

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03619

研究課題名（和文）量子情報量による不確かさの特徴づけと量子系におけるロバスト制御理論の構築

研究課題名（英文）Information-theoretic characterization of uncertainties of quantum systems and development of quantum robust control theory

研究代表者

大木 健太郎 (Ohki, Kentaro)

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：40639233

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、不確かさを有する量子系の制御問題を扱った。主な成果は、有限次元の量子系に対する予期しないモデル化誤差によるロバスト安定化制御の性能解析とロバスト適応制御の量子系への拡張である。有限次元の量子系は、量子情報処理デバイスとして用いられるため、このような量子系に対して有効な制御則を与えることは重要である。本研究では、不確かさが安定化制御に与える影響を調べ、モデル化誤差がどの程度の大きさであれば収束させたい平衡点付近に留まるかを確率的に評価した。また、モデル化誤差がパラメトリックに与えられる場合、パラメータを学習することで誤差の大きさに依らずに特定の平衡点に収束させられることも解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

安定化制御のロバスト性解析は、平衡点を消失させないモデル化誤差を考えて行われることが多く、平衡点へ収束が原理的にできない場合の確率系に対する解析的な結果を得ることは本研究が初めてである。また、非線形確率系としてモデル化される量子系に対する適応制御の研究はこれまでになく、量子制御理論に新たな方向性を与えた。

また、これらの研究成果は、量子系の設計においてどの程度精密に作成しなければいけないかという設計指針を与え、実際のデバイス開発の指針を与えられるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：This research addressed the control problem of uncertainty in quantum systems. The main results were a performance analysis of robust stabilization control for finite-dimensional quantum systems due to unexpected modeling errors and an extension of robust adaptive control to quantum systems. Because finite-dimensional quantum systems are commonly used as quantum information processing devices, providing effective control laws for such systems is crucial. In this research, we investigated the effect of uncertainty on stabilization control. We probabilistically evaluated the level of modeling error required to remain near the desired equilibrium point to which the system converges. We also clarified that when modeling errors are parametric, it is possible to converge to a specific equilibrium point by learning the parameters, regardless of the size of the error.

研究分野：量子制御

キーワード：適応制御 ロバスト制御 ロバスト安定化 量子制御

1. 研究開始当初の背景

本研究は量子系に特化したロバスト制御理論の構築を目指すものである。研究に着手したときの背景を述べる。

1.1 既存手法とその問題点

量子システムに対するロバスト制御の研究は本研究が初めてではない。しかし、現状は先に述べた状況であり、数値実験による検証は実際に保証されたいロバスト性を保証できているとは限らない(図1)。一方、古典システムでは、確率分布の不確かさの集合を Kullback-Leibler 情報量によって特徴付けると、それを拘束条件としたロバスト最適制御がリスク鋭敏型最適制御になることが示されている [R1]。これはリスク鋭敏型最適制御が扱える不確かさの集合の特徴づけをした結果であり、非線形性や雑音に対するリスク鋭敏型制御のロバスト性を完全に特徴付けた。同じように量子リスク鋭敏型制御のロバスト性も同じように特徴付けられると予想されるが、実際のところは直接の拡張はうまくいかず、限られた条件での線形量子系におけるロバスト性が理論と数値的に保証されているだけである。そのため、量子情報処理技術の発展が目覚ましい今日、量子システムのロバスト制御の理論保証はますます重要になるにもかかわらず、多くの既存のロバスト量子制御手法では、保証できる非線形性や雑音の不確かさの範囲が未知のままである。

[R1] I. R. Petersen, et al., "Minimax optimal control of stochastic uncertain systems with relative entropy constraints," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 45, pp. 398-412, 2000.

1.2 量子情報処理デバイスにおける問題点

量子論での状態遷移は Trace Preserving Completely Positive 写像 (TPCP 写像) と呼ばれる写像で記述することができ、量子情報処理技術では TPCP 写像に関する不確かさを考慮することが重要である。しかし、制御系設計のためにはどのような TPCP 写像の集合を不確かさとして扱えばよいか、その特徴づけをどのようにすればよいかは不明である。量子情報処理技術が具体化される中、どのような物理デバイスでの実現が考えられ、モデルの不確かさやどのようなノイズが混入するかなどが徐々に明らかになってきたため、TPCP 写像の集合をより具体的に特徴付けられる時期になっている。古典動的システムのロバスト制御理論の歴史の中でも不確かさのモデリングは非常に重要であったが、量子論においても同様であり、とくにロバスト最適制御のための不確かさの特徴づけは、今後の量子情報処理技術の精度の向上のためにも必要不可欠である。

2. 研究の目的

背景で述べたように、既存のロバスト制御は古典系で構築されたものであり、主に線形系を対象とする。量子系でも線形システムは存在するが、そのようなシステムは量子情報処理の主役である量子ビットとは別であり、ロバスト制御器をそのまま適用することは難しく、また実際に急ピッチでの開発が進められている量子情報処理デバイスのモデル化誤差を反映するわけではない。したがって本研究では、とくに量子情報処理への応用を念頭にし、有限次元の量子系に対するロバスト制御理論を構築することを目標とする。具体的には下記の三点を明らかにする。

(2-1) 既存のロバスト制御手法の適用範囲の解明

(2-2) 量子情報量による量子システム制御のための不確かさの特徴づけ

(2-3) ロバスト量子制御理論の構築

3. 研究の方法

本研究ではあらゆる量子系に対して有効なロバスト制御手法を確立することを目標とせず、特に量子情報処理デバイスに利用することを念頭に、特定の量子系に対するロバスト制御手法の開発を試みる。不確かさを有するシステムの制御手法として、強化学習などの大量のデータを利用する方法も考えられるが、繊細な量子系に対して膨大なデータを取得することはまだ現実的ではないため、本研究では数理モデルを前提として研究する。

基本的な指針としては、先に示した既存のロバスト制御手法がどのような量子系に対して有効であるかを数値的および理論的に調べることで、および量子情報処理によって都合のよいロバスト制御の解明である。とくにロバスト制御は、平衡点への収束を保証するロバスト安定化と与えられたコスト関数に対する性能をある程度保証するロバスト性能保証の2種類が考えられるが、とくに平衡点への収束は量子ビットの初期化を保証するために必要なため、安定化および平衡点付近にどの程度留まるかを確率的に評価する。また、数値実験を用いて理論の正しさおよび理論的な保証のない適用範囲の探索を試み、成果は学会会議および学術誌で発表する。

4. 研究成果

研究成果のうち、主要な結果を以下に示す。

(2-1)に関して、当初はリスク鋭敏型制御器の性能解析を試みたが、これは有限次元の量子系では制御器の導出すら難しかったため、別のロバスト安定化制御器の性能評価を別途試みた。これはパラメータおよび量子ダイナミクス (TPCP 写像の連続時間版) に関して想定外の不確かさが存在する場合、制御性能がどの程度劣化するかを調べたもので、国際会議論文に速報を、より詳細な結果を学術論文誌に投稿した。国際会議論文は採択され、発表済みである。

[1] Weichao Liang, Kentaro Ohki, Francesco Ticozzi, "On the Robustness of Stability for Quantum Stochastic Systems," 2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 7202-7207, Singapore, 2023, DOI: 10.1109/CDC49753.2023.10383791

学術論文誌へ投稿した論文は査読中であり、本事業の期間内に採録決定に至っていないが、プレプリントサーバーにて結果を報告している。

[2] Weichao Liang, Kentaro Ohki, Francesco Ticozzi, "Exploring the Robustness of stabilizing controls for stochastic quantum evolutions," arXiv:2311.04428 doi: 10.48550/arXiv.2311.04428

これらの研究では、公称モデルでは安定な平衡点あるいは安定化可能な平衡点が存在する量子系に対し、予期せぬ外乱やモデル化誤差の影響で安定平衡点そのものが消失してしまった場合に、その平衡点付近にどの程度留まるかを理論的に調べたものである。この問題は不確かさをもつ非線形確率制御問題として定式化されるが、多くの問題では安定平衡点の消失を仮定せずに制御性能を議論するのにに対し、安定化が原理的に不可能となる場合に平衡点付近に留まる確率を解析した。その結果、比較的単純な量子系であっても、少しの摂動が大きく挙動を乱してしまうことがあることがわかり、量子系の設計やモデリングには古典制御以上の精度が要求されることがわかった。

(2-2) に関して、量子情報理論に基づいた不確かさの定式化はできなかった。しかし、量子情報処理にも使える特定の量子系に対し、パラメータの誤差がある範囲に収まれば安定化フィードバック制御器が作成できることが海外の研究者によって示され、それに基づいて (2-3) に関する量子系の適応制御則を提案し、有効性を理論および数値的に示した。下で改めて説明する。

(2-3) に関して、パラメータが不確かな量子系に対するロバスト安定化手法が提案されたが、システムの次元が大きくなると許容されるパラメータ範囲が狭くなる。事前にその範囲を知ることなく、パラメータの不確かさを学習しながらロバスト制御を行う、ロバスト適応制御手法を量子系に適用した。これは3件の国際会議および3件の国内会議にて発表済みである。この手法は、確率1での収束を保証することができ、またその収束速度に関して学習係数の決定を最適化制御問題として求め、収束速度に関する限界も与えた。これらの成果は、量子状態の制御可能な量子系の設計指針を与えると同時に、現実的に学習にどの程度の時間が必要かを与えるため、デバイス設計の材料の選定にも役立つことが期待される。

[3] Shoju Enami, Kentaro Ohki, "A proposal of adaptive parameter tuning for robust stabilizing control of N-level quantum angular momentum systems," The 60th Conference on Decision and Control (CDC2021), pp. 2518-2524, Online (hosted in Austin, Texas, USA), 2021 DOI: 10.1109/CDC45484.2021.9683605

[4] Shoju Enami, Kentaro Ohki, "Convergence analysis of adaptive tuning parameter for robust stabilizing control of N-level quantum systems," SICE Annual Conference 2021, pp. 263-268, Tokyo, Japan, 2021

[5] Kentaro Ohki, Shoju Enami, "On faster convergence of stochastic approximation for adaptive quantum control," The 22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control (discussion paper), pp. 6429-6432, Yokohama, Japan, 2023

ただし、大規模な量子系に対しては、計算時間の問題で実時間のフィードバック制御が難しい。そのため、本研究では計算量の軽減を目的とした手法として、モデル次数の選択法、低ランク化手法、平均場近似手法も開発し、国際会議および国内会議でそれぞれ数件発表した。事業期間内での採択にはならなかったが、2024年度に入って下記のプレプリントが国際学会誌に受理されている。

[6] Daiki Tsuzuki, Kentaro Ohki, "Low-rank approximated Kalman-Bucy filters using Oja's principal component flow for linear time-invariant systems," arXiv:2403.03104 doi: 10.48550/arXiv.2403.03104

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Kentaro Ohki	4. 巻 53
2. 論文標題 Mean-field type quantum filter for a quantum Ising type system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 2243-2248
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ifacol.2020.12.1489	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20件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Weichao Liang, Kentaro Ohki, Francesco Ticozzi
2. 発表標題 On the Robustness of Stability for Quantum Stochastic Systems
3. 学会等名 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kentaro Ohki, Shoju Enami
2. 発表標題 On faster convergence of stochastic approximation for adaptive quantum control
3. 学会等名 The 22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 都築大樹, 大木健太郎
2. 発表標題 正規行列をシステム行列にもつ低ランクKalmanフィルタの解析
3. 学会等名 第66回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 都築大樹, 大木健太郎
2. 発表標題 H フィルタ理論を用いた低ランク Kalman-Bucy フィルタ
3. 学会等名 第11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 34.江波祥樹, 大木健太郎
2. 発表標題 雑音駆動型量子アニーリングの検討
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuto Yamada, Kentaro Ohki
2. 発表標題 Comparison of Estimation Error between Two Different Low-Rank Kalman-Bucy Filters
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shoju Enami, Kentaro Ohki
2. 発表標題 Convergence analysis of adaptive tuning parameter for robust stabilizing control of N-level quantum systems
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shoju Enami, Kentaro Ohki
2. 発表標題 A proposal of adaptive parameter tuning for robust stabilizing control of N-level quantum angular momentum systems
3. 学会等名 The 60th Conference on Decision and Control (CDC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Ohki
2. 発表標題 On Recursive Quantum State Smoothing
3. 学会等名 The 53rd ISCTE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS ' 21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江波祥樹, 大木健太郎
2. 発表標題 N準量子系のロバスト制御のための適応パラメータ推定
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表会(SCI ' 21)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江波祥樹, 大木健太郎
2. 発表標題 N準量子系の適応ロバスト制御のための適応ゲイン設計の考察
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺陵真, 大木健太郎
2. 発表標題 移動エントロピーによるダイナミカルシステムのモデル次数選択
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江波祥樹, 大木健太郎
2. 発表標題 N準位量子系の適応ロバスト制御における可到達性解析
3. 学会等名 第9回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuto Yamada, Kentaro Ohki
2. 発表標題 On a New Low-Rank Kalman-Bucy Filter and Its Convergence Property
3. 学会等名 The 52nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kentaro Ohki
2. 発表標題 Mean-field type quantum filter for a quantum Ising type system
3. 学会等名 the 1st Virtual IFAC World Congress (IFAC-V 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梶田健ノ介, 大木健太郎
2. 発表標題 パケットロスのあるシステムに対するイベント駆動型推定と通信量削減手法の提案
3. 学会等名 自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大木健太郎
2. 発表標題 量子状態スムージング：再帰的手法への一考察
3. 学会等名 第7回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kentaro Ohki
2. 発表標題 Mean-field type quantum filter for a quantum Ising type system
3. 学会等名 21st IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuya Kamo, Kentaro Ohki
2. 発表標題 Distributed control of stochastic battery systems via mean field game
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuto Yamada, Kentaro Ohki, Kenji Kashima
2. 発表標題 An event-based quantum error correction via measurement-based feedback control
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
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

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		
イタリア	the university of Padua		