

令和 4 年 5 月 10 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11937

研究課題名（和文）クラウドに基づく歩行者測位システムの研究開発

研究課題名（英文）Research and development of cloud-based pedestrian positioning system

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・准教授

研究者番号：80395053

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：都市部では、建物の遮蔽・反射の影響で、歩行者の測位精度が大幅に劣化する。本研究では、（1）衛星から直接波を受信できず、代わりに反射波を測位に使用する際、マルチパス誤差の時間・空間相関性を利用して、歩行者でのマルチパス誤差を推測・補正する。（2）衛星数不足の場合、周辺車両を測位アンカーとし、複数アンテナで、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し、2アンテナを利用したときの角度推定・測位誤差を、大きく削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

本研究では、マルチパス誤差の狭域相関性と時間変化特性を調査・利用し、歩行者周辺のマルチパス誤差から、歩行者でのマルチパス誤差を推測・補正することは、斬新な発想である。また、車両をアンカーとして測位に使用する際、歩行者で見た車両の角度は、複数のアンテナでの受信電波位相の空間的变化のみならず、歩行者のアンテナでパケットを受信する際、車両の移動により、異なるタイミングでの受信電波位相の時間的变化を利用して、角度を高精度に推測することが独創的な発想である。また、歩行者位置の高精度化と歩車間通信システムの普及により、歩行者の交通事故の低減が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In urban canyons, pedestrian positioning precision may be significantly degraded by the obstruction and reflection of roadside buildings. In our work, this problem is solved from two aspects. (i) When the line-of-sight (LoS) wave from a satellite is not received, but a reflected wave is used instead for positioning, the multipath error occurs. By exploiting the temporal/spatial correlation of multipath errors, the multipath error at a pedestrian is estimated and corrected. (ii) When the number of satellites is insufficient for positioning, vehicles near a pedestrian are used as anchors, and the spatial and temporal variation of channel state information is used to construct a virtual 2D antenna array and used to accurately measure the pedestrian-vehicle angle, which helps to greatly improve the pedestrian positioning precision.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：歩行者測位 チャネル状態情報 測距 電波到来角度

1. 研究開始当初の背景

内閣府の交通安全白書によると、安全運転支援技術の実用化と共に交通事故発生件数・負傷者数・死者数が年々減少しているが、状態別交通事故死者数のうち、歩行者が一番多くて、3分の1以上を占めることがわかる。歩行者の交通事故を削減するために、運転手は周辺歩行者の情報を正確に把握すべきであるが、見通しの効かない交差点では、歩行者の位置情報を無線で周辺車両へ通知する歩車間通信システムが必要であり、その効果は位置情報の精度に大きく依存する。

歩行者の位置は通常 GPS 測位によって算出されるが、都市部では、建物による電波の遮蔽・反射の影響で、見通しで直接届く直接波の代わりに、反射波を受信した場合、歩行者・衛星の間の計測距離には、マルチパス誤差(直接波と比べて余分な伝播距離)が生じ、歩行者の算出位置に大きな誤差が発生しうる。マルチパス誤差を含む信号を除外すべきであるが、それにより測位に使用できる衛星数が減少する。

衛星のみならず、自動運転時代に高精度に測位できる車両を歩行者測位の基準点(アンカー)とし、車両どうしの衝突防止のための車車間通信の信号を歩行者が傍受し、それを用いて歩車間距離を計測して測位に利用する手法を検討してきた。ここでは、車両数が少ない場合、歩行者の位置精度を向上させるために、歩車間距離のみならず、歩車間の角度情報も利用することが必要となる。角度情報は一般的にアンテナ配列により実現されるが、歩行者端末はサイズが小さいため、搭載できるアンテナ数が限られている。

2. 研究の目的

本研究は、交通事故から歩行者を保護する歩車間通信システムに必要な歩行者の位置情報を高精度に導出する技術を開発することを目的とする。都市部では、路側の建物による電波の遮蔽により測位に必要な衛星数が不足することを考慮し、自動運転時代では高精度に測位できる車両も測位基準点(アンカー)として歩行者の測位中併用する。具体的には、以下の二つの課題に取り組む。

- (1) 衛星からの測位信号により算出された歩行者と衛星間(歩車間)距離におけるマルチパス誤差の狭域相関性を調査し、車両をセンサとして収集したマルチパス誤差情報を利用して歩行者におけるマルチパス誤差を推測。
- (2) 車両の移動による電波の Doppler 効果を利用して歩車間の角度情報を計測し、さらに、歩行者測位演算に使用。

3. 研究の方法

アンカーとする車両は定期的に位置情報を配信する。歩行者位置は、歩車間距離、角度情報、又はその併用から算出される。チャンネル状態情報(CSI)は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それぞれの電波到着時間やその強度等を反映するため、そこから歩車間の直接波成分(強さ・位相)を求めれば、受信信号強度(RSSI)を用いる場合と比べて、反射波の影響を抑えて距離をより正確に算出可能である。

本研究では、歩行者は衛星および周辺車両からの信号を用いて歩車間距離、歩車間距離および歩車間角度を計測し、さらに、クラウドから得られる、周辺車両がかつて収集したマルチパス誤差情報等を利用して、自端末の位置を高精度に算出する技術を開発する。

(1) マルチパス誤差の相関性の調査と推測

マルチパス誤差の狭域相関性が一般的に存在することを予想し、位置精度の高い車両をセンサとしてマルチパス誤差を検知してクラウドに収集し、その空間相関性を検証する。さらに、歩行者の周辺場所でのマルチパス誤差の情報から歩行者でのマルチパス誤差を推測する。歩行者周辺の車両台数が少なく、マルチパス誤差の分布を十分に反映できない場合には、マルチパス誤差の時間変化特性を利用して、過去のマルチパス誤差から補完する。ここでは、機械学習による、マルチパス誤差の推測モデルを作成する。

(2) Doppler 効果を利用した歩車間の角度推測

送信者(車両)からの無線信号を、離れたアンテナで受信する際、アンテナ間の位相差(CSIの空間的变化)から電波到来角度を推測できることがよく知られている。しかし、角度の空

間分解能は（歩行者の）受信機で使用するアンテナの数に依存するうえ、受信機の向きの影響も受ける。これらの制約をなくすために、車両の移動による歩車間の距離変化を利用して、受信機で一つのアンテナが異なるタイミングで計測した車両からの信号の位相差（CSI の時間的变化）から、歩車間の角度情報を推測する。さらに、複数アンテナがある場合、アンテナによる位相の空間的变化と、車両の移動による位相の時間的变化を併用して、角度の計測精度をあげる。

4 . 研究成果

歩行者端末は複数のアンテナで受信する際、アンテナ間の空間的位相差から電波到来角度を推測できる（図 1 における S-CSI）が、角度の空間分解能は受信機で使用するアンテナの数に依存する。一方、アンカーとする車両が移動するため、歩行者端末が受信した電波には Doppler shift が発生する。そこで、複数のアンテナを搭載しなくても、車両の移動による歩車間の距離変化を利用して、歩行者端末で一つのアンテナが異なるタイミングで計測した車両からの信号の時間的位相差から、歩車間の角度情報を推測する手法を提案・評価した（図 1 における T-CSI）。

歩行者端末に複数のアンテナが搭載される際、複数のアンテナでの CSI の空間的違いによって電波到来角度（AoA）を計測するとともに、車両の移動によって、CSI の時間的变化から電波出発角度（AoD）を算出する。直接波のみの場合、AoA と AoD が同じであるため、さらに、空間的 CSI 変化と時間的 CSI 変化を併用して 2 次元の仮想アンテナアレイを構築し、角度を推測する手法を提案・評価した（図 1 における J-CSI）。また、角度を併用した歩行者測位手法を提案し、車両から歩行者への電波の周波数帯、歩車間距離、車車間通信における干渉、車両台数、車両位置における誤差などの影響を評価した。

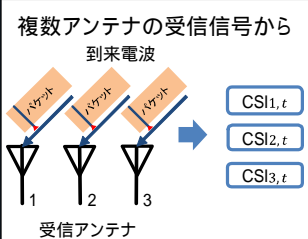
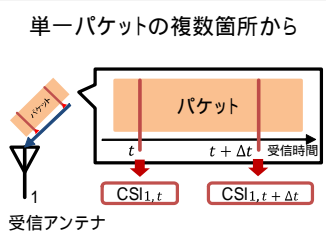
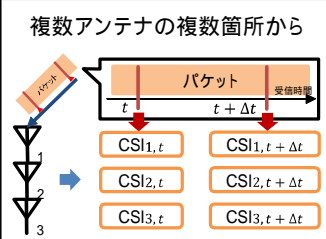
	S-CSI	T-CSI	J-CSI
角度推定	CSIの空間的違いによる位相差を利用	CSIの時間的違いによる位相差を利用	CSIの空間・時間的違いによる位相差を併用
位相差の要因	アンテナごとの経路長差	車両移動による経路状況の変化	複数アンテナ・車両移動
複数のCSIの取得			
特徴	多数のアンテナなら高精度 搭載アンテナ数が限定的	アンテナ数に関わらず角度推定 分解能(精度)が限定的	少数のアンテナでも高分解能 多数のアンテナで精度向上

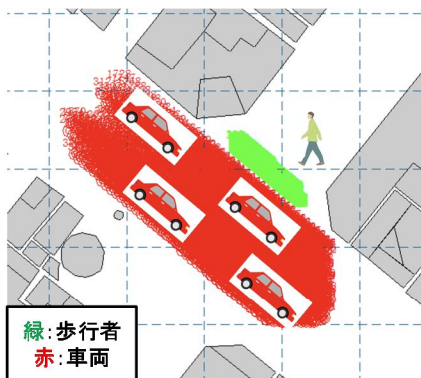
図 1 歩行者の角度計測方法の比較

図 2 (a)に示すシナリオを用いて、レイトレーシングで電波伝搬を模擬し、シミュレーション評価を行った。角度推定誤差・水平測位誤差をそれぞれ図 2 (c)と図 2 (d)に示す。

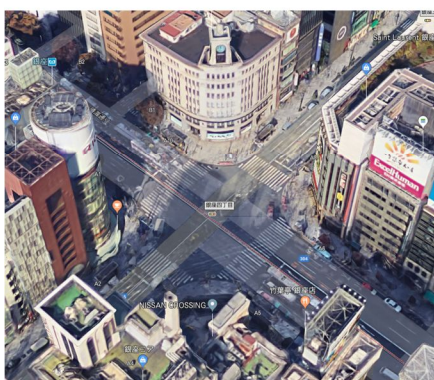
J-CSI、S-CSI、ESPRIT、Root-WSF では、複数アンテナを利用するため、アンテナ数の増加に伴い角度推定精度が向上している。方式ごとの比較では、単一アンテナを利用する T-CSI は、2 アンテナを利用する S-CSI より誤差を 62% 低減する。一方で、6 アンテナとの比較では、S-CSI の方が T-CSI より誤差を 72% 低減する。2 アンテナを利用する J-CSI は、同じ 2 アンテナの S-CSI より誤差を 68%、単一アンテナの T-CSI より 15% 低減する。また、6 アンテナの場合でも、J-CSI は S-CSI より誤差を 9% 低減し、T-CSI より 74% 低減する。ESPRIT と Root-WSF に対して、精度の差は S-CSI との比較と同程度であった。

これらの結果より、T-CSI は、アンテナ数が小さい時（2 アンテナ）には、S-CSI、ESPRIT、Root-WSF に比べ大きな改善効果が得られるものの、アンテナ数が増加した場合には、その精度が逆に劣ることが確認できる。これは、CSI の時間的变化が空間的变化に比べ小さいために、アンテナ数が増加した時には空間的变化の方が、角度推定時の分解能が高くなるためである。一方、J-CSI では T-CSI と同様に、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と同時に、

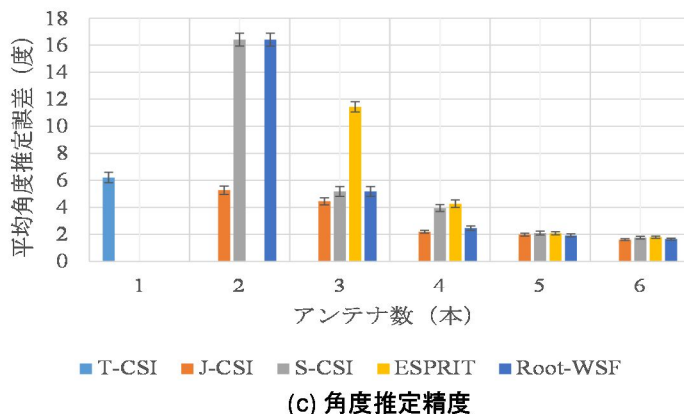
アンテナ数が増加した場合にも S-CSI、ESPRIT、Root-WSF に対する優位性を保っている。これは、アンテナ数が少ない時の空間的 CSI の不足を複数時間の CSI の併用により補えると共に、アンテナ数が増加した時には、逆に複数時間の CSI のみでは不足する分解能を複数アンテナの CSI の併用で補えるためだと考えられる。測位結果からも同様な傾向を確認できる。



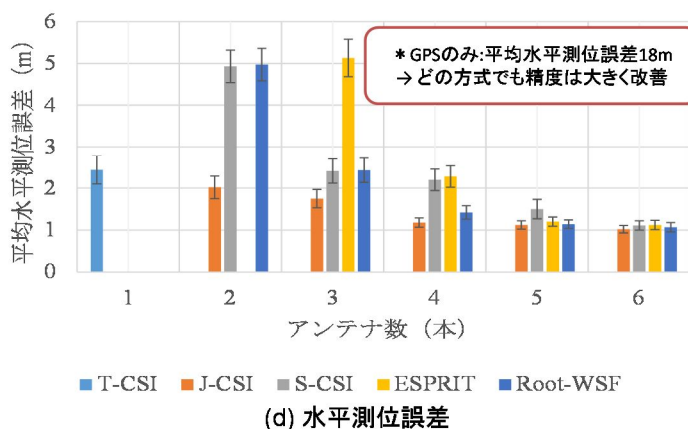
(a) 歩行者・車両の配置



(b) 同位置の航空写真(Googleマップ)



(c) 角度推定精度



(d) 水平測位誤差

図 2 歩行者測位シナリオと角度・測位誤差

また、距離の変化に伴って、CSI 情報が時系列的に変わることを利用し、長短期記憶ネットワーク (LSTM) を用いて、距離を平滑化する手法の検討・初期評価を行い、さらに、学習モデルを環境に応じて更新する手法の検討・初期評価を行った。

また、無線電波の減衰影響を受けにくい位相が距離によって変わることを利用した新しい距離推定手法の検討・初期評価を行った。

これらにより、歩行者測位精度の改善は、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（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Komamiya Wataru, Tang Suhua, Obana Sadao	4. 巻 9
2. 論文標題 Precise Angle Estimation by Jointly Using Spatial/Temporal Change of Channel State Information and Its Application in Pedestrian Positioning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 59420 ~ 59431
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3073000	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Komamiya Wataru, Tang Suhua, Obana Sadao	4. 巻 20
2. 論文標題 Radiation Angle Estimation and High-Precision Pedestrian Positioning by Tracking Change of Channel State Information	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20051430	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 戸田 和宏, 湯 素華, 小花 貞夫	4. 巻 60
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1379-1389
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 山見 悠人, 湯 素華
2. 発表標題 角度情報を用いたBLE測位の高精度化に関する検討
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaki Inoue, Suhua Tang, and Sadao Obana
2. 発表標題 LSTM-based high precision pedestrian positioning
3. 学会等名 IEEE CCNC ' 22 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 湯 素華, 小花 貞夫
2. 発表標題 OFDM信号の位相情報を用いた歩行者測位に関する検討
3. 学会等名 情報処理学会高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS) 研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 真樹, 湯 素華, 小花 貞夫
2. 発表標題 LSTMを用いた高精度歩行者測位方法に関する検討
3. 学会等名 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02021) シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 湯 素華, 小花 貞夫
2. 発表標題 都市部における歩行者測位の取り組み
3. 学会等名 電気情報通信学会高信頼制御通信 (RCC) 研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上真樹, 湯 素華, 小花 貞夫
2. 発表標題 オンライン学習を用いた電波伝搬距離推定および高精度歩行者測位方式
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 陳 子強, 小花 貞夫, 湯 素華
2. 発表標題 マルチパス誤差の空間・時間相関性を用いた歩行者測位精度向上に関する検討
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 駒宮 亘, 小花 貞夫, 湯 素華
2. 発表標題 無線チャン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
3. 学会等名 情報処理学会高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS) 研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 湯 素華, 小花 貞夫
2. 発表標題 車両からの電波のチャンネル状態情報を用いた歩行者測位
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shun Ito, Suhua Tang, and Sadao Obana
2. 発表標題 Dynamic control of transmission interval for efficient pedestrian-to-vehicle communication based on channel utilization rate
3. 学会等名 IEEE VTC2020-Spring (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wataru Komamiya, Sadao Obana, and Suhua Tang
2. 発表標題 Single antenna precise angle estimation by exploiting Doppler shift and its application in pedestrian positioning
3. 学会等名 IEEE ICVES ' 19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 舜, 小花 貞夫, 湯 素華
2. 発表標題 歩車間通信における無線チャネル使用率に基づく動的送信頻度制御
3. 学会等名 情報処理学会高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS) 研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 駒宮 亘, 小花 貞夫, 湯 素華
2. 発表標題 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
3. 学会等名 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02019) シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Suhua Tang and Sadao Obana	4. 発行年 2019年
2. 出版社 CRC Press	5. 総ページ数 19
3. 書名 Precise pedestrian positioning by using vehicles as mobile anchors, in the Book "Cooperative Localization and Navigation: Theory, Research, and Practice"	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 測位システムおよび測位方法	発明者 湯 素華, 小花 貞夫	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-143752	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

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

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小花 貞夫 (OBANA Sadao) (60395043)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授 (12612)	大学の役員になったため、研究分担は初年度のみとなった。

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	久保 信明 (KUBO Nobuaki)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	浜口 雅春 (HAMAGUCHI Masaharu)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関