

車両移動による無線チャネル状態情報の変化を利用した 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: 歩行者が携帯端末で自位置を周囲の車両へ配信する歩車間通信は, 歩行者事故を防止できるものの, その効果が歩行者の測位精度に大いに依存する. 都市部では GPS 単独測位精度が大幅に劣化する問題に対して, 筆者らは, 衝突事故を防止するために車両の位置情報を配信する車車間通信の信号を歩行者の携帯端末で傍受して, 受信信号から歩車間の距離・角度を推測することで, GPS 衛星に加え車両を基準点として測位を行う方式を提案したが, 高精度な角度推定のためには携帯端末に多数のアンテナが必要となる. 本稿では, 車両の移動によるチャネル状態情報の時間変化から, 角度を正確に推定し, それを用いて測位精度を改善する方式を提案する. 3D レイトレーシングシミュレーションにより, 6 アンテナを使用した先行方式と比べ, 単一アンテナの提案方式で角度推定誤差を 15 度から 5.7 度, 測位誤差を 6.42m から 3.49m に削減できることを確認した.

A proposal on angle estimation and high precision pedestrian positioning using change of channel state information caused by vehicle movement

WATARU KOMAMIYA SADA O OBANA SUHUA TANG

1. はじめに

交通事故は現代社会の大きな課題の一つである. その対策として, 車両同士が 700MHz 帯の無線通信を用いて自位置や速度の情報[1]を交換し, ドライバに対して注意喚起を行うことで, 安全運転を支援する車車間通信システムが 2015 年秋実用化され[2], 現在, 既に一部の車両で運用されている[3].

一方, 歩行者の交通事故を防止するために, 歩行者の持つ携帯端末が車載機と通信を行い, 位置情報を交換することで双方に接近を通知する歩車間通信手法[4]も提案された. 車両に搭載したカメラやセンサでは不可能な, 死角にいる歩行者の検知も可能だが, その効果が位置精度に大いに依存する. 都市部では, ビルにより GPS 信号が遮断され測位に十分な衛星数を得られない, あるいは GPS 信号がビル等に反射して測距誤差が発生し測位精度が低下して[5], 事故防止には不十分である. 測位に利用する衛星数の増加を目的として複数衛星システムを用いる方式[6]でも, 使用可能な衛星が天頂付近に集中するため, 測位精度の改善は限定的である.

歩行者の測位精度向上のため, 筆者らは車車間通信で車両が配信する位置情報を含む信号を歩行者の携帯端末が傍

受し, その信号の CSI(Channel State Information)より取得した直接波の信号強度から歩車間距離を推測し, それと GPS 測位とを併用する測位手法[7][8]を提案し, 車両台数が多い場合の効果を確かめた. 車両数が少ない場合の測位精度を改善するために, 複数のアンテナで受信する直接波の位相のズレから取得した車両からの電波到来角度情報を利用する手法[9]をさらに提案した. この方式[9]では, 1)高精度な角度推定のために携帯端末に多数のアンテナが必要となる, 2)角度の基準となる携帯端末自身の向き(方位)の測定誤差が角度推定精度に影響する, という問題があった.

本稿では, 複数アンテナで受信した信号の空間的位相差を利用して直接波の電波到来角度推定を行う先行方式[9]に対し, 車両の移動によるドップラー効果で生じる, 受信信号の時間的位相差を利用して直接波の電波放射角度推定を行い, さらにそれを用いる歩行者測位方式を提案する. この方式では, 信号の異なる受信時間の複数箇所取得した CSI からそれぞれ得られた直接波の位相差により電波放射角度を推定する. 先行方式[9]とは異なり, アンテナ数の影響を受けず, 端末の方位誤差も生じない特徴がある. また, 3D レイトレーシング法によるシミュレーションで, 角度誤差・測位誤差を大幅に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 章では本研究のベース

† 電気通信大学 大学院情報理工学研究科
Graduate School of Informatics and Engineering,
The University of Electro-Communications

となる先行方式[9]、第4章では提案方式について述べる。第5章ではシミュレーション評価を行い、第6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 車両の測位

車両は測位の際、加速度センサやジャイロセンサを用いて自車両の走行距離や方向を算出し、GPS 信号から得た位置情報を補正する(推測航法)。また、マップマッチングや、車線検知なども併用し、測位誤差は数 m 以内に抑えられている[10][11][12]。車両の測位精度は、自動運転の実現に向け、今後さらに向上し、歩行者の単独測位より遥かに高くなることが期待される。

2.2 歩行者の測位

屋内では、Wi-Fi 電波を用いた歩行者測位手法が盛んに検討されている。測位精度を上げるために、一般的に電波の信号強度を表す RSSI (Received Signal Strength Indicator) ではなく、より正確に電波伝搬特性を反映する CSI が使用される。信号には壁等に反射・回折して届くマルチパス波と、LOS(Line of Sight:見通し)の経路を通る直接波が存在し(図1左)、経路の違いから到達時間・信号強度が異なる。このため、受信波形は各マルチパスの到達時間・信号強度に応じて送信波形が複数重なり合い形成される(図1右)。CSI は、受信信号の時間・周波数ごとの強度や位相の情報で[13]、直接波や各マルチパス波の強度情報を取得することが可能である。

Wi-Fi 電波を用いた歩行者測位手法としては、直接波の信号強度や信号到達時間から推測した電波伝搬距離、位相から推測した電波到来角度を用いてアクセスポイントを基準点として歩行者位置を算出する手法[14][15][16][17]、CSI の変化から歩行者を検知する手法[20][21][22][23]などが提案されている。

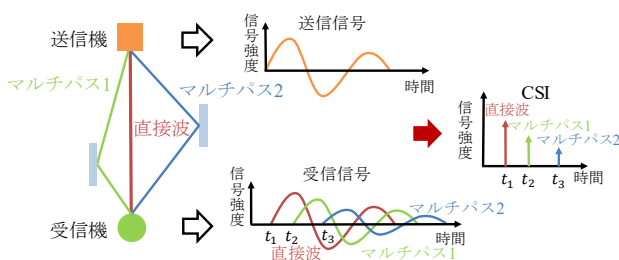


図1. 信号の経路と受信信号のCSI

2.3 歩行者測位における電波到来角度推定

歩行者測位には、歩車間距離に加えて電波到来角度情報が利用され、その導出にはアレイアンテナを利用した手法がよく用いられる。この手法では、複数のアンテナ間の受信信号の位相差や、到来時間差から電波到来角度を推測する[16][17]。他に、指向性アンテナを利用する角度推定手法[18]では、最も信号強度が強くなる方位を検出し、電波到来

角度を推測する。

また、ドップラー効果を利用する手法[19]も提案されている。この手法では設置した高速回転するビーコンを用いて、回転により発生するドップラー効果を測定し、電波到来角度を推測する。ドップラー効果を角度推定に利用する点で方式[19]と提案方式は共通するものの、提案方式は基準点に移動する車両を用いる点や、直接ドップラー効果を測定するのではなく、ドップラー効果によって微小時間に発生する信号の位相差を用いるという点で異なる。なお、これらの角度推定手法[16][17][18][19]では共通して、角度推定に専用の装置が必要になり、一般的な無線端末での利用が難しいという問題がある。

3. 提案方式のベースとなる先行方式[9]

3.1 概要

この方式では、歩行者は車両が位置情報を配信する信号を傍受し、車両の位置情報を取得するとともに、CSI を取得し直接波の信号強度を得る。続いて直接波の信号強度から歩車間距離を推測し、GPS に加えて車両を基準点として歩行者位置を算出する。ただし、利用可能な車両台数が少ない場合には歩車間の距離情報のみでは測位精度が不十分ため、直接波から電波到来角度を推測して利用することで、より高い精度で歩行者測位を行う。

3.2 歩車間距離の推測

直接波は、伝搬距離に応じて信号強度が減衰する。これを利用し、直接波の信号強度から伝搬距離を算出する。直接波の信号強度 L と距離 d には以下の式(1)が成り立つ。

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

定数 a , b は既知の直接波の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導出する。

3.3 電波到来角度の推測

通信は通常、速度や品質の向上のため複数のアンテナを用いて行われるが、アンテナの位置の違いから同一の信号でも受信アンテナごとに電波伝搬距離が異なり(図2)、位相差が存在する。伝搬距離差 $\Delta d = l \cdot \cos \theta$ はアンテナ間の距離 l と電波到来角度 θ によるため、直接波の位相差から伝搬距離差 Δd を求め、電波到来角度 θ を導出する。位相差の導出には、MUSIC 法[24]という手法を用いる。

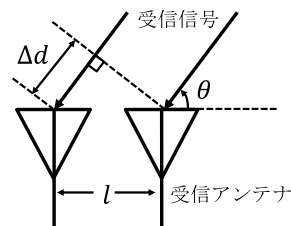


図2. 受信アンテナごとの電波伝搬距離差

3.4 測位計算

歩行者の3次元ENU座標と時刻誤差を $\mathbf{X}$ ，歩車間・歩衛(歩行者-衛星)間の推測距離のベクトルを $\mathbf{Y}$ として，以下の行列式により測位計算を行う。

$\mathbf{X}$ の初期値 $\mathbf{X}^0$ は式(2)のように設定する。1~3 列目は歩行者の座標 x, y, z ，4 列目は歩行者の時刻誤差である。

$$\mathbf{X}^0 = (0, 0, 0, 0)^T \quad (2)$$

次に，GPS 衛星・車両から歩行者への方向ベクトルの行列 $\mathbf{H}$ は以下のように表される。

$$\mathbf{H} = \partial d(\mathbf{X}) / \partial \mathbf{X} |_{\mathbf{X}=\mathbf{X}^0} \quad (3)$$

ここで， $d(\mathbf{X})$ は歩行者の位置と衛星・車両位置との距離のベクトルである。歩衛間の疑似距離 $\mathbf{Y}_{\text{sat}}$ ，歩車間の推測距離 $\mathbf{Y}_{\text{car}}$ はそれぞれ以下のような式で表すことができる。

$$\mathbf{Y}_{\text{sat}} = d(\mathbf{X})_{\text{sat}} + \delta + \boldsymbol{\varepsilon} \approx d(\mathbf{X}^0)_{\text{sat}} + \mathbf{H}_{\text{sat}} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}^0) + \delta + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\mathbf{Y}_{\text{car}} = d(\mathbf{X})_{\text{car}} + \boldsymbol{\varepsilon} \approx d(\mathbf{X}^0)_{\text{car}} + \mathbf{H}_{\text{car}} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}^0) + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

δ は歩行者の時刻誤差による距離誤差， $\boldsymbol{\varepsilon}$ は測距時に発生する誤差で， $d(\mathbf{X})_{\text{sat}}$ ， $d(\mathbf{X})_{\text{car}}$ ， $\mathbf{H}_{\text{sat}}$ ， $\mathbf{H}_{\text{car}}$ はそれぞれ $d(\mathbf{X})$ と $\mathbf{H}$ の衛星・車両部分である。また， i 番目の車両について，歩車間の方向ベクトル $\mathbf{H}_{\text{car } i}$ ，距離 $d(\mathbf{X})_{\text{car } i}$ ，歩車間角度 $\theta_{\text{car } i}$ を用いると，歩車間の推測距離の x, y 座標成分 $\mathbf{Y}_{(x)\text{car } i}$ ， $\mathbf{Y}_{(y)\text{car } i}$ に関して，それぞれ以下のような式が成立する。なお， $\mathbf{a}_n$ は $\mathbf{a}$ の n 番目の要素を示す。

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{(x)\text{car } i} &= d(\mathbf{X})_{\text{car } i} \cos \theta_{\text{car } i} + \varepsilon_1 \\ &\approx d(\mathbf{X}^0)_{\text{car } i} \cos \theta_{\text{car } i} + \mathbf{H}_{\text{car } i1} \cdot (\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_1^0) + \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{(y)\text{car } i} &= d(\mathbf{X})_{\text{car } i} \sin \theta_{\text{car } i} + \varepsilon_2 \\ &\approx d(\mathbf{X}^0)_{\text{car } i} \sin \theta_{\text{car } i} + \mathbf{H}_{\text{car } i2} \cdot (\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_2^0) + \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (7)$$

以上の式から，歩行者の位置を式(8)によって算出する。

$$\hat{\mathbf{X}}^{i+1} = \mathbf{X}^i + (\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{Q}_Y^{-1} \cdot \mathbf{H})^{-1} \cdot \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{Q}_Y^{-1} \cdot (\mathbf{Y} - d(\hat{\mathbf{X}}^i) - \hat{\boldsymbol{\delta}}) \rightarrow \mathbf{X} \quad (8)$$

$\mathbf{Q}_Y$ は各値に対する計算時の重みで，距離誤差の分散値から事前に設定される。重み付けにより，誤差の大きい距離の影響を低減可能であり，測位精度の向上が期待される。

3.5 課題

高精度な電波到来角度推定を行うには，空間分解能を高めるため歩行者の携帯端末に多数のアンテナが必要となるが，端末サイズの制限から実装は難しい。また，電波到来角度推定の際に歩行者端末のアンテナに対する車両位置の角度を算出するための基準となる，携帯端末自身の向き(方位)をジャイロセンサ等で測定する必要があるが，その誤差も測位精度に大きく影響を与える。

4. 提案方式

4.1 概要

複数アンテナごとの信号の経路長差によって発生するCSIの空間的違いによる直接波の位相差を利用して角度推定を行う先行方式[9]に対し，車両の移動による経路状況の変化によって発生するCSIの時間的違いによる直接波の位相差を利用して角度推定を行う方式を提案する。提案方式と先行方式の比較を図3に示す。

先行方式では，直接波の位相差算出に利用する複数CSIを複数アンテナにより取得するため，そのアンテナ数が角度推定精度に影響する。一方，提案方式では，単一のアンテナで受信した単一パケットの異なる受信時間の複数箇所からCSIを取得するため，角度推定精度がアンテナ数の影響を受けない。また，先行方式では電波到来角度を導出するため，基準となる歩行者端末の方位測定誤差が角度推定精度に影響していたが，提案方式では車両からの直接波の電波放射角度を導出するため，角度の基準は車両の方位であり，携帯端末の方位は角度推定に関与しない。車両には，サイズや消費電力の制約が少なく高精度なセンサが搭載され，方位測定誤差は小さい。

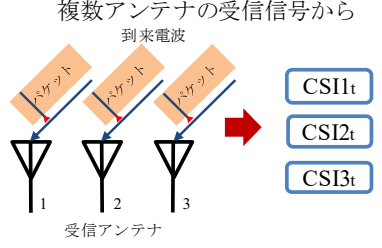
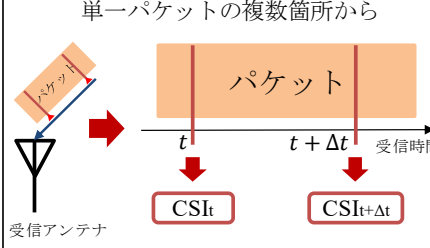
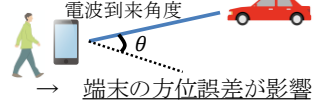
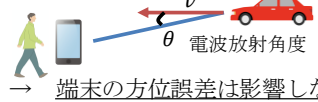
	先行方式	提案方式
角度推定	CSIの空間的違いによる位相差を利用	CSIの時間的違いによる位相差を利用
位相差の要因	アンテナごとの経路長差	車両移動による経路状況の変化
複数のCSIの取得	複数アンテナの受信信号から 到来電波  受信アンテナ → アンテナ数が精度に影響	単一パケットの複数箇所から  受信アンテナ → アンテナ数の影響を受けない
導出する角度	 電波到来角度 → 端末の方位誤差が影響	 電波放射角度 → 端末の方位誤差は影響しない

図3 先行方式と提案方式の比較

4.2 前提条件

3 章で述べた，提案方式のベースとなる先行方式の場合と同じ以下の前提条件を設ける．

- ① 車両は搭載する無線機から自車両の位置情報と速度情報を周期的(100ms 毎)に配信する
 - ② 車両の位置情報と速度情報は正確である
 - ③ 歩行者は携帯端末を所持し，車両の信号を受信できる
- ①は車車間通信の規格[1]として検討され，実用化されている．②は 2.1 で述べた理由による．③は提案方式において歩行者が車両の信号を利用するために設ける．

4.3 角度情報の導出

4.3.1 車両移動による信号の位相差

車両が送信した信号を時刻 t に歩行者が傍受したとき，直接波の信号強度 h_t は，以下の式で表される．

$$h_t = \alpha e^{-j2\pi f_c \frac{d}{\lambda} + \phi} \quad (9)$$

α は信号の振幅成分， $e^{-j2\pi f_c \frac{d}{\lambda} + \phi}$ は信号の位相成分を表し， f_c は信号の中心周波数， λ は波長， d は信号の伝搬距離， ϕ は初期位相である．次に，時刻 t から微小時間 Δt 後(e.g.100 μ s)の直接波の信号強度 $h_{t+\Delta t}$ は，次の式で表される．

$$h_{t+\Delta t} = \alpha e^{-j2\pi f_c \frac{d-\Delta d}{\lambda} + \phi} \quad (10)$$

Δd は車両が信号を送信しながら移動することで Δt 間に発生する信号の伝搬距離差である．式(9)と式(10)の除算から， Δd による Δt 間の信号の位相差 $\Delta\phi$ は以下となる．

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \frac{-\Delta d}{\lambda} \quad (11)$$

4.3.2 CSI の取得

車両の移動速度は可変であり，送受信機間の時刻誤差も変化する．複数のパケットから CSI を取得する場合，送信時間の正確な同期が必要となるが，これは困難である．このため，提案方式では単一パケット内の受信時間が Δt 離れた複数箇所から CSI を取得し，そこで取得した直接波の位相差を利用する．

車車間通信には，同時に複数の周波数の信号(サブキャリア)を利用してデータを送信する OFDM 通信が用いられ，CSI はパケット先頭付近の同期用波形から算出されるため，複数箇所からの CSI の算出は行われない．しかし，OFDM 通信では，後続の信号でも一部分のサブキャリアが周波数同期のためにパイロット信号として使用されるため，それらを用いて CSI を算出可能である．CSI 取得後，それぞれの CSI から直接波を取得し，位相差 $\Delta\phi$ を算出する．

4.3.3 電波放射角度の算出

図 4 のように，車両が高速 v_c ，歩行者が低速 v_p で移動し，車両の進行方向と歩行者方向の角度(直接波の電波放射角度)を θ_c ，歩行者の進行方向と車両方向の角度を θ_p とす

る．歩車間の距離が十分にあり， Δt が微小時間であるため， Δt 間の歩車間の角度変化や車両速度変化を無視する．車両の信号を歩行者が受信した際， Δt 間の信号の伝搬距離差 Δd は， v_c より v_p が十分に大きいことから，歩行者の移動の影響を無視して以下のように近似できる．

$$\Delta d = \Delta t(v_c \cdot \cos \theta_c + v_p \cdot \cos \theta_p) \cong v_c \cdot \Delta t \cdot \cos \theta_c \quad (12)$$

信号の周波数を f ，光速を c として $\Delta\phi$ は式(13)で表される．

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \frac{-v_c \cdot f_c \cdot \Delta t \cdot \cos \theta_c}{c} \quad (13)$$

さらに， θ_c について以下のように変形できる．

$$\cos \theta_c = \frac{\Delta\phi \cdot c}{2\pi \cdot v_c \cdot f_c \cdot \Delta t} \quad (14)$$

$\Delta\phi$ は 4.3.2 で取得され， c と f_c ， Δt は既知である．そこで， v_c を車車間通信のパケットから取得すれば， θ_c を導出できる．

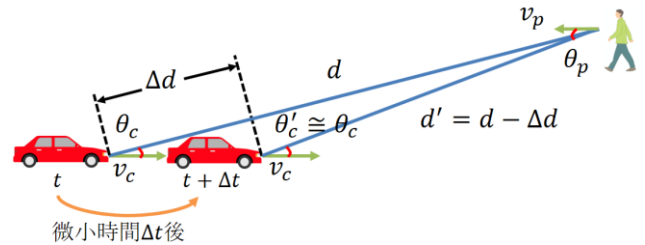


図 4. 微小時間 Δt 間の信号伝搬距離の変化

4.4 測位計算

測位計算では，角度情報に加えて先行方式[9]と同様の手法で取得した車両位置と歩車間の距離情報，GPS 信号の情報を併用し，式(8)の計算により歩行者位置を算出する．

5. シミュレーション評価

3D レイトレーシングシミュレーションで提案方式の有効性を評価する．都市部で車両が道路上移動する環境で 0.1s 毎に 200 シーン的环境を作成し，各シーンで電波伝播シミュレーション・角度算出・測位計算を行う．

5.1 シミュレーション条件

5.1.1 GPS 衛星・車両・歩行者の配置

シミュレーションには，都市部の環境を想定し銀座周辺の 3D 建物データ(NTT データ社製)を用いた．“RapLab”(構造計画研究所社製)で 3D 建物データに車両・歩行者を配置した．歩行者は 4km/h で移動し，車両は片側 3 車線の道路に車頭間隔 5~30m，平均 15 台でランダム配置後，60km/h で移動する．GPS 衛星は過去の実際の衛星の位置データを元に配置した．測位に使用した銀座 4 丁目交差点の航空写真(Google Earth より入手)を図 5 左に，歩行者・車両の配置を図 5 右に示す．

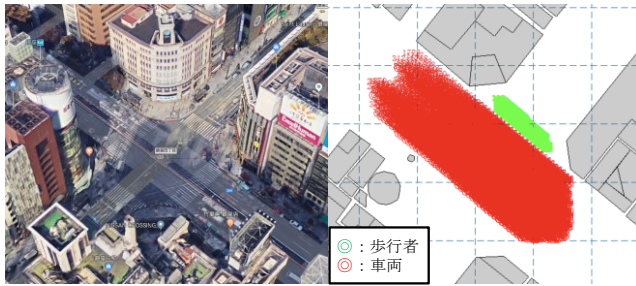


図 5. シミュレーションマップ

5.1.2 電波伝搬シミュレーション

Raplab で電波伝搬の 3D レイトレーシングを行い, CSI を取得した. 最大電波反射回数, 最大電波回折回数はそれぞれ 1 回, 電波の透過は起こらないものとした. 車両の送信周波数を 700MHz, 送信電力を 20dBm に設定した.

5.1.3 時間分解能の模擬

RapLab には受信機の時間分解能の制限がなく, 限りなく高精細な CSI が得られる. しかし, 実際には時間分解能の制限により, ごく近い時間に受信したマルチパス波は分解できずに信号強度が合成されるため, それを用いて歩車間距離や電波放射/到来角度を推定する際に誤差(マルチパス誤差)が発生する. 実機での環境に近づけるため, CSI に一般的な無線 LAN と同じ 50ns の時間分解能を設定して, 50ns 内の信号強度値を合成する処理を行った(図 9).

n 個の信号強度値の合成 α は, 以下の式(15)で表される.

$$\alpha = |(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n) + i(\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n)| \quad (15)$$

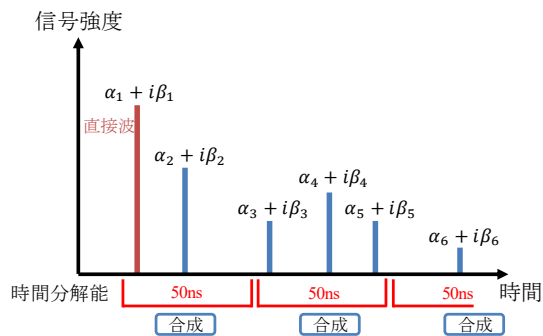


図 6. 時間分解能の模擬

5.1.4 通信チャネルの模擬

RapLab では通信チャネル(経路)での熱雑音は考慮されないため, 通信チャネルを模擬し, CSI に熱雑音の影響を付加した. まず, 送信信号波形を作成し, 5.1.3 で時間分解能の制限を考慮して合成した CSI を用いて複数経路で到達した OFDM 受信信号の波形を作成した. SN 比に応じてその波形にノイズを付加した後, 再度 OFDM 信号から CSI の取得を行った. このときの 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電力と, 熱雑音電力から算出した. 熱雑音電力 P_n は式(16)で表される.

$$P_n = \frac{hf_c B}{e^{\frac{hf_c}{kT}} - 1} \approx kTB \quad (hf_c \ll kT) \quad (16)$$

f_c , 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, 定数 α を用いて, αkTB 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.

5.1.5 提案方式の CSI 取得間隔

提案方式で複数 CSI から取得した直接波の位相差は, CSI の取得間隔 Δt に応じて増加する. 位相差が小さすぎる場合ノイズ等の影響で精度が低下するため, 車車間通信の規格[1]から算出したパケット伝送時間 150 μ s~300 μ s を参考に, CSI の取得は 100 μ s 間隔の 2 箇所から行うものとした.

5.1.6 測位計算

得られた CSI から“Matlab”(Math Works 社製)を用いて, 歩車間距離・電波放射/到来角度の推定や測位計算を行った. 歩車間距離は直接波の信号強度から線形回帰で算出した. 測距誤差が大きいと考えられる仰角 15 度以下の衛星は未使用とした. 重みづけは測距誤差の平均値の 2 乗の逆数を用いて, 表 1 のように設定した.

表 1. 重みづけのパラメータ

条件	測距誤差	重み
衛星(仰角 65 度以上)	0.003	1/(0.003 × 0.003)
衛星(仰角 65 度以下)	9.73	1/(9.73 × 9.73)
車両(10m 以下)	4.00	1/(4.00 × 4.00)
車両(20m 以下)	3.16	1/(3.16 × 3.16)
車両(30m 以下)	3.43	1/(3.43 × 3.43)
車両(40m 以下)	5.84	1/(5.84 × 5.84)
車両(40m 以上)	8.41	1/(8.41 × 8.41)

5.2 シミュレーション結果と考察

5.2.1 電波放射/到来角度推定に関する結果

(1) 提案方式と先行方式の角度推定精度の比較

提案方式と, 先行方式(2, 4, 6 アンテナ)の, 角度誤差の平均値を表 2 に, 累積度数分布を図 7 に示す. 平均値で比較すると, 先行方式では 6 アンテナの場合で 2 アンテナと比較して角度誤差は約 14%削減されている. 一方, 提案方式では先行方式 6 アンテナの場合と比較して角度誤差は約 62%小さい. また, 図 7 を見ると, 角度誤差が 4 度以下の範囲については, 先行方式の方が角度誤差の小さい値が多いことが確認できる.

表 2. 角度誤差の平均値

	提案方式	先行方式 6 アンテナ	先行方式 4 アンテナ	先行方式 2 アンテナ
角度誤差(度)	5.73	15.02	18.69	19.52

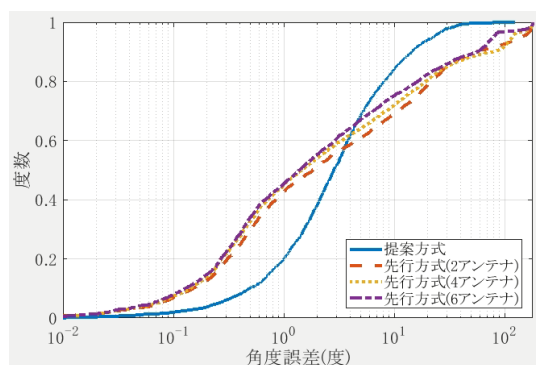


図 7. 角度誤差の累積度数分布

平均値の比較で提案方式の角度誤差が小さかったのは、提案方式のマルチパス誤差が全体的に小さかったためだと考えられる。5.1.3 の処理により、CSI から得られた直接波の信号強度値には、近い時間に到達した他のパスの信号強度値が合成されている。このため、角度推定の際に誤差が発生する。先行方式でマルチパス誤差は主に、直接波とそれに合成されたパスの到来角度差により発生する。図 8 はシミュレーションで、ある車両-歩行者間の電波伝搬において直接波とそれに合成されるマルチパス波を地図データ上に示したものである。このようにマルチパス波が直接波と全く異なる角度から到来した場合、そのパスのアンテナごとの位相差は、直接波の位相差とは大きく異なるため、それらの合成波から算出する角度は誤差が大きい。図 8 の状況では、6 アンテナを使用した先行方式で角度誤差は 29.18 度であった。一方、提案方式でマルチパス誤差は主に、直接波とそれに合成されたパスの放射角度差により発生する。図 8 のような状況では、マルチパス波と直接波の放射角度差は小さく、位相差は直接波と近いため、これらの合成波から算出する角度は誤差が小さい。この時提案方式の角度誤差は、2.99 度であった。マルチパス誤差は、受信機の時間分解能が向上した場合、直接波に合成されるマルチパス波が減少することから、低減すると考えられる。このため、時間分解能が 50ns より高い場合の角度推定精度の比較・検証も今後行う必要がある。

また、図 7 の比較より、角度誤差 4 度以下の範囲では先行方式の方が誤差の小さい値が多い。そこで、歩行者の携帯端末に複数のアンテナが搭載されている場合には、提案方式と先行方式の角度推定手法を組み合わせることで、より高い精度の角度推定が行える可能性がある。

今回のシミュレーションでは提案方式の CSI 取得は単一パケット内の 2 箇所から行ったが、より多くの箇所から取得した CSI を用いることで、ノイズなどの影響が低減でき、角度推定精度の向上が期待できる。

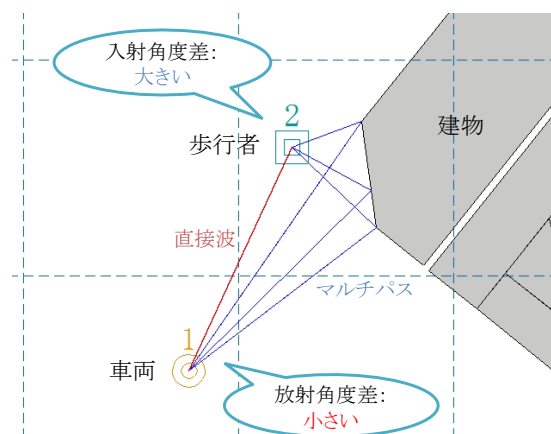


図 8. 直接波に合成されたマルチパス波の放射角と入射角

(2) 歩車間距離ごとの角度推定精度の比較

提案方式における歩車間距離ごとの電波放射角度推定誤差の平均値を図 9 に示す。角度誤差は歩車間距離が最短の 5~10m の場合に最も小さく、歩車間距離の増加に伴い誤差も増大した。これは、受信信号の信号強度が距離に応じて変化するためだと考えられる。図 10 は、5.2.1(1)のシミュレーションにおける歩車間距離ごとの受信信号の SN 比の平均値である。受信信号の SN 比は一部の場合を除いて、歩車間距離の増加に伴い減少している。歩車間距離の増加により、信号強度が減衰したことで受信信号のノイズの比率が高まり、このノイズによって角度推定の誤差も増加したのではないだろうか。

この結果の活用として、提案方式の角度情報への重み付けの最適化が挙げられる。これまで角度情報に対し、距離情報と同様に歩車間距離に基づく重み付けの値を設定していたが、角度推定時の誤差に基づいた値ではなかった。今回得られた結果から、より最適な重み付けの値を設定すれば、測位計算精度の向上が期待できる。

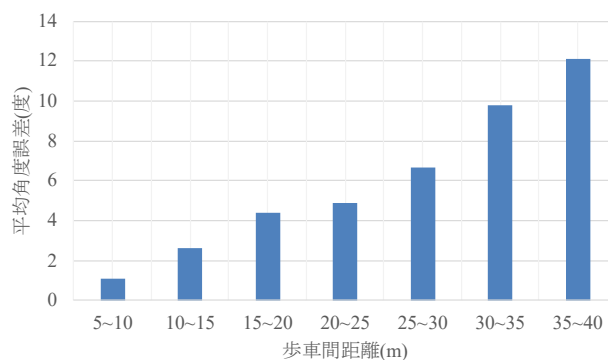


図 9. 歩車間距離ごとの平均角度誤差

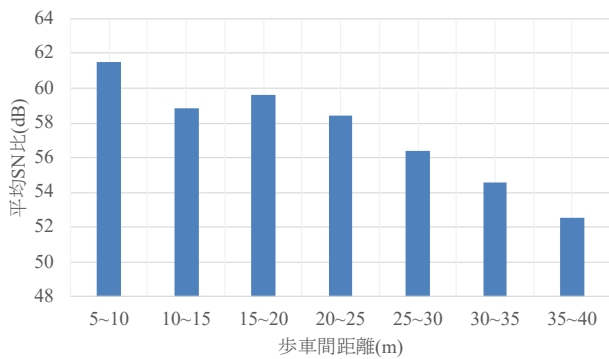


図 10. 歩車間距離ごとの平均 SN 比

(3) 干渉波と角度推定精度の関係

車車間通信では、CSMA/CA による信号の衝突回避が行われるものの、隠れ端末問題などで複数の車両が同時にパケットを送信した場合には、信号の干渉が発生しうる。干渉波が比較的強い場合には、パケットの受信に失敗しそのパケットは破棄されるものの、弱い場合にはデータ通信は問題なく行われ、干渉波の影響を受けた CSI が測位に用いられる。このため、干渉波が提案方式の角度推定に与える影響を調査した。

干渉波の影響のシミュレーションは、5.1.4 の手順においてノイズの他に、ランダムな送信データから生成した OFDM 信号の波形を SI 比に応じた受信電力に調節し、受信信号の波形に合成することで行った。図 11 は、SI 比を変化させた時の提案方式の角度誤差の平均値である。SI 比が 10dB の場合、平均角度誤差は 5.2.1(1)で示した干渉波を考慮していない時の結果と比較して 3 倍以上になっており、干渉波の影響が大きいことがわかる。一方で、SI 比が 30dB より大きい場合には、角度誤差はほとんど変化しておらず、干渉波の影響が微少であることが確認できる。このことから、SI 比が 30dB 以上の場合、干渉波の影響は考慮しなくても良いと考えられる。

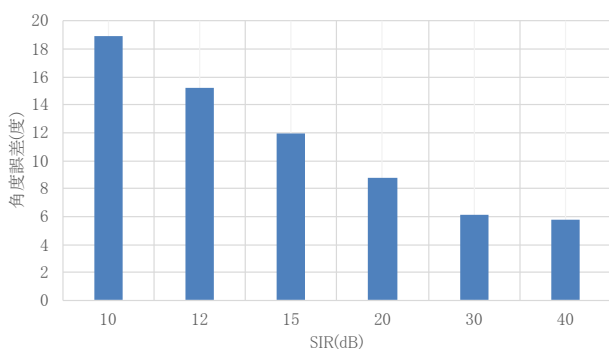


図 11. SI 比ごとの平均角度誤差

(4) 車両の送信信号周波数と角度推定精度の関係

提案方式において、車両の送信信号周波数を 700MHz, 2.4GHz, 5GHz と変化したときの電波放射角度推定誤差

の平均値を表 3 に、累積度数分布を図 12 に示す。角度誤差は 700MHz が最も小さく、5GHz, 2.4GHz では 5GHz のほうが小さかったが、ほぼ同じ値であった。

式(16)より、微小時間の間に発生する直接波の位相差は信号の周波数が高いほど大きくなる。このため、高い周波数で送信するほど発生する位相差を算出する際のノイズの影響が小さくなり、角度推定精度が高くなると推測したが、最も周波数が低い 700MHz の時に角度誤差が最小となった。これは、周波数によって信号の距離減衰量が異なるためであると考えられる。理想的な環境では、電波は周波数の 2 乗に比例して減衰量が大きくなる。高い周波数の場合、微小時間の間に発生する位相差が大きくなる一方で、短い距離でも信号強度が大きく減衰するため、5.1.4 で発生させたノイズの比率が高まり、角度誤差増加の原因になったと考えられる。しかし、2.4GHz と 5GHz では周波数の高い 5GHz の方が、角度誤差が小さい。角度誤差を最小にする送信周波数については、今後も検証を行っていく必要がある。

表 3. 周波数ごとの角度誤差の平均値

	700MHz	2.4GHz	5GHz
角度誤差(度)	5.73	6.96	6.89

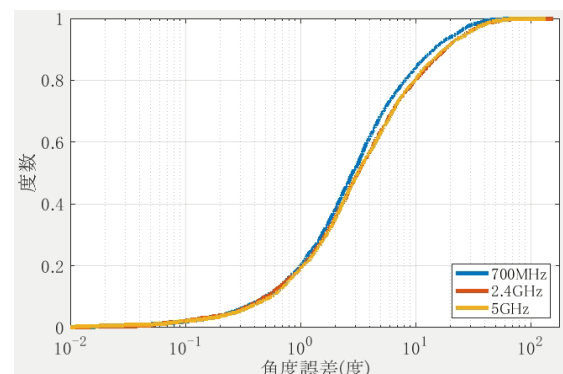


図 12. 周波数ごとの角度誤差の累積度数分布

5.2.2 測位に関する結果

(1) 提案方式と先行方式の測位精度の比較

提案方式と、先行方式(2,4,6 アンテナ)の、水平測位誤差の平均値を表 4 に、累積度数分布を図 13 に示す。なお、GPS のみで測位を行った場合の平均測位誤差は 24.02m であった。測位精度について、提案方式では先行方式の 6 アンテナの場合と比較して誤差は約 46%小さい結果となった。しかし、提案方式でも水平測位誤差は平均 3.49m と大きい。この原因の一つは、GPS の誤差の影響を受けたためだと考えられる。(2)では GPS と測位精度の関係を検証する。

表 4. 水平測位誤差の平均値

	提案方式	先行方式 6 アンテナ	先行方式 4 アンテナ	先行方式 2 アンテナ
水平測位誤差 (m)	3.49	6.42	7.55	7.17

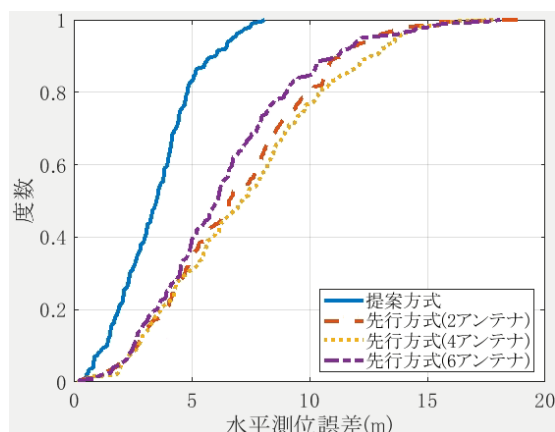


図 13. 水平測位誤差の累積度数分布

(2) GPS 利用の測位精度への影響

GPS を利用せず、車両のみを用いて測位を行った時の水平測位誤差の平均値を表 5 に示す。GPS 無しの場合、どの方式でも測位誤差が GPS 有りの場合より小さかった。これは、周囲の高層ビルの影響により、GPS 信号の誤差が歩車間距離・角度を利用した車両の情報に比べ、大幅に大きかったことが原因だと考えられる。このような環境で測位精度の低下を防ぐため、GPS の重み付けの改善による誤差の低減は今後の課題である。

表 5. GPS 無しでの水平測位誤差の平均値

	提案方式	先行方式 6 アンテナ	先行方式 4 アンテナ	先行方式 2 アンテナ
水平測位誤差 (m)	2.10	5.85	7.11	6.74

(3) 利用車両台数と測位精度の関係

各シーンで測位に使用する車両台数を限定し、提案方式と、歩車間距離のみで測位を行った場合の、水平測位誤差の平均値と 95%信頼区間を図 14 に示す。車両台数と測位精度の関係を正確に観測するため、測位計算に GPS は用いなかった。歩車間距離のみの場合、車両台数の減少に伴って測位誤差が大幅に増加したが、提案方式では誤差の増加が小さい。車両台数が 3 台の場合、誤差は提案方式の方が約 74%小さかった。また、車両台数 2 台以下の場合、歩車間距離のみでは測位計算が行えなかった。これは、角度情報の利用により、歩行者位置の算出に利用する情報が増加したためであると考えられる。距離のみでは歩行者の位置の確定に最低 3 台の車両が必要だが、距離と角度を利用す

ることで、車両台数が 1 台でも歩行者位置を算出できる。一方、車両台数が増加した場合には、測位精度は向上するものの、依然として 2m 以上の誤差が存在する。これは、多数の測定値の中に角度推定誤差が大きいものがあるために、それを利用した際に測位誤差が発生してしまうためと考えられる。5.2.1(2)の結果などから重み付けを改善し、多数の測定値から誤差の大きいものを除ければ、測位精度の更なる改善が期待できる。

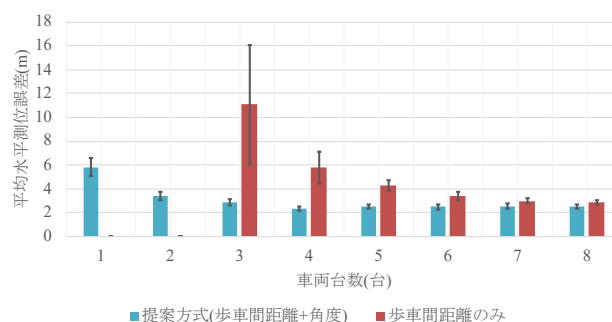


図 14. 車両台数ごとの水平測位誤差

6. おわりに

本稿では、歩行者事故削減のため、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歩行者の携帯端末で傍受し、歩車間の距離・角度情報を推測することで歩行者の測位精度を改善する手法を提案した。ここでは、単一のアンテナで受信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(チャネル状態情報)を取得し、CSI から得られた直接波の位相差から角度推定を行う。これにより、従来方式の 1)高精度な角度推定のため歩行者の携帯端末に多数のアンテナが必要となる、2)角度推定の基準となる携帯端末自身の方位誤差が精度に影響する、という問題を解決した。

一般的な無線 LAN 程度の性能を持つ受信機の場合、6 アンテナの先行方式と比較して、角度推定誤差 15 度から 5.7 度、測位誤差を 6.42m から 3.49m まで削減できることを 3D レイトレーシングシミュレーションにより確認した。

単一パケットの 3 つ以上の箇所から CSI を取得する場合や受信機の時間分解能が向上した場合の角度・位置推定精度の検証、重み付けの改善など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) 2019. 3.20 時点, <http://www.utms.or.jp/japanese/system/dsss.html>.
- [3] TOYOTA, ITS Connect 2019. 3.20 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-GNSS 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] 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.
 - [8] 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.
 - [9] 戸田和宏, 湯素華, 小花貞夫, 車両からの電波の長期計測による路側機の高精度測位方式の提案, *情報処理学会論文誌*, 採録決定, 2019.
 - [10] 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 2019. 3.20 時点,
https://www.densoten.com/jp/eclipse/support/manual/avn558hd/contents/403_50_90.21642.html
 - [11] 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.
 - [12] L. Youwen, "Forecast Map Matching Model for Vehicle-borne Navigation Based on Roadway Characteristic", *ICOIP 2010 International Conference*, vol.1, p.569-571, 2010.
 - [13] 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.
 - [14] Y. Xie, Z. Li, and M. Li, "Precise power delay profiling with commodity Wi-Fi," in Proc. *MobiCom'15*, 2015, pp. 53-64.
 - [15] D. Vasishth, S. Kumar, and D. Katabi, "Decimeter-level localization with a single Wi-Fi access point," in Proc. *NSDI'16*, 2016, pp. 165-178.
 - [16] 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.
 - [17] S. Wielandt, L. Strycker, "Indoor Multipath Assisted Angle of Arrival Localization," *MDPI Sensors*, vol. 17, pp. 2522:1-29, Nov 2017.
 - [18] A. Cidronali, S. Maddio, G. Giorgetti, and G. Manes, "Analysis and Performance of a Smart Antenna for 2.45-GHz Single-Antenna Indoor Positioning," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 58, 1, pp 21-31, Jan 2010.
 - [19] H. Chang, J. Tian, T. Lai, H. Chu, P. Huang, "Spinning Beacons for Precise Indoor Localization," in Proc. 6th ACM conference on Embedded network sensor systems, pp 127-140, Nov 2008.
 - [20] M. Kotaru, K. Joshi, D. Bharadia, and S. Katti, "Spotfi: Decimeter level localization using Wi-Fi," in Proc. *SIGCOMM'15*, 2015, pp. 269-282.
 - [21] X. Wang, L. Gao, S. Mao, and S. Pandey, "CSI-based fingerprinting for indoor localization: A deep learning approach," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 1, pp. 763-776, Jan 2017.
 - [22] Z. Wu, Q. Xu, J. Li, C. Fu, Q. Xuan, and Y. Xiang, "Passive Indoor Localization Based on CSI and Naive Bayes Classification," *IEEE Transactions on Systems*, vol. 48, no. 9, Sept 2018.
 - [23] K. Qian, C. Wu, Z. Yang, Y. Liu, F. He, and T. Xing, "Enabling Contactless Detection of Moving Humans with Dynamic Speeds Using CSI", *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 17, pp. 52:1-18, Apr 2018.
 - [24] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-34, pp. 276-280, 1986.