

令和元年5月27日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00120

研究課題名(和文) 多センサ融合により歩行者の位置情報・危険度合を高精度に導出する技術の研究開発

研究課題名(英文) Research and development of technology for high precision pedestrian positioning and risk degree estimation by multi-sensor fusion

研究代表者

湯 素華 (Tang, Suhua)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：80395053

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：歩行者がGPS衛星に加え、周辺車両・路側機をアンカーとし、自端末の位置を算出する手法を検討した。

車両・路側機と歩行者の間のチャンネル状態情報を利用して、機械学習で非線形再帰関数を学習させ、距離を推定する手法と、距離の誤差特性を考慮し、測位演算中重みづけを行う方式を提案・評価した。また、受信機の時間分解能が測位精度への影響を評価した。さらに、歩行者自身の移動速度、車両・路側機・衛星との距離をKalman filterで融合して測位する手法を提案した。レイ・トレーシング・シミュレーションにより、都市部環境では、GPS衛星測位手法と比べて、測位誤差を大幅に低減できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、歩行者端末により得られた衛星信号、車両・路側機の無線信号、加速度センサ情報など多様な計測情報の融合により歩行者の位置情報・危険度合判定の精度を向上させるものである。数多くの車両・路側機をアンカーとすること、誤差要因である反射波の影響を除外し直接波のみを測位演算に利用すること、センサ情報を誤差特性に従って融合することは、これまでにない独創的な研究である。本研究の成果は、歩行者の交通事故の低減のみならず、電波使用の効率化、生活環境の快適化などに大きく貢献できる。

研究成果の概要(英文)：A pedestrian positioning method is studied, in which pedestrians use nearby vehicles and roadside units as anchors, besides GPS satellites.

The channel state information between vehicles/roadside-units and a pedestrian is obtained, and a non-linear regression function is learned for distance estimation. In the position computing, weighting is performed by considering the error characteristics of distances. The impact of time resolution of the receiver is also evaluated. In addition, we proposed a method for high precision pedestrian positioning by fusing the pedestrian's own moving speed, the distance between the pedestrian and vehicles, roadside-units, satellites by using a Kalman filter. Ray-tracing simulations have shown that in urban environments, the proposed method can significantly reduce the positioning error, compared to the present GPS positioning techniques.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：歩行者測位 多センサ融合 チャンネル状態情報 歩車間通信

## 1. 研究開始当初の背景

状態別交通事故死者数は、歩行者が最も多くなる。歩行者の交通事故を防ぐため、歩行者が持つ携帯端末の位置情報メッセージを無線通信で車両に通知する歩車間通信システムが検討されている。これは、レーダやカメラなどと比べて、見通しの効かない場所でも対応できるという利点があるが、その効果は歩行者の位置情報の精度と無線通信の性能に大きく依存する。

都市部では、衛星測位信号が遮蔽され易く、歩行者の測位精度が大幅に劣化する。一方、近年 Wi-Fi 信号を用いた屋内測位が注目されており、屋外で衛星測位信号と Wi-Fi 信号を統合することにより、前述の歩行者の測位精度劣化問題を緩和できると考えられる。しかし、Wi-Fi 測位の場合、通常直接波と反射波を含めた総受信信号強度（RSSI）から距離を求めるため、反射波の影響を受けやすい。より正確に距離を算出するためには、直接波の有無の識別と受信電力の算出が必要である。それは Wi-Fi 信号のチャンネル状態情報（CSI）を利用することにより実現可能であるが、信号検出の時間分解能に限られる状況で直接波と反射波がほぼ同時に受信される場合には困難であり、また、道路環境での検討はこれまでされていない。

歩車間通信では歩行者からの位置情報メッセージが迅速に車両に届くことが必要であるが、交差点付近など多くの歩行者が集まる場所では、全員が頻繁に送信すると歩車間通信チャンネルが混雑し、大きい遅延またはメッセージロスが発生する可能性が高い。歩行者の行動（移動方向・速度）、場所（歩道・交差点など）、交通信号の状態（赤・青・黄）等安全にかかわる情報をここでは歩行者のコンテキストと呼び、各歩行者はそのコンテキストに応じて自律的に危険度合を判定し、危険度合の高い歩行者のメッセージを優先的に送信させる送信制御が必要となるが、危険度合の導出はこれまで検討されていない。

## 2. 研究の目的

本研究は、衛星信号・車両などの無線信号・加速度情報などの融合により歩行者の位置情報・危険度合を高精度に導出する技術の開発を目的とする。具体的には、以下の三つの課題に取り組む。

- 1) 無線信号のチャンネル状態情報の分析に基づく、直接波があるかどうかの識別技術、及び反射波の影響を除外し、直接波の受信電力のみを使用して距離を正確に算出する技術の開発。
- 2) 衛星信号で計測した距離、車両などからの無線信号で計測した距離、歩行者の行動情報を誤差特性に応じて融合して歩行者の位置情報を高精度に算出する技術の確立。
- 3) 歩行者の属性・場所・行動などの情報から危険度合を推測する技術の確立。

## 3. 研究の方法

本研究では、衛星測位信号に、車両・路側無線機からの無線信号、及び、携帯端末で計測した移動方向・加速度情報を加えて、歩行者の位置情報・危険度合を高精度に導出する技術を開発し、以下の点を明らかにする。

- 1) 無線信号から正確な距離の算出  
直接波の有無による無線信号のチャンネル状態情報の違いを調査して、直接波の有無を高精度に識別するモデルを作成する。さらに、誤差要因である反射波の影響を除外し、直接波の受信電力のみを利用して距離を高精度に算出し、その誤差特性（分布のばらつき）を求める手法を確立し、チャンネル状態情報の時間分解能が直接波の識別率・測距精度への影響を評価する。
- 2) 多様な情報の融合による位置演算技術の確立  
衛星信号や無線信号により算出した距離の誤差特性が異なるため、誤差特性に応じて距離に適切な重みをつけて歩行者の位置情報を算出する。また、加速度・移動方向情報に基づく自律航法と組み合わせ、自動運転車両が多数ある場合、現状の測位誤差（約 10 メートル）を約 1 メートルまで低減することの実現を目指す。
- 3) 危険度合の導出技術の確立  
危険度合に基づく送信制御を実現するため、危険度合の導出が必要である。電子地図を用い

て歩行者の位置する場所（車道・歩道・交差点など）を特定し、更に、歩行者の属性（年齢・健康状況など）や行動（移動方向・速度）、車両との衝突事故発生可能性を基に歩行者の危険度を、各歩行者が自律的に決定する手法を確立する。

#### 4. 研究成果

歩車間通信システムでは、歩行者の位置情報を算出することが必要である。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、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言えない。また複数の GNSS(Global Navigation Satellite System)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出来ず、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。

そこで、歩行者の位置情報の高精度化を図るために、**車両をアンカー(基点)として利用する。車両からの無線信号における直接波成分の有無を識別して、直接波成分ありの信号のみを利用して歩車間距離を算出し、測位演算を行う手法を提案した。**

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し、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。また、自動運転の実現に向け、車両の車載器では、GPS のみならず、Beidou、Galileo、GLONASS 等の複数の GNSS を利用でき、さらに、自律航法 (Dead Reckoning)、車速パルス、マップマッチング、カメラや LiDAR による車線検知などから位置を補正できるため、誤差数 10cm 以内の高精度化が図れるようになるものとする。

マルチパスの影響を抑え測距精度を高めるために、RSSI の代わりに、**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距離を推測する。**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等の受信信号情報を指す。最も早く到着する電波を、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れば、電波の伝搬特性にほぼ従うため誤差が小さい。ただし、直接波が遮蔽され、反射波のみ受信する場合もあり、それを用いると測距誤差が大きい。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 SVM (Support Vector Machine)モデルを作成した。

上記により、直接波があると判定された場合に、直接波の強度  $L(\text{dBm})$  と距離  $(d)$  ログ値  $\log d$  の線形関係を用いて、車両と歩行者の距離を求める。時間分解能の制約で、直接波と後続の反射波が重なって到着する場合もあり、その際、距離推測誤差が大きい。そのため、直接波の強度に限らず、すべての CSI 情報を利用して距離を推測する SVR(Support Vector Regression)モデルを作成した。

歩車間距離誤差特性、歩車間距離誤差特性が異なるため、**歩行者の位置を含む距離の方程式に対して、距離推測誤差から求めた重みを付けて測位演算を行う。**

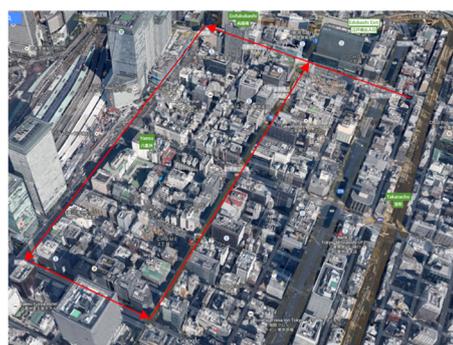
レイトレースシミュレーションで単独測位の精度評価を行った。シミュレーションには銀座の 3D 地図を用いた。歩行者は、分速 80m で歩道を歩く。車両は、時速 60km、平均車頭間隔 46m、6 車線あり、平均 42 台の車両が通行する。GPS 衛星と車両から歩行者への無線通信のレイトレースシミュレーションに、Raplalab を使用した。Raplalab で得られたレイトレースの CSI 結果を基に、歩車間距離や、歩行者の測位演算を行った。

受信機の時間分解能を市販の無線 LAN カード(帯域幅 20MHz、時間分解能 50ns)に設定する場合と、将来的に時間分解能が 0.1ns に向上する場合、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。車両 10 台のとき時間分解能が 50ns のとき 2.39m の測位誤差であるのに対して、0.1ns では 0.67m の測位誤差になり測位精度が大幅に改善されることがわかる。

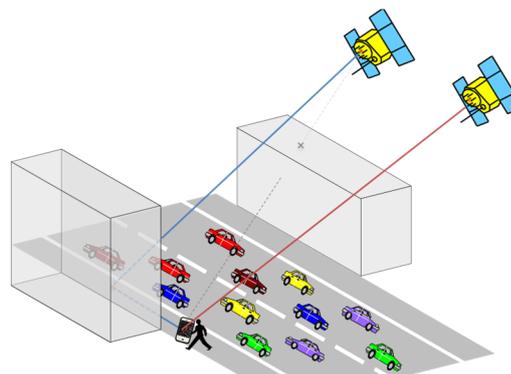
さらに、歩車間距離誤差特性、歩車間距離誤差特性を考慮して、カルマンフィルタで歩行者の位置情報を高精度に算出する手法を提案した。

図 1(a)に示すシナリオで、東京駅周辺で GPS 受信機 (u-blox EVK-6T) を用いて衛星の位置・疑似距離のトレースデータを取得した。また、電気通信大学構内で得られた CSI のトレースデータを併用して、図 1(b)に示すように片道 2 車線の道路に車両を設置した。

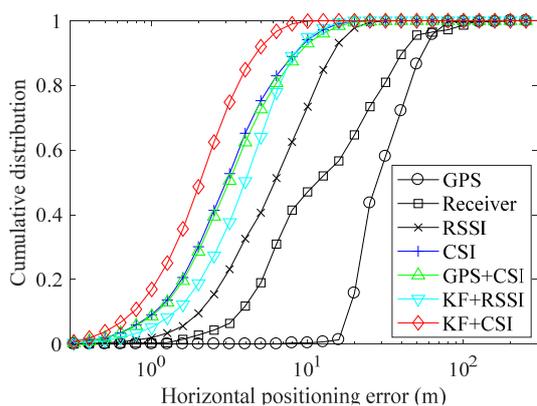
車両送信間隔が 1s の際、平均車間距離が 70m の場合の歩行者の水平測位誤差の累積分布を図 1(c)に示す。提案方式 KF+CSI がほかの方式より大幅に測位誤差を削減できることを確認できた。車両送信間隔は最短 100ms であり、車両速度などに応じて変化可能である。車両送信間隔が変わる際、平均車間距離が 70m の場合、KF+CSI 方式の水平測位誤差の累積分布を図 1(d)に示す。車両送信間隔が短くなるにつれ、1 秒に多くの歩車間距離を計測できて、カルマンフィルタによる円滑化結果、測位誤差が小さくなる。車両の送信間隔が可変であるが、一般的に交差点などでは車線変更や加速・減速があり、車両が短い間隔で送信するため、平均送信間隔を 200ms と仮定すると、歩行者の水平測位誤差が 1m 以下の確率は、0.67 になる。



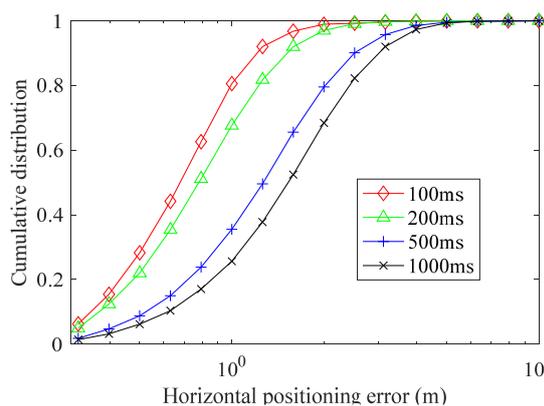
(a) GPSトレースデータを取得する際の移動ルート



(b) シミュレーションシナリオ



(c) 車間距離=70m、車両送信間隔=1sec



(d) KF+CSI, 車間距離=70m

図 1 歩行者測位シナリオと測位誤差

各歩行者は定期的に自分の位置情報を無線通信で車両に送信する (以降、既存手法とする)。歩行者が同じ周波数帯域のチャンネルを共有して同じ周期で送信するため、人数の増大によりメッセージ総量がチャンネル容量 (チャンネル上 1 秒間送信できるデータ量) を超えれば、送信遅延はもちろん、パケットロスが発生し、車両との接触の危険性のある歩行者の情報が迅速に車両に届かない恐れがある。

それを解決するために、歩行者は車両からのパケットを傍受することを契機にコンテキストを基に交通事故危険度を判定し、更に、危険度に応じて、危険度の低い歩行者の送信間隔を長くする送信間隔制御と、送信開始時間をずらして危険度の高い歩行者の送信待ち時間を短くし、危険度の低い歩行者の送信待ち時間を長くする送信開始タイミング制御を行う。歩行者の危険度に応じて送信間隔制御を行えば、メッセージの総量をチャンネル容量以下に抑えることが可能である。

歩行者は周期的に位置情報を送信するが、送信衝突やチャンネルフェージングなどの影響で、メッセージが車両に届かない場合もある。次の送信タイミングで届いた場合、累積パケットロス率 (メッセージの定期的な送信が開始してから一定時間の間に一度でも車両に届かない確率) が

下がるが、遅延が増える。シミュレーションで、累積パケットロス率と遅延時間の関係性を評価した。既存方式では、固定の送信間隔 100ms、200ms、500ms、または、1000ms でパケットを送信する。危険度の一番高い歩行者について、提案方式が既存手法より小さい遅延時間で低い累積パケットロス率を達成し、同じパケットロス率の場合、遅延を半減できることを確認した。

これにより、歩行者測位精度の改善と、歩車間通信性能の向上は、歩行者交通事故の削減に大きく貢献できる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- [1] 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. 査読有
- [2] 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. 査読有
- [3] 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. 査読有

[学会発表] (国際会議発表 3 件、その他国内発表 10 件)

- [1] Kazuhiro Toda, Suhua Tang, and Sadao Obana, “High-precision pedestrian positioning by using radio signals from vehicles and roadside units,” in *Proc. ICEIC'19*, Auckland, New Zealand, Jan. 2019. 査読有
- [2] 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. 査読有
- [3] Ryo Yamashita, Suhua Tang, and Sadao Obana, “Improving positioning precision of pedestrians by using both GPS satellites and vehicles,” in *Proc. ITS world congress 2016*, Melbourne, Australia, Oct. 2016. 査読有

[その他]

ホームページ等

<http://www.tang.cs.uec.ac.jp/research.html>

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：小花 貞夫

ローマ字氏名： OBANA, Sadao

所属研究機関名：電気通信大学

部局名：大学院情報理工学研究科

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：60395043

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：久保 信明          浜口 雅春

ローマ字氏名：KUBO, Nobuaki      HAMAGUCHI, Masaharu

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。