

車車間通信を用いた協調型車両位置推定手法

藤井 彩恵^{†1} 山口 弘純^{†1} 東野 輝夫^{†1}
金田 茂^{†1,†2} 高井 峰生^{†3}

本稿では、複数の車両が保持する GPS 受信機、測域センサおよび車車間通信を利用した、車両の安全走行支援アプリケーションのための協調型位置推定手法を提案する。車載器非搭載車両が混在する環境において、自車両および周辺車両の位置を高精度に推定するために、提案手法では異なる車両が保持する GPS および測域センサの異なる時間の観測結果を推定に利用する。また、中心極限定理に基づき各推定結果の精度を求めることにより、最も高精度な推定結果を車両間で共有する。性能評価により、GPS 単体と比較して平均 90%位置精度を向上できることが示された。

A Cooperative Algorithm to Estimate Vehicle Positions using V2V Communications

SAE FUJII,^{†1} HIROZUMI YAMAGUCHI,^{†1} TERUO HIGASHINO,^{†1}
SHIGERU KANEDA^{†1,†2} and MINEO TAKAI^{†3}

In this paper, we propose a cooperative algorithm to estimate vehicle positions using GPS receivers and onboard sensors of vehicles and V2V communications for vehicle safety applications. Each vehicle uses information obtained by GPS and sensors of different vehicles at different time to estimate positions in the situation all the vehicles can not use GPS and sensors. Also, vehicles share the most accurate estimation according to accuracy of estimation derived by the Central Limit Theorem. From the simulation results, our method could reduce position error by 90% compared with native GPS positions.

^{†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} 株式会社スペースタイムエンジニアリング

Space-Time Engineering Japan, Inc.

^{†3} Computer Science Department, University of California, Los Angeles

1. はじめに

高度交通システム (ITS) 分野において、車両走行の安全性向上の実現は非常に重要な課題であり、アメリカの IntelliDrive、欧州の Car 2 Car Communication Consortium、日本の ASV-4 など世界各国の研究機関やプロジェクトで安全走行支援アプリケーションが研究されている。安全走行支援アプリケーションの多くは GPS によって取得した自車両の現在位置を無線通信によって 100 ミリ秒毎に送信することを想定しているが、これらのアプリケーションには、一般に高精度な位置情報が求められている¹⁾。例えば、衝突警告アプリケーションでは、各車両が GPS やセンサによって測定した現在位置やブレーキの状態などの情報を車車間通信によって共有し、周辺の車両との衝突の可能性を検知した場合に運転手に警告する。時速 100km/h で走行する車両を想定した場合、100 ミリ秒で移動する距離は約 3m であることから、前後の車両との衝突の可能性を適切に判定するためには少なくとも誤差は 3m 以下に抑制される必要がある。また、車載器の普及に至る過程において、多くの車載器非搭載車両が存在するため、運転手の死角に存在する車載器非搭載車両の位置や挙動を把握するためには、他車両の測域センサの観測結果を用いる必要がある。このとき、異なる車両の測域センサの観測結果から周辺車両との位置関係を正確に認識するためには、各車両の絶対位置誤差をなるべく小さくすることが望ましい。しかし、都市環境において GPS によって取得した位置の誤差は、数十 m 以上になる可能性がある。このため、GPS の誤差を補正する技術が求められており、車載器非搭載車両が多数存在する環境においても効果的であることが望まれる。

本稿では安全走行支援アプリケーションに対して、自車両や周辺車両の位置を提供する協調分散位置推定手法を提案する。提案手法では、GPS 受信機とミリ波レーダーなどの測域センサならびに DSRC/WAVE 通信車載器を保持する車両の存在を想定し、GPS や測域センサの測定結果それぞれから予測した現在の位置を平均化することにより、自車両および周辺車両の現在の位置を推定する。一般に、推定に用いる測定結果が多いほど、推定位置の精度が高いと考えられるため、提案手法では測定結果を車車間通信により周辺車両と共有し、異なる時間に異なる車両が取得した測定結果を用いることで高精度な推定を実現する。ただし、時間経過に伴う予測位置の誤差悪化を考慮し、平均化では予測位置の精度を重みとして与える。また、中心極限定理により推定結果の精度を導出し、最も高精度な推定結果を車両間で共有する。性能評価から、提案手法により GPS 単体の誤差を 90%削減したことを確認した。

2. 関連研究

2.1 車両測位技術

近年、多くの車両がカーナビゲーションなどの ITS アプリケーションを利用するために、GPS 受信機を保持している。しかし、GPS は屋内や地下街、多くの建物が混在する都市部では誤差が大きい²⁾。これまでに、D-GPS (Differential GPS)、ジャイロスコープ、加速度センサなどのハードウェアから得られた情報や、地図情報やカメラから得られた画像情報などを統合することにより、自車両の位置精度を向上する手法が研究されている³⁾⁻⁵⁾。これらの手法は車載器非搭載車両の存在を考慮していないため、車載器非搭載車両が多数混在する環境において、周辺車両との位置関係の把握に適用することは困難である。また、車車間通信や車両搭載センサを用いて各車両の走行車線を推定する手法⁶⁾⁻⁷⁾や車車間通信によって共有された GPS や受信電波強度などの情報を用いて、ある車両の位置を原点とした相対位置を推定する手法⁸⁾⁻⁹⁾も提案されている。これらの手法は車両の絶対位置精度の向上を目的としていない点において、提案手法と異なる。また、これらの手法も車載器非搭載の車両の存在が考慮されていない。一方で、測域センサを用いた周辺状況の認識率向上のための手法¹⁰⁾⁻¹¹⁾が研究されている。これらの手法は、自車両の周辺に存在する車載器非搭載車両の位置の把握に利用できるが、情報認識や位置情報の精度向上のために車両間で情報を共有することを考慮していない。センサネットワーク分野では固定のセンサノードを用いて移動体の位置を追跡する手法¹²⁾が提案されているが、提案手法の想定環境と大きく異なるため、単純に適用することは難しい。

2.2 DSRC/WAVE 通信規格

提案手法では通信プロトコルとして、Dedicated Short Range Communications / Wireless Access for Vehicular Environments (DSRC/WAVE)¹³⁾を想定する。DSRC/WAVE は物理層プロトコルである IEEE 802.11p (DSRC) と、ネットワーク層プロトコルである IEEE 1609.x (WAVE) から構成される。IEEE 802.11p は車車間通信や路車間通信の標準的なプロトコルである。欧米では、5.9GHz 帯を仮定しており、無線伝播距離は約 300m 以上である (最大伝播距離は 1000m である)。IEEE 1609.x は DSRC 通信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、DSRC/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 を想定する。SAE J2735 ではパート 1 に現在位置、速度や車両サイズなどの車両の基本的な情報を、パート 2 に車両のイベントに関する情報を、パート 3 にアプリケーションによって定義された情報を含める。

3. 提案手法の概要

3.1 想定環境

本稿では、一部の車両が DSRC/WAVE 通信機器を保持する環境を想定する。以降、DSRC/WAVE 通信機器を保持する車両を**装備車両**、保持しない車両を**非装備車両**と呼ぶ。装備車両は IEEE802.11p により 48 ビットの固有の MAC アドレスを保持する。また、装備車両 i の無線範囲内に存在する車両を車両 i の**近接車両**と呼ぶ。1 章で述べたように、多くの安全走行支援アプリケーションでは各装備車両が 100 ミリ秒毎に現在位置をブロードキャスト送信する環境を想定していることから、提案手法では 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。

以下、各装備車両の動作について述べる。装備車両は T_g タイムスロット毎に GPS により自車両の現在位置を測定する。GPS によって測定された位置を **GPS 位置**と呼ぶ。また、 T_s タイムスロット毎にジャイロスコープなどにより自車両の速度を測定し、ミリ波レーダーなどの測域センサにより他車両への相対角度や距離を測定する。装備車両 i が測域センサによって観測した車両を車両 i の**観測車両**と呼ぶ。装備車両は、観測車両の相対角度や距離から相対位置を計算し、前回観測した相対位置から観測車両の速度を計算する。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、 σ_g^2 は σ_r^2 および σ_v^2 よりも大きいものとする。これは、GPS の位置誤差はマルチパスや信号の遮断によって非常に大きい誤差が生じるが、測域センサやジャイロスコープはそれらの影響をほとんど受けないためである。また、一般的な製品の特性に基づき T_g および T_s のデフォルト値をそれぞれ 10 タイムスロット、1 タイムスロットとする (ただし、提案手法は特有の値からは独立である)。装備車両は T_s タイムスロット毎に自車両が観測した情報や推定した情報を **Basic Safety メッセージ**として近接車両に対しブロードキャスト送信する。 T_s のデフォルト値は 1 タイムスロットとする。

3.2 協調型位置推定手法

装備車両は自車両および近接車両の位置を保持するものとし、タイムスロット毎に更新する。提案手法の目標は、装備車両が非装備車両を含めた車両の位置をなるべく正確に把握することである。より高精度な車両位置推定を達成するために、提案手法は以下のアプローチに基づき位置を推定する。

- ある装備車両 i が測域センサにより車両 j を観測した場合、車両 i の位置と車両 j の相対位置から、車両 j の位置を生成できる。提案手法では、観測した車両 i の位置と観測車

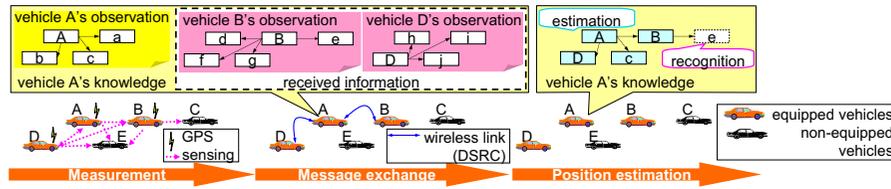


図 1 提案手法の概要.

Fig. 1 Overview of the proposed method.

両 j の相対位置の組み合わせから生成された位置を位置候補と呼び、位置候補の平均により新しい位置を計算する。一般に、利用する位置候補数が多いほど高精度な位置推定を実現できると考えられるため、提案手法では、自車両が観測した GPS 位置や相対位置に加えて、近接車両が過去および現在観測した GPS 位置や相対位置から生成された位置候補を用いる。ただし、時間経過に伴う劣化により、過去の観測結果から生成された位置候補は大きな誤差を含む可能性が高い。このため、位置候補毎に経過時間によって定義される推定誤差を計算し、推定誤差に基づく重み付け平均によって位置を計算する。

- 測域センサは観測した車両の相対位置のみを与えるので、与えられた相対位置がどの車両を表すかを判定する必要がある。そこで装備車両間で観測車両群の相対位置を比較し、観測車両間の一致度を判定する。

- ある車両の位置は各装備車両によってそれぞれ計算されるため、装備車両は近接車両群の異なる精度を持った異なる推定結果を保持する。そこで、各推定結果の尤度を中心極限定理により計算し、推定結果に加えてそれらの尤度を Basic Safety メッセージによって近接車両に送信することで、推定結果の中で最も高精度に推定された結果を車両間で共有する。

図 1 に装備車両 A が自身および近接車両の位置を更新する際の提案手法の動作例を示す。車両 A は自車両の GPS 位置、装備車両 B, D および非装備車両 E の相対位置を測定できる（装備車両 B および D も同様である）。車両 A は車両 A, B, D および E の位置を推定するために、以下のような情報を用いる。(1) 車両 A の GPS 位置および車両 B や D からの車両 A の相対位置、(2) 車両 B の GPS 位置および車両 A や D からの車両 B の相対位置、(3) 車両 D の GPS 位置および車両 A や B からの車両 D の相対位置および (4) 車両 A, B や D からの車両 E の相対位置である。なお、車両 C は車両 B によって観測された後に、車両 B からのメッセージにより車両 A や D によって認識される。

4. 提案手法の詳細

提案手法における位置推定は (1) 観測情報の取得、(2) 観測情報を用いた推定情報の更新および (3) メッセージ交換の 3 つのステップから構成される。

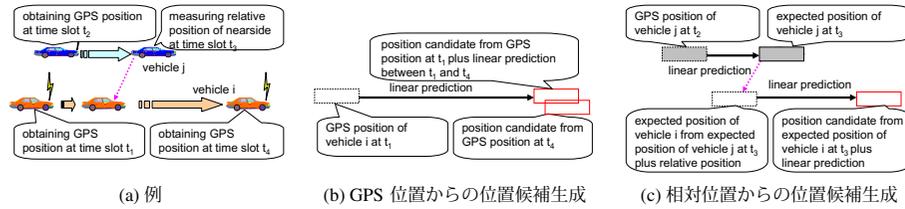
4.1 観測情報の取得

3.1 章で述べたように、各装備車両 i は自車両の GPS 位置と速度および観測車両の相対位置と速度を定期的に測定し、 T_s タイムスロット毎に観測情報を Basic Safety メッセージとして送信することにより近接車両と情報を共有する。以降、 $O_i(a)$ を車両 i が取得した観測車両 “ a ” の観測情報とする。 $O_i(a)$ は観測車両 a の GPS 位置 ($a = i$ のときのみ存在)、観測車両 a の相対位置 ($a = i$ のとき、相対位置は 0 とする)、観測車両 a の速度の組から構成される。 $O_i(a)$ はタイムスロット毎に生成され、生成時刻により区別できるものとする。

4.2 観測情報を用いた推定情報の更新

各装備車両 i は自身および近接車両の推定位置および推定位置の尤度から構成される推定情報を保持する。以降、 $E(a)$ を車両 ID “ a ” の推定情報とする。なお、非装備車両に対しては各装備車両が一時的な ID を与えるものとする。 $E(a)$ は車両 a の推定位置 \mathbf{p} 、車両 a の推定位置の尤度 \tilde{p} 、車両 a の速度 \mathbf{v} 、そして車両 i の位置を基準とする車両 a の相対位置 \mathbf{r} の組から構成される。 \mathbf{r} は後述する観測情報と推定情報のマッチングに利用する。

各推定情報 $E(a)$ は車両 a を表す観測情報を用いてタイムスロット毎に更新される。測域センサによって得られた観測情報からは車両の ID が分からないため、提案手法では、各観測情報がどの推定情報とマッチングするかを判定する。マッチング方法の詳細は 4.4 節で述べる。車両 i が現在のタイムスロットにおいて GPS 位置を観測しなかった場合、車両 a の推定位置 \mathbf{p} は前回の推定位置 \mathbf{p}' から線形予測により更新される。この場合、車両 a の推定位置の尤度 \tilde{p} は前回の尤度 \tilde{p}' を用いて、 $\tilde{p} = 1/\sqrt{1/\tilde{p}'^2 + \sigma_v^2}$ として更新する。車両 i が現在のタイムスロットにおいて GPS 位置を観測した場合、車両 a の推定位置 \mathbf{p} を更新するために、はじめに推定情報 $E(a)$ と一致する観測情報に含まれる GPS 位置および相対位置から位置候補 $\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_n$ を生成し、各位置候補 \mathbf{q}_i に対し推定誤差 \tilde{q}_i を計算する。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 の速度を用いて線形予測することにより、位置候補が生成される。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、位置候補の推定誤差を $\sqrt{\sigma_g^2 + k\sigma_v^2}$ と定義する。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



(a) 例 (b) GPS 位置からの位置候補生成 (c) 相対位置からの位置候補生成
図 2 位置候補の生成
Fig. 2 Generation of position candidates.

($k > k'$) 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 の速度を用いて線形予測することにより, 位置候補が生成される. よって, 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, その尤度を $\sqrt{\sigma_g^2 + \sigma_r^2 + k\sigma_v^2}$ として定義する.

図 2 に, 位置候補の生成例を示す. 図 2(a) に示す例の場合, GPS 位置から生成されたタイムスロット t_4 における車両 i の位置候補は図 2(b) のように t_4 に観測された GPS 位置から直接生成された候補と t_1 に観測された GPS 位置を t_1 から t_4 までの車両 i の速度を用いて線形予測された候補の 2 つである. また, 相対位置から生成された位置候補は図 2(c) のように t_3 に観測された相対位置から t_2 の車両 j の GPS 位置, t_2 から t_3 までの車両 j の速度および t_3 から t_4 までの車両 i の速度を用いて線形予測された候補である.

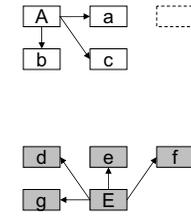
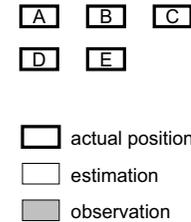
次に, 車両 i の新しい推定位置 \mathbf{p} を式 (1) で定義されるような推定誤差を重みとする位置候補 \mathbf{q}_l ($l = 1 \dots n$) の加重平均で計算する. また, 中心極限定理に基づき推定位置の尤度 \tilde{p} を式 (2) のように計算する. これらの \mathbf{p} および \tilde{p} の定義の妥当性は 5 章で述べる.

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

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

4.3 メッセージ交換

装備車両 i は T_s タイムスロット毎に Basic Safety メッセージを送信する. 装備車両 i は自車両および観測車両の推定情報をメッセージに含める. 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 ID を表す) の組, $S(a) = (E(a), O_i(b))$ によって定義される. 車両 i が車両 j から Basic Safety メッセージを受信した際には, $S(c) = (E(c), O_j(d))$



(a) 例 (b) 車両 A の推定情報と車両 E の観測情報

図 3 観測情報と推定情報のマッチング
Fig. 3 Matching of observation and estimation.

から観測情報 $O_j(d)$ を取り出し保持する. また, 観測情報 $O_j(d)$ と一致する推定情報 $E(a)$ を検索し, 推定情報 $E(c)$ の推定位置の尤度の方が $E(a)$ の推定位置の尤度よりも大きい場合は, 推定情報 $E(c)$ を推定情報 $E(a)$ に代入する.

4.4 マッチング関数

測域センサからは観測車両の ID ではなく相対位置のみが得られるため, 相対位置を用いて近接車両の位置を更新するためには, 観測車両の ID を把握する必要がある. また, より多くの観測情報を推定に利用するためには, 装備車両 i が推定情報 $E(a)$ を更新する際に, 近接車両 j が車両 a とは異なる 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 を表す) を用いる必要がある. 提案手法では, 推定情報 $E(a)$ と観測情報 $O_j(b)$ が同一車両を表すかどうかを判定するために, マッチング関数 $Matching$ を用いる. 推定情報 $E(a)$ を更新する際には, 装備車両 j 毎に以下の式を満たす観測情報 $O_j(b)$ を利用する.

$$b = \arg_x \max Matching(E(a), O_j(x)) \quad (3)$$

マッチング関数は, 車両 i が観測情報 $O_j(b)$ を得たとき, $O_j(b)$ と車両 i が保持する推定情報を比較することにより以下のように更新される.

- 車両 i 自身の観測情報 $O_i(b)$ を用いる場合, $O_i(b)$ と車両 i からの相対位置が一致する推定情報 $E(a)$ を探索する. 一致する推定情報が存在しない場合, 車両 i は新しく推定情報 $E(c)$ を生成し, $Matching(E(c), O_i(b))$ が常に最大値を返すようにマッチング関数を更新する.

- 車両 j からのメッセージにより取得した観測情報 $O_j(b)$ を用いる場合, $O_j(b)$ と車両 i からの相対位置が一致する推定情報 $E(a)$ を探索する. $E(a)$ が存在する場合には, 車両 i の推定情報とメッセージに含まれる車両 j の観測情報間の車両 i からの相対位置における一致

数を $Matching(E(a), O_j(b))$ に加算する. 図 3(a) の場合, 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 $E(b)$ が一致するため, $Matching(E(c), O_E(E))$ に 3 加算する. 同様に観測情報 $O_E(E)$ が推定情報 $E(a)$ に一致し, $O_E(g)$ と $E(A)$ が一致するため, $Matching(E(c), O_E(E))$ に 1 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 $E(c)$ を生成し, $M(E(c), O_j(b))$ が最大値を返すようにマッチング関数を更新する.

また, 観測情報と推定情報のマッチングの結果を車両間で共有するために, 車両 i は推定情報 $E(a)$ が装備車両 m と一致することを判定した場合, Basic Safety メッセージにより近接車両に知らせる. また, 車両 i は $O_j(b)$ が装備車両 m と一致することを把握した場合, $O_j(b)$ と一致する推定情報 $E(a)$ に対し, $Matching(E(a), O_m(m))$ が最大値を返すようにマッチング関数を更新する.

5. 中心極限定理

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を用いた手法が提案されている^{14),15)}. 提案手法では, 近接車両へ大きな誤差が伝播するのを防ぐために, 中心極限定理に基づき計算された推定位置の尤度を用いる. 本章では, 位置候補が情報源において互いに独立であり, それぞれの位置候補の誤差が平均 0 の正規分布に従うとき, 式 (1) のように位置候補の加重平均で定義される推定位置の誤差は, 平均 0 の正規分布に従い, その標準偏差は式 (2) で定義されることを示す.

中心極限定理とは, 平均 μ , 分散 σ_0^2 のある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 において, 確率変数の個数 n が十分大きいとき, それらの平均は近似的に平均 μ , 分散 σ/n 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 においても中心極限定理は成り立つ. 例えば, 確率変数が平均 0, 分散 1 の正規分布に従うとき, 確率変数の平均 σ の標準偏差は $n = 10$ において約 $0.32\sigma_0$ となる. この性質を利用し, 提案手法では, 複数の位置候補の平均を新しい推定位置とすることで, 位置候補よりも誤差が小さい推定位置を得る. 中心極限定理を適用するためには, 各確率変数は互いに独立であり, 同一の分布に従う必要があるが, 提案手法では位置候補は異なる車両が異なる時間に測定した情報源から生成されるため, 位置候補が従う分布は必ずしも同一の分布とは限らない. そこで, 確率変数が同一の分布から抽出された場合以外でも, ある条件下で中心極限定理が適用可能であることを証明する.

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 ,

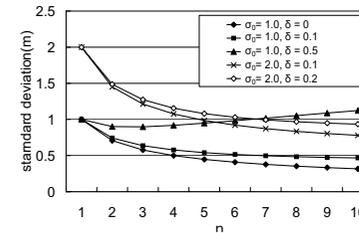


図 4 定理 1 の解析
Fig. 4 Analysis of Theorem 1.

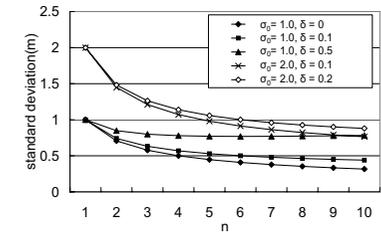


図 5 定理 2 の解析
Fig. 5 Analysis of Theorem 2.

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), それらの平均は有限の n において平均 μ , 式 (4) で定義される分散 σ^2 の正規分布に従う.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}{n^2} \quad (4)$$

証明 積率母関数を用いて証明する. 確率変数 X_i ($1 \leq i \leq n$) の確率密度関数を $f_{X_i}(X_i)$, 積率母関数を $M_{X_i}(\theta)$ で表す. 確率変数 X_i 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 (5) で定義される.

$$M_{X_i}(\theta) = \exp\left(\mu\theta + \frac{\theta^2}{2}\sigma_i^2\right) \quad (5)$$

また, n 個の確率変数の平均の積率母関数は下記のように定義される.

$$\begin{aligned} M_X(\theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\theta \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}\right) f_X(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1 dX_2 \dots dX_n \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \prod_{i=1}^n \exp\left(\theta \frac{X_i}{n}\right) \right\} f_X(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1 dX_2 \dots dX_n \end{aligned}$$

ここで, 確率変数は互いに独立であるため, 積率母関数は下記のように展開可能である.

$$M_X(\theta) = \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\theta \frac{X_i}{n}\right) f_{X_i}(X_i) dX_i = \exp\left\{ \mu\theta + \frac{\theta^2}{2} \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}{n^2} \right\}$$

これは平均 μ , 式 (4) で分散 σ^2 の正規分布に従う変数の積率母関数を表す. □

定理 1 は確率変数が互いに独立で, 同じ平均で異なる分散の正規分布から抽出された場合, 中心極限定理が適用可能であることを意味する. 提案手法では各情報源の誤差の平均が

0 の正規分布に従うことを想定しているため、推定位置の尤度の推定に中心極限定理を用いることが可能である。図 4 に互いに独立な確率変数 X_i が平均 μ 、標準偏差 $\sigma_0 + \delta \times (i - 1)$ (δ は正数) に従う場合の n 個の確率変数の平均の標準偏差を示す。 $\delta = 0.5$ の場合、 $n > 7$ において平均の標準偏差は 1.0 以上となり、確率変数 X_1 の標準偏差よりも大きくなることが分かった。このように、一部の位置候補が大きな誤差を持つ場合、推定位置の誤差が他の位置候補の誤差よりも大きくなる可能性がある。そこで、提案手法では相加平均の代わりに位置候補の推定誤差の標準偏差を重みとした加重平均を用いる。

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)、式 (6) で定義されるような各確率変数 X_i に重みを $1/\sigma_i$ として与えた場合の加重平均 X は有限の n において平均 μ 、式 (7) で定義される分散 σ^2 の正規分布に従う。

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i/\sigma_i)}{\sum_{i=1}^n 1/\sigma_i} \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \frac{n}{(\sum_{i=1}^n 1/\sigma_i)^2} \quad (7)$$

証明 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 ($1 \leq i \leq n$) の確率密度関数を $f_{X_i}(X_i)$ 、積率母関数を $M_{X_i}(\theta)$ で表す。確率変数 X_i 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 (5) で定義される。 n 個の変数の加重平均の積率母関数は下記のように定義される。

$$M_X(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\theta \frac{\sum_{i=1}^n (X_i/\sigma_i)}{\sum_{i=1}^n 1/\sigma_i}\right) \times f_X(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1 dX_2 \dots dX_n$$

ここで、確率変数は互いに独立であるため、積率母関数は下記のように展開可能である。

$$M_X(\theta) = \prod_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\theta \frac{1/\sigma_i}{\sum_{i=1}^n 1/\sigma_i} X_i\right) f_{X_i}(X_i) dX_i \\ = \prod_{i=1}^n M_{X_i}\left(\theta \frac{1/\sigma_i}{\sum_{i=1}^n 1/\sigma_i}\right) = \exp\left\{\mu\theta + \frac{\theta^2}{2} \frac{n}{(\sum_{i=1}^n 1/\sigma_i)^2}\right\}$$

これは平均 μ 、式 (7) で分散 σ^2 の正規分布に従う変数の積率母関数を表す。□

図 5 に互いに独立な確率変数 X_i が平均 μ 、標準偏差 $\sigma_0 + \delta \times (i - 1)$ (δ は正数) に従う場合の n 個の確率変数の平均の標準偏差を示す。結果より、いずれの場合においても変数

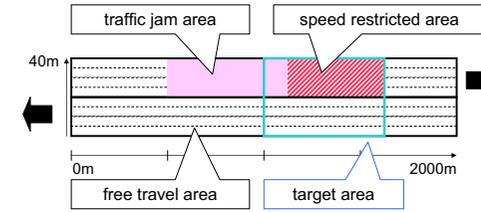


図 6 シミュレーションマップ
 Fig.6 Simulation map.

の数 n が大きいほど、加重平均の標準偏差は小さくなることが確認された。

6. 性能評価

6.1 シミュレーション設定

シミュレーションマップとして、図 6 に示すような車幅 5m、長さ 2km の片側 4 車線道路を用いた。ある一方の車線の 1200m から 1600m の領域を速度制限領域とし、文献 16)、17) で提案された車両モビリティを用いて 500m から 1200m の領域で渋滞が生じるような環境を再現した。タイムスロットの長さを 100 ミリ秒、GPS 位置誤差の標準偏差 σ_g を 5m、測域センサで測定した相対位置の誤差の標準偏差 σ_r を 0.25m、速度誤差の標準偏差 σ_v を 0.08m/ms とした。センサモデルは最大センシング距離を 100m の見通しモデルとし、GPS の測位間隔 T_g を 10 タイムスロット、センサの測定間隔 T_s およびメッセージ送信間隔 T_m を 1 タイムスロットとした。無線伝播モデルとして 2 波モデルを想定し、送信電力を 23dBm とした。また通信プロトコルはデータ転送レート 6Mbps の DSRC/WAVE とする。1000m から 1600m の領域内に存在する車両から 150 台の車両を選択し、計 5 回のシミュレーションにおける性能をネットワークシミュレーター Scenargie¹⁸⁾ を用いて評価した。

6.2 評価結果

6.2.1 特性評価

はじめに、提案手法により GPS 位置からどの程度精度を向上できるかを評価した。一般に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 位置や地図情報などを用いて補正した GPS 位置を利用する。そこで、本節では過去の自身の観測情報に基づき GPS 位置を補正する手法と提案手法での性能を比較する。装備車両の割合は 100% とする。

まず、提案手法および比較手法における各装備車両が保持する自車両の推定位置の平均誤差を評価した。位置誤差は実際の位置とのユークリッド距離で定義する。図 7 に示す評価

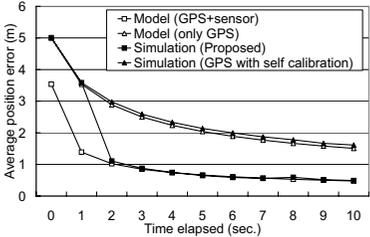


図 7 装備車両の平均誤差

Fig. 7 Average position errors of equipped vehicles.

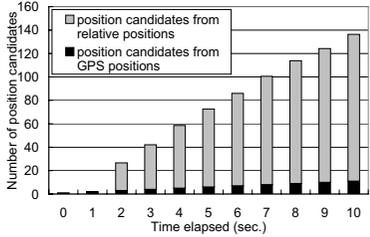


図 8 位置候補数

Fig. 8 Number of position candidates.

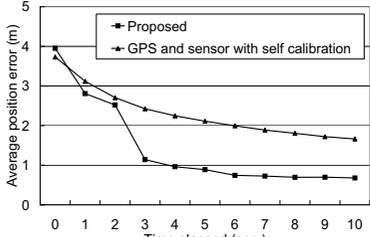


図 9 近接車両の平均位置誤差

Fig. 9 Average position errors of nearby vehicles.

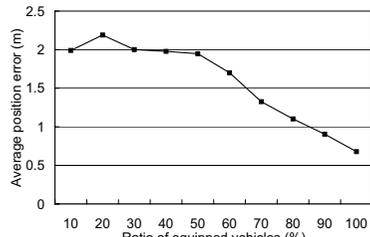


図 10 装備車両の割合が与える影響

Fig. 10 Impact of the ratio of equipped vehicles.

結果より、全車両が一斉に提案手法による位置推定を開始してから 10 秒後には平均誤差が 0.50m 以下となっており、GPS 位置に対して 90%、比較手法に対して 70%の位置誤差を軽減できた。また、提案手法では 2 秒経過後に急激に位置誤差が減少した。図 8 に示す位置候補数において、1 秒経過時点では相対位置から生成された位置候補数が 0 であることから、提案手法では観測情報と推定情報のマッチングがメッセージ交換に基づき行われており、1 秒経過時点では、マッチングが完了しておらず、自身が観測した情報のみを推定に用いるためと考えられる。さらに、中心極限定理から導出された位置誤差の理論値とシミュレーションでの推定位置を比較した結果、2 秒以降は理論値とシミュレーションでの平均誤差がほぼ同じとなった。すなわち、提案手法は中心極限定理に基づき位置精度が向上していることが分かる。次に、各装備車両が保持する全推定情報に含まれる推定位置の平均誤差を評価した。推定位置の誤差は実際の車両の位置のうち最も近い位置とのユークリッド距離とした。図 9 に示す評価結果より、10 秒経過後の位置誤差は 0.65m であり、比較手法よりも高精度な推定を実現できた。以上により、提案手法では異なる車両の異なる時間における測定結果を用いることで、比較手法よりも高精度な自車両および近接車両の位置推定を実現している。

また、渋滞領域、速度制限領域および自由走行領域における平均位置誤差を測定したところ、それぞれ 0.54m、0.45m、0.67m となった。なお、各領域の一車線の車両台数は 5.75、5.94、0.375 である。渋滞領域や速度制限領域では車両密度が高く十分な数の位置候補を生成できるため、自由走行領域と比べて高精度な推定が実現できたと考えられる。また、渋滞領域では車両の加減速が頻繁に生じるため、速度制限領域よりも僅かに渋滞領域よりも誤差が悪化したと考えられる。

6.2.2 装備車両の割合

本節では、装備車両が装備車両の割合が精度に与える影響を評価する。図 10 に、装備車

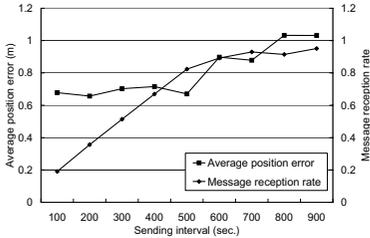


図 11 送信間隔が与える影響

Fig. 11 Impact of the sending interval.

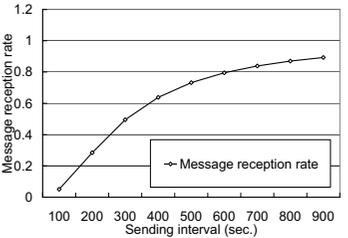


図 12 メッセージ受信率の理論値

Fig. 12 Theoretical message reception rate.

両の割合を 10%から 100%とした場合の 10 秒経過後の平均位置誤差を示す。結果より、装備車両の割合が低いほど位置候補数が減少するため誤差が悪化する傾向となった。しかし装備車両の割合が低い場合でも、異なる時間の異なる車両によって測定された観測情報を用いることにより、推定位置の誤差は GPS 位置誤差の半分以下を達成している。

6.2.3 送信間隔

最後に、メッセージ送信間隔を 100 ミリ秒から 900 ミリ秒まで変化させた場合の、10 秒経過後の全推定情報の平均位置誤差とメッセージ受信率を図 11 に示す。装備車両の割合は 100%とする。結果より、送信間隔が長いほどメッセージ受信率は向上した。また送信間隔が 500 ミリ秒以上の場合において位置誤差が大きくなる傾向となった。これは送信間隔が 500 ミリ秒以下の場合、メッセージ受信率の向上により、精度を維持するのに十分な数の観測情報が共有できているためと考えられる。したがって本シミュレーションにおける最適な送信間隔は 500 ミリ秒である。

また、シミュレーションの妥当性を検証するために、1-persistent CSMA¹⁹⁾ のモデルに基

づき、提案手法のメッセージ受信率を数学的に解析した。平均 G のポアソン分布に従って、フレーム送信時間 T 当たりフレームが生成されるとき、1-persistent CSMA の送信成功率 P は下記の式で定義される。

$$P = \frac{[1 + G + aG(1 + G + aG/2)]e^{-(1+2a)G}}{(1 + 2a)G - (1 - e^{-aG}) + (1 + aG)e^{-(1+a)G}} \quad (8)$$

ただし a は正規化送信遅延時間とする。DSRC/WAVE の規格の一部である IEEE 1609.4 によると、すべての Basic Safety メッセージは各タイムスロットの最初の 50 ミリ秒に相当する CCH インターバルで送信される。すなわち、提案手法においてメッセージ送信時間 T 当たり N 台の車両が送信するメッセージの平均数 G は、各装備車両が 1 秒間に送信するメッセージの平均数 I を用いて $2I \times N \times T$ で定義される。図 12 に $a = 0.01$ 、データ転送レートを 6Mbps、前述の性能評価より平均メッセージサイズを 800 バイトとした場合のメッセージ受信率の理論値を示す。結果よりメッセージ受信率の理論値が図 11 に示したシミュレーションにおけるメッセージ受信率と非常に良く似た傾向となった。

7. ま と め

本稿では、一部の車両が GPS 受信機と測域センサおよび DSRC/WAVE 通信車載器を保持している環境において、ITS アプリケーションにリアルタイムで位置を提供する協調型車両位置推定手法を提案した。性能評価より、提案手法が GPS の位置誤差を平均 90%削減できることが分かった。今後は、実際の地図情報や実際に測定した GPS や測域センサの誤差を用いて、提案手法の実環境における性能を評価する予定である。また、直線道路だけでなく交差点などの様々なシナリオにおける性能評価や手法の改善を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) Vehicle Safety Communications Project: Final Report, Technical Report DOT HS 810 591, NHTSA, USDOT (2006).
- 2) Matosevic, M., Salcic, Z. and Berber, S.: A Comparison of Accuracy Using a GPS and a Low-Cost DGPS, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.55, No.5, pp.1677–1683 (2006).
- 3) Krakiwsky, E.J., Harris, C.B. and Wong, R. V.C.: A Kalman filter for integrating dead reckoning, map matching and GPS positioning, *Proc. IEEE PLANS 1988*, pp.39–46 (1988).
- 4) Chausse, F., Laneurit, J. and Chapuis, R.: Vehicle localization on a digital map using particles filtering, *Proc. of IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2005*, pp.243–248 (2005).
- 5) Rezaei, S. and Sengupta, R.: Kalman Filter-Based Integration of DGPS and Vehicle Sen-

sors for Localization, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.15, No.6, pp.1080–1088 (2007).

6) Dao, T.-S., Leung, K. Y.K., Clark, C.M. and Huissoon, J.P.: Markov-Based Lane Positioning Using Intervehicle Communication, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.8, No.4, pp.641–650 (2007).

7) Du, J. and Barth, M.J.: Next-Generation Automated Vehicle Location Systems: Positioning at the Lane Level, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.9, No.1, pp.48–57 (2008).

8) Kukshya, V., Krishnan, H. and Kellum, C.: Design of a system solution for relative positioning of vehicles using vehicle-to-vehicle radio communications during GPS outages, *Proc. IEEE VTC-2005-Fall*, pp.1313–1317 (2005).

9) Schubert, R., Schlingelhof, M., Cramer, H. and Wanielik, G.: Accurate Positioning for Vehicular Safety Applications - The SAFESPOT Approach, *Proc. IEEE VTC 2007-Spring*, pp.2506–2510 (2007).

10) Folster, F. and Rohling, H.: Data association and tracking for automotive radar networks, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.6, No.4, pp.370–377 (2005).

11) Rockl, M., Strang, T. and Kranz, M.: V2V Communications in Automotive Multi-Sensor Multi-Target Tracking, *Proc. IEEE VTC 2008-Fall*, pp.1–5 (2008).

12) Orton, M. and Fitzgerald, W.: A Bayesian approach to tracking multiple targets using sensor arrays and particle filters, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.50, No.2, pp.216–223 (2002).

13) Jiang, D. and Delgrossi, L.: IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments, *Proc. IEEE VTC 2008-Spring*, pp.2036–2040 (2008).

14) Yuen, W.H. and Schulzrinne, H.: Localization for Intermittently Connected Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE PerCom 2007 Workshops*, pp.86–96 (2007).

15) 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).

16) Nakanishi, K., Umedu, T., Higashino, T., Kitaoka, H. and Mori, H.: Synthesizing Realistic Vehicular Mobility for More Precise Simulation of Inter-vehicle Communication, *Proc. IEEE AutoNet 2007*, pp.1–10 (2007).

17) Umedu, T., Isu, K., Higashino, T. and Toh, C.K.: An inter-vehicular communication protocol for distributed detection of dangerous vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.59, No.2, pp.627–637 (2010).

18) Space-Time Engineering: Scenarigie, [Online]. Available: <http://www.spacetime-eng.com/en/products.html>.

19) Tanenbaum, A.S.: *Computer networks 4th edition*, Prentice Hall (2003).