

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K04106
研究課題名（和文）統計モデルと確率制御理論の融合による確率システムのモデル化 - 制御の体系的枠組み

研究課題名（英文）A systematic framework from modeling to control for systems including stochastic uncertainty based on statistical models and stochastic control systems theory

研究代表者
佐藤 訓志（Sato, Satoshi）
大阪大学・大学院工学研究科・教授

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）：本研究は、確率解析に基づく制御器設計が可能な確率システム制御と実験データの推定誤差を明示できるガウス過程回帰モデルを用いて、確率的な不確かさを含むシステムのモデル化から制御までを一貫して扱える手法を確立した。これまでガウス過程回帰モデルの分散までを確率的に考慮した解析・制御法がなかったため、本研究ではガウス過程回帰モデルの統計的特徴に対応する確率システムを定式化し、この対応関係を用いて確率システム制御理論に基づくガウス過程回帰モデルのモデル化・解析・制御の系統的な枠組みを構築した。さらに、確率サンプリング制御に基づくデータのサンプル点間の挙動の安定性も保証した制御法を開発し、実機検証も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガウス過程回帰により得られるシステムと統計的対応を有する確率システムを定式化したことで、これまでに培われた確率システム制御理論に基づく系統的な解析・制御が可能となった。実験データからのモデル表現において利点をもつ一方で制御系設計を困難にしていたガウス過程回帰システムに対して、モデル化から制御までの一貫した解析・制御器設計を可能とする枠組みを構築し、実機検証による有効性の確認も行った。実システムは連続時間システムであっても、実験データの取得は離散的となるため、ガウス過程回帰により得られるモデルは離散時間システムとなるが、本研究によりサンプル点間の挙動の安定性も保証した制御法を与えた。

研究成果の概要（英文）：This study established a method that can handle the entire process from modeling to control for systems including stochastic uncertainty, based on stochastic systems control theory and the Gaussian process regression model. There have been no conventional control methods that stochastically consider the variance of Gaussian process regression models. Thus, we formulated discrete-time stochastic systems that correspond to the statistical features of Gaussian process regression models. Using this correspondence, we developed a systematic framework for modeling, analyzing, and controlling the Gaussian process regression models based on stochastic systems control theory. Furthermore, we proposed a control methodology guaranteeing the stability of the behavior between sample points of the training data based on stochastic sampled-data control theory and performed experimental verification.

研究分野：制御工学

キーワード：ガウス過程回帰システム 離散時間確率システム 確率サンプリング制御

1. 研究開始当初の背景

環境外乱、センサノイズ、ネットワークの介在などにより、システムの動特性には多かれ少なかれ確率的な不確かさが存在する。制御システムの複雑化や制御要求の高度化が進む近年、このような確率的な不確かさを陽に考慮した系統的な解析・制御法の有用性は一層高まっている。申請者はこれまで、動特性が非線形確率微分方程式で表現される連続時間非線形確率システムを対象として、確率解析に基づく一連の制御手法を開発してきた。確率微分方程式を用いることで、常微分方程式では扱えない非有界変動なノイズを厳密に考慮でき、さらに確率解析により確定システム解析では現れないノイズの定量的評価が可能となる。一方で、一般に実システムに対して制御法を適用する際には適切なシステムモデルが必要となるが、確率システムの系統的なモデル構築法はこれまでのところない。

ガウス過程回帰は、入出力データから直接ノンパラメトリックモデルを推定できるだけでなく、ガウス過程の性質により予測分布を容易に計算できることから、得られたモデルの統計的不確かさも表現できるという大きな利点をもつ。そのため、近年ガウス過程回帰は機械学習だけでなくシステム制御においても注目され、動的システムをガウス過程回帰でモデル化し、その安定性解析や制御器設計を行う試みがなされている。ガウス過程回帰で得られる動的システムモデルは通常、サンプル時間間隔で実験から得られる状態の時系列データの有限個の組を入出力データとして、離散時間システムにおける非線形ベクトル値関数を回帰する。回帰関数はある平均関数と分散関数をもつガウス過程に従う。これがガウス過程回帰で表されるシステムの統計的特徴であり、上述のようなモデル表現としての利点をもつ一方、制御器設計を困難とするため、これまで統計的特徴を全て組み込んだ上での系統的な制御器設計の枠組は存在していない。

そこで本研究では、非線形確率システム制御理論とガウス過程回帰システムによる「確率的な不確かさを含む動的システムのモデル化から制御までの一貫した系統的枠組みの確立」を目指すこととした。

2. 研究の目的

以上の背景および動機を踏まえ、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。

- ①ガウス過程回帰により得られる離散時間システム（以降、ガウス過程回帰システム）と、これまで広く研究されてきた離散時間確率システムを橋渡しするための統計的な対応関係を見出し、定式化する。
- ②ガウス過程回帰システムに対する確率システム制御理論に基づく系統的な解析・制御器設計の枠組みを構築する。
- ③ガウス過程回帰システムに対して、システムのサンプル点間における挙動の安定性も保証する制御法を開発する。さらに、構築したこれらの理論的枠組みに対して実機検証を行う。

3. 研究の方法

目標①については、ガウス過程回帰システムと離散時間確率システムとの統計的な対応関係を見出すため、与えられた学習データセットから得られるガウス過程回帰システムの解過程における現在の状態の下での1離散時間ステップ後の状態に関する条件付き期待値および分散を導出し、それらが一致するような離散時間確率システムを構成する。

目標②については、ガウス過程回帰システムを直接扱うのではなく、①で構成する離散時間確率システムに対しては確率解析に基づく安定性解析・制御が可能となるため、これまでに申請者が研究してきた確率制御手法も含めて系統的な解析・制御器設計法を構築する。

目標③については、ガウス過程回帰システムおよび統計的対応を用いて構成した離散時間確率システムは共に離散時間システムであるため、申請者が研究してきた確率サンプル値制御法に着目する。この手法により、学習データのサンプル時間間隔に起因する離散時間確率システムの安定化だけでなく、サンプル点間の挙動をも考慮した連続時間確率システムの安定化制御器設計も可能となる。そこで、確率サンプル値制御法に基づき、離散時間確率システムならびに、サンプル点間の挙動を考慮した連続時間確率システムの安定性の条件を導出する。また、申請者は屋外用のクアッドコプタ製作経験があり、これを活かし屋内で実験が可能な小型マルチコプタ実験機または相当機を製作し、実験データを用いたガウス過程回帰によるモデル化から制御実験までを一貫して検証する。

4. 研究成果

目標①に対する成果として、サンプル時間間隔で取得した状態変数のデータに線形変換を施した学習データセットに対してガウス過程回帰を適用することで得られる離散時間システムと、確率微分方程式で記述される連続時間確率システムに同じサンプル時間を用いてオイラー・丸山法による時間離散化を適用して得られる離散時間確率システムに対して、状態変数に関する条件付き平均と条件付き分散がそれぞれ等しくなるという統計的性質に関する対応関係を明らかにした。これにより、これまで申請者が行ってきた確率システムに対する一連の制御手法および解析手法が、本研究により得られた関連性を通じてガウス過程回帰システムに対して適用できる道筋が得られた。さらに、得られた結果の拡張として、学習データに観測ノイズが含まれる場合におけるガウス過程回帰システムと統計的対応をもつ離散時間確率システムを定式化した。これまでに得られた結果として、離散時間確率システムとの関連付けを見通しよくするために用いていた学習データの線形変換は、観測ノイズを含む場合には対応する離散時間確率システムにおける観測ノイズの分散を拡大してしまうため、S/N比の改善の役割を果たす調整パラメータを新たに導入し、これまでの結果を拡張した。

目標②に対する成果として、システムのサンプル点間における挙動の安定性も保証する制御法構築のためのアプローチとして、サンプル値制御に着目し、これを非線形確率システムに対して拡張した確率サンプル値制御法を開発した。この手法は、サンプル点間の挙動も考慮した連続時間システムである非線形確率サンプル値システム、各サンプル点における挙動が一致するような離散時間確率システムである厳密離散時間確率システム、そしてその近似モデルに相当する離散時間確率システムの三つのシステムモデル間を結ぶ安定性定理を提供するものである。まず、厳密離散時間確率システムの安定性を近似モデルである離散時間確率システムの安定性に帰着させる条件として、 p 次確率的1ステップ Consistency という近似精度に関する条件を提案し、近似離散時間システムの確率安定性から、対応する厳密離散時間システムの確率安定性を結論付けるための定理を与えた。つぎに、非線形確率サンプル値システムの安定性を厳密離散時間確率システムの安定性に帰着させる条件として、非線形確率サンプル値システムに対するサンプル点間の有界性に関する性質として、確率的マルチステップ有界性という概念を新たに提案した。そして、確率的マルチステップ有界性を備える非線形確率サンプル値システムにおいて、厳密離散時間システムの確率安定性から、この非線形確率サンプル値システムの確率安定性が導かれることを示した。この枠組みによって、一般に解析が困難な非線形サンプル値システムや厳密離散時間確率システムの安定性を、比較的構成と解析が容易な離散時間確率システムの安定性を調べることで解析できるようになった。

目標③に対する成果として、小型マルチコプタと動特性に共通の特徴がありながら、墜落による破損の心配がなく実験データの取得が容易であることを考慮して、まずは2次元上の自律移動ロボットの実験環境の整備を行った。その後、6軸センサを搭載した3次元剛体姿勢制御実験機による実験環境の構築を行い、実機検証を行った。センサから得られた状態変数に関する実験データに対して、目標①で開発したから S/N比改善の可調整パラメータを含む線形変換を施すことで学習データセットを構築し、実験データの観測ノイズを考慮したガウス過程回帰システムを得ることができ、このシステムと統計的に対応する離散時間非線形確率システムモデルを構成することができた。このモデルを用いた目標姿勢軌道に対する姿勢追従制御器を設計して姿勢制御を行い、目標姿勢軌道への追従が達成できることを確認した。本手法は、実験データから、これまでの知見により制御機設計および安定性解析が可能な非線形確率システムモデルをシステムティックに構成することができ、モデル化から制御をシームレスに行える利点を確認することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Facchino Matteo, Totsuka Atsushi, Capello Elisa, Satoh Satoshi, Guglieri Giorgio, Yamada Katsuhiko	4. 巻 -
2. 論文標題 Design and validation of an MPC controller for CMG-based testbed	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optimization and 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） 10.1007/s11081-021-09633-z	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 佐藤 訓志、田坂 直也	4. 巻 61
2. 論文標題 CMG搭載宇宙機の確率システムモデルと確率バックステッピング法による姿勢追従制御	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 127 ~ 132
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11499/sicejl.61.127	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 38
2. 論文標題 Stochastic stabilization based on kinetic-potential energy shaping for stochastic mechanical port-Hamiltonian systems	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 610 ~ 618
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2024.2340543	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 Ichito Tabuchi, Satoh Satoshi, Yamada Katsuhiko	4. 巻 1
2. 論文標題 Formation tracking control using generalized canonical transformations and sliding mode control of port-Hamiltonian systems	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 Article ID: 105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.57350/jesa.105	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10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Y. Nakatsuka, S. Satoh, and K. Yamada
2. 発表標題 Landing guidance control combining powered descending with nonlinear optimization and vertical descending with model prediction
3. 学会等名 the 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Satoh and K. Fujimoto
2. 発表標題 A study on extension of kinetic potential energy shaping to a class of stochastic port-Hamiltonian systems
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
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤訓志・孫芸萍
2. 発表標題 確率微分動的計画法を用いた空気抗力を考慮したドローンの最適制御
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤訓志
2. 発表標題 熱駆動釣糸アクチュエータの非線形オブザーバの設計と局所漸近安定化
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. D'Ortona, E. Capello, and S. Satoh
2. 発表標題 Design of sliding mode techniques for a CMG-based testbed attitude control system
3. 学会等名 The 3rd IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Yabe, and S. Satoh
2. 発表標題 Formation Trajectory Tracking Control of Port-Hamiltonian Systems with Gain Scheduling on the Tracking Error
3. 学会等名 Proceedings of the 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Hamanaka, and S. Satoh
2. 発表標題 Formation Tracking Control Based on Generalized Canonical Transformation with Adaptive Mechanism for Atmospheric Drag
3. 学会等名 Proceedings of the 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Miyazawa, and S. Satoh
2. 発表標題 Design and Stability Analysis of Attitude Tracking Control System for Spacecraft Considering Stochastic Disturbances
3. 学会等名 Proceedings of the 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤訓志・宮澤実央
2. 発表標題 非線形確率サンプル値制御に基づくガウス過程回帰により表された確率システムの一安定化法
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
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 橋本瞭・佐藤訓志
2. 発表標題 軌道要素を用いた非線形確率システムモデルと確率最適制御による宇宙機フォーメーションフライト制御
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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