

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06093

研究課題名(和文) シミュレータ駆動型制御系設計に関する研究

研究課題名(英文) A Research on Simulator-driven Control System Design

研究代表者

丸田 一郎 (Maruta, Ichiro)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20625511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の成果はシミュレータの動作が実際のシステムの動作と一致するようデータに基づいた調節を行うための(1)システム同定法に関する成果と、得られたシミュレータに基づいて制御系を設計するための(2)非線形制御系設計法に関する成果の2つにわけられる。
(1)については、仮想制御器を用いて閉ループシステム同定を行う新たな方法を開発した。これは大規模なシステムや人間が操作しているシステムのシミュレータを調節するための有効な手段となる。
(2)については、機械学習分野で使われる方法と制御理論からの知見を組み合わせたアプローチについて研究し、設計問題の易化やデータベースの構築に基づく方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では大規模なシステムや複雑なシステムに対するシミュレータの調節を行うためのシンプルかつ有効な方法を提案しており、今後制御工学のアプローチを生体や社会などの複雑かつ大規模なシステムに応用していく上で重要な成果であると考えられる。
また本研究において、これまで重要でありながら注目されていなかった制御系設計問題の難しさを可視化し、基本的な方策を示したことは、今後制御工学の適用範囲を拡大し様々な効率の向上を図るうえで意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The results of this research are divided into two parts: (1) the system identification method to make the simulator's behavior consistent with that of the real system, and (2) the nonlinear control system design method to design a control system based on the simulator. For (1), we developed a new method for closed-loop system identification using a virtual controller. This is an effective way to adjust the simulator for large systems and human-operated systems. For (2), we studied the approaches to combine the methods used in machine learning and control theory, and proposed methods based on the simplification of design problems and the construction of databases.

研究分野：制御工学

キーワード：制御系設計 システム同定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

制御系設計に関する理論研究は、与えられた制御仕様に対して「最適な」制御器を与えるアプローチを前提とするものが主流である。その最適性の根拠となるのは設計の際に用いるモデルと制御仕様であるが、実用上要求される制御仕様や制御対象となるシステムを理論的に扱える形式で表現することは多くの場合困難である。したがって実際の制御系設計においては、本来の仕様の充足をシミュレータや実機を用いた検証によって確認しつつ、制御系設計理論において前提とする便宜的な仕様およびモデルを試行錯誤的に調節するアプローチ（以下メタチューニングと呼ぶ）がとられることが多い。倒立振り子のような実験室レベルの制御系設計でもメタチューニングに依存する傾向とその困難さは既に顕著であり、対象システムや制御仕様が複雑になるにつれメタチューニングへの依存と困難さはより深刻になる。このように「最適な」制御器の設計を前提としたアプローチが実問題で十分に機能していない例は多いと考えられる。

一方、近年の計算機技術の進歩によって、産業界では高精度なシミュレータを構築し、これに基づいて制御系設計を行うアプローチ、すなわちシミュレータ駆動型制御系設計が一般化しており、制御系設計において必要とされる技術や理論は変化している。

このように、現状は多くの制御系設計がシミュレータ駆動型制御系設計によって行われているものの、対応する理論がない状況であると考えられ、シミュレータ駆動型制御系設計を想定した新たな理論が求められているという背景がある。

2. 研究の目的

従来のロバスト制御では、モデル化誤差や不確かさをモデルの集合として表現し、集合中のどのモデルに対しても制御仕様を満たすことができる「ロバストな」制御器を設計するアプローチをとっていた。これに対し本研究では、少数のパラメータを持ち、その調節によって集合中のどのモデルに対しても制御仕様を満たすことができる「調節容易な」制御器を設計する理論を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、簡易な実験装置とシミュレータを用いた実験によって問題の構造に関する知見を収集し、理論的な考察を行うアプローチをとった。

また、本研究と同様にシミュレータを多用し、自由度が極めて高いモデルを用いて制御器を構成する強化学習の分野における研究に着目し、制御分野の研究との比較を行うことで新たな知見を得ることを試みた。

4. 研究成果

(1) 本研究ではまず、制御器における「調節容易さ」の定式化について検討し、いくつかの実験を行ったのちに、システム同定問題におけるモデルパラメータ調節の効率化について考察した。

システム同定問題とは、対象システムから得られた入出力データに基づいてモデルを構築する問題であり、複雑かつブラックボックスに近いモデル、すなわちシミュレータの調節を行う上で有力なアプローチであることから、シミュレータ駆動型制御系設計において重要である。

考察の結果、実用上重要な不安定なダイナミクスを持つシステムを対象とし、実験やシミュレーションのデータからの情報をモデルに反映する際に、その効率を向上させる一つの方策を得た。

これはモデル出力と実機出力の間の誤差を安定化する仮想的な制御器を導入することにより、誤差の最小化に基づくモデルパラメータの調節を容易にするものである（図1参照）。

さらにこの方法について考察を行い、シミュレータに安定化を補助するための仮想的な制御入力を設けることでシミュレータと実機の乖離が大きい段階でのシミュレータの調節を容易にできるという知見を得た。

また、このアプローチにおいて必要となる仮想制御器の設計を自動化する方法について研究を行い、通常の規範に基づく自動設計は強力な仮想制御器を指向するものの、それが必ずしもパラメータ調節に寄与せず、仮想制御器の強さを制限する機構を設けることでより調節の精度を改善できることがわかった。

これらの結果は外的要因を排除できないシステムから得られたデータをもとに学習を行う際のシンプルかつ有効な戦略を示しており、重要な成果であると考えられる。

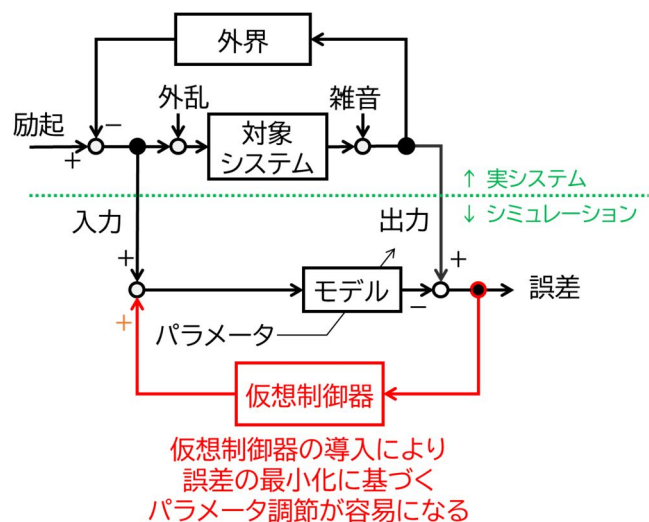


図 1 仮想制御器を用いたシステム同定法の概要

また、システム同定はデータをもとにモデルパラメータを調節するものであるが、データをもとに制御器のパラメータを調節する制御系設計問題はシステム同定問題と強い関連を持ち、したがって、得られたパラメータ探索を容易にする方策は、本研究の課題である制御系設計問題に対しても応用可能であると考えられ、この点でも有意義な成果が得られたと考えられる。

(2)つぎに制御系設計について、機械学習の分野における研究に関する調査をもとに確率的勾配降下法を調節アルゴリズムとして議論を行った。その結果、制御問題を一旦、線形制御理論が適用可能な問題にまで易化し、確立されている線形制御理論に基づいて得られた設計をもとに、徐々に本来の問題に戻しながら制御器の設計を更新していくことで、同じ調節アルゴリズムでも良好な設計が得られるという知見を得た。

また、これをさらに発展させて、設計の初期においては制御器の構造を単純なものに制約し、徐々に制約を弱めることで最終的には複雑な制御器を設計する方法と、制御器が満たすべき重要な条件の違反に罰則を与えつつ調節を行う方法を考案し、有効性を確認した。

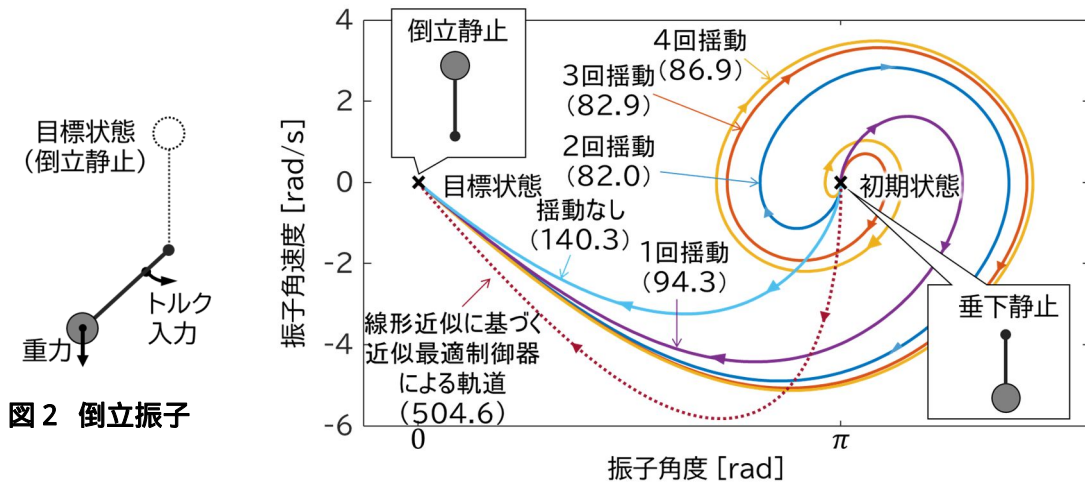


図3 局所最適軌道の一部(括弧内は所要コスト・2回揺動が最適)

(3)さらに、研究の過程において、局所最適な方策が複数存在する問題に対する制御器の調節が極端に困難であることが判明したので、この問題について考察した。例えば、図2に示す単純な倒立振子を、入力エネルギーと収束速度を評価するコストを考慮して振り上げる問題は図3に示すような複数の局所最適軌道を持つが、この種の問題に対しては制御器の調節が極端に困難であり、新しいアプローチが必要となる。

これについて図4に示すような最適軌道データベースを構築することで問題の構造を可視化し、比較的小規模な問題については制御を行えることを示した。

この成果はまだ研究の初期段階であるが、これまで着目されていなかった実用上重要な問題を可視化した点で重要である。

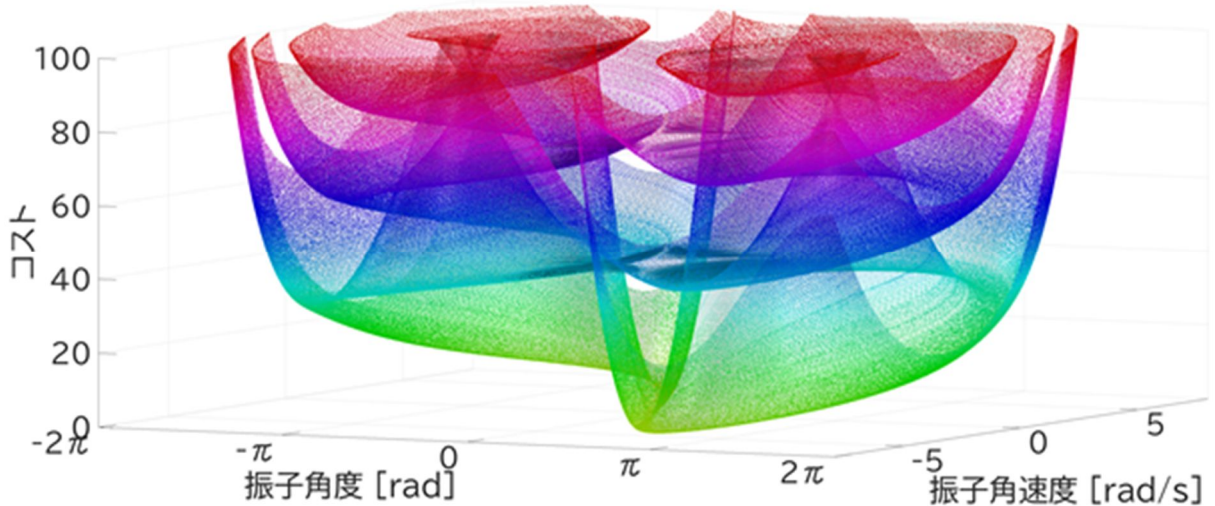


図4 倒立振子振り上げ問題における最適軌道データベース。点はある状態からの最適軌道データの存在と、その所要コストを示す。複数の局所最適軌道がデータの多層構造として現れる

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Maruta Ichiro, Nishida Shuhei, Fujimoto Kenji | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 A Study on Numerical Solutions of Hamilton-Jacobi-Bellman Equations Based on Successive Approximation Approach | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration | 6. 最初と最後の頁 157 ~ 163 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/jcmsi.13.157 | 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 Fujimoto Yusuke, Maruta Ichiro, Sugie Toshiharu | 4. 巻 63 |
| 2. 論文標題 Input Design for Kernel-Based System Identification From the Viewpoint of Frequency Response | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control | 6. 最初と最後の頁 3075 ~ 3082 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2018.2791464 | 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 Fujimoto Yusuke, Maruta Ichiro, Sugie Toshiharu | 4. 巻 印刷中 |
| 2. 論文標題 Optimal Distance Function for Locally Weighted Average Prediction of Just-in-Time Methods | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Asian Journal of Control | 6. 最初と最後の頁 印刷中 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asjc.1698 | 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15件（うち招待講演 1件/うち国際学会 6件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hirofumi Beppu |
| 2. 発表標題 A Study on Solutions to Finite-Time Optimal Control Problems by Numerical Gaussian Processes |
| 3. 学会等名 The 12th Asian Control Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 西田 周平 |
| 2. 発表標題 逐次近似を用いたHamilton-Jacobi-Bellman方程式の数値解法に関する一考察 |
| 3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shuhe Nishida |
| 2. 発表標題 A Study on Numerical Solutions of Hamilton-Jacobi-Bellman Equations Based on Successive Approximation Approach |
| 3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 丸田 一郎 |
| 2. 発表標題 勾配法にもとづくシステム同定の実装と動向 |
| 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 大津 智宏 |
| 2. 発表標題 RRTを用いたデータ駆動型最適制御におけるデータベースの構築 |
| 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 Tomohiro Otsu, Ichiro Maruta, Kenji Fujimoto |
| 2. 発表標題 Nonlinear Optimal Control Base on Numerical Solutions of Hamilton-Jacobi-Bellman Equations by Stochastic Gradient Descent |
| 3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ichiro Maruta, Toshiharu Sugie |
| 2. 発表標題 Stabilized Prediction Error Method for Closed-loop Identification of Unstable Systems |
| 3. 学会等名 The 18th IFAC Symposium on System Identification (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 丸田 一郎, 大津 智宏, 藤本 健治 |
| 2. 発表標題 カリキュラム学習的なアプローチによる非線形最適制御器の設計 |
| 3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大津 智宏, 丸田 一郎, 藤本 健治 |
| 2. 発表標題 確率的勾配降下法を用いたHamilton-Jacobi-Bellman方程式の数値解に基づく非線形最適制御 |
| 3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 丸田一郎 |
| 2. 発表標題 機械学習の流儀で非線形最適制御問題を解く |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会2019年総合大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yusuke Fujimoto |
| 2. 発表標題 On a Relationship between Integral Compensation and Stochastic Gradient Descent |
| 3. 学会等名 SICE Annual Conference 2017（国際学会） |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ichiro Maruta |
| 2. 発表標題 Traffic Control at Intersection with Linear Traffic Lights |
| 3. 学会等名 The 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2017)（国際学会） |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 田邊航介 |
| 2. 発表標題 ノンパラメトリックPWAモデルに基づくシステムの最適制御 |
| 3. 学会等名 第5回制御部門マルチシンポジウム |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 丸田一郎 |
| 2. 発表標題 データでみる機械学習と制御理論の類似点と相違点 |
| 3. 学会等名 第4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 2017年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 岸本紘明 |
| 2. 発表標題 安定化出力誤差法を用いた非線形系の閉ループ同定 |
| 3. 学会等名 第4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 2017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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|