

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420446

研究課題名(和文)分散評価に基づくデータからの直接的制御器調整法の開発と化学プロセス制御への応用

研究課題名(英文) Development of Direct Control Parameter Tuning Methods Based on Variance Evaluation and Its Application to Chemical Process Control

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、分散評価に基づき、定値制御時の入出力データを用いて外乱抑制特性を最適にする制御器パラメータを求めることを研究目的とする。一連の研究成果は、(1)分散を評価基準とする最小分散制御や一般化最小分散制御を基本制御とする研究、(2)閉ループ同定に関連する研究、(3)PIDゲイン調整に関連する研究にまとめられることができる。研究成果は、査読付き論文誌へ14件、国際会議発表で23件、国内発表で34件を発表し、十分な研究成果を挙げることができた。また、化学プロセスモデルへの適用や実データの適用を行い、実用的な有用性を検討した。

研究成果の概要(英文)：This research project aims at development of direct control parameter tuning methods based on variance evaluation for disturbance attenuation. The design method tries to derive directly from plant operating data generated by stochastic disturbances. Thus, it does not require a plant model and an extra plant test for identifying the plant model or tuning control parameters. The following three issues summarize the research results: (1) The development of data-driven minimum variance control and generalized minimum variance control, (2) The closed-loop identification based on variance evaluation, (3) The data-driven PID gain tuning. The 14 journal papers, the 23 international conference papers, and the 34 domestic conference papers et al. have been published as research results. The practical availability of the proposed approach has been examined through numerical simulation experiments using chemical process models and real data collected from industrial processes.

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

1. 研究開始当初の背景

制御系設計手法の多くは、制御対象のモデルを用いて行われる。これに対し、データからの直接的制御器調整法では、制御系から得られたデータを用いて直接的に最適な制御器パラメータを導出する。したがって、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この手法が有効となる。VRFT(Virtual Reference Feedback Tuning)法、FRIT(Fictitious Reference Iterative Tuning)法、非反証制御法、NCbT (Noniterative Correlation-based Tuning) 法、E-FRIT(Extended Fictitious Reference Iterative Tuning) 法などがこれまで提案されており、制御器調整法の新しい展開として注目を集めている。特に、E-FRIT 法については、石油化学プロセスにおける実用的な PID 制御器調整法を目指して開発されており、実機への成功例も複数報告されている。

しかし、これまでの直接的制御器調整法では、設定値の変化に対する追従特性の改善を目的としている場合が多く、外乱抑制に目的が特定化された研究は十分ではない。化学プロセス制御の応用では、参照信号の変化に対する追従特性よりも外乱抑制特性の改善が求められるため、外乱抑制特性の改善を目的とする直接的制御器調整法の開発が求められていた。

研究代表者は、入力端に加えられたステップまたはインパルス状の外乱によって生成された入出力データを初期データとして制御器パラメータを調整する方法をこれまで提案してきた。しかし、その研究では外乱は確定信号に限定されており、さらに入力端にテスト信号を付加するといった追加実験が必要となる。すなわち、定値制御系に確率外乱が加わった場合の外乱抑制に関する研究は行われていなかった。また、石油化学プロセスにおける実用的な PID 制御器調整法の開発をめざす E-FRIT においても、初期的に設定値変更を行なうことによって、入出力データを集める必要があり、定値制御時の通常操業データから直接的に PID ゲインを調整する手法の開発が求められていた。本研究開始時の状況は以上の通りである。

2. 研究の目的

本研究では、定値制御時の閉ループ系から得られた入出力データを用いて、制御対象のモデルを求めることなく直接的に外乱抑制特性を改善する制御器パラメータを導出することを目的とする。具体的には、有色雑音によってモデル化された確率外乱が定値制御時に閉ループ系に加わった場合の入出力データを用いて、分散によって評価された制御性能を改善する問題を考える。

確率外乱によって生成された制御量の分散評価から制御性能を評価することは、Harris Index に代表される制御性能評価/監

視の研究で行われている。これに対し、本研究では制御性能評価/監視の結果を制御器調整に展開することによって、制御器の「診断」から「調整」まで統合された手法を開発することを目指している。また、開発された手法は、PID 制御器調整法に展開することを目指し、実用的な PID 制御器調整法として、広く産業界に普及させていくことを目指す。

3. 研究の方法

研究代表者の研究開始当初の研究である外乱抑制 FRIT 法をベースにして、その手法の課題を解決するという方針で研究を進めていく。

基本アルゴリズムである外乱抑制 FRIT 法では、制御量の設定値まわりの変動が確率外乱によって生成されるものとして定式化し、さらに分散評価の理論値が白色雑音から制御量までの伝達関数の H_2 ノルムで表現する。そして、定値制御系における出力分散を理想的な外乱規範モデル出力の分散に近づけるように制御器パラメータを調整する。しかし、この方法では外乱応答の規範モデル伝達関数や有色雑音の外乱モデルが必要となり、それらをどのように事前に決めるのが問題となる。

そこで本研究では、外乱規範モデルを必要としない方法を導出し、その方法を PID ゲイン調整に展開するという方針で取り組む。具体的には、つぎの方針で研究を進めた。

(1) 最小分散制御や一般化最小分散制御といった制御量の分散を評価基準にした制御性能評価/監視と関連する研究。

(2) 閉ループ同定に関連する研究。

(3) PID ゲイン調整に関連する研究。

(1) では制御対象のプロセスモデルが CARMA (Controlled Auto-Regressive Moving Average) モデルや伝達関数モデルを用いて記述されるという想定のもとで最小分散制御および一般化最小分散制御器の制御器パラメータをデータから直接的に求める方法を検討する。

この方法ではプロセスに加わる外乱を出力端に加わる有色雑音としてモデル化し、外乱抑制問題を感度関数の H_2 ノルム最適化問題として定式化する。そのため、この方法では、外乱規範モデル伝達関数を設定する必要がない。

本研究の問題設定は、閉ループ同定と問題設定が類似しているため、(2) では、分散評価に基づく直接的制御器調整のアプローチからプロセスモデルや外乱モデルを同時推定する手法を開発する。本研究の基本方針は、制御対象のモデルを用いずに、直接的に制御器パラメータを設計することであるが、同時に制御対象のモデルを得ることができれば、制御結果の解析などに役立てることができる。

(3) では、本研究で開発するデータから直接的に制御器のパラメータを調整する手法

をもとに PID ゲイン調整を行う手法を開発する。得られた PID ゲイン調整法は、化学プロセスモデルに適用し、実用的な有用性について検討する。

4. 研究成果

まず、基本アルゴリズムである外乱抑制 FRIT 法に関する研究を論文にまとめた[雑誌論文, (), 学会発表, (), (), (20)]。それから、基本アルゴリズムの課題を解決するという方針で研究を進めた。具体的には、

- (1) 最小分散制御や一般化最小分散制御といった制御量の分散を評価基準にした制御性能評価/監視と関連する研究。
- (2) 閉ループ同定に関連する研究。
- (3) PID ゲイン調整に関連する研究。

の3つの項目について研究を進め、つぎのような研究成果が得られた。

(1) では制御対象のプロセスモデルが CARMA モデルを用いて記述されるという想定のもとで、最小分散制御器および一般化最小分散制御器の制御器パラメータをデータから直接的に求める方法を求めた[雑誌論文, (), 学会発表²²]。また、制御器パラメータと同時にモデルパラメータも求める手法を与えた[雑誌論文, 学会発表, (), ()]。さらに、データ駆動型最小分散制御器設計において、非線形最適化計算における収束領域の解析を行った[雑誌論文, 学会発表]。また、非最小位相系へ拡張する手法も与えている[雑誌論文, 学会発表]。

(2) では、データから直接的に制御器パラメータを調整する方法において、外乱モデルを同時推定する手法に拡張した[雑誌論文, 学会発表]。また、その手法において最小分散値を特徴づけるむだ時間ステップ数の推定を閉ループデータから行う手法を与えた[雑誌論文]。

(3) では、データから直接的に制御器パラメータを調整する方法をもとに PID ゲイン調整を行う手法に拡張した[学会発表]。また、その PID ゲイン調整法は、液面制御モデルに適用することによって確率外乱の他に矩形波上の外乱や正弦波状の外乱が加わった場合に対しても有効であることを確認している[学会発表]。

その他、データから直接的に制御器パラメータを調整する方法として周波数領域に変換して設計する手法[雑誌論文, (), 学会発表, (), (), (21)]、セルフチューニング制御に展開した手法[学会発表, (), (23)]、非線形要素を考慮した研究[雑誌論文, 学会発表]、連続時間系のモデルを求める研究[雑誌論文, 学会発表]などに関しても研究成果がある。さらに、SICE Annual Conference 2015 において Tutorial Workshop にて一連の研究成果を紹介することも行なった[学会発表]。

このように研究成果は、査読付き論文誌へ 14 件、学会発表(国際会議発表)で 23 件を発

表し、十分な研究成果を挙げることができた。また、化学プロセスモデルへの適用や実データの適用を行い、実用的な有用性を検討することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 14 件)

植松凌太, 増田土朗: 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, 電学論 C, 査読有, Vol.136, No.7, 掲載予定(2016)

植松凌太, 増田土朗: 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誌, 査読有, Vol.52, No.6, 掲載予定(2016)

石井友貴, 増田土朗: 非最小位相系に対する分散評価に基づく外乱抑制 FRIT, 計測自動制御学会論文誌, 査読有, Vol.52, No.5, pp.249-256 (2016)

増田土朗, 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), 電学論 C, 査読有, Vol.136, No.5, pp.715-721 (2016)

DOI: 10.1541/ieejieiss.136.715

松井義弘, 綾野秀樹, 増田土朗, 中野和司: 閉ループ過渡応答データを用いた Hammerstein モデルのためのモデルベース制御器設計, 電学論 C, 査読有, Vol.136, No.5, pp.625-632 (2016)

DOI: 10.1541/ieejieiss.136.625

植松凌太, 増田土朗, 一般化最小分散評価に基づく閉ループ同定と外乱モデルの推定, 計測自動制御学会論文誌, 査読有, Vol.51, No.9, pp.597-604 (2015)

DOI: 10.9746/sicetr.51.597

田中優大, 増田土朗, データ駆動型 H2 制御性能評価の最適化計算における収束領域, 計測自動制御学会論文誌, 査読有, Vol.51, No.7, pp.451-457 (2015)

DOI: 10.9746/sicetr.51.451

馬原 康, 増田土朗, 分散評価に基づく外乱抑制 FRIT 法を用いた制御器とモデルの同時更新, 計測自動制御学会論文誌, 査読有, Vol.51, No.7, pp.468-474 (2015)

DOI: 10.9746/sicetr.51.468

Shiro Masuda, Direct control parameter tuning method for stochastic disturbance attenuation based on variance evaluation, Int. J. Advanced Mechatronic Systems, 査読有, Vol.6, No.5, pp.229-236 (2015)

DOI: 10.1504/IJAMECHS.2015.072822

安藤数馬, 増田土朗, CARMA モデルを用いた一般化最小分散評価に基づく直接的

制御器パラメータ調整法, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol.134, No.9, pp.1255-1261 (2014)

DOI: 10.1541/ieejieiss.134.1255

合田雄樹, 増田土朗, 松井義弘, 周波数領域上における最適プレフィルタを用いたFRIT法とそのPIDゲイン調整への応用, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vo.134, No.9, pp.1247-1254 (2014)

DOI: 10.1541/ieejieiss.134.1247

松井義弘, 綾野秀樹, 増田土朗, 中野和司, 閉ループ過渡応答データを用いた連続時間系の同定, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol.134, No.9, pp.1206-1213 (2014)

DOI: 10.1541/ieejieiss.134.1206

安藤数馬, 増田土朗, 寺門和希, CARMAモデルを用いた最小分散評価に基づく直接的制御器パラメータ調整, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol.134, No.8, pp.1123-1129 (2014)

DOI: 10.1541/ieejieiss.134.1123

増田土朗, 寺門和希, 安藤数馬, 外乱抑制を目的とした分散評価に基づく直接的制御器パラメータ調整法, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 27, No. 3, pp.116-121 (2014)

DOI: 10.5687/iscie.27.116

[学会発表(国際会議発表)](計 23件)

Ryoko Yokoyama and Shiro Masuda, Data-driven PID Gain Tuning from Regulatory Control Data Based on Generalized Minimum Variance Evaluation, 7th International Symposium on Design, Operation and Control of Chemical Processes (PSE Asia 2016), 伊藤国際学術研究センター(東京都文京区), 2016年7月25日~27日発表予定.

Shiro Masuda, Data-driven PID Gain Tuning for Liquid Level Control of a Single Tank Based on Disturbance Attenuation Fictitious Reference Iterative Tuning, 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2015), pp.16-20, Busan(Korea), 2015年10月13日~16日発表.

Yuki Ishii, Shiro Masuda and Manabu Kano, Fictitious Reference Iterative Tuning Based on Variance Evaluation for Disturbance Attenuation in Non-Minimum, Phase Plants, IEEE International Conference on Control Applications (CCA) 2015, pp.1593-1598, Sydney(Australia), 2015年9月21日~23日発表.

Satoki Makino and Shiro Masuda, Self-Tuning PID Controller Based on

Generalized Minimum Variance Evaluation, IEEE International Conference on Control Applications (CCA) 2015, pp.1248-1253, Sydney (Australia), 2015年9月21日~23日発表.

Ryoko Yokoyama, Shiro Masuda and Manabu Kano, Data-driven Generalized Minimum Variance Regulatory Control for Model-free PID Gain Tuning, IEEE International Conference on Control Applications (CCA) 2015, pp.82-87, Sydney(Australia), 2015年9月21日~23日発表.

Ryota Uematsu, Shiro Masuda and Manabu Kano, Closed-loop Identification of Plant and Disturbance Models Based on Generalized Minimum Variance Evaluation, IEEE International Conference on Control Applications (CCA) 2015, pp.175-180, Sydney (Australia), 2015年9月21日~23日発表.

Shiro Masuda, Data-driven PID gain tuning for unknown impulse disturbance attenuation, 2015 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS 2015), pp.445-449, Beijing (China), 2015年8月22日~24日発表.

Shiro Masuda, Xianda Kong, Koki Udagawa and Yoshihiro Matsui, Virtual reference feedback tuning for two degree of freedom controllers using closed-loop step response data-Optimal pre-filter design in the frequency domain, SICE Annual Conference 2015, pp. 622-625, Hangzhou (China), 2015年7月28日~30日発表.
Yoshihiro Matsui, Shiro Masuda, Hideki Ayano, Koji Higuchi and Kazushi Nakano, Closed-loop system identification and controller tuning for constant-value control systems, ECTI-CON 2015 - 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Hua Hin (Thailand), 2015年6月24日~27日発表.

Shiro Masuda, Xianda Kong, Koki Udagawa and Yoshihiro Matsui, Virtual reference feedback tuning using closed-loop step response data in frequency domain, 2015 10th Asian Control Conference (ASCC 2015), Kota Kinabalu(Malaysia), 5月31日-6月3日発表.

Yoshihiro Matsui, Hideki Ayano, Shiro Masuda and Kazushi Nakano, A

controller design for nonlinear systems with time-delay using closed-loop step response data, 2015 10th Asian Control Conference (ASCC 2015), Kota Kinabalu(Malaysia), 2015 年 5 月 31 日-6 月 3 日発表 .

Shiro Masuda, Yuki Gohda and Yoshihiro Matsui, Disturbance Attenuation Fictitious Reference Iterative Tuning in Frequency Domain, 2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2015), pp. 258 - 263, Seoul(Korea), 2014 年 10 月 22 日 ~ 25 日発表 .

Yasushi Mahara, Shiro Masuda, and Manabu Kano, Simultaneous Update of Model and Controller Using Fictitious Reference Iterative Tuning for Disturbance Attenuation Based on Variance Evaluation, IEEE International Conference on Control Applications (CCA) 2014, pp.1449- 1454, Antibes/ Niece(France), 2014 年 10 月 8 日 ~ 10 日発表 .

Masahiro Tanaka, Shiro Masuda, and Manabu Kano, Domain of Attraction for Optimization of Databased H2 Control Performance Criterion, IEEE International Conference on Control Applications (CCA) 2014, pp.1455-1460, Antibes/ Niece(France), 2014 年 10 月 8 日 ~ 10 日発表 .

Shiro Masuda, Fictitious Reference Iterative Tuning Method for Disturbance Attenuation, Tutorial Workshop Data-Driven Controller Tuning: Basics and New Developments, SICE Annual Conference 2014, 北海道大学(北海道札幌市), 2014 年 9 月 9 日 ~ 12 日発表 .

Kazuma Ando and Shiro Masuda, A Direct Control Parameter Tuning Method Using Generalized Minimum Variance Evaluation, 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS 2014), pp.99-104, 東海大学(熊本県熊本市), 2014 年 8 月 10 日 ~ 12 日発表 .

Kazuma Ando, Shiro Masuda and Manabu Kano, Data-Driven Generalized Minimum Variance Regulatory Control, 13th European Control Conference (ECC), pp.418-423, Strasbourg(France), 2014 年 6 月 24 日 ~ 27 日発表 .

Shiro Masuda and Kazuma Ando, Optimization of H2 Performance Criterion for Disturbance Attenuation in the Direct Data-based Control Design, 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial

Processes, メルパルク広島 (広島県中区), 2014 年 5 月 28 日 ~ 30 日発表 .

Shiro Masuda, A Model Reference Adaptive Control Based on On-Line FRIT Approaches Using a Normalized Recursive Least Square Method, 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, メルパルク広島 (広島県中区), 2014 年 5 月 28 日 ~ 30 日発表 .

Shiro Masuda, Kazuki Terakado, Kazuma Ando, Direct Control Parameter Tuning Method for Disturbance Attenuation Based on Variance Evaluation, IFAC ALCOSP 2013, Caen(France), 2013 年 7 月 3 日 ~ 5 日発表 .

21 Yuki Gohda, Shiro Masuda and Yoshihiro Matsui, A Direct PID Gain Tuning Based on FRIT Method Using Optimal Filter in the Frequency Domain, IFAC ALCOSP 2013, Caen(France), 2013 年 7 月 3 日 ~ 5 日発表 .

22 Shiro Masuda and Kazuma Ando, A Direct Control Parameters Tuning Method for Random Disturbances Using CARMA Models Based on Variance Evaluation, 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems(ICAMechS 2013), Luoyang(China), 2013 年 9 月 25 日 ~ 27 日発表 .

23 Shiro Masuda, On the Stability Analysis for Model Reference Adaptive Control Based on On-line FRIT Approaches, SICE Annual Conference 2013, 名古屋大学 (愛知県名古屋市), 2013 年 9 月 14 日 ~ 17 日発表 .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

加納 学 (Kano, Manabu)
京都大学・情報学研究科・教授
研究者番号：30263114

(3) 連携研究者

()
研究者番号：