

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 1 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560442

研究課題名（和文）分布定数系に対するデータ駆動型集中定数正準制御器の設計とその性能解析

研究課題名（英文） Design of data-driven lumped parameter canonical controller for distributed parameter system with its performance analysis

研究代表者

金子 修（KANEKO OSAMU）

金沢大学・電子情報学系・准教授

研究者番号：00314394

研究成果の概要（和文）：本研究では、データを直接用いることで、与えられた仕様を達成するための制御器の設計手法（いわゆるデータ駆動型制御）に関する研究を遂行した。研究代表者が開発してきた FRIT というデータ駆動型制御器調整法が、仕様を達成する制御器として A. J. van der Schaft により提案されている正準制御器に対応することを示した。一方で、実用的および理論的観点から集中定数制御器の FRIT に関する成果をいくつか与えた。そして、分布定数系と密接に関連のある、あるいは、場合によっては分布定数系の一つともとらえられることもあるむだ時間系を対象として、仕様を達成する集中定数制御器の FRIT による設計手法とその性能解析を行った。また、分布定数系の一つである 1 次元熱伝導系に対して、FRIT による目標値応答改善について検討した。

研究成果の概要（英文）：In this study, the data-driven controller design for the achievement of a given specification has been addressed. As one of the important results obtained here, we have shown that fictitious reference iterative tuning (which is abbreviated as FRIT) corresponds to the canonical controller which was studied by A. J. van der Schaft as the ideal controller to achieve a given specification. We have also obtained some useful results on FRIT from both of the practical and theoretical points of view. In addition, we have also developed FRIT for time-delay systems, which are deeply related to distributed parameter systems, or are often regarded as one subclass of distributed parameter systems. Moreover, we have also discussed improvement of desired tracking property with FRIT for one-dimensional heat conduction system as one of the distributed parameter systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：制御理論・システム理論

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：データ駆動型制御，正準制御器，制御器チューニング，FRIT，むだ時間系，非最小位相系，1次元熱伝導系，性能解析

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、本研究課題を始める 2010 年度以前より、データを直接用いて制御器パラメータを最適にチューニングする手法である Fictitious Reference iterative Tuning (FRIT) の研究開発を行っていた。また同様な手法である Virtual Reference Feedback Tuning との比較なども行い、いくつかの考察を得ていた。これらの手法に共通する特徴は、一組の実験データのみを用いて最適な制御パラメータを求める手法である。しかし、これらの手法では、対象を通常の線形時不変システムとしたときの限定的な状況での場合に限られており、実用を視野に入れた適用対象の拡大が一つの大きな課題でもあった。とくに、プロセス系でみられるむだ時間や、弾性体による制振制御などでみられるようなセンサとアクチュエータのノンコロケーションに起因する逆応答、すなわち非最小位相特性などに対応可能なデータ駆動型制御器設計手法の構築は重要な課題であったといえる。

また、データ駆動型制御では、設計のみならず、得られた制御器がどの程度の性能を達成するのかという性能解析も重要な課題である。この点に関しては、ビヘイビアアプローチの枠組みで、仕様を達成する制御器として正準制御器(Canonical Controller)が A. J. van der Schaft により 2002 年に発表されている。ビヘイビアアプローチとは J. C. Willems により提案された、システムの軌道そのものに着目するシステム制御理論のアプローチであり、データ駆動型制御とも親和性があるとも考えられ、実際に研究代表者も 2008 年に関連する解説記事(システム/制御/情報, Vol. 52, No. 11, pp. 414-420)を執筆している。さらに、ビヘイビアアプローチの枠組みにおける多次元システムに対して、その独立変数の一つである時間軸のみで動特性が支配されるような 1 次元システムの制御器による仕様の達成可能性に関する研究代表者の成果が 2010 年に学術雑誌 (European Journal of Control, Vol. 16, No. 2, pp. 159-168) に掲載されている。とくに後者の成果では多次元システムが分布定数系に、1 次元システムが集中定数系におのおの対応しており、言い換えれば、分布定数系の対象を集中定数系の制御器で制御する際の仕様の達成可能性に対応しているが、その解析方法や具体的な設計法の提示には至ってはいなかった。

以上のことから、データ駆動型制御においても正準制御器がその性能解析に本質的役割を果たすことが予想され、とくに前述したようなむだ時間系等の分布定数系において、

集中定数正準制御器によるデータ駆動型制御の設計法とその性能の解析は実用的にも学術的にも重要であるとの認識を得た。これらのことから、本研究の着想に至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記のような背景から、分布定数系に対し、FRIT を中心として、データを直接用いることによる集中定数制御器の設計手法の構築を目的とする。同時に、ビヘイビアアプローチの枠組み、および、データ駆動型制御の枠組みにおいて、正準制御器の構造を解析し、その性能解析を行う。そして、最終的にこれらを融合させることで、分布定数系である制御対象に対して与えられた仕様を達成するデータ駆動型集中定数正準制御器の設計理論の構築とその制御器の性能解析を行うことが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

- (1) まず、研究代表者がこれまで開発を行ってきたデータ駆動型制御器チューニング法 FRIT を、むだ時間系に対応可能となるように拡張する。これは、むだ時間系が分布定数と密接に関係、または、状況によっては分布定数系のサブクラスとしてみなされることもあり、分布定数系を扱う際の足がかりとして適切と考えたからである。これらのことより、むだ時間系に対するデータ駆動型制御器設計の方法を構築し、その性能解析を行う。
- (2) さらに、FRIT を集中定数の非最小位相系について適用可能となるように拡張を行う。分布定数系において、たとえば柔軟構造物などではセンサとアクチュエータの配置によっては逆応答を呈することもあつた。したがって、その基礎的知見を得るために、類似の現象をもたらす集中定数非最小位相系の制御に着目し、データ駆動型制御器設計の方法を構築し、その性能解析を行う。
- (3) 分布定数系に関しては、まずは 1 次元熱伝導系という基礎的なシステムに対して、FRIT の適用とその性能解析を行う。検証は制御系 CAD を援用したシミュレーションによりおこなう。
- (4) これらと並行して、ビヘイビアアプローチの枠組みでの正準制御器の理論的解析を行う。とくに仕様を達成するために関連する本質的構造について考察を加えていく。
- (5) FRIT そのものについても、データ駆動型制御のための発展的展開をさぐるために状態フィードバック、不安定系、外乱の抑

制などへの適用を試みて、基礎的知見を得る。

- (6) これらで挙げた内容を有機的に統合することで、目的で挙げた方法論の構築とその性能解析を行う。

#### 4. 研究成果

上記で述べたような方法により、本研究課題では以下のような成果を得た。

- (1) 1 入出力集中定数正準制御器が目標値応答という観点から見たときにデータ駆動型制御器調整法 FRIT と対応することを明らかにした (2008 年の研究代表者の成果 (IFAC World Congress) よりも明確にした)。これは FRIT と正準制御器を結び付ける重要な成果であり、これにより、以下で述べる FRIT に関する成果は、(データ駆動型集中定数) 正準制御器に関する成果としてみなすこともできる。
- (2) 分布定数系と深い関連のある、または分布定数系のサブクラスとしてもとらえられることもあるむだ時間系に焦点をあてて、入出力データのみによる最適な応答を達成するために、FRIT を拡張した。とくに、スミス系に着目をして、その制御器内に、仕様に関連した特殊な構造を導入することで、最適な応答のみならず対象のモデルパラメータ (むだ時間も含む) をも得ることができる方法となっている。そして、台車の位置決め制御実験を通してこの妥当性の検証をした。この成果はむだ時間に対するデータ駆動制御の重要な知見を与えたとともに、分布定数系へのデータ駆動型制御の展開の際の足がかりになる成果として貢献するものと思われる。
- (3) 分布定数系によくみられる逆応答について、類似の現象を引き起こすと考えられる非最小位相集中定数系に対する FRIT の拡張を行った。結果として、逆応答という現象を考慮して、制御器に特殊な構造を導入することで、最適な応答パラメータとモデルを同時に求めるパラメータ制御器調整手法として FRIT を構築した。この成果も、データ駆動型制御器設計を分布定数系への展開を行う際に有用な知見となることが期待される。
- (4) むだ時間と非最小位相集中定数系を统一的に扱うことのできる FRIT の手法を構築し、また目標値応答における性能解析を行った。とくに非最小位相集中定数系については、構造が未知である場合にはラゲル級数展開を導入することで、非最小位相特性を的確にとらえた上での所望の制御器性能を発揮する方法を提案した。本成果も (2) や (3) 同様に、データ駆動型制御の分布

定数系への展開の際の重要な足がかりとなる成果として貢献するものと期待できる。

- (5) 二自由度制御器のフィードフォワード部に対し、入出力データを直接用いることで最適な応答を示すパラメータ調整手法を考案した。この成果は二自由度制御系に対するデータ駆動型制御器設計の基礎として有用である。また、(2) や (3) の成果を援用することで、むだ時間系等に対しても二自由度制御系において有効となるデータ駆動型制御器調整法を構築した。
- (6) FRIT についてもいくつかの理論解析を行った。とくに VRFT との比較をループ特性から試みて、この二つのデータ駆動型制御器調整手法の相違点を明確にした。これは 2013 年の国際会議発表する予定である。これら FRIT に関する理論的知見は、今後のデータ駆動型制御器チューニングにおいて重要な知見を与えるものと期待できる。
- (7) 状態フィードバックゲインのデータ駆動型更新、振動的未知外乱を除去するための FRIT、不安定系に対するあるクラスの制御器構造を援用した FRIT についても有用な成果を得た。これらもデータ駆動型集中定数正準制御器チューニングの基礎として重要である。
- (8) 一次元熱伝導系に対し集中定数制御器を実装し FRIT を適用することで、所望の性能を得ることを評価関数の解析およびシミュレーションにより確認した。上述のように、FRIT の目的は正準制御器の構築でもあるので、この成果は分布定数系に対するデータ駆動型正準制御器設計の基礎的結果として重要である。なお、これに関連する成果を 2013 年 8 月におこなわれる MOVIC2013 にて発表予定であることを付記しておく。

以上より、分布定数系そのものに関する理論解析や正準制御器の性能解析については不十分なところがあり、ここで扱った分布定数系も基本的な熱伝導系にとどまっているが、しかし一方では、FRIT をはじめとしたデータ駆動型制御器設計、およびビヘイビアアプローチにおける正準制御器という観点では、本研究課題に関する重要な基礎的事項について豊富な学術的成果と実用的方法論を得ることができたと考えている。

他のクラスの分布定数系への拡張やその性能解析、多入出力系への拡張、一般的な外乱への対処、閉ループ系のロバスト化、安定化、そしてより包括的な設計手法とその理論解析など、取り組むべき課題も明確にできたともいえ、今後の更なる研究の進展につなげていく予定である。

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 9 件)

- ① 金子 修, FRIT とデータ駆動型正準制御器, 電気学会データ指向型制御系設計調査専門委員会編「データを診て予測する/制御する」, (査読無技術報告) 掲載決定, 2013
- ② 金子 修, 澤川 史明, 山本 茂, 状態フィードバックゲインのデータ駆動型更新, 計測自動制御学会論文集, 掲載決定, 2013, 査読有
- ③ Nguyen T.H., Kaneko O., and Yamamoto S., Fictitious Reference Iterative Tuning of Disturbance Observers for Attenuation of the Effect of Periodic Unknown Exogenous Signals, 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, 2013.7.4, The University of Caen Basse-Normandie (France) 発表予定
- ④ Nguyen T.H., Kaneko O., and Yamamoto S., Fictitious Reference Iterative Tuning of Internal Model Controllers for Non-Minimum Phase Systems: A Laguerre Expansion Approach, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 6, No.1, 2013, 38-44, 査読有
- ⑤ 金子 修, FRIT の基礎と今後の展開 — 目標応答への追従問題を中心として — 電気学会論文誌 C Vol. 131, No, 6, 2012, 816-819 (査読無解説)
- ⑥ Kaneko O., Nguyen T.H., Wadagaki Y., and Yamamoto S., Fictitious Reference Iterative Tuning for Non-Minimum Phase Systems in the IMC Architecture: Simultaneous Attainment of Controllers and Models, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.5 No.2, 2012, 101-108, 査読有
- ⑦ 金子 修, 和田垣 祐介, 山本 茂, FRIT によるスミス補償器の最適制御パラメータとプラントモデルの同時獲得について 電気学会論文 C, Vol.131, No.4, 2011, 742-750, 査読有
- ⑧ Kaneko O., Yamashina Y., and Yamamoto S., Fictitious Reference Tuning of the Feed-forward Controller in a Two-degree-of-Freedom Control System, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.4 No.1, 2011, 55-62, 査読有
- ⑨ Kaneko O., Miyachi M., and Fujii T., Simultaneous Updating of Model and Controller Based on Fictitious Reference Iterative Tuning, SICE

Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.4, No.1, 2011, 63-70, 査読有

[学会発表] (計 20 件)

- ① Kaneko O., Data-driven controller tuning: FRIT Approach, 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, 2013.7.4, The University of Caen Basse-Normandie (France) 発表予定
- ② Uozumi F., Kaneko O., and Yamamoto S., Fictitious Reference Iterative Tuning of Disturbance Observers for Attenuation of the Effect of Periodic Unknown Exogenous Signals, 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, 2013.7.4, The University of Caen Basse-Normandie (France) 発表予定
- ③ 吉武 繁樹, 金子 修, 山本 茂, 二自由度制御器のフィードフォワード部に対する FRIT - むだ時間系への拡張, 電気学会制御研究会「データに基づく適応型スマートシステム」, 2012年12月18日, 広島大学東京オフィス (東京都)
- ④ 金子 修, 北出 幸大, 山本 茂, 一次元熱伝導系に対する集中容量制御器のパラメータチューニング-FRIT アプローチ, 電気学会制御研究会「データに基づく適応型スマートシステム」, 2012年12月18日, 広島大学東京オフィス (東京都)
- ⑤ 金子 修, 和田垣 祐介, 吉武 繁樹, 山本 茂, 二自由度制御系に対する FRIT を用いた非最小位相系の同定, 第 55 回自動制御連合講演会, 2012年11月17日, 京都大学 (京都)
- ⑥ 澤川史明, 金子 修, 山本茂, 積分型サーボ系における状態フィードバックゲインのデータ駆動型更新, 第 55 回自動制御連合講演会, 2012年11月17日, 京都大学 (京都)
- ⑦ Nguyen T.H., Kaneko O., and Yamamoto S., Data-driven Approach to IMC for Unstable Plants, Ausutarlian Control Conference, 2012.11.15, University of New South Wales Kesington Campus (Australia)
- ⑧ Kaneko O., Yoshitake S., and Yamamoto S., Data-Driven Parameter Optimization of Two-Degree-of-Freedom of Controllers Approximated by Laguerre Expansions, IFAC 15th Workshop on Control Application of Optimization, 2012年9月15日, Rimini

- Italy, The University of Bologna, Rimini Campus (Italy)
- ⑨ Yoshitake S., Kaneko O., and Yamamoto S., Fictitious Reference Iterative Tuning of Non-Minimum Phase Systems in the Two-Degree-Of-Freedom Control Architecture: A Laguerre Expansion Approach, SICE Annual Conference 2012, 2012年8月22日, 秋田大学 (秋田県)
- ⑩ 金子 修, FRITによるPID制御器パラメータチューニングに関する研究の最新動向, 電気学会C部門制御技術委員会「PID制御合同シンポジウム - IFAC Conference on Advanced in PID Controlの報告を中心としたPID制御の最新動向 -」, 2012年5月30日, 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス (東京都)
- ⑪ 金子 修, FRITの基本的考え方とその応用 (招待講演), 第56回システム制御情報学会研究発表講演会, 2012年5月23日, 京都テルサ (京都府)
- ⑫ 澤川 史明, 金子 修, 山本 茂, FRITによる一入力多出力系のための制御器パラメータチューニング - 状態フィードバックへの適用 -, 第56回システム制御情報学会研究発表講演会, 2012年5月22日, 京都テルサ (京都府)
- ⑬ 澤川 史明, 金子 修, 山本 茂, 状態フィードバックゲインのデータ駆動型更新 - 自走式倒立二輪の制御への応用 -, 計測自動制御学会第12回適応学習制御第3回プラントモデリング合同シンポジウム, 2012年4月13日, 東京工業大学 (東京都)
- ⑭ 魚住 文彬, 金子 修, 山本 茂, 振動的な未知外乱の影響を低減するFRITによる制御器パラメータチューニング, 計測自動制御学会第12回適応学習制御第3回プラントモデリング合同シンポジウム, 2012年4月13日, 東京工業大学 (東京都)
- ⑮ Kaneko O., Wadagaki Y., Nguyen T.H., and Yamamoto S. Fictitious reference iterative tuning for a system with a time-delay and/or unstable zeros in the internal model control architecture, The 2011 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2011.9.29, Sheraton Denver Down Town Hotel (USA)
- ⑯ 金子 修, FRITの基本的考え方と使い方, 2011年度統計数理研究所公開講座 モデルフリー制御器設計の新展開 - FRIT法の基礎とその応用, 2011年9月21日, 京都テルサ (京都府)
- ⑰ Nguyen T.H., Kaneko O., Wadagaki Y., Yamamoto S., Fictitious reference iterative tuning of internal model controller for non-minimum phase plants, SICE Annual Conference 2011, 2011年9月17日, 早稲田大学 (東京都)
- ⑱ 金子 修, はじめてのFRIT - 一組のデータを用いる制御器パラメータチューニング入門, 日本鉄鋼協会計測制御システム工学部会若手フォーラム「現場で使える制御・推定技術!」2011年9月13日, 金沢マンテンホテル駅前 (石川県)
- ⑲ Kaneko O., Yamamoto S., and Wadagaki Y., Simultaneous attainment of model and controller for linear time delay systems with the data-driven Smith compensator, 18<sup>th</sup> IFAC World Congress, 2011.8.31, Università Cattolica del Sacro Cuore (Italy)
- ⑳ 金子 修, 和田垣 祐介, 山本 茂, FRITを用いたデータ駆動型IMCによる非最小位相系・むだ時間系の最適制御パラメータと数式モデルの同時獲得, 第43回計測自動制御学会北海道支部学術講演会 2011年3月1日, 北海道大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金子 修 (KANEKO OSAMU)

金沢大学・電子情報学系・准教授

研究者番号: 00314394