める。しかしながら、LRF の計測誤差は多くの場合は平均 d 、標準偏差 σ のガウス分布で表現されており⁹⁾、ガウス分布の特性として計測値の真値が σ におさまる確率は約 68.3% である。このため上記の計測モデルを用いると、約 31.7% の確率でグリッド内にオブジェクトが存在するにも関わらず、そのグリッドの Occupy 確率を低く設定する可能性がある。そこで本研究では、計測値の真値が 3σ におさまる確率が約 99.7% であることを利用して、Occupy 領域の計測モデルを以下の式とした。

$$p_o(r) = 1 - \left(\frac{r-d}{3\sigma}\right)^2 \quad (2)$$

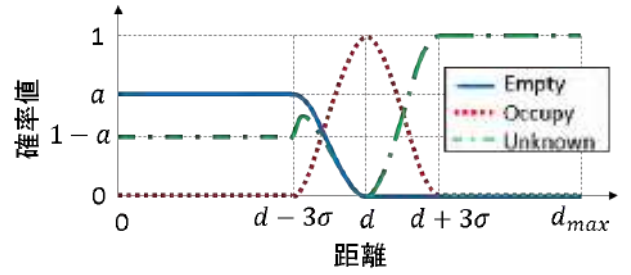
式 (2) を考慮して、Empty 領域の計測モデルを以下のように構築した。

$$p_e(r) = \begin{cases} a & (0 \leq r < d-3\sigma) \\ a-a \left\{1 - \left(\frac{r-d}{3\sigma}\right)^2\right\} & (d-3\sigma \leq r \leq d) \\ 0 & (d < r \leq d_{max}) \end{cases} \quad (3)$$

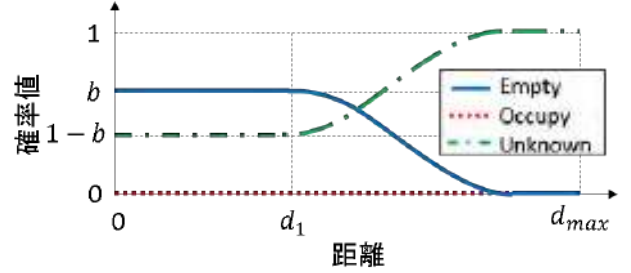
ただし、 $p_e(r)$ は LRF から r 離れた位置の Empty 確率、 r は LRF からの距離、 d は計測値、 d_{max} は LRF の計測範囲の上限値である。式 (3) において、 $0 \leq r < d-3\sigma$ の区間は、計測特性の (b) を考慮して、Empty 確率を 1 ではなく、 a ($0 < a < 1$) とした。この a の値は LRF の信頼度によって調整するパラメータである。次に $d-3\sigma \leq r \leq d$ の区間は、Empty 確率は Occupy 確率と対称関係にあると考えた。最後に $d < r \leq d_{max}$ の区間は、検知できていない領域なので Empty 確率を 0 としている。

Unknown 領域の計測モデルについては、Empty 確率、Occupy 確率、Unknown 確率の和が 1 となるように以下の式と定義する。

$$p_u(r) = 1 - p_e(r) - p_o(r) \quad (4)$$



(a) 計測値が出力される場合の計測モデル



(b) 計測値が出力されない場合の計測モデル

Fig. 3: 距離計測の特徴のみを考慮した計測モデル

ただし、 $p_u(r)$ は LRF から r 離れた位置の Unknown 確率、 r は LRF からの距離である。

LRF が計測値 d を出力した場合、各計測モデルは Fig. 3a のようになる。Fig. 3a において、Empty 領域の計測モデルを実線、Occupy 領域の計測モデルを点線、Unknown 領域の計測モデルを一点鎖線で示している。

4.1.2 計測値が出力されない場合

計測値が出力されない原因は第 3 章に記述した通りであり、(d) のオブジェクトが存在しない要素と (e) のオブジェクトが存在する要素を Empty 領域の計測モデルに組込む必要がある。(e-2) より、計測範囲内には一様にオブジェクトが存在する可能性があるため、Empty 確率の最大値を 1 ではなくて b ($0 < b < 1$) とした。この b の値は、検知範囲内に鏡面反射が発生するオブジェクトがどの程度存在するかによって調整するパラメータである。(e-1) では、LRF の検出距離が遠くなるほど、受信部で検知する反射光の強度がロジスティック曲線を描いて低下し、オブジェクトの明度が低いほど、反射光の強度が低下することが確認されている¹²⁾。そこで明度に関わらず確実に計測できる距離を d_1 とすると、Empty 確率は d_1 からロジスティック曲線を描いて徐々に低下すると考えた。そこで本研究では Empty 領域の計測モ

デルを以下のように構築した。

$$p_e(r) = \begin{cases} b & (0 \leq r < d_1) \\ be^{-c_1 \left(\frac{r-d_1}{d_{max}-d_1} \right)^2 - 1} + b & (d_1 \leq r \leq d_{max}) \end{cases} \quad (5)$$

ただし、 r は LRF からの距離、 d は計測値、 d_{max} は LRF の計測範囲の上限値である。また式 (5) において、 $0 \leq r < d_1$ の区間は (e-2) の特徴より、Empty 確率を b としている。 $d_1 \leq r < d_{max}$ の区間は (e-1) の特徴より、ロジスティック曲線を描いて Empty 確率が低下するとしているが、 c_1 は Empty 確率の低下の程度を調整するパラメータである。

Occupancy 領域の計測モデルは、LRF でオブジェクトを検出できていないことから検出範囲内の Occupancy 確率を 0 とし、Unknown 領域の計測モデルは、Empty 確率、Occupancy 確率、Unknown 確率の和が 1 となるように以下のように構築した。

$$p_u(r) = 1 - p_e(r) \quad (6)$$

LRF が計測値を出力しない場合、各計測モデルは Fig. 3b のようになる。Fig. 3b において、Empty 領域の計測モデルを実線、Occupancy 領域の計測モデルを点線、Unknown 領域の計測モデルを 1 点鎖線で示している。

4.2 測域計測の特徴の考慮

計測領域に存在するオブジェクトの最小サイズが既知の場合、見落としが発生する距離を事前に見積もることができる。このことから、オブジェクトの最小の大きさを l_{min} 、LRF の角度分解能を θ とすると、隣合うレーザー間に存在する円弧状の隙間にオブジェクトが入る可能性がある距離 d_2 は、円弧と弦の関係式より以下の式で算出できる。

$$d_2 = \frac{l_{min}}{2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (7)$$

距離計測の特徴を考慮した Empty 領域の計測モデルに測域計測の特徴を組込む必要があるが、LRF の様々な計測特性が入り混じるため、単純に Empty 領域の計測モデルを構築することができない。そこで本研究では、測域計測の特徴を考慮しなければならない区間については、ロジスティック曲線を描いて Empty 確率が徐々に低下すると仮定して、Empty 領域の計測モデルを構築した。

4.2.1 計測値が出力される場合

$d_2 < d - 3\sigma$ のとき、 $d_2 \leq r \leq d - 3\sigma$ の区間ではオブジェクトを見落としている可能性がある。そこで Empty 領域の計測モデルを以下のように構築した。

$$p_e(r) = \begin{cases} a & (0 \leq r < d_2) \\ ae^{-c_2 \left(\frac{r-d_2}{d_{max}-d_2} \right)^2 - 1} + a & (d_2 \leq r \leq d - 3\sigma) \\ k - k \left\{ 1 - \left(\frac{r-d}{d_2-d} \right)^2 \right\} & (d - 3\sigma \leq r \leq d) \\ 0 & (d < r \leq d_{max}) \end{cases} \quad (8)$$

$$k = ae^{-c_2 \left(\frac{d-3\sigma-d_2}{d_{max}-d_2} \right)^2 - 1} + a \quad (9)$$

ただし、 c_2 は Empty 確率の低下の程度を調整するパラメータである。

LRF が計測値 d を出力した場合、各計測モデルは Fig. 4a のようになる。Fig. 4a において、Empty 領域の計測モデルを実線、Occupancy 領域の計測モデルを点線、Unknown 領域の計測モデルを 1 点鎖線で示している。

4.2.2 計測値が出力されない場合

$d_2 < d_1$ のとき、 d_2 から Empty 確率が低下するとし、Empty 確率の計測モデルを以下のように構築した。

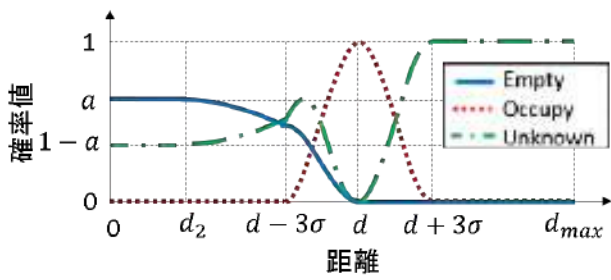
$$p_e(r) = \begin{cases} b & (0 \leq r < d_2) \\ be^{-c_2 \left(\frac{r-d_2}{d_{max}-d_2} \right)^2 - 1} + b & (d_2 \leq r \leq d_{max}) \end{cases} \quad (10)$$

ただし、 c_2 は Empty 確率の低下の程度を調整するパラメータである。

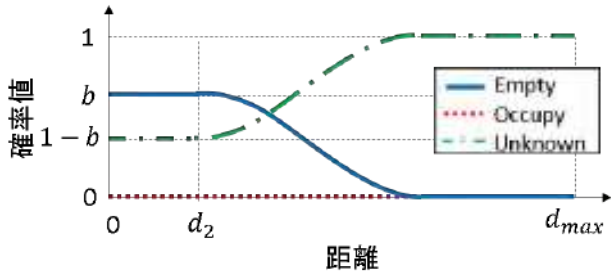
LRF が計測値を出力しない場合、各計測モデルは Fig. 4b のようになる。Fig. 4b において、Empty 領域の計測モデルを実線、Occupancy 領域の計測モデルを点線、Unknown 領域の計測モデルを 1 点鎖線で示している。

5 評価実験

本研究で提案した Empty 確率分布の有用性を評価するために、路側に 2 次元 LRF センサを定点設置して Empty 確率分布を算出する。また LRF 単体での計測ではオクルージョンや誤情報が発生してしまうので、空間知能化では多くの場合、視点が異なる複数の LRF の情報をセンサフュージョンする。そのため、センサフュージョンをしても Empty 確率分布の有用性が損なわれないか評価する必要がある。そこで、まずは設置箇所や性能が



(a) 計測値が出力される場合の計測モデル



(b) 計測値が出力されない場合の計測モデル

Fig. 4: 距離計測と測域計測の特徴を考慮した計測モデル

異なる LRF から算出した Empty 確率分布をそれぞれ評価したのちに、それらの Empty 確率分布を Dempster 結合則を用いたセンサフュージョンをして得られた Empty 確率分布の評価を行う。

5.1 実験環境

実験時の様子は Fig. 5 の通りであり、実験に使用した LRF の諸元は Table 1 である。各 LRF の位置と姿勢については、事前に複数の地点で UTM30LX で点群データを取得して点群地図を作成し、MATLAB のスキャンマッチングのツールを利用して算出した。占有格子地図の各グリッドの大きさは一辺 0.05m の正方形とし、検知範囲内にある最小のオブジェクトは直径約 60mm のポールとする。計測モデルの各パラメータは試行実験により Table 2 のように設定した。

Fig. 6 に、スキャンマッチングの時に作成した点群地図上に各 LRF の位置を☆で表示する。またポール場所を○で囲っている。各 LRF から得られた点群データを Fig. 7 (a)~(c) に示す。ただし、Fig. 7 (c) については、使用した LRF の検出可能距離が短いため、LRF3 の周辺を抽出して拡大表示している。またポールは $16 < x < 18$, $-4 < y < 2$ の範囲内にある。Fig. 7 (b) と Fig. 7 (c) では 4 本のポールを全て検出できているが、Fig. 7 (a) では 3 本しかポールを検出できていない。



Fig. 5: 実験時の様子

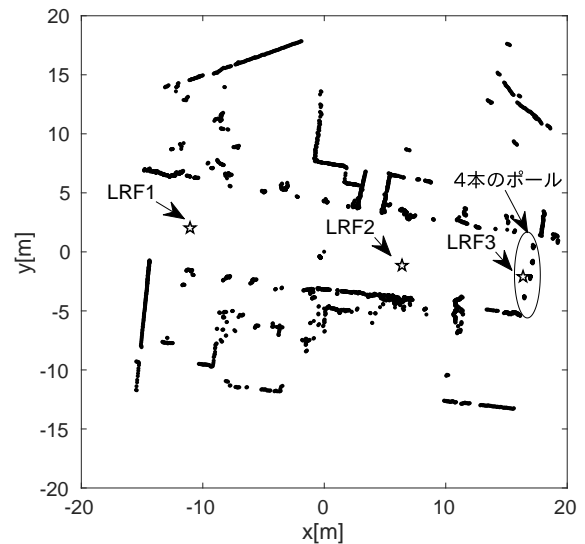


Fig. 6: LRF の配置図

5.2 LRF が出力する Empty 確率分布

Empty 領域の計測モデルで得られた各 LRF の Empty 確率分布を Fig. 8 (a), Fig. 9 (a), Fig. 10 (a) に示す。また Occupy 領域の計測モデルで得られた Occupy 確率分布を Fig. 8 (b), Fig. 9 (b), Fig. 10 (b) に、Unknown 領域の計測モデルで得られた Occupy 確率分布を Fig. 8 (c), Fig. 9 (c), Fig. 10 (c) に示す。さらに LRF1 のポール付近の Empty 確率分布、Occupy 確率分布、Unknown 確率分布を Fig. 11 に、LRF2 のポール付近の Empty 確率分布、Occupy 確率分布、Unknown 確率分布を Fig. 12 に示す。この図の見方であるが、Empty 確率、Occupy 確率、Unknown 確率が高い場所ほど明度を高く、低い場所ほど明度を低くなるように表示している。Fig. 8 (a), Fig. 9 (a), Fig. 10 (a) において、LRF 付近では明度

Table 1: 実験に使用した LRF の諸元

	LRF1	LRF2	LRF3
製品名	UTM30LX(北陽電機)		URG-04LX-UG01(北陽電機)
検出可能距離	0.1~30m (ただし, 条件によっては最大 60m まで検出可能)		0.02~5.6m
測距精度	0.1~10m : ± 30mm, 10~30m : ± 50mm		0.06~1m : ± 30mm, 1~4m : 距離の 3%
角度分解能	$\frac{\pi}{720}$ [rad]		$\frac{\pi}{512}$ [rad]

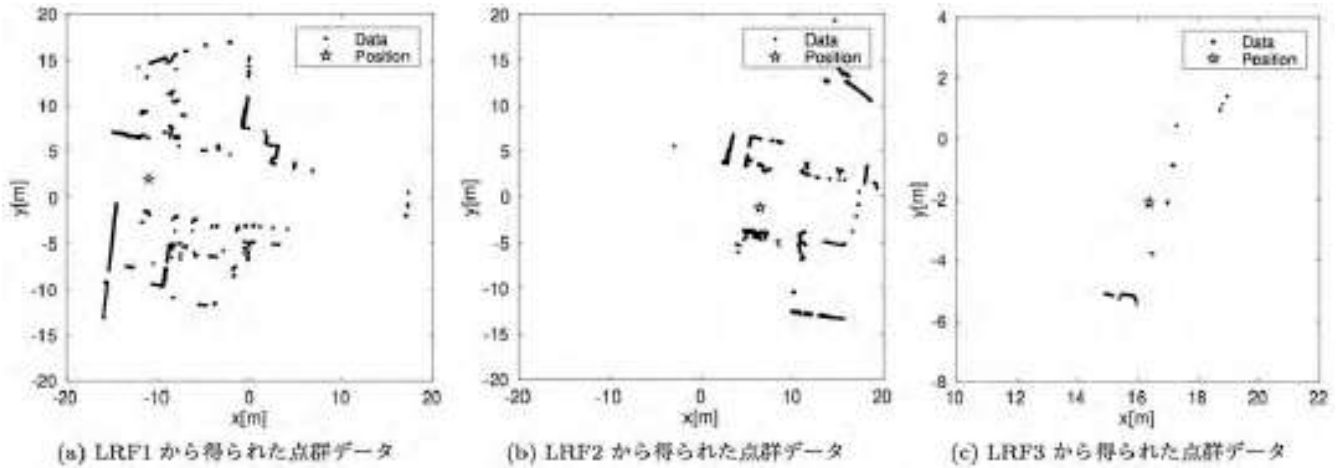


Fig. 7: 各 LRF から得られた点群データ

Table 2: 計測モデルのパラメータ

	URG-04LX-UG01	UTM30LX
a	0.8	
b	0.8	
c ₁	2	
c ₂	2	
d ₁	3	15
d ₂	9.78	13.75

が高く, LRF から遠ざかるにつれて明度が低くなっていく. 一方で, Fig. 8 (c), Fig. 9 (c), Fig. 10 (c)において, LRF 付近では明度が低く, LRF から遠ざかるにつれて明度が高くなっていく. これは LRF から遠ざかるにつれて見落としの可能性を加味されて Empty 確率が低下して Unknown 確率が上昇するためである. また Fig. 11 (a), Fig. 11 (c)において, 本来ポールが存在する箇所の Empty 確率は低く, Unknown 確率が高い. 以上のことから, 本稿の提案した LRF の計測モデルで得られた Empty 確率分布では, LRF の特性から起こる見落としの可能性を加味することができている.

5.3 Empty 確率分布のセンサフュージョン

設置箇所や性能が異なる LRF が出力した Empty 確率分布をセンサフュージョンすることで, 検知範囲の拡大とそれぞれの LRF が出力した誤情報を補正できるかを確認する. なおセンサフュージョンでは Dempster 結合則¹¹⁾を用いる.

5.3.1 Dempster 結合則を用いたセンサフュージョン

Dempster 結合則は, 2つのそれぞれ独立な情報源から得られた各要素の信念を統合する手法である. 特徴的なのは, 各組合せに要素を定義づけて同要素の和を算出することと, 矛盾する組合せを棄却して矛盾していない組合せで正規化することである. 本研究では, 以下に示した法則性で各組合せの要素を Table 3 のように定義づけた.

Empty 組合せた要素の中に Empty が少なくとも 1 つ以上含まれており, Occupy が含まれない要素

Occupy 組合せた要素の中に Occupy が少なくとも 1 つ以上含まれており, Empty が含まれない要素

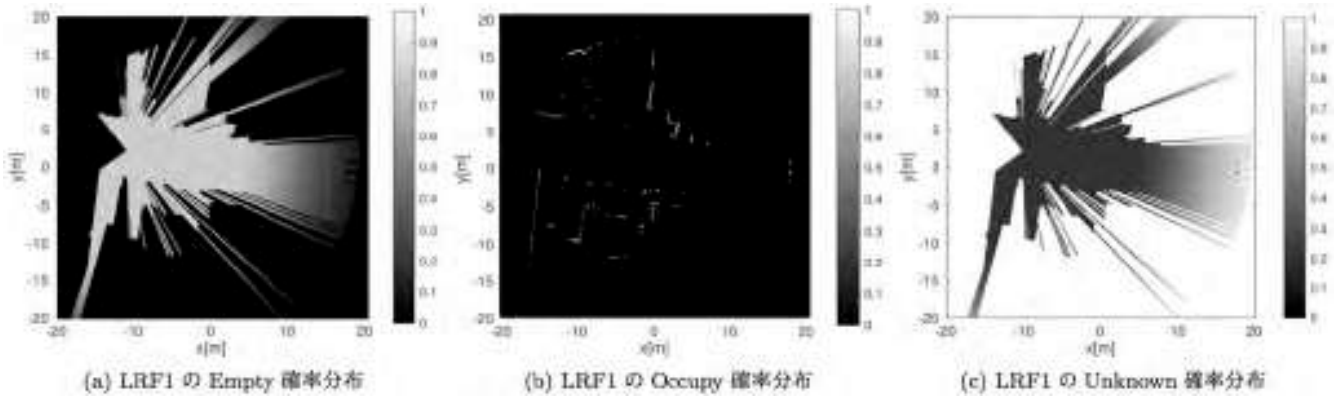


Fig. 8: LRF1 の点群データより算出した確率分布

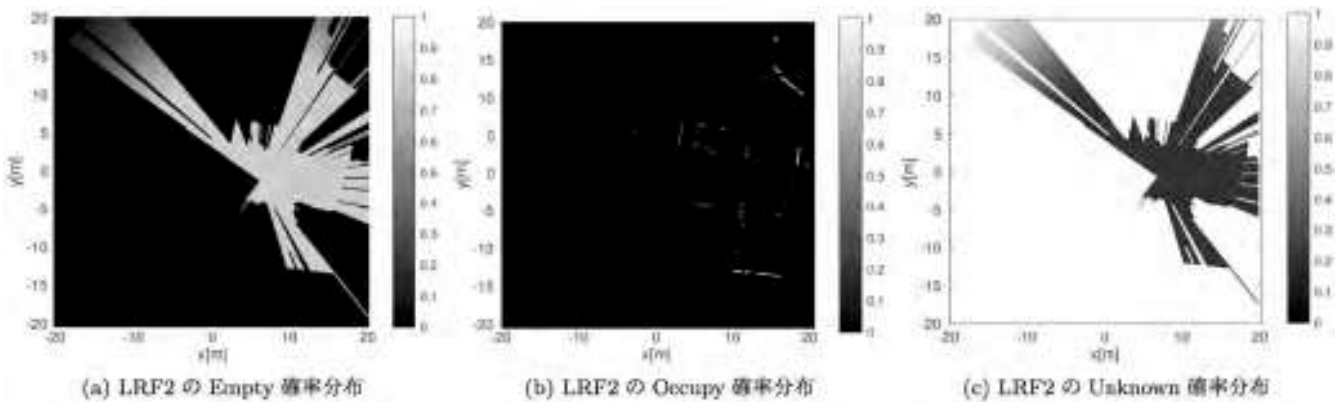


Fig. 9: LRF2 の点群データより算出した確率分布

Unknown 組合わせた要素の中に Unknown しか含まれない要素

Contradiction 上記以外

Contradiction は Empty と Occupied の組合せが含まれた矛盾する組合せである。そのため全ての環境情報のセンサフュージョンが完了した後に棄却して、Empty 確率、Occupied 確率、Unknown 確率を正規化する必要がある。以上を踏まえたうえで、Dempster 結合則を用いたセンサフュージョンは以下の式の通りとなる。

$$p_e(z_{i:j}) = \frac{p_e(z_i)p_e(z_j) + p_e(z_i)p_u(z_j) + p_u(z_i)p_e(z_j)}{1 - p_c(z_{i:j})} \quad (11)$$

$$p_o(z_{i:j}) = \frac{p_o(z_i)p_o(z_j) + p_o(z_i)p_u(z_j) + p_u(z_i)p_o(z_j)}{1 - p_c(z_{i:j})} \quad (12)$$

$$p_u(z_{i:j}) = \frac{p_u(z_i)p_u(z_j)}{1 - p_c(z_{i:j})} \quad (13)$$

$$p_c(z_{i:j}) = p_e(z_i)p_o(z_j) + p_o(z_i)p_e(z_j) \quad (14)$$

ただし、 $p_e(z_i)$ 、 $p_o(z_i)$ 、 $p_u(z_i)$ はそれぞれ LRF*i* が出力した Empty 確率、Occupied 確率、Unknown 確率、 $p_e(z_j)$ 、

$p_o(z_j)$ 、 $p_u(z_j)$ はそれぞれ LRF*j* が出力した Empty 確率、Occupied 確率、Unknown 確率、 $p_e(z_{i:j})$ 、 $p_o(z_{i:j})$ 、 $p_u(z_{i:j})$ 、 $p_c(z_{i:j})$ は、LRF*i* と LRF*j* が検出した環境情報をセンサフュージョンして得られた Empty 確率、Occupied 確率、Unknown 確率、Contradiction 確率である。

5.3.2 センサフュージョンより得られた Empty 確率分布

Dempster 結合則を用いた LRF1 と LRF3 のセンサフュージョン結果を Fig. 13 に示す。ただし、得られたセンサフュージョン結果では LRF3 の周辺以外は変化していないため、Fig. 13 では LRF3 の周辺を抽出して拡大表示している。状況としては、LRF 1 がボールを検出していないため、LRF1 が誤情報を出し、LRF3 が正確な情報を出している状態である。Fig. ??を見ると、検出漏れしていたボールの位置の Occupied 確率が高いため、LRF3 の情報が反映されて LRF1 の誤情報を

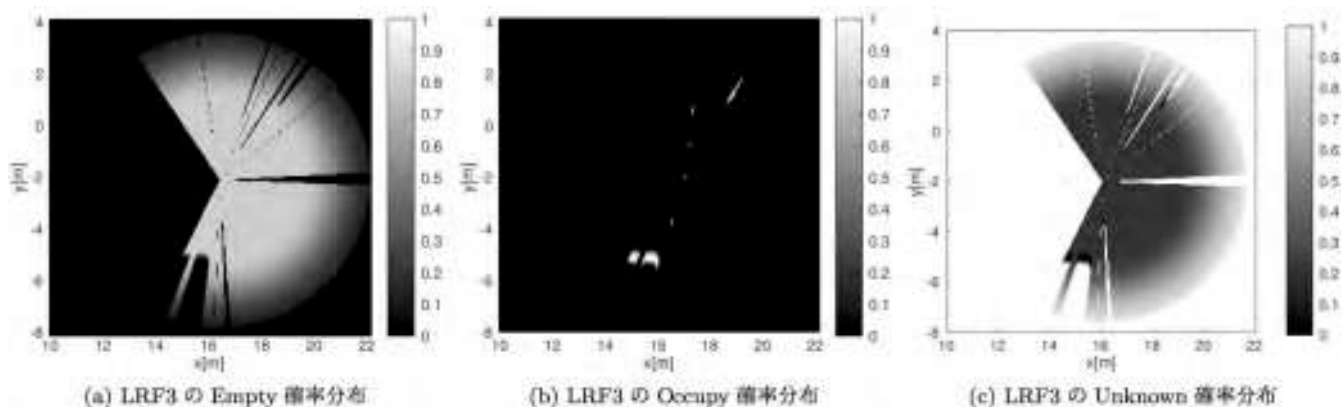


Fig. 10: LRF3 の点群データより算出した確率分布

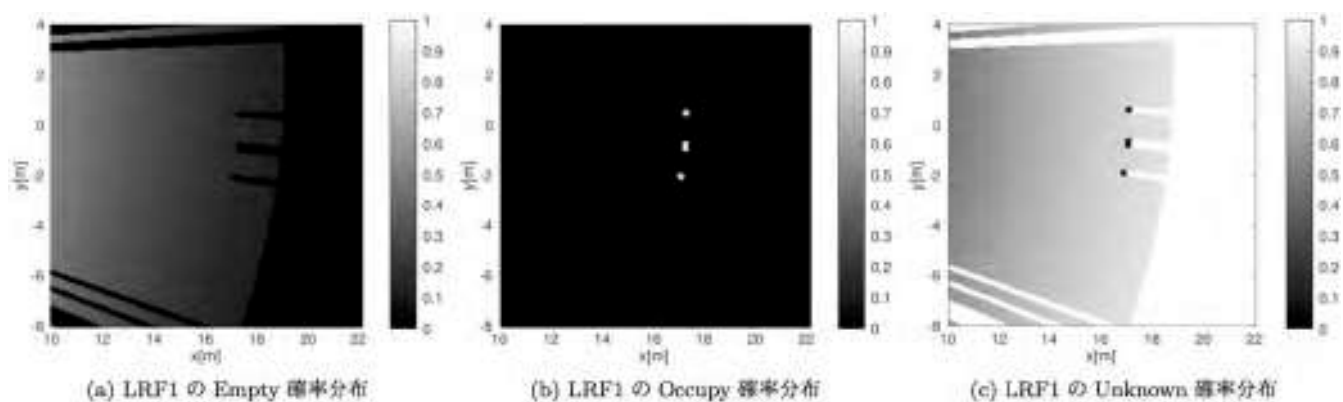


Fig. 11: LRF1 のポール付近の確率分布

補正することができている。これは、LRF 1ではポール付近の Unknown 確率が高く、LRF3ではポール付近の Unknown 確率が低いため、Dempster 結合則によるセンサフュージョンによってLRF3の情報が優先されたからであると考えられる。

次に Dempster 結合則を用いた LRF1 と LRF3 のセンサフュージョン結果を Fig. 14 に示す。こちらも得られたセンサフュージョン結果では LRF3 の周辺以外は変化していないため、Fig. 14 では LRF3 の周辺を抽出して拡大表示している。状況としては、両センサとも正確に環境情報を取得できている状態である。両センサがともに Empty 領域と検出した箇所については、センサフュージョンにより Empty 確率が上昇し、Unknown 確率が低下している。また視点が異なる LRF の検出結果をセンサフュージョンすることにより、オクルージョンなどにより LRF 単体では検出できない領域の情報も作成することができている。

以上より、本研究で提案した Empty 確率分布には LRF の計測特性が反映されているため、LRF の計測結果の

信頼度を考慮したセンサフュージョンが可能であることが確認できた。これにより、検出結果が異なる領域にはより信頼度の高い方の計測結果が反映され、計測結果が一致する領域では、その領域の検出結果の信頼度を向上させることが可能であることが確認できた。またセンサフュージョンにより LRF 単体では検出できない領域の情報も作成することが出来ることを確認した。

6 考察

本研究で提案した Empty 確率分布の有用性について考察する。本研究で提案した Empty 確率分布では、LRF の特性から起こる見落としの可能性が加味されている。また LRF の計測特性が反映されているため、LRF の計測結果の信頼度を考慮したセンサフュージョンが可能であり、検出結果が異なる領域にはより信頼度の高い方の計測結果が反映され、計測結果が一致する領域では、その領域の検出結果の信頼度を向上させることが可能であることが確認できた。このことから、実

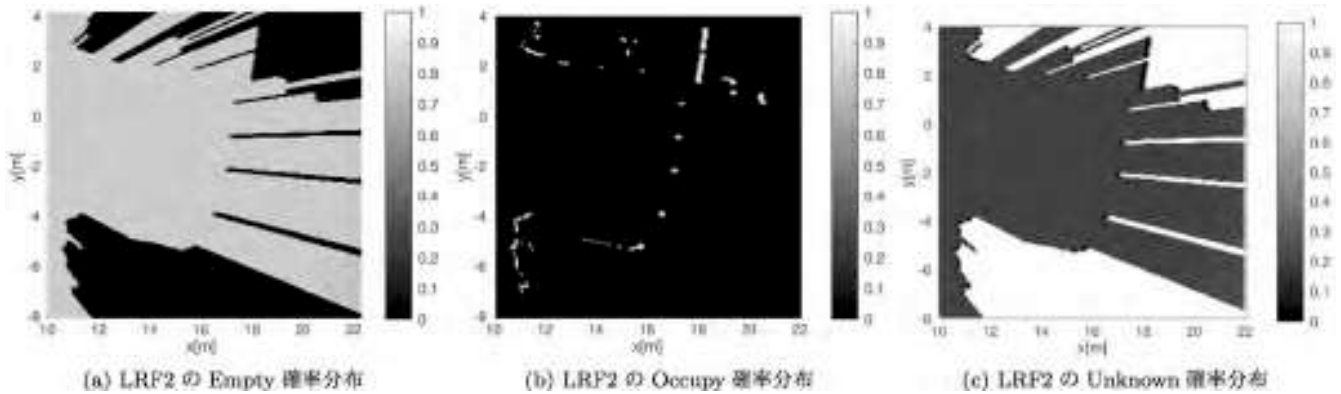


Fig. 12: LRF2 のポール付近の確率分布

Table 3: Dempster 結合則の各要素の組み合わせ

		LRF _j から出力された要素		
		Empty	Occupy	Unknown
LRF _i から出力された要素	Empty	Empty	Contradiction	Empty
	Occupy	Contradiction	Occupy	Occupy
	Unknown	Empty	Occupy	Unknown

際に空間知能化で本研究で提案した計測モデルを利用すると、出来上がった Empty 確率分布には信頼度の高い箇所と信頼度の低い箇所が発生すると考えられる。そこで自律移動ロボットが目的地への経路生成をする際に、目的地の到着時間に厳格に指定されている場合は信頼度の高い領域内で経路生成することで、スケジュール通りの走行が可能となると考えられる。一方で、特に目的地の到着時間に制限がない場合は信頼度の低い箇所を走行して定点設置された LRF が検出漏れを起こしていないか監視することで、より安全な自律移動ロボットの運用ができるのではないかと考えられる。

7 おわりに

本稿では、2次元 LRF の計測特性を考慮した計測モデルを利用して作成した Empty 確率分布について提案した。LRF 単体の出力結果より算出した Empty 確率分布ではオブジェクトの検出漏れが発生している可能性がある箇所を把握することができる。また視点が異なる2つの LRF が出力した Empty 確率分布をセンサフュージョンすることにより、Empty 確率分布の範囲が拡大するだけでなく、LRF の検出結果の信頼度を反映した Empty 確率分布を得ることができる。以上のことから、

本研究で提案する Empty 確率分布はロボットの行動選択のための新たな判断材料として利用できると考えられる。

今後、自律移動ロボット等の移動体に搭載された LRF のように、自己位置や姿勢の誤差を考慮した Empty 確率分布を算出する予定である。また Empty 確率分布の更新方法についても検討していく予定である。

本研究の一部は、JST 産学共創オープンプラットフォーム事業 (OPERA) による。

参考文献

- 1) “「サービスロボット」の最新動向,” https://www.nri.com/jp/event/mediaforum/2016/pdf/forum233_02.pdf
- 2) 橋本秀紀, “知能化と構造化: 空間知能化の観点から,” ロボット情報学ハンドブック (松原仁, 松野文俊, 稲見昌彦, 野田五十樹, 大須賀公一編), pp.763-768, ナノオブトニクスエナジー, 2010.
- 3) 藤本一真, 松日楽 信人, 遠藤 太貴, 佐々木 毅, “空間知能化された環境におけるロボット連携システムの開発—環境センサを利用した写真撮影ロボットの動作生成—,” ROBOMECH2016, 横浜, pp.1-3, 2016.
- 4) 宮下 敬宏, 神田 崇行, 西尾 修一, 萩田 紀博, “施設内

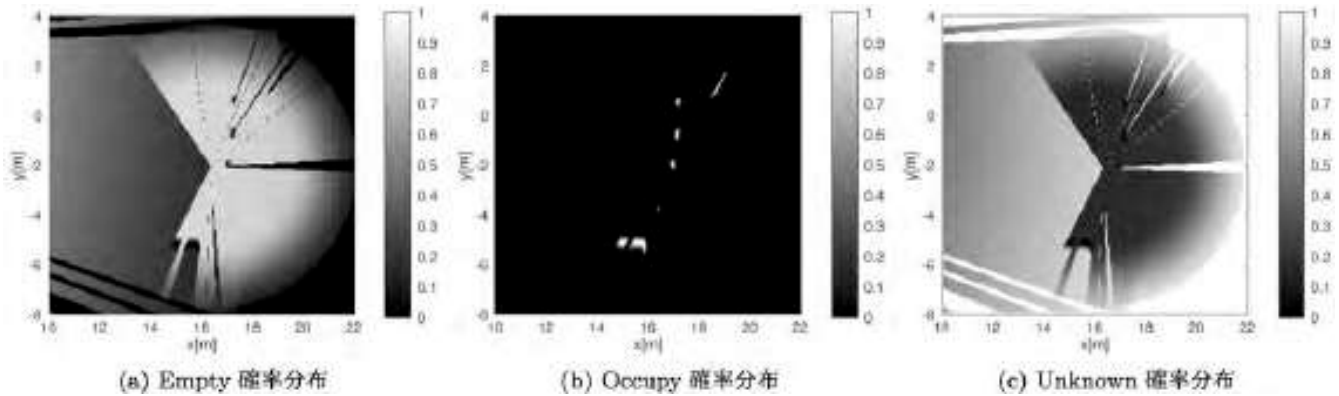


Fig. 13: LRF1 と LRF3 のセンサフュージョン結果

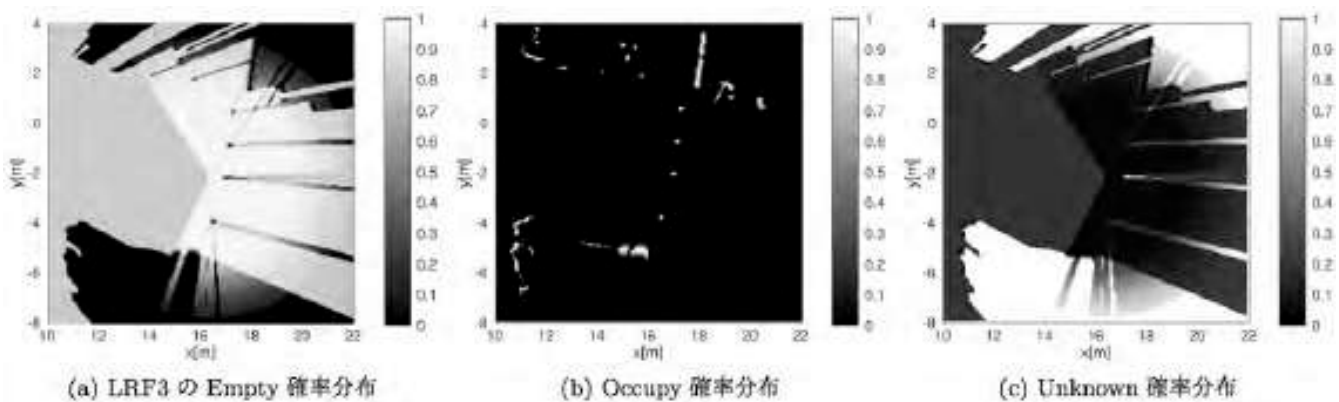


Fig. 14: LRF2 と LRF3 のセンサフュージョン結果

外の人計測と環境情報構造化プラットフォーム,” 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.5, pp.423-426, 2008.

- 5) 長谷川 勉, 野原 康伸, 村上 剛司, “生活環境における日用品情報構造化のための床面センシングシステム,” 日本ロボット学会誌, Vol.28, No. 9, pp.1144-1147, 2010.
- 6) 長谷川 勉, 野原 康伸, 村上 剛司, “分散配置測域センサによる環境内物体の位置情報取得に関する研究,” ROBOMECH2008, 長野, pp.1-2, 2016.
- 7) Christophe Coué, Cédric Pradalier, Christian Laugier, Thierry Fraichard, Pierre Bessiere, “Bayesian Occupancy Filtering for Multitarget Tracking: an Automotive Application,” The International Journal of Robotics Research, Vol. 25, No. 1, pp.19-30, 2006.
- 8) 友納 正裕, “観測度数をもつ占有格子地図による長時間地図構築のためのデータ削減手法,” 日本機械学会論文集, 日本機械学会, 2018.
- 9) Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox, “確率ロボティクス,” 上田隆一訳, pp.139-143, 株式会社マイナビ, 2010.
- 10) Hans P. Moravec, Alberto Elfes, “High resolution maps from wide angle sonar,” In proceedings. IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis MO USA, 1985.

- 11) Michelle Valente, Cyril Joly, Arnaud de la Fortelle, “Fusing Laser Scanner and Stereo Camera in Evidential Grid Maps,” 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), Singapore, pp.1-8, 2018.
- 12) H. Kawata, K. Miyachi, Y. Hara, A. Ohya, S. Yuta, “A method for estimation of lightness of objects with intensity data from SOKUIKI sensor,” IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Seoul South Korea, pp.661-664, 2008.

Roadside-Assisted V2V Messaging for Connected Autonomous Vehicle

Manabu TSUKADA*

(Received April 24, 2018)

Vehicle-to-vehicle (V2V) messaging is an indispensable tool for real-time dynamic information sharing in cooperative Intelligent Transportation Systems (ITSs). Although V2V standards are specified in the European Union, United States, and Japan, all such standards suffer from a set of common drawbacks. In this paper, we first analyze these issues and derive a problem statement. We then propose a roadside-assisted V2V messaging scheme in which roadside units construct a database of dynamic information obtained from sensors and transmit data to nearby and remote vehicles. We also design a common solution to the problem of differing regional standards by making the system independent of any specific set of standards. Finally, we analyze the potential requirements for designing a specification of roadside-assisted V2V messaging. The proposed system is designed to be technically compatible with 5G mobile edge computing.

Key words F Cooperative ITS; Vehicle-to-Vehicle; Standard; VANET; Internet

1 Introduction

Intelligent Transportation Systems (ITS) aims to make road traffic safer, more efficient, and more comfortable. Today, autonomous vehicle attracts the interest of many researchers and engineers in ITS. In 2018, Waymo (Google) started the taxi business using autonomous vehicles in the public road in the US, and similar attempts follow in all over the world. However, the standalone autonomous vehicle is a mere replacement of human driver operation (perception, decision, and manoeuvre). Thus they have the same limitation that we humans have. For example, the blind spots of the onboard sensors remain.

This limitation prevents autonomous vehicles from being safer and more efficient. For example, the standalone vehicles always have to stop before the intersection without the traffic signal and enter slowly to the intersection. On the other hand, the risk of collision at the intersection depends on the duration in the intersection. Thus, in theory, they can pass the intersection

at the maximum speed to reduce the duration in the intersection to increase safety and efficiency. To achieve the above, cooperative ITS can help the perception of the blind spot of the vehicle sensors by connecting the vehicles and roadside units.

For the standardization of cooperative ITS, the International Organization for Standardization (ISO) Technical Committee 204 Working Group 16 (TC204 WG16) (also known as Communications Architecture for Land Mobile (CALM)) is developing a standard architecture for Cooperative ITS, called ITS Station reference architecture with coordination with the European Telecommunications Standards Institute (ETSI) TC ITS^{1, 2)}. In the US, the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) is standardising Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) architecture in IEEE 1609 family of standards³⁾ as well as IEEE802.11 variant for vehicular communication as IEEE802.11p⁴⁾.

Vehicle-to-vehicle (V2V) messaging is indispensable in cooperative ITS for the real-time information sharing among the vehicles to notify the sender vehicle posi-

* The University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan
Telephone : +81-3-5841-7465
E-mail : tsukada@hongo.wide.ad.jp

tions and additional information. For this reason, Cooperative Awareness Message (CAM) ⁵⁾, Basic Safety Message (BSM) ⁶⁾ and ITS forum basic message have been specified as V2V message standards in EU, US and Japan, respectively.

Thanks to the V2V messages, the connected autonomous vehicle can be aware of the other vehicle out of sight. However, we cannot take all the vehicle's real-time information because there are many legacy vehicles that do not have the transmitter in the deployment phase. Thus we must assume the mixed environment where connected autonomous vehicles and legacy vehicles co-exist on the road. In the previous work, we developed a special roadside unit called Proxy CAM agent⁷⁾ (also overviewed in Section 2.2) to help the awareness of legacy vehicles. We implemented the agent and performed a field test at an intersection.

In this paper, we propose to inter-connect the Proxy CAM agents with high-speed roadside networks to wider dissemination of cooperative awareness messages. The rest of the paper is organized as follows. Section 2 describes the problem statement of V2V messaging in the mixed environment and discuss the potential solution analysis. Section 3 presents our proposal called Grid Proxy CAM to enhance the cooperative awareness in the mixed environment using the roadside unit networks. Section 4 provides a numerical analysis to evaluate the proposed system. Section 5 evaluate the proposed system in the simulation using the two maps in Tokyo and Paris. Then, section 6 explains the related works. Section 7 concludes the paper and provide future works.

2 Problem Statement and solution analysis

2.1 Issues in Mixed Environment

The penetration ratio of the V2V device is a critical factor for the cooperative ITS because the cooperative awareness using V2V message does not work without the V2V device. However in the deployment process, it is hard to imagine deploying the V2V devices at once in all the vehicles including new and old vehicle, thus

we should consider the mixed environment with V2V-enabled vehicles and the legacy vehicles. Besides the issues of legacy vehicles, it is essential for cooperative ITS to accommodate pedestrians and bicycles, that usually do not equip the V2V sender device. In the current assumption of V2V messaging, these non-V2V aware nodes are excluded and therefore their presence information is not aware of the connected autonomous vehicle using cooperative ITS.

2.2 Proxy Cooperative Awareness Message

To make the presence information of legacy vehicles available for the connected autonomous vehicle, we proposed Proxy CAM ⁷⁾ in the previous work as shown in Fig. 1. First, the roadside sensors detect target vehicles and estimate the information on vehicles such as positions, velocities, and accelerations. Second, the vehicle information from the sensors is sent to the server in the infrastructure and stored in a database. Third, it generates V2V messages from the data stored in the database on behalf of the target vehicles (This messages is called proxy V2V message). We used CAM for the V2V message with the system, however potentially the V2V message can be other messages such as BSM. Finally, it broadcasts proxy CAMs from the roadside transmitters. The connected autonomous vehicles receive these proxy CAMs without any difference from the reception procedure of the specification of standard CAM.

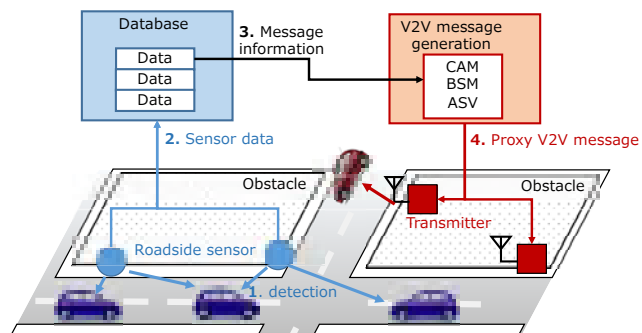


Fig. 1. Overview of Proxy CAM.

2.3 Objectives and solution analysis

Thanks to the Proxy CAM system, connected autonomous vehicle can be aware of all of the vehicles in

the mixed environment. However, the message dissemination range remains limited in the range of wireless radio propagation from the roadside transmitter. This range is often referred from around 500 meters to 1 kilometres using ITS-5G in the ideal environment with the line of sight. The distance often becomes shorter in the environment of non-line of sight scenarios.

The objectives of the paper are to broader the cooperative awareness message dissemination area by connecting the Proxy CAM agents using high-speed roadside networks. To design the solution, there are three requirements as follows.

- Coexistence with the CITS Standards:** To enable interoperability among countries, cooperative ITS must be developed based on universal architecture, protocols, and technologies. Such a solution must adopt techniques for standardized V2V messages such as CAM and BSM. Especially CAM is specified in 2014 and many products are ready to the market. The solution must not have a big impact on the current standards.
- Real-time delivery of messages:** Frequent transmission of V2V messages allows for the tracking of highly dynamic vehicle status information such as position, velocity, and acceleration. Standard CAMs, for example, are transmitted 1 ~ 10 times per second. A solution should also send dynamic vehicle information frequently. Overall, delays in message sensing and transmission must be minimized. The solution should be designed to deliver the message directly in the edge bypassing the Internet and the cloud.
- Message priority by safety contribution:** The solution delivers frequent messages in the broad area by connecting Proxy CAM agents by the high-speed roadside network. The number of message delivery increase as road traffic increases. In the message delivery path, the roadside wired network has enough capacity to accommodate a large number of messages in the peak of the road traffic condition. On the contrary, the wireless

link reaches to saturation point if all the message goes to the link. The solution must prioritise the message importance based on the safety contribution.

3 V2V message dissemination using roadside unit networks

In this section, we propose the system fulfils requirements mentioned in the previous section. The solution is divided into two parts. First one is the system called Grid Proxy CAM connecting Proxy CAM agents by roadside networks. The second one is the distance priority algorithm to prioritize the message delivery when road traffic is increased. The two parts are described in the following sections.

3.1 Grid Proxy CAM

Fig.2 shows the overview of the Grid Proxy CAM system. A Proxy CAM agent is consist of sensor, transmitter and router. The sensor and the transmitter are connected to the router to inter-connect the Proxy CAM agents by the wired network. Each agent is installed at each intersection.

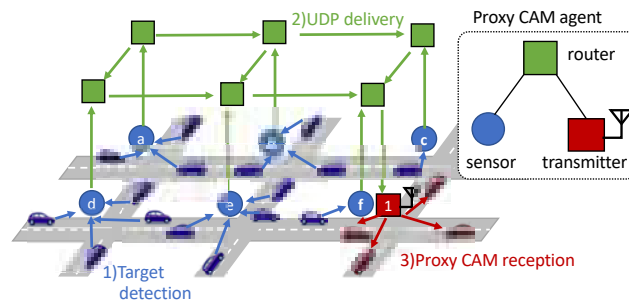


Fig. 2. Overview of Grid Proxy CAM system.

As depicted in 1) in Fig.2, the sensors (can be a camera, LiDAR, radar) can detect the target vehicle and pedestrian and estimate the position (latitude and longitude) and the movement (speed and heading). In addition, the sensors estimate object type (pedestrian, vehicle, bicycle, etc.) and vehicle class (public vehicle, emergency vehicle, etc.) if available depending on the sensor. Also, it estimates the identification number of the object if a number plate is available. If not, it gives a random number to the object and assigns the

same number to the same object in the sequence of the sensor detections.

As in 2), the estimated object information by the sensor is sent with UDP to all the neighbouring Proxy CAM agents within the range configured by the road infrastructure operator. We assume that the sensors have the IP address list of the destination agents in advance. The IP routing (static or dynamic) deliver the packet to the destination. The sensors send the UDP packets in 10Hz which is the maximum frequency of the CAM specification.

As in 3), upon reception of the UDP packet, the transmitter composes the proxy CAM. Unavailable object information is filled by 'unknown'. Then the transmitter adds the header of Basic Transport Protocol and GeoNetworking as in the CAM standard specification. Before the broadcast in the wireless link, it adds to the queue of the IEEE802.11p interface. The MAC layer of IEEE 802.11p uses an Enhanced Distributed Channel Access(EDCA) ⁸⁾ mechanism, which is based on IEEE 802.11e with some parameters modification. CAM is classified into the AC_BE class in EDCA. The queuing priority policy is described in the next section.

The above operation by inter-connected Proxy CAM agent makes the real-time vehicle information at an intersection available in all of the intersections. For example, Fig.2 illustrates that the red vehicles receive Proxy CAM of the blue target vehicles via transmitter 1, sent from all of the neighbouring sensors (a~f).

3.2 Distance Priority algorithm

The transmitter cannot broadcast all the messages when the target vehicles information increase in the case of heavy road traffic, because of the capacity of the wireless link. The data rate of IEEE 802.11p is 3~27 Mbps. However, the actual sending data rate of the proxy CAM is lower than the data rate because the message is small and the ratio of the header becomes big. When the transmitter receives more proxy CAMs than the sending rate, the message is added to the queue. This makes the wait time and increases the end-to-end delay. The end-to-end delay of the message delivery makes real-time information outdated. For ex-

ample, when a vehicle at a speed of 50km/h is detected in the sensor, and it takes 500ms in the message delivery, the difference between the position in the message and the actual position at the moment is about 7 meters. In the case that the queue is full, the messages are discarded and this affects the end-to-end packet delivery ratio (PDR).

There is a trade-off that wider cooperative awareness supports a more safe and efficient ITS application, but also increase the number of messages that increase the delay and decrease the PDR. We need to balance wider cooperative awareness, low delay and high PDR. Our approach for the trade-off is to prioritize the message based on the safety contribution. We assume the receiving node needs the real-time information of the nearest objects for the safety reason. For example to avoid the crush at the intersection.

The proposed distance priority algorithm gives higher priority to the proxy CAM that contains a nearer position from the transmitter. The number of messages (*i.e.* number of detected objects) varies over time depending on the road traffic volume. If there is enough capacity to broadcast more proxy CAMs at the moment, it adds the proxy CAM with farther objects information to the queue.

The transmitter has a maximum distance of d_{max} pre-configured by the road infrastructure operator and continuously monitors the queue occupancy ratio of r_{qo} . Upon generation of the proxy CAM, the transmitter calculates the distance d between the detected object position in the message and the transmitter position. The transmitter determines if the packet is added to the queue or dropped by equation 1.

$$r_{qo} < 1 - \frac{d}{d_{max}} \quad (1)$$

If the equation is true, the proxy CAM goes to the queue, otherwise dropped. From the equation, the proxy CAM that contains farther object information is dropped when r_{qo} is high. The transmitter begins to drop the CAM of farther information before the queue is full; it keeps the room for the nearer information for the future use. Besides, this algorithm keeps r_{qo}

lower than without it, and it contributes to decrease the end-to-end delay.

4 Numerical Analysis

In the section, we conduct mathematical analysis for the underlying performance of the proposed system in term of the message delivery delay and the packet delivery ratio.

First, we calculate the effective throughput of proxy CAMs over IEEE802.11p. Table 1 summarizes the corresponding variables, symbols and values for the calculations. t_{cam} is the average time duration to successfully transmit a CAM packet in the wireless channel and given by equation 2, where the Distributed Inter Frame Space (DIFS) interval, the backoff time, and sending duration are denoted by t_{DIFS} , b , and t_{send} , respectively.

$$t_{cam} = t_{DIFS} + b + t_{send} \quad (2)$$

Table 1. Parameters in Physical and MAC layer.

Layer	Variable type	Symbol	Value
MAC	AIFSN with OCB	$AIFSN$	6
	Slot length of IEEE802.11p	$slen_{11p}$	0.013ms
	SIFS interval	t_{SIFS}	0.032ms
	Contention windows size	CW	0~15
	Average of CW	CW_{ave}	7.5
PHY	Switch time between Tx and Rx	t_{switch}	0.001ms
	PLCP preamble duration	t_{pre}	0.032ms
	Duration of PLCP Signal	t_{sig}	0.008ms
	Symbol interval	t_{sym}	8 μ s
	Number of data bits per symbol	N_{DBPS}	144bits
Other	Payload Length of Proxy CAM	P_{pcam}	680bits

The DIFS interval t_{DIFS} is a waiting time after the channel becomes an idle state in of CSMA/CA, given by equation 3. For the AC_BE class in EDCA, the arbitration interframe space number (AIFSN) $AIFSN$ is 6, when Offset Codebook Mode (OCB) is activated⁹). The slot length of IEEE801.11p $slen_{11p} = 0.013$ ms and the Short Inter Frame Space (SIFS) interval $t_{SIFS} = 0.032$ ms. Therefore t_{DIFS} is 0.110ms by equation 3.

$$t_{DIFS} = AIFSN \times slen_{11p} + t_{SIFS} \quad (3)$$

The backoff time b is the random waiting time determined by the contention window, given by equation 4. The contention window size CW is 0 ~ 15⁹), therefore

the average of the contention windows size $CW_{ave} = 7.5$. Thus, $b = 0.0975$ ms is given by equation 4.

$$b = CW_{ave} \times slen_{11p} \quad (4)$$

The sending duration t_{send} of proxy CAM is given by equation 5, where the switch time between Tx and Rx is denoted by t_{switch} , the duration of Physical Layer Convergence Protocol (PLCP) preamble by t_{pre} , the duration of PLCP Signal by t_{sig} , the number of data bits per OFDM symbol by N_{DBPS} , the symbol interval by t_{sym} . Also, $ceil()$ is the function returns the smallest integer greater than or equal to a given number. In IEEE802.11p $t_{switch} = 0.001$ ms, $t_{pre} = 0.032$ ms, $t_{pre} = 0.008$ ms. When the data rate is specified at 18Mbps in IEEE802.11p, 16QAM is used for the modulation scheme, and the code rate is fixed to 3/4. Therefore, $N_{DBPS} = 144$ bits, and $t_{sym} = 8\mu$ s. Therefore, $t_{send} = 0.081$ ms by equation 5.

$$t_{send} = t_{switch} + t_{pre} + t_{sig} + t_{sym} \times ceil\left(\frac{16 + P_{pcam} + 6}{N_{DBPS}}\right) \quad (5)$$

By equation 2, the average time duration to successfully transmit a CAM packet $t_{cam} = 0.2885$ ms. A proxy CAM (payload length $P_{pcam} = 680$ bits) is transmitted in 0.2885ms in average, therefore the effective throughput of proxy CAMs over IEEE802.11p is about 2.73Mbps.

Then we calculate at which data rate, the transmitter can broadcast the CAMs without keeping in the queue. It can broadcast 273kbits in 0.1 seconds at the effective throughput of 2.73Mbps. It is equivalent to 401 CAMs in 0.1 seconds. In the case that each proxy CAM agent detects ten vehicles on average, a proxy CAM agent can broadcast the messages from about 40 neighbouring agents. Thus, it starts queuing in the case that the agent detects more than ten vehicles or more than 40 neighbouring agents send messages to the agent. In other words, end-to-end delay increases and end-to-end PDR decreases in the situation without the distance priority algorithm. In the case that the queue length is 1000 packets (which is later used

in the simulation scenario in section 5), the queuing delay is $0.2885ms \times 1000 = 288.5$ ms when it is full.

5 Evaluation

5.1 Simulation Scenarios

- Environment

To evaluate the communication performance in term of delay and PDR in the various scenarios, we have implemented our proposal on the *Artery** framework, an extension of the open source vehicular network simulation framework *Veins*** . In Veins, the communication network is simulated in *OMNeT++**** and vehicle traffic (*i.e.* movement) is simulated in *SUMO*¹.

- Maps

We conducted the experiments in the following two maps: Tokyo (Japan) and Paris (France). Fig 3 shows the map near the University of Tokyo in Japan and Fig 4 shows the map Paris in France. Both maps are taken from Open Street Maps. The size of the Tokyo map is about $1.9km \times 1.7km$ and the Paris map is around $1.8km \times 2.0km$. Each selected intersection has a proxy CAM agent and they are interconnected by 10Gbps Ethernet cable (black line). The Tokyo map has 49 agents in the map and the Paris map has 32 agents in the map. Each agent maintains the routes to all the agents with the Routing Information Protocol (RIP). In both maps, the red lines are buildings (obstacles) that attenuates wireless radio when they block the line between the source node and the destination node. It attenuates 9db when the edge of the building blocks the path once, and 0.4db parameters when the radio pass through the building.

- Scenario

We conducted the experiments with the following two scenarios and made the comparison: 1) Grid Proxy CAM, and 2) Grid Proxy CAM + distance



Fig. 3. Map of Tokyo.



Fig. 4. Map of Paris.

priority algorithm. The parameters of the simulation are listed in Table 2.

Table 2. Parameters of Simulation.

Type	Variable name	Value
Radio	IEEE802.11p datarate	18Mbps
	Attenuation per building edge	9db
	Attenuation through building	0.4db/m
	Radio range	150m
Proxy CAM agent	Queue length	1000 packets
	Maximum distance (d_{max})	1000m
	Proxy CAM frequency	10Hz
Vehicle traffic	Vehicle speed	50 km/h
	Vehicle num per sec per intersection	2
	CAM frequency	10Hz

The data rate of IEEE802.11p is 18Mbps, the radio frequency is 5.89GHz, the transmission power is 126mW, and the reception sensitivity is -89dBm. We limited the maximum radio range at 150m because the radio coverage often limited in an urban area. Each proxy CAM agent generates the message at the frequency of 10Hz. The maximum distance (d_{max} defined in section 3) is 1000 meters. And the queue length is 1000 packets.

The vehicles at speed 50km/h pass to the intersection along with the route (A) and (B) illustrated in Fig 3 and Fig 4. Vehicles pass the intersection without stopping because we assume the road without signals in the study. Two vehicles per seconds pass the intersection. The vehicle traffic is average traffic of the specified intersection of Tokyo map (Fig 3) according to official traffic statistics of the Japanese Police department. The vehicles also generate the standard CAM at the frequency of 10Hz.

* <https://github.com/riebl/artery>

** <http://veins.car2x.org>

*** <https://omnetpp.org>

¹ <http://sumo.dlr.de/>

All the agent detect 5, 10 or 15 vehicles per 0.1 seconds and send the UDP to all the neighbouring agents. Assuming that the sensor detection coverage is 50 meters, a sensor covers 200 meters in four directions at the intersection. So, we express the three scenarios as 25, 50, and 75 vehicles/km for the vehicle traffic density because they detect 5,10 and 15 vehicles in 200 meters, respectively.

As in Fig 5, we measured the communication performance at the intersection where the two routes cross (at the centre of the maps). For the measurement, we install an evaluation node near the intersection to receive the proxy CAMs via IEEE802.11p from all the neighbouring agents. We evaluated the packet delivery ratio and the delay from the source agent to the evaluation node. We conduct all the simulations 100 times with random seed and calculate the average and the standard deviations for the results. Each simulation lasts 15 seconds and the results from 5 seconds to 10 seconds are used for the evaluation because we measure the communication performance in the steady-state.

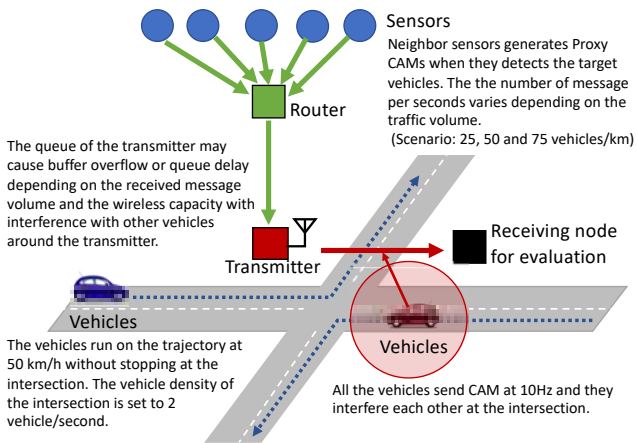


Fig. 5. Simulation Scenarios.

5.2 Packet delivery ratio evaluation

Fig 6 shows the PDR in the Tokyo map with the vehicle density of 25, 50 and 75 vehicles/km. The red line shows the Grid Proxy CAM scenario without priority algorithm. The blue line shows the Grid Proxy CAM scenario with the distance priority algorithm. All the

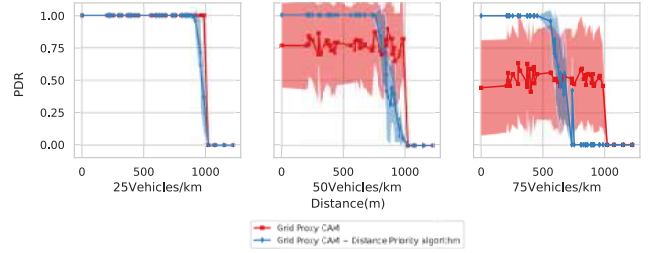


Fig. 6. PDR in scenario of Tokyo, Japan.

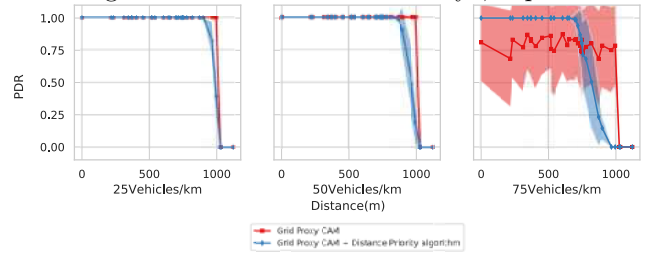


Fig. 7. PDR in scenario of Paris, France.

lines indicate the average PDR and the coloured zones above and below shows the standard deviation. As expected, two Grid Proxy CAM scheme can deliver the message longer distance than Proxy CAM scenario where no packet is delivered more than the wireless range (150 meters) in all the vehicle density scenarios.

With the vehicle density of 25 vehicles/km, Grid Proxy CAM keeps the PDR at 100% for all the distance. Grid Proxy CAM with the distance priority algorithm keeps 100% PDR until 900 meters and gradually drops the ratio until 1000 meters. The drop occurs because the algorithm discards the farther information to keep the room for nearer information.

With the vehicle density of 50 vehicles/km, the PDR of the Grid Proxy CAM scenario is kept around 70% with large standard deviations. The standard deviations come from the following reasons. The packet arrives first to the agent in question successfully transmitted to the receiving node, and the succeeding packets have the risk of packet drop depending on queue occupancy ratio. The simulation gives the randomness of vehicle detection timing. Therefore, the packets from all the distance are the target of the packet drop and the standard deviation remains high. On the contrary, with the distance priority algorithm, the PDR is 100% within the distance of 740 meters. The PDR gradually

drops from 740 meters to 990 meters. The relatively large standard deviation comes from the randomness of the detection timing as well.

With the vehicle density of 75 vehicles/km, the situation becomes harsher. In the Grid Proxy CAM scenario, half of the messages are lost in all the distance. The distance priority algorithm, however, saves the delivery for 100% of the messages within the range of 450 meters. The PDR gradually drops from 450 meters to 800 meters.

Fig.7 shows the PDR in the Paris map. In the map, PDR is 100% in no priority scenario for all the distance with the vehicle density of 25 and 50 vehicles/km, because there are fewer agents installed in the selected intersection. The distance priority algorithm drops the message from long distance (900 meters and 850 meters) for the future reserve for nearer information. With the 75 vehicles/km density, the distance priority algorithm keeps the PDR at 100% within the distance of 650 meters, while no priority scenario is unstable in all the distance.

In summary, Grid Proxy CAM widens the message transmission range, and the distance priority algorithm sustains 100% message delivery for the nearer information.

5.3 Delay evaluation

Fig 8 shows the delay in the Tokyo map with the vehicle density of 25, 50 and 75 vehicles/km. With the vehicle density of 25 vehicles/km, the delay is around 10 ms in both Grid Proxy CAM scenarios until the maximum distance (1000 meters). With the vehicle density of 50 vehicles/km, the no priority scenario has 290ms in delay. The delay comes from the queuing delay as we calculated in section 4. The distance priority algorithm reduces the delay to 40 ms within the range of 740 meters where the PDR is 100%. The delay decreases from 740 meters to 990 meters because the packet occupancy ratio also decreases (*i.e.* packet drop occurs). With the vehicle density of 75 vehicles/km, the Grid Proxy CAM scenario has 290ms in delay as well. The distance priority algorithm reduces the delay to 100 ms within the range of 450 meters where the

PDR is 100%. The delay decreases from 450 meters to 800 meters with the same reason above.

Fig 9 shows the delay in the Paris map. With the vehicle density of 25 vehicles/km, the delay is around 10 ms in both scenarios. The delay increases to about 20 ms with the vehicle density of 50 vehicles/km in both scenarios. The delay is around 290 ms without the proposed algorithm with the 75 vehicles/km density, while the distance priority algorithm can reduce the delay to 65 ms.

In summary, the Grid Proxy CAM system delivered the message widely, and the distance priority algorithm contributed to reducing the delay for the nearer information.

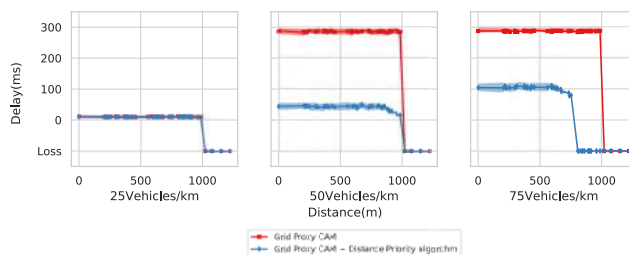


Fig. 8. Delay in scenario of Tokyo, Japan.

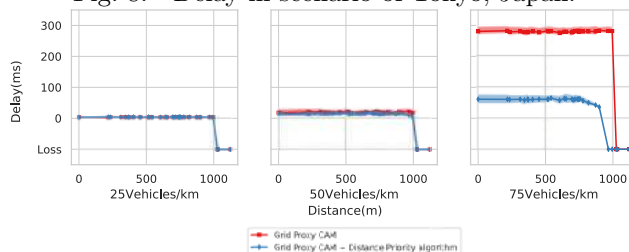


Fig. 9. Delay in scenario of Paris, France.

6 Related works

In our previous works, ¹⁰⁾ provides the detailed problem statement in on the mixed environment and the requirements analysis of the infrastructure-assisted messaging. ¹¹⁾ extends Proxy CAM⁷⁾ to deliver the proxy CAM to remote place over the Internet using IPv6 and LTE.

There is an approach to creating a message to share the perception objects by the sensors. Cooperative Perception Messages (CPM) is specified in Ko-PER

to share the perceived dynamic objects in the environment of an equipped vehicle or roadside station^{12, 13}). Environmental Perception Message (EPM) is a proprietary message including a list of all perceived objects, that contains the unique IDs of the vehicles perceived by the local perception sensors^{14, 15}). Sensory Observation Message (SOM) is proposed for sharing of infrastructure sensor information to mainly save vulnerable road users¹⁶).

Cloud-based cooperative awareness between vehicles and pedestrians are proposed in¹⁷). The pedestrians send their positions to the cloud regularly from smartphones, and the cloud alerts to the vehicles in the case that the cloud finds an approach of a pedestrian to the vehicles. Vehicle-to-Pedestrian (V2P) communication is also investigated in¹⁸). In the work, pedestrians receive CAMs on their smartphones from invisible vehicles behind an obstacle.

¹⁹) demonstrates how multi-sensor data fusion can leverage consistency and plausibility checking for perception sensor data. In particular, it validates the contents of CAMs as delivered by connected vehicles with on-board perceptions sensors independently.

7 Conclusion and future work

We proposed the system named Grid Proxy CAM where high-speed roadside networks inter-connect roadside sensors to wider dissemination of proxy cooperative awareness messages. We also proposed the distance priority algorithm that gives higher priority to the proxy CAM with a nearer position from the receivers. The simulation result shows that the proposed scheme successfully delivers the messages with low latency and high delivery ratio, especially in heavy road traffic.

We have two future works. First, the proposed system is based on IEEE802.11p dedicated to ITS, and there are¹¹) based on the general Internet technology (IPv6 and LTE). We plan to combine both systems to accommodate more use cases. Second, we set a maximum distance of d_{max} pre-configured by the

road infrastructure operator as a constant (1000 meters). However, in theory, we can introduce an adaptive parameter to the maximum distance to cover more area when the road traffic is low. For the adaptive maximum distance, the queue monitoring result must be shared among the neighbouring agents to send the proper amount of messages to a certain agent.

References

- 1) ISO 21217:2010 Intelligent transport systems – Communications access for land mobiles (CALM) – Architecture, April 2010.
- 2) Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture, September 2010. ETSI EN 302 665 V1.1.1 (2010-09).
- 3) IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture, April 2013. IEEE 1609.0-2013.
- 4) IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirement, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, July 2010. IEEE Std 802.11p-2010.
- 5) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, December 2014. ETSI EN 302 637-2 V1.3.2 (2014-11).
- 6) SAE J2735 Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary, November 2009.
- 7) T. Kitazato, M. Tsukada, H. Ochiai, and H. Esaki. Proxy cooperative awareness message: an infrastructure-assisted v2v messaging. In *2016 Ninth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU)*, pages 1–6, Oct 2016.
- 8) IEEE standard for information technology–local and metropolitan area networks–specific requirements–part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications - amendment 8: Medium access control (MAC) quality of service enhancements. *IEEE Std 802.11e-2005 (Amendment to IEEE Std 802.11 Edition (Reaff 2003))*, pages 1–212, November 2005.
- 9) IEEE standard for information technology–telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks–specific requirements part 11: Wireless

- LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. *IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007)*, pages 1–2793, March 2012.
- 10) Manabu Tsukada. Roadside-assisted v2v messaging for connected autonomous vehicle. In *The Thirteenth International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC 2017)*, pages 89–94, Nice, France, 2017.
 - 11) Masahiro Kitazawa, Manabu Tsukada, Kei Morino, Hideya Ochiai, and Hiroshi Esaki. Remote Proxy V2V Messaging using IPv6 and GeoNetworking. In *Vehicular 2017*, July 2017.
 - 12) Andreas Rauch, Felix Klanner, and Klaus Dietmayer. Analysis of v2x communication parameters for the development of a fusion architecture for cooperative perception systems. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE*, pages 685–690. IEEE, 2011.
 - 13) Andreas Rauch, Stefan Maier, Felix Klanner, and Klaus Dietmayer. Inter-vehicle object association for cooperative perception systems. In *Intelligent Transportation Systems-(ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on*, pages 893–898. IEEE, 2013.
 - 14) Hendrik-jorn Gunther, Oliver Trauer, and Lars Wolf. The potential of collective perception in vehicular ad-hoc networks. In *ITS Telecommunications (ITST), 2015 14th International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2015.
 - 15) Hendrik-Jörn Günther, Björn Mennenga, Oliver Trauer, Raphael Riebl, and Lars Wolf. Realizing collective perception in a vehicle. In *Vehicular Networking Conference (VNC), 2016 IEEE*, pages 1–8. IEEE, 2016.
 - 16) Robbin Blokpoel and Arjan Stuiver. Sensory observation message and cam extensions for vru safety.
 - 17) M. Bagheri, M. Siekinen, and J. K. Nurminen. Cellular-based vehicle to pedestrian (v2p) adaptive communication for collision avoidance. In *Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2014 International Conference on*, pages 450–456, November 2014.
 - 18) P. Merdrignac, O. Shagdar, I. B. Jemaa, and F. Nashashibi. Study on perception and communication systems for safety of vulnerable road users. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on*, pages 1876–1881, September 2015.
 - 19) Marcus Obst, Laurens Hobert, and Pierre Reisdorf. Multi-sensor data fusion for checking plausibility of v2v communications by vision-based multiple-object tracking. In *Vehicular Networking Conference (VNC), 2014 IEEE*, pages 143–150. IEEE, 2014.