

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04456

研究課題名(和文) 定値制御系における勾配推定と計測可能外乱を用いた繰り返し制御器調整

研究課題名(英文) Iterative regulatory controller tuning using gradient estimate and measurable disturbances

研究代表者

増田 士朗 (Masuda, Shiro)

東京都立大学・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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：申請研究では、設定値を一定にした定値制御系から得られた定値制御データを用いて外乱抑制性能を改善する制御器パラメータ調整法を開発すること目的とする。具体的には、1) 定値制御データから外乱抑制を改善するフィードバック制御器のパラメータを求める手法 2) フィードバック制御器パラメータに加えて計測可能な環境情報データからのフィードフォワード制御器の制御器パラメータを定値制御データから調整し、外乱抑制を改善する手法、に関するアルゴリズム開発を行った。提案した手法や提案法に関連する研究は、英文誌に4件、国際会議に10件、3件の招待講演、国内の学会や研究会に12件の発表を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

申請研究で着目した定値制御データは、制御性能評価や閉ループ同定に利用する研究が行われていたが、制御器調整にまで利用する研究は申請者の研究以外に取り組みされた例が少ない。したがって、本研究により実システムから得られるデータから直接的に制御器調整を行うデータ駆動制御に新しい展開を与えたと言える。また、産業界の化学プロセス制御では定値制御系に分類される制御ループが多数動作しているが、十分な調整が行われないまま操業されているケースがあるため、本研究の成果の有用性は高い。さらに申請研究が着目した計測可能外乱からのフィードフォワード補償に対する制御器調整も応用上ニーズのある取り組みと言える。

研究成果の概要(英文)：The study aims at the development of the controller parameter tuning for improving disturbance attenuation properties from regulatory control data. The developed algorithms are categorized by the following two parts. The first one is to develop the feedback controller parameter tuning using regulatory control data. The second one is to develop the feedforward controller parameter tuning simultaneously. The feedforward controller works for disturbance attenuation from measurable disturbances. The research activities are summarized as 4 journal papers, 10 international conference papers, 3 invited presentation in the conferences and 12 domestic conference papers.

研究分野：システム制御工学

キーワード：データ駆動制御 外乱抑制 計測可能外乱 フィードフォワード補償 定値制御系 化学プロセス制御 制御器調整

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

図1で示される定値制御系に対して制御器パラメータを調整し、外乱抑制性能を改善する問題を考える。ここで白色雑音にフィルタを通したランダム信号を外乱とする。このときフィルタは外乱の特性を与えるので外乱モデルと呼ぶ。また、参照信号は望ましい基準値に維持することが求められており、制御動作は基準値からの変動を抑制するために働く。そのため、一般性を失うことなく参照信号は零と設定できる。

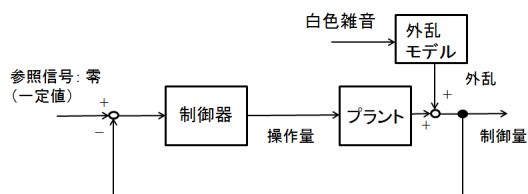


図1 定値制御系のブロック線図

このような定値制御系の外乱抑制問題に対しては、最小分散制御や一般化最小分散制御などの制御系設計手法が提案されている。実際、最小分散制御では、プラントモデルと外乱モデルを用いて制御量の分散を最小化する制御器を設計することができる。しかし、化学プロセスや電力・水処理などのインフラシステムなどの実操業プラントに対してプラントモデルと外乱モデルを正確に求めることは難しい。

申請者のこれまでの研究では、プラントモデルや外乱モデルが未知の場合でも制御系から得られたデータを用いて直接、制御器調整を行ない、外乱抑制性能を改善する方法の開発に取り組んできた。データ駆動型最小分散制御、一般化最小分散評価に基づくデータ駆動型PID制御などが、これらの研究の研究成果といえる。

しかし、これらの研究では、取得データはモデルの代用として位置付けられており、制御性能を現状より改善するために、制御系から得られたデータをどのように活用すると良いのか？といった点についての検討が求められていた。また、図1のようなフィードバック制御系だけでなく、フィードフォワード制御器に対する制御器パラメータ調整法に関する検討も十分ではなかった。

2. 研究の目的

化学プロセスや電力・水処理などのインフラシステムでは、動作条件や外部環境の変化などを原因とするプロセス変数の変動、すなわち外乱による変動を抑制する外乱抑制性能の改善が重要となる。申請研究では、このような定値制御系に対する外乱抑制性能の改善を

- 1) 定値制御データによる推定勾配を用いた制御器パラメータの繰り返し調整
- 2) 計測可能な環境情報データからのフィードフォワード補償器のデータ駆動調整、

によって行う方法について研究を進めるものである。

1) に対しては、現時点の制御性能より確実な改善が見込める高信頼な勾配ベクトルの推定法を導出し、繰り返し調整によって外乱抑制性能を段階的に改善する手法を提案する。また、2) に対しては、外乱の発生原因となる環境情報データの時系列モデルを導出し、外乱抑制のためのフィードフォワード補償に利用する手法を提案する。本研究は、定値制御系のデータ駆動制御器調整に実用性の高い繰り返し調整やフィードフォワード外乱補償を導入し、それに対する制御器調整アルゴリズムの理論的体系化を目指している点に学術的な意義がある。

3. 研究の方法

1)の手法の取組み目標

最初に2種類の初期PIDゲインによる出力データを求めたのち、それらの時系列モデルを求め、時系列データモデルの比によって外乱モデルをキャンセルしたのち、相補感度関数を推定し、勾配ベクトルを求めるという手順をとる。制御性能の改善速度の向上については、評価関数のヘッセ行列の推定を取り入れたニュートン法や準ニュートン法の導入を実現する。また、更新ステップ幅の設定を工夫することも考察する。

2)の手法の取組み目標

計測可能外乱を用いた場合の定値制御系として図2のような構成を想定し、計測可能外乱からのフィードフォワード制御器の調整とフィードバック制御器の調整を同時に行う手法の開発を進める。計測外乱としては、最初ランダム外乱が加わった場合について検討を進めたのち、矩形波や正弦波といった確定外乱が加わった場合に関するアルゴリズムの開発を行う。

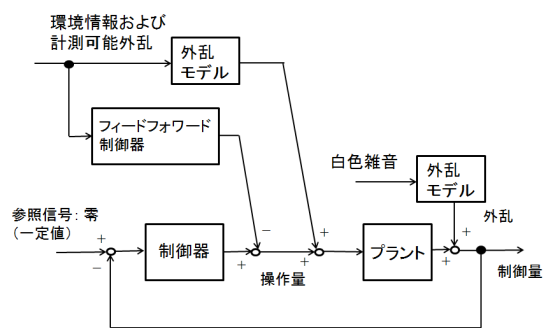


図2 計測可能外乱と外乱フィードフォワード補償器を含む定値制御系のブロック線図

4. 研究成果

1) については、定値制御系から得られるデータが CARIMA モデルで記述されると想定される場合について、データから閉ループ系の感度関数と相補関数を推定する方法を与え、それにより制御量分散を評価関数とする場合の勾配ベクトルの推定方法を与えた内容を 12th ASCC に発表した。また、この手法を入力分散も含んだ場合に拡張した結果を 16th ECTI-CON にて発表した。さらにデータが Box-Jenkins モデルと呼ばれる CARIMA モデルより外乱モデルが拡張した場合についても同様の手法が適用できることを示した結果を ICAMEchS 2019 にて発表した。さらに、定値制御系から得られたデータを用いて、ヘッセ行列を推定する方法を与え、制御器パラメータのデータ駆動繰り返し調整をニュートン法によって実現する方法を与え、収束特性が大幅に改善する手法を与え、第 7 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウムで発表した。また、勾配推定を行う手法を繰り返し調整を行わないデータ駆動制御のプレフィルタの設計に適用した結果を 58th IEEE CDC に発表した。

2) については、計測可能なランダム外乱が含まれる場合に対し、通常のフィードバック制御だけでなく、計測可能外乱からのフィードフォワード制御を行う問題を設定し、そのシステムに対して制御量分散で評価される評価関数の勾配ベクトルを推定する方法を与えた。その結果、周波数領域上のシステム同定で用いられるスペクトル解析法を導入したフィードバック制御器とフィードフォワード制御器の両者の評価関数に関する勾配ベクトルを推定する方法が得られた。これにより計測可能外乱が含まれる場合についてフィードバック制御器とフィードフォワード制御器の両者の制御器更新とデータ収集を繰り返す手法を与えることができた。また、この手法では制御器パラメータの更新に伴う閉ループ特性の更新式を導入することも行い、制御器パラメータ更新後の閉ループ系の安定性を評価することも可能にした。これらの研究成果は、計測自動制御学会第 8 回制御部門マルチシンポジウムで発表した。また、令和元年度に研究を進めた勾配推定と繰り返し調整を行わないデータ駆動制御手法を併用する手法については論文の形にまとめた。その論文は、IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering に投稿され、掲載が受理された。また、勾配推定の精度を向上させるため、勾配推定のために同定した感度関数の更新式を導入する方法を開発した。また、感度関数の更新式は制御器パラメータ更新後の閉ループ系の安定性を評価に利用できることも確認した。

さらに、申請研究に関連する研究として一般化最小分散評価に基づき、定値制御系から得られた 1 組のデータから制御器パラメータを更新する研究を進め、著者らの既発表の研究の拡張を行った。具体的には ARMAX モデルで提案していた手法をより一般的なモデル表現である Box-Jenkins モデルに適用できるように拡張した。これらの研究は、Asian Journal of Control, および Journal of Process Control に投稿し、掲載が受理された。

これらの研究成果によって、論文発表 4 件、学会発表 24 件(うち国際会議 10 件、招待講演 3 件)の成果を上げることができた。これらの研究成果を通じて計測可能外乱を有効に利用できる定値制御系に対するデータ駆動制御器調整法の体系化に貢献することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 R. Uematsu, S. Masuda, and M. Kano	4. 巻 -
2. 論文標題 Closed-loop Identification of Plant and Disturbance Models Based on Data-Driven Generalized Minimum Variance Regulatory Control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Process 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） 10.1016/j.jprocont.2022.05.002	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 R. Uematsu and S. Masuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Data-driven Generalized Minimum Variance Regulatory Control Using Routine Operation Data	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.2776	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 Shiroi Shotaro, Masuda Shiro	4. 巻 16
2. 論文標題 Pre Filter Design for Iterative Controller Parameter Tuning Using Data Driven Minimum Variance Regulatory Controllers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1429 ~ 1434
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.23439	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 Y. Matsui, H. Ayano, S. Masuda, and K. Nakano	4. 巻 13
2. 論文標題 A Consideration on Approximation Methods of Model Matching Error for Data-Driven Controller Tuning	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 291-298
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/jcmsi.13.291	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 -

[学会発表] 計25件(うち招待講演 3件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 R. Uematsu and S. Masuda
2. 発表標題 Closed-loop Identification and Dead Time Estimation Based on Generalized Minimum Variance Evaluation
3. 学会等名 2021 European Control Conference (ECC) , June 29 - July 2, 2021, Rotterdam, NL (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Uematsu and S. Masuda
2. 発表標題 Closed-loop Identification and Periodic Disturbance Estimation Based on Generalized Minimum Variance Evaluation
3. 学会等名 2021 25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 20-23 Oct. 2021, Iasi, Romania (Online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Takano and S. Masuda
2. 発表標題 Iterative Feedback Tuning for Regulatory Control Systems with Measurable Disturbances
3. 学会等名 3rd IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems MICNON 2021, Tokyo, Japan, 15-17 September 2021 (Online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Mikami, S. Masuda, and Y. Matsui
2. 発表標題 Data-driven Closed-loop Update Tuning Taking Account of Stability Margin
3. 学会等名 2021 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), 9-12 Dec. 2021 (Online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Takahashi and S. Masuda
2. 発表標題 Data-driven Successive Economic Performance Improvement for Model Predictive Control Taking Account of Variance Evaluation of Manipulated Variables
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2021, Sep. 8-10, 2021, at Yotsuya Campus, Sophia University, Tokyo (Online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三井康平, 増田士朗, 豊田充
2. 発表標題 フィードバック特性を考慮した2自由度Iterative Feedback Tuning によるPID ゲイン調整
3. 学会等名 電気学会制御研究会, CT-21-056
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高野結衣, 増田士朗
2. 発表標題 計測可能外乱を利用した 定値制御系に対するIterative Feedback Tuning
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会, 2021年8月27日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増田士朗, 豊田 充
2. 発表標題 データフィルタリングシミュレーションに基づくIterative Feedback Tuning
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増田 土朗
2. 発表標題 定値制御系における IFT のための感度関数の推定法
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三井康平, 増田土朗, 豊田充
2. 発表標題 ドローン実験モデルに対する IFT に基づくフィードフォワード・フィードバックゲイン調整
3. 学会等名 電気学会制御研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増田土朗
2. 発表標題 予測誤差法を用いた定値制御系に対する IFT 法
3. 学会等名 第9回制御部門マルチシンポジウム (MSCS 2022)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増田土朗
2. 発表標題 1 組の入出力データを用いたデータ駆動制御器調整法の最近の展開
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会 研究発表講演会 (SCI ' 21), テーマセッション招待講演 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三上泰平, 増田士朗, 松井義弘
2. 発表標題 安定性を考慮した閉ループ更新式に基づくデータ駆動制御器調整法
3. 学会等名 電気学会制御研究会, CT-20-088
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三井康平, 増田士朗, 豊田 充
2. 発表標題 勾配推定に基づくデータ駆動繰り返しPID ゲイン調整
3. 学会等名 電気学会制御研究会, IIC-20-006
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三上泰平, 増田士朗, 松井義弘
2. 発表標題 閉ループ更新式に基づくデータ駆動制御器調整法(DD-CLUT)におけるプレフィルタの設計
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小嶋陸也, 豊田 充, 増田 士朗
2. 発表標題 閉ループ応答予測を用いたカスケードシステムに対するIterative Feedback Tuning
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三上泰平, 増田士朗, 松井義弘
2. 発表標題 安定余裕を考慮した閉ループ更新式に基づくデータ駆動制御器調整法
3. 学会等名 第8回制御部門マルチシンポジウム MSCS 2021
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高野結衣, 増田士朗
2. 発表標題 スペクトル解析法を用いた計測可能外乱を含む定値制御系に対する2自由度Iterative Feedback Tuning
3. 学会等名 第8回制御部門マルチシンポジウム MSCS 2021
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shogo Okada, Tsukasa Yokoyama, Shiro Masuda
2. 発表標題 Gradient based pre-filter design for data-driven parameter updating for regulatory controller based on variance evaluation
3. 学会等名 58th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shiro Masuda
2. 発表標題 Iterative controller parameters tuning using gradient estimate of variance evaluation
3. 学会等名 2019 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ji Qiang and Shiro Masuda
2. 発表標題 Iterative PID regulatory control design using gradient estimate of LQG evaluation
3. 学会等名 2019 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shiro Masuda
2. 発表標題 Iterative PID gain tuning using gradient estimate of variance cost criterion through regulatory control data,
3. 学会等名 2019 12th Asian Control Conference (ASCC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古橋美聖, 増田士朗
2. 発表標題 ヘッセ行列を用いた定値制御系における分散評価に基づく データ駆動繰り返し制御器調整
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 Shiro Masuda
2. 発表標題 Data-driven Controller Parameter Tuning Toward a Standard Controller Design
3. 学会等名 2019 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga, Japan, Aug. 26-28, 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増田士朗
2. 発表標題 データ駆動制御を用いた制御性能改善 – 標準的な制御系設計法との関係性について –
3. 学会等名 計測・制御・システム工学部会シンポジウム(制御技術部会共催) 「データ駆動制御 基礎・応用・新展開」(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------