

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04202

研究課題名(和文) 確率最適制御と非線形推論の統一解法による出力FB型非線形確率モデル予測制御の開発

研究課題名(英文) Development of output feedback nonlinear stochastic MPC by a unified solution method of stochastic optimal control and nonlinear inference

研究代表者

佐藤 訓志 (Sato, Satoshi)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60533643

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)：システムの非線形性や確率的な不確かさを表現できる非線形確率システムを対象とし、不確かさを考慮して評価関数の期待値を最小化する最適制御入力を与える確率最適制御法と、観測雑音を伴う観測出力からシステムの全状態の推定値を得る非線形フィルタに対する統一解法を開発を行い、非線形フィルタによる状態推定値に基づき最適FB入力を求める、出力フィードバック型確率最適制御の解法を開発した。実時間最適化において実装上重要な計算速度について、並列化による計算速度高速化手法の開発を行い、新たに製作したマルチコプタ実験機および3軸姿勢制御実験機を用いて確率外乱下における最適位置・姿勢制御に関する実機検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義や社会的意義は以下のようにまとめられる。1.これまで非線形確率システムに対する最適制御問題とフィルタ問題は、それぞれの十分な解法さえなかったが、本研究により両者の統一解法を開発した。2.実時間最適化の実装において重要な高速計算について、並列計算を用いた計算法も与えた。3.姿勢運動による非線形性、気象や通信による不確定性に対する性能と頑健性の向上が必須課題となっている小型無人ヘリコプタに対する最適位置・姿勢制御法を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we consider a nonlinear stochastic system that properly models the nonlinearity and stochastic uncertainty of the system. We have developed a unified solution method for stochastic optimal control and nonlinear filter. Here, the former method gives the optimal control input that minimizes the expectation of a given cost function under stochastic uncertainty, while the latter method provides an estimate of the state of the system from the measurement output with sensor noise. We have also presented a fast computational scheme using parallelization for the proposed method, which is important for the implementation of real-time optimization. Then, we have conducted experimental verification of the optimal position and attitude control under stochastic disturbances using newly developed quadcopter testbed and 3-axis attitude control equipment.

研究分野：制御工学

キーワード：非線形制御 確率制御 最適制御 非線形推定 クアッドコプタ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の制御要求の多様化・高度化により、人間との相互作用や動的に変化する未知環境など、不確定な変動を考慮したロボットの自律的な判断や最適な行動の獲得の重要性が増している。このような背景の下で、申請者はシステムの非線形性や確率的な不確かさを適切に表現できる非線形確率システムを対象とし、不確かさを厳密に考慮して評価関数の期待値を最小化する最適制御入力を与える確率最適制御に関する解法を開発してきた。一方、システムの観測出力は、一般に状態の一部であり観測雑音も伴うため、状態の推定値を得る必要がある。この推定値が満たす方程式は求解が困難な非線形確率偏微分方程式であるが、ある非線形変換によりこの非線形確率偏微分方程式を申請者が開発してきた確率最適制御の解法が適用可能な非線形偏微分方程式に帰着されることを見出した。これを動機として、非線形確率最適制御と非線形フィルタに対する統一的解法とそれに基づく非線形確率モデル予測制御に対する新しい解法の開発を目指す。

2. 研究の目的

上述した背景の下で、本研究では、課題解決により得られる理論的寄与だけでなく応用的寄与も考慮して以下の三つの研究目標を設定した。

観測出力から非線形フィルタによる状態推定値に基づき最適FB入力を求める、出力フィードバック型確率最適制御問題の解法の構築

有限評価区間確率最適制御から、評価区間を後退させながらサンプル時刻毎に実時間で解く非線形確率モデル予測制御への拡張

実装上重要な実時間最適化の計算速度について、並列化による計算速度高速化手法の開発、および非線形性、未知環境、通信の不確実性を伴う小型無人ヘリコプタの最適飛行制御による実機検証

これまで非線形確率システムに対する最適制御と推定問題は、それぞれの十分な解法さえなかったが、本課題の遂行により両者の統一的な解法を与えることが可能となる。本手法は推定と制御を連成し、これまでほとんど研究が成されていない出力FB型非線形確率最適制御問題の解法を与えることが期待できる。さらに、構築した枠組みの実問題への適用を考え、近年実用化へ向けて気象や人間の生活圏への接近などに起因する不規則外乱に対する性能と頑健性の向上が必須課題となっている小型無人ヘリコプタに対する最適飛行制御法への貢献も目的とする。

3. 研究の方法

上述の目標に対する研究の方法として、一般の非線形システムに対する非線形フィルタの導出は応用上の制約が大きいため、まずは非線形システムのクラスを適切に限定し、実装可能な非線形フィルタの導出を目指す。本研究では目標の小型無人ヘリコプタへの応用も見据え、剛体の位置・姿勢推定においても非常に有用な3次元特殊ユークリッド群SE(3)に着目し、確率微分方程式で記述されるSE(3)上の確率キネマティクス方程式を導出し、システム・観測ノイズおよび未知バイアス存在下における非線形フィルタを新たに導出し、さらに確率システム理論に基づく誤差システムの安定性解析を行う。つぎに、より一般の非線形システムに対する最適制御と推定の連成の問題を、確率最適制御と非線形フィルタの統一的解法を利用することで解決する。申請者のこれまでの結果では、推定問題に経路積分法を適用した際に現れるサンプル生成に

おける確率測度と、確率最適制御に経路積分法を適用した際の確率測度は異なるため、重点サンプリングというサンプルの確率測度を変換できる手法を用いて推定と確率最適制御に関するサンプル生成の確率測度を変換し、連成の影響を同一確率測度の条件付き確率の枠組みで考慮することでこの問題の解決を目指す。

目標 に対する研究の方法として、これまで申請者が開発してきた確率最適制御における問題設定では評価区間が有限区間で固定されたものだったが、この評価区間を現時刻が進むのに合わせて後退させながら有限時間確率最適制御問題を繰り返し解くことができるように解法の拡張を行う。

目標 の実時間最適化における計算速度高速化の方法として、ハード・ソフトの両面からのアプローチを行う。経路積分法に基づく解法の特徴として、非線形確率最適制御問題に付随する偏微分方程式の解またはその偏導関数を、サンプリング手法により任意の精度で計算できる。各サンプルの生成と評価は並列化が可能であることから、並列計算の方法として代表的なマルチコア CPU と GPGPU を利用した並列化計算による実装を行い、両方の実装法による効果を比較検証する。つぎに、実機検証を予定している小型無人ヘリコプタの飛行制御についてクアッドコプタ試験機の作成を行う。申請者はこれまでに不規則気流の影響を考慮した小型ヘリコプタの確率モデルの構築と、有界安定化制御を達成しており、クアッドコプタ製作の経験もあるため、実験機製作に関する基礎準備はできている。ただし、過去に製作した実験機は浮動小数点演算ユニット(FPU)を持たない 8bit マイコンを用いていたため、姿勢制御の計算速度が遅い問題があった。そこで、本研究では FPU 搭載の 32bit マイコンに置き換え、実験機を改良する。改良した実験機に目標 , で達成予定である提案手法を適用することで実機検証を行い、目標 を達成する。

4. 研究成果

目標 においては、まず剛体の姿勢を表現できる 3 次元特殊直交群 $SO(3)$ に着目し、確率微分方程式で記述される $SO(3)$ 上の確率キネマティクス方程式を導出し、システム・観測ノイズおよび未知バイアス存在下における非線形姿勢推定フィルタを新たに導出した。そして、確率システム理論に基づく推定誤差システムの安定性解析を行った。得られた定理により、二乗平均誤差の上限を定量的に与えることが可能となった。さらに、この結果を剛体の姿勢だけでなく位置も同時に扱うことが可能な $SE(3)$ に拡張することができた。また、経路積分法に基づく確率最適制御の最適制御入力の算出において、重点サンプリング法によるサンプルの確率測度の変換を組み込んだ新たな導出式を得ることができ、パーティクルフィルタによる状態推定を組み合わせた出力フィードバック型確率モデル予測制御法によるクアッドコプタの最適位置・姿勢制御における有用性を数値シミュレーションにより確認できた。

目標 について、有限評価区間が現時刻が進むのに合わせて後退させながら有限時間確率最適制御問題を繰り返し解くことができるように経路積分法に基づく解法の拡張を計画通り行うことができた。

目標 に関して、並列計算の実装としてマルチコア CPU を用いた方法および、GPGPU による並列化実装を行うために CUDA によるプログラム環境を構築し、経路積分法の解の算出において上記の並列計算が適用できるようにし、数値シミュレーションにおいて並列計算の有無による比較検証を行った。実機検証のためのクアッドコプタ試験機を製作し、試験機の基本的な飛行実験を行い、非線形フィルタと確率最適制御の実装準備を行った。しかし、その後の新型コロナウイルスの感染拡大により、グラウンドや体育館を借りた飛行実験を継続することが困難となった

ため、急遽研究室居室内で実験が可能な三次元剛体の3軸姿勢制御実験機を代替試験機として準備した。モデル予測制御に関する基礎実験として、既存研究の手法として知られる目標値整形機構つきモデル予測制御法を実装した3軸姿勢制御に関する実機実験を行った。また、目標で開発したSO(3)上の確率システムモデルに基づく、システム・観測ノイズおよび未知バイアス存在下における非線形姿勢フィルタの実装を行い、実機実験において確率解析結果の有効性と妥当性を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 S. Satoh and H. J. Kappen	4. 巻 -
2. 論文標題 Nonlinear stochastic optimal control with input saturation constraints based on path integrals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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

1. 著者名 T. Nishishita, S. Satoh, and K. Yamada	4. 巻 -
2. 論文標題 Stochastic bounded stability in the three-body problem with probabilistic uncertainty using port-Hamiltonian representation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 A. Taniguchi, S. Satoh, and K. Yamada	4. 巻 43
2. 論文標題 Simultaneous learning optimization of Hamiltonian systems and trajectory tracking around an asteroid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Guidance, Control, and Dynamics	6. 最初と最後の頁 222-231
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.G004533	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 S. Satoh and K. Fujimoto	4. 巻 29
2. 論文標題 Iterative feedback tuning for Hamiltonian systems based on variational symmetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Robust and Nonlinear Control	6. 最初と最後の頁 5845-5865
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/rnc.4692	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 N. Tasaka, S. Satoh, T. Hatanaka and K. Yamada	4. 巻 -
2. 論文標題 Stochastic stabilization of rigid body motion of a spacecraft on SE(3)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00207179.2019.1637544	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 Satoh Satoshi, Fujimoto Kenji	4. 巻 23
2. 論文標題 Gait generation for a biped robot with knees and torso via trajectory learning and state-transition estimation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 489 ~ 497
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-018-0476-4	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18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 M. Ciavola, E. Capello, S. Satoh and K. Yamada
2. 発表標題 Comparison of SDA and MPC controllers of a CMG system for the singularity problem
3. 学会等名 SICE 2019 Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Satoh
2. 発表標題 Attitude estimation for a spacecraft based on stochastic control theory
3. 学会等名 SICE 2019 Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Satoh
2. 発表標題 Introduction to an iterative solution method for nonlinear stochastic optimal control problems
3. 学会等名 SICE 2019 Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Tasaka, S. Satoh and K. Yamada
2. 発表標題 Stochastic systems modeling and stabilization of the attitude of a spacecraft
3. 学会等名 the 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Nishishita, S. Satoh and K. Yamada
2. 発表標題 Stochastic bounded stability in the three-body problem with probabilistic uncertainty using port-Hamiltonian representation
3. 学会等名 the 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤訓志・福永修一・片山仁志
2. 発表標題 確率制御アプローチによるガウス過程回帰により表されたシステムの安定性解析
3. 学会等名 第7回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤訓志・関口和真
2. 発表標題 線形ドリフト・アフィン拡散確率システムの制御法に関する一考察
3. 学会等名 第7回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤訓志・片山仁志
2. 発表標題 近似モデルに基づく離散時間確率システムの準大域的実用確率漸近安定性の十分条件
3. 学会等名 第62回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤訓志・山田克彦
2. 発表標題 非線形確率制御を用いたフォーメーションフライト制御に関する一考察
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤訓志・福永修一・片山仁志
2. 発表標題 確率解析に基づくガウス過程回帰により表されたシステムの安定性解析
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

1. 発表者名 S. Satoh and K. Yamada
2. 発表標題 Spacecraft attitude estimation based on stochastic kinematics modeling on $SO(3)$
3. 学会等名 the 50th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Application (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Satoh, T. Tasaka and N. Wada
2. 発表標題 Bounded stability of stochastic mechanical port-Hamiltonian systems under both deterministic and stochastic disturbances
3. 学会等名 SICE 2018 Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤訓志
2. 発表標題 確率的な不確かさを含む連続時間システムのモデル化と制御 – 確率微分方程式と確率解析を使って –
3. 学会等名 日本機械学会東海学生会 第219回講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤訓志
2. 発表標題 確率システムモデルに基づく剛体姿勢の非線形推定
3. 学会等名 第6回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田坂俊郎・佐藤訓志・和田信敬
2. 発表標題 確定外乱と確率外乱が加わる確率ポート・ハミルトン系の確率有界安定化制御と2ロータヘリコプタへの応用
3. 学会等名 第27回 計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井内裕弥・佐藤訓志・和田信敬
2. 発表標題 重点サンプリングを用いた経路積分確率最適制御によるクアッドコプタの制御
3. 学会等名 第27回 計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤訓志・山田克彦
2. 発表標題 経路積分法に基づく非線形確率最適制御のフォーメーションフライト制御への適用
3. 学会等名 第28回アストロダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田坂直也・佐藤訓志・山田克彦
2. 発表標題 Eulerパラメータ表現に基づく宇宙機姿勢の確率システムによるモデル化と確率安定化
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

佐藤 訓志
http://www-space.mech.eng.osaka-u.ac.jp/satoh/index_ja.html
Satoshi Satoh
http://www-space.mech.eng.osaka-u.ac.jp/satoh/index.html

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			
オランダ	Radboud University Nijmegen			
イタリア	Politecnico di Torino	CNR-IEIIT		