

歩行者事故削減のためのGPSと車両からの電波を用いた歩行者位置の高精度測位方式の提案と評価

山下 遼^{1,a)} 湯 素華¹ 小花 貞夫¹

受付日 2017年4月10日, 採録日 2017年10月3日

概要: 歩行者交通事故削減のための歩車間通信では, 歩行者位置は一般的にGPSにより算出されるが, 都市部のビルが密集する場所では, 測位精度が大幅に劣化し, 複数の衛星測位システムを使用しても, 受信できる衛星の配置がほとんど天頂付近に集中するため測位精度向上は限定的である. 本論文では, GPS衛星からの電波による測位に加えて, 周囲の車両間で交換される車両の位置情報と, その電波の直接波のみの信号強度に基づいて歩行者が所持する端末で測定する車両との距離を用いた測位を併用して, 都市部でGPS衛星からの電波を十分に受信できない場合でも, 歩行者の位置を高精度に測位する方式を提案した. 具体的には, まず1) 衛星数不足の問題を解消するために移動車両をアンカとし, 2) 歩車間における直接波の有無を判別する基本方式を検討した. ついで, さらなる測位の高精度化のため, 基本方式を改良し, 3) 歩車間測距へのサポートベクタマシン回帰の適用, 4) 測位演算における距離精度を考慮した重み付けを行う機能を追加拡張した. この改良により, 歩行者の周囲に車両が10台存在するとき, 測位誤差を平均2.39mにまで抑えることを可能とした. また, 信号受信の時間分解能を向上させることで測位誤差を0.65mにまで改善できることを示した.

キーワード: ITS, 歩車間通信, 歩行者位置測位

Proposal and Evaluation of Pedestrian Positioning Method by Using Signals from both GPS Satellites and Vehicles

RYO YAMASHITA^{1,a)} SUHUA TANG¹ SADA OOBANA¹

Received: April 10, 2017, Accepted: October 3, 2017

Abstract: In pedestrian-to-vehicle communication for reducing pedestrian traffic accidents, pedestrian position is calculated by using GPS in general. In urban areas with high buildings, however, the positioning precision of GPS is drastically degraded. And the improvement is limited even if a pedestrian uses multiple satellite positioning systems because the constellation of visible satellites is biased. In order to improve the positioning precision, this paper proposed a method which uses signals from both GPS satellites and vehicles, and the basic method includes two parts: i) using mobile vehicles as anchors, ii) discriminating the LOS (Line of Sight) component from non-LOS ones. We further improved the basic method by iii) applying support vector machine regression to improve the precision of pedestrian-vehicle distance, and iv) assigning weights in the position computation to distances between pedestrian and satellites/vehicles according to their precision. Extensive evaluations confirm that a) under the time resolution constraint of off-the-shelf hardware, the proposed method reduces the positioning error to a satisfactory level (2.39 m) when there are 10 vehicles around a pedestrian, and b) the positioning error can be further reduced to 0.65 m when a finer time resolution is available.

Keywords: ITS, pedestrian-to-vehicle communication, pedestrian positioning

¹ 電気通信大学大学院情報理工学研究所
Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

^{a)} ryo.yamashita212@gmail.com

1. はじめに

現代社会において交通手段の1つとして, 自動車はきわめて重要になっており, 経済の発展に大きく貢献している.

しかし自動車の台数の増加により、歩行者は自動車の危険にさらされることが多くなってきている。

歩行者死亡事故の削減は、現代の交通社会で重要な課題の1つであり、また将来的な自動運転の実現を視野に入れた場合も、この対策は急務になっている。このため歩行者事故の抑止策として、自動車が周囲の歩行者の位置を知ることで事故の危険性を下げる研究が数多く行われている。中でも、レーダ [1] やカメラ [2] では検出できない建物や他車両の影にいる歩行者も検出可能とするという点で、歩行者が自身の位置を測位し、無線により周囲の車両にその位置情報を配信する歩車間通信 [3] が近年注目されている。しかしながら、従来から使われている GPS による測位方法では、高層ビルが立ち並ぶ都市部などでは誤差がしばしば大きく、また場合によっては測位に必要なだけの衛星からの電波を受信できないことがあり、この歩行者事故抑止策を実現するには測位精度が十分確保できているとはいえない。また複数の GNSS や準天頂衛星を測位に利用する場合であっても、高いビルが乱立する都市部では、天頂付近の衛星からの電波しか直接受信することができず、直接受信できる衛星の天空での配置に偏りがあるため測位精度の向上は限られる。

本論文では、周囲の車両どうして位置情報を無線により頻繁に交換する車車間通信が普及し、また自動運転の実現に向け、車両自体の測位誤差が、たとえば数十 cm 以内といった高精度化が図れることが期待できることから、GPS 衛星からの電波による測位に加えて、周囲の車両間で交換される車両の位置情報と、その電波の直接波のみの信号強度に基づいて歩行者が所持する端末で測定する車両との距離を用いた測位を併用する歩行者の測位方法を提案する。基本方式 [4] では、直接波の判別、直接波による歩車間測距、適切な GPS 衛星と車両の選択の方法について検討する。また、さらなる測位の高精度化のため、基本方式を改良し、歩車間測距へのサポートベクタマシン回帰の適用、測位演算における距離精度を考慮した重み付け、の機能を追加拡張する。レイトレーシングシミュレーションにより、歩行者の周囲に車両が 10 台存在するとき、測位誤差を平均 2.39 m にまで抑えることを可能とした。また、信号受信の時間分解能を向上させることで測位誤差を 0.65 m にまで改善できることを示した。

以下、2 章では関連研究を紹介し、3 章では、GPS 衛星からの電波と周囲の車両からの電波を併用する測位の基本方式を提案する。ついで 4 章では、さらなる測位の高精度化のための基本方式への改良について論じる。5 章では提案方式の有効性を検証するシミュレーション評価を、さらに、直接波判別の実証実験結果を 6 章で述べ、7 章では結論と今後の課題を述べる。

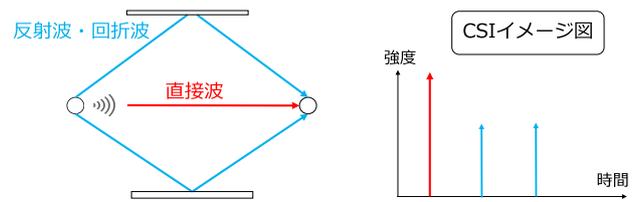


図 1 CSI のイメージ図

Fig. 1 Image of CSI.

2. 関連研究

GPS 信号の届かない屋内における Wi-Fi を用いた測位手法が提案されている。既知の位置に設置されるアクセスポイント (以下 AP) をアンカとし、電波の距離減衰の特性を用いて AP との距離を測り、3 つ以上の AP の位置と距離情報から測位する方法がある。文献 [5] では、RSSI (Received Signal Strength Indicator) を用いて AP との距離を測定する。RSSI は直接波および反射波・回折波などすべてのマルチパスを含む総合的な受信信号の強度を指す。この値は一般的に距離が遠くなるほど小さくなり、距離が近くなるほど大きくなる。しかし RSSI は距離だけではなく、周囲の電波伝搬の環境が大きく影響する。周囲に遮蔽物が多数あり反射波や回折波の多い場所では、距離が短くても反射により RSSI は小さくなりうる。またその逆もありうる。そのため、RSSI から距離を求めると誤差が大きい。

そこで、マルチパスの影響を抑え測距精度を高めるために、屋内において受信した電波のチャネル状態情報 (CSI: channel state information) から直接波のみを使用して屋内測位をする手法が提案されている [6], [7], [8]。CSI には時間軸と周波数軸の 2 つの側面がある。そのうち、時間軸の CSI は、無線通信のチャネルインパルス応答と呼ばれ、電波受信時における直接波、反射波などの電波の異なる到達経路 (「パス」) それぞれの電波到着時間やその強度などの受信信号情報を指す。たとえば、図 1 左側の 3 つのパスに対応する電波の到着時間とその強度を表す CSI を右側に示す。最も早く到着する電波 (赤色) を、送信機から受信機に直接届いた「直接波」と見なし、この直接波の信号強度から距離を測定する。その後届いた電波は反射波 (青色) である。

この手法では反射波や回折波を使用しないので、周囲の環境の影響を受けずに高い精度で距離を測定可能である。しかしながら、この手法では、単純に最初に到達した電波を直接波と見なすため、必ずしも直接波が存在せず、建物の反射、回折する電波しか受信しない可能性がある屋外では、この手法をそのまま利用することはできない。

提案方式と上記の関連研究との主な違いを以下に示す。

- (1) 固定 AP ではなく、移動車両をアンカとする。
- (2) 歩車間における直接波の有無を判別する。

- (3) 歩車間測距にサポートベクタマシン回帰を用いる。
- (4) 距離精度を考慮した重み付け測位演算を行う。

以降、3章の基本方式では(1)と(2)を、4章の基本方式の改良では、(3)と(4)を論じる。

3. 基本方式の提案

3.1 歩車間通信と提案方式（基本方式）の概要

図2左のように、たとえば車①からは見通しがきかず正確な位置の分からない歩行者がいた場合でも、歩行者は別の見通しのきく車両②③からの電波を用いて自身の絶対位置を測位し、歩車間通信を用いて車①を含めた周囲の車両に自身の位置を通知することで、事故を未然に防ぐことを目的とする。ここでは、歩行者の位置の正確性が要求される。

基本方式[4]では、図2右に示すように、GPS衛星からの情報だけではなく、車両からの電波の情報を併用することで、都市部でGPS衛星からの電波を十分に受信できない場合でも、精度の高い歩行者の測位を可能とする。

車両は移動するが、車両が送信する瞬間の位置情報を歩行者端末が受信して瞬時に測距を行うため、車両の移動による測位への影響はないと考えられる。また歩行者は100msごとに測位演算を行うが、その間の歩行者の移動距離はたかだか13cm程度（通常の歩行速度80m/分から算出）であるため、測位精度への影響は無視できるものとする。

3.2 前提条件

前提条件として以下のものを設ける。

- (1) 車両は無線機を搭載し位置情報を周期的に配信

現在実用化・商品化が進められている車車間通信が普及し、各車両が衝突事故防止のために互いの位置情報を無線により頻繁に交換する（例：100msごと）状況[9]を想定する。すでに2015年10月より一部の車種の車両では搭載が始まり多車種への搭載が進みつつある。この車車間通信では、無線の変調方式として、ほとんどの無線LAN規格で採用されている直交周波数分割多重方式（OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing）を用いるものとする。

- (2) 歩行者は電波を受信可能な端末を所持

歩行者が所持する端末で衛星と車両からの電波の両方を受信できるものとする。以後、歩行者の端末を単に歩行者と呼ぶ。どの車両から発せられた電波であるかは、パケットに含まれる送信元アドレスから識別可能である。

- (3) 車両の位置は正確

車両の車載器では、GPSだけでなく、自律航法（Dead Reckoning）、車速パルス、マップマッチング、カメラによる車線検知、などから位置を補正できる。また自動運転の実現に向け、車両自体の測位に、GPSだけでなくGLONASSなどの複数の異なるGNSS（Global Navigation Satellite

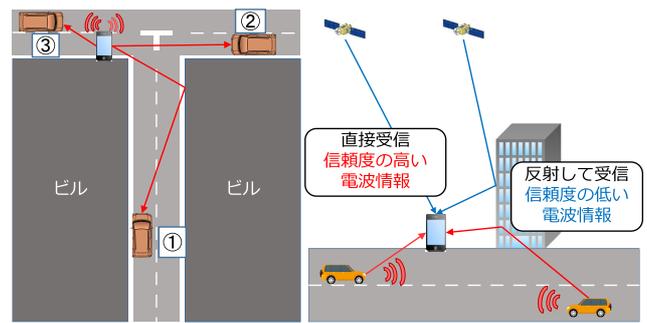


図2 歩車間通信を用いた事故防止案（左）と基本方式（右）
Fig. 2 Pedestrian-to-vehicle communications (left) and proposed basic positioning method (right).

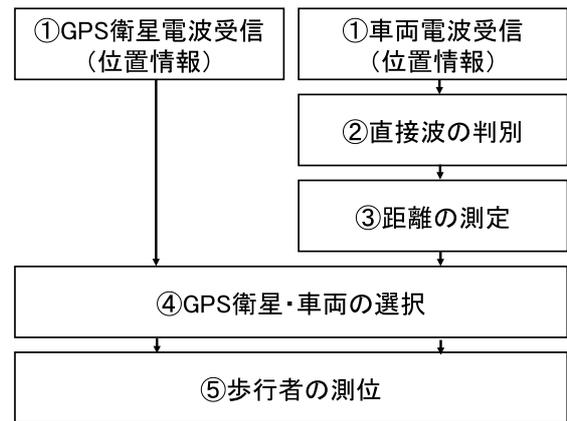


図3 基本方式の測位手順

Fig. 3 Process flow of pedestrian positioning in the basic method.

System)の利用、路側センサ、白線検知[1]などを使用して、誤差数十cm以内の高精度化が図れるようになるものとする。

3.3 歩行者の測位手順

歩行者の測位手順を図3に示す。以下に手順の各ステップを説明する。

- ① GPS衛星と周囲の車両から電波を受信する。
- ② 受信した車両からの電波に直接波が含まれるかを判別する。
- ③ 受信した直接波の強さ（信号強度）から車両との距離を測定する（反射波、屈折波などのマルチパスを含む電波の総合受信信号強度（RSSI）ではなく、直接波のみの信号強度を使用）。
- ④ 直接波のある車両の中から、測位に使用する適切な車両とGPS衛星を選択する。
- ⑤ 100msごとに車両とGPS衛星の情報を併用して測位計算する。

3.4 直接波の判別（3.2節②対応）

3.4.1 判別の原理

歩行者が車両から受信する信号には、直接波と反射波と

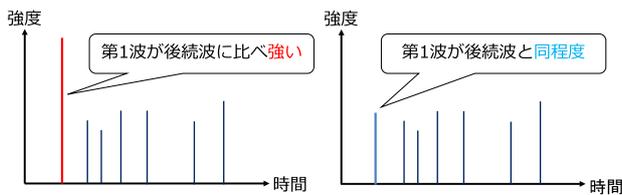


図 4 CSI に基づく直接波の有無の判別

Fig. 4 Discriminating whether LOS path exists based on CSI.

回折波が混在する。反射波や回折波を含む電波による測距では誤差が大きい。直接波のみの電波による測距では、電波の伝搬特性にほぼ従うため誤差が小さい。そこで、最初に到達する電波の信号と後続波の信号の関係から、直接波が存在するか否かを判別する必要がある。判別には 2 章で述べた CSI を用い、判別の基本方針を以下に示す。

(1) 直接波が存在する場合 (図 4 左)

第 1 波が直接波であり、反射や回折により信号強度が減衰した後続波に比べて、信号強度が著しく強い。

(2) 直接波が存在しない場合 (図 4 右)

第 1 波が反射波あるいは回折波であり、後続波と同程度に信号強度が減衰して弱い。このような直接波が存在しない電波を用いて測距すると誤差が大きくなるため、直接波が存在しない電波は測距には使用しない。

3.4.2 機械学習による直接波判別

歩行者の端末が車両から受信した信号の CSI と直接波の有無を示す LOS flag を <CSI, LOS flag> とペアにする。LOS (Line-Of-Sight) は、見通しがあり直接波があることを指し、LOS flag は直接波の有無を示す。直接波がある場合は 1 とし、それ以外の場合は 0 とする。これらのペアを機械学習ツール SVM (Support Vector Machine) [11] に入力して学習させることで、CSI が入力されたとき、SVM は直接波が存在するか否かの判定結果を返す。シミュレータが直接波は存在するか否かの真値を出力可能であるため、それを LOS flag として使用した。表 1 は SVM の機械学習に使用する条件を示す。

3.5 車両・歩行者間の測距方法 (3.3 節③対応)

車両・歩行者間の距離は直接波の信号強度から求める。事前に、車両から受信した信号の CSI から得られる直接波の信号強度と車両・歩行者間の距離のペアを約 12,000 ペア用意し、それらから最小二乗法による線形回帰を行い、車両・歩行者間の距離と直接波の信号強度の関係を示す式 (1) を得た。式 (1) に示す直接波の信号強度 L (dBm) と距離 d の関係を用いて、車両と歩行者の距離を求める。

$$L = a \log_{10} d + b \tag{1}$$

定数 a , b はシミュレーションにより求められ、それぞれ $a = -0.49$, $b = -0.13$, となった。

表 1 SVM 機械学習の条件

Table 1 SVM learning parameters.

総ペア数	20,464 ペア
歩行者と車両の距離	10m~140m
歩行者と車両の位置	全ペア異なる
車両の送信電力	10mW
交差検証	10 回
SVM カーネル	RBF

3.6 GPS 衛星と車両の選択 (3.3 節④対応)

式 (1) の両辺を微分すると以下の式 (2) が得られる。

$$\Delta d = \ln 10 \cdot \frac{d}{a} \cdot \Delta L \tag{2}$$

式 (2) より、直接波の信号強度の誤差 (ΔL) が固定の場合、歩車間の測距誤差 Δd が歩車間の実際の距離 d に比例して増加することが分かる。このため、距離誤差の大きい車両を測位に使用すると測位誤差が大きくなる。また GPS 衛星からの電波を、ビルなどの遮蔽物により反射・回折して受信した場合には距離誤差が大きくなり、それにともない測位誤差も大きくなる。そこで、測位に使用する適切な車両と GPS 衛星の選択が必要となり、以下にその方法を示す。

(1) 車両の選択

式 (3) に表されるように距離残差は、推定距離 (測位された歩行者の位置 (x, y, z) と車両の位置 (x_i, y_i, z_i) から計算) と測定距離 (直接波の信号強度から計算) の差から計算される。これを用いて車両の選択は以下のとおりに行う。

最初に、直接波ありと判定された車両の中から、最も近い N (たとえば $N = 3$) 台の車両を選択して測位グループに追加 (測位に使用する車両・衛星群を測位グループと呼ぶ)、これらにより歩行者の測位を行い、距離残差の平均を得る。また、他の直接波のある周辺車両を測定距離の近い順に並べ替え、(i) 1 台の車両を仮に測位グループに追加し、歩行者の位置を求める、(ii) 平均距離残差を計算する。(iii) もし平均距離残差が前よりも小さければ、(i) で一時的に追加した 1 台の車両を測位グループに正式に追加し、歩行者の位置を更新する。

(2) GPS 衛星の選択

車両同様に測位に使用する適切な GPS 衛星を選択する。GPS 衛星を仰角の高いものから選択する。仮に各 GPS 衛星を上記 (1) で選択した測位グループに追加していき、式 (3), (4) から歩行者の位置と平均距離残差を得る。平均距離残差がより小さくなれば、仮に加えた GPS 衛星を正式に測位グループに追加し、歩行者の位置を更新する。

$$\text{残差 (車両)}_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - d_i \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \text{残差 (GPS 車両)}_k &= \sqrt{(x-x_k)^2+(y-y_k)^2+(z-z_k)^2} \\ &\quad + c\Delta t - d_k \end{aligned} \quad (4)$$

式 (3), (4) で, (x, y, z) , (x_i, y_i, z_i) , (x_k, y_k, z_k) は, それぞれ, 歩行者の位置, i 番目に選択した車両の位置, k 番目に選択した GPS 衛星の位置を表す. また, c は光速を, Δt は歩行者の端末と GPS 衛星の時刻誤差を表す. 以上の工程を繰り返して, 距離の残差が最も小さくなったときの車両と測位グループを用いて得られた歩行者の位置を, 歩行者の最終的な位置とする.

3.7 測位方法 (3.3 節⑤対応)

1つの GPS 衛星と歩行者との間の距離 d_k は, 式 (5) で表される.

$$\sqrt{(x-x_k)^2+(y-y_k)^2+(z-z_k)^2} + c\Delta t = d_k \quad (5)$$

一方, 車両と歩行者との間の距離 d_i は, 式 (6) で表される.

$$\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2} = d_i \quad (6)$$

GPS 衛星と車両の情報を併用する場合, その変数を解くために最低 4 つの式があればよい [12].

3.8 基本方式で考えられる問題点

(1) 歩車間測距方法の問題

基本方式では, 歩車間測距は線形回帰により, 直接波の信号強度 (dBm) と歩車間距離の対数の関係式 (式 (1)) を得て, その式に基づいて算出される. しかし線形回帰では, 直接波の信号強度と歩車間距離の関係式は直線で表され, 直線から外れるほど直接波が強い, あるいは弱い場合には, 測距誤差は大きくなる. 測距誤差が大きくなると, (2) で説明するが, 残差計算の誤差が大きくなることが考えられる.

(2) 距離残差の計算方法の問題

残差は式 (3), 式 (4) にあるように, 歩行者の位置と GPS 衛星と車両の実位置から算出される距離, および測定された距離から計算される. しかし測定された距離は GPS 衛星の場合は電波の到来時刻, 車両の場合は直接波の信号強度から得られ真値ではない. よって式 (3), 式 (4) から得られる残差から使用する車両や衛星を選択しても, 測定距離精度の高い GPS 衛星と車両が選択できていない.

(3) 使用する GPS 衛星や車両の問題

基本方式では多くの場合で, 遠方車両や仰角の低い GPS 衛星は測位に使用されず切り捨てられる. そのため, 歩行者の周囲に車両が増えても測位に使用できる車両数が増えるとは限らないため, 周囲の車両台数が増えても必ずしも測位精度の向上にはつながらない.

4. 基本方式の改良

4.1 SVM 回帰による歩車間測距

基本方式の問題点 (1) を解決するため, サポートベクターマシン回帰 (SVR: Support Vector machine Regression) [13] を用いた測距を行うこととする. SVR では歩行者の距離と CSI の関係を得るため, 事前に CSI と歩車間の距離をペアにして学習させる. CSI の入力に対して SVR は歩車間距離を出力する.

4.2 重み付けによる測位

基本方式の問題点 (2), (3) を解決するため, 基本方式では残差計算を行って遠方車両・仰角の低い GPS 衛星を切り捨てることで測位に使用しなかったのに対して, 改良版では測位計算時にすべての遠方車両, GPS 衛星の距離情報に重みを付けて測位する. 式 (2) より, 重みは距離誤差の分散値をもとに設定し, 重み付けを用いたときの歩行者位置は以下の式で算出する. \mathbf{x} は歩行者の 3 次元の位置と時刻誤差 (δ), \mathbf{y} は歩行者との距離を表す.

- 歩行者の位置初期値 \mathbf{x}^0 :

$$\mathbf{x}^0 = (0, 0, 0)^T$$

- GPS 衛星/車両から歩行者への方向ベクトル \vec{H} :

$$\vec{H} = \partial d(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x} |_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^0}$$

- 歩車間の擬似距離 $\mathbf{y}_{\text{衛星}}$:

$$\mathbf{y}_{\text{衛星}} = d(\mathbf{x}) + \delta^0 + \varepsilon \approx d(\mathbf{x}^0) + \vec{H} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^0) + \delta^0 + \varepsilon$$

- 歩車間の測定距離 $\mathbf{y}_{\text{車両}}$:

$$\mathbf{y}_{\text{車両}} = d(\mathbf{x}) + \varepsilon \approx d(\mathbf{x}^0) + \vec{H} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^0) + \varepsilon$$

$d(\mathbf{x})$: 歩行者の位置と衛星・車両位置との距離のベクトル

δ : 時刻誤差による距離誤差

ε : 距離計測誤差

- 歩行者の位置:

$$\mathbf{x}^{i+1} = \mathbf{x}^i + \mathbf{Q}_x \cdot \vec{H}^T \cdot (\mathbf{Q}_y)^{-1} \cdot (\mathbf{y} - d(\mathbf{x}^i) - \delta^i) \rightarrow \mathbf{x}$$

$$\mathbf{Q}_x = (\vec{H}^T \cdot \mathbf{Q}_y^{-1} \cdot \vec{H})^{-1}$$

$$\mathbf{Q}_y = E\{\varepsilon\varepsilon^T\}: \text{重み付け.}$$

重みは距離誤差の分散値.

$$E\{\varepsilon\varepsilon^T\}: \text{距離誤差の分散値}$$

5. シミュレーション評価

基本方式の改良の有効性の検証を行った. 5.1 節ではシミュレーション環境・条件, 5.2 節ではシミュレーション結果, 5.3 節ではシミュレーション結果の考察, をそれぞれ行う.



図 5 シミュレーションで用いた 2D マップ (銀座)
Fig. 5 2D map of Ginza for simulation.



図 6 シミュレーションで用いた 3D マップ (銀座)
Fig. 6 3D map of Ginza for simulation.

5.1 シミュレーション環境・条件

(1) シミュレータ

GPS 衛星と車両から歩行者への無線通信のレイトレースシミュレーションに、シミュレータソフト Raplab [14] を使用した。Raplalab で得られたレイトレースの CSI 結果を Matlab [15] で読み込み、また歩行者の測位演算を行った。

(2) マップ

シミュレーションには銀座の地図を用い、2D のものを図 5、3D のものを図 6 に示す。建物の配置・高さはすべて現実に基づくものとした。

(3) 歩行者と車両の配置

1 シーン 1 秒として、計 300 シーンのシミュレーションを行った (図 5)。緑色部分は歩行者の位置を示し、分速 80 m で歩道を歩く。赤色部分は移動する車両を示し、時速 60 km、平均車頭間隔 46 m、6 車線あり、1 シーンにつき平均 42 台の車両が通行する。橙色部分は車両がそれぞれ 8 台、2 車線に静止している。青色部分は車両がそれぞれ 4 台、1 車線に静止している。

(4) 時間分解能

時間分解能は、時間計測の精度を指す。1 つの時間分解

表 2 SVR のパラメータ

Table 2 Parameter of SVR.

総ペア数	20,464 ペア
学習ペア	7 割
テストペア	3 割
交差検証	10 回

表 3 歩車間距離と測距誤差

Table 3 Pedestrian-vehicle distance and error.

歩車間距離	測距誤差(m)	
	線形回帰	SVR
10m 以下	10.57	3.95
10~20m	5.75	3.16
20~30m	3.75	3.53
30~40m	5.87	5.84
40~50m	11.88	8.41
50~70m	27.65	27.7
70~90m	29.95	31.9
90m 以上	25.12	12.27

能の時間の間に受け取るすべての電波は 1 つの電波と見なす。Raplalab は信号受信時の時刻・振幅・位相などの CSI を出力する。Raplalab で得られる出力結果は受信機の時間分解能を自在に設定でき、細かい時間で電波情報を抽出することが可能である。シミュレーションでは、まず、一般的な無線 LAN 受信機の時間分解能 (5.0×100^{-8} sec) を設定し、時間分解能内で受信した電波は 1 つの電波と見なし、それらの電波を合成することとした。後述の 5.2.3 項では、時間分解能を変えた場合を検討している。

(5) 歩車間測距

歩車間測距は SVR により行った。学習では Raplab のシミュレーションで得られた CSI と歩車間の距離をペアにしてサポートベクタマシンに入力した。入力には、図 5 に示した地図・配置で 1 シーン 1 秒として、計 300 シーンから得られた 20,464 ペアのうち、7 割 (14,324 ペア) を学習に用いた。また SVR による測距の学習では、行った交差検証 10 回のうち、最大 6.2×10^5 、最小 5.6×10^5 、平均 6.2×10^5 回の反復で収束した。

線形回帰による測距と SVR による測距のそれぞれの測距誤差の結果を表 3 に示す。表 3 より、ほぼすべての歩車間距離において SVR を用いた方が、測距誤差を小さくできており直接波と距離の関係をより正確に求められていることが分かる。

(6) 仰角マスク

水平から何度以上の GPS 衛星を使用するか、制限を加える機能である仰角マスクを、15 度に設定した [16]。

(7) 重み付け

4.2 節に記述したように、歩行者と車両の測定距離が近

表 4 条件と様々な重み

Table 4 Conditions and various weights.

条件	重み 1	重み 2	重み 3	重み 4	重み 5
衛星(仰角 65 度以上)	0.003	0.001	1.00	0.003	0.003
衛星(仰角 65 度以上)	9.73	6.00	12.73	9.73	9.73
車両(歩車間距離 10m 以下)	3.95	3.95	3.95	2.00	4.95
車両(歩車間距離 10~20m)	3.16	3.16	3.16	2.50	4.16
車両(歩車間距離 20~30m)	3.53	3.53	3.53	3.00	5.53
車両(歩車間距離 30~40m)	5.84	5.84	5.84	4.00	6.84
車両(歩車間距離 40~50m)	8.41	8.41	8.41	7.41	10.41
車両(歩車間距離 50~70m)	27.7	27.7	27.7	27.7	27.7
車両(歩車間距離 70~90m)	31.9	31.9	31.9	31.9	31.9
車両(歩車間距離 90m 以上)	12.27	12.27	12.27	12.27	12.27

表 5 改良方式・そのほかの方式の詳細

Table 5 Details of improved and other methods.

	GPS	車両			測位計算
		直接波の判別	測距要素	測距方法	
従来方式	使用する				
基本方式	使用する	SVM	直接波	線形回帰	選択
改良方式 1	使用する	SVM	直接波	SVR	選択
改良方式 2	使用する	SVM	直接波	線形回帰	重み付け
改良方式 3	使用する	SVM	直接波	SVR	重み付け

いほど、衛星の場合は仰角が高いほど、重みが増すように設定する。

シミュレーションの改良方式では、表 4 の重み 1 の値を、2 乗して逆数にしたものが重みとなるよう設定した (例: 値 x のとき $1/x^2$)。重み 1 の値は測距誤差の平均値を示しており、測距誤差の平均値の 2 乗の逆数とするのは、分散値を重みとして設定するためである。

5.2 シミュレーション結果

従来方式、基本方式、改良方式の詳細を比較した結果を表 5 に示す。従来方式は、GPS のみを用いて測位する。

基本方式は、測位に GPS 衛星と車両を併用するが、歩車間に直接波があるかどうかを SVM で判別し、直接波があると判別されたもののみを使用する。歩車間測距は線形回帰で得られた直接波の信号強度と距離の関係式を用いて行い、測位計算時では GPS 衛星や車両をすべてではなく、選択して使用する。

改良方式 1 は、基本方式と比較して測距方法が異なり、線形回帰ではなく SVR を用いる。

改良方式 2 は、基本方式と比較して測位計算が異なり、GPS 衛星・車両を選択せず、GPS 衛星・車両の距離情報に重みを付けて測位する。

改良方式 3 は、基本方式と比較して歩車間の測距と測位計算が異なり、歩車間測距に SVR を用い、測位計算には GPS 衛星や車両の距離情報に重みを付ける。

それぞれの方式について全 300 シーンのシミュレーションを行った。水平測位誤差 ($\Delta x, \Delta y$) は $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ として計算した。

5.2.1 重み付けの評価

改良方式 2, 3 では、測位計算時に各 GPS 衛星や車両との測定距離に重みをつける。表 4 の重み 1 に、各条件における測定距離の誤差の 2 乗の逆数を重みとして設定したが、この重みが最適なものであるかをシミュレーションにより評価した。

改良方式 3 を用いて、表 4 は設定した重みを指す。重み 1 は表 3 で示したように各測距誤差の平均値から取得したものである。重み 2 では GPS 衛星の重みを上げ、重み 3 では GPS 衛星の重みを下げ、重み 4 では車両全体の重みを上げ、重み 5 では車両全体の重みを下げた。太字部分は重み 1 と比較して変更した部分である。各重みで使用する車両台数を変化させた場合の平均水平測位誤差を図 7 に、車両台数が 10 台のときの累積度数分布を図 8 に示す。

いずれの重みの場合でも歩行者の周囲にある車両台数が増えるほど、測位精度が良くなっていることが分かる。車両の重みを上げている重み 4 のみ、測距誤差に基づき重み

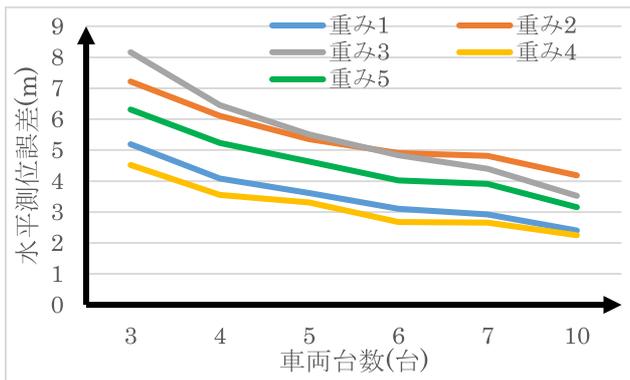


図 7 各重みにおける車両台数に対する水平測位誤差

Fig. 7 Horizontal positioning error under different numbers of vehicles for each weight.

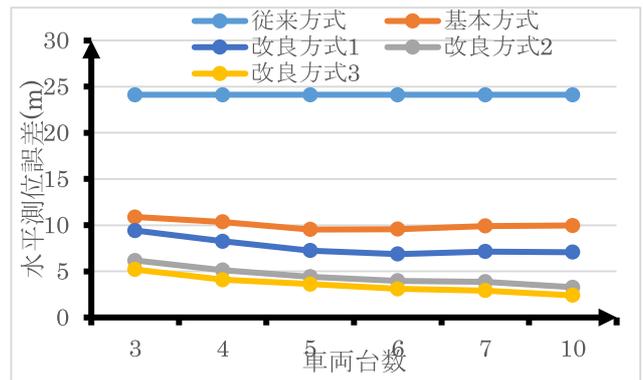


図 9 各方式における使用車両台数に対する水平測位誤差

Fig. 9 Horizontal positioning error under different numbers of vehicles for each method.

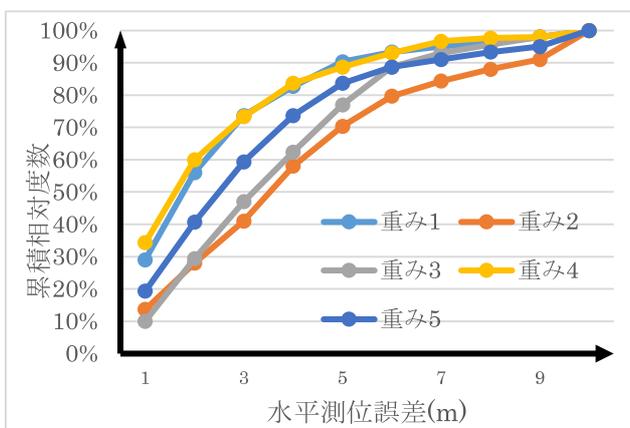


図 8 各重みにおける車両台数 10 台のときの測位誤差の累積度数分布

Fig. 8 Horizontal positioning error with 10 vehicles (Cumulative frequency distributions) for each weight.

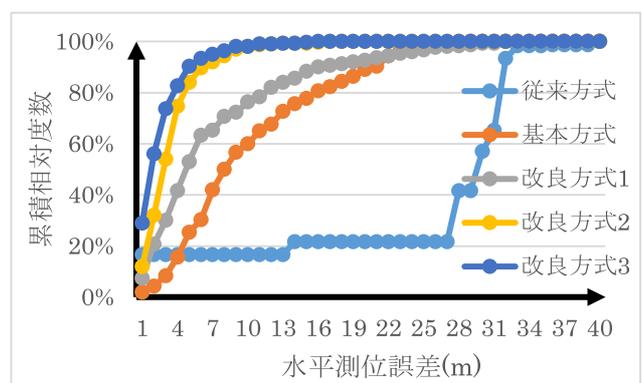


図 10 各方式における車両台数 10 台のときの水平測位誤差の累積度数分布

Fig. 10 Horizontal positioning error with 10 vehicles (Cumulative frequency distributions) for each method.

が設定されている重み 1 よりも測位精度が向上した。

5.2.2 改良方式の評価

各方式で使用する車両台数に対する測位誤差の結果を図 9 に、歩行者の周囲の車両台数が 10 台の場合における累積度数分布を図 10 に示す。

測位に GPS のみを用いる従来方式と比較して、測位に GPS と車両を併用する基本方式、改良方式 1, 2, 3 が測位精度が良い。また GPS 衛星や車両を選択して測位する基本方式よりも、選択せずすべての GPS 衛星と車両を使用し、測位計算時に距離情報に基づく重み付けをする改良方式 1, 2, 3 が測位精度が良い。さらに、歩車間の測距において、基本方式と同様に線形回帰による測距を行う基本方式よりも、SVR による測距を行う改良方式 1 が測位精度は良い。同様に線形回帰による測距を行う改良方式 2 よりも、SVR による測距を行う改良方式 3 の方が測位精度は良い。

5.2.3 時間分解能と測位誤差

前述までの測位計算では、受信機の時間分解能を 50 ns に設定した。将来的に時間分解能が 0.1 ns に向上した場合

に、どの程度の測位精度が得られるかをシミュレーションした。比較には改良方式 3 を用いた。それぞれの時間分解能で車両台数を变化させた場合の測位誤差の結果を図 11 に、累積度数分布を図 12 に示す。

時間分解能が 50 ns のときよりも 0.1 ns の方が測位精度は高く、車両 10 台のとき時間分解能が 50 ns のとき 2.39 m の測位誤差であるのに対して、0.1 ns では 0.67 m の測位誤差になり測位精度が大幅に改善されることが分かる。

5.3 考察

(1) 図 7 に示した様々な重みを試したシミュレーションの結果より、重み 1 は測距誤差の平均値に基づいて設定したが、最適な重み付けではないことが分かった。これは距離誤差が正規分布になっておらず正しい重み付けができていないことが原因であると考えられる。今後、どの重みを使用することが精度向上につながるかの検証が必要である。

(2) 図 9 で、精度が高いと推測される距離情報の重みを大きくすることにより、重みなしの場合と比較して精度が良くなっている。これは測位時に測距精度が低い仰角の低い衛星や歩車間距離の大きい車両の情報の重みを下げる

ことで、測距精度の高い情報に基づいて測位計算をしたためである。また、使用する衛星と車両を選択する基本方式と比較しても測位精度が向上した。選択する場合、仰角の低い、あるいは歩車間距離の大きい車両を測位に使用しないが、改良方式 2, 3 では重みが低いながらも精度向上が向上している。この効果は測位結果のヒストグラムである図 10 の結果にも現れており、測位誤差が 5m 以上のデータが、改良方式 3 と改良方式 1 を比較して 51% 少なくなっており、精度が著しく向上している。

(3) 図 9 より、歩行者と車両の測距は、線形回帰ではなく SVR を用いる方、また、基本方式よりも改良方式 1、さらに改良方式 2 よりも改良方式 3 の方がそれぞれ測位精度はよくなる。これは表 3 の測距誤差の比較にもあるように SVR を用いる方が線形回帰の場合より測距誤差が小さいためである。

(4) 車両と歩行者の測距誤差は、時間分解能により直接波のみではなく、後続波の一部を含んで距離を計算しているため生じている。図 11 から、時間分解能が向上すれば、直接波のみの信号強度から距離をより正確に求めることが可能であることが分かった。それにともない測位精度が向

上し、特に時間分解能が 0.1 ns の場合は車両情報の精度が著しく上がるため、重み付けの効果と合わせてきわめて高い精度で測位できると考えられる。しかしながら時間分解能が向上しても完全に測位誤差を 0 にすることはできていない。理由として受信機の時間分解能が 0.1 ns になっても、歩行者あるいは車両が建物に近すぎた場合、直接波と同じくらい早い時間で (0.1 ns 以内に) 到着する反射波が存在することがあるためである。それにより直接波の識別や歩車間距離の算出には誤差が発生した。

6. 直接波判別の実証実験

電気通信大学のキャンパス内で、図 13 に示すノート PC を歩行者端末とし、また、デスクトップ PC を車両として、直接波の判別がどの程度可能かを確認するための実験を行った。デスクトップには Intel Wi-Fi Link 5300 を装着し、無線 LAN チャネル 6 (周波数: 2,426 MHz~2,448 MHz) を使用し、Linux 802.11n CSI Tool [17] でチャンネル周波数応答を取得した。無線 LAN モジュールは 20 MHz の帯域幅を使用する場合、60 サブキャリアが使用可能であるが Intel Wi-Fi Link 5300 では、隣接する 2 つのサブキャリアの値を 1 つにまとめているため、30 サブキャリアの値をチャンネル周波数応答として出力する。この制限は使用したドライバによるものである。提案方式ではチャンネルインパルス応答 (時間軸の CSI) が必要であり、そのフーリエ変換したものがチャンネル周波数応答であるため、実験で取得したチャンネル周波数応答を、逆フーリエ変換を行ってチャンネルインパルス応答を算出することにした [18]。なお、20 MHz の帯域幅に対応する時間分解能は 50 ns であるが、上述の隣接のサブキャリアを合成することにより、このチャンネルインパルス応答の時間分解能は 100 ns と低下している。

ノート PC は 1 つの実験条件につき、1 秒に 10 回、計 20 秒間デスクトップに ping を送信した。図 14 に実験を行った場所の一例を示す。青い点はデスクトップの場所を、また赤い点はノート PC の場所を指す。①は直接波がある場合の例であり、直線距離 5~50 m において 5 m 間隔で CSI の取得を行った。②は直接波がない場合の例であり、デス

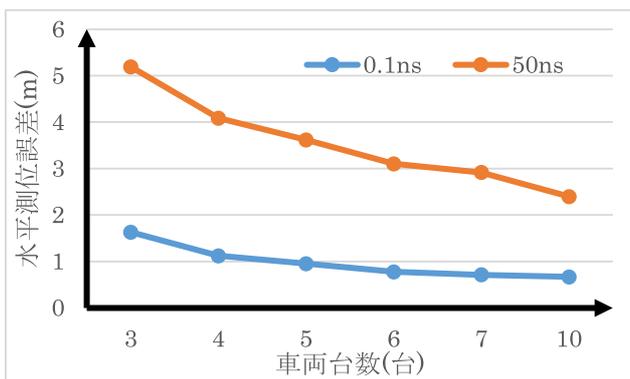


図 11 各時間分解能における車両台数と測位誤差

Fig. 11 The number of vehicles and horizontal positioning error for each time resolution.

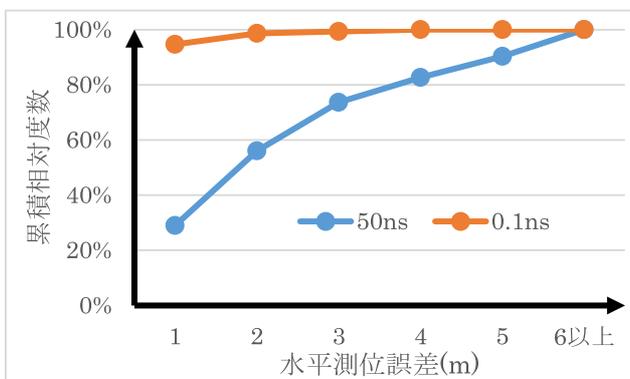


図 12 各時間分解能における車両台数 10 台のときの測位誤差 (累積度数分布)

Fig. 12 Horizontal positioning error with 10 vehicles (Cumulative frequency distributions) for each time resolution.



図 13 デスクトップ (車両) とノート PC (歩行者端末)

Fig. 13 Desktop PC (vehicle) and laptop (device of pedestrian).

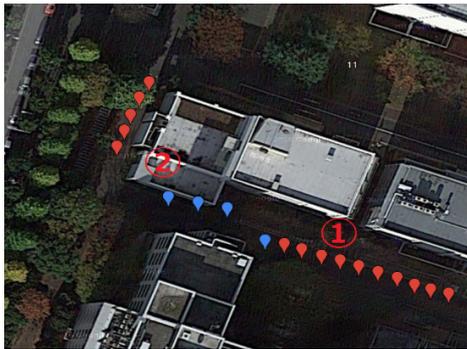


図 14 実験場所

Fig. 14 Places in experiment.

表 6 SVM による直接波の判別率

Table 6 Discrimination rate of LOS path by SVM.

判別率		直接波あり	直接波なし
判別	直接波あり	95%	8%
	直接波なし	5%	92%

クトップと建物の角までの距離を 10, 20, 30 m, 角からノート PC までの距離を 5~25 m で 5 m 間隔の位置で、それぞれデスクトップからの電波を受信した。

実験で得られた約 8,000 の CSI のうち、70% を SVM の学習に用い、残りの 30% を判別に用いた。送受信機間の LOS パスが建物により遮蔽されるかの真値は目視で決めた。また、交差検証を 20 回行い、表 6 に結果を示す。表 6 の結果より、実証実験における結果はシミュレーションに近い結果を得ることができた。

7. 結論

本論文では、GPS 衛星からの電波による測位に加えて、周囲の車両間で交換される車両の位置情報と、その電波の直接波のみの信号強度に基づいて歩行者が所持する端末で測定する車両との距離を用いた測位を併用して、都市部で GPS 衛星からの電波を十分に受信できない場合でも、歩行者の位置を高精度に測位する方式を提案した。具体的には、1) 衛星数不足の問題を解消するために移動車両をアンカとし、2) 歩車間における直接波の有無を判別する基本方式を提案した。また、さらなる測位の高精度化のため、基本方式を改良し、3) 歩車間測距への SVR の適用、4) 測位演算における距離精度を考慮した重み付けを行う機能を追加拡張した。

シミュレーションにより評価した結果、歩行者の周囲に車両が 10 台存在するときに、平均測位誤差が GPS のみによる従来方式では約 24 m であるのに対し、基本方式では 7.39 m に改善され、さらに改良方式により、平均測位誤差を 2.39 m にまで抑えることを可能とした。また、受信機の時間分解能を現在の無線 LAN で使われている 50 ns から 0.1 ns に向上させることで測位誤差を 0.65 m にまで改善で

きることを示した。加えて、さらなる精度の向上にむけてより最適な重み付けの値の設定という課題を明確にした。

今後のシミュレーション評価において、本論文で示した地図・配置以外の場所での、直接波判別、SVR による測距、測位等を行う予定である。また実機によるフィールド実験・検証では、実際の CSI から直接波の信号強度を得て測距を行い、それを用いて測位の実験を行う予定である。本論文では GNSS の 1 つである GPS を対象としたが、準天頂衛星をはじめ他の衛星も併用することにより、測位精度のさらなる向上が期待できる。その評価・検証については今後の課題とする。

参考文献

- [1] Hasch, J., Topak, E., Schnabel, R., Zwick, T., Weigel, R. and Waldschmidt, C.: Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 GHz frequency band, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol.60, No.3, pp.845–860 (2012).
- [2] Barrois, B. and Wöhler, C.: 3D pose estimation of vehicles using stereo camera, *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, pp.10589–10612 (2012).
- [3] Tang, S., Saito, K. and Obana, S.: Transmission control for reliable pedestrian-to-vehicle communication by using context of pedestrians, *Proc. IEEE ICVES'15* (2015).
- [4] Yamashita, R., Tang, S. and Obana, S.: Improving positioning precision of pedestrians by using both GPS satellites and vehicles, *Proc. 23rd World Congress of Intelligent Transport Systems*, AP-SP0573, pp.1–12 (2016).
- [5] Daiya, V., Ebenezer, J., Satya Murty, S. and Raj, B.: Experimental analysis of RSSI for distance and position estimation, *Proc. IEEE-ICRTIT*, pp.1093–1098 (2011).
- [6] Sen, S., Lee, J., Kim, K. and Congdon, P.: Avoiding multipath to revive inbuilding WiFi localization, *Proc. MobiSys'13*, pp.249–262 (2013).
- [7] Xiao, J., Wu, K., Yi, Y., Wang, L. and Ni, L.: Passive device-free indoor localization using channel state information, *Proc. IEEE ICDCS'13*, pp.236–245 (2013).
- [8] Alibi, D., Javed, U., Wen, F., He, D., Liu, P., Zhang, Y. and Jiang, L.: 2D DOA estimation method based on channel state information for uniform circular array, *Proc. 4th International Conference on Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location Based Services (UPINLBS)*, pp.68–72 (2016).
- [9] 内閣府戦略的イノベーション創造プログラム, 入手先 (<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>).
- [10] Liu, Y.: Forecast map matching model for vehicle-borne navigation based on roadway characteristic, *Proc. International Conference on Optoelectronics and Image Processing*, pp.569–571 (2010).
- [11] Foody, G.M.: The effect of mis-labeled training data on the accuracy of supervised image classification by SVM, *Proc. IEEE IGARSS'15*, pp.4987–4990 (2015).
- [12] 山下 遼, 湯 素華, 2 小花貞夫: GPS と車両からの電波を用いた歩行者測位精度向上のための方式提案, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DI-COMO2015) シンポジウム, 6H-4, pp.1373–1380 (2015).
- [13] Kavousi-Fard, A., Samet, H. and Marzbani, F.: A new hybrid modified firefly algorithm and support vector regression model for accurate short term load forecast-

- ing, *Expert Systems with Applications*, Vol.41, No.13, pp.6047–6056 (2014).
- [14] 構造計画研究所ホームページ, Raplab, 入手先 (<http://network.kke.co.jp/products/raplab/>).
- [15] MathWorks ホームページ, Matlab, 入手先 (<https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>).
- [16] Matusi, S. and Kimura, H.: Survey comparison using GNSS and ME5000 for one kilometer range, *Proc. 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan* (2008).
- [17] Linux 802.11n CSI Tool, available from (<https://dhalperi.github.io/linux-80211n-csitool/>).
- [18] Yang, Z., Zhou, Z. and Liu, Y.: From RSSI to CSI: Indoor localization via channel response, *ACM Computing Surveys*, Vol.46, No.2, Article No.25 (2013).



山下 遼

1993年生。2015年電気通信大学情報・通信工学科卒業。2017年同大学大学院博士前期課程修了。この間、GPSと車両からの電波を用いた歩行者測位精度向上の研究に従事。同年首都高速道路(株)入社。



湯 素華 (正会員)

1998年中国科学技術大学電子情報工学科卒業。2003年同大学大学院博士課程修了。工学博士。同年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケーション研究所研究員。2014年電気通信大学大学院情報理工学研究科助教。アドホックネットワーク, ITS, 省電力無線通信, マルチメディア通信の研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



小花 貞夫 (正会員)

1953年生。1976年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。1978年同大学大学院修士課程修了。同年国際電信電話(株)(現, KDDI(株))入社。パケット交換方式, ネットワークアーキテクチャ, OSIプロトコル実装, データベース, ビデオテックス, 分散処理, ネットワーク管理の研究・開発に従事。2004年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケーション研究所所長。2011年電気通信大学大学院情報理工学研究科教授。無線アドホックネットワーク, 高度交通システム(ITS), センサネットワーク, ネットワーク低消費電力化等の研究に従事。工学博士。2001年文部科学大臣賞(研究功績者), 電子情報通信学会会員。本会フェロー。