

車車間通信を用いた車両間協調による周辺車両群の存在把握

藤田 敦^{1,a)} 梅津 高朗^{2,b)} 山口 弘純^{1,c)} 東野 輝夫^{1,d)} 金田 茂^{3,e)} 高井 峰生^{1,4,f)}

受付日 2015年1月28日, 採録日 2015年8月12日

概要: 本論文では, 車載レーダやカメラなどの自律安全走行の支援を目的としたデバイスで検出した周辺車両の情報を車車間通信を利用して共有することで, 自車周辺に存在する車両を正しく把握する手法を提案する. 提案手法では車車間通信機器および車両検出デバイスをいずれも搭載しない車両 (非搭載車両) が一定の比率で存在する環境を想定する. そのうえで, 車載器の搭載車両間で共有する情報を適切に重量することにより高精度に車両位置を推定し, 非搭載車両を含めた周辺車両群の存在把握を行う. このとき, 各搭載車両が推定に利用する情報には車載器の性能や車両情報の取得タイミングに起因する誤差が含まれるため, それらの影響がなるべく小さくなるよう工夫する. シミュレーションにより, 搭載車両の存在比率が 30%程度であっても自車周辺の半径 500 m 以内に存在する車両の約 60%を位置誤差が 2.0 m 以下となる精度で把握できることを示した.

キーワード: 協調 ITS, 車車間通信, 状況把握, 位置推定

A Study on Cooperative Vehicle Awareness Using Vehicle-to-vehicle Communication

ATSUSHI FUJITA^{1,a)} TAKAAKI UMEDU^{2,b)} HIROZUMI YAMAGUCHI^{1,c)} TERUO HIGASHINO^{1,d)}
SHIGERU KANEDA^{3,e)} MINEO TAKAI^{1,4,f)}

Received: January 28, 2015, Accepted: August 12, 2015

Abstract: In this paper, we propose a cooperative awareness method in which multiple vehicles cooperatively calibrate their positions and recognize neighboring vehicles. In the proposed method, only limited vehicles are equipped with GPS receivers, DSRC devices and vehicle detection devices such as all directional sensors or cameras, and these vehicles share their positions from GPS signals or relative positions calculated by observation among equipped vehicles. Then, the proposed method aims that each equipped vehicle recognizes its neighboring vehicles including indirect neighbors by combining various pieces of position information with different degrees of accuracy. The simulation experiment have revealed that about 60% of neighboring vehicles located within a 500 m radius of own position are recognized within 2.0 m errors in the environment that the penetration rate is even 30%.

Keywords: cooperative ITS, V2V communications, position estimation

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

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, Hikone, Shiga 522-
8522, Japan

³ 株式会社スペースタイムエンジニアリング
Space-Time Engineering, LLC., Chiyoda, Tokyo 101-0025,
Japan

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, 4732 Boelter Hall, Los Angeles, CA 90095, USA

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と
もない路車間 DSRC (狭域通信) を用いてドライバにリ
アルタイムの交通情報や運転支援情報を配信する ETC2.0

a) a-fujita@ist.osaka-u.ac.jp

b) ta-umedu@biwako.shiga-u.ac.jp

c) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp

d) higashino@ist.osaka-u.ac.jp

e) skaneda@spacetime-eng.com

f) takai@ist.osaka-u.ac.jp

(ITS スポット) [1] や DSSS (安全運転支援システム) [2] 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時に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提供されており、今後は経路情報を活用したサービスの展開が予定されている。これらの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ことが課題となっている。また、このような路車協調によるシステムに加え、携帯電話網の通信速度の向上やスマートフォンの爆発的な普及を背景とした携帯電話網を利用する情報配信サービスが開始されている。特に、プローブカーとよばれる車両が自車の位置や速度の情報を交通情報の処理サーバに送信し、サーバ側では送信された情報を解析することによりリアルタイムの交通情報を車両に配信するサービス (本田技研工業株式会社のインターナビ [3] など) や車載カメラで撮影した動画をサーバにアップロードしユーザ間で共有するサービス (パイオニア株式会社の cybernavi [4]) が実用化されている。しかし、GPS 精度や普及率に課題を残しており、現状では車線レベルで車両や車列の存在を正確に把握するには至っていない。

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。たとえば、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現在地情報を定期的に DSRC でブロードキャスト送信することで、周辺車両の存在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、車載レーダやカメラなどの自律安全走行の支援を目的とした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により自車の周囲に存在する車両を直接検出することが可能になってきている [5], [6]。

このような現状をふまえ、本論文では全方位レーダ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を正確に把握するための手法を提案する。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 [7]、それらの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比率で存在する環境を想定し、GPS で測位した自車の現在地情報と車両検出デバイスの検出結果から算出した車両の相対位置情報を車車間通信を利用して搭載車両間で共有する。各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

去の位置情報より生成する予測位置は時間経過にともな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、車両位置を高精度に推定することにより周辺把握を行う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がとれた車両分布を求める必要がある。このとき、測位精度によっては誤って車両を認識するなどの悪影響が考えられるが、本手法では異なる時刻に異なる車両が取得した位置情報を利用し、時間経過にともなう車両の移動などによる誤差を考慮したうえで推定誤差を算出する。そして推定誤差に基づく加重平均により現在地を求めることで、測位精度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を想定した研究は調査した限りでは存在しないため、この点が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 [8] を用いたシミュレーション実験により提案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、搭載車両の存在比率を変化させて評価をした結果、存在比率が 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% を位置誤差が 2.0m 以下となる精度で把握でき、また、存在比率が 50% を超えた場合では約 90% の車両を同じく位置誤差 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 を用いた車両検出および車両位置特定技術

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。地球の周囲に存在する複数の GPS 衛星から送信される信号を受信することで、緯度、経度、高度の 3次元位置情報を測位する [9]。しかし、GPS 測位の精度は信号を受信できる GPS 衛星の数や、マルチパスとよばれる建物などの障害物に反射した信号に影響を受けることが知られている [10]。そのため、走行環境によっては測位した GPS 位置の誤差が大きくなる可能性があり、Drawil ら [11] は都市部の高層建築物間において誤差が 80m を超える場合があることを示している。しかし、一般財団法人日本自動車研究所の発表資料 [12] では、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や隊列走行における車間距離制御では位置精度を誤差 1m 程度に抑制する必要があると指摘されている。したがって、車両位置の精度向上は必須の課題である。

そのため、GPSを補完する技術が多く開発されている。高精度の現在地情報の取得を目的とするシステムや研究の多くは、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で位置を補正するアプローチを採用している。Rezaeiら[13]はD-GPSを用いて測位した位置情報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の適用により統合し補正している。Rife[14]は車載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を用いて測位した位置情報と統合することにより走行車線を推定する手法を提案している。Costa[15]はGPS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辺の街路樹をあげ、これら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。また、Leeら[16]はRFIDをベースに固定ノードの位置情報を利用した走行車線レベルの位置推定手法を提案している。しかし、これらの手法はあくまで自車の位置精度の向上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に関する研究と本論文の位置付け

車両間協調を想定したシステム(協調ITS)で必要とされるネットワーク技術や技術的諸課題についての研究が進んでいる。Bohmら[17]は安全系アプリケーションにおいて車両位置や速度などの基本的な情報を扱う協調認識メッセージ(Cooperative Awareness Message, CAM)を送信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)でデータレートと送信の優先度を設定し、走行環境に応じて動的に制御する方式を提案している。その中で車列の先頭車両にメッセージをブロードキャスト送信する機会を多く与えるよう制御することで、送信遅延を抑制すると同時に効率的な帯域利用が達成できることを示している。また、CAMの送信電力や送信間隔がパケット到達率、遅延時間、および、車両間の干渉に与える影響を、Fallahら[18]はシミュレーションにより、d'Oreyら[19]は実環境においてそれぞれ実験している。di Bernardoら[20]は隊列走行では車両をノードとする動的ネットワークのトポロジが構成されているとして、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、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している。

これらをはじめとした協調ITSに関する研究の多くは安全走行支援を目的とするアプリケーションを前提とし、通信遅延やパケットロスなどを主な評価指標としている。一方、Joererら[21]はそれらの評価指標に加えて車両の走行環境に依存する評価指標の必要性について言及している。その中で交差点の周辺における評価指標として衝突確率をあげ、相対位置やCAMの送信間隔をパラメータとする衝

突確率の推定手法を示している。

また、協調ITSにおける周辺把握を目的とした研究として、Ansariら[22]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、あらかじめ定めた領域の単位で周囲車両の相対位置を管理する手法を提案している。提案手法ではリアルタイムの車両情報を管理するデータセンタを想定し、通信可能な周囲車両が存在しない場合はデータセンタより相対位置情報を取得できるよう工夫している。Zardoshtら[23]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、特定の車両を車両間協調によりトラッキングするアプローチを示し、シミュレーション実験によりその有効性や課題を述べている。この方法では交差点周辺の見通し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、他車両が検出した対象車両の位置情報を利用することにより間接的にトラッキングを継続できるが、位置誤差を考慮していないため車両の誤認識が発生する可能性がある。また、Aminiら[24]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車間通信環境において適用する場合の問題点を指摘している。これらの手法は車両の周辺把握に利用できる可能性はあるが、本論文で想定する車載器の非搭載車両が存在する環境における適用は困難である。

以上のような協調ITSの枠組みにおいて、本論文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の車両を検出し、車両間の協調により位置情報などを共有することで、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している。

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)[25]、その下位層としてIEEE802.11p[26]がそれぞれ規格化されている。また、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いる。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[27]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[28]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 [29] の実証実験などで利用されている。表 1 に示す各情報を含めることができ、100 ミリ秒ごと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、本論文においても WAVE/IEEE802.11p を想定した設計を行っている。

3.2 車両モデル

4 章で述べる提案手法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, ここにあ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, 各車載器は 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 の仕様に従い 48 ビットの固有の MAC アドレスを保持し, このアドレスを車両を識別するための車両 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**, 車両 i が把握している車両の推定位置や速度などの情報を車両 i が保持する **推定情報** とそれぞれよぶ。

以下, 搭載車両の動作について述べる。搭載車両は T_g ごとに GPS を用いて自車の現在地情報を取得する。GPS を用いて取得した位置を **GPS 位置** とよび, 取得間隔 T_g は 1 秒 (10 タイムスロット) とする。また, T_s ごとに速度計を用いて自車の速度情報を取得し, 同時に車両検出デバイス (ミリ波レーダ) を用いて周囲の見通し車両の相対角度や距離を測定する。取得間隔 T_s 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とするが, 障害物に遮られる場所に位置する車両などの直接見通すことのできない車両は検出できないものとする。また, 検出対象を四輪車両に限定し, 二輪車両や人, 道路上の障害物などは考慮しない。

搭載車両 i が車両検出デバイスを用いて検出した車両を車両 i の観測車両とよび, 観測車両の相対角度や距離の情報から自車の位置を基準とする観測車両の相対位置を算出し, さらに以前に算出した相対位置を用いて観測車両の速度を求める。観測車両の相対位置や速度などの情報は **観測情報** とよぶ。なお, 検出した車両の車両 ID は分からないため, 搭載車両が独自に車両 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

表 1 Basic Safety Message のフォーマット

Table 1 Basic Safety Message format.

Part 1	車両の基本情報 (位置, 速度, 大きさ, 重量など)
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り定義された情報

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 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 や σ_v^2 と比べて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 および T_s の値を 1 秒, 100 ミリ秒とそれぞれ定めているが, 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 ごとに現時刻において自車が保持する観測情報と推定情報を Basic Safety Message の Part 3 に含めブロードキャスト送信する。送信間隔 T_s は 100 ミリ秒とし搭載車両間でメッセージの同期は行わない。これによりメッセージの衝突が発生するが, GPS 位置の取得までにメッセージを数回受信できれば推定位置の算出が行えるよう手法を設計するため, メッセージの衝突は許容し T_s を規格に準拠する 100 ミリ秒に定めている。

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で検出した車両の相対位置に基づき, 自車と観測車両の位置を推定する。車両 i の GPS 位置と観測車両の相対位置の組合せから生成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生成では自車の観測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, 車両検出デバイスを用いた検出では車両 ID が分からないことから, 車両 j の観測車両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。マッチングの方式については 4.4 節で述べる。

また, 現時刻の GPS 位置と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生成に利用する。このとき推定誤差をあわせて求め, 推定誤差の逆数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

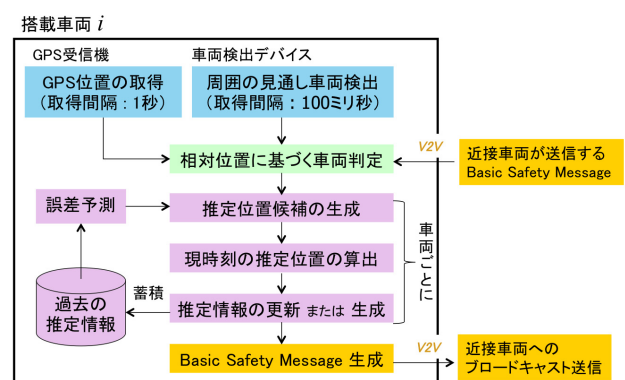


図 1 提案手法の構成

Fig. 1 Overview of the proposed method.

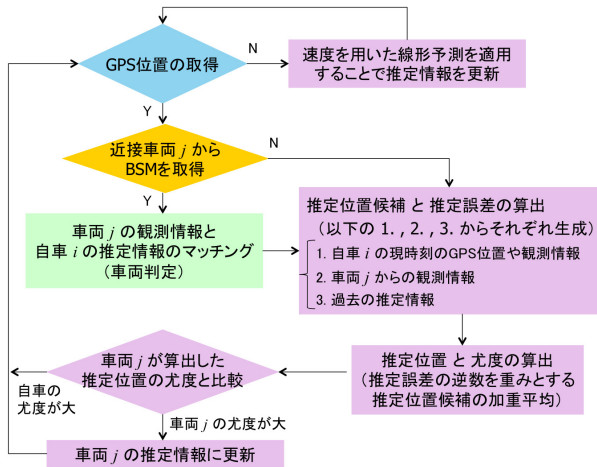


図 2 搭載車両 i における車両位置の推定

Fig. 2 Estimating vehicle's position in vehicle i .

の誤差が平均 0 の正規分布に従うことを想定しており、中心極限定理の前提条件を充足するためである。推定位置の算出においてこの定理を適用することにより位置精度の向上を実現する。この妥当性については 4.5 節で議論する。ただし、時間経過にともなう信頼度の劣化により、過去の推定情報から生成した推定位置候補は大きな誤差を含む可能性が高い。このため、推定位置候補ごとに経過時間に応じた推定誤差を定める。

このようにして求めた車両ごと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。このとき、ある車両についての推定情報を自車と近接車両が保持しており、かつ、近接車両が推定した推定位置の尤度の方が大きい場合には、近接車両の推定情報に更新する。このようにして近接車両間で最も高精度に推定された推定位置を保持できるようにする。

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 ごとに測位、また観測車両の相対位置と速度を T_z ごとに算出し、観測車両ごとに観測情報 $O_i(a)$ を生成する (式 (1))。

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

なお、“ a ” は車両 i が付与した観測車両の車両 ID とし、 t が $O_i(a)$ の生成時刻、 \mathbf{p}_i が i の推定位置、 \mathbf{r}_a が a の相対位置、 \mathbf{v}_a が a の速度をそれぞれ表す。

また、搭載車両 i は図 2 に基づき推定位置や尤度を含む推定情報 $E(a)$ を生成する (式 (2))。

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

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

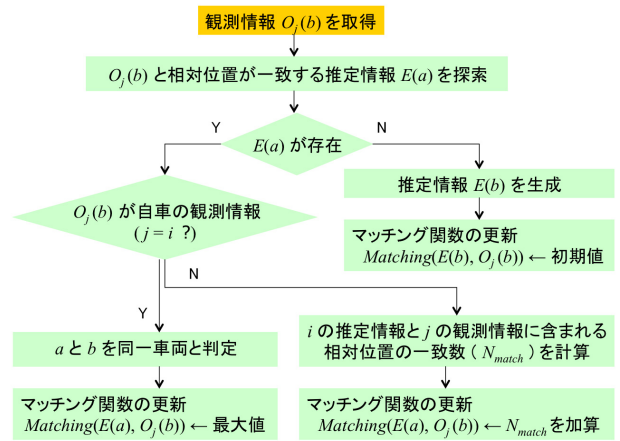


図 3 相対位置に基づく車両判定

Fig. 3 Vehicle identification based on relative positions.

4.3 車車間通信メッセージの処理

3.2 節で述べたように、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 v に関する情報を $M(v)$ で表す。 $M(v)$ は推定情報 $E(v)$ と車両 v に一致する観測情報 $O_i(a)$ (ID “ a ” は車両 i によって付与された車両 v の車両 ID) の組とする (式 (3))。

$$M(v) = (E(v), O_i(a)) \tag{3}$$

車両 i が搭載車両 j から Basic Safety Message を受信したとき、車両 u に関する情報： $M(u) = (E(u), O_j(b))$ から観測情報 $O_j(b)$ を取り出し、これと一致する推定情報 $E(v)$ を探索する。 $E(v)$ が存在し、かつ、 $E(u)$ に含まれる尤度 \tilde{p}_u が $E(v)$ に含まれる尤度 \tilde{p}_v よりも大きいとき、 $E(u)$ を $E(v)$ に更新する。

4.4 相対位置に基づく車両判定

車両検出デバイスによる検出では観測車両の車両 ID が分からないため、相対位置を用いた車両判定を行う。また、より多くの観測情報を推定に利用するために、車両 i の推定情報 $E(a)$ と車両 j が車両 i とは異なる車両 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 の車両 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。関数 $Matching$ は車両 i が $O_j(b)$ ($j \neq i$) を取得し、かつ、 $E(a)$ が存在する場合に車両 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 $Matching(E(a), O_j(b))$ に加算することで更新する。

$E(a)$ を更新する場合には式 (4) を満たす $O_j(b)$ を利用する。

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

図 4 (推定情報、観測情報をそれぞれトポロジで

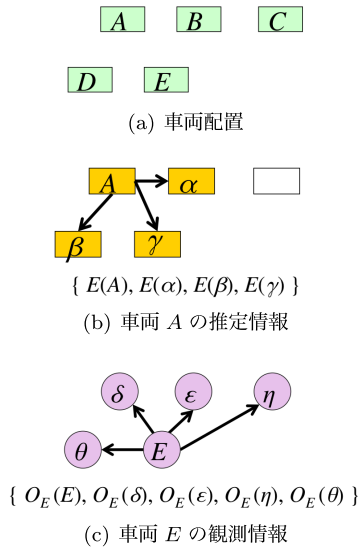


図 4 関数 Matching の更新例
Fig. 4 Updating a function Matching.

車両 a の推定位置 \mathbf{p}_a は以前の推定位置 \mathbf{p}'_a から速度 \mathbf{v}_a を用いた線形予測を適用することで更新する. この場合, \mathbf{p}_a の尤度 \tilde{p}_a は前のタイムスロットで求めた尤度 \tilde{p}'_a と現在のタイムスロットの速度誤差 σ_v^2 を用いて更新する (式 (5)).

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

• GPS 位置を取得した場合

車両 a の推定位置 \mathbf{p}_a を更新するために, まず 4.4 節で述べたマッチング方式により推定情報 $E(a)$ と一致すると判定した観測情報に含まれる GPS 位置や相対位置から推定位置候補 $\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_n$ を生成し, 各 \mathbf{q}_l ($l = 1, \dots, n$) について推定誤差 \tilde{q}_l を算出する.

現時刻のタイムスロット t に対し, k タイムスロット前に測位された車両 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を適用することで \mathbf{q}_l を生成する. このとき, GPS 位置誤差 σ_g^2 と k タイムスロット間で蓄積された速度誤差 σ_v^2 を考慮し \tilde{q}_l を定める (式 (6)).

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

一方, 現時刻のタイムスロット t に対し, k' タイムスロット前に搭載車両 b によって観測された車両 a の相対位置 r_a からは k タイムスロット前 ($k > k'$) に測位された車両 b の GPS 位置, $[t - k, t - k']$ 間に観測された車両 b 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をそれぞれ適用することで \mathbf{q}_l を生成する. このとき, GPS 位置誤差 σ_g^2 と k タイムスロット間で蓄積された速度誤差 σ_v^2 , および, 相対位置誤差 σ_r^2 を考慮し \tilde{q}_l を定める (式 (7)).

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

この方針に基づく車両 a の推定位置候補の生成例を図 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 a と b が動くとき, GPS 位置より生成する推定位置候補は t_4 で測位した GPS 位置から直接生成した \mathbf{q}_1 と t_1 で測位した GPS 位置を t_1 から t_4 までの車両 a の速度を用いた線形予測を適用することにより生成した \mathbf{q}_2 の 2 つである (図 6(b)). また, 相対位置より生成する推定位置候補は t_3 における車両 b の推定位置と相対位置より算出した t_3 における車両 a の推定位置から t_3 から t_4 までの車両 a の速度を用いた線形予測を適用することにより生成した \mathbf{q}_3 である (図 6(c)).

以上のような方針により生成する推定位置候補 \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 a の新しい推定位置 \mathbf{p}_a を算出する (式 (8)).

表現している) を例に, 関数 Matching の更新の過程を説明する. 車両 E の観測情報 $O_E(E)$ が車両 A の推定情報 $E(\gamma)$ と相対位置が一致し, $\{O_E(\delta), E(A)\}$, $\{O_E(\epsilon), E(\alpha)\}$, $\{O_E(\theta), E(\beta)\}$ の相対位置がそれぞれ一致するため ($N_{match} = 3$), $Matching(E(\gamma), O_E(E))$ に 3 を加算する. 同様に, $O_E(E)$ が車両 A の推定情報 $E(\alpha)$ に一致し, $\{O_E(\theta), E(A)\}$ の相対位置が一致するため ($N_{match} = 1$), $Matching(E(\gamma), O_E(E))$ に 1 を加算する. 一致する推定情報がない場合は推定情報 $E(b)$ を新たに生成し, $Matching(E(b), O_j(b))$ に初期値を設定する.

4.5 推定位置と尤度の更新

推定位置と尤度の更新は図 5 に示すように搭載車両 i が GPS 位置を取得したか否かに応じて, 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

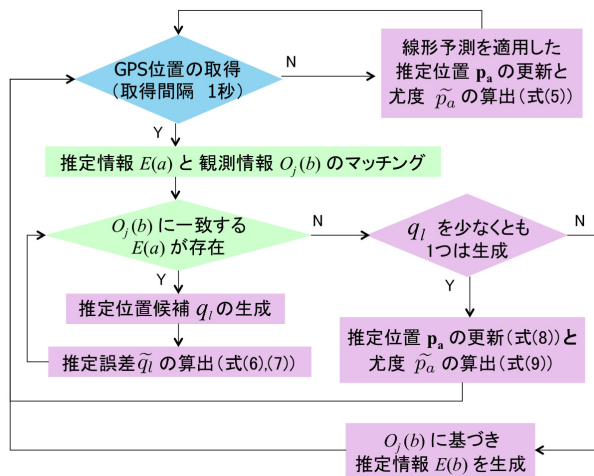


図 5 推定位置の算出過程
Fig. 5 Calculating of an estimated position.

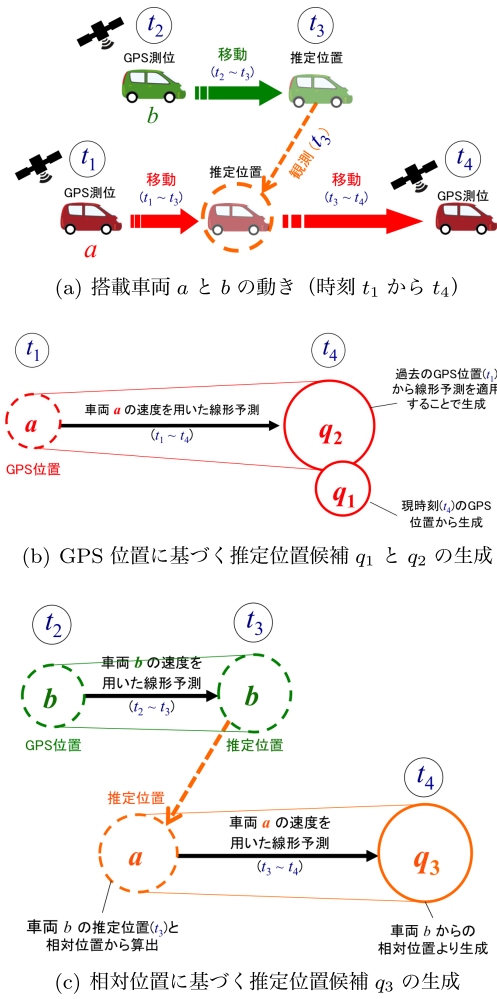


図 6 推定位置候補の生成例
Fig. 6 Generating of position candidates.

また、 \mathbf{p}_a の尤度 \tilde{p}_a は \mathbf{p}_i が平均 0、分散 $n/(\sum_{i=1}^n (1/\tilde{q}_i))^2$ の正規分布に従い、中心極限定理の前提条件を充足することから式 (9) のように定める。

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

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

以下では、推定位置候補が情報源において互いに独立であり、かつ、推定誤差が平均 0 の正規分布に従うとき、それらの加重平均で算出する推定位置 \mathbf{p}_a の誤差も平均 0 の正規分布に従い、その標準偏差は式 (9) の分母となることを示す。

ロボット分野やセンサネットワーク分野では、位置誤差の解析のために中心極限定理が利用されていることから [30], [31], 提案手法においてもこの定理を適用することにより位置精度の向上を実現する。中心極限定理は平均 μ ,

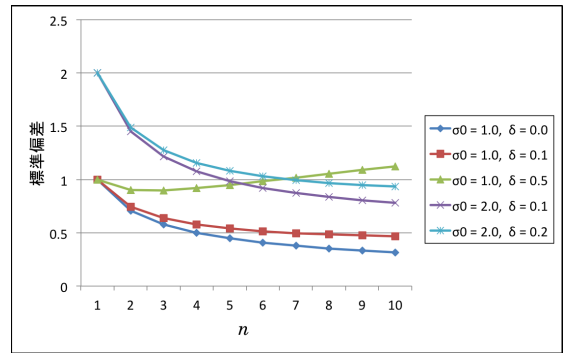


図 7 定理 1 の解析 (\bar{X} の標準偏差)
Fig. 7 Analysis of Theorem 1 (standard deviation of \bar{X}).

分散 σ_0^2 のある同一の分布から無作為に抽出された独立確率変数の列 X_1, X_2, \dots, X_n において抽出数 n が十分に大きいとき、それらの確率変数の平均 \bar{X} は近似的に平均 μ 、分散 $(\sigma/n)^2$ の正規分布に従うことを表す。特に、各確率変数が正規分布に従うとき、有限の n において中心極限定理の条件を充足する。たとえば、確率変数が平均 0、分散 1 の正規分布に従うとき、 \bar{X} の標準偏差は $n = 10$ において約 0.32 となる。この性質をふまえ、複数の推定位置候補の平均を推定位置 \mathbf{p}_a に、また標準偏差の逆数を尤度 \tilde{p}_a にそれぞれすることで、各推定位置候補よりも高精度の推定位置を得ることができる。

中心極限定理を適用するためには、各確率変数が互いに独立であり、かつ、同一の分布に従う必要があるが、推定位置候補は異なる車両が異なる時刻に測定した情報源から生成されるため、それらの従う分布は必ずしも同一の分布になるとは限らない。そこで、異なる分布から抽出された確率変数に対してもある条件を満たすことで中心極限定理の前提条件が充足可能であることを示す。

定理 1. 平均 μ 、分散 σ_i^2 の正規分布からそれぞれ抽出した独立確率変数の列 X_1, X_2, \dots, X_n に対し (ただし μ はすべての i ($1 \leq i \leq n$) で共通とする)、それらの確率変数の平均 \bar{X} は有限の n において平均 μ 、式 (10) で定義する分散 σ^2 の正規分布に従う。

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}{n^2} \quad (10)$$

定理 1 は確率変数が互いに独立であり、同じ平均 μ と異なる分散 σ_i^2 の正規分布から抽出された場合において、中心極限定理が適用可能であることを意味している (証明は付録 A.1 に掲載する)。提案手法では各情報源の誤差が平均 0 の正規分布に従うことを想定しているため適用可能である。

図 7 に互いに独立な確率変数 X_i ($1 \leq i \leq n$) が平均 μ 、標準偏差 $\sigma_0 + \delta \times (i - 1)$ (δ はある正数) に従う場合における n 個の確率変数の平均 \bar{X} の標準偏差を示す。 $\sigma_0 = 1.0$, $\delta = 0.5$ の場合、 $n > 7$ において \bar{X} の標準偏差は 1.0 以上となり、 X_1 の標準偏差 1.0 よりも大きくなっている。こ

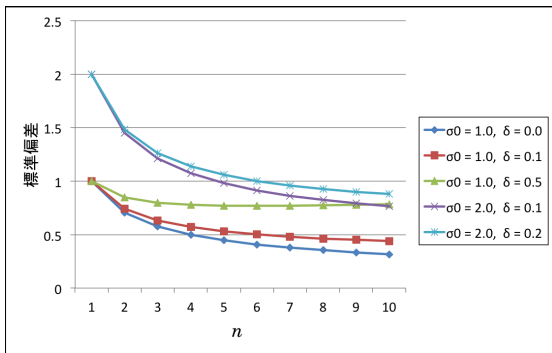


図 8 定理 2 の解析 (\bar{X} の標準偏差)

Fig. 8 Analysis of Theorem 2 (standard deviation of \bar{X}).

のことは大きな推定誤差を持つ推定位置候補 \mathbf{q}_l が存在する場合、推定位置 \mathbf{p}_a の推定誤差が \mathbf{q}_l の推定誤差よりも大きくなる可能性があることを意味する。

そこで、 \bar{X} を相加平均として求める代わりに、 \tilde{q}_i の逆数を重みとする加重平均として求めるようにする。定理 2 において、加重平均として求める場合でも \bar{X} は正規分布に従い中心極限定理が適用可能であることを示す。なお、証明は付録 A.2 に掲載する。

定理 2. 平均 μ 、分散 σ_i^2 の正規分布からそれぞれ抽出した独立確率変数の列 X_1, X_2, \dots, X_n に対し (ただし μ はすべての i ($1 \leq i \leq n$) で共通とする)、各確率変数 X_i に重みを $1/\sigma_i$ として与えた場合の加重平均 \bar{X} (式 (11)) は有限の n において平均 μ 、式 (12) で定義する分散 σ^2 の正規分布に従う。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i / \sigma_i)}{\sum_{i=1}^n (1 / \sigma_i)} \quad (11)$$

$$\sigma^2 = \frac{n}{\left(\sum_{i=1}^n (1 / \sigma_i)\right)^2} \quad (12)$$

図 8 に互いに独立な確率変数 X_i ($1 \leq i \leq n$) が平均 μ 、標準偏差 $\sigma_0 + \delta \times (i - 1)$ (δ はある正数) に従う場合における標準偏差の逆数を重みとする n 個の確率変数の加重平均 \bar{X} の標準偏差を示す。どのパラメータにおいても n が大きいほど \bar{X} の標準偏差は小さくなっている。したがって、提案手法では推定位置候補 \mathbf{q}_l の加重平均により推定位置 \mathbf{p}_a を算出することで位置精度の向上を実現している。

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 点を評価の目的とするシミュレーション実験を行った。

- 非搭載車両の存在比率による影響
 - サービス開始当初でもある程度の周辺把握を達成でき、また、車載器の普及にともない十分な周辺把握を達成できることを示すため

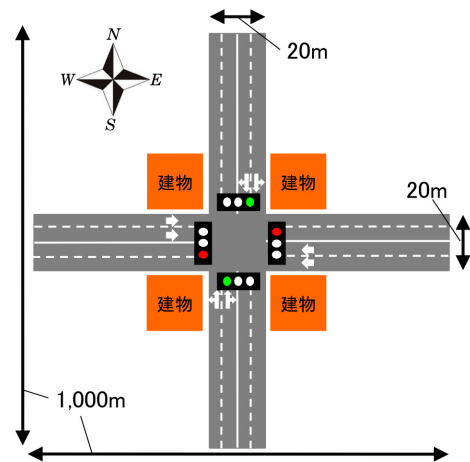


図 9 シミュレーションマップ

Fig. 9 Simulation map.

表 2 車載器モデルのパラメータ設定

Table 2 Settings of on-board sensors.

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

- 車両位置精度と直接検出できない非搭載車両を含めた周辺把握
 - 既存の周辺把握手法と比較した場合の提案手法の特色であるため
- 見通しの悪い交差点の周辺環境における合理的な性能の達成
 - 米国の国家道路交通安全局のレポート [32] で上記の環境が安全運転支援を目的とする ITS アプリケーションの評価シナリオとしてあげられているため

5.2 シミュレーション設定

図 9 に示す車幅 5m、長さ 1000m の片側 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した。ここでは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 9 のシミュレーションマップ上を走行する車両のモビリティデータをマイクロ交通流シミュレータ VISSIM [33] 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マイクロな挙動を再現できるシミュレータであり、このシミュレータを用いて車両密度が 0.05 台/m となるモビリティデータを生成した。

車載器モデルは表 2 に示すパラメータ設定とした。ミリ

表 3 通信プロトコル設定

Table 3 Settings of communication protocol.

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 [36]
メッセージセット	SAE J2735 Basic Safety Message

表 4 通信パラメータ設定

Table 4 Settings of communication parameters.

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

波レーダなどの車両検出デバイスは近年、高性能化が進んでいる。稲葉ら [34] は車載用ミリ波レーダの基本原理や性能をあげたうえで普及のための課題を述べている。また、Heath Jr. [35] はミリ波レーダの車車間通信や路車間通信への応用可能性について議論している。シミュレーション実験ではこれらの文献で述べられているミリ波レーダの特性に基づき最大検出距離を 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 を用いて行った。表 3 および表 4 に通信プロトコルとパラメータの各設定を示す。非搭載車両の存在比率による影響を評価目的とするため、搭載車両の存在比率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各搭載車両の推定情報に含まれる各車両の推定位置誤差（実際の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 周辺把握の時間推移

時間経過とともに周辺車両の把握状況の変化について述べる。図 10 および図 11 にシミュレーションの開始直後と 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 で生成したモビリティデータの位置（実車両位置）に対応する。本評価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位置を図中で黄色矩形（推定車両）として表現している。なお、装備率は 50% である。

シミュレーションの開始直後においては推定車両は赤色矩形の近傍に偏っていることが分かる。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把握が十分にできてい

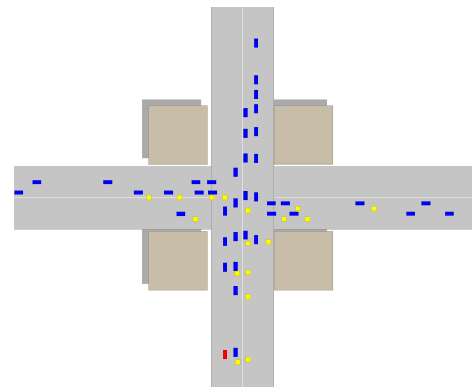


図 10 赤色矩形車両の周辺把握（シミュレーション開始直後）
Fig. 10 Situation awareness of a red vehicle (at the start of the simulation).

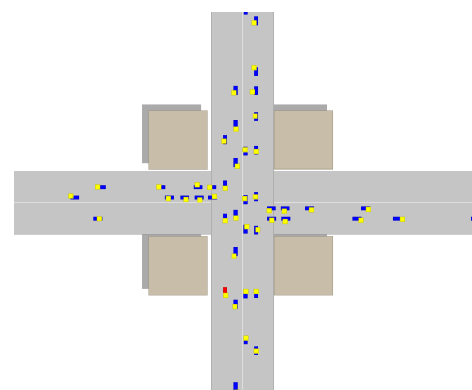


図 11 赤色矩形車両の周辺把握（3 秒経過時）
Fig. 11 Situation awareness of a red vehicle (3 seconds elapsed).

ない。また、実車両位置と推定位置のずれが明らかであり位置誤差が大きいことが分かる。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 の誤差と比べて小さいが、赤色矩形の車両の位置誤差が大きいことによる影響である。

一方、3 秒経過時には、交差点周辺に存在する多数の車両を認識している。このことは近接車両の観測情報や推定情報を推定に利用することで、自車の車両検出デバイスだけでは直接観測できない車両を認識できたことを表す。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、開始直後と比べて推定車両の位置精度が向上している。

5.3.2 周辺把握性能

本評価では、評価指標として認識率 $R(d,r)$ を用いる。図 9 のシミュレーションマップ内に存在する自車の現在地周辺の半径 r m 以内の領域に存在する車両を周辺把握の対象とし、その円領域に含まれるすべての車両に対して誤差 d 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車両比率の平均値を $R(d,r)$ と定義する。

図 12 および図 13 は、シミュレーションの開始直後を 0 秒とした認識率 $R(d,300)$ 、 $R(d,500)$ の時間経過とも

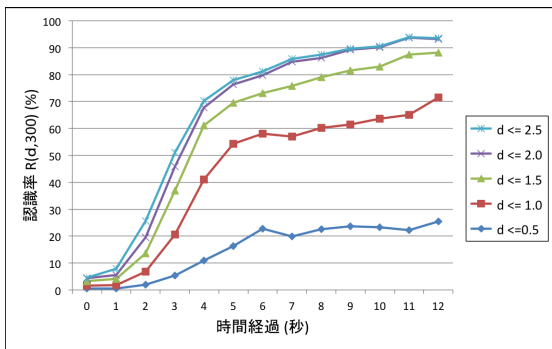


図 12 認識率 $R(d, 300)$ の時間経過にともなう推移 (装備率 50%)
 Fig. 12 Transition of $R(d, 300)$ (The penetration rate is 50%).

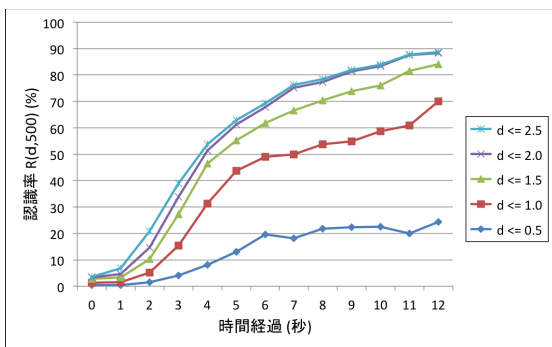


図 13 認識率 $R(d, 500)$ の時間経過にともなう推移 (装備率 50%)
 Fig. 13 Transition of $R(d, 500)$ (The penetration rate is 50%).

なう推移をそれぞれ表している。なお、装備率は50%である。時間経過にともない認識率が向上し、同時に、より高精度な位置で認識できたことが分かる。特に、自車の現在地周辺300m以内を対象とした場合(図12)、4秒経過時点において周辺車両の約67%を位置誤差2.0m以下となる精度で、その後、約93%の車両を位置誤差2.0m以下となる精度で認識している。同様に、自車の現在地周辺500m以内を対象とした場合(図13)、4秒経過時点において周辺車両の約50%を位置誤差2.0m以下となる精度で、その後、約88%の車両を位置誤差2.0m以下となる精度で認識している。図12と図13を比較すると、 $R(d, 500)$ は $R(d, 300)$ と比べて若干悪化しているが、これはパケットロスの発生により近接車両から送られる観測情報や推定情報を完全に取得できず、パケットロスが発生しない環境と比べて生成する推定位置候補の数が減少するためである。

次に、装備率を10%から100%に10%刻みで変化させて、装備率が周辺把握に与える影響を評価した。図14は12秒経過後の認識率 $R(d, 500)$ を表す。装備率が高くなるにつれ、より高い割合の周辺把握を達成し、同時に高精度に位置を推定できている。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以下となる精度で認識していることから、車載器の普及段階において提案手法は有効であるといえる。

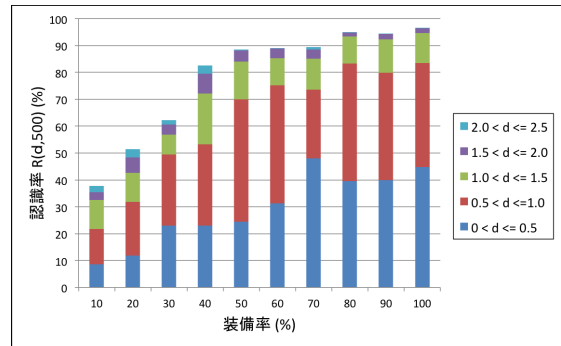


図 14 装備率が認識率 $R(d, 500)$ に与える影響 (12秒経過時)
 Fig. 14 Impact of the penetration rate on $R(d, 500)$ (12 seconds elapsed).

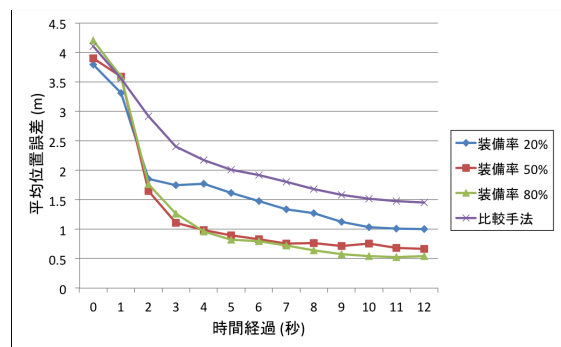


図 15 平均位置誤差の時間経過にともなう推移
 Fig. 15 Transition of average position errors.

表 5 平均位置誤差の改善率 (12秒経過時)
 Table 5 Improvement of average position errors (12 seconds elapsed).

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

5.3.3 推定位置の精度向上

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位したGPS位置や地図情報を用いて補正した位置情報を利用している。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、車両で自律的に取得可能な情報のみを利用して位置を補正する手法を本評価での比較手法とする。

まず、時間経過にともなう推定車両の平均位置誤差の推移を調べた(図15)。装備率を20%(低)、50%(中)、80%(高)としてそれぞれ評価を行ったが、表5に示す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ているが、これは装備率が高いほど近接車両の数が多くなるため、その分、多くの推定位置候補を推定に利用できるためである。一方、時間経過にともない平均位置誤差が収束する傾向にあることが分かる。これは誤差の蓄積により過去に生成した推定位置

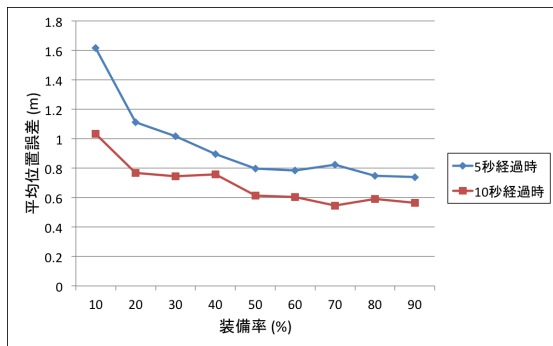


図 16 装備率が平均位置誤差に与える影響

Fig. 16 Impact of the penetration rate on position errors.

候補の推定誤差が大きくなっており、そのような推定位置候補は位置精度の向上に寄与しなくなったためである。

最後に、装備率を 10% から 100% に 10% 刻みで変化させて装備率が平均位置誤差に与える影響を評価した。図 16 は 12 秒経過時の平均位置誤差を表している。装備率が高くなるにつれ平均位置誤差が小さくなる傾向にあるが、これは図 15 の場合と同様で推定に利用する推定位置候補の数の違いによる影響であり、装備率の向上にともない推定位置候補数が増加するためである。一方、装備率が 50% を超えると顕著な違いが見られないことも分かる。

6. まとめ

本論文では、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利用し、車両間協調により周辺車両の存在把握を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の比率で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 位置や相対位置を用いて推定位置の候補と推定誤差を算出する。そして、その推定誤差の逆数を重みとする加重平均により車両の現在地を推定し、推定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推定結果を保持することにより、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検出できない車両も含めた正確な周辺把握を実現する。見通しの悪い交差点の周辺を対象としたシミュレーション実験により、車載器の装備率が 30% 程度であっても、自車周辺の半径 500 m 以内に位置する車両の約 60% を一般的な道路の車線幅員以下となる位置誤差 2.0 m 以下に抑制して把握できることを確認し、提案手法は車載器の普及段階において有効となることを示した。

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と考えている。本論文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、GPS の実測値をモデルに組み込むことを検討している。また、提案手法では車両検出デバイスによる検出はすべて四輪車両とするモデルにしているが、実際には四輪車両と異なる動きをする二

輪車両や歩行者、道路上の障害物などが存在するため、それらの識別や挙動予測を行い、より実環境に即した周辺把握を実現できるように改善していくことを検討したい。

参考文献

- [1] 国土交通省：ETC2.0 - ETC 総合情報ポータルサイト, 入手先 <https://www.go-etc.jp/etc2/etc2/service.html> (参照 2015/08/21).
- [2] 一般財団法人道路交通情報通信システムセンター：安全運転システム (DSSS), 入手先 <http://www.vics.or.jp/service/dsss.html> (参照 2015/08/21).
- [3] 本田技研工業株式会社：インターナビ・リンク, 入手先 <http://www.honda.co.jp/internavi> (参照 2015/08/21).
- [4] バイオニア株式会社：サイバーナビ, 入手先 <http://pioneer.jp/carrozzeria/carnavi/cybernavi> (参照 2015/08/21).
- [5] Burlet, 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).
- [6] Sivaraman, S. and Trivedi, M.: Vehicle Detection by Independent Parts for Urban Driver Assistance, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.14, No.4, pp.1597-1608 (2013).
- [7] 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, 首相官邸 (オンライン), 入手先 <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20150630/siryou7.pdf> (参照 2015/08/21).
- [8] Space-Time Engineering: Scenargie, available from <http://www.spacetime-eng.com/en/products.html> (accessed 2015/08/21).
- [9] Faouzi, N.E., Leung, H. and Kurian, A.: Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges-A survey, *Information Fusion*, Vol.12, No.1, pp.4-10 (2011).
- [10] Meguro, J., Murata, T., Takiguchi, J., Amano, Y. and Hashizume, T.: GPS multipath mitigation for urban area using omnidirectional infrared camera, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.10, No.1, pp.22-30 (2009).
- [11] Drawil, N.M., Amar, H.M. and Basir, O.A.: GPS localization accuracy classification: A context-based approach, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.14, No.1, pp.262-273 (2013).
- [12] 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).
- [13] Rezaei, S. and Sengupta, R.: Kalman Filter-Based Integration of DGPS and Vehicle Sensors for Localization, *IEEE Trans. Control Systems Technology*, Vol.15, No.6, pp.1080-1088 (2007).
- [14] Rife, J.: Collaborative Vision-Integrated Pseudorange Error Removal: Team-Estimated Differential GNSS Corrections with no Stationary Reference Receiver, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.13, No.1, pp.15-24 (2012).
- [15] Costa, E.: Simulation of the Effects of Different Urban Environments on GPS Performance Using Digital Elevation Models and Building Databases, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.12, No.3, pp.819-829 (2011).
- [16] Lee, E.K., Yang, S., Oh, S. and Gerla, M.: RF-GPS:

- RFID assisted localization in VANETs, *Proc. IEEE 6th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS 2009)*, pp.621–626 (2009).
- [17] 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).
- [18] Fallah, Y., Huang, C., Sengupta, R. and Krishnan, H.: Analysis of Information Dissemination in Vehicular Ad-Hoc Networks With Application to Cooperative Vehicle Safety Systems, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.60, No.1, pp.233–247 (2011).
- [19] d'Orey, P.M. and Boban, M.: Empirical Evaluation of Cooperative Awareness in Vehicular Communications, *Proc. IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2014)*, pp.1–5 (2014).
- [20] 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 Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.16, No.1, pp.102–112 (2015).
- [21] Joerer, S., Segata, M., Bloessl, B., Lo Cigno, R., Sommer, C. and Dressler, F.: A Vehicular Networking Perspective on Estimating Vehicle Collision Probability at Intersections, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.63, No.4, pp.1802–1812 (2014).
- [22] 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).
- [23] Zardosht, B., Beauchemin, S. and Bauer, M.: An in-vehicle tracking method using vehicular ad-hoc networks with a vision-based system, *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2014)*, pp.3022–3029 (2014).
- [24] Amini, A., Vaghefi, R., de la 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).
- [25] 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).
- [26] 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).
- [27] Uzcategui, R. and Acosta-Marum, G.: Wave: A tutorial, *IEEE Communications Magazine*, Vol.47, No.5, pp.126–133 (2009).
- [28] Kenney, J.: Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States, *Proc. IEEE*, Vol.99, No.7, pp.1162–1182 (2011).
- [29] 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).
- [30] Liu, Z., Shi, Z., Zhao, M. and Xu, W.: Adaptive Dynamic Clustered Particle Filtering for Mobile Robots Global Localization, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol.53, No.1, pp.57–85 (2008).
- [31] Yuen, W.H. and Schulzrinne, H.: Localization for Intermittently Connected Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE 5th International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops 2007)*, pp.86–96 (2007).
- [32] 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).
- [33] 構造計画研究所: 交通シミュレーション PTV Vision, 入手先 (http://www4.kke.co.jp/ptv-vision/vissim_top.html) (参照 2015/08/21).
- [34] 稲葉敬之, 桐本哲郎: 車載用ミリ波レーダ, 自動車技術, Vol.64, No.2, pp.74–79 (2010).
- [35] Heath Jr, R.K.: Vehicular Millimeter Wave Communications: Opportunities and Challenges, *D-STOP Symposium: Pathways to a Connected/Autonomous Transportation World* (2015).
- [36] 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).

付 録

A.1 定理 1 の証明

Proof. 積率母関数を用いて証明する. 確率変数 X_i ($1 \leq i \leq n$) の確率密度関数と積率母関数をそれぞれ $f(X_i)$, $M_{X_i}(\theta)$ と表す. X_i が平均 μ , 分散 σ_i^2 の正規分布に従うとき, $M_{X_i}(\theta)$ は式 (A.1) で定義される.

$$M_{X_i}(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\theta X_i) f(X_i) dX_i = \exp\left(\mu\theta + \frac{1}{2}\sigma_i^2\theta^2\right) \quad (\text{A.1})$$

また, n 個の確率変数の平均 \bar{X} の積率母関数を $M_{\bar{X}}(\theta)$ として表すと式 (A.2) で定義される.

$$\begin{aligned} M_{\bar{X}}(\theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\theta \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}\right) \\ &\quad f(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1 dX_2 \dots dX_n \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \prod_{i=1}^n \exp\left(\frac{\theta}{n} X_i\right) \right\} \\ &\quad f(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1 dX_2 \dots dX_n \quad (\text{A.2}) \end{aligned}$$

X_i は互いに独立であるため, $M_{\bar{X}}(\theta)$ は式 (A.3) のように展開できる.

$$\begin{aligned} M_{\bar{X}}(\theta) &= \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{\theta}{n} X_i\right) f(X_i) dX_i \\ &= \prod_{i=1}^n M_{X_i}\left(\frac{\theta}{n}\right) \\ &= \exp\left\{\mu\theta + \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}{n^2} \theta^2\right\} \quad (\text{A.3}) \end{aligned}$$

これは平均 μ , 分散 $\sum_{i=1}^n \sigma_i^2/n^2$ の正規分布に従う確率変数の積率母関数を表す。□

A.2 定理 2 の証明

Proof. 定理 1 と同様に積率母関数を用いて証明する。確率変数 X_i ($1 \leq i \leq n$) が平均 μ , 分散 σ_i^2 の正規分布に従うとき, 積率母関数 $M_{X_i}(\theta)$ は式 (A.1) となる ($f(X_i)$ は確率密度関数を表す)。このとき, n 個の確率変数の加重平均 \bar{X} の積率母関数を $M_{\bar{X}}(\theta)$ として表すと式 (A.4) で定義される。

$$\begin{aligned} M_{\bar{X}}'(\theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\theta \frac{\sum_{i=1}^n (X_i/\sigma_i)}{\sum_{i=1}^n (1/\sigma_i)}\right) \\ &\quad f(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1 dX_2 \cdots dX_n \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \prod_{i=1}^n \exp\left(\frac{\theta}{\sum_{i=1}^n (1/\sigma_i)} \left(\frac{X_i}{\sigma_i}\right)\right) \right\} \\ &\quad f(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1 dX_2 \cdots dX_n \quad (\text{A.4}) \end{aligned}$$

X_i は互いに独立であるため, $M_{\bar{X}}'(\theta)$ は式 (A.5) のように展開できる。

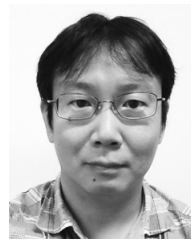
$$\begin{aligned} M_{\bar{X}}'(\theta) &= \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\theta \frac{1/\sigma_i}{\sum_{i=1}^n 1/\sigma_i} X_i\right) f(X_i) dX_i \\ &= \prod_{i=1}^n M_{X_i}\left(\theta \frac{1/\sigma_i}{\sum_{i=1}^n 1/\sigma_i}\right) \\ &= \exp\left\{ \mu\theta + \frac{1}{2} \frac{n}{\left(\sum_{i=1}^n (1/\sigma_i)\right)^2} \theta^2 \right\} \quad (\text{A.5}) \end{aligned}$$

これは平均 μ , 分散 $n/(\sum_{i=1}^n (1/\sigma_i))^2$ の正規分布に従う確率変数の積率母関数を表す。□



藤田 敦 (学生会員)

平成 23 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。平成 27 年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。現在, 同大学院情報科学研究科博士後期課程在学。高度交通システムに関する研究に従事。



梅津 高朗 (正会員)

平成 14 年大阪大学大学院情報科学研究科助手に着任。平成 17 年同研究科より博士号を取得。平成 19 年同助教に配置転換。平成 25 年滋賀大学経済学部情報管理学科准教授に着任, 現在に至る。博士 (情報科学)。情報処理学会高度交通システム研究会幹事等を歴任。通信プロトコルの設計等の無線通信や, 通信やシミュレーション技術を応用した高度交通システムに関する研究に従事。



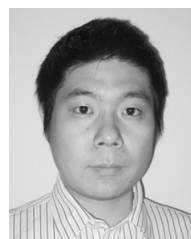
山口 弘純 (正会員)

平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 10 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。平成 11 年同大学院基礎工学研究科助手。平成 19 年より同大学院情報科学研究科准教授。博士 (工学)。モバイルコンピューティングに関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



東野 輝夫 (フェロー)

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 59 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学助手。現在, 同大学大学院情報科学研究科教授。工学博士。分散システム, 通信プロトコル, モバイルコンピューティング等の研究に従事。電子情報通信学会, ACM 各会員。IEEE Senior Member。本会フェロー。



金田 茂 (正会員)

平成 13 年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。平成 15 年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年株式会社 NTT ドコモ入社。平成 26 年大阪大学大学院情報科学研究科博士課程修了。現在, 米国法人スペースタイムエンジニアリング Director of Engineering。博士 (工学)。移动通信システム, 性能評価手法に関する研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。



高井 峰生 (正会員)

平成9年早稲田大学大学院博士後期課程修了。平成19年米国法人スペースタイムエンジニアリング設立。現在、カリフォルニア大学ロサンゼルス校主幹開発研究員ならびに大阪大学大学院情報科学研究科招へい准教授。モバイル通信システムおよびその評価方法についての研究に従事。ACM, IEEE 各会員。