

平成 30 年 4 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18089

研究課題名(和文)非線形確率システムに対する経路積分解析に基づく最適制御と推定の統一的解法の構築

研究課題名(英文)Development of a unified framework for optimal control and estimation of nonlinear stochastic systems based on path integral analysis

研究代表者

佐藤 訓志 (Sato, Satoshi)

大阪大学・工学研究科・講師

研究者番号：60533643

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):本研究ではまず、確率解析と統計学的サンプリング法に基づく新しい非線形確率最適制御問題の解法である反復型経路積分制御法を拡張することで、確率最適制御だけでなく、非線形フィルタ問題に対する解法を開発した。つぎに、非線形フィルタによるパラメータ推定により、非線形確率システムのモデル化の手法を検討した。これらにより、経路積分解析に基づく非線形確率最適制御、状態推定、確率システムのモデル化に対する統一的枠組みを提案した。さらに、構築した枠組みの実問題への適用を考え、気象という不規則外乱の考慮が不可欠な小型ヘリコプタを用いた実機検証により提案手法の効果を確認した。

研究成果の概要(英文): We have proposed an iterative solution method for nonlinear stochastic optimal control problems using stochastic analysis and statistical sampling. In this project, first, we have extended this method to a nonlinear filtering problem. Second, a modeling method for a nonlinear stochastic system has been investigated, which is based on the parameter identification with the nonlinear filtering method. Third, we have provided a unified framework for stochastic optimal control, state estimation and stochastic system modeling by the path integral analysis approach. Finally, we have performed experimental verification of the proposed method with small unmanned helicopters. Optimal flight trajectories for the helicopters taking probabilistic uncertainties into account have been obtained.

研究分野：制御工学

キーワード：確率制御 非線形制御 最適制御 小型ヘリコプタ

### 1. 研究開始当初の背景

申請者は確率解析・統計学的サンプリング・量子論における経路積分を用いた、新しい非線形確率最適制御問題の解法である反復型経路積分制御法を提案してきた。非線形確率最適制御問題とは、制御対象である非線形確率システムに伴う確率的不確かさを厳密に考慮して、与えられた評価関数の期待値を最小化する最適制御則を設計する問題である。この問題は、非線形二階の偏微分方程式である確率ハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式 (SHJB 方程式) の求解に帰着でき、提案法は反復規則に基づく逐次近似によりこの SHJB 方程式の解と最適制御則の確率表現を与えることができる。本手法は、この反復規則を拡張することで確率最適制御だけでなく、非線形フィルタ問題に付随する非線形フィルタ方程式へも適用できる可能性を見出した。これにより、非線形確率最適制御・状態推定・確率システムのモデル化の統一的枠組みを構築できる可能性が見えてきた。このことが本研究の動機である。

### 2. 研究の目的

上述の動機の下で、本研究では、まず反復型経路積分法の拡張理論を整備し、これを用いた非線形フィルタ問題の解法を開発する。これにより、経路積分解析に基づく非線形確率システムに対して、パラメータ推定 (モデル化)・状態推定・最適制御を包括的に扱える新しい枠組みの構築を目的とする。さらに、構築した枠組みの実問題への適用を考え、近年実用化が期待されながら気象という不規則外乱の影響を受けるため精密な制御が困難であった小型無人ヘリコプタの最適飛行制御法の確立も目指す。

申請者は、本課題達成のために以下の三段階の目標を設定した。

目標 反復型経路積分確率最適制御法の拡張理論の整備

目標 経路積分法による非線形フィルタ問題の解法の開発と、経路積分解析に基づくモデル化・推定・制御の統一的枠組みの構築

目標 確率的な不確かさを厳密に考慮した小型無人ヘリコプタの確率最適飛行制御法の確立

### 3. 研究の方法

はじめに目標 に対する研究の方法を述べる。これまでの反復型経路積分制御法では、評価区間として有限時間区間のみを対象としていたため、理論的な拡張の一つ目として、評価区間を無限時間区間とし、将来の不確かさを考慮した割引率を導入した割引率付き

無限時間区間確率最適制御問題を扱えるようにした。この問題に付随する SHJB 方程式は有限時間のそれと偏微分方程式の構造が異なり、定常性に起因して解の時間に関する偏導関数項がなく、割引率に起因する定数項が新たに表れる。そこでこれらの違いを考慮した反復規則を開発した。二つ目の理論的な拡張として、入力飽和を考慮した非線形確率最適制御の解法を与えた。入力飽和を考慮した非線形確率最適制御問題はこれまで先行研究においても解法は与えられていなかったため、確定システムに対して得られている知見を拡張することで、まずこの問題に付随する SHJB 方程式を新たに導出した。そして、得られた偏微分方程式を扱えるように反復規則を改良することで、入力飽和を厳密に満足する非線形確率最適制御の解法を得た。更に三つ目の拡張として、確率的な不確かさと確定外乱の両方を扱うことができる確率 H 制御問題に付随する確率ハミルトン・ヤコビ・アイザック方程式の解法も得た。

つぎに目標 に対する研究の方法を述べる。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、非線形フィルタにより状態の推定値を得る必要がある。誤差の二乗平均を最小とする推定値は、観測出力の条件付き確率密度関数により与えられる。この条件付き確率密度関数が満たすべき方程式がフィルタ方程式として明らかにされているものの、それは求解が困難な非線形確率偏微分方程式であった。しかしある非線形変換により、この非線形確率偏微分方程式は新しい変数に関する線形偏微分方程式に帰着されることが先行研究により見出されていた。そこで、申請者は更にもう一段新たな変換を施すことで、前述の経路積分法が適用できるクラスの偏微分方程式に変換できることを示した。この理論を精緻化することで、経路積分法に基づく非線形フィルタ問題の解法を提案した。これにより観測出力から状態推定が可能となり、さらにモデル化の段階においては、実験データから確率システムモデルを構築するためのモデルパラメータの同定手法としても利用できる。これにより、モデル化・推定・最適制御を経路積分解析に基づき統一的に扱うことができる。

さいごに目標 に対する研究の方法を述べる。小型無人ヘリコプタはダイナミクスの非線形性、未知環境や通信における確率的な不確かさを本質的に含むシステムである。本研究では、小型無人ヘリコプタを非線形確率システムとしてモデル化し、これに提案法を適用することで、確率的な不確かさを適切に考慮した最適な飛行制御による更なる性能向上と頑健性の獲得を数値シミュレーションと実機実験により検証した。実機検証のために、申請者が所属していた研究室が所有していたツインロータヘリコプタ実験機を使用し、

さらにクアッドコプタの試験機を新たに製作した。近年ホビー用の小型クアッドコプタが製品として多数販売されているが、制御ロジックの改変が困難なものが多いことと、実験中の墜落による故障も想定されるため、入手性の良い部品の選定の自由度などを考慮して、製作することとした。ヘリコプタのダイナミクスモデルをドリフトと拡散ダイナミクスに分け、ドリフトダイナミクスはシステムの平均挙動を表す部分であるため、第一モデル原理に従い運動学・動力学方程式からモデルを構築した。つぎに、確率的不確かさを表す拡散ダイナミクス部分のモデル化として、得られた応答データからドリフトダイナミクスモデルの応答を除くことで、確率的不確かさに関する応答データを取得した。このデータに対して複数のパラメトリックモデルの候補を用意し、非線形フィルタによるパラメータ同定を行い、適合度が最も高いモデルを採用した。ドリフトダイナミクスのモデル化誤差に起因する確定的な誤差信号の影響が、最終的に得られる確率モデルの精度に無視できない影響を与えることがわかったため、更なる理論的な成果として、これまで確率的外乱のみを考慮していた提案手法を、確率外乱だけでなく確定外乱も同時に扱えるように拡張した。これにより、実験結果とよく適合する非線形確率システムモデルを得ることができ、実機検証として小型ヘリコプタの非線形確率最適制御による目標軌道の最適追従制御や目標点での確率安定化制御を行い、提案制御法と得られたモデルに関する有効性を確認した。

#### 4. 研究成果

研究成果として、まずはこれまで有限時間非線形確率最適制御問題の解法であった反復型経路積分法の反復規則を拡張することで、これまで扱えなかったさらに広いクラスの非線形確率制御問題に対する解法を与えた。具体的には、割引率付き無限時間区間最適制御問題、入力飽和付き最適制御問題、更に確率H<sub>∞</sub>制御問題の解法を新たに得ることができた。特に、入力飽和を厳密に扱える非線形確率最適制御問題や非線形確率H<sub>∞</sub>制御問題に対する解法はこれまでなく、提案法によりこれらの問題に対する系統的な解法を与えることが可能となった。

二つ目の成果として、非線形変換を用いて非線形フィルタ問題に付随する非線形確率偏微分方程式を反復型経路積分法が適用可能な方程式に帰着させることで、非線形フィルタ問題に対する経路積分法の適用を行った。非線形フィルタによるパラメータ同定により、非線形確率システムのモデル化についても検討を行った。これらによって、非線形確率最適制御・状態推定・確率システムのモデ

ル化の統一的枠組みを提案した。

三つ目の成果として、提案法の実機検証を行った。環境外乱下における小型無人ヘリコプタに着目し、まずツインロータヘリコプタと新たに作成したクアッドコプタの運動を非線形確率システムとしてモデル化した。これらに提案法を適用することで、確率的不確かさを考慮した最適な飛行制御を行いその効果を数値シミュレーションと実験により確認した。非線形推定と確率最適制御に基づく小型無人機の不確かさを適切に考慮した飛行制御手法により、従来法では実現できなかった更なる性能の向上と環境外乱への頑健性の獲得が達成できる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

K. Yoshida, S. Satoh and M. Saeki: Component-based detailed modeling of a small wheeled mobile robot with indispensable nonlinearities, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol.11, No.1, 2018, pp.72-80

S. Satoh, R. Ebimoto and M. Saeki: A force regulation guaranteeing input-to-state stability for a robot manipulator in a potential field, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol.12, No.S2, 2017, pp.S40-S48

M. Saeki, K. Hinokimoto, N. Wada and S. Satoh: A data-driven design method of PID controller with noise filter, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, Vol.12, No.S2, 2017, pp.S74-S81

S. Satoh: Input-to-state stability of stochastic port-Hamiltonian systems using stochastic generalized canonical transformations, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 査読有, Vol.27, No.17, 2017, pp.3862-3885

S. Satoh, H. J. Kappen and M. Saeki: An iterative method for nonlinear stochastic optimal control based on path integrals, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, Vol.62, No.1, 2017, pp.262-276

S. Satoh, K. Fujimoto and M. Saeki: Transition to an optimal periodic gait by simultaneous input and parameter optimization method of Hamiltonian systems, *Artificial Life and Robotics*, 査読有, Vol.21, No.3, 2016, pp. 258-267

M. Saeki, N. Wada and S. Satoh: Stability analysis of feedback systems with dead-zone nonlinearities by circle and Popov criteria, *Automatica*, 査読有, Vol.66, 2016, pp.96-100

佐伯正美・黒坂友亮・和田信敬・佐藤訓志: ポリウムレンダリングによる非線形フィルタのパラメータ空間設計, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.28, No.10, 2015, pp.419-425

〔学会発表〕(計 7 件)

S. Satoh and K. Fujimoto: Gait generation for a biped robot with knees and torso via trajectory learning and state-transition estimation, 2nd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics, Kyoto (Japan), 2017.10.29

J. Yamauchi, K. Kizaki, T. Ibuki, T. Hatanaka, S. Satoh and M. Fujita: Performance Analysis of Visual Feedback Leader-Following Pose Synchronization with Stochastic Uncertain Leader in Three Dimensions, 1st IEEE Conference on Control Technology and Applications, Kohala Coast (Hawai'i), 2017.8.27

S. Satoh, T. Kamiike and M. Saeki: Nonlinear stochastic H-infinity control using local quadratic approximation, SICE International Symposium on Control Systems 2016, Nagoya (Japan), 2016.3.7

S. Satoh, K. Fujimoto and M. Saeki: Transition to a passive walking gait via input and parameter optimization of Hamiltonian systems, 1st International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics, Kyoto (Japan), 2015.10.28

S. Satoh, K. Fujimoto and M. Saeki: Input and plant parameter optimization via learning optimal control of Hamiltonian systems, 5th IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for

Nonlinear Control, Lyon (France), 2015.7.5

M. Saeki, Y. Kurosaka, N. Wada and S. Satoh: A parameter space design method using simulation, 10th Asian Control Conference, Sabah (Malaysia), 2015.6.1

J. Yamauchi, S. Nakano, S. Satoh, T. Hatanaka and M. Fujita: Stochastic performance analysis of visual motion observer and experimental verifications, 10th Asian Control Conference, Sabah (Malaysia), 2015.6.1

〔図書〕(計 2 件)

佐藤訓志: ハミルトン力学に基づくダイナミクスベース制御, ロボット制御学ハンドブック 分担執筆, 近代科学社, 2017. pp.285-290

佐藤訓志・藤本健治: 最適制御で結ぶ受動歩行とZMP規範歩行, ロボット制御学ハンドブック 分担執筆, 近代科学社, 2017. pp.595-597

〔その他〕

ホームページ

<http://www-space.mech.eng.osaka-u.ac.jp/satoh/index.html>

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 訓志 (SATOH, Satoshi)

大阪大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号: 6 0 5 3 3 6 4 3