

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15017

研究課題名（和文）超高自由度制御器のデータ駆動設計

研究課題名（英文）Data-driven design of controller with ultra-high degree of freedom

研究代表者

藤本 悠介 (Fujimoto, Yusuke)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：60826204

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）：本研究の目的は、一度の予備実験のデータから適切な制御器を構成する理論の確立であった。通常の制御器においては、自由度（可調整パラメータの数）は少ない場合数個、多くても十数個程度である。しかし、制御対象のシステムが複雑化する現在、この程度の自由度では適切な制御器が構成できない場合もある。そこで本研究では数百から数千に上る自由度を有する制御器をデータから調整する方法を研究した。より詳細には、調整方法の確立、ノイズ影響の軽減方法の確立、実機での検証などがあり、特にノイズ影響の軽減に関しては関連する正則化という理論の観点からもいくつかの成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

制御工学自身は、モータあるいはそれを組み込んだロボットハンド、車両の速度制御など多様かつ産業上も重要な応用を数多く持つ。通常は対象の数理モデルを基に制御器を設計するが、制御対象は年々複雑化しており、モデルを得ること自体が難しい。そこで、データから直接制御器を設計するデータ駆動制御が近年注目されている。一方で既存のデータ駆動制御は高々十数個程度の可調整パラメータからなり、極めて複雑な対象に対しては限定的な性能しか出せない。そこで本研究では数百から数千ものパラメータを持つ制御器をデータから設計した。ただし、パラメータ数が多いとノイズの影響を受けやすい。その影響の低減が本研究の一つの主眼であった。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project is to design a controller in a data-driven manner especially from the data observed in one preliminary experiment. Although typical controllers have several (up to dozens of) parameters, such degrees of freedom would be small for control of a complex system. Hence this work focused on data-driven designs of controller with hundreds/thousands of parameters. In more detail, we established some methods to tune parameters of such ultra-high degree of freedom controllers, gave noise reduction methods, and validated their effectiveness through practical experiments. In particular, related to noise reduction methods we developed some methods and made some contributions from the viewpoint of regularization theory.

研究分野：制御工学

キーワード：データ駆動制御 正則化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

対象を自在に制御することを目的とする制御工学は、モータやそれを用いたロボットハンド、エンジン、化学プラント、航空機など様々な応用を持ち、産業上重要なものである。古典的には制御対象の数理モデルを構築し、そのモデルを基に制御器を設計するアプローチが取られていたが、制御対象が複雑化するにつれて数理モデルの構築自体が困難な課題となった。このような流れから、観測データから直接制御器を設計するデータ駆動制御が2000年ごろから注目されるようになり、様々な手法が提案されてきた。

一方で、上記のデータ駆動制御の多くは数個、多くて十数個程度のパラメータを持つ制御器を想定していた。しかし、制御対象の複雑化に伴い、その程度の自由度の制御器では十分な性能が達成できないような場合が生じてきた。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では数百から数千のパラメータを持つ制御器のパラメータを、観測データを基に調整する方法を確立することを目的とした。なお、一般にパラメータ数が多くなるほど観測データ中のノイズの影響を大きく受ける。この現象は過適合と呼ばれるものであり、本研究の主眼はこの過適合をいかに回避するかという点にあった。

3. 研究の方法

上記の目的に直結するものから順に、下記の三つの研究を実施した。

- A) ノイズの除去を含むパラメータ調整法の確立と実証
- B) 多数のパラメータで記述される動的システムに対する正則化の設計
- C) ベイズ的な手法に基づくパラメータ調整法の検討

Aは上記の目的に直結するものである。また、BはAにおける要素技術として利用するが、それ単体としても応用があるものであるため別項目として記載する。更に、この正則化理論はベイズ推定とも深い関係があり、そこからデータ駆動制御のためのベイズ推定とその応用に関する研究がいくつか着想されたため、実施した。

4. 研究成果

上記のA, B, Cそれぞれについて列挙する。

- A) パラメータの調整に際しては、フィードフォワード制御器を設計することで目標軌道への追従を達成する方法を検討した。この際にフィードフォワード制御器をインパルス応答の形で記述することにより制御器の自由度を数百～数千程度とするようにした。結果として、フィードフォワード制御器の調整に利用可能な Estimated Response Iterative Tuning やフィードフォワード入力的设计に使用可能な Iterative Learning Control の発想と、後述する正則化を組み合わせる方法を提案し、有効性を実機により検証した。
- B) 動的システムに特化した正則化として、カーネル法を利用する方法について検討した。具体的には、安定な動的システムのインパルス応答は指数収束することを利用し、インパルス応答に対して指数収束性を持たせる正則化について提案した。また、インパルス応答をフーリエ変換したものである周波数応答がローパス/ハイパス特性を持つ場合の正則化についても提案した。望ましいフィードフォワード制御器は必ず安定であり、かつローパス特性を持つことが多い。したがって、これらの正則化をA)の成果などに活用した。
- C) カーネル法を用いた応用として、ベイズ最適化によりデータ駆動制御を行う方法についても模索し、いくつかの方法を提案した。これはB)を更に発展させたものと考えられるが、ベイズ最適化の特徴からC)については自由度の低い制御器での実装に留まる。とはいえ、上述のように正則化(カーネル法)は本研究に不可欠のものであり、そこから着想されたC)の項目も本研究の成果として重要なものであると考える。

上記A)の実際の成果を下記に示す。図1は制御対象であるフレキシブルアームである。この実験機は、回転するモータの上に柔軟構造物が負荷として設置されている。アームがしなるために挙動が複雑になるため、制御に工夫が必要であることが知られている。少し数的に表現すると、この制御対象は偏微分方程式で記述されるべきものであり、低次数の伝達関数での近似は難しいものと言える。

図2に上記制御対象の角度制御の結果を示す。横軸が時間、縦軸が角度(rad)である。今回は半周回転させる制御を行っている。破線が目標軌道、細い実線が初期実験の軌道、太い実線が

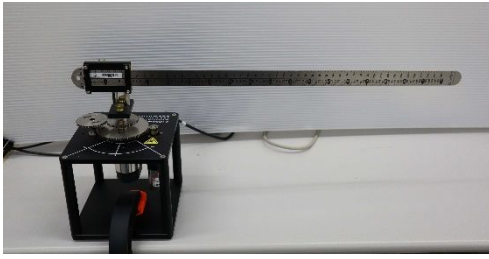


図 1 実験機

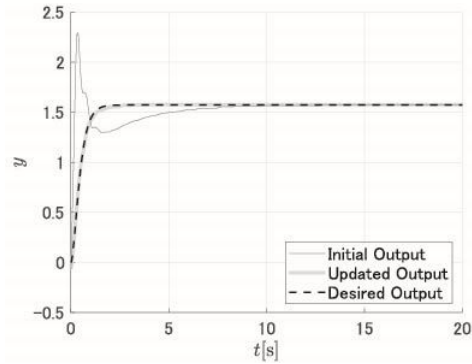


図 2 制御結果

提案法により設計された制御器を用いた場合の結果である．初期実験では目標軌道には追従できていないこと，提案法を用いた場合目標軌道へほぼ完全な追従ができていることが確認できる．なお，この実験で用いた制御器の自由度は 4000 であった．通常の制御器の自由度が高々 10 程度であることから考えると，極めて高い自由度を有した制御器であると言える．

上記の結果について，二点確認しておく．第一に，上述の通りこの制御対象は偏微分方程式で記述されるべきものである．本研究では，この複雑な対象を制御するために超高自由度な制御器を利用し，その有効性を検証した．すなわち，ここでは自由度が高いことが主要な役割を果たしている．第二に，それほど高い自由度の制御器をたった一回の予備実験から調整している点にも注意が必要である．上記の実験では，図 2 の細かい実線のデータのみから制御器を更新した．このような少データからの更新が可能であるのは，要素技術 B) で開発している正則化が有効に働いているためである．

以上のように，上記の実験結果は「超高自由度な制御器を」「一回の実験データから」更新することに成功したことを示し，提案法の有効性についても明らかにした．

なお，上記は一度の実験データから更新する方法であったが，「一度」という条件を外して反復的な更新を許容した場合，一定条件下で目標軌道への収束を理論的に保証することができる．このときの挙動を図 3 に示す．横軸が時間，縦軸が角度であり，破線が目標軌道を表す．また，1 回目，5 回目，10 回目，20 回目の反復の結果を示している．回数が増えるごとに目標軌道へ収束していることがわかる．

こちらは反復回数が増えるために実験にかかる時間は増えてしまうが，一方で学習が上手くいくことが理論的に保証されているという点で大きな利点を持つ．状況によってはこちらの手法が役に立つと思われる．

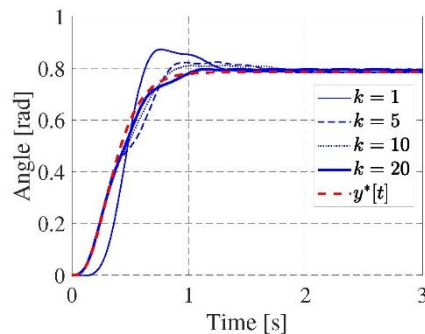


図 3 収束保証付きの方法の実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 徳重達樹, 藤本悠介, 永原正章	4. 巻 57
2. 論文標題 電動車いすのLPV-FIRモデリングとそのモデル予測制御への応用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 156 ~ 161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.57.156	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 Yusuke Fujimoto	4. 巻 5
2. 論文標題 Kernel Regularization in Frequency Domain: Encoding High-Frequency Decay Property	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 367--372
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2020.3001879	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 Yusuke Fujimoto, Tatsuki Tokushige, Masaaki Nagahara	4. 巻 13
2. 論文標題 Bayesian LPV-FIR Identification of Wheelchair Dynamics and Its Application to Feedforward Control	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 208 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/jcmsi.13.208	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	4. 巻 19
2. 論文標題 Estimated Response Iterative Tuning with signal projection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IFAC Journal of Systems and Control	6. 最初と最後の頁 100179 ~ 100179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacsc.2021.100179	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, Sato Hiroki, Nagahara Masaaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Controller tuning with Bayesian optimization and its acceleration: Concept and experimental validation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Asian Journal of Control	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) 10.1002/asjc.2847	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 阿蘇大志、藤本悠介	4. 巻 58
2. 論文標題 インパルス応答表現を用いたERITの実機検証	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 141 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.58.141	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 佐藤宏樹, 藤本悠介	4. 巻 58
2. 論文標題 DD-CLUTと準最適なVRFTの等価性について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	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) 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 佐藤宏樹, 藤本悠介	4. 巻 58
2. 論文標題 ベイズ最適化による制御器パラメータ調整のためのカーネル関数	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	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) 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 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Yusuke Fujimoto
2. 発表標題 Kernel Regularization in Frequency Domain: Encoding High-Frequency Decay Property
3. 学会等名 59th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Fujimoto
2. 発表標題 Efficient Implementation of Kernel Regularization based on ADMM
3. 学会等名 19th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Fujimoto
2. 発表標題 Time-Frequency Regularization for Impulse Response Estimation
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿蘇大志
2. 発表標題 インパルス応答表現を用いたERITの実機検証
3. 学会等名 第8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 2021年

1. 発表者名 Yusuke Fujimoto, Hiroki Sato, Masaaki Nagahara
2. 発表標題 PID Controller Tuning with Bayesian Optimization and Its Acceleration
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤本悠介
2. 発表標題 ベイズ最適化に基づくデータ駆動制御
3. 学会等名 電気学会制御研究会「データ駆動制御および制御技術一般」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本悠介
2. 発表標題 信号射影に基づくEstimated Response Iterative Tuning
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 藤本悠介
2. 発表標題 カーネル法による連続時間線形システムの推定
3. 学会等名 クープマン作用素と機械学習・工学・物理学との接点 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuki Tokushige
2. 発表標題 Bayesian LPV-FIR Identification of Wheelchair Dynamics
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fumika Abe
2. 発表標題 Room Impulse Response Estimation with Kernel-Based Regularization
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Fujimoto
2. 発表標題 Kernel Regularization for Low-Frequency Decay Systems
3. 学会等名 60th IEEE Conference Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Fujimoto
2. 発表標題 Iterative Learning Control Not to Interfere with Feedback Control
3. 学会等名 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 Hiroki Sato
2. 発表標題 Kernel Function Specialized for Controller Tuning via Bayesian Optimization
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小園貴寛
2. 発表標題 入力制約下で最適サーボ系を実現するデータ駆動型フィードフォワード入力設計
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 藤本悠介
2. 発表標題 新しいIPlant-Inversion型反復学習制御について
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 田中 聡久、藤本 悠介、永原 正章	4. 発行年 2021年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 256
3. 書名 線形システム同定の基礎	

〔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
---------	---------