

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04447

研究課題名(和文)分散協調型非線形システム状態推定アルゴリズムとそのSLAM問題への適用

研究課題名(英文) Distributed cooperative state estimation algorithms of nonlinear systems and their application to SLAM problems

研究代表者

鷹羽 浄嗣 (Takaba, Kiyotsugu)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：30236343

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)：本研究は、センサネットワークにおける分散状態推定問題について検討したものである。分散型カルマンフィルタの従来法では推定値の最適性は保証されておらず、推定精度が著しく劣化する場合がある。そこで我々は、ネットワークが環状トポロジーの場合に、ベイズ推定の考え方に基づいて最適推定値を与える新しい分散型カルマンフィルタを導出した。また、これを非線形システムへ拡張して分散型unscentedカルマンフィルタ(UKF)を提案した。さらに、この分散型UKFをマルチロボットSLAM問題に適用し、実データを用いた数値実験により提案法の有効性・実用可能性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

センサネットワークやSLAM(移動ロボットの位置推定と環境把握の同時実行)の技術は現代社会に深く浸透しようとしている。本研究は、これらの技術の基礎となる分散協調型状態推定問題を研究したものであり、非線形システムに対する分散型最適推定アルゴリズムを提案している。このアルゴリズムの完成度を上げることで、より多様なセンサネットワークやSLAMのシステムに対して高精度な計測・情報抽出を実現することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：This research is concerned with the distributed state estimation problem in sensor networks. The conventional distributed Kalman filter does not guarantee the optimality of the state estimates, and the estimation accuracy may be significantly degraded in some cases. Therefore, in the case of ring networks, we employed the Bayesian inference to derive a new distributed Kalman filter that provides the optimal estimates. We also extended this to nonlinear systems and proposed a distributed version of the unscented Kalman filter (UKF). Furthermore, we applied this distributed UKF to the multi-robot SLAM problem and verified its effectiveness and practical applicability through numerical experiments with real data.

研究分野：制御工学

キーワード：分散協調状態推定 ベイズ推定 カルマンフィルタ SLAM

1. 研究開始当初の背景

小型高性能なセンサおよびマイクロプロセッサの普及により,センサネットワークや Internet of Things (IoT)に関連する技術が急速に発展している.これらの技術では,各センサノードから得られるデータを速やかに収集し,適切な統計的処理を施す事によって有用な情報を得ることが重要である.

本研究では,センサネットワークにおける信号処理の基本的問題として,各ノードで得られる観測値から対象システムの内部状態を推定する分散状態推定問題を研究した.

分散状態推定問題には,大別して2つの枠組みがある.すなわち,基地局を設置して,すべてのノードの情報を収集し,それらに基づいて状態推定値を計算する情報融合型状態推定(Sun(中国)など)と,基地局を設置せずにノード間の相互通信を通じて得られる情報に基づいて各ノードがそれぞれ状態推定値を計算する合意協調型状態推定(O-Saber(米国), Batistelli(イタリア)など)である.本研究では,後者の合意協調型状態推定のアルゴリズムを検討した.

合意協調型状態推定は,マルチエージェント系の合意制御の考え方に基づき,各ノードにおける状態推定器に状態推定値の合意制御項を付加する事により,ネットワーク全体で均一な推定精度を保証する枠組みである.線形システムに対するカルマンフィルタに基づくアプローチでは,多くの先行研究は,既存のカルマンフィルタに合意制御項を付加したものであって,最適性が保証されているわけではなく,実際の推定精度や安定性の解析は不十分であった.非線形システムに対しては,拡張カルマンフィルタ(EKF)を用いた分散協調型推定アルゴリズムを作ることが可能であるが,EKFは線形近似を含むため,非線形性の強いシステムにはEKFよりも粒子フィルタや Unscented カルマンフィルタ(UKF)が有効である事が良く知られている.特に移動ロボットが環境地図とロボットの位置を同時に推定する SLAM(Simultaneous Localization And Mapping)問題では,ヒト,移動体や障害物などにより一時的にセンサに対して推定対象が遮蔽される状況において,粒子フィルタの推定精度はEKFよりもロバストである.粒子フィルタや UKF といった非線形フィルタの分散協調型アルゴリズムに関する報告は,研究開始当初は研究代表者の知る限りほとんど無かった.

2. 研究の目的

本研究では,非線形システムを対象とした高精度・高効率な合意協調型最適状態推定アルゴリズムの提案を目的とする.上述のように,粒子フィルタや UKF は SLAM をはじめとする多くの非線形推定問題において有用であるにも関わらず,その分散協調型アルゴリズムはまだ十分に研究されていなかった.この点において本研究の独自性・新規性がある.

さらに,提案アルゴリズムをマルチロボット SLAM 問題に適用し,その実用可能性を検証する.特に,ノード(ロボット)間の情報伝達ネットワークの構造によっては,1つのノードでの推定精度劣化が他のノードの推定精度に大きく波及することが往々にしてある.このような状況に対処するため,ネットワークの構造に着目した推定誤差の解析に基づき,ネットワーク構造の変化や観測値の欠落に対してロバストな分散協調型

推定アルゴリズムの開発を試みる。先行研究において、ネットワーク構造が推定精度に与える影響に関する研究報告は見当たらない。

3. 研究の方法

本研究では、非線形システムを対象とするセンサネットワークにおける高精度・高効率な分散協調型状態推定アルゴリズムを提案し、その有用性をマルチロボット SLAM 問題への応用を通じて検証する。

- (1) まず、線形システムを対象として、従来法による分散型カルマンフィルタの推定精度などを検討し問題点を明らかにする。その上で、ベイズ推定に基づいて最適性を保証した新しい分散型カルマンフィルタのアルゴリズムを導出する。
- (2) 非線形システムを対象として、Unscentedカルマンフィルタ(UKF)に基づく分散協調型状態推定アルゴリズムを開発する。UKFでは σ ポイントの生成の分散処理化を行うことによって分散協調型状態推定アルゴリズムを導出する。
- (3) 適当な観測雑音・プロセス雑音の仮定(ガウス白色性など)下での2.で求めた分散協調型推定アルゴリズムと分散協調型拡張カルマンフィルタ(EKF)との推定精度・ロバスト性などについての比較を行う。
- (4) マルチロボットSLAMへ提案法を適用し、実機実験により、その有用性、実用可能性を検証する。
実験装置・設備については、現有設備・装置に加えて本研究の科研費でも追加購入して実験を実施した。
- (5) 3.での検討結果を踏まえて、ネットワーク構造の変化や観測値情報の劣化に対してロバストな分散協調型推定アルゴリズムを検討する。また、提案アルゴリズムの高速化・効率化についても検討する。特に、単ロボットSLAM問題では、問題の構造に着目してEKFと粒子フィルタを組合わせたFastSLAMアルゴリズムが普及している。マルチロボットSLAMでも同様の観点からアルゴリズムの高速化を検討する。

4. 研究成果

- (1) Unscentedカルマンフィルタ(UKF)などの非線形カルマンフィルタの基礎にあるベイズ推定の枠組みに、従来法で用いられている合意制御を直接的に組み合わせることは困難であると判断し、まず、線形システムに対する分散協調カルマンフィルタについて検討した。
 - ・観測値伝搬型分散カルマンフィルタ(各センサノードが遅延を許容してすべてのノードから集めた観測値を用いて状態推定する手法)との従来法の合意型分散カルマンフィルタとの比較において、環状ネットワークの場合に従来法の推定精度が著しく劣化することを確認した。これにより、ネットワークの構造・規模によっては、従来法の推定精度が著しく劣化することが判明した。(学会発表済)
 - ・通信による遅延を鑑みれば、上述の観測値伝搬型分散カルマンフィルタが最も良い推定精度を与えるが、ノード数が多い場合に計算量の増加が問題となる。そこで、環状ネットワークの場合に対して、観測値伝搬の代わりに隣接ノードの状態推定値を用いる新しい分散協調カルマンフィルタをベイズ推定の考え方に基づいて提案した。提案アルゴリズムの特徴は、遠いノードからいくつものノードを経由して観測値を集める代わりに隣接ノードの状態推定値の現在と過去の値を利用する事である。(学会発表済、雑誌論文発刊済)
- (2) 前項の線形システムに対する結果を非線形システムに拡張した。具体的には、環状ネットワークの場合に対して新しい合意協調型 Unscented カルマンフィルタを導出し、レーダーアレイによる追尾フィルタのシミュレーションでその有効性を検証

- した (学会発表済).
- (3) 提案した合意協調型 UKF をマルチロボット SLAM 問題に適用した . ロボット間通信は環状ネットワークを介して行うものとして , LiDAR を搭載した 3 台の移動ロボットを走行させて得た実データに対して提案アルゴリズムを適用して , その有効性を確認した (学会発表済).
 - (4) 残された課題は , 以下の通りである . これらについては , 本課題の終了後も引き続き検討を重ねる予定である .
 - ・環状ネットワークだけでなくより一般的なトポロジーのネットワークに対して提案アルゴリズムを拡張することを検討したが , 現時点までに結果を出すことはできなかった .
 - ・UKF だけでなく粒子フィルタなどその他の非線形状態推定アルゴリズムの分散型アルゴリズムの開発には未着手であった .
 - (5) 分散カルマンフィルタおよびマルチロボット SLAM に関連するその他の成果は以下の通りである .
 - ・後退ホライゾン推定と高速非線形最適化計算手法 C/GMRES を用いたマルチロボット SLAM の手法を開発し , 実データを用いた数値実験によりその有効性を確認した (学会発表済).
 - ・SLAM 情報を利用した複数ロボットによる迷路探索の効率的な探索アルゴリズムを開発し , シミュレーションによりその有効性を確認した . (学会発表済)
 - ・一般のトポロジーの場合においては , マルチレート型合意協調カルマンフィルタに対して , 合意誤差による推定値バイアスの解析を行い , 合意誤差を補償した分散型カルマンフィルタアルゴリズムを導出した . (学会発表済)

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 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tsuji Akihiro, Ohashi Asuka, Takaba Kiyotsugu	4. 巻 18
2. 論文標題 A Bayesian approach to distributed optimal filtering over a ring network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement: Sensors	6. 最初と最後の頁 100223 ~ 100223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.measen.2021.100223	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 Y. Kishimoto, K. Takaba, A. Ohashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Moving horizon multi-robot SLAM based on C/GMRES method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 International Conference on Advanced Mechatronic Systems	6. 最初と最後の頁 22-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICAMechS.2019.8861681	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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 鷹羽浄嗣, 辻晃弘, 大橋あすか
2. 発表標題 環状ネットワーク上の分散型Unscentedカルマンフィルタ
3. 学会等名 第3回測位技術振興会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎颯太, 鷹羽浄嗣
2. 発表標題 環状ネットワークにおける分散協調型Unscentedカルマンフィルタを用いたマルチロボットSLAM
3. 学会等名 第4回 測位技術振興会 研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤祐樹, 鷹羽浄嗣
2. 発表標題 合意誤差に基づく分散型カルマンフィルタの推定誤差解析
3. 学会等名 第67回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Tsuji, A. Ohashi, K. Takaba
2. 発表標題 A Bayesian approach to disitributed optimal filtering over a ring network
3. 学会等名 IMEKO2021 World Congress (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻晃弘, 鷹羽浄嗣, 大橋あすか
2. 発表標題 分散型カルマンフィルタにおける情報伝達構造に関する一考察
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻晃弘, 大橋あすか, 鷹羽浄嗣
2. 発表標題 環状ネットワークにおける分散型カルマンフィルタ
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本航, 鷹羽浄嗣
2. 発表標題 SLAM情報を用いた複数ロボットによる効率的迷路探索法
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019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	大橋 あすか (Ohashi Asuka) (50782166)	香川高等専門学校・一般教育科・助教 (56203)	

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