

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：33917

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04446

研究課題名（和文）ハミルトン・ヤコビ方程式に内在する高機能閉ループ運動の実現と抽出

研究課題名（英文）Detection and realization of high performance motions embedded in the Hamilton-Jacobi equation

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：代表者のこれまでの最適制御理論に関する研究から、本研究では、ハミルトン・ヤコビ方程式が制御目的が可能かどうかを含め、制御によって達成される閉ループ運動などの運動制御情報が埋め込まれているという直感を検証し実証することを目的とした。本研究期間では、これを理論的に示しただけでなく、実験によっても検証することができた。これらの成果はIEEEやIFACなどの国際的権威の高いジャーナルに発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メカトロニクス系の制御において標準的に用いられるAcrobotという体操選手を模擬した装置に対し、制御系の切り替えなしに真下から倒立状態へ一気に振上げかつ安定化する制御に成功した。この成果はこれまでどのような非線形制御理論（かつ実験）の研究者も成功しなかった独自の成果で、例えば宇宙ロボットなどの新しい制御方式へ繋がる可能性がある。

また、計量経済学で重要なターンパイク理論に対して新しい解析手法を提案することができた。これは、ハミルトン系の輸送問題の一種として考察し動的システム理論のラムダ補題などを用いる新規性の高い成果である。

研究成果の概要（英文）：Based on the research on optimal control by the principal investigator of this project, it was conjectured that in Hamilton-Jacobi equations of optimal control, much control information is embedded as to achievable controlled motions as well as the possibility of such control.

研究分野：制御理論

キーワード：最適制御 非線形システム ハミルトン・ヤコビ方程式 ハミルトン系 不変多様体理論 ラムダ補題

### 1. 研究開始当初の背景

現代制御理論は線形最適制御に始まり、H 無限大制御理論によって一定の解決が得られたとされる。しかし、非線形システムに対しては、基礎的な最適制御でさえ設計が困難であり、実用とは程遠い状況が長く続いてきた。この理由は HJE を解く有効な手段が存在しなかったことが大きな要因である。これに対し、2008 年に代表者の坂本と van der Schaft によって安定多様体法が提案され、その後数多くの実システムに対する有効性の検証研究が行われた。

本研究は、上記安定多様体法の開発と応用の過程で明らかになった本手法の特徴が、制御系設計論と現代数学のこれまで知られていない関係を示していることを受けたものである。安定多様体法の特徴は、HJE(偏微分方程式)そのものではなく関連するハミルトン系(常微分方程式)を考察することにある。この常微分方程式の不変多様体が最適制御入力を表すフィードバック関数となり、不変多様体上のダイナミクスが閉ループ運動を表す。申請者の一連の研究により、このハミルトン系には極めて豊富な制御情報が埋め込まれていることが分かってきた。特に、非線形性が強い場合や大変位を要する制御では、(線形制御理論では)これまで想像もできなかった合理的な軌道が数多く存在する可能性がある。

### 2. 研究の目的

このような、これまで想像もできなかった合理的な軌道の発見、生成、実システム実現を可能にする理論的、数値計算論的、および設計論的枠組みを開発することが本研究の目的である。このような軌道は非線形システムだけに存在するものであり、線形理論では解析不可能なものである。

### 3. 研究の方法

上記目的を達成するため、本研究では下記のように理論、計算、実験という3方向からのアプローチを取った。

(1) ハミルトン系の不変多様体の幾何学的解析：

(1-1) HJE 方程式の解構造を解析するためのハミルトン系の相空間輸送解析法の開発

(1-2) 安定多様体の摂動理論による二点境界値問題の解法とターンパイク現象の解析

これらはいずれも動的システム理論の不変多様体理論とその摂動理論であるラムダ補題を有効に用いる点に独自性がある。

(2) 数値計算論的考察：

(2-1) Shadowing 理論の活用

(2-2) モデル縮約に対する数値計算論的アプローチ

(3) 制御器設計論の開発と実装ための基礎研究：

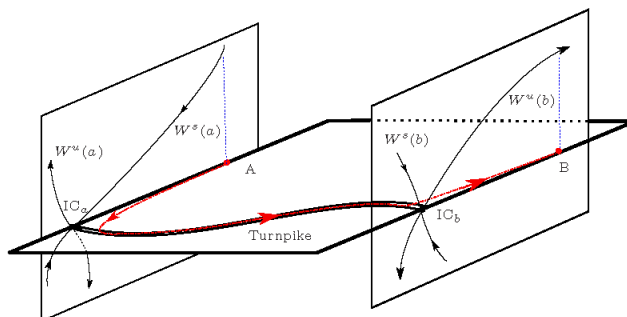
(3-1) HJE 幾何学構造に基づき制御入力写像を構築する手法の開発

(3-2) 実システムに対する適用と検証実験

### 4. 研究成果

ハミルトン系の相空間輸送解析とターンパイク理論の関係：

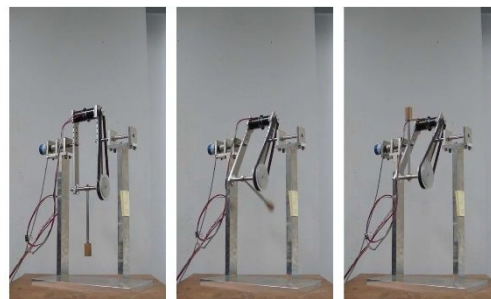
HJE 方程式の解構造の解析を目的としてハミルトン系の相空間輸送解析を行う中で、計量経済学のターンパイク理論との関連が明らかになってきた。これは、次のような日常的に遭遇する高速道路の利用に例えられる。すなわち、出発地点と目的地が十分離れているならば、それらの高速道路の乗り口と出口との位置関係によらず高速道路を利用して移動距離を稼ぐのがもっと効率的な移動方法である。計量経済学における発見とは独立に、制御理論においても同様の認識が制御系の双曲性と関連して議論されていた。Automatica で発表した論文では、ターンパイク現象は不変多様体理論とその摂動理論であるラムダ補題を用いることで幾何学的に解釈が可能であり、これまで非線形システムに対しては局所的な議論しかなされていなかったのに対し、より大域的な解析が可能となることを示した(上図参照)。



**安定多様体と不安定多様体近傍の動的な流れをラムダ補題を用いて解析することでターンパイク現象の解析が容易となることを示した**

Acrobot の振上げ安定化制御(単一フィードバック制御による世界初の成功例):

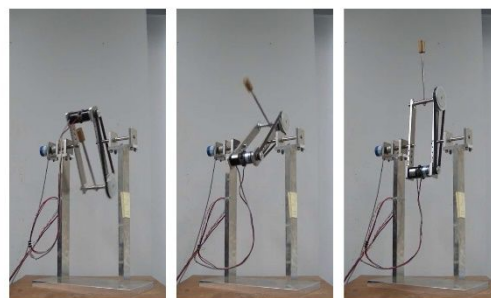
メカニカル系には、系の高い自由度を一つの入力だけで制御しなければならないことやリンクの回転に伴う強い非線形性をもつことなどから、線形制御では扱えない興味深いシステムが多数存在する。Acrobot はその典型例であり、これは鉄棒演技を行う体操選手の力学的特性を模擬する装置である。Acrobot は非線形制御理論の検証対象として長く研究が行われ、その目的の大部分はぶら下がり状態から倒立状態への遷移を如何に行うかにある。IEEE Trans. Control Systems Technology で発表した論文では、この遷移を単一のフィードバック制御で行った実験を発表した。この成果は、シミュレーションも含め世界で初の振上げ安定化制御である。安定多様体法を用いることで広い領域での安定化が可能となり、ぶら下がり点とその安定領域に入るよう安定多様体の計算を行うことによりフィードバック制御を設計した。



1/6

2/6

3/6



4/6

5/6

6/6

**Acrobot の振り上げ制御の様子。体操選手が行うように、脚(金属塊が固定されたリンク)の反動を使い体全体を持ち上げ、逆立ち状態へ遷移している (IEEE Transaction on Control Systems Technology 掲載論文から転載)**

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 N. Sakamoto and M. Nagahara	4. 巻 -
2. 論文標題 The turnpike property in the maximum hands-off control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)	6. 最初と最後の頁 2350-2355
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CDC42340.2020.9304306	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. Sakamoto, D. Pighin, E. Zuazua	4. 巻 -
2. 論文標題 The turnpike property in nonlinear optimal control --- A geometric approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)	6. 最初と最後の頁 2422-2427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CDC40024.2019.9028863	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 Nkamba Leontine Nkague, Manga Thomas Timothee, Sakamoto Noboru	4. 巻 7
2. 論文標題 Stability and Optimal Control of Tuberculosis Spread with an Imperfect Vaccine in the Case of Co-Infection with HIV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Open Journal of Modelling and Simulation	6. 最初と最後の頁 97 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4236/ojmsi.2019.72005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Horibe Takamasa, Sakamoto Noboru	4. 巻 27
2. 論文標題 Nonlinear Optimal Control for Swing Up and Stabilization of the Acrobot via Stable Manifold Approach: Theory and Experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control Systems Technology	6. 最初と最後の頁 2374 ~ 2387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCST.2018.2865762	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 NAKAMURA Takuto, OISHI Yasuaki, SAKAMOTO Noboru	4. 巻 56
2. 論文標題 Nonlinear Optimal Tracking Control for a Periodic Reference Signal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 243 ~ 248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.56.243	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 Sakamoto Noboru, Zuazua Enrique	4. 巻 134
2. 論文標題 The turnpike property in nonlinear optimal control?A geometric approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 109939 ~ 109939
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2021.109939	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 A. Nakashima, I. Ishiguro, N. Sakamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 A palm circle task controller of contact juggling for ball-and-plate system with 6-DOF manipulator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 60th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)	6. 最初と最後の頁 618 ~ 623
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 Beck Fabian, Sakamoto Noboru, Ott Christian	4. 巻 54
2. 論文標題 Control of a Class of Underactuated Systems by Successive Submanifold Stabilization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 352 ~ 358
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2021.11.102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishida Gou, Takamatsu Takahiro, Sakamoto Noboru	4. 巻 54
2. 論文標題 Implementation Approach of Fractional Nonlinear Systems to Stable Manifold Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 43~47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2021.10.326	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sakamoto Noboru	4. 巻 -
2. 論文標題 A Dynamical System View on Nonlinear Optimal Control Analysis and Design	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Smirnov, N., Golovkina, A. (eds) Stability and Control Processes. SCP 2020.	6. 最初と最後の頁 3~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-87966-2_1	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8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 竹田賢矢、坂本登、中島明、古川大輝、星野紘輝、野々雄斗
2. 発表標題 安定多様体法を用いたAcrobotの不安定平衡点間遷移制御実験
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 竹田賢矢、坂本登、中島明
2. 発表標題 Acrobotの最適大域姿勢遷移に関する数値解析的考察
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 2020年

1. 発表者名 Yuki Nishida、Kenya Takeda、Noboru Sakamoto、Akira Nakashima
2. 発表標題 A numerical study on fractional PID control of three-inertia system using exact backlash model
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenya Takeda、Noboru Sakamoto、Akira Nakashima
2. 発表標題 Experimental verification of Acrobot transitions between unstable equilibrium attitudes via stable manifold method
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Noboru Sakamoto
2. 発表標題 A Dynamical System View on Nonlinear Optimal Control Analysis and Design
3. 学会等名 IV Stability and Control Processes Conference in memory of Prof. Vladimir Zubov (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松元大輝、坂本登、中島明
2. 発表標題 安定多様体法による並列回転型倒立振子の振り上げ安定化制御
3. 学会等名 第17回「運動と振動の制御」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島明、牧大裕、笹山泰生、坂本登
2. 発表標題 ボール打ち上げタスクにおける離散時間システムに基づいた制御系設計
3. 学会等名 第9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 2022年

1. 発表者名 椎野功大、磯村真也、坂本登、中島明
2. 発表標題 バックラッシュを含む駆動系への非整数次PID制御系の適用
3. 学会等名 第9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 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Dycon Working Package 2 <a href="https://www.youtube.com/watch?v=klc06k90iVg">https://www.youtube.com/watch?v=klc06k90iVg</a>
--

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
研究分担者	西田 豪  (Nishida Gou)  (80435669)	日本大学・工学部・准教授    (32665)	



6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	中島 明  (Nakashima Akira)  (70377836)	南山大学・理工学部・准教授    (33917)	

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			
スペイン	University of Deusto			
ドイツ	German Aerospace Center (DLR)			