

車両間協調による自車周辺エリア内の混雑状況把握

A Study on Road Traffic Congestion Estimation by Cooperation among Vehicles

藤田 敦^{†1} 梅津 高朗^{†2} 山口 弘純^{†1} 東野 輝夫^{†1} 金田 茂^{†3} 高井 峰生^{†1†4}
 Atsushi Fujita Takaaki Umedu Hirozumi Yamaguchi Teruo Higashino Shigeru Kaneda Mineo Takai

1. はじめに

近年、カーナビゲーションシステムの高度化と普及に伴い、路車間 DSRC (狭域通信) を用いてドライバーにリアルタイムで情報を配信する ETC2.0 (ITS スポット) [1] などのシステムが広がりを見せている。現在では、広域にわたる交通情報のリアルタイム配信による渋滞回避支援、道路上の落下物や故障車両などの通行の支障となりうる情報の提供による安全運転支援をはじめとするサービスが展開されており、今後は、経路情報を活用したサービスなどの展開が予定されている。しかし、これらの路車協調による情報配信システムは路側機の設置が前提となるため、細街路を含む全域へのサービス展開がコスト的に容易でない点が課題になっている。

そこで、路側機が設置されていない道路を通行する車両に交通情報を配信するために、車車間通信を活用することが考えられている。例えば、車車間通信機器を搭載した車両が、GPS により取得した自車の位置情報を定期的に DSRC でブロードキャスト送信することで、車両相互に自車周辺の状況把握を行うことができる。しかし、GPS 精度によってはある特定の車両が別車両と認識されるなどの悪影響が考えられる。一方で、車載レーダーやカメラなどの車両の自律安全走行を目的とした車両検出デバイスが普及段階にある。これらのデバイスを利用することで自車周辺に存在する車両を直接、高精度に検知することが可能になってきている [2,3]。

このような現状をふまえ、本稿では、全方位レーダーや全方位カメラなどの車両検出デバイスにより検出した周囲車両の情報を車車間通信で共有することにより、自車周辺に存在する車両や車列の存在を正確に把握するための手法を提案する。文献 [4] によると、車車間通信機器や車両検出デバイスは今後、多数の新車に搭載されることが見込まれているが、普及段階においては、搭載していない車両 (非搭載車両) の存在を無視することはできない。そこで、本手法では GPS 受信機、車両検出デバイス、および、車車間通信機器を保持する搭載車両が一定の割合のみ存在する環境を想定し、車車間通信により、GPS で測位した自車の現在地情報と車両検出デバイスにより検出した周囲車両の相対位置情報を含めたメッセージを搭載車両間で共有する。搭載車両では、自車と周辺の搭載車両が過去

および現在に測位した位置情報を利用して現在の位置を推定することで、周辺車両の存在把握を行う。このとき、過去の位置情報より算出する予測位置は時間経過に伴い誤差が増大するため、推定位置の誤差の大きさ (程度) も同時に求め、以降の推定に利用する。このようにして、車両検出デバイスによる検出だけは把握の難しい車両も含めた車両位置を高精度に推定し、周辺把握を実現することを本手法の目的とする。

搭載車両間で共有する位置情報には、自車の GPS 位置と車両検出デバイスで検出した車両の相対位置を含めるが、複数の車両の位置情報を組み合わせて整合性のとれた車両分布、つまり車両位置の対応関係を求める必要がある。このとき、位置誤差の影響により、ある特定の車両が別車両と認識されることが起こりうる。しかし、本手法では異なる時間に異なる車両が取得した位置情報に対し、時間経過に伴う車両の移動などによる誤差を考慮した上で推定誤差を求め、推定誤差に基づく加重平均により現在位置を求めることにより、位置誤差の影響を軽減するよう工夫している。車両の相互把握に関する研究において、非搭載車両の存在影響を想定した研究は、筆者らが調査した限りでは存在しないため、この点が本手法の新規性につながると考えている。

様々なシナリオにおける ITS の通信性能評価が可能なネットワークシミュレータ Scenargie を用いたシミュレーション実験により本手法の性能評価を行った。見通しの悪い交差点周辺の道路を評価エリアとし、搭載車両の存在割合を変化させて評価を行った結果、搭載車両の存在割合が 30% 程度であっても、自車周辺の半径 500m 以内に存在する車両の約 60% を位置誤差の平均値が一般的な道路の車線幅より小さい 2.0m 以下となる精度で把握でき、また、搭載車両の割合が 50% を超えた場合では、90% を超える車両を同じく 2.0m 以下となる精度で把握できることを確認した。

2. 関連研究

2.1 GPS を利用する車両検出および位置特定技術

車両の現在地情報を取得する方法としては一般に GPS が用いられ、様々なアプリケーションにおいて利用されている。しかし、GPS 測位の精度は、信号を受信できる GPS 衛星の数や、マルチパスと呼ばれる建物などの障害物に反射した信号の影響に依存することが知られている [5]。そのため、車両の走行環境によっては測位した GPS の位置誤差が大きくなる可能性があり、文献 [6] では都市部の高層建築物の間では誤差が 80 メートルを超える場合があることが指摘されている。しかし、交差点での出会い頭の衝突回避をはじめとする運転支援シナリオや隊列走行における車間距離制御では、車両位置の精度を誤差 1m 程度に抑制する必要があると指摘されている [7]。したがって、位置精度の向上は必須の課題となる。

そのため、GPS を補完する技術が多く開発されている、その

†1 大阪大学 大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

†2 滋賀大学 経済学部 情報管理学科

Department of Information Processing and Management, Faculty of Economics, Shiga University

†3 株式会社 スペースタイムエンジニアリング

Space-Time Engineering, LLC.

†4 カリフォルニア大学 ロサンゼルス校

Computer Science Department, University of California, Los Angeles

多くは D-GPS(Differential GPS) を想定し、速度計や加速度センサなどのハードウェア情報を併用することにより位置誤差を補正するアプローチを採用している。文献 [8] では、D-GPS の測位位置と車輪に配置した速度センサのデータをカルマンフィルターにより統合することで補正している。文献 [9] では、カメラから得られた画像情報から道路の白線を検出し、GPS の測位位置と統合することで、走行車線を推定する手法が提案されている。文献 [10] では、GPS の測位位置の精度に与える影響要因として高層建築物や道路周囲に植えられている樹木などを挙げ、このような影響要因の情報をデータベース化し、GPS 衛星からの信号取得状況の推定に利用している。しかし、これらの手法はあくまで自車両の位置精度向上のみを目指したものであり、周辺車両の存在把握については考慮されていない。

2.2 協調 ITS に関する研究と本稿の位置付け

車両間協調を想定したシステム (協調 ITS) で必要となるネットワーク技術やそれに伴う諸課題についての研究が行われてきている。文献 [11] では、安全系アプリケーションで、車両位置や速度などの基本的な情報を載せる協調認識メッセージ (Cooperative Awareness Message, CAM) を定期的に変送する場合において通信遅延が問題になることをふまえ、下位層プロトコル (IEEE 802.11p) でデータレートの制御と送信の優先度を適切に設定することで、車列の先頭車両にメッセージのブロードキャストで送信する機会を多く与えるように制御する手法を提案し、通信遅延を抑制すると同時に効率的な帯域利用が実現可能であることを示している。文献 [12] では、隊列走行では隊列内の車両をノードとみて動的なネットワークポロジが構成されているとし、安定な隊列を維持するための分散型制御プロトコルを提案している。提案プロトコルでは時変の通信遅延の発生を考慮して、車両相互の位置関係や送信パケットの特性を解析することでパケットの送信間隔や送信レートを制御する方法を示している。これらを含めた協調 ITS の多くは、安全走行支援を想定したプロトコルやアプリケーションを前提とし、通信遅延やパケットロスに性能評価における主な評価指標としている。一方で、文献 [13] ではそれらの評価指標に加え、車両の走行環境に依存した指標の導入とその必要性について議論されている。その中で著者は、交差点環境を想定したシナリオでは衝突確率を評価指標とした上で、相対位置関係や協調認識メッセージの送信間隔をパラメータとする衝突確率の推定手法について言及している。

また、協調 ITS における周辺認識を意図した研究として、文献 [14] では、DSRC 機器を搭載した車両が自車の位置情報を定期的にブロードキャスト送信し、周囲車両との相対位置関係を把握し個々に管理する手法が提案されている。この手法では自車周辺の領域を 8 方位に分割した上で、周囲車両の相対位置がどの領域に含まれるかを判定し、領域毎に木構造で車両情報の管理と更新を行うようにしている。文献 [15] では、車載カメラにより検出した車両の位置情報を複数車両間で共有し、車両間で協調して特定の車両トラッキングを行うためのアプローチが示され、シミュレーション実験により手法の有効性と課題が述べられている。この方法では交差点周辺などの見通し

表 1 Basic Safety Message 仕様

Part 1	現在位置、速度、車両サイズなどの車両に関連する基本情報
Part 2	車両のイベントに関連する情報
Part 3	アプリケーションによって定義された情報

の悪い環境や交通量の多い道路など、単一車両の車載カメラだけでは継続したトラッキングが困難となる環境においても、他車両が検出した該当車両の位置情報を知ることにより間接的なトラッキングの継続を実現している。また、文献 [16] では、GPS 位置に依存しない携帯端末を用いた協調位置追跡手法を、GPS 精度が課題である車両間通信環境において適用する場合の問題点が指摘されている。これらの手法は車載器の非搭載車両の存在は考慮されていないため、本稿で想定している環境での適用は困難である。

このような協調 ITS の枠組みの中で、本稿で提案する手法は、車両検出デバイスを搭載した車両が自律的に周囲車両を検出し、車両間協調により位置情報を共有することで、非搭載車両や直接検出できない車両を含めた周辺把握を行うことを目的とする。

3. 想定環境

3.1 無線通信方式

現在、高度交通システム (Intelligent Transportation Systems, ITS) における通信プロトコルの規格化が進められており、米国では上位層として WAVE (Wireless Access for Vehicular Environments) [17]、その下位層として IEEE802.11p [18] が規格化されている。ITS における狭域通信用帯域として米国では 5.9GHz 帯、日本では 700MHz 帯と 5.8GHz 帯の周波数帯がそれぞれ割り振られており、IEEE802.11p の場合、通信速度は 3Mbps から 27Mbps、最大通信可能距離は 300m から 1000m と想定されている。WAVE はトランスポート層およびネットワーク層の規格で、IEEE1609 ファミリー [19] として標準化されており、DSRC のためのアーキテクチャやセキュリティ、物理層アクセスなどを定義している。また、WAVE では、ITS アプリケーションで用いられるメッセージセットとして SAE J2735 [20] を想定している。SAE J2735 における Basic Safety Message (BSM) は米国ミシガン州の Connected Vehicle [21] の実証実験などで利用されており、表 1 に示す情報をそれぞれ含めることができ、100 ミリ秒毎にブロードキャスト送信することが定められている。

米国における WAVE プロトコルスタックは ITS アプリケーションにおける将来的な標準規格として用いられる可能性が高いことから、本稿においても WAVE/IEEE802.11p を想定する設計を行っている。

3.2 車両モデル

本稿では、一部の車両が車載器 (GPS 受信機、速度計、車両検出デバイス、および、WAVE/IEEE802.11p 通信機器) を搭載する環境を想定する。以下、ここに挙げた車載器をすべて搭載する車両を**搭載車両**、いずれも搭載しない車両を**非搭載車両**とそれぞれよぶ。なお、車載器はそれぞれ Basic Safety Message の送信間隔に合わせ、100 ミリ秒を単位とするタイムスロットを基準として動作するものとする。搭載車両は IEEE802.11p

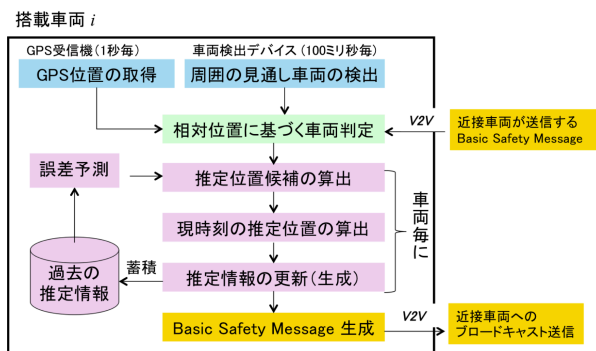


図 1 搭載車両 i における処理の流れ

により 48 ビットの固有の MAC アドレスを保持し、車両識別のための車両 ID とする。また、搭載車両 i の無線範囲内に存在する車両を車両 i の**近接車両**とよび、車両 i が把握している車両位置や速度などの情報を**推定情報**とよぶ。

以下、搭載車両の動作について述べる。搭載車両は T_g 毎に GPS により自車の現在地情報を取得する。GPS により取得した位置を **GPS 位置**とよび、 T_g は 1 秒 (10 タイムスロット) とする。また、 T_z 毎に自車の速度情報を取得し、車両検出デバイス (ミリ波レーダー) により周囲の見通し車両への相対角度や距離を測定する。 T_z は 100 ミリ秒 (1 タイムスロット) とし測定結果は十分に高性能であるものとするが、障害物に遮られる位置に存在する車両などの直接見通すことのできない車両は検知しないものとする。また、検出対象を四輪車両に限定し、二輪車や人、道路上の障害物は考慮しない想定としている。

搭載車両 i が車両検出デバイスにより検出した車両を車両 i の被観測車両とよび、被観測車両の相対角度や距離から自車の位置を基準とする被観測車両の相対位置を算出し、さらに以前に観測した相対位置を用いて被観測車両の速度を求める。被観測車両の相対位置や速度などの情報を**観測情報**とよぶ。ただし、検出した車両の車両 ID はわからないため、搭載車両が個別に車両 ID を付与する。

GPS 位置、相対位置、および、速度の誤差は平均 0 の正規分布に従うものとし、分散をそれぞれ σ_g^2 、 σ_r^2 および σ_v^2 で表す。ここで、GPS の位置誤差は第 2.1 節で述べたように走行環境に依存して増大することが考えられるため、 σ_g^2 は σ_r^2 と σ_v^2 より大きいと仮定している。また、デバイスの一般的な動作周波数を考慮して、 T_g 、 T_z の値をそれぞれ 1 秒、100 ミリ秒と定めているが、提案手法はそれらの特定値には依存しない。搭載車両は T_s 毎に、現時刻における自車の観測情報と推定情報を Basic Safety Message の Part 3 に載せ、近接車両に対してブロードキャスト送信する。 T_s は 100 ミリ秒 (1 タイムスロット) とするが、同期制御は行わない。

4. 提案手法

4.1 提案手法の概要

提案手法の構成を図 1 に示す。搭載車両 i は GPS 位置と車両検出デバイスにより検出した被観測車両の相対位置に基づ

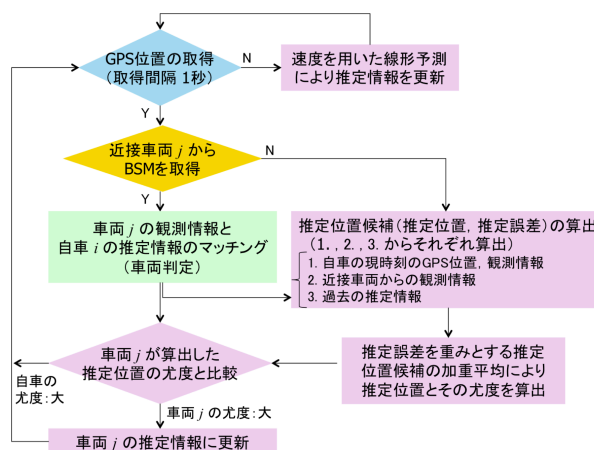


図 2 搭載車両 i における推定情報更新のプロセス

き、車両毎の位置を推定する。車両 i の GPS 位置と被観測車両の相対位置の組み合わせから算出する現時刻の予測位置を**推定位置候補**とよぶ。

図 2 に示すように推定位置候補の算出では、自車の推定情報に加えて近接車両 j の観測情報を利用する。このとき、車両検出デバイスによる検出だけでは車両 ID がわからないことから、近接車両 j の観測情報と同一の車両の推定情報を保持しているか否かを判定する必要がある。そのため、相対位置に基づくマッチング (車両判定) を行う。マッチング方式については第 4.4 節で述べる。

また、現時刻の GPS 位置と被観測車両の相対位置に加え、過去の推定情報から予測した位置も推定位置候補の算出に利用する。このとき推定誤差を併せて算出し、その推定誤差を重みとする加重平均により現時刻の車両位置を推定する。複数の推定位置候補を利用するのは、各推定位置候補の誤差が平均 0 の正規分布に従い、中心極限定理の適用の前提条件を満たすためであり、推定誤差を抑制できることを確認している。ただし、時間経過に伴う信頼度の劣化により、過去の推定情報から算出した推定位置候補は大きな誤差を含む可能性がある。このため、推定位置候補毎に経過時間によって増大する推定誤差を定義する。算出については第 4.5 節で詳細に述べる。

このようにして求めた車両毎の推定位置は、推定結果の信頼度を表す尤度とともに推定情報として保持する。この際、近接車両が推定した推定位置の尤度の方が大きい場合、近接車両の推定位置に更新することで、近接車両間で最も高精度に推定された推定位置を保持する。

4.2 観測情報と推定情報の生成

搭載車両 i は GPS 位置を T_g 毎に測位、また被観測車両の相対位置と速度を T_z 毎に検出し、観測情報 $O_i(a)$ を式 (1) のような 4 項組で生成する。

$$O_i(a) = (t, \mathbf{p}, \mathbf{r}, \mathbf{v}) \quad (1)$$

なお、"a" は車両 i が付与した被観測車両の車両 ID とし、 t が観測情報の生成時刻、 \mathbf{p} が i の位置、 \mathbf{r} が a の相対位置、 \mathbf{v} が a の速度をそれぞれ表す。

また、搭載車両 i は図 2 に従い算出する車両の推定位置と尤度を含む推定情報 $E(a)$ を式 (2) のような 5 項組で生成する。

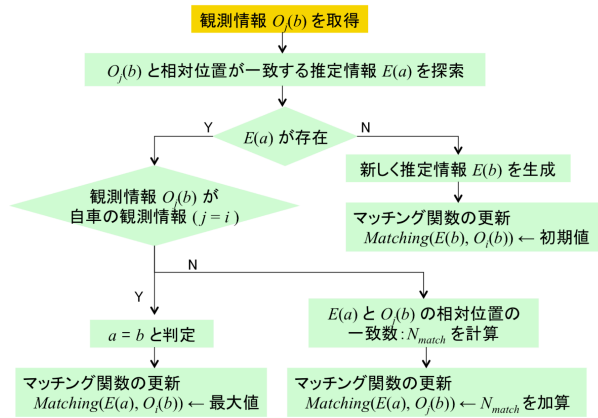


図3 車両判定の流れ

$$E(a) = (t, \mathbf{p}, \tilde{p}, \mathbf{r}, \mathbf{v}) \quad (2)$$

なお、 t が生成時刻、 \mathbf{p} が a の推定位置、 \tilde{p} が \mathbf{p} の尤度、 \mathbf{r} が a の相対位置、 \mathbf{v} が a の速度をそれぞれ表す。

4.3 車車間通信メッセージの処理

第3.2節で述べたように車両毎の観測情報と推定情報は Basic Safety Message の Part 3 に載せて送信する。以降、メッセージ内の車両 a に関する情報を $S(a)$ で表す。 $S(a)$ は推定情報 $E(a)$ および車両 a と一致する観測情報 $O_i(b)$ (ID "b" は車両 i によって付与された車両 a の車両 ID) の組で式 (3) のような2項組で定義する。

$$S(a) = (E(a), O_i(b)) \quad (3)$$

車両 i が車両 j から Basic Safety Message を受信したとき、車両 c に関する情報 $S(c) = (E(c), O_j(d))$ から観測情報 $O_j(d)$ を取り出し、一致する推定情報 $E(a)$ を探索する。 $E(a)$ が存在し、かつ、推定情報 $E(c)$ に含まれる推定位置の尤度 \tilde{p} が $E(a)$ に含まれる推定位置の尤度 \tilde{p} よりも大きいとき、推定情報 $E(c)$ を推定情報 $E(a)$ に代入して更新する。

4.4 相対位置に基づく車両判定

より多くの観測情報を推定に利用するために、搭載車両 i の推定情報 $E(a)$ と搭載車両 j が車両 i と異なる ID で認識している車両 a の観測情報 $O_j(b)$ (ID "b" は車両 j によって付与された車両 a の ID) が同一車両であるか否かを判定する必要がある。この車両判定 (マッチング) の流れを図3に示す。

推定情報 $E(a)$ を更新する場合には、式 (4) を満たす観測情報 $O_j(b)$ を利用する。

$$b = \arg_x \max \text{Matching}(E(a), O_j(x)) \quad (4)$$

関数 Matching は、搭載車両 i が観測情報 $O_j(b)$ ($j \neq i$) を取得し $E(a)$ が存在する場合には、車両 i の推定情報と車両 j の観測情報に含まれる相対位置の一致数 (N_{match}) を $\text{Matching}(E(a), O_j(b))$ に加算する関数である。

図4を例に (推定情報、観測情報をそれぞれトポロジーとして表現している)、関数 Matching の更新過程を説明する。観測情報 $O_E(E)$ が車両 A の推定情報 $E(c)$ と相対位置が一致し、 $O_E(d)$ と $E(A)$ 、 $O_E(e)$ と $E(a)$ および $O_E(g)$ と $E(b)$ がそれぞれ一致するので $N_{\text{match}} = 3$ となり、 $\text{Matching}(E(c), O_E(E))$ に3を加算する。同様に、観

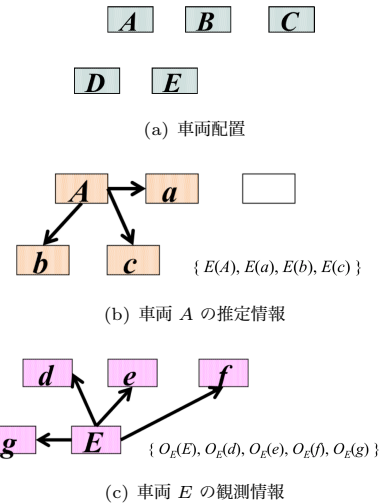


図4 関数 Matching 更新の例

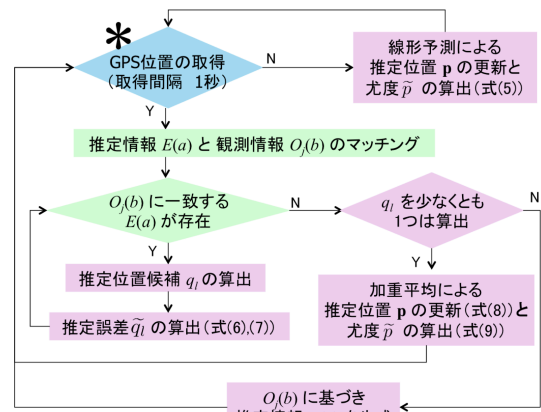


図5 推定位置の更新過程

測情報 $O_E(E)$ が車両 A の推定情報 $E(a)$ と相対位置が一致し、 $O_E(g)$ と $E(A)$ が一致するので $N_{\text{match}} = 1$ となり、 $\text{Matching}(E(c), O_E(E))$ に1を加算する。一致する推定情報が存在しない場合、新しく推定情報 $E(a)$ を生成し、 $\text{Matching}(E(a), O_j(b))$ が最大値を返すようにマッチング関数を更新する。

4.5 推定位置の更新

推定位置の更新は、図5に示すようにGPS位置を取得したか否かに応じ (図5の*)、以下のいずれかの処理を実行する。

- GPS位置を取得しなかった場合

推定位置 \mathbf{p} は前のタイムスロットの推定位置 \mathbf{p}' からの線形予測により更新する。この場合、車両 a の推定位置の尤度 \tilde{p} は前のタイムスロットで求めた尤度 \tilde{p}' と現在のタイムスロットの速度誤差 σ_v^2 を用いて式 (5) として更新する。

$$\tilde{p} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\tilde{p}'^2} + \sigma_v^2}} \quad (5)$$

- GPS位置を取得した場合

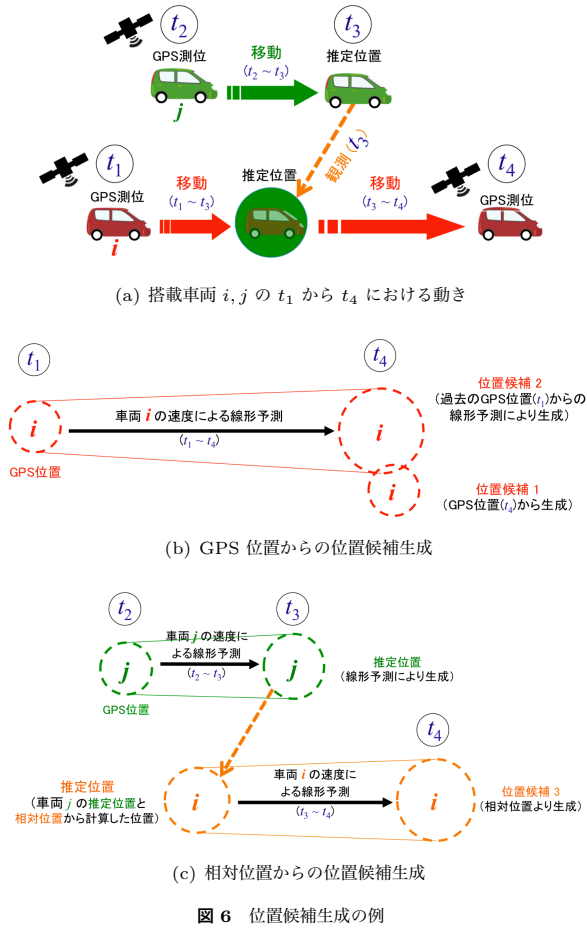


図 6 位置候補生成の例

車両 a の推定位置 \mathbf{p} を更新するために、まず第 4.4 節で述べた方法により推定情報 $E(a)$ と一致すると判定した観測情報に含まれる GPS 位置および相対位置から、推定位置候補 $\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_n$ を生成し、推定位置候補 \mathbf{q}_l に対し推定誤差 \tilde{q}_l を求める。

現在のタイムスロット t に対し、 k タイムスロット前に測定された車両 a の GPS 位置からは、 $[t-k, t]$ 間に観測された車両 a の速度を用いた線形予測により \mathbf{q}_l を生成する。この場合、 k タイムスロット間で蓄積された速度誤差と GPS 位置誤差を考慮し、推定誤差 \tilde{q}_l を式 (6) として定義する。

$$\tilde{q}_l = \sqrt{\sigma_g^2 + k\sigma_v^2} \quad (6)$$

一方、現在のタイムスロット t に対し、 k' タイムスロット前に搭載車両 j によって観測された車両 a の相対位置からは、 k タイムスロット前 ($k > k'$) に観測された車両 j の GPS 位置、 $[t-k, t-k']$ 間に観測された車両 j の速度および $[t-k', t]$ 間に観測された車両 a の速度を用いた線形予測により \mathbf{q}_l を生成する。この場合、 k タイムスロット間で蓄積された速度誤差と GPS 位置誤差、および、相対位置誤差を考慮し、推定誤差 \tilde{q}_l を式 (7) として定義する。

$$\tilde{q}_l = \sqrt{\sigma_g^2 + \sigma_r^2 + k\sigma_v^2} \quad (7)$$

この方針に基づく \mathbf{q}_l の生成例を図 6 に示す。時刻 t_1 から t_4 において図 6(a) のように搭載車両 i, j がそれぞれ動くとき、GPS 位置より生成する t_4 における車両 i の位置候補は、 t_4 で観測した GPS 位置から直接生成した位置候補 1 と、 t_1 で観測した GPS 位置を t_1 から t_4 までの車両 i の速度を用いた線形予測により生成した位置候補 2 の 2 つである (図 6(b))。また、相対位置より生成する位置候補は、 t_3 での車両 j の推定位置 (t_2 から t_3 までの車両 j の速度を用いた線形予測により生成) と相対位置より計算した t_3 における車両 i の推定位置と t_3 から t_4 までの車両 i の速度を用いた線形予測により生成した位置候補 3 である (図 6(c))。

以上のような方針により算出した推定位置候補 \mathbf{q}_l ($l = 1, \dots, n$) に対し、推定誤差 \tilde{q}_l の逆数を重みとする加重平均により車両 i の新しい推定位置 \mathbf{p} を算出し (式 (8))、推定位置 \mathbf{p} の尤度 \tilde{p} を式 (9) で定める。これは、推定位置 \mathbf{p} が平均 0、分散 $n/(\sum_{l=1}^n \mathbf{q}_l)^2$ の正規分布に従い、中心極限定理の前提条件を充足するためである (紙面の都合上、式の妥当性に関する議論は本稿では省略する)。

$$\mathbf{p} = \frac{\sum_{l=1}^n \frac{1}{\tilde{q}_l} \mathbf{q}_l}{\sum_{l=1}^n \frac{1}{\tilde{q}_l}} \quad (8)$$

$$\tilde{p} = \frac{1}{\sqrt{\frac{n}{(\sum_{l=1}^n \tilde{q}_l)^2}}} \quad (9)$$

5. 性能評価

5.1 評価目的

提案手法の評価のために、以下の 3 点を評価目的とするシミュレーション実験を行った。

- 非搭載車両の存在割合による影響
- ITS アプリケーションの評価シナリオ [22] として挙げられている見通しの悪い交差点周辺環境において合理的な性能を達成できること
- 車両位置精度の向上および直接検出できない非搭載車両を含めた周辺認識性能を実現できること

5.2 シミュレーション設定

シミュレーションでは図 7 に示す車幅 5m、長さ 1000m、片側 2 車線である合計 4 車線の道路が交わる交差点の周辺環境を想定する。なお、車両検出デバイスで直接見通すことのできない車両を考慮するため、交差点の角に見通しの障害となる 4 つの建物を配置している。そして、図 7 上を走行する車両のモビリティをマイクロ交通シミュレータ VISSIM [23] により生成した。VISSIM は車間距離や速度をパラメータとする確率分布モデルに従い車両の発進や追従といったミクロな挙動を再現可能なシミュレータであり、本シミュレータにより車両密度が 0.05 台/m となるモビリティを生成した。

車載器モデルは表 2 に示すパラメータ設定とした。ミリ波レーダーなどの車両検出デバイスは近年、高性能化が進んで

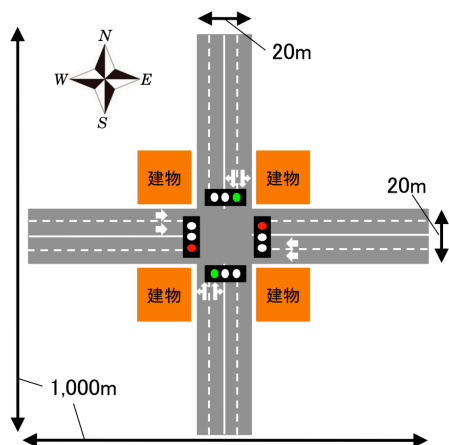


図7 シミュレーションマップ

表2 車載器モデルのパラメータ設定

	測位誤差分布	取得間隔
GPS 受信機	標準偏差 $\sigma_g=5\text{m}$ 平均 0m の正規分布	1 秒
速度計	標準偏差 $\sigma_v=0.25\text{m/s}$ 平均 0m/s の正規分布	100 ミリ秒
車両検出デバイス (ミリ波レーダー)	標準偏差 $\sigma_r=0.25\text{m}$ 平均 0m の正規分布	100 ミリ秒

表3 通信プロトコル設定

項目	設定
通信プロトコル	WAVE / IEEE 802.11p
無線伝搬モデル	ITU-R P.1411 [25]
メッセージセット	SAE J2735 Basic Safety Message

表4 通信パラメータ設定

パラメータ	設定値
送信電力	23dbm
周波数帯域	5.9GHz
データレート	6Mbps
最大通信範囲	300m
メッセージ送信間隔	100ms

おり、文献 [24] で述べられているデバイスの特性に基づいて、最大検出距離を 100m、視野角を 360 度（車両の前後左右に配置）とした。

シミュレーション実験は ITS の通信性能評価が可能なネットワークシミュレータ Scenargie [26] により行った。通信プロトコルとパラメータの各設定を表 3 および表 4 に示す。非搭載車両の存在割合による影響を評価目的としているため、搭載車両の存在割合を評価パラメータとし、以降、**装備率**とよぶ。また、評価指標とする位置誤差は、ある搭載車両におけるすべての認識車両に対する誤差（実車両位置と推定位置のユークリッド距離）の平均値として定義し、すべての搭載車両における位置誤差の平均値を**平均位置誤差**とよぶ。

5.3 評価結果

5.3.1 周辺認識の時間推移

時間経過に伴う周辺車両の認識状況の変化について述べる。図 8 および図 9 に、シミュレーションの開始後、1 秒経過時と

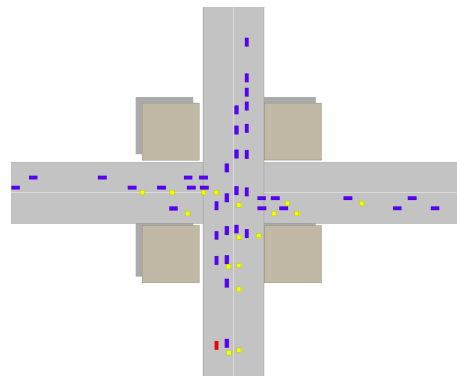


図8 赤色矩形車両における周辺認識状況：1 秒経過時

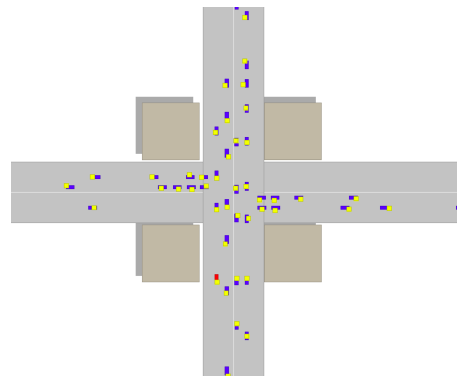


図9 赤色矩形車両における周辺認識状況：3 秒経過時

3 秒経過時における Scenargie のスナップショットを示す。図中の青色および赤色矩形は VISSIM で生成したトレースデータの位置（実車両位置）に対応する。本実験では赤色矩形で示した搭載車両に着目し、この車両の保持する推定情報に含まれる推定車両の位置が図中の黄色矩形（推定車両）に対応する。なお、装備率は 50%である。

図 8 と図 9 を比較すると、開始直後における推定車両は赤色矩形の近傍に偏っていることがわかる。これらの多くは車両検出デバイスにより直接観測した車両であり、近接車両の観測情報や推定情報を用いた周辺認識が十分にできていない。また、実車両位置と推定車両の位置のずれが大きいたことがわかる。これは、表 2 で示したように車両検出デバイスの誤差は GPS の誤差と比較して小さいが、赤色矩形の車両自体の位置誤差が大きいためによる影響である。

一方、3 秒経過時では、交差点周辺に存在する多数の車両が推定車両となっている。このことは周辺の搭載車両の観測情報や推定情報を利用することで、自車の車両検出デバイスだけでは直接見通すことのできない車両を認識したことを表す。また、搭載車両間でより精度の高い推定情報を共有していることから、推定車両の位置精度を向上したこともわかる。

5.3.2 周辺認識性能

本評価では、評価指標として認識率 $R(d, r)$ を用いる。自車周辺の半径 $r\text{m}$ 以内の領域に存在する車両を周辺認識の対象とし、その円領域に含まれるすべての車両に対して誤差 $d\text{m}$ 以下で一意に認識した車両比率を求め、すべての搭載車両における

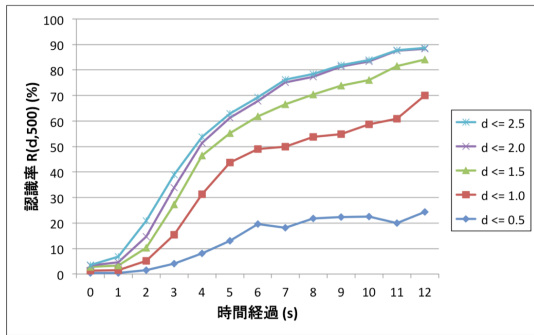


図 10 認識率 $R(d, 500)$ の時間経過に伴う推移 (装備率 50%)

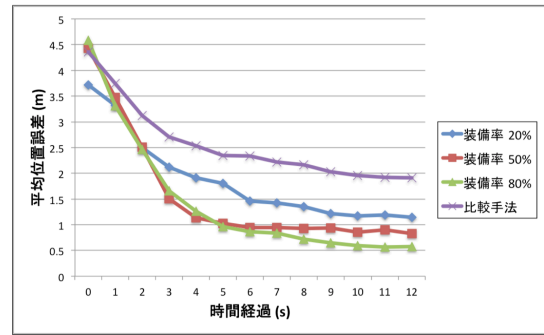


図 12 推定車両の平均位置誤差の時間経過に伴う推移

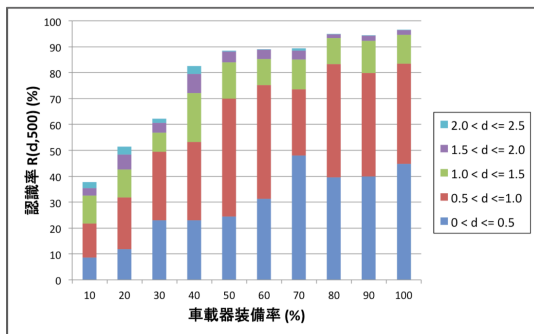


図 11 装備率が認識率 $R(d, 500)$ に与える影響 (10 秒経過時)

それら車両比率の平均値を $R(d, r)$ とする。

図 10 はシミュレーションの開始直後を 0 秒とする時間経過に伴う認識率 $R(d, 500)$ の推移を表す。なお、装備率は 50% である。時間経過に伴い、推定した車両比率が大きくなり、同時に高精度な位置で認識できていることがわかる。特に、4 秒経過時点において周辺車両の約 50% を位置誤差 2.0m 以下で認識し、その後、約 88% の車両を位置誤差 2.0m 以下で認識している。この位置誤差は一般的な道路の車線幅よりも小さいため、車線レベルでの認識を達成できているといえる。

次に、装備率を 10% から 100% に 10% 刻みで変化させる実験により、装備率が周辺認識に与える影響を評価した。図 11 は 10 秒経過後の認識率 $R(d, 500)$ を表している。装備率が高くなればなるほど、より高い認識を達成し、同時に高精度に位置を推定できている。車載器の普及段階において、装備率が 30% 程度であっても 60% 程度の車両を位置誤差 2.0m 以下で認識できていることから、装備率が低い環境下でも提案手法が有効である。

5.3.3 推定位置の精度向上

最後に推定位置の精度向上について評価した。一般にカーナビゲーションなどのアプリケーションは過去に測定した GPS 位置や地図情報を用いて補正した位置を利用している。そこで、過去および現在の GPS 位置や車両検出デバイスによる観測情報のみ、つまり車両単位で自律的に取得可能な情報のみを利用して車両の絶対位置を補正する手法を本評価における比較手法とする。その上で時間経過に伴う推定車両の平均位置誤差の推移を調べた (図 12)。装備率は低 (20%)、中 (50%)、高 (80%) としてそれぞれシミュレーションを行ったが、表 5

表 5 平均位置誤差の抑制 (12 秒経過時)

装備率	平均位置誤差	比較手法に対する改善率
低 (20%)	1.1m	40%
中 (50%)	0.8m	57%
高 (80%)	0.6m	70%

に示すように平均位置誤差の抑制を達成している。

装備率が高い方がより精度の高い位置を得ることができる傾向にあるがこれは近接車両数が最も多く、その分推定位置の計算において多くの推定位置候補を利用できたためである。一方で、位置誤差の収束傾向が見られる。これは、時間経過に伴う誤差の蓄積により過去に生成した推定位置候補の誤差が大きくなっており、精度向上に寄与していないためと考えられる。

6. まとめ

本稿では、自車の GPS 位置と車両検出デバイスで検出した相対位置を利用し、車両間協調により周辺車両の存在把握を高精度に行う手法を提案した。提案手法では、車載器の非搭載車両が一定数存在する想定のもとで、まず、搭載車両が過去および現在に測位した GPS 位置や相対位置により、推定位置の候補と位置誤差 (尤度) を算出する。そして、その尤度を重みとする加重平均により位置を推定し、その結果を搭載車両間で共有する。このとき、搭載車両間で最も高精度に推定できた位置情報を保持するなどして、自車の車両検出デバイスや車両間通信による存在把握だけでは直接検出できない車両も含めた正確な周辺認識を実現する。見通しの悪い交差点周辺を想定したシミュレーション実験による性能評価により、車載器の装備率が 30% 程度であっても、自車周辺の半径 500m 以内に位置する車両の約 60% を、一般的な道路の車線幅以下となる位置誤差 2.0m 以下に抑制して認識できることを示し、提案手法は車載器の普及段階において有効となることがわかった。

今後の課題として、様々な交通状況における評価が必要である。本稿の性能評価では交差点周辺の道路を対象としたが、実環境では様々な交通状況や車両分布の偏りがあるためである。そのために GPS の実測値をモデルに組み込むことなどを検討している。また、提案手法では、車両検出デバイスでの検出結果はすべて四輪車両とするモデルとしているが、実際には四輪車両と異なる動きや特徴を持つ二輪車や歩行者、障害物などが存在するため、それらを考慮し、より実環境に即した周辺状況把握を行う手法に改善していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省：ETC2.0 (オンライン) . <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/etc2> (参照:2015/7/24) .
- 2) Bulet, J. and Dalla Fontana, M.: Robust and efficient multi-object detection and tracking for vehicle perception systems using radar and camera sensor fusion, *IET and ITS Conference on Road Transport Information and Control (RTIC 2012)*, pp.1-6 (2012).
- 3) Sivaraman, S. and Trivedi, M.: Vehicle Detection by Independent Parts for Urban Driver Assistance, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.14, No.4, pp.1597-1608 (2013).
- 4) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部：官民ITS構想・ロードマップ2015 (オンライン) . <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20150630/siryu7.pdf> (参照:2015/7/24) .
- 5) Meguro, J., Murata, T., Takiguchi, J., Amano, Y. and Hashizume, T.: GPS multipath mitigation for urban area using omnidirectional infrared camera, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.10, No.1, pp.22-30 (2009).
- 6) Drawil, N.M., Amar, H.M. and Basir, O.A.: GPS localization accuracy classification: a context-based approach, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.14, No.1, pp.262-273 (2013).
- 7) 一般財団法人日本自動車研究所 ITS 研究部：自動運転・隊列走行分野における位置認識技術, 技術セミナー, pp. 1-5 (2013).
- 8) Rezaei, S. and Sengupta, R.: Kalman Filter-Based Integration of DGPS and Vehicle Sensors for Localization, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.15, No.6, pp.1080-1088 (2007).
- 9) Rife, J.: Collaborative Vision-Integrated Pseudorange Error Removal: Team-Estimated Differential GNSS Corrections with no Stationary Reference Receiver, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.13, No.1, pp.15-24 (2012).
- 10) Costa, E.: Simulation of the Effects of Different Urban Environments on GPS Performance Using Digital Elevation Models and Building Databases, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.12, No.3, pp.819-829 (2011).
- 11) Bohm, A., Jonsson, M. and Uhlemann, E.: Adaptive Cooperative Awareness Messaging for Enhanced Overtaking Assistance on Rural Roads, *Proc. IEEE 74th Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2011)*, pp. 1-5 (2011).
- 12) di Bernardo, M., Salvi, A. and Santini, S.: Distributed Consensus Strategy for Platooning of Vehicles in the Presence of Time-Varying Heterogeneous Communication Delays, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.16, No.1, pp.102-112 (2015).
- 13) Joerer, S., Segata, M., Bloessl, B., LoCigno, R., Sommer, C. and Dressler, F.: A Vehicular Networking Perspective on Estimating Vehicle Collision Probability at Intersections, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.63, No.4, pp.1802-1812 (2014).
- 14) Ansari, K., Wang, C., Wang, L. and Feng, Y.: Vehicle-to-Vehicle Real-Time Relative Positioning Using 5.9 GHz DSRC Media, *Proc. IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2013)*, pp.1-7 (2013).
- 15) Zardosht, B., Beauchemin, S. and Bauer, M.: An in-vehicle tracking method using vehicular ad-hoc networks with a vision-based system, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2014)*, pp.3022-3029 (2014).
- 16) Amini, A., Vaghefi, R., dela Garza, J. and Buehrer, R.: GPS-free cooperative mobile tracking with the application in vehicular networks, *Proc. IEEE 11th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC 2014)*, pp.1-6 (2014).
- 17) Wu, X., Subramanian, S., Guha, R., White, R., Li, J., Lu, K., Bucceri, A. and Zhang, T.: Vehicular Communications Using DSRC: Challenges, Enhancements, and Evolution, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.31, No.9, pp.399-408 (2013).
- 18) IEEE Computer Society: 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 6: Wireless Access in Vehicular Environments (2010).
- 19) Uzcategui, R. and Acosta-Marum, G.: Wave: A tutorial, *IEEE Communications Magazine*, Vol.47, No.5, pp.126-133 (2009).
- 20) Kenney, J.: Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States, *Proceedings of the IEEE*, Vol.99, No.7, pp.1162-1182 (2011).
- 21) Lu, N., Cheng, N., Zhang, N., Shen, X. and Mark, J.: Connected Vehicles: Solutions and Challenges, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol.1, No.4, pp.289-299 (2014).
- 22) Harding, J., Powell, G., Yoon, R. and Fikentscher, J.: Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application, Technical report, NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration) (2014).
- 23) 構造計画研究所：交通シミュレーション PTV Vision (オンライン) . http://www4.kke.co.jp/ptv-vision/vissim_top.html (参照:2015/7/24) .
- 24) Hasch, J., Topak, E., Schnabel, R., Zwick, T., Weigel, R. and Waldschmidt, C.: Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol.60, No.3, pp.845-860 (2012).
- 25) 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, *RECOMMENDATION ITU-R P.1411-5* (2012).
- 26) Space-Time Engineering: Scenargie (Online). <http://www.spacetime-eng.com/en/products.html> (参照:2015/7/24) .