

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13727

研究課題名（和文）モデルベース法に基づく自動走行の安全保障を可能にする機械学習の利用に関する研究

研究課題名（英文）Study on the use of machine learning approaches for enabling to guarantee safety of model-based autonomous navigation

研究代表者

赤井 直紀（Akai, Naoki）

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：40786092

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：自律移動において重要な役割を担う自己位置推定の問題に焦点を当て、モデルベースの自己位置推定法を信頼可能なものとするための研究を行った。基本的には機械学習を活用し、モデルだけでは実現できないことを、機械学習を用いて実現させるような取組を実施した。また、単に機械学習を用いるだけでなく、確率モデルの中の一部に機械学習を組み込むような利用方法を提案し、機械学習の不確実性にも対応できるような手法を複数提案した。提案した方法をまとめた書籍を2022年に発行しており、本研究を通してモデルベースの自己位置推定法の性能向上の実現を達成したと考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果をまとめた書籍を、2022年に発行している。この書籍では、教科書のような基礎を確実に伝えることを前提とせず、どのような考えで新しい技術を作り、それをどのように実装するかという解説に主眼を置いた。そのため、長い時間を見て、有用なものであり続けるとは考えていない。しかし、これから実現される新たな技術を作るために活用されるものと考えている。つまり本研究の成果は、これからの科学技術を向上させるための一助になるものと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have focused on localization for mobile robots. Localization is a fundamental function for autonomous navigation. Our main objective is to realize reliable localization. Machine learning algorithms were utilized to achieve things that model-based localization methods cannot perform, for example, detection of localization failures. In particular, we do not just use the machine learning algorithms and integrated them into a probabilistic model. This integration enables us to handle uncertainty of the learning methods. We have published a book that summarizes the proposed methods at 2022. Therefore, we consider that we could contribute to improve localization technologies through this research.

研究分野：ロボティクス

キーワード：自己位置推定 機械学習 確率モデリング 移動ロボット

1. 研究開始当初の背景

自動運転の実用化が期待されており、多くの関連する研究が実施されていた。またこれに伴い、様々な機関が自動運転のデモンストレーションを公道で実施していた。しかしながら、その性能や安全性を保証することは難しく、実用化に至っては多数の問題があった。

またこの時期には、深層学習をはじめとした機械学習の性能向上に注目が集まり、多くの問題を深層学習を用いて解決する試みが実施されていた。これにより、従来では実現不可能と考えられていた処理が多数実現されるようになった。しかしながら、深層学習のブラックボックス性、すなわちある入力に対してどのような出力が得られるかの予想が困難という性質が強く問題視されており、自動運転の様な高い安全性が要求されるアプリケーションに対して、深層学習を用いることに対する否定的な意見は強かった。

一方で説明性の高いモデルベースの方法と深層学習を比較すると、モデルベースの方法が深層学習に性能面で敵わないという例も多数見られるようになってきた。そのため、モデルベースの方法よりも深層学習を用いるのが良いのではという意見も多くみられるようになってきた。しかし前述の通りブラックボックス性という問題が大きな課題となっており、深層学習を用いれば良いという風潮にはなっていなかった。そのため、モデルベースの方法を用いるべきか、深層学習を用いるべきかという議論が多くなされていた。しかし当然ながら、どちらの方法にも利点や欠点があり、一概にどちらを用いるべきかという結論には至ってはいなかった。

2. 研究の目的

自動運転のような高い安全性を要求される知能システムを対象として、その安全性を保障できるような知能システムを実現することを本研究の大目的とした。この実現ために、まずはモデルベースの方法に焦点を当てた。ただし前述の通り、モデルベースの方法だけでは十分な性能が得られないような場合も存在する。そのため、モデルベースの方法と深層学習を効果的に同時利用できる方法の構築、提案を行うことを目的とした。そしてこれにより、知能システムの性能保障や高性能化を実現することを目指した。

3. 研究の方法

自動運転で用いられる技術の 1 つである自己位置推定に焦点を当て、上記の研究目的の達成を目指した。具体的には、モデルベース法である確率モデリングに焦点を当て、モデルベースの自己位置推定法に機械学習器を組み込み、性能保証や高性能化の実現を狙った。

モデリングにあたっては、深層学習も確率的に解釈するような方法を採用した。具体的には、深層学習の出力には不確実性が含まれることを前提として、これをセンサのような可観測変数として扱うような方法を採用した。これにより、深層学習の不確実性を考慮しながらモデルベース法に組み込むことを狙った。さらに深層学習を可観測変数として扱うことで、従来では推定することが困難な情報を推定することを狙った。これにより、例えば推定結果の信頼度などを推定することを狙い、性能保障の実現を目指した。

なお有用性の検証に関しては、公開データセットや購入したロボットを用いた実機実験を実施した。

4. 研究成果

機械学習器を組み込んだ自己位置推定のための新たな確率モデルをいくつか提案した。これにより、自己位置推定結果の信頼度を推定することや、推定機能の頑健性向上を達成し、目標とした性能保障を可能とする新技術の実現を達成した。

一例として、自己位置推定結果の信頼度を推定するための新たな確率モデルを提案した。このモデルでは、深層学習を用いた自己位置推定の失敗判定を行う。しかし深層学習にも不確実性が含まれるため、この判定には失敗することもある。提案した確率モデルでは、深層学習の判定結果を基にして、実際に位置推定に成功・失敗しているかの判定を行う。具体的には、深層学習の判定性能をオフラインで記録し、その性能を基にベイズ推定を行うことで定める。この様な推定を行うことで、深層学習が持つ不確実性に対処しながら、従来法では推定できなかった信頼度の推定を可能にさせた。

なお関連する研究は、ロボティクス分野のトップカンファレンスで発表や、IF 付きの雑誌論文などに掲載されている。また、本研究により得られた成果をまとめた書籍を出版した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 3件）

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Naoki Akai, Takatsugu Hirayama, and Hiroshi Murase | 4. 巻 143 |
| 2. 論文標題 Experimental stability analysis of neural networks in classification problems with confidence sets for persistence diagrams | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Neural Networks | 6. 最初と最後の頁 42-51 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2021.05.007 | 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 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 赤井直紀 平山高嗣 村瀬洋 | 4. 巻 5 |
| 2. 論文標題 Semantic Localization Considering Uncertainty of Object Recognition | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters | 6. 最初と最後の頁 4384-4391 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2020.2998403 | 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 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 赤井直紀 モラレスルイス洋一 平山高嗣 村瀬洋 | 4. 巻 55 |
| 2. 論文標題 幾何地図上での観測物体の有無を考慮した自己位置推定 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集 | 6. 最初と最後の頁 745-752 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.55.745 | 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 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 赤井直紀 モラレスルイス洋一 平山高嗣 村瀬洋 | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 Misalignment recognition using Markov random fields with fully connected latent variables for detecting localization failures | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters | 6. 最初と最後の頁 3955-3962 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2929999 | 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 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 赤井直紀 モラレスルイス洋一 村瀬洋 | 4. 巻 32 |
| 2. 論文標題 Simultaneous pose and reliability estimation using convolutional neural network and Rao-Blackwellized particle filter | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Advanced Robotics | 6. 最初と最後の頁 930-944 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2018.1509726 | 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 該当する |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 赤井直紀 モラレスルイス洋一 村瀬洋 | 4. 巻 30 |
| 2. 論文標題 Teaching-playback navigation without a consistent map | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Jornal of Robotics and Mechatronics | 6. 最初と最後の頁 591-597 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2018.p0591 | 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 該当する |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 赤井直紀 モラレスルイス洋一 平山高嗣 村瀬洋 | 4. 巻 50 |
| 2. 論文標題 LiDARを用いた自車両位置認識結果の信頼度推定 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 自動車技術会論文集 | 6. 最初と最後の頁 609-615 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11351/jsaeronbun.50.609 | 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 Naoki Akai | 4. 巻 7 |
| 2. 論文標題 Mobile robot localization considering uncertainty of depth regression from camera images | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters | 6. 最初と最後の頁 1431-1438 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2021.3140062 | 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 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Naoki Akai, Yasuhiro Akagi, Takatsugu Hirayama, Takayuki Morikawa, and Hiroshi Murase | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 Detection of localization failures using Markov random fields with fully connected latent variables for safe LiDAR-based Automated driving | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems | 6. 最初と最後の頁 17130-17142 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TITS.2022.3164397 | 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 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Naoki Akai | 4. 巻 40 |
| 2. 論文標題 Reliable Monte Carlo localization for mobile robots | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Field Robotics | 6. 最初と最後の頁 595-613 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/rob.22149 | 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28件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 15件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Naoki Akai, Takatsugu Hirayama, and Hiroshi Murase |
| 2. 発表標題 Persistent homology in LiDAR-based ego-vehicle localization |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Naoki Akai, Shota Matsubayashi, Kazuhisa Miwa, Takatsugu Hirayama, and Hiroshi Murase |
| 2. 発表標題 Navigation style classification using persistent homology |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Naoki Akai, Koki Yasui, Kazuya Arashi, Kane Saliou, Daisuke Tsubakino, and Susumu Hara |
| 2. 発表標題 Bayesian filtering fusion of optimization-based monocular visual localization and autonomous quadcopter navigation, |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Naoki Akai |
| 2. 発表標題 Detection of localization failures with probabilistic modeling |
| 3. 学会等名 European Conference on Mobile Robots (ECMR) Workshop (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 赤井直紀, 平山高嗣, 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 Monte Carlo Dropoutを適用したEnd-to-End自己位置推定とMCLの融合 |
| 3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演演習集 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 赤井直紀, 嵐和也, 安井浩毅, サリューカン, 椿野大輔, 原進 |
| 2. 発表標題 最適化に基づく単眼自己位置推定のベイズフィルタによる融合とそれに基づくクアッドコプタの自律ナビゲーション |
| 3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会概要集 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 赤井直紀 平山高嗣 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 Hybrid localization using model- and learning-based methods: Fusion of Monte Carlo and E2E localizations via importance sampling |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 赤井直紀 平山高嗣 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 3D Monte Carlo localization with efficient distance field representation for automated driving in dynamic environments |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 赤井直紀 平山高嗣 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 LiDARを用いた自己位置推定における潜在変数全結合型のマルコフ確率場を用いたミスマッチ検出 |
| 3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演演概要集 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 赤井直紀 |
| 2. 発表標題 深層学習を「活用」する：モデルベース・学習ベース手法の併用による自己位置推定の性能向上 |
| 3. 学会等名 令和元年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 赤井直紀 平山高嗣 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 確率的自己位置推定法における機械学習の併用 |
| 3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会概要集 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 赤井直紀 平山高嗣 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 完全自動運転実現のための信頼度付き自己位置推定の提案 |
| 3. 学会等名 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 赤井直紀 平山高嗣 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 LiDARを用いた自己位置推定における潜在変数全結合型のマルコフ確率場を用いたミスマッチ検出 |
| 3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会概要集 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 赤井直紀 平山高嗣 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 Hybrid localization using model- and learning-based methods: Fusion of Monte Carlo and E2E localizations via importance sampling |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 赤井直紀 平山高嗣 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 3D Monte Carlo localization with efficient distance field representation for automated driving in dynamic environments |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 赤井直紀 モラレスルイス洋一 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 Reliability estimation of vehicle localization result |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 赤井直紀 モラレスルイス洋一 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 Mobile robot localization considering class of sensor observations |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 赤井直紀 モラレスルイス洋一 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 Toward localization-based automated driving in highly dynamic environments: Comparison and discussion of observation models |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 赤井直紀 モラレスルイス洋一 平山高嗣 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 自車両位置認識結果の信頼度推定 |
| 3. 学会等名 自動車技術会秋季大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 赤井直紀 モラレスルイス洋一 平山高嗣 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 観測物体のクラスを考慮した自己位置推定 |
| 3. 学会等名 ロボティクスシンポジア |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Naoki Akai, Shota Matsubayashi, Kazuhisa Miwa, Takatsugu Hirayama, and Hiroshi Murase |
| 2. 発表標題 Navigation style classification using persistent homology |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration (招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Naoki Akai, Koki Yasui, Kazuya Arashi, Kane Saliou, Daisuke Tsubakino, and Susumu Hara |
| 2. 発表標題 Bayesian filtering fusion of optimization-based monocular visual localization and autonomous quadcopter navigation |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration (招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kazuya Arashi, Naoki Akai, Kane Saliou, and Susumu Hara |
| 2. 発表標題 Obstacle avoidance with zigzag tentacles for multirotor UAVs |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration (招待講演) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Naoki Akai |
| 2. 発表標題 SLAMER: Simultaneous localization and map-assisted environment recognition |
| 3. 学会等名 Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (招待講演) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 赤井直紀, 平山高嗣, 村瀬洋 |
| 2. 発表標題 自己位置推定におけるセマンティクスの確率的活用 |
| 3. 学会等名 ROBOMECH (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 嵐和也, 赤井直紀, 安井浩毅, サリューカン, 原進 |
| 2. 発表標題 触手を模した経路選択およびバックステッピングMPCを用いたクワッドコプタのための障害物回避の実装 |
| 3. 学会等名 ROBOMECH (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 赤井直紀, 嵐和也, 原進 |
| 2. 発表標題 階層化最適制御を用いたクアッドコプタのフォーメーションフライトの検証 |
| 3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会概要集 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 赤井直紀 |
| 2. 発表標題 信頼可能な自己位置推定実現のためのアプローチ |
| 3. 学会等名 自動制御連合講演会 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 赤井直紀 | 4. 発行年 2022年 |
| 2. 出版社 コロナ社 | 5. 総ページ数 174 |
| 3. 書名 LiDARを用いた高度自己位置推定システム - 移動ロボットのための自己位置推定の高性能化とその実装例 - | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

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 |
|---------|---------|
| | |