

令和元年6月9日現在

機関番号：22604
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2016～2018
課題番号：16K06423
研究課題名（和文）分散評価に基づくデータ駆動制御器調整の理論展開とプロセス制御応用に関する研究

研究課題名（英文）Study on Theoretical Development and Process Control Applications of Data-driven Controller Parameter Tuning Based on Variance Evaluation

研究代表者
増田 士朗（MASUDA, SHIRO）
首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：60219334
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、分散評価に基づくデータ駆動制御器調整に対して、システム同定や制御性能評価の観点から新たな理論課題を設定し、その課題を解決することを行った。具体的には、閉ループ同定や制御性能評価に関連する研究、構造が限定された制御器を用いた新しい手法の提案と理論解析、非線形系を考慮した場合やフィードフォワード補償器の設計、正則化を導入する手法やプレフィルタの設計法の提案などを行った。これらの研究成果は、査読付き論文誌14件、国際会議発表22件、国内発表38件、によって報告を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

定値制御系における制御器調整は、事業所あたりでは数百～数千あると言われており、簡易な制御器調整が求められているが、本研究の成果により、多様な状況の定値制御系に対して、データ駆動制御器調整が適用できる可能性が広がった。また、データ駆動制御手法において、定値制御系に焦点を当てた研究はこれまで十分に行われていなかったため、本研究の研究成果は、制御理論や制御アルゴリズム開発に関する研究に新しい可能性を与えたとと言える。

研究成果の概要（英文）：This research project settles theoretical problems, and provides solutions of the problem for direct control parameter tuning methods based on variance evaluation for disturbance attenuation. In detail, the analysis on theoretical issues on closed-loop identification, performance assessment, the development for the case of restricted controller structures and nonlinear systems, the extension to feedforward controller design, introduction of L2 regularization, and pre-filter design for performance improvement were tackled and their research results have been published. The 14 journal papers, the 22 international conference papers, and the 38 domestic conference papers et al. have been published as research results.

研究分野：システム制御工学

キーワード：データ駆動型制御器調整 外乱抑制 分散評価 制御性能評価監視 システム同定 PID制御 適応制御
化学プロセス制御

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

1. 研究開始当初の背景

制御対象のモデルを使わないでデータから直接、制御器調整を行なうデータ駆動制御器調整は、モデルを求めることが困難な場合やパラメータ調整の効率化が求められる場合に有効である。このようなデータ駆動制御器調整に対して研究代表者は、平成 25 年度～平成 27 年度までの科研費基盤研究 (C) において、データ取得が容易な定値制御データのみを用いて制御器調整を行なう手法の開発に着手した。この研究では、図 1 のイメージ図に示されるように、制御量の分散評価に着目し、制御器調整によりプロセス変数の分散評価を改善することを目指す。

この研究によって得られた知見は、1) 化学プロセスへの有効性が十分に期待できる。2) 分散を評価基準にした制御性能評価 / 監視との関連が深い。3) 閉ループ同定と問題の構造が類似している。にまとめられる。これらの研究成果により、定値制御データを用いて制御器パラメータを直接的に調整するアプローチは、産業プロセスの要求にマッチしつつ、一方で理論背景が明確で将来的な体系化が期待できる手法であることが示された。

しかし、このアプローチが実際のプロセスに広く適用されていくためには、開発された手法の適用事例を増やすことを目指すだけでは十分でなく、モデルに基づいた解析や評価ならびに制御器調整と制御性能評価との定量的な関係の明確化といった多岐にわたる理論的な検討が必要となる。また、実プロセスは、一般に非線形、多変数系と考えられるので、それらの場合への対応が求められていた。本研究開始時の状況は以上の通りである。

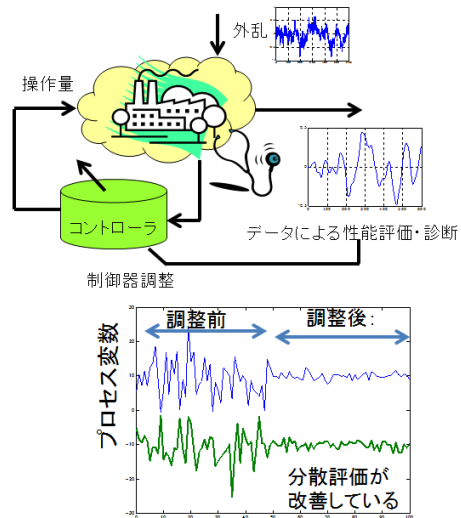


図 1: 分散評価に基づくデータ駆動制御器調整

2. 研究の目的

本研究では、分散評価に基づくデータ駆動制御器調整に対して、システム同定や制御性能評価の観点から新たな理論課題を設定し、その課題を解決することにより制御、同定、評価を融合させた新しい制御系設計理論を構築することを目的とする。さらに、本研究では実プロセスへの応用を想定した課題に取り組む。具体的には、1) 非線形系への拡張、2) 多変数系への拡張、3) 測定可能外乱からのフィードフォワード補償器に対するパラメータ調整法の導出、を行なう。また、これらの研究を通して、システム同定や制御性能評価法の観点から設定された理論課題を解決し、制御、同定、評価を融合させた新しい制御系設計理論を構築することを目指す。さらに、実プロセスへの応用を想定して基本制御構造を拡張するとともに、その計算アルゴリズムを開発する。

3. 研究の方法

本研究では、システム同定や制御性能評価の観点から設定された理論課題を解決し、制御、同定、評価を融合させた新しい制御系設計理論を構築するために、つぎの課題に取り組む。

- 閉ループ同定に関連する理論課題：閉ループ同定法における可同定性条件に相当する条件の導出やむだ時間などのプロセスの構造推定法の導出を行なう。
- 制御性能評価に関連する理論課題：最小分散制御に基づく制御性能評価手法との関連について検討する。また、外乱モデルの推定方法の検討やロバスト制御に基づく制御性能評価法を検討する。
- 構造が限定された制御器を用いた場合の理論課題：構造が限定された制御器を用いた場合の理論解析および繰り返し設計時の収束性の検討を行なう。この研究は、構造が限定された制御器として PID 制御器を想定すると、PID 制御における制御器調整、制御性能評価、システム同定に関する理論的検討を行なうことに相当する。

さらに、実プロセスを想定した計算アルゴリズムの拡張として、a) 非線形要素が含まれる場合に拡張する。b) データ駆動制御器設計をフィードフォワード補償器へ拡張する。c) データ駆動制御器設計法に正則化法を導入する。などに取り組む。具体的には、a) については、RBF ネットワークを利用した一般非線形関数を同定できる補償要素やフィードバック線形化手法などをデータ駆動制御器調整に適用したアルゴリズムを導入し、その効果を確認する。b) については、注目している制御ループに加わる外乱と相関が高い信号が計測できる場合、その信号からのフィードフォワード補償をデータから直接設計する手法の開発に取り組む。c) については、システム同定において、データ数に雑音が多く含まれる場合に有効とされている L2 正則化法などデータ駆動型の制御器設計に展開することを検討する。

一方、目標値応答特性の改善を制御目的とするデータ駆動制御器設計に対しても取り組みを続け、それらの研究成果を定値制御データを用いたデータ駆動制御器設計に役立てることも行なう。特に定値制御データを用いたデータ駆動制御にプレフィルタの設計を行なう研究は、これ

まで行われていなかったため、目標値応答特性の改善に対して研究が進められているプレフィルタの設計法は、定値制御データを用いた場合にも有効なアプローチを提供することが期待できる。

4. 研究成果

研究成果は、査読付き論文誌へ 14 件、国際会議発表が 21 件、国内会議 39 件を発表し、十分な研究成果を挙げるとともに、特に国内の学会発表の活性化に貢献できた。具体的な内容を以下のように分類する。

- a) 閉ループ同定に関連する理論課題
雑誌論文、 、学会発表、
- b) 制御性能評価に関連する理論課題
雑誌論文、 、学会発表、
- c) 構造が限定された制御器を用いた場合の理論課題
雑誌論文、 、 、 、学会発表、 、 、 、 、 、
- d) 非線形・多変数系への検討
雑誌論文、学会発表、^①
- e) フィードフォワード補償器の設計
学会発表、 、
- f) 正則化法を導入する手法への拡張
学会発表、^②
- g) プレフィルタの設計に関する検討
雑誌論文、 、 、 、 、 、 、学会発表、 、 、 、 、 、
- h) 新しい展開に向けた取り組み
学会発表

上記のように分類された研究成果の概要は下記の通りである。

- a) 定値制御系の確率外乱で駆動された入出力データを用いて周期性外乱およびむだ時間を推定する手法を導出した。閉ループ同定と同じ問題設定の中で新しいシステム同定手法を提案した点に特徴がある。さらに、フィードバック制御不変量から外乱モデルを推定する手法も導出した。
- b) 制御性能評価で用いられる制御不変量を利用したデータ駆動制御器調整法を導出した。非最小位相推移系への拡張も行った。
- c) 線形パラメータ表現された制御器に対して最小分散制御を制御目的とするデータ駆動制御器調整法を与え、その手法の最適性について理論検討を行った。また、構造を限定した制御器として PID 制御に着目し、PID ゲインの調整法を 1 回の入出力データを用いる方法と繰り返し調整を用いる方法について検討を行った。
- d) 非線形ダイナミクスが含まれるシステムに対して、内部モデル原理を用いる手法、フィードバック線形化を用いる手法、RBF ネットワークによる未知関数を同定する手法などを提案した。
- e) 外乱と相関性の高い信号が計測される場合において、計測された信号からのフィードフォワード補償器をデータ駆動制御手法によって求める方法を与えた。また、計測された信号を用いて制御器調整を行う手法についても検討を行った。
- f) 定値制御系における一般化最小分散制御器の制御器パラメータをデータ駆動制御によって求めるときに L2 正則化法を導入する手法を検討した。また、繰り返し調整を行う場合の収束性についても検討を大なった。
- g) データ駆動制御では、データによって導出された評価関数を最適化することによって調整された制御器パラメータを求める。このとき、データから構成された評価関数をできる限り本来の制御目的を与える評価関数に近づけるために、初期データに対してプレフィルタを適用することが有効である。ここでは、そのプレフィルタの設計に関する検討を目標値追従問題に対する場合について検討した。また、そこで得られた知見をもとに定値制御系に対する分散最小化を目的とする制御器パラメータ調整について新しく提案を行った。
- h) データに基づく制御器調整の新しい展開を探るため、非線形最適制御を用いた I-PD 制御系の構成法や 2 階層の最適化問題に定値制御系に対するデータ駆動制御系設計を応用する手法、定値制御系によるデータによって Iterative Feedback Tuning (IFT) 法における勾配推定を行う方法を与え、定値制御系のデータ駆動制御器調整の新しい展開を与えた。

定値制御系における制御器調整は、事業所あたりでは数百～数千あると言われており、簡易な制御器調整が求められているが、本研究の成果により、多様な状況の定値制御系に対して、データ駆動制御器調整が適用できる可能性が広がった。また、データ駆動制御手法において、定値制御系に焦点を当てた研究はこれまで十分に行われていなかったため、本研究の研究成果は、制御理論や制御アルゴリズム開発に関する研究に新しい可能性を与えたと言える。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 14 件)

増田士朗、朴 鍾浩、松井義弘、閉ループステップ応答データを用いたデータ駆動 I-PD ゲイン調整、電気学会論文誌 C、査読有、Vol. 139、No.8、2019、掲載予定

Shogo Okada、Shiro Masuda、Data-driven minimum variance control using regulatory closed-loop data based on the FRIT method、Electronics and Communications in Japan、Vol. 102、No. 4、2019、28-34

DOI: 10.1002/ecj.12156

岡田将吾、増田士朗、線形パラメータ表現された制御器に対するデータ駆動型最小分散制御、電気学会論文誌 C、査読有、Vol. 139、No.4、2019、469-475

DOI: 10.1541/ieej.139.469

梶原諒太、増田士朗、松井義弘、操作量評価を考慮した閉ループステップ応答データを用いたデータ駆動型制御器調整における規範モデルの設計法、電気学会論文誌 C、査読有、Vol. 139、No. 4、2019、476-481

DOI: 10.1541/ieej.139.476

岡田将吾、増田士朗、FRIT 法に基づく定値制御データを用いたデータ駆動型最小分散制御、電気学会論文誌 C、査読有、Vol. 138、No. 12、2018、1580-1585

DOI: 10.1541/ieej.138.1580

津久井文哉、増田士朗、フィードバック線形化を用いたデータ駆動型制御器調整、電気学会論文誌 C、査読有、Vol. 137、No. 7、2017、891-897

DOI: 10.1541/ieej.137.891

植松凌太、増田士朗、一般化最小分散評価に基づく閉ループ同定と周期外乱の推定、計測自動制御学会論文誌、査読有、Vol. 53、No. 9、2017、501-508

DOI: 10.9746/sicetr.53.501

Shiro Masuda、Xianda Kong、Koki Udagawa、Yoshihiro Matsui、Virtual Feedback Reference Tuning Using Closed Loop Step Response Data in Frequency Domain、Electronics and Communications in Japan、査読有、Vol. 100、No. 10、2017、24-31

DOI: 10.1002/ecj.11971

梶原諒太、増田士朗、松井義弘、閉ループステップ応答データを用いた FRIT における最適プレフィルタ設計、計測自動制御学会論文誌、査読有、Vol. 54、No. 2、2018、238-246

DOI: 10.9746/sicetr.54.238

増田士朗、孔憲達、宇田川光輝、松井義弘、周波数領域における閉ループステップ応答データを用いた Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT)、電気学会論文誌 C、査読有、Vol. 136、No. 5、2016、715-721

DOI: 10.1541/ieej.136.715

石井友貴、増田士朗、非最小位相系に対する分散評価に基づく外乱抑制 FRIT 法、計測自動制御学会論文集、査読有、Vol. 52、No. 5、2016、249-256

DOI: 10.9746/sicetr.52.249

植松凌太、増田士朗、一般化最小分散評価に基づく閉ループ同定とむだ時間の推定、計測自動制御学会論文集、査読有、Vol. 52、No. 6、2016、330-337

DOI: 10.9746/sicetr.52.330

植松凌太、増田士朗、CARMA モデルにおける未知な外乱特性に対するデータ駆動型一般化最小分散制御、電気学会論文誌 C、査読有、Vol. 136、No. 7、2016、907-914

DOI: 10.1541/ieej.136.907

横山涼子、増田士朗、一般化最小分散評価に基づく定値制御データからのデータ駆動型 PID ゲイン調整、電気学会論文誌 C、査読有、Vol. 137、No. 1、2017、106-113

DOI: 10.1541/ieej.137.106

[学会発表](計 60 件)

Sota Takahashi and Shiro Masuda、I-PD Controller Gain Tuning using a Nonlinear Optimal Control Design Method for Helicopter Attitude Control Model、The 18th International Conference on Control、Automation and Systems (ICCAS 2018)、October 17-20、2018 YongPyong Resort、PyeongChang、Korea

Shunsuke Nagumo and Shiro Masuda、Data-driven Feedforward Controller Tuning for Disturbance Attenuation Property、SICE Annual Conference 2018 Sep. 11-14、Nara Kasugano International Forum、Japan、2018

Shiro Masuda and Yoshihiro Matsui、Data-driven Optimal Parameter Tuning of Controller and Reference Model for Continuous-time VRFT Using Closed-loop Step Response Data、SICE Annual Conference 2018 Sep. 11-14、Nara Kasugano International Forum、Japan、2018

Tsukasa Kono and Shiro Masuda、Performance Improvement in Iterative Data-driven PID Gain Tuning Based on Generalized Minimum Variance Regulatory Control、ECTI-CON 2018、July 18 - 21、Chiang Rai、Thailand、2018

- Shiro Masuda, Yoshihiro Matsui, and Jongho Park, Pre-filter Design for Two-degree-of-freedom Continuous-time VRFT Using Closed-loop Step Response Data, IFAC INCOM 2018, Bergamo, Italy, June 10-13th 2018
- Fumiya Tsukui, Shiro Masuda, Non-Iterative Data-Driven Controller Parameters Tuning of Feedback Linearizing Controller, 2017 11th Asian Control Conference (ASCC) Gold Coast Convention Centre, Australia, December 17-20, 2017, pp. 525-530, 2017
- Ryota Kajiwara, Shiro Masuda, Yoshihiro Matui, Pre-filter Design for Non-iterative Data-driven Controller Parameters Tuning Using Closed-loop Step Response Data, 2017 11th Asian Control Conference (ASCC) Gold Coast Convention Centre, Australia, December 17-20, 2017, pp. 519-524
- Shogo Okada, Shiro Masuda, Data-driven Linearly Parametrized Controller Design Based on Minimum Variance Evaluation, 2017 11th Asian Control Conference (ASCC) Gold Coast Convention Centre, Australia, December 17-20, 2017, pp. 513-518
- Jongho Park, Shiro Masuda, Continuous-time I-PD Gain Tuning for Helicopter Attitude Control Model Based on VRFT Using Closed-loop Step Response Data, 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2017) Oct. 18-21, 2017, Ramada Plaza, Jeju, Korea, pp. 97-98
- Ryota Kajiwara, Shiro Masuda, Yoshihiro Matsui, A Design Method for an Optimal Pre-Filter in FRIT Using Closed-loop Step Response Data, Proceedings of the SICE Annual Conference 2017, September 19-22, 2017, Kanazawa University, Kanazawa, Japan, pp. 255-258
- Shogo Okada, Shiro Masuda, Data-Driven Minimum Variance Control Using Regulatory Closed-Loop Data based on the FRIT Method, Proceedings of the SICE Annual Conference 2017, September 19-22, 2017, Kanazawa University, Kanazawa, Japan, pp. 253-254
- Yoshitada Shimamoto, Shiro Masuda, Iterative Data-Driven Generalized Minimum Variance Regulatory Control via L2-regularization, 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA) August 27-30, 2017, Kohala Coast, Hawai'i, USA, pp. 1923-1928
- Shiro Masuda, Yoshihiro Matsui, Data-driven feedback-feedforward controller design from closed-loop step response data based on virtual reference feedback tuning, Chinese Control Conference, CCC pp. 9637-9642
- Ryoko Yokoyama, Shiro Masuda, Convergence property for iterative data-driven PID gain tuning based on generalized minimum variance regulatory control, 2017 6th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, AdCONIP 2017, pp. 511-516
- Ryoko Yokoyama and Shiro Masuda, Data-Driven Generalized Minimum Variance Regulatory Control with Constrained Controller Structure, 2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Melbourne, Australia, 2016, pp. 17-22
- Ryota Uematsu and Shiro Masuda, Data-Driven Generalized Minimum Variance Regulatory Control with Unknown Disturbance, 2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Melbourne, Australia, 2016, pp. 5-10
- Yuki Ishii and Shiro Masuda, Data-driven update of the free parameter of the Youla-Kucera parametrization in disturbance attenuation FRIT based on variance evaluation, ICAMechS 2016, Melbourne, Australia, 2016, pp.17-22
- Ryoko Yokoyama and Shiro Masuda, Data-driven PID Gain Tuning from Regulatory Control Data Based on Generalized Minimum Variance Evaluation, The 7th symposium, PSE Asia 2016, Tokyo, 2016
- S. Takahashi and Shiro Masuda, The model-free PID gain tuning for regulatory control based on generalized minimum variance evaluation with a feedforward compensator, 2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2016) Oct. 16-19, 2016 in HICO, Gyeongju, Korea
- Riku Yoshino and Shiro Masuda, Robust performance optimization for structural uncertainties in data-driven regulatory control parameter tuning, 2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2016) Oct. 16-19, 2016 in HICO, Gyeongju, Korea
- ②① Fumiya Tsukui and Shiro Masuda, Data-Driven Control Parameters Tuning of Internal Model Controllers for a Class of Nonlinear Systems in the Presence of Deterministic Disturbances, SICE Annual Conference 2016, Tsukuba, Japan, September 20-23, 2016, pp. 559-562.
- ②② Yoshihitada Shimamoto and Shiro Masuda, Data-Driven Control Parameter Tuning Based on Generalized Minimum Variance Evaluation via L2-regularization, SICE Annual Conference 2016, Tsukuba, Japan, September 20-23, 2016, pp. 555-558.

他、国内会議ほか 38 件

〔図書〕(計 1 件)

電気学会技術報告書「データに基づく性能指向型制御システム設計」、データに基づく性能指向型制御システム調査専門委員会編、16 章(定値制御データからのデータ駆動型 PID ゲイン調整)担当、2017/11/30 発行

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：加納 学

ローマ字氏名：Kano, Manabu

所属研究機関名：京都大学

部局名：情報学研究科

職名：教授

研究者番号(8桁)：

30263114

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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。