

無線チャネル状態情報の空間・時間変化の併用による 歩行者の角度推定及び高精度測位法の提案と評価

駒宮亘[†] 小花貞夫[†] 湯素華[†]

概要：歩行者の測位精度向上のため、筆者らは先に、車車間通信で配信される車両の位置情報を含むパケットの電波を歩行者の携帯端末で傍受し、GPS 信号と合わせて測位に利用する方式を提案した。この方式では、車両を基準点として、受信信号から歩車間の距離と角度情報を推測し歩行者位置を算出することにより、測位精度の向上が期待できる。角度推定の手法としてこれまで、CSI（チャネル状態情報）の、複数アンテナによる空間的变化を利用するものや、車両の移動による時間的变化を利用するものを別々に提案したが、携帯端末に搭載可能な少数のアンテナの利用では、得られる角度推定精度が限定的となる課題が存在した。本稿では、これら CSI の空間的变化と時間的变化を併用することで、少数のアンテナでも正確な角度推定を行い、測位精度を改善する方式を提案する。3D レイトレーシングによるシミュレーション評価により、2 アンテナの場合に、先行方式と比較して角度推定誤差を 17.04 度から 6.27 度、測位誤差を 5.09m から 2.89m に削減できることを確認した。

High Precision Angle Estimation and Pedestrian Positioning by Jointly Using Spatial/Temporal Change of Channel State Information

WATARU KOMAMIYA SADA O OBANA SUHUA TANG

1. はじめに

交通事故防止のため、車車間通信や歩車間通信が提案されている。車車間通信は、車両同士が車載器を用いた通信を行い、自位置や速度の情報を交換[1]することで、接触の危険を事前に検知し、ドライバーへの警告を行う[2]もので、一部の車両で既に運用されている[3]。歩車間通信は、歩行者が携帯端末で周囲の車両へ位置情報を配信して、車車間通信と同様の事故防止効果を得るものである[4]。これらの方式では、車両に搭載されたカメラ・センサを用いる検知手法では不可能な、死角にいる車両・歩行者の検知が可能になり、より信頼性の高い事故防止効果が期待できるが、その効果は車両・歩行者の測位精度に大いに依存する。

屋外測位方式は、GPS などの GNSS (Global Navigation Satellite System) を利用するのが一般的である。この方式では、4 機以上の衛星からの信号を同時に受信し、各衛星に対する距離を算出することで自位置が推測可能になる。しかし都市部では、高層ビル等により、信号の遮蔽で利用可能な衛星数が 4 機に満たず測位できない、信号の反射・回折で衛星との距離推定に誤差が発生して測位精度が低下する[5]、などの問題が発生する。建物の影響を受けづらい準天頂衛星[6]を利用した場合であっても、利用可能な衛星が天頂付近に集中するため、精度の改善は限定的である。

このため、車両は衛星を利用した測位の他に、推測航法、マップマッチング、車線検知などを併用して自位置を補正しており、衛星が十分に利用できない場合でも、数 m 以内

の誤差で測位が可能である[7][8][9]。また、今後自動運転実現のため、測位精度の更なる向上が期待できる。一方で、歩行者の持つ携帯端末ではサイズ等の制限から、車両が用いるセンサを利用した位置補正技術は利用できないため、都市部では十分な測位精度が得られず、それを利用する歩車間通信の信頼性も低下する。

この問題に対し、筆者らは、高い測位精度を持つ車両が車車間通信で配信する自位置の情報を含むパケットを歩行者が携帯端末で傍受し、衛星に加えて車両を測位の基準点とすることで、歩行者の測位精度を向上する方式[10][11]を先に提案した。この方式では、受信信号から取得した CSI (Channel State Information, チャネル情報情報) を用いて歩車間距離を推定して、歩行者位置の推測を行う。より高精度な測位を行うために、歩車間角度を推測して利用する方式[12][13]も提案した。[12]では、複数アンテナによる CSI の空間的变化から電波到来角度推定を行い、[13]では、車両の移動による CSI の時間的变化から電波放射角度推定を行う。しかし、これらの角度推定方式では、携帯端末に搭載が容易な少数の受信アンテナの利用では分解能の不足により、得られる精度が限定的である、という課題があった。

本稿では、[12][13]の方式で単独で用いられていた、CSI の空間的变化と時間的变化を併用することで、携帯端末に搭載可能な少数のアンテナでも高精度に角度推定を行い、それを用いて歩行者測位精度を向上する方式を提案する。この方式では、複数アンテナで取得した受信信号の、異なる受信時間の複数箇所から連続して CSI を取得して、空間

[†]電気通信大学
The University of Electro-Communications

軸・時間軸の二次元の要素を持つ擬似アンテナアレイを構成し、各 CSI の位相差から歩車間の角度情報を推測する。3D レイトレーシングを用いたシミュレーション評価では、既存の方式と比較して、2 アンテナを利用したときの角度推定・測位誤差を、特に大きく削減できることを確認した。

以降、第 2 章では関連研究、第 3 章では提案方式について述べる。第 4 章ではシミュレーション評価と考察を行い、第 5 章では結論と今後の課題について述べる。

2. 関連研究

2.1 提案方式のベースとなる先行方式[12][13]

この方式では、都市部などの、衛星信号が十分に受信できない環境で歩行者の測位精度を向上するため、高精度な位置情報を持つと期待される、車両を測位の基準点として利用する。歩行者は、周囲の車両が車車間通信で配信する位置情報を含むパケットを傍受し、取得した CSI から歩車間の距離情報を推測することで、歩行者位置を算出する。さらに、距離情報のみでは精度が十分でない場合のため、CSI から角度情報を推測し、距離情報に加えて利用する。

2.1.1 RSSI と CSI

電波の受信情報を利用した伝搬距離の推測では、信号強度を表す RSSI (Received Signal Strength Indicator) が、一般的に用いられる。受信信号には図 1 左で示すように、送信端末から見通しの経路で直接届く信号(直接波)と、途中で反射・回折して届く信号(マルチパス波)の 2 種類が存在する。伝搬距離推定には、反射等による減衰の発生していない直接波の利用が望ましいが、RSSI は直接波と全てのマルチパス波の信号強度を合成した値であるため(図 1 右上)、これを利用すると推測値には大きな誤差が発生する。

一方で、CSI は信号の時間・周波数毎の強度や位相を表し、Wi-Fi や LTE などで行われる変調方式である OFDM の信号から取得できる。CSI は時間軸の信号情報を表すため[14]、受信機の時間分解能(20MHz の帯域幅の場合 50ns)が十分なら到来時間別に直接波とマルチパス波の分離が可能である(図 1 右下)。従って、CSI から取得した直接波の情報を利用することで、誤差の小さい推測が可能になる。

CSI による伝搬距離推定手法には、信号の強度や到来時間を用いるもの[15][16]がある。距離だけでなく、複数アンテナで取得した信号の位相差や到来時間差により、電波到来角度を推測する[17][18]ことも可能である。

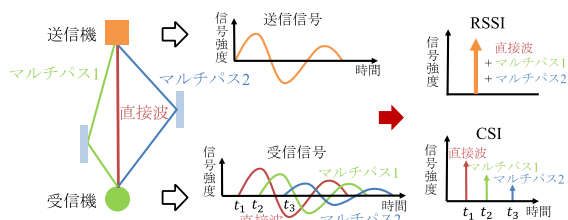


図 1. 信号の経路と受信信号の RSSI・CSI
 Figure 1. Signal propagation path and RSSI/CSI

2.1.2 歩車間距離推測

直接波の信号強度から、電波伝搬距離を推測する。信号強度 L は、伝搬距離 d に応じて、式(1)に従い減衰する。

$$L = a \log_{10} d + b. \quad (1)$$

a , b は定数で、事前に測定した信号強度と伝搬距離の組のデータから線形回帰を行って算出したものを利用する。

2.1.3 歩車間角度推測

複数のアンテナで受信した信号の CSI を利用して直接波の電波到来角度を推定する方式[12]と、信号内の複数の時間で取得した CSI を利用して直接波の電波放射角度を推定する方式[13]が存在する。2 つの方式で利用される信号情報は同時に取得可能だが、角度推定の原理がそれぞれ異なるために、単純に合成して利用することはできない。

(1) 複数アンテナの受信信号情報を用いる角度推定

速度・品質の向上のため、通信が複数のアンテナ(アンテナアレイ)を用いて行われることを利用して、各アンテナで取得した CSI から角度推定を行う。図 2 左で示すように、複数のアンテナで信号を受信した場合、アンテナ間の距離 l と電波到来角度 θ_A に基づき、アンテナ毎に微小な電波伝搬距離差 $\Delta d = l \cdot \cos \theta_A$ が存在し、各アンテナの受信信号には位相差 $\Delta \varphi = 2\pi \cdot \Delta d / \lambda$ が発生する。ここで、 λ は信号の波長である。アンテナ毎に CSI から取得した直接波の位相差から Δd を算出すれば、角度 θ_A が導出可能である。角度の計算には、MUSIC 法[19]が用いられる。

この方式では、受信アンテナ数が多いほど空間分解能が高まり、高精度な角度推定が可能となるが、現在の携帯端末では、サイズの制限から多数のアンテナを搭載するのは困難である。

(2) 受信信号内の複数時間の情報を用いる角度推定

車両が車車間通信の信号を送信しながら移動することを利用して、異なる時間に取得した CSI から角度推定を行う。複数 CSI の取得を複数のパケットから行う場合、送受信機間で正確な時刻同期が必要になる。これを避けるため、歩行者は、携帯端末の単一アンテナで受信した同一パケット内の、受信時間が Δt 離れた複数箇所でも CSI をそれぞれ取得する。図 2 右で示すように、歩車間の相対速度 v_r と Δt 、電波放射角度 θ_D に基づいて、各受信時間で微小な電波伝搬距離差 $\Delta d = v_r \cdot \Delta t \cdot \cos \theta_D$ が存在し、それに伴い位相差 $\Delta \varphi = 2\pi \cdot \Delta d / \lambda$ も発生する。受信時間毎の CSI から取得した直接波の位相差から Δd を算出し、角度 θ_D を求める。

この方式では、受信アンテナ数に関わらず角度推定が行えるものの、同一パケット内で取得した CSI の位相差が、複数アンテナで取得するものに比べて微小であるために分解能が限定的で、十分な受信アンテナ数が確保できる場合にはその精度が[12]より劣る。

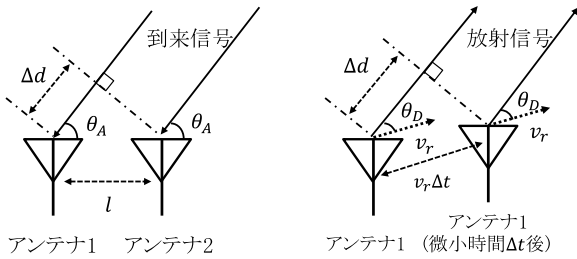


図 2. 複数アンテナによる信号の伝搬距離差(左)と受信時間差による信号の伝搬距離差(右)

Figure 2. Signal propagation distance difference between multiple receiving antennas (left) / multiple receiving timings (right)

2.2 MUSIC 法を利用した電波到来角度推定

複数の受信アンテナを利用した電波到来角度推定では、MUSIC 法がよく利用される[20][21]. アンテナ間隔 l , アンテナ数 N の一次元アンテナアレイに対して K 個の信号が到来する時, 各アンテナでの各到来信号に対する位相応答を表す方向ベクトルは, 以下の式で表される.

$$a(\theta_k) = [1, \exp(-j2\pi \cdot \frac{l \cdot \cos \theta_k}{\lambda}), \dots, \exp(-j2\pi \cdot \frac{(N-1) \cdot l \cdot \cos \theta_k}{\lambda})]^T. \quad (2)$$

θ_k は k 番目の信号の到来角度である. また, n 番目のアンテナの受信信号を x_n として, 全アンテナの受信信号を表す列ベクトル $X(t)$ と, その相関行列を以下のように定義する.

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T. \quad (3)$$

$$R_{xx} = \frac{1}{N} X(t) X^H(t). \quad (4)$$

R_{xx} の固有値, 固有ベクトルをそれぞれ λ_i, e_i ($i = 1, 2, \dots, N$) とする. これら N 個の組のうち, 固有値が大きい順に K 個の組は信号部分空間に対応するもので, 残りが雑音部分空間に対応している. 後者に対応する固有ベクトルは到来信号の方向ベクトルと直交することから, 次の式が成り立つ.

$$a^H(\theta_k) e_i = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, K, i = K + 1, K + 2, \dots, N). \quad (5)$$

これを利用して, MUSIC スペクトラム $S(\theta)$ を算出する.

$$S(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=K+1}^N |a^H(\theta) e_i|^2}. \quad (6)$$

θ が信号の到来角度に近い時には式(5)に従って分母が 0 に近づき, $S(\theta)$ の値が増大するため, $S(\theta)$ のピークが, それぞれの信号の到来角度となる.

通常, MUSIC 法は空間軸の一次元アンテナアレイに対して適用されるが, それに加え, 信号の周波数軸の情報からアンテナアレイを擬似的に構成し, 二次元アンテナアレイとして, MUSIC 法を適用する方式[22]が提案されている. この方式では, 空間軸と周波数軸に対して別々に位相応答を表す方向ベクトルを定義し, それらを組み合わせることで, 二次元アンテナアレイに対して MUSIC 法を適用している. これにより, アンテナ数が擬似的に増加する利点があるが, 周波数軸の位相変化は信号の伝搬距離情報の推測に利用され, 到来角度情報の推測には利用されない. 従って, 角度推定精度の向上は限定的であると考えられる.

3. 提案方式

3.1 概要

先行方式[12][13]の, 少数のアンテナでは角度推定精度が限定的となる課題を解決するため, 複数アンテナ・複数時間で取得した CSI の併用により, 空間軸・時間軸の二次元の要素を持つ擬似アンテナアレイを構成して角度推定を行い, 歩行者の測位精度を高める新たな方式を提案する. 先行方式[12][13]と提案方式の比較を図 3 に示す.

この方式では, 端末のアンテナ数が少ない場合でも, 時間軸の情報を併用することで分解能の不足を補うことができる. また, 空間軸と周波数軸の二次元の情報をそれぞれ角度推定と距離推定に利用する方式[22]とは異なり, 空間軸と時間軸の二次元の情報は共に, 同一の角度情報の推測に利用するため, それぞれの情報を独立して利用する場合より, 角度推定精度の向上が期待できる.

	先行方式[12]	先行方式[13]	提案方式
角度推定	CSIの空間的違いによる位相差を利用	CSIの時間的違いによる位相差を利用	CSIの空間・時間的違いによる位相差を併用
位相差の要因	アンテナごとの経路長差	車両移動による経路状況の変化	複数アンテナ・車両移動
複数のCSIの取得	複数アンテナの受信信号から 	単一パケットの複数箇所から 	複数アンテナの複数箇所から
特徴	多数のアンテナなら高精度 搭載アンテナ数が限定的	アンテナ数に関わらず角度推定 分解能(精度)が限定的	少数のアンテナでも高分解能 多数のアンテナで精度向上

図 3. 先行方式[12][13]と提案方式の比較

Figure 3. Comparison between the base method [12][13] and the proposed method

3.2 前提条件

車両は高精度なセンサ等を利用することから正確な自位置・速度の情報を持っており、車車間通信の規格[1]に基づきそれらを周期的(100ms 毎)に配信しているものとする。また、歩行者は車両の信号の受信や測位計算を行えるよう、携帯端末を所持しているものとする。

3.3 角度情報の導出

3.3.1 CSI の取得

歩行者は走行する周辺車両が送信した信号を N 個のアンテナを持つ携帯端末で傍受し、各受信アンテナで、同一パケット内の受信時間が Δt 離れた M 箇所で CSI をそれぞれ取得する。これらの情報から、図 4 で示すような、 $N \times M$ 個のアンテナを持つ二次元擬似アンテナアレイを構成する。

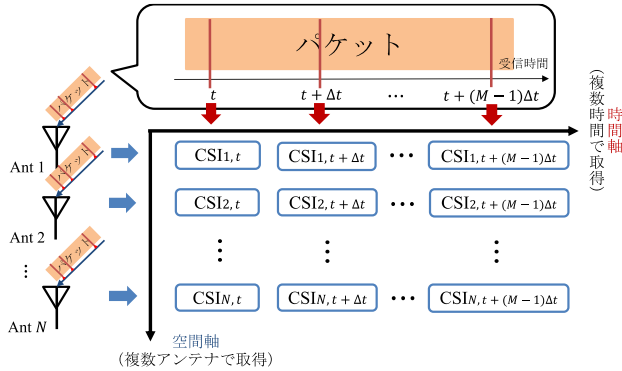


図 4. 二次元擬似アンテナアレイの構成

Figure 4. Construction of virtual two-dimensional antenna array

3.3.2 MUSIC 法による角度推定計算

空間軸と時間軸の二次元アンテナアレイに対し、MUSIC 法を適用して、歩車間角度の推測を行う。

n 番目のアンテナで m 番目の時刻に受信した CSI を $x_{n,m}$ として、二次元アンテナアレイの全アンテナの CSI を表す列ベクトル $X(t)$ と、その相関行列を以下のように定義する。

$$X(t) = [x_{1,1}(t), x_{2,1}(t), \dots, x_{N,1}(t), \dots, x_{N,M}(t)]^T. \quad (7)$$

$$R_{xx} = \frac{1}{N \times M} X(t) X^H(t). \quad (8)$$

R_{xx} の固有値、固有ベクトルをそれぞれ λ_i 、 e_i ($i = 1, 2, \dots, N \times M$)とする。 $N \times M$ 個の組のうち、固有値の大きい順に、到来信号数に等しい K 個の組は信号部分空間に対応し、残りの $N \times M - K$ 個が雑音部分空間に対応する。

二次元アンテナアレイでは、2.2 で挙げた一次元アンテナアレイの場合とは違い、それぞれの次元で、各アンテナの受信信号間で発生する位相変化の原理が異なるため、位相応答を表す方向ベクトルを、式(2)のように単純な形で定義することができない。このため、それぞれの次元で別々に方向ベクトルを定義し、それらを合成する。2.1.3 (1), (2)より、二次元アンテナアレイの、空間軸に沿った位相応答を表す方向ベクトル $a_1(\theta_{A,k})$ と、時間軸に沿った位相応答を表す方向ベクトル $a_2(\theta_{D,k})$ は次の式で示される。

$$a_1(\theta_{A,k}) = [1, \exp(-j2\pi \cdot \frac{l \cdot \cos \theta_{A,k}}{\lambda}), \dots, \exp(-j2\pi \cdot \frac{(N-1) \cdot l \cdot \cos \theta_{A,k}}{\lambda})]^T. \quad (9)$$

$$a_2(\theta_{D,k}) = [1, \exp(-j2\pi \cdot \frac{v_r \cdot \Delta t \cdot \cos \theta_{D,k}}{\lambda}), \dots, \exp(-j2\pi \cdot \frac{(M-1) \cdot v_r \cdot \Delta t \cdot \cos \theta_{D,k}}{\lambda})]^T. \quad (10)$$

$\theta_{A,k}$ と $\theta_{D,k}$ は k 番目の信号の到来角度、放射角度である。式(9),(10)のクロネッカー積(\otimes 演算)が、二次元アンテナアレイの各アンテナの位相応答を表す方向ベクトルとなる。

$$a_3(\theta_{A,k}, \theta_{D,k}) = a_1(\theta_{A,k}) \otimes a_2(\theta_{D,k}). \quad (11)$$

ここで、直接波のみに着目すると、直接波の到来角度 $\theta_{A,d}$ と放射角度 $\theta_{D,d}$ の関係は、以下の式で表される。

$$\theta_{D,d} = \theta_{A,d} + \phi. \quad (12)$$

ϕ は携帯端末の受信アンテナの配列方向と、歩車間の相対速度の方向との角度差であり、車両の進行方向の情報と、歩行者のジャイロ・加速度センサで得られる情報により算出可能である。式(12)を用いて、式(11)は以下のように $\theta_{A,d}$ のみで表現することができる。

$$a_3(\theta_{A,d}) = a_1(\theta_{A,d}) \otimes a_2(\theta_{A,d} + \phi). \quad (13)$$

式(13)と、 e_i のうち雑音部分空間に対応するものを用いて、到来角度に関する MUSIC スペクトラム $S(\theta_A)$ を算出する。

$$S(\theta_A) = \frac{1}{\sum_{i=K+1}^{N \times M} |a_3^H(\theta_A) e_i|^2} \quad (14)$$

$S(\theta_A)$ 算出後、そのピークから直接波の到来角度を導出する。

3.4 測位計算

測位計算では、測位誤差を低減するために、カルマンフィルタを利用して位置の平滑化を行う。

3.4.1 初期設定

歩行者の位置 x, y, z と移動速度 v_x, v_y, v_z 、クロックのずれによる衛星-歩行者間の距離誤差 δ を状態 \mathbf{X} 、GPS 信号から算出した k 個の衛星-歩行者間の距離 d_{s1}, \dots, d_{sk} 、CSI から算出した n 個の車両-歩行者間の距離・角度 $d_{c1}, \dots, d_{cn}, \theta_1, \dots, \theta_n$ 、ジャイロ・加速度センサで測定した歩行者の移動速度 s_x, s_y, s_z を観測値 \mathbf{Y} として定義する。 \mathbf{X} は直接観測不能な値であり、歩行者端末で取得した \mathbf{Y} により計算される。

$$\mathbf{X} = [x, y, z, v_x, v_y, v_z, \delta]^T, \quad (15)$$

$$\mathbf{Y} = [d_{s1}, \dots, d_{sk}, d_{c1}, \dots, d_{cn}, \theta_1, \dots, \theta_n, s_x, s_y, s_z]^T. \quad (16)$$

3.4.2 状態 \mathbf{X} の予測ステップ

ある時刻 t において、状態 \mathbf{X} の予測値 \mathbf{X}_t^- を直前の時刻 $t-1$ の状態 \mathbf{X}_{t-1}^+ と状態遷移モデル \mathbf{F} から算出する。

$$\mathbf{X}_t^- = \mathbf{F} \mathbf{X}_{t-1}^+, \quad (17)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & & & \Delta T & & & \\ & 1 & & \Delta T & & & \\ & & 1 & & \Delta T & & \\ & & & 1 & & \Delta T & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & 1 & \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

ΔT は隣接時刻間の時間差を表す。また、状態推定誤差分散 P についても、状態ノイズ分散 Q を用いて更新を行う。

$$P_t^- = F P_{t-1}^+ F^T + Q. \quad (19)$$

次に、これらの推測値と状態変換方向ベクトル H , Y の観測ノイズの共分散 R を用いてカルマンゲイン K を算出する。

$$K_t = P_t^- H^T (H P_t^- H^T + R)^{-1}. \quad (20)$$

H は、 X_t^- と各衛星・車両の位置情報から算出した、歩行者から各衛星・車両に対する単位方向ベクトルで構成される。

3.4.3 状態 X の更新ステップ

この時刻の観測値 Y とカルマンゲイン K を用いて、 X と P の更新を行う。 $\rho(X_t^-)$ は、 X_t^- から計算した各衛星・車両と歩行者の距離・角度である。

$$X_t^+ = X_t^- + K_t (Y_t - \rho(X_t^-)). \quad (21)$$

$$P_t^+ = (I - K_t H_t) P_t^-. \quad (22)$$

X_t^+ が、この時刻の測位結果となる。次の時刻には、時刻を $t+1$ として、同様の手順で計算を行う。

4. シミュレーション評価

シミュレーションにより先行方式[12][13]との比較を行い、提案方式の有効性を評価する。シミュレーションでは、電波伝搬シミュレーションソフトウェア“RapLab”（構造計画研究所社製）により 3D レイトレーシングで衛星・車両から歩行者への電波伝搬を模擬し、その情報から数値計算ソフトウェア“MATLAB”（Math Works 社製）で歩車間距離・角度の計算や、測位計算を行なう。

4.1 シミュレーション条件

4.1.1 概要

都市部の環境を想定して、東京銀座周辺の 3D 建物データ（NTT データ社製）を使用し、衛星・車両・歩行者を配置した。衛星の配置は、実際の衛星の位置情報に基づいている。3D 建物データ上の移動する車両・歩行者の配置と、同位置の航空写真（Google Earth より入手）を図 5 に示す。

表 1 はシミュレーション条件を表したものである。シミュレーションでは、車両や歩行者の移動を想定して、0.1 秒間隔の連続する 200 シーンを作成した。車両の信号は、車車間通信の規格[1]に基づいて設定した。RapLab で建物データを読み込み、GPS 衛星、車両、歩行者を配置して、3D レイトレーシングにより電波伝搬情報を取得した。

その後、得られた情報を用いて、MATLAB で各シーンの歩車間距離・角度の推測や測位計算を行なった。歩車間距離は、式(1)で定義される線形回帰モデルに、直接波の信号

強度を入力して取得した。仰角 15 度以下の衛星は、測距誤差が大きいと考えられるため、使用しないものとした。

表 1. シミュレーション条件

Table 1. Simulation conditions

シミュレータ	RapLab (3D レイトレーシング) MATLAB (角度, 距離, 測位計算)
試行条件	2019/1/1 PM1:00 から 0.1 秒間隔の 200 シーンで測位
車両の配置	片側二車線, 60km/h で移動 車頭間隔 5-30m ランダム配置 各シーン平均 8 台
歩行者の配置	一人, 歩道を 4km/h で移動
利用衛星	GPS 衛星 (仰角 15 度以上)
車両の信号	中心周波数: 700MHz 送信強度: 20dBm, 送信間隔: 0.1 秒
電波伝搬	最大反射・回折回数: 各 1 回
車両の位置誤差	無し
複数時間の CSI 取得	提案方式: 100 μ 秒間隔 6 回 先行方式[12]: 100 μ 秒間隔 2 回 先行方式[13]: 1 回

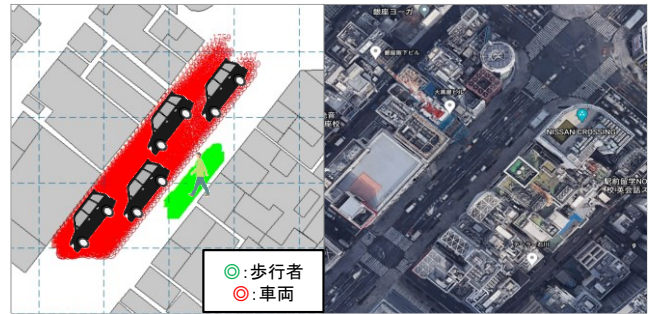


図 5. シミュレーションマップ

Figure 5. Simulation map

4.1.2 時間分解能の模擬

実際の受信機では、信号の時間分解能に制限が存在し、時間分解能より短い時間に連続して受信した直接波とマルチパス波は、CSI を用いた場合でも分離できない。この場合、信号強度値が合成されるため、歩車間距離・角度の推測に誤差が発生する。

しかし、RapLab ではこの制限が存在せず、全てのマルチパス波が分離された状態で CSI が得られる。現実に近いシミュレーションを行うため、図 6 で示すように、一般的な無線 LAN と同じ時間分解能 (50ns) を CSI に設定し、この時間内の信号を全て合成する処理を行なった。同じ時間分解能の範囲内に到来した n 個の信号強度値の合成 α は、以下の式で算出する。

$$\alpha = |(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n) + i(\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n)|. \quad (23)$$

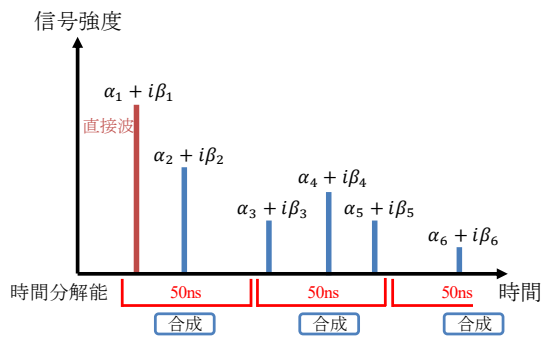


図 6. 時間分解能の模擬
Figure 6. Simulation of time resolution

4.1.3 熱雑音の模擬

RapLab では、伝搬経路上のノイズは考慮されないため、通信経路を模擬して、CSI に熱雑音の影響を付加した。まず、ランダムなデータから作成した送信信号波形と 4.1.2 の CSI を利用して、複数の経路で到達した OFDM 受信信号の波形を作成した。SN 比に応じたノイズをこれに付加し、その信号波形から再度 CSI を取得した。SN 比は、レイトレーシングで算出した車両ごとの受信信号強度と、熱雑音電力から算出した。熱雑音電力 P_n は、以下の式(24)で表される。

$$P_n = \frac{hf_c B}{e^{kT} - 1} \approx kTB \quad (hf_c \ll kT). \quad (24)$$

f_c と B は信号の中心周波数と帯域幅、 T は温度、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数である。より大きな雑音を想定し、 αkTB (α は定数) を雑音電力とした。シミュレーションでは、 $\alpha = 10$ 、気温 25 度、使用周波数帯域 20MHz とした。

4.2 シミュレーション結果と考察

4.2.1 角度推定に関する結果

(1) 提案方式と先行方式の比較

提案方式と先行方式[12][13]の、角度推定誤差の平均値を図 7 に示す。提案方式と先行方式[12]では、共にアンテナ数の増加に伴い角度推定精度が向上している。一方で、単一アンテナを用いる先行方式[13]ではこの変化はない。方式ごとの比較では、2 アンテナを利用する提案方式は、誤差が、同じ 2 アンテナの先行方式[12]より 73%、単一アンテナの提案方式[13]より 45%小さい。また、6 アンテナの比較では、提案方式は先行方式[12]より誤差が 11%小さい。

これらの結果より、提案方式ではアンテナ数が少ない時に、特に大きな改善効果を得られることがわかった。これは、アンテナ数が少ない時の分解能の不足を、複数時間の CSI の利用により補えた為だと考えられる。また、単一アンテナで複数時間の CSI を用いる先行方式[13]よりも 2 アンテナの提案方式の精度が高いことから、複数時間の CSI のみでは不足する分解能を、複数アンテナの CSI の併用で補えているとも考えられる。一方で、アンテナ数が多い場合には、提案方式と先行方式[12]では精度の差が縮まる。これは、アンテナ数が増加したために、複数時間の CSI を利

用しなくても、複数アンテナの CSI のみで十分な分解能を得られるようになったためだと考えられる。

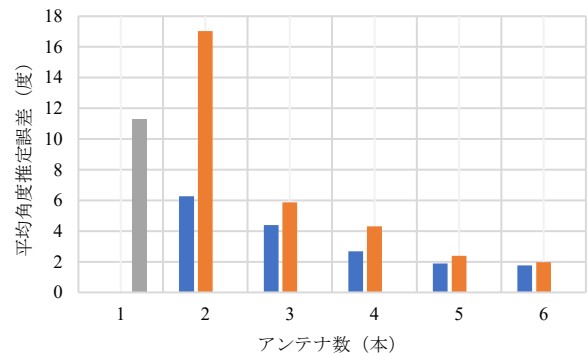


図 7. 各方式の平均角度推定誤差
Figure 7. Average angle error for each method

(2) 車両の送信信号周波数との関係

車両の送信信号周波数を、700MHz に加え、一般的な無線 LAN で用いられる 2.4GHz、5GHz に変更し、その時の角度推定誤差を調査した。その結果を図 8 に示す。周波数ごとの精度の差は小さいものの、700MHz の時に最も精度が高く、その後 5GHz、2.4GHz の順に誤差が大きい。これは、周波数の増加により SN 比が低下したためだと考えられる。信号は周波数が高いほど距離当たりの減衰量が増加するため、700MHz と比較すると 2.4GHz や 5GHz では同じ伝搬距離でも信号強度が小さくなる。これにより、信号に対するノイズの比率が高まり、誤差の増加に繋がったと考えられる。一方で、周波数の高い 5GHz の方が 2.4GHz より精度が高いことから、単に周波数の増加が精度を低下させるだけではないことがわかる。その要因の一つとして、CSI 間の位相差の増加が考えられる。式(9)、(10)で示される各要素の位相応答は、分母に信号の波長 λ があるため、周波数が高い時ほど値が大きくなる。結果として、観測される位相差が大きくなることから、SN 比増加の影響を相殺し、角度推定精度があまり低下しなかったと考えられる。

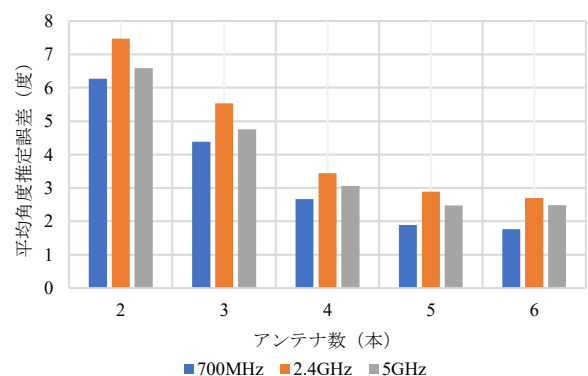


図 8. 周波数ごとの平均角度推定誤差
Figure 8. Average angle error for each frequency band

(3) 歩車間距離との関係

提案方式で 2, 4, 6 アンテナを利用した際の、歩車間距離ごとの角度推定誤差の平均値を図 9 に示す。どのアンテナ数でも、歩車間距離が大きい時ほど角度推定誤差が増加することが確認できる。これは、歩車間距離の増加に伴い信号の受信強度が低下するためだと考えられる。同じシミュレーション環境での、歩車間距離と SN 比の関係を図 10 に示す。この図で表されるように、歩車間距離が増加すると信号の受信強度が低下し、SN 比も減少する。これにより、受信信号におけるノイズの比率が高まり、角度推定時の誤差が増加したと考えられる。

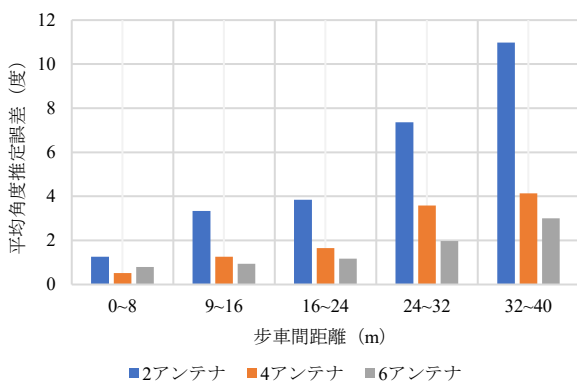


図 9. 歩車間距離ごとの平均角度推定誤差

Figure 9. Average angle error for each pedestrian-vehicle distance

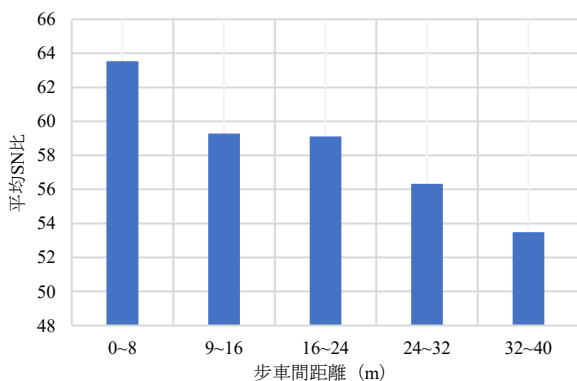


図 10. 歩車間距離ごとの平均 SN 比

Figure 10. Average SNR for each pedestrian-vehicle distance

4.2.2 測位に関する結果

(1) 提案方式と先行方式の比較

提案方式と先行方式[12][13]の、水平測位誤差の平均値を図 11 に示す。GPS のみで測位を行なった場合、平均水平測位誤差は 18.87m であった。これを考慮すると、どの方式でも車両の利用により、測位誤差を大幅に削減できている。方式ごとの比較では、2 アンテナを利用した提案方式で、誤差が、同じ 2 アンテナの先行方式[12]より 43%、単一アンテナを利用する先行方式[13]より 37%小さい。角度推定手法以外の条件は同一であることから、提案方式の角度推定により測位精度が大きく向上したことが確認できる。

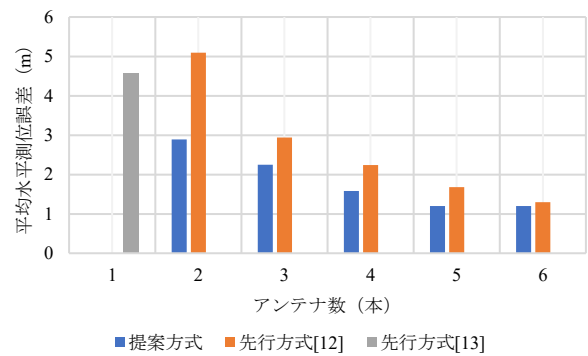


図 11. 各方式の平均水平測位誤差

Figure 11. Average horizontal positioning error for each method

(2) 車両の送信信号周波数との関係

車両の送信信号周波数を 700MHz, 2.4GHz, 5GHz に変更し、その時の水平測位誤差を調査した。その結果を図 12 に示す。4.2.1(2)の結果と同様に、700MHz の時に精度がもっとも高く、5GHz, 2.4GHz の順に誤差が大きくなるが、700MHz とそれ以外の周波数との精度差は角度推定の時より大きい。角度推定精度の差が小さいにもかかわらず、測位誤差の差が比較的大きくなった理由としては、4.2.1(2)で述べた信号の距離減衰量の増加が、角度推定だけでなく距離推定にも影響を与えているためだと考えられる。周波数が増加した場合、短距離でも信号が大きく減衰し、強度が小さくなるため、信号強度を利用して測距を行う際に誤差が発生しやすくなる。その結果、車両を用いた測位計算に利用する、歩車間距離と角度の双方で誤差が増大し、大きな測位誤差に繋がったものと考えられる。

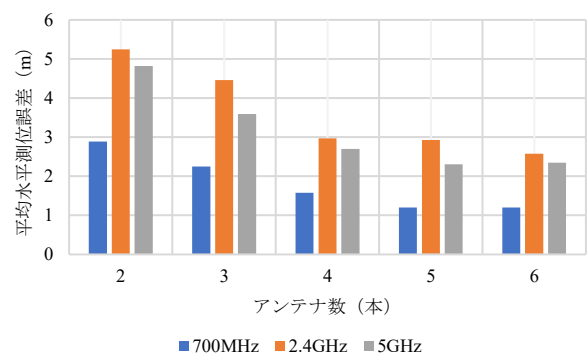


図 12. 周波数ごとの平均水平測位誤差

Figure 12. Average horizontal positioning error for each frequency band

(3) 利用車両台数との関係

これまでのシミュレーションでは、測位時に利用可能な車両を全て利用していたが、利用車両台数が測位精度に与える影響を調べるため、各シーンで利用する車両の台数を制限して検証を行なった。設定した利用車両台数ごとの、提案方式における平均水平測位誤差を図 13 に示す。どの

アンテナ数でも、利用車両台数が多いほど測位精度は向上するが、車両台数 4-5 台付近からは、精度の変化がほとんど見られない。従って、周囲に 5 台程度の車両があれば、上限値に近い精度の測位が可能だと考えられる。

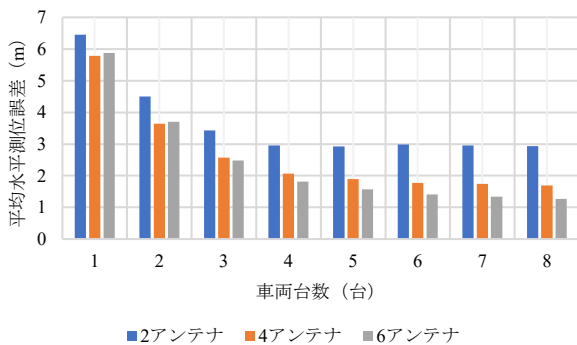


図 13. 車両台数ごとの平均水平測位誤差

Figure 13. Average horizontal positioning error for each number of vehicles

5. おわりに

本稿では、車車間通信で周囲の車両が位置情報を交換するパケットを歩行者の携帯端末で傍受し、推測した歩車間の距離・角度情報から車両を測位の基準点とすることで、歩行者測位精度を改善する方式において、より高精度に測位を行うため、CSI の空間・時間的変化を併用して角度を推定する手法を提案した。この方式では、複数アンテナで取得したパケットの異なる受信時間の複数箇所からそれぞれ CSI を取得し、信号の空間軸・時間軸双方の位相変化を MUSIC 法により同時に解析して歩車間の角度推定を行う。

3D レイトレーシングによるシミュレーション評価により、携帯端末への搭載が容易な 2 アンテナの場合に、先行方式と比較して角度推定誤差を 17.04 度から 6.27 度、測位誤差を 5.09m から 2.89m に削減できることを確認した。方式の改善と、より様々な環境での検証が今後の課題である。

参考文献

[1] ITS Connect 推進協議会, 車車間通信メッセージ仕様 ITS Connect TD-001 1.0 版, 2015.
 [2] 一般社団法人 UTMS 協会, 安全運転支援システム(DSSS) 2020.10.20 時点, <http://www.utms.or.jp/japanese/system/dsss.html>.
 [3] TOYOTA, ITS Connect 2020.10.20 時点, <https://toyota.jp/technology/safety/itsconnect/>.
 [4] Suhua Tang, Kiyoshi Saito, and Sadao Obana, "Transmission control for reliable pedestrian-to-vehicle communication by using context of pedestrians," in Proc. IEEE ICVES'15, 2015, pp. 41-47.
 [5] Yearlor Patou, Sadao Obana, and Suhua Tang, "Improvement of pedestrian positioning precision by using spatial correlation of multipath error," in Proc. IEEE ICVES'18, Madrid, Spain, Sept. 2018.
 [6] L. Hsu, F. Chen, and S. Kamijo, "Evaluation of Multi-GNSSs and GPS with 3D Map Methods for Pedestrian Positioning in an Urban Canyon Environment," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E98.A(1), pp.284-293, 2015.

[7] ECLIPSE, マップマッチングによる自車位置検出の補正について 2020.10.20 時点, https://www.densoten.com/jp/eclipse/support/manual/avn558hd/contents/403_50_90.21642.html.
 [8] C. Kwon and I. Hwang, "Constrained stochastic hybrid system modeling to road map - GPS integration for vehicle positioning," 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), 2016.
 [9] L. Youwen, "Forecast Map Matching Model for Vehicle-borne Navigation Based on Roadway Characteristic", ICOIP 2010 International Conference, vol.1, p.569-571, 2010.
 [10] 山下 遼, 湯 素華, 小花 貞夫, 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, 情報処理学会論文誌, 59(1), 113-123, 2018.
 [11] Suhua Tang and Sadao Obana, "Improving performance of pedestrian positioning by using vehicular communication signals," IET Intelligent Transport Systems, DOI: 10.1049/iet-its.2017.0134, 2018.
 [12] Kazuhiro Toda, Suhua Tang and Sadao Obana, "High-Precision Pedestrian Positioning by Using Radio Signals from Vehicles and Roadside Units," ICEIC 2019, Jan. 2019.
 [13] Wataru Komamiya, Suhua Tang and Sadao Obana, "Radiation Angle Estimation and High-Precision Pedestrian Positioning by Tracking Change of Channel State Information," Sensors 2020, 20, 1430.
 [14] Z. Yang, Z. Zhou, and Y. Liu, "From RSSI to CSI: Indoor Localization via Channel Response," ACM Computing Surveys, vol. 46, no. 2, pp. 1-32, 2013.
 [15] Y. Xie, Z. Li, and M. Li, "Precise power delay profiling with commodity Wi-Fi," in Proc. MobiCom'15, 2015, pp. 53-64.
 [16] D. Vasisht, S. Kumar, and D. Katabi, "Decimeter-level localization with a single Wi-Fi access point," in Proc. NSDI'16, 2016, pp. 165-178.
 [17] S. Sen, J. Lee, K.-H. Kim, and P. Congdon, "Avoiding multipath to revive inbuilding Wi-Fi localization," in Proc. MobiSys'13, 2013, pp. 249-262.
 [18] S. Wielandt, L. Strycker, "Indoor Multipath Assisted Angle of Arrival Localization," MDPI Sensors, vol. 17, pp. 2522:1-29, Nov 2017.
 [19] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-34, pp.276-280, 1986.
 [20] T. J. Shan, M. Wax and T. Kailath, "On spatial Smoothing for Directions of Arrival Estimation of Coherent Signals", IEEE Trans. on Acoustics Speech and Signal Processing, vol. ASSp-33, no. 4, pp. 806-811, April 1985.
 [21] R. Williams, S. Prasad, A. Mahalanabis and L. Sibul, "An improved spatial smoothing technique for bearing estimation in a multipath environment", IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Processing, vol. 36, pp. 425-432, Apr. 1988.
 [22] R. Zhang, Y.-H. Quan, S.-Q. Zhu, L. Yang, Y.-C. Li, and M.-D. Xing, "Joint high-resolution range and DOA estimation via MUSIC method based on virtual two-dimensional spatial smoothing for OFDM radar," International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2018, Article ID 6012426, 9 pages, 2018.