

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02098

研究課題名(和文) 動的環境の実時間SLAMの実現

研究課題名(英文) Real-time SLAM for Dynamic Environments

研究代表者

野中 謙一郎 (Nonaka, Kenichiro)

東京都市大学・理工学部・教授

研究者番号：30298012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,900,000円

研究成果の概要(和文)：この研究では、動的な移動体がある環境における自己位置と地図の同時推定(SLAM)の研究に取り組みました。SLAMは移動ロボットや自動運転車で一般的に使用される手法ですが、従来の手法の多くは移動体の影響を受けていました。本研究では、モデルに移動物体を明示的に取り込み、静的物体と移動物体の両方を推定する新しいSLAMの構築に取り組みました。移動体を識別せずに地図が崩れないようにするために Moving Horizon Estimation (MHE)を導入し、地図のロバスト性を向上させています。加えて特異環境でのSLAMの精度向上にも取り組みました。それらは実際の環境で有効性を確認しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SLAMは地図生成の手法として広く使われていますが、一般的に建物や壁など静的な物体が対象でした。一方で移動体が含まれる場合は、静的物体と移動体の情報を分けて、別々に推定することが一般的でした。本研究では Moving Horizon Estimation(MHE)を用いることで、動的物体を扱うモデルとそれに対応した評価関数を導入しました。これにより、動きのある物体が含まれた環境でも、移動物体の抽出などの処理を施すことなく、地図を生成し、移動物体を追跡する新しいSLAMの基礎を構築しました。これに加えて、遮蔽の生じる移動体の追跡や特異環境での推定などの成果もあげることができました。

研究成果の概要(英文)：This research investigated simultaneous localization and mapping (SLAM) for environments with dynamically moving objects. Although SLAM has become a commonly used method for mobile robots and self-driving vehicles, the conventional methods were sensitive to variation due to the moving objects. In this research, we built a novel SLAM that explicitly deals with moving objects in its model to estimate a map of both static and moving objects. To suppress the corruption of the map due to the assumption that it does not identify the moving objects, we introduced a moving horizon estimation (MHE) to devise an objective function that enhances the robustness of the map. In addition, a robust SLAM in singular environments was proposed. Finally, the simulation and experimental results show that the method generates a map in the real environment.

研究分野：制御工学

キーワード：SLAM MHE 実時間最適化 動的環境 モデル予測制御 物体追跡

## 1. 研究開始当初の背景

移動ロボットや自動運転車など自立移動ビークルの実用化が進められています。その実現のための重要な技術として、車体に搭載した LiDAR やカメラなどのセンサによって周囲の建物や地形などを計測して地図を作りつつ、自己位置を計測する SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) が広く用いられるようになりました。一方で、従来の SLAM の多くの手法は、周囲の環境が時間変化しない静的なものと仮定しています。このため周囲に移動体が存在する環境では、センサで計測した情報から動的な移動体のものを抽出して静的な周囲環境の情報から分離し、静的な環境に対する SLAM を行うとともに、移動体は別の手法によって移動体の位置などを推定することが主流でした。

しかしこの方法では、移動体の情報の抽出に失敗すると、静的な環境地図や自己位置の推定精度を悪化させる可能性があります。移動ロボットが人の活動空間に混在し、自動運転車が市街地を走行するなど、GNSS(Global Navigation Satellite System)の性能が劣化し、周囲に移動体が多数存在する現実的な都市環境では、この点が問題となります。

## 2. 研究の目的

本研究では、移動体が含まれた環境においても頑強に動作する SLAM を実現して、周囲の静的な環境地図と自己位置推定を行えるようにすると同時に、周囲の移動体の位置や速度なども同一のプログラムで推定できる新しい SLAM を実現することを目的とします。特に周囲の静的な環境地図と動的な移動体の判別処理を行わずに、時変の地図として扱える SLAM を構築することに取り組みます。これによって、移動体の判別の失敗による静的な環境の地図や自己位置推定精度の劣化を抑制することが期待できます。そして移動体を含めた時変の地図を生成することによって、自立移動ビークルの正確な移動とともに、安全な障害物回避や最適な経路生成を実現することが期待できます。

さらに SLAM を頑強にするためには、遮蔽などが発生する環境においても移動体の特徴点を精度よく追跡する手法や、特に歩行者の形状をとらえて位置と速度だけでなく方向も含めて推定する手法、特異環境においても頑強な SLAM を実現する手法、GNSS に外れ値が加わる場合でもその影響を抑制する手法、などを開発する必要があります。

## 3. 研究の方法

本研究では、静的な環境と動的な移動体を統一して扱うことができる環境の数値モデルの構築と、それに基づいた実時間 SLAM の開発に取り組みます。センサはロボットから自動車まで広く用いられており周囲の明度の影響を受けない LiDAR(Light Detection And Ranging)を想定します。LiDAR の計測した点群データから得られるのは、周囲の照射点の相対的な座標情報のみであり、それらが構造物などの静的な物体のものか、移動体のものであるかはデータのみからは判別することができません。それらの点群データを環境の数値モデルの出力として位置づけ、予測誤差を用いたベイズ推定により修正することを試みます。

さらに、静的な環境と動的な移動体を区別しないことにより、静的な環境が低い推定速度を生じてドリフトすることが予想されるので、それを抑制することが必要になります。この問題を解決するために、評価関数を柔軟に設計可能な数値最適化による最尤推定手法である Moving Horizon Estimation (MHE) を用いて、静的環境の推定値にドリフトを生じることを抑制する評価関数の導入に取り組みます。

一般に MHE は計算負荷が高くなるので、それを実時間実行可能なレベルまで高速化するために、効率的な並列計算の実装に取り組みます。それに関連する手法として、遮蔽に対しては人工ポテンシャル場を用いたデータ結合手法により組み合わせ問題の数値最適化による解決を試みます。特徴点の追跡では確率的なデータ結合手法に基づいた Probabilistic Data Association Filter(PDAF)の適用を検討します。歩行者の形状を考慮した推定では、Random Sample Consensus (RANSAC)により腕や脚の揺動の影響を抑制することを試みます。特異環境では移動体の運動モデルを用いて情報量の少ない運動に対する推定精度の改善を図ります。GNSS に外れ値が加わる環境では、MHE のホライズンと制約を用いて推定精度の劣化を抑制します。

## 4. 研究成果

以下では、本研究の成果をテーマごとに分けて説明します。

### (1) 静的な環境と動的な移動体を含んだ環境における SLAM

LiDAR で計測した 2 次元点群で計測した動的に移動する線分で囲まれた環境において、動的な移動体モデルを想定した MHE の導入により、線分地図と自己位置を同時に推定する手法を開発しました (石川ら, MSCS2021)。この手法では環境は動的なものと仮定しているために、推定値にドリフトを生じる可能性があります。そこで、MHE の評価関数に速度抑制をする仕組みを導入することによって、静的な環境地図のドリフトの抑制 (Haziq et al., SICE2022) を図り、静的な環境と動的な移動体を統一的な SLAM の枠組みに収めて、それらを推定することに成功しました。

MHE は数値最適化による推定手法なので、柔軟な評価関数を導入できる一方で、計算時間が増加します。この点を考慮した実時間計算を実現するために、移動体の状態の幾何学的関係を用いた変数消去に加えて、並列化計算による高速化を図る手法 (Haziq et al., AROB2023, Pan et al., SICE2022) を提案しました。これにより、静的な環境と動的な移動体が混在する環境において高精度な SLAM を実現しました。これらの成果によって、自己位置推定と静的環境地図の推定だけでなく、移動体の位置・速度の推定を同時に実現する基礎的な手法を構築することができたと考えています。さらに LiDAR を搭載した実験車両による性能の検証結果については、今後論文発表すべく準備を進めています。

### (2) PDAF によるデータ結合を用いた MHE による物体追跡

移動体の追跡において、PDAF によるデータ結合を MHE に導入して、特徴点のイノベーションに尤度を導入した評価を行うことができる手法を提案しました (Kikuchi et al., SII2020)。その結果をモーションキャプチャシステムの計測に応用して有効性を検証しました (菊池ら, MSCS2020)。さらに、システムノイズに制約を想定することにより、移動体の駆動方向の制約を推定に反映することに成功しました (Kikuchi et al., Journal of Robotics and Mechatronics, 2020)。この手法により特徴点を確率的に追跡する手法を MHE に組み込むことが可能になりました。(1)における線分の端点の追跡計算では、PDAF の手法を導入して離散的な LiDAR の点群を考慮した端点の尤度計算に応用しています。

### (3) 遮蔽に対して頑強なデータ結合

特徴点の一部が遮蔽された場合にも、頑強にデータ結合して物体追跡を可能にするために、観測値に対して人工ポテンシャル場を設定して、遮蔽がある場合の推定値に基づいたデータ結合を、連続的な勾配計算によって実現する手法を提案しました (Abe et al., IFAC-WC2020)。

### (4) GNSS に外れ値が加わる環境における推定精度の改善

地図上のノード値を制約とした数値最適化を導入した MHE によって、GNSS の外れ値の影響を抑制することに成功しました (藤間ら, MSCS2021)。さらに、PDAF を用いて外れ値を除去する手法を適用して、市街地と郊外の両方において頑強な自己位置推定を行える手法を構築し、自動車の走行を想定した数値検証を行いました (Ochiai et al., CCTA2022)。

### (5) 特異環境における SLAM の精度を改善する手法

長い廊下など特定の方向に対して特徴点が極端に少ない環境において、オドメトリと情報量の多い方向のセンサ情報を用いることによって、特徴点が少ない方向にも精度を改善する仕組み (和田ら, MSCS 2021) を構築し、その性能を車両型ロボットにおいて数値的に検証して有効性を確認しました (Sekiguchi et al., Artificial Life and Robotics, 2022)。

### (6) 歩行者の形状を考慮した位置・速度推定

LiDAR で歩行者を計測しようとする時、照射点は体の LiDAR 側の面となるので、歩行者の中心位置からずれが生じます。この問題を解決するために、人の形状を楕円近似したモデルに RANSAC を適用して、腕や脚の揺動により楕円からずれる点群を除去した上でベイズ推定する手法を構築しました (Matsuyama ら, SICE2022)。さらに LiDAR による実時間計測を歩行者に対して行った結果を、一般的に用いられる Bounding box や円近似の場合と比較して、高い精度と頑強性を有することを確認しました (松山ら, MSCS2023)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Tomoya Kikuchi, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi	4. 巻 32-3
2. 論文標題 Moving Horizon Estimation with Probabilistic Data Association for Object Tracking Considering System Noise Constraint	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 537-547
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2020.p0537	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 Sekiguchi Kazuma, Wada Sota, Nonaka Kenichiro	4. 巻 28
2. 論文標題 Active sensing control improving SLAM accuracy for a vehicle robot	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 208 ~ 216
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-022-00822-2	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Ryoya Abe, Tomoya Kikuchi, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi
2. 発表標題 Robust Object Tracking with Continuous Data Association based on Artificial Potential Moving Horizon Estimation
3. 学会等名 IFAC 2020 WORLD CONGRESS (IFAC-WC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤間 隆生, 野中 謙一郎, 関口 和真
2. 発表標題 地図上のノード位置を制約とするMoving Horizon Estimationによる自動車位置の補正
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (MSCS 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川 恭匡,野中 謙一郎,関口 和真
2. 発表標題 自己位置と任意長の動的な線分の同時推定の実点群による検証
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム(MSCS 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田 聡太,関口 和真,野中 謙一郎
2. 発表標題 測域センサにおける特異環境のSLAM精度を向上させる車両モデルの運動制御
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム(MSCS 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoya Kikuchi, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi
2. 発表標題 Visual Object Tracking by Moving Horizon Estimation with Probabilistic Data Association
3. 学会等名 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊池智哉, 野中謙一郎, 関口和真
2. 発表標題 モーションキャプチャにおける確率的対応付けを有するMHEによる移動物体追跡
3. 学会等名 第7回制御部門マルチシンポジウム (MSCS 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Ochiai, Fuguo Xu, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi
2. 発表標題 Robust Localization in Both Urban and Rural Environments for Fusion of LiDAR-SLAM, GNSS, and Odometry
3. 学会等名 The 2022 Conference on Control Technology and Applications (CCTA 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masato Matsuyama, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi
2. 発表標題 Pedestrian Tracking by Ellipse Approximation of Point Cloud Utilizing Random Sample Consensus
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (SICE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Qiong Pan, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi
2. 発表標題 A Plane-Based EKF-SLAM with Reduced Computation Cost
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (SICE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Haziq Muhammad, Yasumasa Ishikawa, Kenichiro Nonaka, Kazuma Sekiguchi
2. 発表標題 2D SLAM for Dynamic Environments with Dynamic Line Segment
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (SICE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松山優人, 関口和真, 野中謙一郎
2. 発表標題 LiDARによる形状を考慮した歩行者追跡
3. 学会等名 第10回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (MSCS 2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Haziq Muhammad, Yasumasa Ishikawa, Kazuma Sekiguchi, Kenichiro Nonaka
2. 発表標題 Online Simultaneous Localization and Mapping with Parallelization for Dynamic Line Segments based on Moving Horizon Estimation
3. 学会等名 The Twenty-Eighth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2023 (AROB 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	関口 和真  (Sekiguchi Kazuma)  (80593558)	東京都市大学・理工学部・准教授   (32678)	
研究分担者	大貝 晴俊  (Ogai Harutoshi)  (80367169)	早稲田大学・理工学術院 (情報生産システム研究科・センター)・教授   (32689)	

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
---------	---------