# 内外分点と動的な重みづけ手法を用いた 移動車両向け位置推定手法

富樫 宏謙<sup>1,a)</sup> 山田 茂樹<sup>2,b)</sup>

受付日 2011年10月25日, 採録日 2012年4月2日

概要:現在、GPS を用いた位置推定手法が広く用いられているが、道路空間での利用には立体交差などでは正しく車両の位置する道路を認識できない、トンネルなどでは位置推定自体行えないといった課題が存在する。GPS によらない手法も検討されているが、道路空間全体に適用可能かつ一定以上の精度を持つ手法は実現されていない。こうした課題に対し、本論文では RFID を利用し、以下のアルゴリズム的特徴を持つ位置推定手法を提案する。1) 推定精度の向上を実現するため、提案手法では各 RFID の組合せに対し、それらを結んだ直線を RFID の位置と RFID-アンテナ間の距離に基づいて内分または外分する点(内外分点)を利用している。2) 複数の内外分点を次数の異なる重みづけ関数により統合し、重みづけ次数の増加による統合結果の収束をもとに各アンテナの位置を推定する。この重みづけにおいて、車両の近くに位置する RFID から求められた内外分点に、より大きなウェイトを与えている。屋外の道路環境で位置推定実験を行った結果、提案手法は RFID を道路の両側に 0.5 m 間隔で配置し、アンテナを 8 本車載することで誤差の平均値を 0.7 m に抑えられることが判明した。車線方向の誤差に着目することで,提案手法は移動中の車両において車線の認識が可能であると結論づけられた。既存手法と比較しても、提案手法は位置推定誤差を 31-70%改善した。

キーワード: RFID, 位置推定, RSSI, 路車間通信, ITS

## A Scheme for Estimating Position of Moving Vehicles Using Pair-wise Position and Dynamic Weighting

Hiroaki Togashi $^{1,a)}$  Shigeki Yamada $^{2,b)}$ 

Received: October 25, 2011, Accepted: April 2, 2012

Abstract: GPS (Global Positioning System) is widely used to estimate position of objects. However, it cannot accurately estimate which road the vehicle is running such as grade separated crossing, and it cannot estimate vehicular position in tunnel. This paper presents a new position estimation algorithm for moving vehicles based on RFIDs (Radio Frequency IDentifications) placed on roadsides and lane boundaries, and multiple on-car RFID receiver antennas, aiming to overcome these problems. This algorithm employs two novel ideas: (1) compute pair-wise positions of on-car antennas using the RSSI (Received Signal Strength Indication) of all pairs of received RFID signals, and (2) use a dynamic weighting function to assign higher weights to the positions estimated based on RFIDs closer to the receiver antennas. The results obtained from our field experiments indicate that the proposed method achieved 0.7-meter localization accuracy for the position estimation when RFIDs were placed at 0.5-meter intervals and a vehicle has 8-antennas. Analysis of localization accuracy in road-width direction revealed that the proposed method allows a moving vehicle to recognize which lane it is in. This result also indicates that the proposed method reduced error in estimating position to 31–70%, compared to existing methods.

Keywords: RFID, position estimation, RSSI, road-to-vehicle communication, ITS

The Graduate University for Advanced Studies, Hayama, Kanagawa 240–0193, Japan

National Institute of Informatics, Chiyoda, Tokyo 101–8430, Japan

#### 1. はじめに

現在, GPS (Global Positioning System) [1] を用いた位置推定手法が広く利用されているが, 道路空間での利用を考えると立体交差などでは車両の位置する道路を正しく認識できない, トンネルなどでは位置推定自体行えないと

<sup>1</sup> 総合研究大学院大学

<sup>2</sup> 国立情報学研究所

<sup>&</sup>lt;sup>a)</sup> saha777@nii.ac.jp

b) shigeki@nii.ac.jp

いった課題が存在する。GPS によらない手法 [2], [3] も検討されているが、道路空間全体に適用可能かつ一定以上の精度を持つ手法は実現されていない。こうした課題の解決には位置推定に利用する機器を道路上に多数配置して推定精度の改善と利用可能範囲の拡大を行う手法が考えられるが、低価格でサイズの小さな機器でなければ実用的には困難である。RFID(Radio Frequency IDentification)[4] はサイズが小さいため物理的には多数配置する用途に適している。価格はアクティブ型 RFID で1個数千円程度であるが、ID 番号の活用により位置推定以外の用途にも利用できるため測位専用の機器と比較すると費用対効果は高い。こうした点に着目し、本論文では路側に設置したアクティブ型 RFID を用いた位置推定手法を提案する。提案手法の特徴は以下のとおりである。

- (a) 推定精度の向上と3次元空間での位置推定を実現するため、提案手法では各RFIDの組合せに対して求められる内外分点を利用している.内外分点とはRFIDどうしを結んだ直線を、RFIDの位置とRFID-アンテナ間の距離から求まる分割比率により内分または外分[5]する点である.
- (b) 複数の内外分点を次数の異なる重みづけ関数により統合し、重みづけ次数の増加による統合結果の収束をもとに各アンテナの位置を推定する.この重みづけにおいて、車両の近くに位置する RFID から求められた内外分点に、より大きなウェイトを与えている.

位置推定の対象が移動する車両である点に対し、提案手法では車両の移動ベクトルを位置推定に用いることで推定精度を向上させている。ここで、車両の移動ベクトルはジャイロ/加速度センサにより得られる角速度/加速度から求めている。さらに、提案手法では複数のアンテナを車載し、それらの位置関係を利用して車両中心の推定位置を求めている。

以降の構成は以下のとおりである。まず、2章で必要な位置推定精度と制約条件を、3章において本研究に関連する技術・研究を整理する。4章では提案手法の実現手法、特徴、アルゴリズムなどを述べる。5章において屋外実験により提案手法の実現性を評価し、6章で本論文の総括を行う。

### 2. 要求条件

#### 2.1 位置推定精度

(1) 走行車線の識別

車両の走行している車線を識別するためには車線幅の半分程度が必要な推定精度と考えられる。したがって、標準的な車線幅(約3m)の道路では1.5mが達成すべき推定精度となる。

(2) 立体交差での走行経路の識別 立体交差など高さ方向に複数の道路が存在する環境 で、車両の走行経路を識別するためには下の道路面から上の道路面までの距離の半分程度が高さ方向で必要な推定精度である。下の道路面から上の道路面までの高さは低いものでも3m程度であるため、1.5m程度の高さ方向の推定精度が必要となる。

#### (3) 車両の制御

レーンキープアシストなど車両の制御を行うシステムについて、正常な制御に必要な位置推定精度は明確に規定されていないため、以下のように 10 の整数乗を基準に精度目標を検討した。標準的な車線幅(約3 m)の道路中央を車幅 1.5 m の車両が走行している場合、車両と路肩ないし車線境界までの距離は左右とも約0.75 m である。この環境では推定誤差が $10^0$  m = 1 m 以上存在すると車両の車線逸脱や路肩との接触を正しく認識できないため、車両の制御に必要な精度は $10^{-1}$  m = 0.1 m となる。

#### 2.2 制約条件

道路空間において、RFID を利用して位置推定を行う際には以下のような制約条件があげられる.

(制約-1) 車両を対象とするため、その移動を考慮すること が必要である。

> 提案手法はアクティブ型 RFID を利用するため、 それらの電波の受信時刻はそれぞれ独立であり、 移動する車両が電波を受信する位置もそれぞれ 異なる.推定した車両の位置はある1つの時刻 での値であるため、車両の移動を考慮しつつ時刻 をそろえる手法の検討が必要である.

(制約-2) 道路は公共の空間であるため, RFID の配置箇所が制約される.

道路空間に設置される機器は RFID 以外も存在するため、必ずしも RFID を自由に配置することはできない。このため、格子状に設置する一般的な場合と比べると位置推定に利用できる RFID の数が少なくなり、位置推定精度の悪化が予想される。したがって格子状の配置を前提とした手法をそのまま適用するのではなく、アルゴリズム面での改良などを行い精度の悪化を抑えることが必要である。

(制約-3) 様々な道路構造に適応することが必要である. 道路空間を対象とすると、トンネル、勾配の変化 する区間、立体交差などの箇所でも位置推定精 度が大きく悪化しないことが必要となる.また、 トンネルなどでは外部からの電波が届きにくい ため、推定精度の向上にはトンネル内に設置でき る機器の利用が必要である.

> 勾配の変化する箇所において,車両の位置する 平面を位置推定前に認識することは困難である.

固定した平面を前提とする手法や平面上への投影をともなう手法では、車両の位置する面を正しく認識できないと誤差が大きくなると考えられるため、推定計算において平面を利用しない手法を検討すべきである。立体交差においては車両が位置する道路を正しく識別することが必要であり、2.1 節で述べたような高さ方向の推定精度が要求される。

## 3. 関連技術・研究

本章では提案手法に関連する技術・研究を3.1-3.3節でそれぞれ紹介し、3.4節でこれらを総括する。

#### 3.1 RFID

RFID [4] は主に動作の方式と使用する周波数により以下のように分類される.

動作の方式では、読み取り側からの電波をエネルギーとして動作するパッシブ型、バッテリを内蔵し読み取り側からの電波に応答して電波を発信するセミパッシブ型、バッテリを内蔵し自発的に電波を発信するアクティブ型に、使用する周波数では  $125\sim135\,\mathrm{kHz}$  を使用する  $\mathbf{LF}$  帯、 $13.56\,\mathrm{MHz}$  を使用する  $\mathbf{HF}$  帯、 $860\sim960\,\mathrm{MHz}$  を使用する  $\mathbf{UHF}$  帯、 $2.5\,\mathrm{GHz}$  を使用するミリ波にそれぞれ分類される。これらの RFID のうち、提案手法では複数台の車両による利用とできるだけ長い距離での通信を考慮して、 $\mathbf{UHF}$  帯のアクティブ型 RFID を利用する。

#### 3.2 移動体(車両)の移動ベクトルの観測

移動体(車両)の移動ベクトルの観測は主にジャイロセンサや加速度センサ、レーザスキャナ、車載カメラなどを用いて実現されており、手法面では自身の移動を観測する手法と他者の移動を観測する手法に大別される.

## (1) 自身の移動を観測する手法

自身の移動を観測する手法として、ジャイロセンサを利用した事例 [6] では自律航法(Dead Reckoning Navigation)により車両の移動ベクトルを推定し、位置推定結果を補正している。加速度センサを利用した事例 [7] でも自律航法を用いており、歩行者の移動の観測を可能としている。ジャイロセンサや加速度センサを用いた自律航法はカーナビゲーションシステムに実装されるなど広く普及している手法であるが、航続距離が延びるに従って推定誤差が大きくなる点が課題である。これに対し、GPS [8] や可視光通信 [9] により提供される位置情報を用いて移動ベクトルの推定誤差を改善する手法が存在する。自律航法以外の手法として、レーザスキャナを用いた事例 [10] では目標物との距離データ系列を用いて車両の移動ベクトルを観測している。

#### (2) 他者の移動を観測する手法

他者の移動を観測する手法は主に車載カメラを用いており、ステレオカメラをロボットに搭載した事例 [11] では歩行者の移動を観測することで追従走行を実現しているが、視界不良時に利用できない点が課題である。RFID を用いた手法 [12] も存在し、車載のアンテナにより RFID を持つ歩行者の移動方向を推定しているが、正しく移動を観測できる範囲は車両の進行方向±10 度の範囲に限られる。

#### 3.3 位置推定手法

物体の位置推定には GPS や Wi-Fi, セルラシステム, DME (Distance Measuring Equipment)\*1, さらに RFID など様々な機器が利用されている。測位方式としては自身の位置を単独で測位する「単独測位」, 基準点・参照点を用いて自身の位置を測位する「参照測位」, 基地局などが他者の位置を測位する「第三者測位」に大別される。本節では、主に ToA (Time of Arrival), RSSI (Received Signal Strength Indication) などにより求めた距離を用いて位置推定を行う手法\*2の既存研究を紹介する。

## (1) 単独測位

GPS 単独測位 [14] は GPS における基本的な測位手法であり、ToA により求めた衛星との距離を利用して三辺測量 [15] により対象の位置を推定する. 改良型 PPP (Precise Point Positioning) [1] はこれを改良する手法であるが、距離観測において対流圏遅延や電離層の影響を取り除くことで誤差を改善しているため、不確実な誤差の生じる RSSI を用いた距離推定に対する同様の改良は困難である.

精度の高い DME を用いた事例 [3] では三辺測量を基本とした位置推定手法を提案し、飛行体による位置推定実験を行っている。実験結果としては水平方向の誤差に対して鉛直方向の誤差のバイアスが大きく、高さ方向において高い推定精度が要求される事例では無視できない値となっている。機器をより高密度に配置することで数の効果によるバイアスの改善は期待できるが、水平方向に対して高さ方向の推定誤差が大きくなる傾向は残るため、立体交差において車両の位置する道路を誤判断する課題は残る。

MIMO (Multiple Input Multiple Output) セルラシステムを用いた手法 [16] では複数のアンテナを持つ基地局と複数のアンテナを持つ移動局の間の ToA によりノード間の距離を推定し、移動局の位置推定を行っ

<sup>\*1</sup> DME は主に航空用の装置で、パルス信号が航空機と DME 地上 局の間を往復する時間により航空機と地上局の距離を測定してい る [13].

<sup>\*2</sup> これらの手法は Range-based 手法のうち Lateration 手法に 分類され、そのうち RSSI により求めた距離を用いる手法は Attenuation 手法とも呼ばれる.

ている. 通信範囲が 1.5 km 程度の環境で数 m レベル の位置推定精度が得られているが, 位置推定において 移動局上のアンテナの位置関係を考慮していないなど 改良の余地は残されている.

Wi-Fi の受信強度を用いた事例として PlaceEngine [2] があげられる。PlaceEngine ではノード位置と距離の 逆数を用いた重みづけにより対象の位置を推定しているが,同時に受信データの分布に着目して利用するノードを絞り込むことで位置推定精度を向上させている。さらに,過去の位置推定に用いた受信データを蓄積し,これを位置推定に利用することで推定誤差を改善している。一方で,過去の位置推定回数が少ない箇所では誤差が大きくなるため,通過台数の少ない箇所での位置推定精度は低くなり,車両の制御に必要な推定精度が得られないと予想される。

RFID を利用した手法も存在し, ROCRSSI [17] や動く ロボットを対象とした事例 [18], Passive タグを利用し た事例 [19] が存在する. ROCRSSI では grid-scan \*3を 用いて位置推定を行っている. Lim らによる動く口 ボットを対象とした事例 [18] では、ロボットに搭載さ れた受信機と床面に配置したパッシブ型のタグを用い, 取得した RFID の配置位置の最大値と最小値の平均 をとることでロボットの位置を推定している.物体の 移動速度や移動方向を求めるために位置推定を行って いるため、位置推定の段階では物体の移動を考慮して いない. 位置推定精度はタグを 0.1 m 間隔で三角格子 状に置いた環境で誤差が最小 0.009 m, 四角格子状に 0.1 m ごとに置いた環境での誤差の平均値は約 0.02 m である. Moeeni による Passive タグを利用した事例 は、床面に格子状に配置されたパッシブ型のタグを用 いて、取得した RFID の設置された位置の重心を求め ることで受信機の位置推定を行う手法である. 位置推 定を行う対象は低速で移動する物体であることから移 動の考慮は特にされておらず,位置推定精度はタグを 0.6 m または 0.3 m ごとに四角格子状で配置した環境 で、誤差の平均値が約 0.2 m である.

#### (2) 参照測位

GPS 相対測位 [14] は求める点と基準点での搬送波の位相を観測し、未知の点と基準点を結ぶ 3 次元ベクトルを求め、未知点の位置推定を行う手法である.これを改良した手法が DGPS (Differential GPS) [1] であり、基準点からの距離や、距離を補正するための情報を参照することで未知点での推定精度を向上させている.したがって、DGPS の利用には常時接続環境が必要であり、トンネル内などでの利用は難しい.

地上から疑似的に GPS 信号を送信するシュードライト [20] を活用した手法も DGPS 測位を応用した手法である。シュードライトを空港に設置して実験した結果では高さ方向の誤差が改善され、測位結果の 95%は高さ方向の誤差が 2m 以下であった。一方で、市街地での利用においてはマルチパス、シュードライト信号の干渉などによる測位精度の悪化が課題である。

RFID を用いた手法も多く存在し、それらは受信機に対して位置が固定されたタグを参照点として利用している。位置推定アルゴリズムに着目すると SSDV [21] は最小二乗法を利用した手法であり、LANDMARC [22] やそれを 3 次元空間に拡張した 3-D LANDMARC [23] は k 近傍法(k-nearest neighbor 法)を利用した手法である。

## (3) 第三者測位

物体の位置検出や追跡目的では他者の位置を測位する 手法が多くみられており、赤外線センサや画像センサ、 レーダ機器、RFID などが利用されている.

赤外線センサ [24] や画像センサ [25] を用いた手法は物体の追跡が主目的であるため、位置推定精度は数 m 程度である. 赤外線センサや画像センサは遮蔽に弱く、センサ機器と対象物の間に遮蔽物が存在すると位置推定は行えない.

レーダネットワーク [26] のようにレーダを利用した手法は精度の高い位置推定が可能であるが、得られる結果はレーダ機器を基準とした相対位置であるため、絶対位置への座標変換にはレーダ機器または対象物の絶対位置が既知であることが必要である。またレーダには ID のような機能がないため、対象物の位置や形状は認識できても個体を識別することはできない。

RFID を活用した手法にも詳細な位置推定を行う事例が存在し、その多くは参照タグを用いて実現している。RADAR [27] や PRM/KF [28] は最小二乗法に基づいた手法であり、参照タグの受信強度と未知点における受信強度から未知点の座標を求めている。ECOLOCATION [29] は実際に観測したデータとタグの位置関係を利用する手法で、これらの情報とあらかじめ定義された車両移動経路の順序木を比較することで物体の位置推定を行っている。

#### 3.4 既存手法と提案手法の関連性

移動の観測に利用する機器のうち、最も普及しているものはジャイロセンサ[6]や加速度センサ[7]であり、これらはセンサを車載するだけで利用可能である。レーザ[10]は路側に目標物を設置することが必要であり、目標物と車両の間に遮蔽物が存在すると利用できないため、道路全体での利用や複数台の車両が存在する条件での利用は難しい。車載カメラ[11]は視界不良に弱く、夜間・悪天候といった

<sup>\*3</sup> 位置推定を行う領域をあらかじめいくつかの格子状領域 (grid) に分割し、実際の受信状況から物体がどの grid に位置するかを推定する手法である.

条件では利用が困難である. RFID を用いた手法 [12] では対象物の移動を正しく観測できる範囲が狭いため,真横などに位置する対象物の移動観測には利用できない. よって,多様な環境での利用を考えるとジャイロセンサや加速度センサの利用が適当であり,現状ではジャイロセンサと加速度センサが1つのパッケージに実装されたジャイロ/加速度センサが安価で市販されていることから,提案手法ではジャイロ/加速度センサを利用している.

移動の観測手法に着目すると、自律航法は様々な機器に利用できる手法である。航続距離が延びることで誤差が蓄積する点が課題だが、この誤差は位置情報などを併用[8]、[9] することにより改善できるため自律航法の有用性は高いといえる。また車両は速度の変化が多いため、自律航法の中でも角速度と速度を中心に求める手法[6]よりも加速度[7]を中心に求める手法の方が適している。これ以外の自身の移動を観測する手法や他者の移動を観測する手法は利用する機器の特性への依存度が高いため、アルゴリズムを異なる機器と組み合わせることは難しい。よって、提案手法では自身の移動を観測する手法のうち、加速度を中心に求める方式の自律航法により車両の移動ベクトルを求めている。

位置推定に利用する機器に着目すると, GPS [1], [14] は トンネル内では利用できない点が課題である.シュードラ イト[20]はトンネル内でも利用できるが、マルチパスや信 号の干渉で測位精度が悪化する. 航空用 DME [3] を用いた 手法は高さ方向の誤差が大きくなりやすいため、立体交差 では正しく走行経路を認識できない. さらに GPS 衛星や シュードライト, DME 機器は高価なため, 設置数の増加に よる推定精度の改善は困難である. Wi-Fi[2] やセルラシス テム [16] は価格的には高密度で配置できるものの、電波干 渉の問題があるため数 m 間隔での配置は実用的ではない. 画像センサ [25] や赤外線 [24] は遮蔽物が存在すると基本的 には位置推定が行えないため、複数台の車両が存在する環 境での利用には不向きである. レーダ [26] を用いて推定さ れる位置は相対位置であり、絶対位置の取得には座標変換 が必要だが、レーダは反射物の個体を識別できないため単 独測位では絶対位置の取得が困難である. RFID は単独測 位,参照測位,相対測位いずれの手法でも利用でき,アク ティブ型でも数千円と比較的安価である. またアクティブ 型 RFID は自発的に電波を発信するため干渉が発生しにく く,数m間隔での配置が可能である.したがって,配置箇 所の制約内であれば推定精度の改善を目的として配置間隔 を調整することが容易なため、提案手法ではアクティブ型 RFID を採用する.

位置推定の方式について考えると,車両が移動する環境では車両に対して固定的な位置のタグは存在しないため,RFIDによる参照測位[21],[22],[23]の応用は難しい。また,基準点において電波などの観測を必要とする手

法[14],[20] は基準点の設置費用が高く,基準点を自由に増やすことは難しい.第三者測位のうち詳細な位置を推定する手法[27],[28] も受信機に対して固定的な位置の参照点を利用しているため,移動する車両が自身の位置を測位する目的での応用は困難である.ゆえに移動する車両で利用しやすく,高い推定精度が期待できる手法は単独測位であり,提案手法ではこれを採用する.

位置推定に利用するデータに注目すると,正確と思われ る受信データの比率は位置推定を行う箇所によって異なる ため, 固定的な k 近傍法 [22], [23] を用いたデータの絞り 込みでは必ずしも推定精度を向上させることができない. 受信状況も気象条件や道路の混雑度により変化するため, 事前に計測した受信データ [17], [22], [23] や蓄積した受信 データ [2] を参照する手法はすべての場合において有効性 が高いとは限らない. あらかじめ定義した移動の順序木を 利用する手法 [29] は位置推定の対象範囲が広くなると順序 木が複雑になりすぎるため、道路全体での応用は困難であ る. よって, 道路環境で移動体の位置推定に有用なデータ は実際の受信データのように位置推定時に計測するデータ や、各機器の配置位置のようにほとんど変化しないデータ に限定される. 提案手法では実際の受信データ, ジャイロ/ 加速度センサの計測値と RFID の配置位置、そして車載ア ンテナの位置関係を用いて位置推定を行う.

位置推定精度については、RFIDを用いた既存手法 [18], [19], [23] などで 1 m 以内の位置推定誤差が実現されている。しかし RFID の配置に具体的な制約条件のある環境での検証は行われていないため、道路環境で同等の推定精度が実現できるかは未知である。高さ方向の精度に着目すると、三辺測量を基本とした手法 [3], [14] では水平方向の誤差と比較して高さ方向の誤差が大きくなる傾向があり、立体交差などでは車両の位置する道路を正しく認識できない場合がある。RFID の位置など路面 (付近) に存在する点と、重みづけ関数を用いた位置推定手法 [18], [19] では、RFID を設置した面の付近を中心に位置計算が行われるため、高さ方向の誤差が生じにくい。提案手法で用いる内外分点は路面付近に存在する点であり、これに重みづけを行って位置推定を行うため高さ方向の誤差が抑制できる。

このように俯瞰すると、移動する車両に適用でき、道路空間全体で利用可能な既存手法は少なく、Lim らによる事例 [18] や、Moeeni による事例 [19] などに絞られる。これらの手法はパッシブ型のタグを用い、低速で移動する物体を対象とした手法であるため、アクティブ型タグを利用し、車両を対象とする場合には受信時刻の差による車両位置の変化を考慮する必要がある。位置推定アルゴリズム自体も簡素であるが、RFID を格子状で高密度に配置した環境では高い推定精度を実現している。これらの手法に対し、提案手法はアルゴリズムの改良と車両の移動への対応により2.2 節の制約条件の下で高い推定精度の実現を目指す。

## 4. 提案手法

## 4.1 提案手法の特徴

2章でまとめた要求条件と 3.4 節でまとめた関連研究の 現状に対し、提案手法は以下の特徴によりこれらを解決 する.

## (特徴-1) 内外分点の利用

提案手法では RFID の各組合せに対し内外分点を求め、これを位置推定に利用している。Place-Engine [2] のような重みづけ平均では誤差が大きくなりすぎると考え、RFID-アンテナ間の距離をより考慮した内外分点を用いることで精度を向上させる手法を提案する(制約-2への対応)。本手法は GPS [1] と比較して計算負荷が小さく、車載可能な計算機器でも十分利用可能であると考えられる。

また内外分点は RFID を結んだ直線上に位置するため、特定の平面に依存しない位置推定が実現できる (制約-3への対応).

### (特徴-2) 次数の異なる重みづけ関数の利用

提案手法では複数の内外分点を次数の異なる重みづけ関数により統合し、重みづけ次数の増加による統合結果の収束をもとにアンテナの位置を推定する。この重みづけにおいて、車両の近くに位置する RFID により求められた内外分点に、より大きなウェイトを与えており、重みづけ関数の次数を増加させることで車両から遠い RFIDにより求められた内外分点が次第に除外される。このように提案手法での絞り込みには固定的な条件を用いる手法と比較して精度の高い絞り込みが可能である。

## (特徴-3) 車両の移動を考慮

提案手法ではジャイロ/加速度センサから得られるデータから車両の移動ベクトルを推定し、これを用いて車両の移動を考慮した位置推定を実現する(制約-1への対応). 対象が車両であり加減速の多い環境であるため、自律航法のうち加速度を中心に求める手法により移動ベクトルを推定している.

この移動ベクトルを用いて受信時刻の差による 車両位置のずれの補正と、位置推定結果の補正を 行っている。車両の移動ベクトルを重視して最 終的な位置推定結果を求める手法は多くみられる が、移動ベクトルは航続距離の延長により誤差が 累積するため、位置情報による補正などで誤差を 削減する必要がある。これに対し、提案手法では RFID による位置推定とセンサにより求まる移動 ベクトルの精度を同程度として扱うことで相互補 完を行い、最終的な推定結果に反映させている.

## (特徴-4) 複数のアンテナを車載

提案手法では車両には複数のアンテナを設置し、 これらの位置関係を基に車両の位置推定を行っ ている.車載したアンテナの数を増加させるこ とで、推定精度の向上が期待できる.

#### 4.2 提案手法の実現手法

提案する車両位置推定は,以下の手順により実現する. まず、路側や車線境界に RFID を一定間隔で配置する. こ の配置間隔を短くすることで位置推定精度の向上が期待で きる. 提案手法で用いる固定的データは RFID の ID 番号 と設置位置(緯度・経度・標高)の対応のみで、車上のシ ステムに格納する.この情報を用いて、受信したRFIDの ID 番号から RFID の設置位置(緯度・経度・標高)を取 得する.また、車載の複数のアンテナにより路面に設置し た RFID から定期的に発信される電波の受信強度を観測す る. この受信強度を利用してアンテナ-RFID 間の距離を 推定し、この距離と RFID の設置位置を用いて車両の位置 を推定する. 車両の移動ベクトルはジャイロ/加速度セン サにより得られた加速度を中心に求めている. 計測値はセ ンサ座標系での値であるため, 重力加速度の方向の参照を 中心にこれを測地座標系\*4での値に変換\*5し、変換後の加 速度を積分することで移動ベクトルを求めている.

## 4.3 提案手法のアルゴリズム

提案手法をコード化したものが表 1 であり、各ステップ の概要は以下のとおりである. はじめに、ある基準時刻に より車両位置の推定を行うため、車両の移動ベクトルを用 いて RFID の位置を仮想的に移動し、車両の位置を基準時 刻での位置に固定する. 各 RFID の組合せに対する内外分 点は2つのRFIDの位置と、それぞれのRFIDからアンテ ナまでの距離を用いて求める. 各アンテナの位置は複数の 内外分点を次数の異なる重みづけ関数により統合し、統合 結果の変化をもとに動的に推定する. この動的重みづけに おいて、推定した距離の短い RFID から得られた内外分点 には大きいウェイトが与えられ、重みづけ関数の次数を増 加させることで距離の大きい RFID により得られた内外分 点は次第に除外される. 車両の中心位置はアンテナの推定 位置と、それらの位置関係を利用して推定し、車両の移動 ベクトルを用いて補正する. 補正後の値が提案手法におけ る車両位置の推定結果である.

以降では、必要に応じて以下の点・ベクトルを用いて提 案手法のアルゴリズムを説明する.これらの点・ベクトル

<sup>\*4</sup> 一般的な地図で用いられている,緯度・経度・標高により示される座標系である.

<sup>\*5</sup> 水平面での座標変換にはジャイロセンサを用いている.

#### 表 1 提案する位置推定手法の仮想コード

Table 1 Pseudo-code of the proposed localization method.

```
・送信タグの ID から、RFID の設置されている位置座標を求める
・受信時刻と計算基準時刻の差分に応じ、車両の移動ベクトルを利用して
 RFID の設置されている位置座標を仮想的に移動する
for(int r=0;r < 車載された受信アンテナの数;r++){
//アンテナごとに実行する処理
while(受信データから2つを選んだ組合せをすべて行う){
  ・受信強度から RFID - アンテナ間の距離を求める
  ・求めた距離と RFID の位置から内外分点を求める
 ・重みづけ関数の次数=0
while(求めたアンテナ位置が収束するまで){
 //実用的には計算時間を位置推定計算の間隔以内に収めるため,
 //次数の上限設定などが必要である
 while(すべての内外分点に対して){
    · "距離 A", "距離 B"=内外分点を求める際に利用した RFID-アンテナ間の距離
   ・ウェイト=("距離 A" × "距離 B") の -(重みづけ関数の次数) 乗
  ・求めた内外分点を、設定したウェイトで統合することによりアンテナの位置座標を計算する
  ・重みづけ関数の次数を加算
}
・すべての受信アンテナの位置座標を用いて車両中心位置を計算する
・前回の推定位置と観測した車両の移動ベクトルを用いて求めた車両中心位置を補正する
・補正された車両中心位置を {緯度,経度,標高} の形式で返す
```

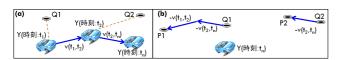


図 1 車両の移動ベクトルを用いた RFID 位置の移動((a):実際は 車両が移動,(b): 仮想的に RFID を移動)

Fig. 1 Adjusted RFID positions by using vehicular displacement ((a): actual situation, (b): imaginary situation).

は測地座標系に基づく3次元座標で表現される.

ベクトルの基準となる原点:O

時刻  $t_n$  から時刻  $t_{n+1}$  の間に車両(移動体)が移動したベクトル: $\overrightarrow{v(t_n,t_{n+1})}$ 

h 番目の RFID  $(RFID_h)$  の,実際に設置された位置: $Q_h$  i 番目の受信アンテナの位置: $X_i$  (実際の位置), $X_i'(m)$  (推定位置,m は重みづけ関数の次数)

時刻 t における車両中心の位置: $C_t$  (実際の位置),  $C_t'$  (推定位置),  $C_t''$  (推定位置  $C_t'$  を,移動ベクトル  $\overline{v(t_{n-1},t_n)}$  をもとに補正した位置)

(I) 車両の移動ベクトルを用いた車両位置の固定/RFID 位置の移動

アクティブ型の RFID を用いたシステムでは各 RFID の電波発信時刻が異なるため、車両 Y が移動する場合には RFID からの電波を受信する位置も図  $\mathbf{1}(a)$  のようにそれぞれ異なる.ここで相対速度を利用し、図  $\mathbf{1}(b)$  のように車両 Y の代わりに  $Q_1$ ,  $Q_2$  に設置された RFID をそれぞれ  $P_1$ ,  $P_2$  へ仮想的に移動させることで、車両の位置を位置計算の基準時刻  $t_n$  での位

置に固定できる. これを点  $Q_h$  に設置された RFID からの電波を車両で受信した時刻が  $t_h$  だと一般化すると,移動後の点  $P_h$  は車両の移動ベクトル  $\vec{v}$  を用いて式 (1) のように求められる.

$$\overrightarrow{OP_h} = \overrightarrow{OQ_h} - \overrightarrow{v(t_h, t_n)} \tag{1}$$

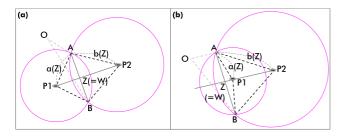
提案手法では点 $Q_h$  に設置された RFID を点 $P_h$  に仮想的に平行移動し、移動後の点 $P_h$  を用いて各過程におけるモデル構築を行う。

移動ベクトル で はジャイロ/加速度センサにより得られる加速度、角速度から推定する. 具体的には、加速度の値を重力加速度の方向や角速度を参照\*6することで、センサ座標系から測地座標系に基づく座標での値に変換し、変換後の加速度を積分して移動ベクトル でを求める.

センサにより得られる値は細かく振動したり,異常値を観測したりすることがあるため,ジャイロ/加速度センサのデータを式 (2) に示すフィルタを通すことにより安定化した値を利用する. 時刻  $u_n^{*7}$ におけるジャイロ/加速度センサデータの測地座標系での読み取り値  $D(u_n)$  とフィルタ後の値  $D'(u_n)$  の関係は式 (2) のとおりで,係数 k (0 < k < 1) は評価を行う際のパラメータとしている.

<sup>6</sup> 水平方向の回転のみ角速度を用いて座標変換している.

 $v_n = v_{n-1}$  はセンサの計測間隔である.



内外分点と RFID-アンテナ間の距離を半径とする円の位置関 係 ( は RFID を示す)

Fig. 2 Relationship between dividing points and circles whose radius is equal to distances between RFID and receiver ( shows RFIDs).

$$D'(u_n) = \begin{cases} D(u_n) & (u_n = 0) \\ k \cdot D(u_n) + (1 - k)D(u_{n-1}) & (u_n > 0) \end{cases}$$
(2)

## (II) 2 つの RFID による内外分点の決定

提案手法では、観測した受信強度と自由空間損失の公 式 [30] を変形した式 (3) を用いて図 2 における  $P_1A$ ,  $P_1B$ ,  $P_2A$ ,  $P_2B$ の各距離を推定する. ここで r(1) は 予備実験などにより得られた値を与えるものとし、本 論文では -70 dBm とする.

$$d = 10^{((r(1)-r(d))/20)} (3)$$

(:: d:求める距離 (m), r(d):観測した受信強度 (dBm), r(1): 距離 1 m の受信強度 (dBm))

図 2 において、線分  $P_1A$  と  $P_1B$ 、線分  $P_2A$  と  $P_2B$ はそれぞれ直線  $P_1P_2$  に関して対称である. ゆえに, 点 A, 点 B は直線  $P_1P_2$  について対称であり、これは 直線  $P_1P_2$  を含むすべての平面上で成立する. よって. 点 A, B の中点 W はつねに直線  $P_1P_2$  上に存在し、直 線  $P_1P_2$  を含む任意の平面上で計算可能である. この 性質に着目し、提案手法では中点 W を求める内外分 点Zとしており、以下の式により求める。

$$|\overrightarrow{P_1Z}| = \begin{cases} |\overrightarrow{P_1A}| \cdot \cos \angle AP_1P_2 \\ (\cos \angle AP_1P_2 \ge 0) \\ |\overrightarrow{P_1A}| \cdot \cos(\pi - \angle AP_1P_2) \\ (\cos \angle AP_1P_2 < 0) \end{cases}$$

$$|\overrightarrow{P_2Z}| = \begin{cases} |\overrightarrow{P_2A}| \cdot \cos \angle AP_2P_1 \\ (\cos \angle AP_2P_1 \ge 0) \\ |\overrightarrow{P_2A}| \cdot \cos(\pi - \angle AP_2P_1) \\ (\cos \angle AP_2P_1 < 0) \end{cases}$$

$$(5)$$

$$|\overrightarrow{P_2Z}| = \begin{cases} |\overrightarrow{P_2A}| \cdot \cos \angle AP_2P_1\\ (\cos \angle AP_2P_1 \ge 0)\\ |\overrightarrow{P_2A}| \cdot \cos(\pi - \angle AP_2P_1)\\ (\cos \angle AP_2P_1 < 0) \end{cases}$$
(5)

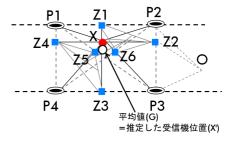


図 3 内外分点 Z と推定したアンテナ位置 X', 正確なアンテナ位置 *X* の関係 (**●** は RFID を示す)

Fig. 3 Positional relationship between receivers and pair-wise positions: Z ( $\Longrightarrow$  shows RFIDs).

$$\therefore \overrightarrow{OZ} = \begin{cases}
\frac{|\overrightarrow{P_2Z}| \cdot \overrightarrow{OP_1} + |\overrightarrow{P_1Z}| \cdot \overrightarrow{OP_2}}{|\overrightarrow{P_1P_2}|} \\
(\cos \angle AP_1P_2 \ge 0) \\
\wedge (\cos \angle AP_2P_1 \ge 0)^{*8} \\
\frac{|\overrightarrow{P_2Z}| \cdot \overrightarrow{OP_1} - |\overrightarrow{P_1Z}| \cdot \overrightarrow{OP_2}}{|\overrightarrow{P_2Z}| - |\overrightarrow{P_1Z}|} \\
(\cos \angle AP_1P_2 < 0) \\
\vee (\cos \angle AP_2P_1 < 0)^{*9}
\end{cases} (6)$$

## (III)内外分点群からのアンテナ位置の推定

(II) で求めた内外分点について考えると、すべての内 外分点  $Z_i$  (i=1,2,...) は図 2 のように 2 つの RFID とアンテナ間の距離  $a(Z_i)$ ,  $b(Z_i)$  によって求まる. こ れらの距離  $a(Z_i)$ ,  $b(Z_i)$  が小さい内外分点は求めるア ンテナの位置 X に近い点であるため、 $a(Z_i)$ 、 $b(Z_i)$  の より近い内外分点により大きいウェイトを与えること でこれらを統合し、アンテナの位置を推定することを 考える. すると, 点  $Z_i$  に対するウェイトは重みづけ 関数の次数mを用いて $(a(Z_i) \cdot b(Z_i))^{(-m)}$ となる。ゆ えに、アンテナの位置 X'(m) は式 (7) のように推定で きる.

$$\overrightarrow{OX'(m)} = \frac{\sum_{i=1}^{|Z|} \{(a(Z_i) \cdot b(Z_i))^{(-m)} \cdot \overrightarrow{OZ_i}\}}{\sum_{i=1}^{|S|} (a(Z_i) \cdot b(Z_i))^{(-m)}}$$

$$= \sum_{i=1}^{|Z|} \{w(Z_i) \cdot \overrightarrow{OZ_i}\} \tag{7}$$

(∵ |Z| = 内外分点の総数)

式 (7) より、次数 m の増加により受信強度から求めた 距離の誤差を丸められると期待できる. また、 mの増 加により  $\overrightarrow{OX'(m)}$  の収束する位置は  $(a(Z_i) \cdot b(Z_i))$  の 値が小さく、かつ近似したいくつかの内外分点(図3 の  $Z_1, \ldots, Z_6$ ) を統合した点 (図 3 の平均値:G) で ある. これらの点は、たとえば図3のような位置関係 にあり、平均値Gと正確なアンテナ位置Xは近似し た点であると推測できる.よって、提案手法では平均 値 G を推定したアンテナ位置 X' とする. さらに、式

図 2(a) のケース

図 2(b) のケース

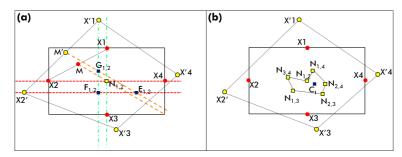


図 4 アンテナ位置 (実際の位置 X, 推定した位置 X') と車両中心位置 C の関係 (同種類の 点線は互いに平行である)

Fig. 4 Positional relationship between receivers and center of vehicle (same type of dashed lines indicate that they are parallel).

(7) に複数の数値例を代入することで,m の増加により  $w(Z_i)^{*10}$ が漸近的に収束する傾向を確認した.よって  $\overrightarrow{OX'(m)}$  の収束は漸近的であると推定し,提案手法では  $|\overrightarrow{X'(m)X'(m-1)}|$  があらかじめ設定した閾値を下回るまで m の値を増加させている\*11.位置推定精度の最終目標は  $0.1\,\mathrm{m}$  であるから,この 1/10 である  $0.01\,\mathrm{m}$  を  $|\overrightarrow{X'(m)X'(m-1)}|$  の閾値とする.

#### (IV)アンテナ位置からの車両中心位置の推定

(III) において推定したアンテナの位置  $X_1', X_2', \ldots$ , 実際のアンテナの位置  $X_1, X_2, \ldots$  と実際の車両中心位置 C の位置は、図 4 のような関係にある。ここで図 4 (a) のように  $X_1', X_2'$  について考えると,推定したアンテナ位置  $X_1'$  から車幅方向( $\overline{X_1C}$ )に平行に引いた直線  $\overline{X_1'F_{1,2}}, X_2'$  から車長方向( $\overline{X_2C}$ )に平行に引いた直線  $\overline{X_2'E_{1,2}}, X_1', X_2'$  の中点 M' から対角線方向( $\overline{MC}$ )に平行に引いた直線  $\overline{M'E_{1,2}},$  これらの 3 直線がなす 三角形  $\Delta E_{1,2}F_{1,2}G_{1,2}$  の平均値  $N_{1,2}$  (以降ではこれを候補点と呼ぶ)が,推定したアンテナ位置  $X_1', X_2'$  により推定される車両中心位置となる.

$$\overrightarrow{ON_{1,2}} = \frac{1}{3} \overrightarrow{OE_{1,2}} + \frac{1}{3} \overrightarrow{OF_{1,2}} + \frac{1}{3} \overrightarrow{OG_{1,2}}$$
 (8)

 $(:: M'G_{1,2}//MC, X'_1G_{1,2}//X_1C)$ 

この候補点 N を図 4 (b) のように (III) で位置が推定できたすべてのアンテナの組合せに対して求め、それらの平均値(幾何重心)を時刻 t における車両中心の推定位置  $C_t'$  とする.

$$\overrightarrow{OC_t'} = \sum_{i=1}^{|X'|} \sum_{j=i+1}^{|X'|} \frac{\overrightarrow{ON_{i,j}}}{0.5|X'||X'-1|}$$
(9)

(∵ |X'| = 位置が推定できた車載アンテナの総数)

(V) 車両の移動ベクトルを利用した推定結果の補正 (IV) で推定した車両中心位置 C' を、図  $\mathbf{5}$  のように車 両の移動ベクトルを用いて補正する。提案手法では補

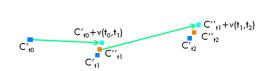


図 5 車両の移動ベクトルを用いた車両中心位置の補正

Fig. 5 Adjustment method by vehicular movement for center of vehicle.

正前の推定位置 C' と移動ベクトル  $\vec{v}$  を相互に補完するため,それぞれの精度を同等であると扱って推定位置を補正する.したがって,時刻: $t_n$  における補正後の推定位置: $C''_t$  は以下の漸化式により求められる.

$$\overline{OC_{t_0}^{"}} = \overline{OC_{t_0}^{"}} \quad (\because \overline{v(t_0, t_0)} = (0, 0, 0)) \qquad (10)$$

$$\overline{OC_{t_n}^{"}} = \frac{\overline{OC_{t_n}^{"}} + (\overline{OC_{t_{n-1}}^{"}} + \overline{v(t_{n-1}, t_n)})}{2} \quad (\because n > 0)$$
(11)

提案手法では、補正後の $C_{t_n}^{"}$ が時刻 $t_n$ における最終的な位置推定結果である。

## 5. 屋外環境における実験と評価

#### 5.1 実験の実施手法

提案手法の評価にあたり,車両の両側面に設置した web カメラと道路上に設置された計測用テープを用いて路肩からの距離を計測し,この距離をもとに実際の車両位置  $C_t$  を把握する。この  $C_t$  と,補正後の車両推定位置  $C_t''$  の差を位置推定誤差とし,この数値で評価を行う。また,誤差の平均値はデータの両端に位置する数値を除いて求めている。これは車両全体が RFID の設置された領域に到達する前の推定結果であり,位置推定を行うには不十分な環境で得られたデータだからである。

車両における各機器の配置を図 6 に,使用した機材は表 2 に示す.屋外実験は総合研究大学院大学葉山キャンパス構内の図 7 に示す道路で実施した.評価に利用したパラメータの値は表 3 のとおりである.このうち,位置計算間隔は何秒おきに位置推定の計算を実行するかを示す値であり,センサ計測間隔はジャイロ/加速度センサの計測間隔である.

<sup>\*</sup> $^{*10}$  この  $w(Z_i)$  は,各  $Z_i$  に対するウェイトをその総和が 1 になるよう正規化したものである.

<sup>\*&</sup>lt;sup>11</sup> 実用的には計算時間を位置推定計算の間隔以内にするため,次数 m の上限の設定などが必要である.

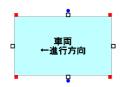


図 6 車載機器の配置概要 (■, □…受信アンテナ, ●…web カメラ)

Fig. 6 Placement of equipment on the vehicle (■, □···receiver antenna, ●···web camera).

表 2 使用機器一覧

Table 2 List of equipments.

RFID タグ/	NTT-AT 社製
受信機システム	NIRE-Type2
ジャイロ/	ZMP 社製
加速度センサ	e-nuvo IMU-Z Lite
web カメラ	Buffalo 社製 BSW20KM02HBK



	裏側コース	表側コース
形状	直線	曲線
道路幅	約 3.75 m	約 5 m
最高走行速度	約 30 km/h	約 35 km/h
走行距離*12	約 40–60 m	約 45-60 m

図7 屋外実験実施箇所と各コースの概要

Fig. 7 Locations of field experiment and their specification.

表 3 パラメータ一覧

Table 3 List of parameters.

道路形状	表側コース,			
(図 7)	裏側コース			
RFID 配置間隔	0.25, 0.5, 1,			
(路側両側に配置)	2, 5, 10, 20 (m)			
位置計算間隔				
$(t_n - t_{n-1})$	0.5, 1, 2, 3 (sec.)			
	4本 (図6の■),			
車載アンテナ数	8本			
フィルタ係数 k	0.01, 0.05, 0.1, 0.3			
センサ計測間隔	1/30  (sec.)			
$(u_n - u_{n-1})$	(固定)			
電波発信間隔	3 (sec.) (固定)			
RFID の通信距離	最大 40 (m) (固定)			

## 5.2 提案手法の評価

図8に道路形状による誤差の違いを,表4にRFIDの配置間隔ごとの位置推定誤差を示す.図8の横軸は時刻であり,車両の走行位置を実験開始からの経過時間により表

した値である。これを表 4 のように整理すると、配置間隔が 2 m 以下の場合でも位置推定誤差の最大値が 4–6 m と大きい値を示す例が発見された。

車線方向の誤差を分析した結果が図 9 であり、車載アンテナ数が 8 本,RFID 配置間隔が 1 m 以内の場合において,第 3 四分点はすべてのコースで 1.5 m 程度(車線幅の半分以内)であった.裏側コースにおいて,RFID を 0.5 m 間隔で配置した場合(図 9 中の ①)には最大で 2.4 m 車線方向の誤差が存在しているが,受信データを RSSI により求めた距離をもとに絞り込む\*13ことでこの値を 1.7 m(車線幅の半分程度)に改善できた.また,これ以外の RFID 配置間隔が 1 m 以内のケースでは,誤差の最大値は各コースの車線幅\*140半分以内であった.よって,提案手法は車両が走行する車線の推定がおおむね可能であると結論づけた.

高さ方向の誤差は RFID を  $5 \,\mathrm{m}$  以内の間隔で配置した場合においてすべて  $1 \,\mathrm{m}$  以内であり、車両の走行経路を識別するために必要な精度を達成している.

図 10 は位置計算間隔と位置推定誤差の関係を示したもので、位置計算間隔を短くすると推定精度が高くなった。位置推定との相互補完により軽減されてはいるものの、移動ベクトルの推定誤差が計算間隔の延長により増大する傾向は残っていることが原因と考えられる。一方で、位置計算間隔を短くすると1回の位置推定において取得するタグの数が少なくなるため、位置推定が行えないケースも増加する。具体的には、配置間隔が5mの場合、位置計算間隔を1秒から0.5秒に縮めることで位置推定の行えないケースが大きく増加した。同様に、RFIDの配置間隔が10mの場合では計算間隔が2秒を、配置間隔が20mの場合では計算間隔が3秒を下回ると位置推定が行えないケースが大きく増加した。

受信したタグの個数と提案手法の PC/AT 互換機\*15における計算時間との間に相関性は見られず、位置計算に要した時間の最大値は 80 ミリ秒、平均値は約 20 ミリ秒であった. 位置計算の間に車両が進む距離は車速 100 km/h でも最大 2.2 m 程度であり、リアルタイムな位置推定がおおむね実現できた.

#### 5.3 既存手法との比較

提案手法の推定精度の特性を明らかにするため,既存の 位置推定手法との比較や,既存の重みづけ手法との比較, さらにアルゴリズムが対象とする次元数に着目した評価を 行った.

<sup>\*12</sup> RFID 個数の都合により、RFID の配置間隔に応じて距離を変更 している.

<sup>\*13</sup> 具体的には、RSSI から推定した距離が 40 m を超えるデータを 位置推定から排除した。

 $<sup>^{*14}</sup>$  表側コースの車線幅は  $5\,\mathrm{m}$  程度, 裏側コースの車線幅は  $3.5\,\mathrm{m}$  程度である.

<sup>\*15</sup> OS は windows7(64 bit)を, CPU は AMD Athlon64 X2(2.6 GHz, Dual-core)を, メモリは 4 GB をそれぞれ搭載している.

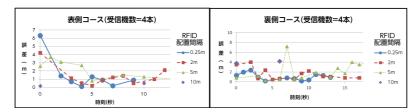


図 8 道路形状と配置間隔による位置推定誤差の比較(位置計算間隔 = 1 秒)

Fig. 8 Comparison of localization accuracy: difference caused by road shape and placement interval (estimation interval =  $1 \sec$ .).

表 4 配置間隔ごとの推定精度(位置計算間隔 = 1 秒)

**Table 4** Summary of localization accuracy (estimation interval = 1 sec.).

	-	表側コース		裏側コース			
	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	
配置間隔:0.25 m							
アンテナ数:4	$0.1\mathrm{m}$	$0.9\mathrm{m}$	$4.2\mathrm{m}$	$0.2\mathrm{m}$	$1.0\mathrm{m}$	2.4 m	
配置間隔:0.25 m							
アンテナ数:8	$0.1\mathrm{m}$	$0.8\mathrm{m}$	$6.3\mathrm{m}$	$0.1\mathrm{m}$	$0.7\mathrm{m}$	2.2 m	
配置間隔:0.5 m							
アンテナ数:8	$0.3\mathrm{m}$	$0.8\mathrm{m}$	$1.6\mathrm{m}$	$0.1\mathrm{m}$	$0.7\mathrm{m}$	3.3 m	
配置間隔:1 m							
アンテナ数:8	$0.2\mathrm{m}$	$0.8\mathrm{m}$	$1.6\mathrm{m}$	$0.2\mathrm{m}$	$0.8\mathrm{m}$	2.7 m	
配置間隔:2 m							
アンテナ数:4	$0.2\mathrm{m}$	$0.9\mathrm{m}$	$4.2\mathrm{m}$	$0.5\mathrm{m}$	$1.5\mathrm{m}$	$3.5\mathrm{m}$	
配置間隔:2m							
アンテナ数:8	$0.2\mathrm{m}$	$1.0\mathrm{m}$	$4.0\mathrm{m}$	$0.2\mathrm{m}$	$1.0\mathrm{m}$	3.6 m	
配置間隔:5m							
アンテナ数:4	$0.7\mathrm{m}$	$1.8\mathrm{m}$	$3.7\mathrm{m}$	$0.3\mathrm{m}$	2.1 m	$7.2\mathrm{m}$	
配置間隔:10m							
アンテナ数:4	位置推定できた箇所が5未満であるため、計算不可						
配置間隔:20m							
アンテナ数:4	1 秒間隔では位置推定できた箇所なし						

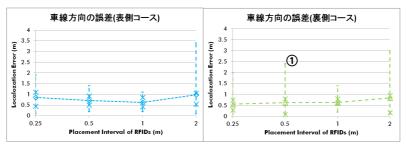


図 9 車線方向の位置推定誤差(位置計算間隔 = 1 秒,アンテナ本数 = 8 本,"×" は四分点 を示す)

Fig. 9 Localization accuracy in lane-width direction (estimation interval =  $1 \sec$  and No. of antennas = 8. " $\times$ " indicates quartile).

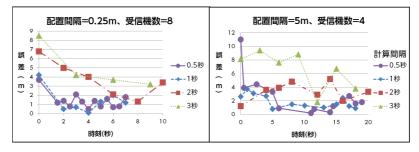


図 10 位置計算間隔の差による位置推定誤差の比較

 $\mbox{\bf Fig. 10} \quad \mbox{Comparison of localization accuracy: difference caused by estimation computation interval.}$ 

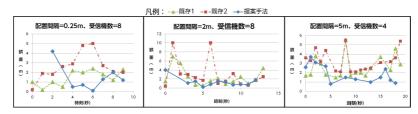


図 11 提案手法と既存手法による,位置推定誤差の比較(位置推定間隔 = 1 秒)

Fig. 11 Comparison of localization accuracy: proposed method and existing methods (estimation interval = 1 sec.).

#### 表 5 手法ごとの位置推定誤差(位置推定間隔 = 1 秒)

**Table 5** Summary of localization accuracy in each method (estimation interval = 1 sec.).

	配置間隔 = 0.25 m		配置間隔 = 2 m			配置間隔 = 5 m			
	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値
提案手法	0.1 m	0.9 m	4.2 m	0.2 m	1.0 m	4.0 m	$0.7\mathrm{m}$	1.8 m	3.7 m
既存 1	$0.2\mathrm{m}$	$1.4\mathrm{m}$	$2.4\mathrm{m}$	$0.4\mathrm{m}$	2.3 m	$5.5\mathrm{m}$	$0.8\mathrm{m}$	$2.6\mathrm{m}$	$5.5\mathrm{m}$
既存 2	$0.2\mathrm{m}$	$3.0\mathrm{m}$	4.8 m	$0.4\mathrm{m}$	$3.3\mathrm{m}$	10 m	$2.1\mathrm{m}$	3.1 m	5.5 m

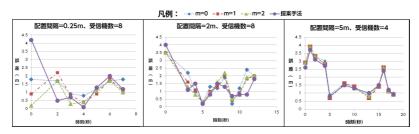


図 12 重みづけ手法による,位置推定誤差の比較(位置計算間隔 = 1 秒)

Fig. 12 Comparison of localization accuracy: difference between weighting methods (estimation interval  $= 1 \, \text{sec.}$ ).

#### (比較-1) 移動体を対象とした既存手法との比較

3.4 節で述べたように、提案手法は Moeeni による事例(図 11、表 5 では「既存 1」と表記)や Lim らによる事例(図 11、表 5 では「既存 2」と表記)を発展させた内容である。したがって、これらの手法と比較することで提案手法での改良効果が観測できるため、同様の環境で既存手法の位置推定誤差を評価した。パラメータは提案手法における位置推定において使用したものと同一であり、実装は既存手法のアルゴリズムを、提案アルゴリズムのうち(II)-(V)で述べた計算過程と入れ替えることにより行った。

結果は図  $11^{*16}$ , ならびに表 5 のとおりであり, 本実験で得られた既存手法の位置推定誤差は,それぞれの文献 [18], [19] で示された誤差を RFID の配置間隔に応じて線形拡大した値と近似している.よって提案手法の採用によって Moeeni の事例に対しては平均値として約 31-55%の誤差を, Lim らの事例に対しては約 40-70%程度の誤差を

それぞれ削減したと判明した.

## (比較-2) 重みづけ手法による比較

位置推定に用いるウェイトを動的(重みづけ関数の次数mの値を固定しない)としていることは提案手法の特徴の1つである。そこで,次数mの値による位置推定精度を評価することで固定的な重みづけ手法との比較を行う。ここで,一般的に用いられているmの値として,m=0とm=2のケースで比較する。m=0のケースはMoeeniによる手法[19]のように位置の単純平均を求める手法である。m=2のケースはk近傍法に基づいた手法などで用いられている手法であり $^{*17}$ ,同時に受信強度と距離の関係性 $^{*18}$ にも従った手法である。

評価結果は図 12 に示すとおりである。[m = 固定せず」は提案手法の値であり、誤差の値は他の手法とほぼ同じか、より小さい値をとることがほ

<sup>\*&</sup>lt;sup>16</sup> 配置間隔が 0.25 m のケースにおいて, 提案手法は時刻 0, 時刻 1 における位置推定はできていない.

<sup>\*</sup> $^{17}$  たとえば、LANDMARC [22] においては受信強度をもとに位置を求める対象と参照タグとの間の距離を推定し、この距離を 2 次の重みづけ関数により重みづけをしている。

<sup>\*18</sup> 一般的に, 受信電界強度 (V/m) は距離 (メートル) の二乗に反 比例して減衰する [30].

とんどであった。そのうえで、提案手法で用いた 重みづけ手法により、位置推定精度が 0.5-1 m 程 度改善されている箇所も存在している。このた め、提案手法の重みづけ手法は、他の重みづけ手 法と比較して誤差の最小値を改善する効果があ ると確認できた。

## (比較-3) 次元数による比較

提案手法は3次元を前提として提案された手法 であり、2次元を前提とした手法とは位置推定精 度の特性が異なると考えられる. そこで, 提案手 法をもとに、1) 推定した距離を2次元空間での 値と見なす、2) 位置計算において高さ方向の成 分を考慮しない, などの修正を行った「平面化ア ルゴリズム」との比較を行った. 一様な平面に おいては, 道路勾配の存在する箇所でも両者の 間に大きな位置推定精度の差はみられなかった. 道路勾配の変化する地点では平面化アルゴリズ ムの方が位置推定誤差が大きくなる傾向があり, 提案手法によって推定精度が 1.5 m 以上改善され た箇所も存在した. したがって, 提案手法のよう に平面に依存しない手法を構築することで,高さ が変化する環境での位置推定精度を改善できる と判定した.

## 5.4 評価結果からの考察

前節までで述べた結果では、たとえば RFID を 0.5 m の 間隔で配置した環境において、位置推定誤差の平均値はおよそ 0.7 m であった。車線方向の誤差を分析することで、提案手法は車両が走行している車線の認識がおおむね可能であると判明した。一方で、レーンキープアシストのように制御を行うシステムのための必要条件である 10 cm 程度の誤差については未達成のため、位置推定手法のさらなる改良が必要である.

主な検討対象として以下の事項があげられる。まず、屋外環境においては自由空間損失のみでは受信強度と距離を関数に正確に射影することが困難であると考えられるため、これをより正確に射影できる関数の検討、もしくは、受信強度から求めた距離の誤差を提案手法以上に吸収できるアルゴリズムの検討が必要である。次に、ジャイロ/加速度センサを利用した車両の移動ベクトルの推定においてもセンサの計測誤差の補正などを含めて、さらに精度を上げるための改良が重要である。最後に、実際の利用においては RFID の設置の正確さなど、使用する機器の配置に対しても誤差を抑えるための工夫が必要である。

#### まとめ

本論文では,道路環境における車両の位置推定を,路側・車線境界に設置した RFID を用いて実現する手法を検討し

た. 提案手法のアルゴリズム面での特徴は以下のとおりである.

a) 推定精度の向上と 3 次元空間での位置推定を実現するため、提案手法では各 RFID の組合せに対し、それらを結んだ直線を RFID の位置と RFID-アンテナ間の距離に基づいて内分または外分する点(内外分点)を利用している.

b) 複数の内外分点を次数の異なる重みづけ関数により統合 し、重みづけ次数の増加による統合結果の収束をもとに各 アンテナの位置を推定する.この重みづけにおいて、車両 の近くに位置する RFID から求められた内外分点に、より 大きなウェイトを与えている.

屋外の道路環境で提案手法の位置推定実験を行った結果,RFIDを 0.5 m の間隔で配置し、車両にアンテナを 8本設置した環境において、位置推定誤差の平均値を 0.7 m に抑えることができた。さらに車線方向の誤差を分析することで、提案手法は車両の走行している車線を認識することがおおむね可能であると判明した。受信したタグの個数と位置計算に要した時間に相関性はみられず、位置計算に要した時間の最大値が 80 ミリ秒、平均値は約 20 ミリ秒であった。既存手法との比較では、提案手法は 31% (0.5 m)-70% (2.3 m) 程度位置推定誤差を改善したと判明した。同様に、重みづけ手法に着目した比較においても、提案手法で用いた重みづけは推定精度の向上に一定の効果があることが確認できた。

最後に、本論文で示した内容は位置推定手法を主とした検討であり、推定誤差の数値に重点を置いて評価を行った。このため、アプリケーション固有の要求条件への対応は今後の検討課題であり、アプリケーションの観点からさらに実現可能性を検討していきたい。また、ジャイロ/加速度センサにより得られる車両の移動ベクトルの利用、内外分点の導入といった提案手法の特徴のうち、より改良効果が大きい特徴が何であったかの詳細な分析や、GPS[1]、PlaceEngine[2] など RFID を利用しない手法との測位精度の比較も今後の課題である。

謝辞 本研究の遂行にあたり、芝浦工業大学の上岡英史教授、愛知県立大学の田学軍准教授、ニュージャージー工科大学の Cristian Borcea 准教授には非常に有用な助言をいただいた。各氏にはこの場を借りて感謝の意を表するとともに、今後も引き続きご指導を仰ぐ所存である。また、本論文で述べた屋外実験に際して、総合研究大学院大学葉山キャンパスの敷地の利用を許可していただいた。総務課の方々にこの場を借りて感謝の意を表する。

## 参考文献

- [1] ホフマン, B., リヒテンエッガ, H., ヴァスレ, E.: GNSS のすべて, シュプリンガー・フェアクラーク (2010).
- [2] 暦本純一,塩野崎敦,末吉隆彦:PlaceEngine—実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤,インターネットコンファレンス論文集,pp.95–104 (2006).

- [3] Manolakis, D.E.: Efficient Soltion and Performance Analysis of 3-D Position Estimation by Trilateration, *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol.32, pp.1239–1248 (1996).
- [4] Mark, B., Eva, Z. and Robert, S.: Exam Cram RFID+, Que Publishing (2006).
- [5] 一松 信, 伊藤雄二 (共訳): 数学辞典, 朝倉出版 (1993).
- [6] 森信一郎,沢田健介,肥田一生,峰野博史,水野忠則:光 ビーコンを使用した連続自車位置推定方式,情報処理学 会論文誌, Vol.52, No.1, pp. 233-243 (2011).
- [7] 上坂大輔, 村松茂樹, 岩本健嗣, 横山浩之: 手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案, 情報処理学会論文誌, Vol.52, pp.558-570 (2011).
- [8] 神原誠之, 横矢直和: RTK-GPS と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感, 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU, Vol.104, pp.37-42 (2005).
- [9] 辻英美子,春山真一郎,中川正雄:可視光通信による位置情報を用いた車載用慣性航法型測位,電子情報通信学会技術研究報告 ITS, Vol.107, pp.23-28 (2008).
- [10] 小島祥子,高橋 新,二宮芳樹:汎用 GPS と車載レーザレーダを用いた高精度自車両位置推定,情報処理学会論文誌,Vol.50, No.1, pp.64-74 (2009).
- [11] 佐竹純二,三浦 純:移動ロボット制御のための人物シルエットの重なりを考慮した複数人物追跡,情報処理学会研究報告 CVIM, Vol.2010, pp.1-8 (2010).
- [12] 野場敏裕,小川恭孝,西村寿彦,大鐘武雄,田中 誠, 佐々木邦彦:車載アレーアンテナによる歩行者方向推定 に関する基礎的考察,電子情報通信学会技術研究報告 A・ P,アンテナ・伝播,Vol.109,pp.177-182 (2009).
- [13] 加藤昭英:航空電子装備上巻, 日本航空技術協会 (1985).
- [14] ホフマン, B., モーリッツ, H.: 物理測地学, シュプリンガー・フェアクラーク (2006).
- [15] 大嶋太市:測量学基礎編, 共立出版 (2009).
- [16] 藪 智文,原 晋介: MIMO セルラシステムにおける TOA に基づいた位置推定の性能評価,電子情報通信学 会技術研究報告 WBS,ワイドバンドシステム,Vol.10, pp.37-42 (2009).
- [17] Liu, C., Wu, K. and He, T.: Sensor localization with Ring Overlapping based on Comparison of Received Signal Strength Indicator, 2004 IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, pp.516– 518 (2004).
- [18] Lim, H., Choi, B. and Lee, J.: An Efficient Localization Algorithm for Mobile Robots based on RFID System, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, pp.5945-5950 (2006).
- [19] Moeeni, F.: A Passive RFID Location Sensing, 12th World Multi-Conference on Systemics (2008).
- [20] 福島荘之介,齊藤真二,藤井直樹,須賀秀一,角田寛人:空港シュードライトの性能評価,電子情報通信学会技術研究報告 SANE, Vol.102, pp.1-6 (2002).
- [21] Zhan, J., Liu, H. and Huang, B.: A New Algorithm of Mobile Node Localization Based on RSSI, Wireless Engineering and Technology, Vol.2, pp.112–117 (2011).
- [22] Ni, L.M., Liu, Y., Lau, Y.C. and Patil, A.P.: LAND-MARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID, Wireless Networks, Vol.10, pp.701-710 (2004).
- [23] Khan, M.A. and Antiwal, V.K.: Location Estimation Technique using Extended 3-D LANDMARC Algorithm for Passive RFID Tag, 2009 IEEE International Advance Computing Conference 2009 (IACC 2009), pp.249–253 (2009).
- [24] 本田誠一,福井健一,森山甲一,栗原 聡,沼尾正行:赤外線センサーネットワークによる人物追跡,人工知能学会全国大会論文集,2A3-2 (2006).

- [25] 森田真司,山澤一誠,寺沢征彦,横矢直和:全方位画像センサを用いたネットワーク対応型遠隔監視システム,電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.88, pp.846-875 (2005).
- [26] 水谷友治、羽多野裕之、桑原義彦:レーダネットワークにおける受信機配置の検討、電子情報通信学会技術研究報告 ITS, Vol.109, pp.251-256 (2010).
- [27] Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An inbuilding RF-based user location and tracking system, Proc. 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000), IEEE, Vol.2, pp.775-784 (2000).
- [28] Bekkali, A., Sanson, H. and Matsumoto, M.: RFID Indoor Positioning based on Probabilistic RFID Map and Kalman Filtering, 3rd IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2007), p.21 (2007).
- [29] Yedavalli, K., Krishnamachari, B., Ravula, S. and Srinivasan, B.: Ecolocation: A sequence based technique for RF localization in wireless sensor networks, IPSN '05, Proc. 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (2005).
- [30] 松本欣二:電波工学入門, 朝倉書店 (1969).



## 富樫 宏謙 (学生会員)

昭和 57 年生. 現在,総合研究大学院 大学複合科学研究科情報学専攻後期博 士課程に在籍.



## 山田 茂樹 (正会員)

昭和24年生. 昭和49年北海道大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了. 現在, 国立情報学研究所情報学プリンシプル研究系研究主幹・教授, 総合研究大学院大学教授併任.