

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300069

研究課題名(和文) 路車異種センサー融合による衝突防止システムの統合的研究

研究課題名(英文) Research on System Integration of Multiple Sensors for Collision Avoidance

## 研究代表者

上條 俊介 (Kamijo, Shunsuke)

東京大学・大学院情報学環・准教授

研究者番号：70334357

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、自動運転時代へ向けて、歩車間の安全を確保すべく、車載画像センサー、車載電波RSSIセンサー、スマートフォンの加速度センサー、磁気センサー、GPS等の位置特定要素技術、ならびにセンサーフュージョン技術を開発した。自動運転や歩行者安全の分野では、赤外線LIDARやミリ波レーダー等のアクティブセンサーを活用した有用な研究成果が生まれているが、センサー間の干渉や電力消費が膨大である等の課題がある。本研究では、パッシブセンサーを中心としたインテグレーションを試み、その可能性を検証することで、アクティブセンサーへの依存を軽減し、システム全体での負荷バランスが最適化されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Toward the era of autonomous vehicles, localization technology of pedestrian and vehicle, fusion technology of on-board vision sensors, on-board RSSI sensors, accelerometers, magnetometric sensor, and GPS have been developed in this research. There are many researches to employ active sensors as infra-red LIDAR and millimeter wave radar for autonomous vehicles and pedestrian safety. Although these researches are very successful for some products, there are still some problems as interference among the active sensors and electric power consumptions. This research tried the strategy to integrate the passive sensors, and evaluate the abilities of passive sensors. More aggressive employment of passive sensors can relieve the responsibility of active sensors to optimize the total balance of the sensor integrations.

研究分野：高度交通システム(ITS)

キーワード：自動運転 歩車間通信 車載カメラ 衛星測位 デッドレコニング

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、事故回避支援を目的として、路側センサーを活用した路車協調型衝突防止技術、車載センサーを活用したドライバー支援および自動運転による自律型衝突防止技術、歩車間通信を活用した衝突防止技術の研究が盛んである。これらは、歩行者の検知可能範囲や精度が異なるため、情報を融合した相互補完を行うための統合研究が必要である。

(2) 自動運転の実現へ向けて、この課題を可決する方法として、アクティブセンサーやパッシブセンサーを組み合わせた様々な技術が提案されているが、どの技術が有望かについては、今後の研究の進展が注目されているところである。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、車載画像センサー、車載電波 RSSI センサー、スマートフォンの加速度センサー、GPS 等の歩行者および車両の位置特定要素技術、ならびにセンサーフュージョン技術を開発する。東京都の実交差点をテストベッドとして実証実験を行い、技術の有効性を検証する。

(2) 自動運転や歩行者安全の分野では、赤外線 LIDAR やミリ波レーダー等のアクティブセンサーを活用した研究が多く行われている。これらの研究は、多くの有用な成果を生んでおり、実用化が始まっている。その反面、センサー間の干渉や電力消費が膨大である等の課題がある。

(3) そこで、本研究では、敢えて(1)にあるようなパッシブセンサーを中心としたインテグレーションを試み、その可能性を検証する。こうすることで、アクティブセンサーへの依存を軽減し、システム全体での負荷バランスが最適化されることへの見通しをつけることが可能となる。

### 3. 研究の方法

(1) Zigbee 受信機を車両の四隅に搭載し、歩行者が保持する Zigbee 発信機との通信時の RSSI(Received Signal Strength Indicator) を評価し、パーティクルフィルター適用した学習データとのパターンマッチングにより、発信機的位置を特定する技術を開発する。アルゴリズムには、路面とビルからの電波反射を考慮した改良を行う。

(2) スマートフォンの加速度センサー、磁気センサー、GPS をフュージョンさせた PDR(pedestrian dead reckoning)技術を開発する。測位結果は、歩車間通信を通じて車両に情報提供されることを想定している。車両側では、さらに、RSSI センサーと受信した歩行者測位データをフュージョンすることで、歩行者の軌跡の推定精度を向上させ、遠距離から近距離へアプローチする過程のシームレスなトラッキングを実現する。

(3) 車載カメラを活用し、近距離に接近する歩行者を検出し、その挙動を把握する。本研

究では、まず、歩行者の体と頭の向きを検出する技術を開発する。これにより、当該車両に注意が向いているか、急な方向転換が行われたかといった、トラッキング軌跡からだけでは分かりにくい歩行者の挙動の把握を可能にする。LIDAR やレーダーは、原理的にこの目的に適用することが不可能である。

(4) 都市部の三次元構造データを活用した衛星測位技術を開発し、歩行者測位精度を劇的に向上させる。このテーマは研究開発当初にはなかったものであるが、研究途中に着想を得たものである。

### 4. 研究成果

(1) RSSI を用いた歩行者及び車両の検知技術に関する研究

近年、様々な取り組みにより、交通事故における死亡事故や重大事故は減少傾向にあるといえる。しかし、依然として車両の右左折時における巻き込みや対面衝突の事故を 100%防ぐことは難しい。これらの事故を防ぐためには歩行者及び車両の自己位置を頑健に推定することが重要であるが、GPS を用いた位置推定は、都市部においてマルチパスの影響により、その精度が著しく低下することが知られている。この問題を解決するには、複数のセンサーを組み合わせることで位置推定を行うことが有効である。そこで、本研究では RSSI を用いた歩行者及び車両の検知技術について研究を行うものである。

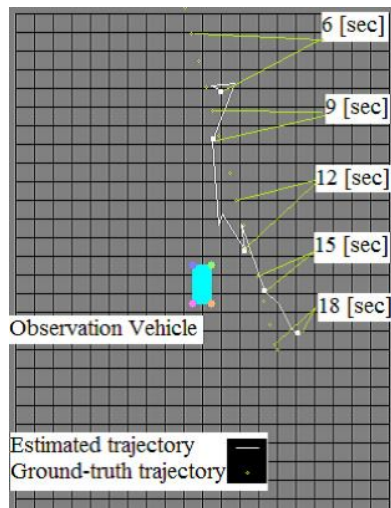
RSSI のキャリブレーションデータ構築では、図に示すような車両の四隅に取り付けられた Zigbee から RSSI 値を取得し、それらの相対値を推定に用いることで周囲の環境に対し頑健な推定を行うことができる。



また、推定結果を安定させるためにパーティクルフィルターによって位置の最尤推定を行う。さらに、このモデルに路面からの電波反射モデルとして FDTD 法(Finite-Difference Time-Domain method)を適用し、シミュレーションを行った。

この FDTD 法によって得られる RSSI 値は、距離によって振動し、多峰性の関数となる。この状態の分布にパーティクルフィルターを直接適用すると、本手法は正しい推定をできないので、予め k-means 法により尤度分布のクラスタリングを行う。その後、分割され

たパーティクル分布の内、一つのパーティクルを選択し、推定をする。  
 結果として、Zigbee が観測者から見て LOS(Line-Of-Sight) の位置でも NLOS(Non-Line-Of-Sight) の位置でもほぼ正解位置に近い推定結果を得ることができており、観測者と Zigbee の間の距離が 15m 以下であれば、誤差の平均は 2m 以下の範囲に収まる。また、先述したクラスタリングを行なわなかった場合、誤差の平均は 7m ほどであるが、これを行うことで、誤差の平均を 4m 程度に収めることが確認できた。これにより、提案手法が有効であることが示された。このことより本手法が車両近傍であれば歩行者の位置を推定する強力な手法となり得ることが示された。



(2)複数センサーを融合させた PDR 技術の開発

歩行者の現在位置を高精度に推定する技術は、様々な情報システムにおいて重要な要素である。屋外環境において、歩行者が現在位置情報を取得する一般的な手段は、一般的な手段は、複数の人工衛星との距離をもとに地球上の自分の位置を割り出す GPS である。しかし都市部に置いて、建物による衛星電波の遮断や反射により GPS の測位精度は大きく低下する。そのような環境においても高い精度で測位を続けるためには、GPS に情報を補う、あるいは GPS に取って代わるような、別の位置推定手段を用いるのが効果的である。その手段の一つとして盛んに研究されているのが、歩行者デッドレコニング (PDR) である。歩行者デッドレコニングは歩行者の一步一步の歩幅と方向を計算し、積み重ねて歩行者をトラッキングするシステムである。本研究においては、信頼性の高い歩行者デッドレコニングシステムを提案する。従来の歩行者デッドレコニングシステムは、歩行者が長距離を一度に移動した時に正しい歩幅推定と方向推定が計算できない問題がある。本研究の目的は、それらの補正手法を探ることである。また、歩行者デッドレコニングと

GPS システムの融合手法を提案し、最終的により信頼度の高い歩行者ナビゲーションシステムを構成する。

具体的な手法としては、まず歩行者の行動パターンを分析し、歩く状態と走る状態の歩行者に対して、別々の歩幅推定モデルを作る。歩行者の行動パターンを分析し手法としては、そのモデルを実装した。歩く状態に対しては従来のモデルをそのまま使用するが、走る状態に対しては、新たなモデルを提案する。次に、歩行者の移動方向を正しく推定できないという問題に対して、その主な理由は、都市部において磁場の乱れが大きいためである。その乱れを補正するために、本研究では事前に磁気マップを生成し、磁場の乱れを補正する。

最後に、PDR と GPS の融合手法として、カルマンフィルターを用いた。加速度センサーやジャイロセンサの測定値をカルマンフィルターの State Transition Model として、GPS の観測結果を Observation Model として定義した。加えてマップマッチング手法を用い、更に高精度な位置推定ができるような手法を提案した。

実験結果として、東京都品川区を実験サイトとした。この場所は周辺に高層ビルが乱立しており、GPS にとっては厳しい条件である。この場所において、我々の提案手法は平均 5.48m の測位精度を達成した。これは、GPS 単体による測位結果を大きく改善するものであり、提案する手法の優位性が示されている。



(3)車載カメラを用いた歩行者の頭部/身体の向き推定

当研究では車載カメラ画像上における歩行者の体と頭の向きの推定において、半教師あり学習を用いた高精度な向き推定器の学習手法と、頭部向きと身体向きの制約条件を考慮した向き推定手法の 2 つの提案を行った。

まず、半教師あり学習を用いた高精度な向き推定器の学習手法について述べる。

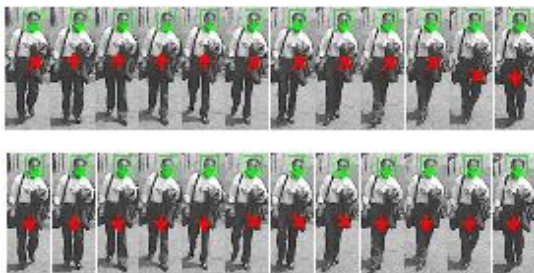
一般に機械学習のフレームワークで向き推定器を構築する場合、それぞれの実際の向きに対応した正解の学習データセットを用意する必要がある。この際、各データの正解の向きクラスを人手によりラベル付けする必要があるが、特に向きクラスの境界に位置するようなデータなど、学習データの中には人にとってラベル付けすることが難しいデータが存在する。そこで本研究では、学習データを人手によるラベル付けが簡単ある集合と困難である集合の2つに分ける。そして、この学習データに対して半教師あり学習を適用することでより高精度な向き推定器を学習させる手法を開発した。本手法により、全ての学習データを人手によりラベル付けした場合よりも推定精度が、頭部向きでは94%から95%、身体向きでは90%から93%に向上した。

次に、頭部向きと身体向きの制約条件を考慮した向き推定手法について述べる。

歩行者画像を入力として受け取った際、頭部向きと身体向きを独立に推定すると図上に示すような推定結果が得られることがある。これは頭部及び身体向きの推定器それぞれが入力画像に最も適していると認識する推定結果を出力するからであるが、このように頭部と身体向きが著しく異なる方向を向くことは人体の構造から不可能である。

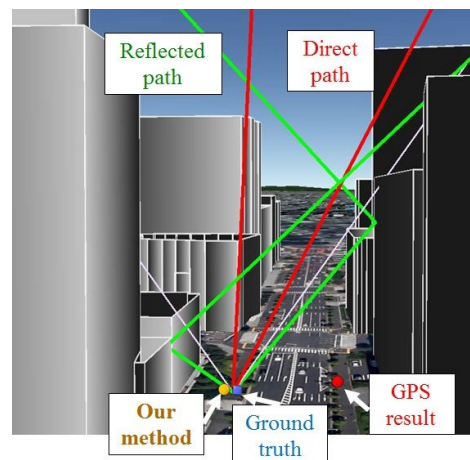
そこで本研究では頭部向きと身体向きに制約条件を設けることによってこのような誤推定を低減する手法を開発した。具体的には、頭部向きと身体向きは一般に一致することが多いことをモデル化し、それを向き推定の尤度に組み込む。頭部向きと身体向きの制約のモデル化には、角度空間において正規分布と非常によく似た性質を持つ von Mises 分布を用いた。本手法によって頭部向きの推定精度を86%から93%、身体向きの推定精度を90%から94%まで向上したことを、実際の車載画像データを用いた評価実験により確認した(図下)。

これらの提案した学習方法によって得られる高精度な歩行者の頭部および身体の向きは、歩行者の挙動を認識・予測に有力な情報となると考えられる。



(4)都市部三次元データを活用した GNSS 測位の高度化

GNSS(Global Navigation Satellite Systems)を活用した測位においては、一般に4つ以上の衛星からの信号をLOS状態で受信できることが必要である。しかし、高層ビルが多い都市環境では、衛星信号の遮蔽や反射により、測位誤差が生じる[ ]。これらの効果により、十数メートル~数十メートルの測位誤差が一般的なのが現状である。そこで、urban canyonにおける三次元地図データを活用したGNSS測位精度向上のための技術を開発した。ビルの三次元構造データを活用して、GNSS衛星からの信号の反射経路を推定することで、NLOSやマルチパス状態で受信した信号の到達時間を補正することで、本来の直接波の伝播時間を推定する。正解となる測位結果が未知の状態では、反射経路を推定することができない。そこで、仮定した測位結果から推定される反射経路と、この推定に基づいた伝播距離補正に基づく測位結果が無矛盾性を評価し、最適解を探索するアルゴリズムを開発した。



結果として、都内のビル街で4.7mの測位精度を達成したが、これは歩車間通信のRSSI推定手法を用いた測位誤差と同等である。本手法は、都市部の三次元構造データが必要であるが、多くの歩行者測位手法の有力な選択肢と考えられる。

<引用文献>

M.S. Braasch, "Performance comparison of multipath mitigating receiver architectures," In Proceedings of IEEE Aerospace Conference 2001, Vol. 3, pp. 3/1309-3/1315 vol.3, 2001.

T. Suzuki, N. Kubo, and A. Yasuda, "The possibility of the precise positioning and multipath error mitigation in the real-time," In Proceedings of International Symposium on GNSS/GPS, 2004.

S. Reddy, M. Mun, J. Burke, D. Estrin, M. Hansen, and M. Srivastava, "Using mobile phones to determine transportation modes,"

ACM Transactions on Sensor Networks, vol. 6, no. 2, pp. 1-27, Feb. 2010.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

S. Miura, L.-T. Hsu, F. Chen, and S. Kamijo, "GPS Error Correction with Pseudorange Evaluation Using 3-dimensional Maps," IEEE Trans. on Intelligent Transportation System (accepted).

Noriaki KAKIUCHI, Kenichi SUNAGAWA, Shunsuke KAMIJO, "Pedestrian Dead Reckoning for Mobile Phones Using Magnetic Deviation Map", IEICE Trans. A, Vol.E98-A No.1 pp.313-322, 2015. Li-Ta HSU, Feiyu CHEN, Shunsuke KAMIJO, " Evaluation of Multi-GNSS and GPS with 3D Map Methods for Pedestrian Positioning in an Urban Canyon Environment ", IEICE Trans. A, Vol. E98-A No. 1 pp. 284-293, January 2015

Shinya Yano, Yanlei Gu, Shunsuke Kamijo, "Estimation of Pedestrian Pose and Orientation Using On-Board Camera with Histograms of Oriented Gradients Features", International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, Springer, DOI 10.1007/s13177-014-0103-2, 2014

Shunsuke Miura, Shoma Hisaka, Shunsuke Kamijo, "GPS Positioning with Multipath Detection and Rectification using 3D Maps", International Journal of Automotive Engineering, Vol.5, No.1, pp. 23-29, 2014.

Shunsuke Miura, Shunsuke Kamijo, "GPS Error Correction by Multipath Adaption", International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, ISSN1348-8503, pp.1 - 8, 2014, Springer.

Shoma Hisaka, Shunsuke Kamijo, "Object Detection using RSSI with Road Surface Reflection Model for Intersection Safety", IEICE Trans. A, Vol.E96-A,No.6,pp.1451-1459, 2013.

金 亨官, 高橋 俊允, 上條 俊介, "異種 HOG カスケードと差分領域特徴を用いた歩行者クラス分類",自動車技術会論文集, pp.573-578, Vol.44, No.2, 2013.

日坂翔馬 上條俊介 "車両による遮蔽と路面反射を考慮した RSSI による接近移動物体検知",自動車技術会論文集, pp.1117-1122, Vol. 43, No. 5, 2012

Shoma Hisaka and Shunsuke Kamijo,

"Onboard Sensing System for Intersection Safety Use of Received Signal Strength Indication ", Transportation Research Record(TRB), Vol. 2324, pp. 110-118, 2012,

〔学会発表〕(計18件)

・国際会議(査読付)

L.-T. Hsu, Y. Gu, F. Chen, Y. Wada, and S. Kamijo, "Assessment of QZSS L1-SAIF for 3D Map-Based Pedestrian Positioning Method in an Urban Environment," International Technical Meeting of The ION, Dana Point, Jan. 2015.

Yanlei Gu, Yutaro Wada, Lita Hsu and S. Kamijo, "Vehicle Self-localization in Urban Canyon Using 3D Map based GPS Positioning and Vehicle Sensors", IEE ICCVE, Vienna, Nov. 3-7, 2014.

Yanlei Gu, S. Kamijo, "Recognition and Pose Estimation of Urban Road Users from On-board Camera for Collision Avoidance", IEEE ITSC, Qingdao, Oct., 2014.

Shunsuke Miura, Feiyu Chen, S. Kamijo, " GNSS Pseudorange Evaluation Using 3- Dimensional Map " , ITS World Congress, Detroit, Sept. 2014.

Shunsuke Miura, Feiyu Chen, Shunsuke Kamijo, "GPS Precise Positioning with Pseudorange Evaluation Using 3-dimensional Maps," IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn June 2014.

Shunsuke Miura, Feiyu Chen, Shunsuke Kamijo, "GPS Error Correction with Multipath Evaluation using 3D Maps", the TRB Annual Meeting, Wahington D.C., Jan. 2014.

Noriaki Kakiuchi and Shunsuke Kamijo, "Pedestrian Dead Reckoning for Mobile Phones through Walking and Running Mode Recognition", 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC2013, pp261-267, The Hague, Oct.6-9, 2013.

Shunsuke Miura, Shoma Hisaka, and Shunsuke Kamijo, "GPS Multipath Detection and Rectification using 3D Maps", 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC2013, pp.1528-1534, The Hague, The Netherlands, Oct.6-9, 2013.

Shunsuke Miura, Shoma Hisaka, and Shunsuke Kamijo, "GPS Positioning with Multipath Detection and Rectification using 3D Maps", 20th ITS World Congress, 4172, Tokyo, Oct. 2013.

Shoma HISAKA, Shunsuke MIURA and Shunsuke KAMIJO, "Performance

Assessment Study of Road User Sensing Method by RSSI Combinations at Real Intersections", 20th ITS World Congress, 3952, Tokyo, Oct. 2013.

Shoma Hisaka and Shunsuke Kamijo, "Road User Positioning by RSSI Combinations with Pavement Reflection at Real Intersection," International Conference on ITS Telecommunications, pp. 29-34, Taipei, Taiwan, Nov. 2012.

・国内会議(査読付)

Yanlei Gu, and S. Kamijo, "Bicyclist Recognition and Orientation Estimation from On-board Vision System," 自動車技術会・秋季大会, 仙台, 2014年11月.

Feiyu Chen, Li-Ta Hsu, and Shunsuke Kamijo, "Evaluation of Multi-GNSSs and GPS with 3D Map Methods for Pedestrian Positioning in an Urban Canyon Environment," 自動車技術会・秋季大会, 仙台, 2014年11月.

Shunsuke Miura, Feiyu Chen, Shunsuke Kamijo, "GPS Positioning Algorithm Considering the Effect of Non-Line-of-Sight and Multipath Propagation using 3D Map", 自動車技術会・春季大会, 横浜, 2014年5月.

Shinya Yano, Yanlei Gu, and Shunsuke Kamijo, "Pedestrian Orientation Estimation using On-board Monocular Camera with Semi-Supervised Learning", 自動車技術会・春季大会, 横浜, 2014年5月.

矢野進也, 上條俊介, "HOG特徴量とパーティクルフィルタを用いた車載カメラからの歩行者向き推定," 自動車技術会・秋季大会, 名古屋, 2013年11月.

日坂翔馬, 上條俊介, "車両による遮蔽と路面反射を考慮したRSSIによる接近移動物体検知," 自動車技術会・春季大会, 横浜, 2012年5月.

金亨官, 高橋俊允, 上條俊介, "異種HOGカスケードと差分領域特徴を用いた歩行者クラス分類," 自動車技術会・春季大会, 横浜, 2012年5月.

〔図書〕(計1件)

上條俊介 他、(株)エヌ・ティー・エス、「自動車オートパイロット開発最前線 要素技術開発から社会インフラ整備まで」2014.5

〔産業財産権〕

出願状況(計4件)

名称: 位置検出装置および位置検出方法  
発明者: 上條俊介、三浦俊祐  
権利者: (財)生産技術研究奨励会  
種類: 特許  
番号: 特許願 2014-060111 号

出願年月日: 平成26年3月24日

国内外の別: 国内

名称: 位置検出装置および位置検出方法

発明者: 上條俊介、三浦俊祐

権利者: (財)生産技術研究奨励会

種類: 特許

番号: 特許願 2014-060084 号

出願年月日: 平成26年3月24日

国内外の別: 国内

名称: 位置検出装置および位置検出方法

発明者: 上條俊介、三浦俊祐

権利者: (財)生産技術研究奨励会

種類: 特許

番号: 特許願 2013-182191 号

出願年月日: 平成25年9月3日

国内外の別: 国内

名称: 位置検出装置および位置検出方法

発明者: 上條俊介、三浦俊祐

権利者: (財)生産技術研究奨励会

種類: 特許

番号: 特許願 2013-106442 号

出願年月日: 平成25年5月20日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://kmj.iis.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上條俊介 (KAMIJO, Shunsuke)

東京大学・大学院情報学環・准教授

研究者番号: 70334357

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

古 艶磊 (GU, Yanlei) 東京大学生産技術

研究所 特任研究員

研究者番号: 40704838

許 立達 (HSU, Li-Ta) 東京大学生産技術

研究所 特任研究員

研究者番号: 10739303