様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２８ 年　 ６ 月　 ６ 日現在

機関番号：８２６２６
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2012～2015
課題番号：２４３０００７８

研究課題名（和文）スマートモビリティと環境固定センサ群の相互支援による走行時リスク検出法の開発

研究課題名（英文）Development of Risk Detection Method by Coordination of a Smart Mobility and Environment Sensors

研究代表者

佐藤　雄隆（SATOH, Yutaka）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・研究グループ長

研究者番号：００３９２６２１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　13,800,000円

研究成果の概要（和文）：歩行者とも共存しながら移動する一人乗り移動機器において、車載センサと環境側に設置された固定センサ群の情報を自動的に協調・統合し用いることで、走行時のリスク検出を行う方法について研究を行った。具体的には，壁や障害物などが多く見通しの悪い環境においても，環境センサが検出したリスクを移動機器に情報共有することで，車載センサのみでは検出できないリスクの検出が可能であることを明らかにした．また，センサによるリスクの検出性能を高めるために，ロバストパターン認識技術の導入による照明変動など外乱の影響の低減，RGB-Dカメラの導入，人物検出技術の開発などの要素技術に関する研究も併せて行った．

研究成果の概要（英文）：In the research project, we developed a risk detection method for personal mobility systems using coordination of on-board sensors and environment sensors. The method is capable of detecting risk even in complex and highly occluded driving environments by risk information sharing framework between on-board sensors and environment sensors. We also developed some elemental techniques for improving the accuracy of the risk detection such as robust background subtraction, RGB-D sensing / processing and robust human detection.

研究分野：画像工学

キーワード：画像情報処理　情報センシング　センサ融合・統合　知能ロボット　生活支援技術

１．研究開始当初の背景

近年、環境・エネルギー問題への意識の高まりから、一人あたりの移動に要するエネルギー消費量や CO2 排出量を低く押さえることができるパーソナルモビリティ（主に１名で乗車する移動機器）が注目を浴びている。そこにおいては、走行エリアを車道以外にも拡張することで、地域内移動や大規模施設内での移動、更には障害者や高齢者を対象とした電動車いすなどを包含する新しい移動手段として発展することが期待されている。

道路のみの走行を前提とした自動車においては、追突の危険性を事前に予測して自動的にブレーキをかけたり、自動的に前走車に追従するなどのインテリジェントシステムが既に開発され、実用化されている。しかしながら、道路のみならず人混みなどを含む様々な生活空間での共存が前提となるパーソナルモビリティ（以下「移動機器」と記述）においては、より積極的に周囲環境をセンシングし、走行時のリスク検出を行うための技術の導入が必要となる。

このような背景のもと、我々はこれまでに一人乗りの移動機器である電動車いすの走行時リスク検出に関する研究に取り組んだ。そこにおいては、走行環境のセンシングを行う車載センサにブレークスルーが必要であると考え、全方向の画像および三次元情報を同時且つリアルタイムに取得する能力を持つ全方向ステレオカメラシステムを開発し、同時に開発した全方向三次元情報に基づくリスク検知アルゴリズムと組み合わせることで、人混みのような走行困難な環境であっても、車載センサのみで安全に移動することを可能にした。

しかし、一方で屋内空間のような見通しの悪い環境を走行する場合、車載センサのみでは遮蔽によってセンシングできない範囲が多く、いわゆる「出会い頭の衝突」の回避が困難であることがこれまでの研究で明らかとなった。本研究では、この問題を解決するために、これまでの研究によって得られた車載センサによるリスク検出の枠組みをベースとして発展させ、環境側に設置された固定センサ群と車載センサが自動的に相互協調してリスク検出する方法について研究を行う。移動機器は、車載センサのみならず環境固定センサ群も自らの「眼」としてリスク検出に用いることが出来るようになる。これにより精度良く、しかも移動機器から死角となる領域についてもリスク評価が可能になることを明らかにする。

２．研究の目的

歩行者とも共存しながら移動する一人乗り移動機器において、車載センサと環境側に設置された固定センサ群の情報を自動的に協調・統合し用いることで、走行時のリスク検出を行う技術について研究を行う。具体的には（１）車載センサと環境固定センサ群が相互協調して移動機器の位置を精度良く推定し、その情報に基づき全センサの座標系を自動的に統合する技術に関する研究を行う。（２）統合されたセンサ群の情報からリスクを検出し、移動機器に対する自動減速・停止などの介入制御や、ユーザへのリスク情報の提示を行う技術に関する研究を行う。

３．研究の方法

本研究では、以下の研究項目について研究を行う。

（１）移動機器の位置姿勢を、車載センサと環境固定センサ群が協調して精度良く推定するアルゴリズムの開発：車載センサと環境固定センサ群が対話的に互いの情報を繰り返し用いることで、移動機器の位置姿勢が推定できることを明らかにする。更に精度向上のために、①センサ間の対話アルゴリズムの検討：移動機器はまず自らのおおよその自己位置推定結果と運動パターンを環境固定センサに通知する。環境固定センサはその情報を元に移動機器を検出し、位置情報を移動機器に通知する。移動機器は通知された位置情報を初期値としてより詳細な自己位置推定を行う、といった手順を繰り返すアルゴリズムにより、高い精度で位置姿勢推定が可能になることを明らかにする。②ロバストパターン認識技術の導入：各センサ情報の処理に統計に基づくロバストパターン認識の枠組みを適用することで、良く管理された実験室環境のみならず、照明の変動や、他の移動体や静止物による部分的な遮蔽など、実環境で起こり得る外乱の影響を大きく低減できることを明らかにする。

（２）推定された移動機器の精度の高い位置姿勢情報を元に、車載センサと環境固定センサの座標系を自動的に統合するアルゴリズムの開発：位置姿勢推定の誤差が座標系の統合にも悪影響を及ぼすことが予想されるが、常に連続的に座標統合処理を繰り返し、且つロバスト統計を導入することで、時間の経過に従って統合精度を統計的に安定させる。

（３）統合されたセンサ情報から、走行時のリスクを検出するアルゴリズムの開発：我々の従来研究である車載センサによるリスク検出法をベースとし、より高い精度で、しかも移動機器から死角となる領域についてもリスク評価が可能になることを明らかにする。

（４）検出されたリスク情報を、ユーザに情報提示するための方法の検討：移動機器に設置した画面上に、ユーザの視界に相当する実写動画像と、ピクトグラム（絵文字）を重畳表示（全センサの座標系が自動的に統合されているのでこのような重畳表示が可能になる）することで、直感的なリスク

の認知が可能になることを明らかにする。

４．研究成果

まずセンサ間の対話アルゴリズムに関する検討を行った。移動機器はまず自らのおおよその自己位置推定結果と運動パターンを環境固定センサに通知する。環境固定センサはその情報を元に移動機器を検出し、位置情報を移動機器に通知する。移動機器は通知された位置情報を初期値としてより詳細な自己位置推定を行う、といった手順を繰り返すアルゴリズムにより、実験室環境においては位置誤差 5cm 以内、姿勢誤差 3 deg.以内の高い精度で位置姿勢推定が可能になることを明らかにした(図 1)。また、センサ対話ためのプロトコルのプロトタイプを設計・実装し実験に用い、改良を行った。

しかしながら、実験室環境以外の環境では、当初予想していたとおり照明変動等の外乱が大きく、推定精度が低下したり、推定に失敗する場合があることがわかった。スマートモビリティは屋内外の様々な環境で用いられることを想定しているため、センサに対するさまざまな外乱に対してロバストである必要がある。特にセンサとしてカメラを用いる場合、照明変動に対するロバスト性の確保が問題となる。

したがって、次にロバストパターン認識技術の導入に関する検討を行った。具体的には、明度の増減の符号に着目する独自の統計的リーチ特徴法の導入に関する検討を行った。統計的リーチ特徴法を導入することで、環境固定センサからの移動体の検出時に明度変動の影響を大きく低減することが可能であることを明らかにした一方で、より速いフレームレートで検出を行うために高速化が必要となった。そこで、リーチの参照点をランダムサンプリングによって得る方法を開発し、参照点を探索により求める従来の方法と比較して、性能を落とすことなく、１０倍以上の高速化が実現できることを明らかにした。また更に、画像を明度変化の共起性に基づきまず領域分割し、異なる領域に属する画素間の共起性に着目するというメカニズムを導入することにより、ロバスト性が更に向上することを明らかにした。

これらの結果、環境固定センサ群については安定的な推定が可能になったが、車載センサによる自己位置推定に関して、その精度と安定性を改善する必要があることがわかった。具体的には、車載センサの１つとして用いているステレオカメラが、例えば白い壁のみの部屋のようにテクスチャが乏しい環境に置かれた場合等に十分な信頼性を持ったデータを出力できていない場合があることがわかった。したがって、このような条件であっても安定に情報を取得するためにアクティブタイプの RGB-D カメラ

図１　モビリティの位置姿勢推定
（赤丸：推定位置，緑矢印：推定姿勢）

の導入を検討した。RGB-D カメラは、通常のカラー（RGB）画像に加えて、奥行き（D）を取得することが可能である三次元センサである。近年高性能化、小型化および低価格化が急速に進み、本研究課題で必要となる要件を高いレベルで満たしていることから導入を決断した。

RGB-D カメラを用いることで、前述のような問題を解決可能であることを確認したが、更なる精度向上のために複数台を同時に用いた場合、むしろ精度が低下する問題が発生した。問題の解析と検証実験を重ねた結果、原因が RGB-D カメラから得られる３次元データの（個体差がある）歪みによるものであることが明らかとなった。したがってこの歪みを較正するための手法を開発し、複数台の RGB-D カメラで精度良く自己位置推定を行うことを可能にした。

通常のカメラキャリブレーションでは、既知の図形を観測するなどの方法でカメラの内部パラメータを推定し用いることで歪みの無い像を得る。例えばステレオカメラでは、推定された内部パラメータとカメラ間の位置関係を表す外部パラメータを用いて、三角測量を行うことによって歪みのない距離データを得る。一方、今回用いた RGB-D カメラ（キネクトセンサ）は、三角測量に必要なディスパリティの計算過程がブラックボックスとなっているため、仮にカメラの内部パラメータが推定できたとしても、計算過程に適用することができない。従って、本研究では、まずカメラが出力した距離データの歪みの性質を詳細に分析し、次に歪みの無い像に変換するための補正ワープテーブルを作成した。なお、この較正法は「ビジョン技術の実利用化ワークショップ ViEW2013」の最優秀論文賞を受賞した。また、複数カメラ間の外部パラメータについても、同一の平面を複数の姿勢で観測することにより相対的な位置関係を決定する方法を開発し、簡便且つ精度良く較正することを可能にした。

次に統合された車載センサと環境固定センサの情報を用いることにより、より高い精度で、しかも移動機器から死角となる領

域についてもリスク評価が可能になることを実験的に確かめた。具体的には、見通しの悪い交差点を模擬した実験環境での歩行者の急な飛び出しに対して、移動体からの死角をカバーする環境固定センサの情報と車載センサの情報を統合してリスク評価することにより、衝突を未然に防ぐアルゴリズムを開発・実装し、衝突の回避が可能であることを実証した。ここでリスクを安定的に検出するためには、環境固定センサによる人物検出の精度向上および、人物の動作認識・動作予測を実現することが特に重要であることが明らかになった。これを実現するために、三次元情報のみならず、二次元画像局所特徴量を併用して人物検出を行う方法を開発し、人物検出の精度を向上させた。また、人物の移動に伴う時系列特徴を音声や言語処理の分野で用いられてきた「トピックモデル」の手法を用いて解析することで、行動の分類および数秒程度先の行動を予測することを可能にした。ただし、直進、方向転換などの行動分類は 90%以上の精度が得られたものの、行動予測に関しては環境条件による精度ばらつきが大きく、引き続き精度向上に関する研究を続けていく必要があると結論づけた。

次に、検出されたリスク情報を、ユーザに情報提示するための方法の検討を行った。実際の表示を行うソフトウェアを実装し、タブレット端末等による表示実験を行い、有用性を検証した。図 2 に環境固定センサで取得したリスク情報（ここではパーティションの向こう側を歩行する人物の存在）を車載カメラからの映像にピクトグラムとして重畳表示した例を示す。ユーザからは直接視認できないパーティションの向こう側の歩行者の位置が、リスク情報としてピクトグラム（ここでは歩行者を表す絵柄の黄色三角形）で提示されていることがわかる。環境固定センサと車載センサの座標系が自動的に統合されているので、このような重畳表示が可能になる。このような表示は見通しの悪い走行環境において早期にリスクをユーザに知らせることを可能にするほか、ユーザから見えない衝突対象を移動機器が検知し自動停止した場合に、ユーザが混乱すること無く速やかに自動停止の原因を知ることを可能にする。図 3 はピクトグラムに加えて、環境固定センサによって取得した三次元点群（ポイントクラウド）情報を重畳表示したものである。パーティションの向こう側の歩行者の姿が緑色の点群として確認できる。これにより、リスクの対象が何であるのかより詳細かつ直感的に情報提示することが可能になるが、一方で衝突する可能性がある対象が同時に多数存在するような環境においては、表示が煩雑になりすぎる恐れがある。近い将来、すでに一部の航空機では採用されているヘッドアップディスプレイや、ヘッドマウントディスプレイなどのデバイスがパーソナルモビリティを含む様々な移動機器において活用されるようになる可能性もあり、リスクの提示法については、このようなデバイスの進化も踏まえながら引き続き検討を行っていく必要がある。

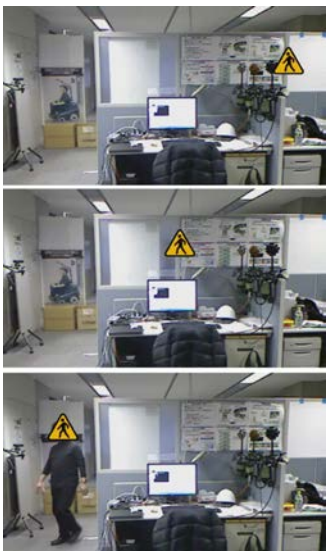

図 2 人物位置のピクトグラム表示

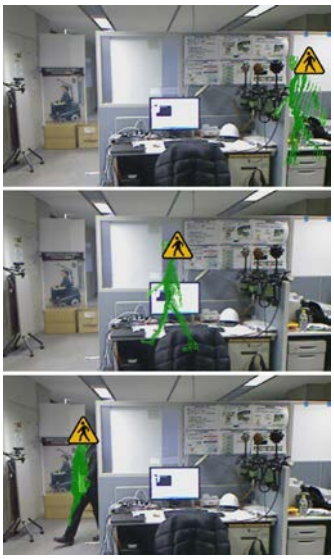

図 3 ピクトグラム＋三次元データ重畳表示

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 17 件）

①Hirokatsu Kataoka, Yoshimitsu Aoki, Kenji Iwata, Yutaka Satoh, Activity Prediction Using a Space-Time CNN and Bayesian Framework, Proc. of 11th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, 査読有, 2016.

② Dong Liang, Shun'ichi Kaneko, and Yutaka Satoh, A Robust Appearance Model and Similarity Measure for Image Matching, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol.27, 2015, 126-135.

③ Hirokatsu Kataoka, Shoko Oikawa, Yasuhiro Matsui, Yoshimitsu Aoki, Yutaka
Satoh, Shoko Oikawa, Yasuhiro Matsui, Fine-grained Walking Activity Recognition via Driving Recorder Dataset, Proc. of 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 査読有, 2015, 620-625.

④ Hirokatsu Kataoka, Kiyoshi Hashimoto, Kenji Iwata, Yutaka Satoh, Nassir, Navab, Slobodan Ilic, Yoshimitsu Aoki, Extended Co-occurrence HOG with Dense Trajectories for Fine-grained Activity Recognition, Proc. of ACCV'14, 査読有, 2014, USB, 14 pages.

⑤ Dong Liang, Shun'ichi Kaneko, Manabu Hashimoto, Kenji Iwata, Xinyue Zhao,
Yutaka Satoh, Robust Object Detection in Severe Imaging Conditions using Co-occurrence Background Model, International Journal of Optomechatronics, 査読有, Vol.8, 2014, 14-29.

⑥ Hirokatsu KATAOKA, Kimimasa TAMURA, Kenji IWATA, Yutaka SATOH, Yasuhiro MATSUI, Yoshimitsu AOKI, Extended Feature Descriptor and Vehicle Motion Model with Tracking-by-detection for Pedestrian Active Safety, IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, Vol. 97, 2014, 296-304.

⑦ Dong Liang, Shun'ichi Kaneko, Manabu Hashimoto, Kenji Iwata, Xinyue Zhao, Yutaka Satoh, Robust Object Detection in Severe Imaging Conditions using Co-occurrence Background Model, Proc. of 2013 International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT2013), 査読有, CD-ROM, 2013.

⑧ Dong Liang, Shun'ichi Kaneko, Manabu Hashimoto, Kenji Iwata, Xinyue Zhao, Yutaka Satoh, o-occurrence-based adaptive background model for robust object detection, Proc. of the 10th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS2013), 査読有, 2013, 401-406.

⑨ Hirokatsu Kataoka, Kenji Iwata, Yutaka Satoh, Ikushi Yoda, Masaki Onishi, Yoshimitsu Aoki, Big Trajectory Data Analysis for Clustering and Anomaly Detection, Proceedings of IAPR International Conference on Machine Vision Applications, 査読有, 2013, 451-454.

⑩ Kenji Iwata, Yutaka Satoh, Ryushi Ozaki, Katsuhiko Sakaue , Robust Background Subtraction by Statistical Reach Feature on Random Reference Points, IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, 査読有, Vol. 133C, No.1, 2013, 128-133.

〔学会発表〕(計 3 件)
①佐藤雄隆, RGB-D カメラにおける Depth データの歪み補正, 精密工学会 大規模環境の 3 次元計測と認識・モデル化技術専門委員会
(招待講演), 2014 年 04 月 14 日, 東京大学 (東京都・文京区)

②Dong Liang, 金子 俊一, 橋本 学, 岩田 健 司 , Xinyue Zhao, 佐藤 雄隆 , Co-occurrence-based adaptive background model for robust object detection, 電気学会 C 部門大会, 2013 年 09 月 05 日, 北見工業大学 (北海道・北見市)

③片岡裕雄, 大西正輝, 佐藤雄隆, 岩田健司, 依田育士, 青木義満, 大規模軌跡データを用いた屋内空間地図作成とクラスタリング, ビジョン技術の実利用ワークショップ, 2012 年 12 月 7 日, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市).

〔図書〕(計 2 件)
①佐藤雄隆, 産業開発機構株式会社, 映像情報インダストリアル : 優れた画像処理に触れる : RGB-D カメラから得られる Depth データの歪み補正, 2014, 66-71.

②産業技術総合研究所 (分担執筆), カナリア書房, 社会まるごとスマートシステム, 2013, 201-220.

６．研究組織
(1)研究代表者
佐藤　雄隆 (SATOH, Yutaka)
産業技術総合研究所・知能システム研究部門・研究グループ長
研究者番号：00392621