

車両からの電波到来角度を利用した 歩行者測位精度向上方式の提案と評価

戸田和宏¹ 湯素華¹ 小花貞夫¹

概要: 歩行者事故の低減のために歩行者が持つ携帯端末が自らの位置を周辺車両に通知する歩車間通信では, 歩行者測位の高精度化が必須である. 筆者らは, これまでに GPS による測位と車両が発する電波の直接波の信号強度から算出した歩車間距離に基づく測位を併用して, 都市部でも GPS 単独より高い精度で測位できる方式を提案した. 本稿では, この先行方式に加えて, 車両からの電波到来角度を用いてより高い測位精度を実現する方式を提案した. ここでは, 1)車両からの直接波の到来角度の判別, 2)衛星・車両に対する重み付け, 3)測位計算における残差の大きい方程式の除去が重要である. シミュレーションにより, ビルが密集する銀座付近の環境において, 先行方式に比べ測位誤差を 23%削減できることを示した.

Proposal on Improving Positioning Precision of Pedestrians by Using Incoming Directions of Radio Signals from Vehicles and Its Evaluation

KAZUHIRO TODA¹ SUHUA TANG¹ SADA OOBANA¹

1. はじめに

歩行者死亡事故の削減を目的に, 歩行者が携帯するスマートフォン等のモバイル端末から端末の位置情報を周辺車両に周知する歩車間通信が注目されている[1]. ここでは歩行者端末の測位の高精度化が課題である. これまで高いビルに囲まれる都市部での GPS 等の衛星による測位精度の低下を改善するために, 複数衛星測位システムを用いる方式[2]が検討されているが, ビルなどの遮蔽物の影響により測位に利用可能な衛星が天頂付近に集中し天空での衛星配置のばらつきが悪いため, 効果は限定的である.

本稿では, 既に筆者らが提案した, GPS による測位と車両が発する電波の直接波の信号強度から算出した歩車間距離に基づく測位を併用する方式[3]に加えて, 車両からの電波到来角度を求めて測位演算に組み込むことにより, より高精度な測位を可能とする方式を提案する. また, 3D レイトレーシング法を用いたシミュレーションを行い, 提案方式の有効性を評価した.

以降, 第2章では関連技術を概観する. 第3章では, 提案方式のベースとなる先行研究[3]の方式を述べる. 第4章では提案方式を述べ, 第5章では提案方式の有効性をシミュレーションで評価し, 第6章で考察する. 最後に第7章で結論を述べる.

2. 関連技術

2.1 車車間通信・路車間通信・歩車間通信

車車間通信・路車間通信は, それぞれ車両同士, 車両と路側機の無線通信により周辺車両や道路状況などの情報を取得して, 運転者に対して安全運転の支援を行うシステムである. 既に, 車両同士の衝突防止のために 2016 年秋に実用化され, 一部の車種にはシステムが搭載されており, 今後も普及が想定される[4]. この安全運転支援システムでは, 700MHz 帯の電波を使用し, 車両の位置情報, 速度等の情報を周囲車両に頻繁(100m 秒毎)ブロードキャストする.

一方, 歩車間通信[1]は, 歩行者と車両が直接通信を行うことで, 車両の運転者側だけでなく, 自転車を含む歩行者にも注意喚起を可能なシステムである[5]. 歩行者から車両への通信では, 歩行者の位置を車両に通知するが, ここでは歩行者の測位の正確性が求められる. 歩行者の測位誤差が大きい場合, 運転者にとって危険な位置にいるのかどうかを判断できない.

2.2 スマートフォン技術の現状

スマートフォンの普及が進み, 平成 28 年度では所有率が 70.7%[6]となり, 我々の生活に不可欠なものになっている.

スマートフォンなどの携帯端末は GPS 対応のものが殆どであり, iPhone 7/7 Plus では, QZSS (Quasi-Zenith Satellite System: 準天頂衛星システム)も利用できる[7]. これにより, スマートフォンの所持者は自位置を測位可能であるが, 都

¹ 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

市部では、衛星からの電波がビルなどの遮蔽・反射によるマルチパスの影響を受けて測位精度の低下が著しい。

一方で、LTE 等で MIMO(Multiple Input Multiple Output)を利用した高速通信を実現するため、送信側と受信側の両方に複数のアンテナを備えることが一般的になっている。

3. 本研究のベースとなる先行研究[3]

筆者らは、車車間通信の電波を利用して、GPS 衛星からの電波のみでは高精度な測位が困難な場所でも、歩行者の測位精度を向上させる方式を先に提案した。ここでは、マルチパスの影響を受けないように、車両から受信した電波の RSSI(総受信信号強度)ではなく、CSI(チャネル状態情報)により得られる直接波の信号強度から、車両と携帯端末(受信機)を持つ歩行者との距離を算出し、GPS 衛星信号に加えて歩行者の位置測位に利用する。

3.1 前提条件

以下を前提条件としている。

- 車両は 2.1 で述べた安全運転支援システムの無線機を搭載し、周辺車両に対して自車両位置を定期的（例 100m 秒毎）に送信する。
- 車両側の測位は正確である。
- 歩行者は GPS と車両からの電波を受信する携帯端末を所持する。

車両側の測位が正確であるとしたのは、今後の自動運転技術の発展に伴い、車両自身の測位はさらに正確になると考えられるためである。車線検知や、タイヤの回転数を基に検出される車速パルス信号、加速度センサや角速度センサ、3D マップ、路側機などを組み合わせて測位することが検討されている[8][9][10]。

3.2 RSSI と CSI

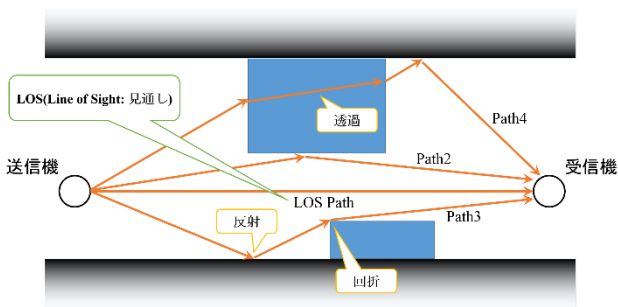


図1 マルチパス電波伝搬

RSSI(Received Signal Strength Indication: 総受信信号強度)は、LOS(Line of Sight:見通し)の経路を通る信号(直接波)だけではなく、反射波や回折波など全ての信号の強度を合成したものである。図1のような環境では、直接波だけではなく、反射波や回折波などのマルチパスの影響を顕著に受けるため、信号強度が安定しない。このため、車両と歩行者との間の測距に RSSI を用いると誤差が大きくなること

が予想される。

一方 CSI(Channel State Information: チャネル状態情報)は、無線 LAN や LTE の通信で採用されている変調方式である OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing: 直交周波数分割多重方式)の信号から取得できる情報で、サブキャリア周波数ごとの信号強度や位相を表す[11]。CSI では、時間軸で信号強度を示すことができる。図1のように送信機から受信機まで信号が伝播するとき、CSI は図2のようになる。最初に届く第1波(LOS Path)の信号強度は建物や地面に反射せずに到来した直接波の強度を表す。

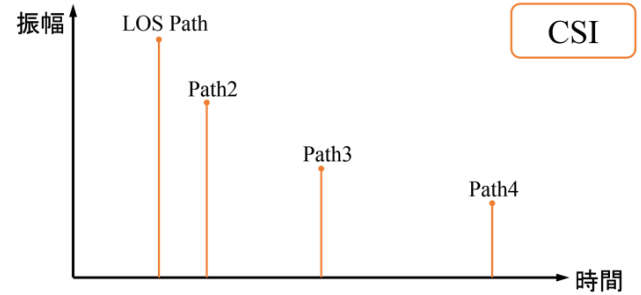


図2 CSI

CSI から得られる直接波の強度は、受信機が各パスを分離するのに十分な時間分解能を持つ場合、周囲の建物や地面で反射・回折したパスの干渉による信号強度の増幅・減衰の影響を受けないため、信号強度から送受信機間距離を算出する際に生じる誤差が RSSI から算出したときに比べて小さくなる。受信機の時間分解能は時間の計測においての精度を表し、一般的な無線 LAN 受信機では、 $5 \times 10^{-8} \text{ sec}$ 程度である。

3.3 GPS の利用

測位計算に k 番目の有効な GPS 衛星(x_k, y_k, z_k)と歩行者(x, y, z)の間の実距離と擬似距離 $d_{est,k}$ との関係は式(1)で表せる。測位計算では、これを利用可能な衛星数だけ立式する。 c は光速を示す。なお、擬似距離の測距誤差は時刻誤差 Δt による誤差のみとする。

$$\sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2} + c\Delta t - d_{est,k} = 0. \quad (1)$$

3.4 車両からの電波の利用

測位計算に i 番目の有効な車両(x_i, y_i, z_i)から受信した電波の CSI を用いて直接波の信号強度を求め、その強度から式(2)に示す直接波の信号強度 L_i と距離 $d_{est,i}$ の関係を用いて、歩車間距離を計算する。

$$L_i = a \log_{10} d_{est,i} + b. \quad (2)$$

式(2)の a, b は定数である。また、車両と歩行者の間の実距離を d_i とすると、

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (3)$$

となる．この値と L_i から算出した歩車間距離 $d_{est,i}$ との関係から，式(4)を利用可能な車両台数だけ立式する．

$$d_i - d_{est,i} = 0. \quad (4)$$

3.5 歩行者位置の計算

式(1)(4)から成る連立方程式の最適解を求める．

4. 電波到来角度を利用する提案方式

測位精度をさらに向上させるため，3章で述べた筆者らの先行研究[3]の方式に加えて，新たに車両からの電波到来角度を求め，それも含めて歩行者の位置を算出する方式を提案する．図3に提案方式の概要を示す．車両が発した電波から得られる情報は，車両位置，歩車間距離，電波到来角度である．車両位置は車両側で求め，車両から周辺車両に無線通信でブロードキャストされるパケットに含まれ，歩車間距離，電波到来角度は，車両が発した電波から歩行者の携帯端末側で求める．

図4に全体の処理フローを示す．歩行者が車両から受信した電波に直接波が含まれているかどうかを判別したのち，直接波が含まれている場合のみ歩車間距離と電波到来角度を算出する．電波到来角度は，算出結果が直接波の方角であるかを判別し，直接波の方角であると判別された電波到来角度のみ測位計算に利用する．測位計算では，歩車間距離・車両からの電波到来角度，GPS衛星との距離から連立方程式を立式し，連立方程式の残差を求める．残差が大きい方程式を除去したのち，再度，連立方程式を求め，歩行者は自位置を算出する．

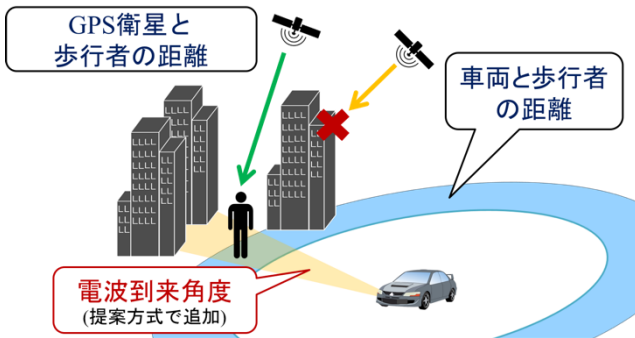


図3 提案方式の概要

4.1 前提条件

3.1節で述べた先行研究[3]の方式の前提条件に以下の条件を加える．

- 携帯端末は電波到来角度を計算するため複数アンテナを備える．2.2節で述べたように現在のスマートフォンでは，複数のアンテナを備えることが一般的になっている．

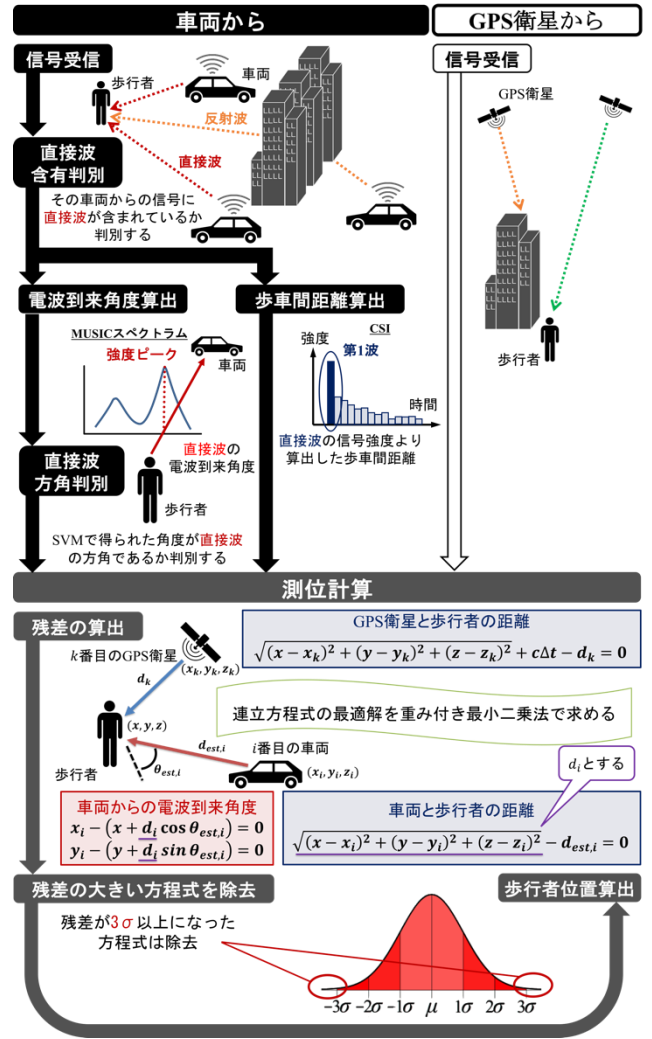


図4 提案方式の処理フロー

4.2 車両からの電波到来角度の算出

提案方式では，車両から歩行者端末に届く電波から電波の到来角度を，MUSIC法[12]を用いて求める．本アルゴリズムは高分解能周波数推定の手法で，電波到来角度推定[13]等に用いられる．

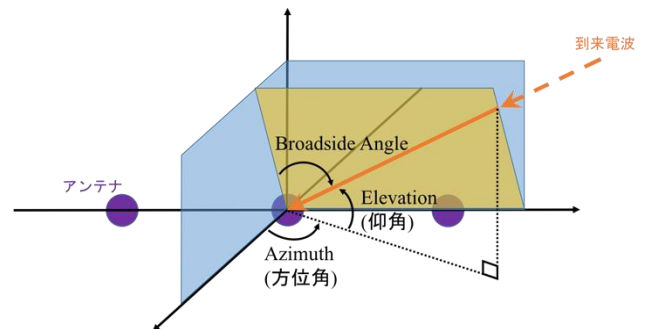


図5 Broadside Angle

まず歩行者端末において，線形配列のアンテナで車両から受信した電波にMUSIC法を適用して方位角と仰角から成るBroadside Angleを得る[14]．Broadside Angleの概略図

を図5に示す. Broadside Angle を α とすると, 方位角 β ($-\pi \leq \beta \leq \pi$), 仰角 γ ($-\pi/2 \leq \gamma \leq \pi/2$) を用いて以下のように表される.

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \beta \cos \gamma). \quad (5)$$

MUSIC 法で取得できる Broadside Angle では, -90 度から 90 度の範囲でしか角度を算出できないため, アンテナのどちら側に車両がいるかを複数台の車両の角度算出結果から算出する. また, 近距離では, 歩行者と車両はほぼ同じ高度に位置すると考えられることから, 仰角は 0 度と見なすことができ, 式(5)において $\gamma = 0$ より, $\beta = \alpha$ となる. 得られた β を電波到来角度 $\theta_{est,i}$ とする. このとき, 実際の車両の位置と, 車両の算出位置との関係から, 式(3)を用いて, 式(6)(7)を利用可能な車両台数だけ立式する.

$$x_i - (x + d_i \cos \theta_{est,i}) = 0, \quad (6)$$

$$y_i - (y + d_i \sin \theta_{est,i}) = 0. \quad (7)$$

4.3 歩行者位置の計算

4.3.1 衛星に対する重み付け

先行研究[3]の方式と同様, 仰角の大きいものに対して方程式の残差の重みを大きくする. これは, 仰角の低い衛星からの電波は, 建物に反射して到来した電波の可能性が高く, それにより生じるマルチパス誤差が大きいと考えられるためである.

ここでは, 先行研究[3]の方式の重み付け計算方法ではなく, 方程式に重み付けを行うこととする. k 番目に利用可能な衛星の仰角を φ_k , 定数を p とし, 式(1)に対し(1')のように重みを付加する.

$$p \sin \varphi_k (\sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2} + c\Delta t - d_{est,k}) = 0. \quad (1')$$

式(1')では, $p \sin \varphi_k$ が重みを表す.

4.3.2 車両に対する重み付け

先行研究[3]の方式と同様, 受信機に近い車両に対して方程式の残差の重みを大きくする. これは, 電波の信号強度は距離に対して指数関数的に減衰し, 歩車間実距離が大きくなるほど, 歩車間距離算出精度が下がるためである. 加えて, 信号強度が小さいと直接波と反射波の区別が難しくなるため, 正しい車両方向の判別も困難になる.

ここでも, 先行研究[3]の方式の重み付け計算方法ではなく, 方程式に重み付けを行うこととする. 提案方式では, 新たに角度を用いた方程式(6)(7)にも重み付けを行う. 観測歩行者と i 番目に利用可能な車両との距離を $d_{est,i}$, 定数を q とし, 式(4)(6)(7)に対し, それぞれ(4')(6')(7')のように重みを付加する.

$$\frac{q}{d_{est,i}} (d_i - d_{est,i}) = 0, \quad (4')$$

$$\frac{q}{d_{est,i}} \{x_i - (x + d_i \cos \theta_{est,i})\} = 0, \quad (6')$$

$$\frac{q}{d_{est,i}} \{y_i - (y + d_i \sin \theta_{est,i})\} = 0. \quad (7')$$

式(4')(6')(7')では, $q/d_{est,i}$ が重みを表す.

4.3.3 電波到来角度の判別

電波の伝搬環境によっては, 直接波に比べ反射波, 回折波の信号強度が大きく, MUSIC 法で電波到来角度を算出した際に, 反射波, 回折波を直接波と見なしてしまうことがある. 例えば, 図6のように, MUSIC スペクトラムで得られた信号強度のピークが, 建物などに反射して届いた電波の方角であった場合などである. 強め合う位相で複数の反射波が重なったとき, 信号強度が大きくなるために生じる. 直接波の電波到来角度でなければ, 測位精度は低下する. そのため, 算出した角度が直接波であるかどうかの判別を行い, 直接波ではないと判別された場合は 角度算出結果を測位に利用しないようにする.

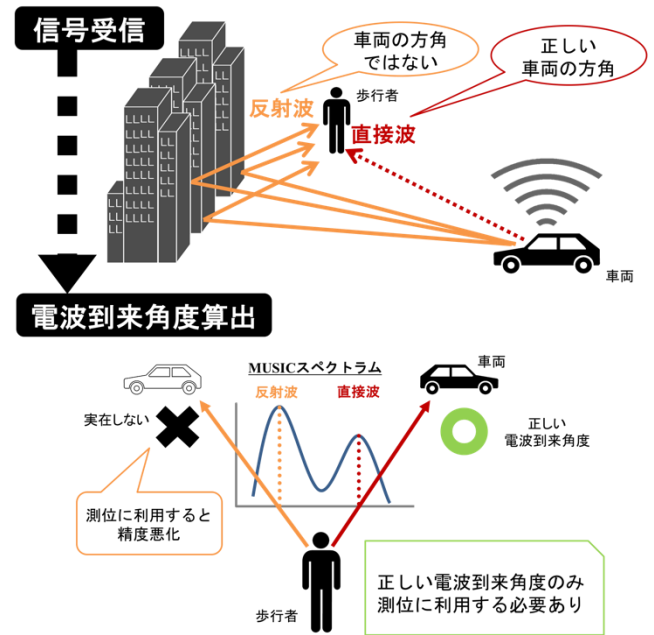


図6 電波到来角度と車両の方角

得られた電波到来角度が車両の方向であるかどうかの判別には, 機械学習装置を用いる. ここでは, データの特徴量の次元数が大きくなる場合においても識別精度がよく, 多数の属性を持つデータセットに対しても十分機能するという理由から, サポートベクタマシン(以下 SVM)を用いることとした. 判定の流れを図7に示す. まず, MUSIC スペクトラムの波形を特徴量として, その信号強度のピークが直接波の方角であるかどうかというラベルを SVM 分類器に学習させる. その後, 測位時に取得した MUSIC スペクト

ラムの波形を SVM 分類器に入力し、直接波の到来角度であると判別された到来方向のみ測位に利用する。以降、式(6')(7')では直接波の到来角度であると判別された到来角度のみ立式する。

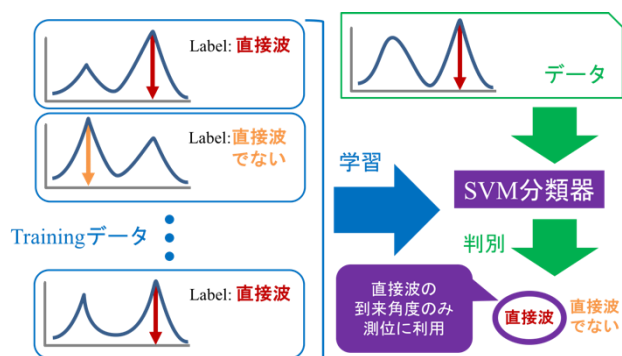


図7 SVMを用いた電波到来角度の判別

4.3.4 残差が大きい方程式の除去

式(1)(4')と、提案方式で立式した式(6')(7')から成る連立方程式の最適解を最小二乗法で求め、各方程式の左辺の残差を求める。得られた残差は、正規分布に従うとし、その標準偏差を σ とする。残差が 3σ を越えた方程式は測位計算に利用しない。

4.3.5 歩行者位置算出

残差が大きい方程式を除外したのち、式(1)(4')と、提案方式で立式した式(6')(7')から成る連立方程式の最適解を再度算出し、歩行者の位置とする。

5. シミュレーション評価

3D レイトレーシング法を用いて現実の建物モデルで電波伝搬のシミュレーションを行い、提案手法により測位誤差がどの程度軽減できるか検証した。レイトレーシング法は、電波の各伝搬経路を追跡することで、受信点で観測される信号をシミュレーションする手法である。

5.1 シミュレーション条件

3D レイトレーシング法による電波伝搬シミュレーションを行うシミュレーションソフトウェア GPS-Studio を用いた。実際の RINEX ファイル(Receiver Independent Exchange Format: GNSS 受信機が観測したデータの共通フォーマットとして使われるファイル形式)から GPS 衛星情報を取得し、ある時刻における衛星の位置を決定する。銀座付近の 3D 建物データ (NTT データ社製) と衛星、車両、歩行者を配置して電波伝搬のシミュレーションを行い、測位評価を行う。シミュレーション条件を表 1 に示す。ここでシーンとは、測位を行うある瞬間のことで、このシミュレーションでは、30 秒間を 0.3 秒間隔で測位を行い、全 100 シーンとする。直接波存在判定率は、車両と歩行者の間に LOS 経路があるかどうかの判定率で、筆者らの先行研究[3]の方式では既に 95%以上の判定率が検証されている。

表 1 シミュレーション条件

レイトレーシング シミュレータ	GPS-Studio (「構造計画研究所」社製)
シーン数	100 シーン
測位誤差算出	全シーンの平均値
1 シーンあたりの 車両台数(静止車両)	16 台
1 シーンあたりの 車両台数(移動車両)	平均 42.8 台
移動速度(移動車両)	時速 60km
車頭間隔(移動車両)	46.7m
観測歩行者数	1 人
移動速度(観測歩行者)	分速 80m
歩行者端末アンテナ数	4 本(Array 配置)
歩行者端末 電波時間分解能	5×10^{-8} sec
車両送信周波数	700MHz
車両送信電力	20dBm
利用衛星測位システム	GPS のみ
歩車間距離・電波到来 角度算出利用車両	算出歩車間距離 50m 以内かつ 見通し経路(直接波)が存在する車 両からの電波のみ
直接波存在判定率	100%
最大電波反射回数	1 回
最大電波回折回数	1 回
最大電波透過回数	0 回

3D 建物データ(図 8 左)は、対応する航空写真(図 8 右、Google Earth より入手)とほぼ相違がない。実際の場所での車両と歩行者の配置イメージ(Google ストリートビューより入手)を図 9 に、全シーンでの車両(赤点)、歩行者(緑点)の配置をまとめて図 10 に示す。

アンテナが受信した電波を模擬するため、レイトレーシングシミュレータで算出した各パスの位相情報を含んだ信号強度とその受信時刻から、時間分解能の内に含まれる信号を合成する(図 11)。歩車間距離は、この合成した信号強度から、式(2)を用いて算出する。時間分解能が向上するほど、直接波と反射波・回折波を分離することができるため、歩車間距離算出精度も向上する。

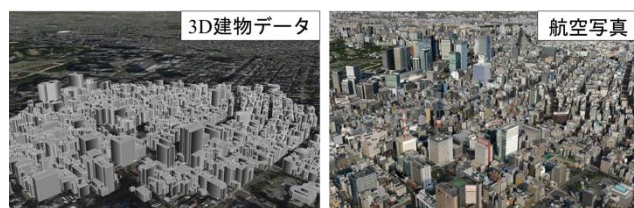


図8 銀座付近の 3D 建物データと航空写真



図9 車両と歩行者の配置



図10 歩行者と車両の配置

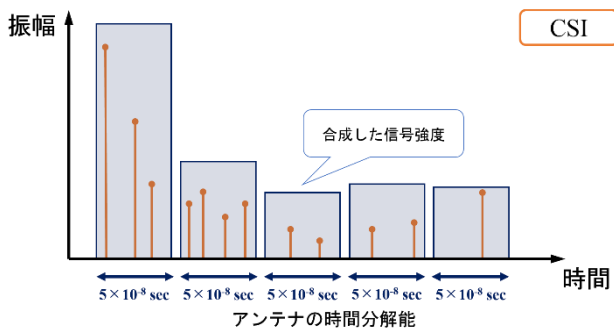


図11 アンテナの時間分解能を考慮した受信信号強度

電波到来角度は、MATLAB の Phased Array System Toolbox を用いてパス情報から受信信号を生成し、その信号に対して MUSIC 法を適用して算出する。パス情報は、GPS-Studio で取得することができ、各パスの到来時間や到来方向(方位角・仰角)、パス強度をもとに MATLAB で受信信号を生成する。

アンテナを Array 配置した場合、MUSIC 法ではアンテナの左右どちら側から電波が到来したか判定できないが、今回のシミュレーションでは既知とする。シミュレーション計算では、真値からアンテナのどちら側から電波が到来したかを判定することとした。

5.2 シミュレーション結果

5.2.1 電波到来角度の算出結果

歩車間算出距離 50m 以内で見通し(LOS)の経路が存在する車両において、到来角度が直接波の方角かどうかの SVM による判定結果を表 2 に、SVM 判別の有無による角度算出誤差の累積分布関数を図 12 に、角度算出誤差の

平均値・中央値を表 3、表 4 に示す。ここでの SVM 判別とは、SVM を用いた電波到来角度の判別のことであり、SVM 判別なしでは算出した電波到来角度が直接波の方角ではないと判別されたものも含む全データを表示している。表 2 より、直接波の方角から受信した電波を直接波の方角として正しく判別した割合は 20.4%、直接波ではない方向から受信した電波を直接波ではない方角として正しく判別した割合は 92.6% となった。図 12 より、SVM 判別なしの場合でも、角度算出誤差の過半数は 10 度以内に収まっているが、正反対の方角を車両の方角として算出したケースも少なからず存在する。表 3、4 より、SVM 判別を行うことで平均角度算出誤差を 20 度削減できたことがわかる。

表2 SVM による直接波の方角の判別率

判別率 <測定数>		真値	
		直接波の方角である (誤差 20 度以内) <906>	直接波の方角ではない (誤差 20 度以上) <435>
判別	直接波の方角である <217>	20.4%	7.4%
	直接波の方角でない <1124>	79.6%	92.6%

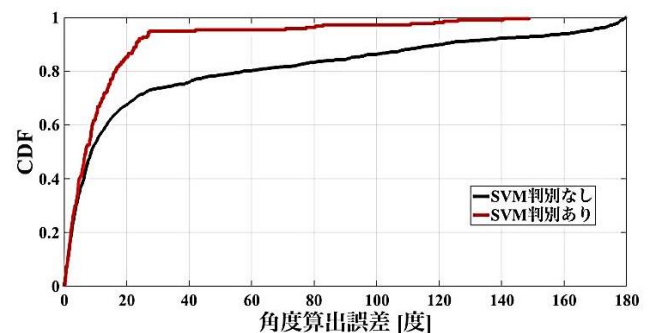


図12 角度算出誤差の累積分布関数

表3 角度算出誤差(SVM 判定なし)

平均値	33.3 度
中央値	8.67 度

表4 角度算出誤差(SVM 判別あり)

平均値	13.3 度
中央値	6.98 度

5.2.2 測位結果

(1) 他方式との比較

他方式と比較した水平平面の測位誤差平均と、その 95% 信頼区間を図 13 に示す。提案方式は先行研究[3]の方式に比べ、約 23%の測位誤差削減効果がみられた。

(2) 重み付けの有無による比較

重み付けの有無によって比較した水平平面での測位誤差と、その 95%信頼区間を図 14 に示す。GPS 重み付けでは、式(1')による GPS に対する重み付けを、車両重み付けでは、式(4')(6')(7')による車両に対する重み付けを表している。重み付けを行うことにより、重み付けを行わない場合に比べ約 29%の測位誤差削減効果がみられた。

(3) 残差が大きい方程式除去の有無による比較

残差が大きい方程式除去の有無によって比較した水平平面での測位誤差と、その 95%信頼区間を図 15 に示す。残差が大きいとみなす境界値を σ から 4σ まで変化させて測位計算したところ、 3σ に設定したときがもっとも測位精度がよく、残差が大きい方程式を除去しない場合に比べ、約 15%の測位誤差削減効果がみられた。

(4) 電波到来角度判別による比較

電波到来角度算出において、提案方式と、直接波の方角から受信した電波を直接波の方角として正しく判別した割合を 100%、直接波ではない方向から受信した電波を直接波ではない方角として正しく判別した割合を 100%とした場合（つまり理想的な場合）、ならびに全く判別を行わない場合で比較した水平平面での測位誤差と、その 95%信頼区間を図 16 に示す。提案方式において、SVM による方角判別を行うことにより、方角判別を全く行わない場合に比べ約 34%の測位誤差削減効果がみられた。また、算出した電波到来角度が直接波の到来した方角であるかどうかを正しく判別することにより精度向上が見込まれ、判別率が向上することにより測位誤差を 2.07m にまで改善できることが分かる。

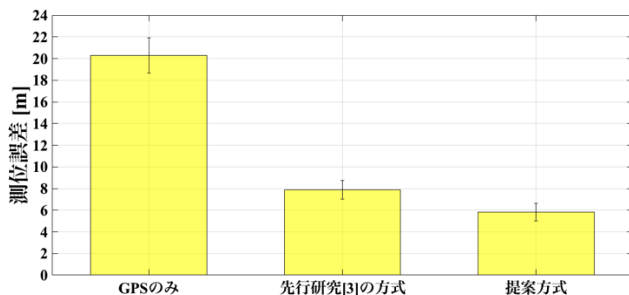


図 13 水平平面の測位誤差(他方式との比較)

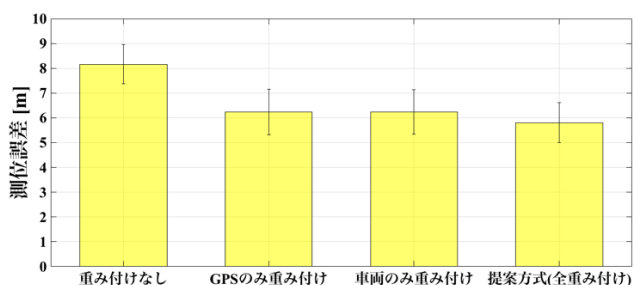


図 14 水平平面の測位誤差(重み付けによる比較)

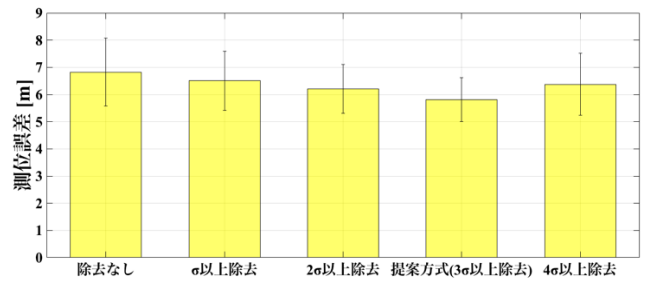


図 15 水平平面の測位誤差
(残差が大きい方程式除去による比較)

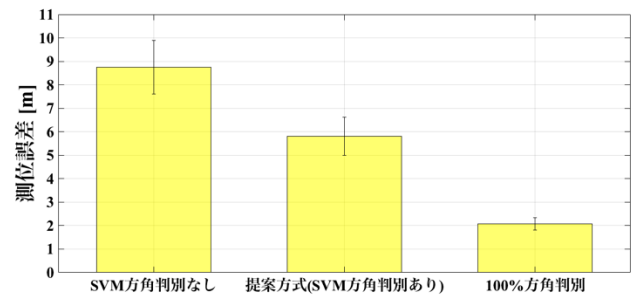


図 16 水平平面の測位誤差(方角判別による比較)

6. 考察

6.1 シミュレーション環境の設定について

今回のシミュレーションではシーン数が 100 回と少なく、シミュレーション時間も 30 秒間と短いため、衛星の配置がほとんど変化していない。提案方式の効果を十分に検証するため、シーン数を増やす必要がある。また、GPS 衛星の周期を考慮し、異なる衛星配置でもシミュレーション評価を行う必要がある。また、電波の反射、回折回数は最大で 1 回に制限して計算時間を短縮したが、より現実を模したシミュレーションにするため、反射、回折回数を増やした場合での有効性の検証が必要である。

また、今回のシミュレーションは銀座付近の特定の場所だけを対象にして 3D 建物データを利用して行ったが、別の環境でも同様の測位精度改善効果が得られるかどうか検証していく必要がある。

6.2 電波到来角度の判別について

SVM を用いた電波到来角度の判別の精度が低い結果となった。特に、正しく電波到来角度を算出できているにもかかわらず、誤った電波到来角度であると判別されたがために測位に利用できていないデータが表 2 より 79.6%も存在した。一方、図 16 に示すように、全て正しく判別できた場合には、測位誤差は 2.07m にまで低くすることができると分かった。今後は、電波到来角度の判別率の改善が課題である。

6.3 測位利用可能車両台数が少ない場合の補完について

歩行者の周辺車両台数が少ない場合には、十分な測位精度改善効果が得られないと考えられる。提案方式では、ビルなどの遮蔽の影響により生じる測位に利用可能な衛星数不足を車両台数で補うこととしているが、そもそも車両台数が少ない場合には補いきれない。

このような状況であっても、1 台の車両が短い周期で発信する電波を歩行者が連続して受信し、複数点からの歩車間距離、電波到来角度を用いて位置を算出することにより、あたかも多くの車両が存在するのと同様な程度に精度を向上させられる可能性があると考えられる(図 17)。これについては今後の課題である。

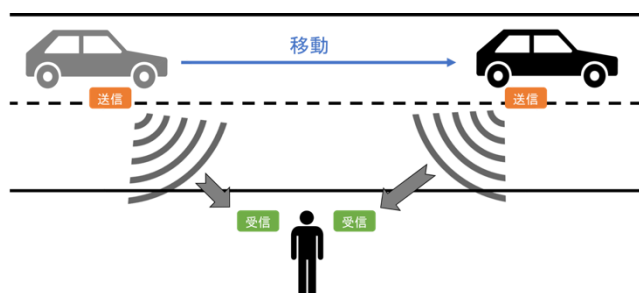


図 17 測位利用可能車両台数が少ない場合の補完

7. おわりに

本稿では、高層ビルが建ち並ぶ都市部において、GPS だけでは測位できない、または精度が悪い環境においても、歩行者が自位置を高精度に測位するため、既に筆者らが提案した、GPS による測位と車両が発する電波の直接波の強度から算出した歩車間距離に基づく測位を併用する方式[3]に加えて、車両からの電波到来角度を用いてより高い測位精度を実現する方式を提案した。ここでは、車両からの直接波の到来角度の判別、2)衛星・車両に対する重み付け、3)測位計算における残差の大きい方程式の除去が重要である。シミュレーションにより、ビルが密集する銀座付近の環境において、先行研究[3]の方式に比べ測位誤差を 23%削減できることを確認した。

今後は、シミュレーションのシーン数を増やし、また、環境設定もさまざま変えて検証を行うとともに、測位精度改善のため、直接波到来角度の判別精度を向上させる方法、ならびに測位利用可能車両台数が少ない場合の補完方法などの検討・検証を行う。

参考文献

- [1] 内閣府, “戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)自動走行システム研究開発計画,” 2016.
- [2] 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.

- [3] R. Yamashita, S. Tang, and S. Obana, “Improving positioning precision of pedestrians by using both GPS satellites and vehicles,” *Proc. ITS world congress 2016*, October 2016.
- [4] トヨタ, “トヨタ トヨタの最新技術 | 安全技術 | ITS Connect | トヨタ自動車 WEB サイト”, *Toyota.jp*, 2017. [Online]. Available: <http://toyota.jp/technology/safety/itsconnect/>. [Accessed: 19- Apr- 2017].
- [5] 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*, No v. 2015, pp. 41-47.
- [6] 株式会社博報堂D Y メディアパートナーズ, “メディア定点調査 2016,” 2016.6.20
- [7] “iPhone 7 - 仕様”, *Apple*, 2017. [Online]. Available: <https://www.apple.com/jp/iphone-7/specs/>. [Accessed: 18- Apr- 2017].
- [8] Y. Gu, L. Hsu and S. Kamijo, “GNSS/Onboard Inertial Sensor Integration With the Aid of 3-D Building Map for Lane-Level Vehicle Self-Localization in Urban Canyon,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 427 4-4287, 2016.
- [9] F. de Ponte Muller, E. Diaz, and I. Rashdan, “Cooperative Infrastructure-Based Vehicle Positioning,” *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2016.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] R. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34(3), pp.276-280, 1986.
- [13] S. Sen, J. Lee, K.-H. Kim, and P. Congdon, “Avoiding multipath to revive inbuilding WiFi localization,” *Proceeding of the 11th annual international conference on Mobile systems, applications, and services - MobiSys '13*, 2013.
- [14] “Spherical Coordinates - MATLAB & Simulink - MathWorks United Kingdom,” *Jp.mathworks.com*, 2017. [Online]. Available: <https://jp.mathworks.com/help/phased/ug/spherical-coordinates.html>. [Accessed: 19- Apr- 2017].