

令和元年5月27日現在

機関番号：33917

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26289128

研究課題名(和文) 不変多様体理論による非線形制御系の最適統合設計と計算プラットフォーム開発

研究課題名(英文) Design integration for nonlinear control systems via invariant manifold theory and the development of computational platform

研究代表者

坂本 登 (Sakamoto, Noboru)

南山大学・理工学部・教授

研究者番号：00283416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,800,000円

研究成果の概要(和文)：研究課題全体を通じ、抽象理論よりも実システムの具体例を積み上げる手法を取った。それら具体例は、自動変速機に用いられるロックアップクラッチのサーボ系設計、コントロールモーメントジャイロの最適制御、無人VTOL機の姿勢制御における安定性増大化制御、小型ロケットエンジンのジンバル制御、倒立振り子振上げ実験、柔軟倒立振り子振上げ実験、アクロボット振上げ実験である。これらの応用的研究の中には、本研究によってはじめて報告される成果も含んでいる。計算プラットフォーム開発は、これらの実験的研究が可能となったことでその効果が示されたと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

倒立振り子振上げ実験、柔軟倒立振り子振上げ実験、およびアクロボット振上げ実験は、これまで非線形制御では不可能だった制御性能が達成された。これは、本研究の学術的意義の高さを示していると言える。また、このような性能が可能となった背景には、計算プラットフォーム開発が十分に行われたことがある。このような計算プラットフォームを社会に還元することによって、基盤的工学の高度化が可能となるであろう。

研究成果の概要(英文)：Throughout this research project, an approach has been taken such that concrete applications rather than abstract theories are investigated. Those examples include servo control design for lock-up clutch for automatic transmissions, optimal control for control moment gyros, stability augmentation for unmanned VTOL aircraft, gimbals control for a small-size rocket, swing up and stabilization for inverted pendulum, swing up and stabilization for flexible inverted pendulum, and swing up and stabilization for the Acrobot. Some of these experiments include the results that had never been reported. The success of these experimental results shows that the development of computational platform has been effectively achieved.

研究分野：制御理論

キーワード：非線形制御 最適制御 計算プラットフォーム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

非線形システムに対する制御系設計は、安定化(最適制御)でさえ 50 年以上困難であった。研究代表者は、基本方程式であるハミルトン・ヤコビ方程式(以下、HJ 方程式)の新しい解法をシンプレクティック幾何学(Sakamoto, SIAM J. Control and Optimization, 2002)と安定多様体理論に基づき開発し(Sakamoto & van der Schaft, IEEE Trans. Automatic Control, 2008)、すでに様々なシステムへの適用を行い、有効性を実証してきた(Sakamoto, Automatica, 2013)。しかし、制御系の設計は安定化問題だけで行えるわけではない。実用のためには、サーボ系(追従系)とオブザーバの設計が不可欠である。さらに近年の研究により、サーボ系設計では中心安定多様体という概念が本質的であり(鈴木, 坂本, Celikovsky: 計測自動制御学会論文集, 2009, 論文賞武田賞受賞論文)、オブザーバ設計にはより一般の不変多様体を考察することで設計・計算が行えることがわかってきた。このように三大設計問題は、非線形システムにおいてはいずれも不変多様体という概念で捉えることが可能である。しかしながら、不変多様体の計算理論は数学分野でも完成していない。

## 2. 研究の目的

上記の背景の下、本研究では以下の課題に取り組むことを目的とした。

**課題 1.** サーボ系設計のための中心安定多様体理論とその計算理論開発

サーボ系とは外部参照入力に対して状態変数(の一部)が漸近追従する機構であり、状態変数は平衡点に収束せず、そのメカニズムは安定化制御と比べ複雑である。サーボ系に対しても最適設計を行うことが可能で、その数学的メカニズムは中心安定多様体によって説明がつくことが申請者によって明らかにされた。しかし、中心多様体(虚軸上固有値に対応する不変多様体)が含まれることにより、様々な問題が生じることが知られていた。

**課題 2.** ルーエンバーガーオブザーバの非線形拡張

線形オブザーバとして有名なルーエンバーガー理論は、対象システムと観測器の状態の間に不変な関係(不変部分空間)を構成することが本質的である。非線形システムでは、不変多様体によってこれを拡張することが可能である。オブザーバ設計の場合、設計者が新たに動的システムを構成する。ここには高い自由度が存在し、実用化にはこの自由度を適切に利用する理論が必要とされていた。

**課題 3.** 非線形制御設計のための不変多様体計算理論の開発

ここでは、力学系理論としての不変多様体とその計算について、制御系設計の観点から深く調べることを目的とした。上記課題 1, 2 の内容に加え、共通の課題として領域拡大問題、高次元不変多様体の計算がテーマとなる。力学系理論における shadowing や 補題などの技術を応用する。特に、下記の 3 点を主たる目的とした。

(3a) 制御則実装に必要な領域まで不変多様体を拡大する計算理論の開発

(3b) 高次元の不変多様体計算を高速かつ自動的に行うアルゴリズム開発

(3c) MATLAB による計算プログラム開発と実装を容易にする制御器表現法の研究

**課題 4.** 実験検証と産業応用への取り組み

本研究は、理論だけで終わることなく実システムへ実装し非線形制御による性能向上を実証することを最終目的とした。そのため、種々の装置を自作し検証研究を行うことを目的とした。

## 3. 研究の方法

いずれの課題に対しても、抽象理論よりもむしろ具体例を積み上げる手法を取った。課題 1 のサーボ系設計問題では、自動車のパワートレインで重要なロックアップクラッチのサーボ系設計問題やコントロールモーメントジャイロの最適制御などを考察した。また、課題 2 では、カオス系の状態推定問題を扱った。実システム、特にメカニカル系の制御では常にオブザーバの設計が必要となるため、課題 2 は実応用を行いながら進捗を評価した。非線形制御の実応用を目指す本研究課題の実際の活動では、課題 3 及び 4 は常に優先的に取り組む必要があった。

## 4. 研究成果

課題 1 に関し、自動車関連メカとの協働によって自動変速機における基幹的部品であるロックアップクラッチのサーボ系設計を非線形制御により行い、実験検証により大きな性能改善効果があることを示した。この成果は、論文 1 及び 6 によって公開した。また、中心安定多様体を用いた最適制御については、コントロールモーメントジャイロの制御を論文 2 として発表した。この論文は、実験検証も含む。また、日本宇宙航空研究開発機構との共同研究として、VTOL 無人機の姿勢制御を出力レギュレーション理論によって設計し、従来の PID 制御からの改善が可能であることを実験によって検証した(論文 13)。

課題 2 に関し、シルベスタ方程式を用いる新規な非線形オブザーバの提案を論文 1 で行った。また、この推定器は、その後さまざまな実応用での状態推定器として用いられている。例えば、論文 2, 5, 6, 14, 18 では、本成果は状態推定器とフィルタとして重要な役割をしている。

課題 3 と 4 は、数値解理論、プログラム開発、シミュレーション検証、さらに実験検証の 4

方面からのアプローチを様々なシステムに対して考察した。以下にその特徴を詳述する。第一の特徴は、安定多様体法の特徴であるハミルトン力学系を取り扱う点に関し、高速数値解法(論文4)やハミルトン系の構造を保存する計算理論の利用(論文9)などの成果を得たことである。第二の特徴は、大規模系としての難しさを有する偏微分方程式系への適用(論文7)を通じ、効率的な計算法の確立を試みたことである。これに関しては、さらなる改善改良の余地があり、今後の研究課題としたい。第三の特徴は、様々な拘束条件を満たす最適制御系の設計問題としてラグランジュ未定乗数を含むハミルトン・ヤコビ方程式の数値解理論(論文15, 16)の開発を行ったことである。第四の特徴は、航空宇宙工学への応用として本研究成果の適用を行った(論文10, 13, 15, 17)ことである。第五の特徴は、数値解理論とそれを実現するプログラム開発、およびこれらの実装技術開発の検証として、メカニカル系の制御実験を多く行ったことである。倒立振子とアクロバット実験装置を開発し制御実験検証を行い、米国電気学会(IEEE)の論文誌へ発表した(論文14, 18)。いずれの制御系設計においても、単一フィードバックによる振上げ安定化の成功、ハミルトン・ヤコビ方程式における解の非一意性の実例検証というこれまで報告がなされていない成果を得た。特に、論文14ではその非一意性を3Dプリンタによって視覚的に示すことに成功した。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 18 件)

1. 上野晃司, 坂本登, 鈴木雅康, 小口俊樹, 状態依存シルベスタ方程式を用いた非線形オブザーバの提案, 計測自動制御学会論文集, 第50巻3号, pp. 219-226, 2014
2. 梅村哲央, 坂本登, LPVシステムに対する最適出力レギュレーションによるロックアップクラッチのスリップ回転速度制御, 計測自動制御学会論文集, 第50巻3号, pp. 274-280, 2014
3. 石川和男, 坂本登, コントロールモーメントジャイロの最適姿勢制御---中心安定多様体アプローチ, 計測自動制御学会論文集, 第50巻10号, pp. 731-738, 2014
4. 濱口謙一, 西田豪, 坂本登, 山本裕, 安定多様体法におけるHamilton-Jacobi方程式の高速数値解法, システム・制御・情報学会論文集, 第28巻1号, pp. 32-39, 2015
5. 山口恭輔, 坂本登, 周波数依存型非線形最適制御による回転型柔軟倒立振子の振り上げ安定化, 計測自動制御学会論文集, 第51巻3号, pp. 148-154, 2015
6. Y. Umemura and N. Sakamoto, Optimal servo design for lock-up slip control for torque converter---nonlinear output regulation approach, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 23, Issue 4, pp. 1587 - 1593, 2015
7. 濱口謙一, 西田豪, 坂本登, 山本裕, モデル縮約に基づく非線形偏微分方程式の最適フィードバック制御, 計測自動制御学会論文集, 第51巻第3号, pp. 181-188, 2015
8. M. Suzuki and N. Sakamoto, A study on global stabilization of periodic orbits in discrete-time chaotic systems by using symbolic dynamics, Kybernetika, Vol. 51, Issue 1, pp. 4-19, 2015
9. Y. Abe, G. Nishida, N. Sakamoto and Y. Yamamoto, Symplectic numerical approach for nonlinear optimal control of systems with inequality constraints, International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application Vol. 4, No. 4, pp. 234-248, 2015
10. T. Kobayakawa, H. Kawato, K. Mochizuki, N. Sakamoto and Y. Habaguchi, Abort recovery strategy for future vertical landing systems, Acta Astronautica, Vol. 116, pp. 148-153, 2015
11. G. Nishida, Y. Abe, N. Sakamoto and Y. Yamamoto, Robustness analysis of optimal regulator for vehicle model with nonlinear friction, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 5, Issue 6, pp. 25-30, 2015
12. Y. Abe, G. Nishida and N. Sakamoto, Robust nonlinear H-infinity control design via stable manifold method, Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2015, Article ID 198380, 2015
13. A. T. Tran, N. Sakamoto, M. Sato and K. Muraoka, Control augmentation system design for Quad-Tilt-Wing unmanned aerial vehicle via robust output regulation method, IEEE Transactions on Aerospace and Electric Systems, Vol. 53, No. 1, pp. 357 - 369, 2017
14. T. Horibe and N. Sakamoto, Optimal swing up and stabilization control for inverted pendulum via stable manifold method, IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol. 26, No. 2, pp. 708-715, 2017
15. A. T. Tran, N. Sakamoto, Y. Kikuchi and K. Mori, Pilot-Induced-Oscillation suppression controller design via nonlinear optimal output regulation method, Aerospace Science and Technology, Vol. 68, pp. 278-286, 2017
16. A. T. Tran, S. Suzuki, N. Sakamoto, Nonlinear optimal control design considering a class of system constraints with validation on a magnetic levitation system, IEEE Control Systems Letters, Vol. 1, No. 2, pp. 418-423, 2017

17. A. T. Tran, N. Sakamoto and K. Mori, Nonlinear gain-scheduled flight controller design via stable manifold method, Aerospace Science and Technology, Vol. 80, pp. 301-308, 2018
18. T. Horibe and N. Sakamoto, Nonlinear optimal control for swing up and stabilization of the Acrobot via stable manifold approach: Theory and experiment, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, in print

**【学会発表】(計 47 件)**

1. 石川和男, 坂本登, 佐藤昌之, 成岡優, 最尤推定法を用いた MuPAL- の空力パラメータ推定, 第 52 回飛行機シンポジウム, 2014 年 10 月
2. K. Ueno and N. Sakamoto, A Nonlinear observer via system variables dependent Sylvester equation approach with applications, Proceedings of the 21st International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, pp. 1228-1231, 2014
3. K. Hamaguchi, G. Nishida and N. Sakamoto, Suboptimal feedback control of nonlinear distributed parameter systems by stable manifold method, Proceedings of the 19th IFAC World Congress, pp. 11357-11362, 2014
4. A. T. Tran, N. Sakamoto, M. Sato and K. Muraoka, Flight Controller Design of Quad Tilt Wing Aircraft and Flight Tests --- CAS design based on output regulation method, 第 52 回飛行機シンポジウム, 2014 年 10 月
5. 長田圭介, 坂本登, 幅口雄太, 準ハロー軌道計算に対する中心多様体法の適用, 電子情報通信学会非線形問題研究会(信学技報), pp. 57-62, 2014 年 11 月
6. 西田豪, 坂本登, 非線形分布定数系に対する最適制御の外乱に対するロバスト性について, 第 57 回自動制御連合講演会, pp. 101-106, 2014 年 11 月
7. 菊池芳光, 坂本登, 小口俊, 入力遅れを有する非線形システムに対する最適制御の設計について, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬, pp. 125-130, 2014 年 11 月
8. 堀部貴雅, 坂本登, 非線形最適制御による Acrobot の振り上げ安定化, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬, pp. 115-120, 2014 年 11 月
9. 幅口雄太, 坂本登, 長田圭介, 不安定周期軌道の非線形最適安定化制御, 第 57 回自動制御連合講演会, pp. 1046-1051, 2014 年 11 月
10. A. T. Tran, N. Sakamoto, Flight control design of Quad Tilt Wing VTOL - CAS design using robust output regulation method with nonlinear model modification, 第 57 回自動制御連合講演会, pp. 1598-1605, 2014 年 11 月
11. T. Kobayakawa, H. Kawato, K. Mochizuki, N. Sakamoto and Y. Habaguchi, Abort recovery strategy for future vertical landing systems, Proceedings of the 65th International Astronautical Congress, 2014
12. N. Sakamoto and B. Rehak, Nonlinear Luenberger observer design via invariant manifold computation, Proceedings of the 19th IFAC World Congress, pp. 37-42, 2014
13. K. Ishikawa and N. Sakamoto, Optimal control for control moment gyros --- Center-stable manifold approach, Proceedings of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 5874-5879, 2014
14. 堀部貴雅, 坂本登, 安定多様体法を用いた非線形最適制御による Acrobot の振り上げ安定化実験, 第 2 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2015 年 3 月
15. 幅口雄太, 坂本登, 長田圭介, 非線形最適制御によるハロー軌道への最適投入軌道設計, 第 2 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2015 年 3 月
16. A. T. Tran, N. Sakamoto, M. Sato and K. Muraoka, Flight control design of Quad TiltWing VTOL UAV by using robust output regulation approach - experiment result, 第 2 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2015 年 3 月
17. 長田圭介, 坂本登, 幅口雄太, 中心多様体法を用いた制限三体問題における様々な軌道設計, 第 2 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2015 年 3 月
18. 中村和也, 坂本登, 梅村哲央, パラメータ変動を考慮した IPMSM の準最適制御, 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2015 年 5 月
19. 堀部貴雅, 坂本登, 非線形メカニカル系の最適軌道計算について---Acrobot を例に, 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2015 年 5 月
20. Y. Abe, G. Nishida, N. Sakamoto and Y. Yamamoto, Nonlinear H-infinity control of vehicle model via stable manifold method, Proceedings of the SICE International Symposium on Control Systems 2015, 2015
21. K. Hamaguchi, G. Nishida, N. Sakamoto and Y. Yamamoto, Nonlinear optimal control in catalytic process via stable manifold method, Proceedings of the 5th IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Non-Linear Control, IFAC-PapersOnLine 48, pp. 250-255, 2015
22. G. Nishida and N. Sakamoto, Robustness of Nonlinear Optimal Regulator for Reduced Distributed Parameter System, Proceedings of the 2015 SIAM Conference on Control and Its Applications, 2015

23. Y. Habaguchi, N. Sakamoto and K. Nagata, Nonlinear optimal stabilization of unstable periodic orbits, Proceedings of the 4th IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems, pp. 215-220, 2015
24. 幅口雄太, 坂本登, 長田圭介, 楢円制限三体問題における準ハロ一軌道計算に対する中心多様体法の適用, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015 年 11 月
25. K. Nagata, N. Sakamoto and Y. Habaguchi, Center manifold method for the orbit design of the restricted three body problem, Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 1769-1774, 2015
26. N. Sakamoto and G. Nishida, Nonlinear optimal control: Stable manifold approach, Half-Day Workshop at the 54th IEEE Conference on Decision and Control, 2015
27. 幅口雄太, 長田圭介, 坂本登, 非線形最適制御による楢円制限三体問題における最適遷移軌道計画, 第 3 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2016 年 3 月
28. G. Nishida and N. Sakamoto, Optimal port allocation for nonlinear distributed parameter systems, Proceedings of the 2nd IFAC Workshop on Control of Systems Governed by Partial Differential Equations, 2016
29. T. Horibe and N. Sakamoto, Swing up and stabilization of the Acrobot via nonlinear optimal control based on stable manifold method, Proceedings of the 10th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, pp. 380-385 2016
30. A. T. Tran and N. Sakamoto, A computational approach for stable manifold method based on three-point boundary value problem, Proceedings of the SICE Annual Conference 2016, 2016
31. 幅口雄太, 酒井祐介, 石田翔也, 坂本登, 楢円制限三体問題における準ハロ一軌道の計算, 第 59 回自動制御連合講演会, 北九州, 2016 年 11 月
32. A. T. Tran and N. Sakamoto, A general framework for constrained optimal control based on stable manifold method, Proceedings of the 55th IEEE Conference on Decision and Control, 2016
33. 堀川詳悟, 坂本登, 逆問題を用いた非線形ロボスト最適制御器の設計 -Acrobot の振上げ安定化制御-, 第 4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 岡山, 2017 年 3 月
34. 大石泰章, 坂本登, 非線形最適制御における数値計算技術の利用, 第 4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2017 年 3 月
35. 鈴木彰悟, A. T. Tran, 坂本登, 加速度制約を陽に考慮した非線形最適制御則の設計と検証 -磁気浮上システムへの適用-, 第 4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2017 年 3 月
36. G. Nishida and N. Sakamoto, Stable manifold method for infinite horizon optimal control problem with discounted cost, Proceedings of the 20th IFAC World Congress, 2017
37. Y. Oishi and N. Sakamoto, Numerical computational improvement of the stable-manifold method for nonlinear optimal control, Proceedings of the 20th IFAC World Congress, 2017
38. 小塚健太, 坂本登, 安定多様体法を用いた種々の非線形平衡点安定化による Acrobot の制御, 第 15 回「運動と振動の制御」シンポジウム, 2017 年 8 月
39. G. Nishida and N. Sakamoto, Parallelization of search scheme in stable manifold method, Proceedings of the SICE Annual Conference 2017, 2017
40. 石田翔也, 坂本登, 不変多様体の計算による 2 つの周期軌道を遷移する制御系の設計, 第 60 回自動制御連合講演会, 2017 年 11 月
41. 大角隼大, A. T. Tran, 坂本登, 磁気浮上システムにおける加速度制約を考慮した非線形最適サーボ制御器の設計, 第 60 回自動制御連合講演会, 2017 年 11 月
42. A. T. Tran, 坂本登, 航空機の縦運動の飛行制御に対する安定多様体法の適用例, 第 60 回自動制御連合講演会, 2017 年 11 月
43. A. T. Tran, S. Suzuki and N. Sakamoto, Nonlinear optimal control design considering a class of system constraints with validation on a magnetic levitation system, Proceedings of the 56th IEEE Conference on Decision and Control, 2017, pp. 4964-4969, 2017
44. 石田翔也, 坂本登, 制限三体問題における不変多様体の計算を用いた周期軌道間の遷移, 第 5 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2018 年 3 月
45. 小塚健太, 坂本登, 中島明, 鈴木達朗, 米川翔太, 西田裕貴, 宮野峻, 安定多様体法を用いたアクロバットの平衡姿勢間遷移制御 -制御系設計と検証実験-, 第 5 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2018 年 3 月
46. 中村拓登, 大石泰章, 坂本登, 安定多様体法における射撃法とその応用, 第 5 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2018 年 3 月
47. 中村拓登, 大石泰章, 坂本登, 安定多様体法における射撃法の倒立振り上げへの応用, 第 61 回自動制御連合講演会, 2018 年 11 月

〔産業財産権〕

取得状況（計 1 件）

名称: VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING SPACECRAFT AND METHOD OF CONTROLLING VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING SPACECRAFT

発明者: Toyonori KOBAYAKAWA, Noboru SAKAMOTO, Yuta HABAGUCHI

権利者: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (Minato-ku, Tokyo), National University Corporation Nagoya University

種類: Application

番号: 15/504,867

取得年: Sep 21, 2017

国内外の別: 国際

6 . 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。