

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420432

研究課題名(和文) 安定化・ロバスト化を実現する多入出力データ駆動型制御 FRITアプローチ

研究課題名(英文) Multi-Input Multi-Output Data-Driven Control with Stability and Robustness -FRIT Approach-

研究代表者

金子 修 (Kaneko, Osamu)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：00314394

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)：データを直接用いて制御器を更新する手法FRITを理論的保証のもとに多入出力スミス法へ拡張した。また現代制御理論におけるオブザーバベースのデータ駆動制御の基礎を与えた。安定性という観点では、FRITと同様に一組のデータで制御器更新を可能にするVRFTが、一巡伝達関数やナイキスト軌跡の整形にも有効であることを見だし、ロバスト性や安定性に関わる一つの基礎的成果を得た。あるクラスの外乱除去の手法も提案した。さらにオブザーバ付き状態フィードバックや時変系または非線形内部モデル制御などにおいて、モデルと制御の同時更新法を提案した。そして、あるクラスのデータ駆動型リアルタイム制御器更新の手法も与えた。

研究成果の概要(英文)：In this research, data-driven controller update based on FRIT is theoretically extended to the MIMO case by addressing MIMO smith compensator. Fundamental of data-driven control for state space setting is established. Moreover, it is clarified that VRFT, which is also one of the data-driven controller tuning, is effective for shaping of the open-loop transfer function or Nyquist loci. This result can be regarded as an important fundamental result related to data-driven controller update with stabilization and robustness. Simultaneous update of model and controller are extended, for example, full-state and minimal state observers based state feedback, nonlinear or time variant typed internal model control, state predictor for time delay systems and so on. In addition, real-time data-driven update methods for a class of controllers, e.g., two-degree of freedom control systems, generalized internal model controllers, state space typed servo systems, and so on, are also proposed.

研究分野：制御工学

 キーワード：データ駆動制御 制御器チューニング FRIT 多入出力制御 感度関数 安定性 状態フィードバック  
オブザーバ

### 1. 研究開始当初の背景

制御対象のデータを直接用いることで制御器を設計および更新するアプローチがいくつか提案され、実用的にも、そのコストパフォーマンスの高さから、産業界から注目を集めつつあった。中でも研究代表者が中心となって開発してきた Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT) は一回の操業データのみで所望の応答を達成することができるという点から、時間とコストの削減という意味で、有益な方法となっている。これまで代表者は、1 入出力系や、むだ時間、非最小位相系、二自由度系などに取組んでいくつかの成果を得てきた。また他の研究者や産業界の技術者も、この FRIT を様々な問題設定のもとに拡張したり、実応用の問題の解決法の一つとして適用し、実例も出始めてきている。

しかし、本研究開始当初は、多入出力系に関する拡張については、理論保証ができていなかった。実応用においては干渉のある多入出力制御系である場合は多く、その意味で FRIT を多入出力系に拡張することは実用上大変有益である。また、FRIT 等で得られた制御器が閉ループ系の安定性や、外乱除去・感度最小化などに関わるロバスト性を保証してあることは、実用上、安全な制御器更新が可能になるという点でも、早急に解決すべき課題であった。さらに、制御対象のモデルも同時に求める、またはノミナルモデルをより精度よく更新できることは、モデル誤差を評価し補償するロバスト制御にも逆に応用が期待できる。その意味でロバスト化の一環として、制御器のみならずモデルを同時に与えるという、代表者がそれまで行ってきた研究成果をさらに発展させことは実用的および理論的にも大変意義があると考えられていた。

### 2. 研究の目的

上記のような背景のもとで、本研究では、データ駆動制御器更新・調整について、代表者が取り組んできた FRIT を中心として、また場合によっては、同じくデータ駆動制御器調整法である VRFT も取り入れることで、以下のような観点での理論および応用双方の観点からの研究を行う。

まず、理論的な意味で多入出力系に適用可能となるように拡張する。また、データ駆動制御器更新・調整により閉ループ系の安定化を図る方法を検討する。そして、感度最小化や外乱除去など閉ループ系のロバスト化も図る方法を検討する。また、ロバスト化に関する主題の一つとしてのモデリングという点では、代表者がこれまで開発してきたモデルと制御器同時更新を、より理論的に深く考察し、さらに、考え得る対象や制御器のクラスもより広く拡張する。これらが本申請課題の目的である。

### 3. 研究の方法

研究代表者がそれまで取り組んできた FRIT に関する先行研究の中で、通常のフィードバック制御系や二自由度制御系を活用した目標値応答特性改善のための制御器チューニング、および、関連する制御とモデルの同時更新の成果をもとに以下のような観点で遂行した。

- (1) 多入出力系への拡張：適用することが可能であることは以前から知られていたもので、ここでは理論的な観点からの保証に着目する。とくにプロセス系で干渉の強い多入出力系が多いことから、同じくプロセス制御で用いられるスミス補償器を例にとり、拡張を行う
- (2) 現代制御理論におけるデータ駆動型制御器更新の確立：これまでのデータ駆動制御器の研究は伝達関数ベースの主題がほとんどであった。そこで、状態フィードバックやオブザーバ併合系の制御系に対しても FRIT 等を拡張する。これは状態量を制御することで、よりきめの細かい制御が可能になることを考えると、更新後の安定性を高める制御器更新が可能になるのではないかと期待される。またオブザーバ系に対する取り組みは、のちの Youla パラメータ併合系を視野に入れた安定化制御器のチューニングを視野に入れているからである。
- (3) 目標値応答以外の仕様への展開：感度関数整形や外乱抑制など、フィードバック特性を更新するためのデータ駆動制御器チューニング法を考える。また、関連する話題としてナイキスト軌跡や一巡伝達関数など、閉ループ系の安定性に関わる指標のデータ駆動型制御器更新も検討する。場合によっては VRFT も視野に入れる。
- (4) 非線形系や時変系への展開：ヒステリシスやウィナー型モデルなど、実用上重要と思われる非線形システムに対して FRIT を拡張する。また時変系へも拡張し、この場合は、オフライン最適化のみならず、オンラインで逐次的に更新することで、外乱などにロバストな逐次更新型データ駆動制御も検討する。
- (5) 制御器とモデルの同時更新・および仕様との関係の考察：線形系に対する二自由度系や IMC に対する代表者の成果を拡張する。この際、制御器の構造という観点では、状態フィードバック、一般化内部モデル制御、状態予測制御、全状態オブザーバおよび最小次元オブザーバを併合したサーボ系、さらに Q パラメータを併合した系への拡張を考察する。対象という観点では、多入出力系（これは (1) にも関連）、あるクラスの非線形系、あるクラスの時変系などにも拡張を行う。
- (6) 上記の内容で、可能であれば、空気圧ゴム人工筋肉や、メカトロニクス系など、実際の対象を用いて検証する。可能でないような主題は数値例を熟考して検証する。

#### 4. 研究成果

具体的には以下の成果を得た。

- (1) 多入出力系への拡張について：1入出力系のときと同様な評価関数を誘導し、その評価関数を最小化することが、なぜ(目標値応答問題に限定しているが) 所望の性能を達成することにつながるかということ考察した。そしてシミュレーションによりその有効性を検証した。そして、出力にむだ時間をもつ系に対して多入出力システムを適用することで、良好な非干渉特性を実現できることをシミュレーションにより確認した(論文 発表)。

現代制御における、状態フィードバックの多入力化も確立した(発表)。これは理論的には正準制御器とよばれる仕様をかならず達成する制御器の構成法を応用することで実現できている。なお、別の側面であるが、正準制御器と FRIT・VRFT が内部モデル制御を軸に密接に関連することも理論的に明らかにした(発表<sup>22</sup>)。

さらに、全状態オブザーバを併合した状態フィードバックによるサーボ系に対して多入出力化に成功した。これは現在論文投稿中である。

- (2) 現代制御理論におけるデータ駆動制御の確立：状態フィードバックおよび全状態オブザーバ、さらにはそれを一般化した最小次元オブザーバについても、FRIT を拡張した(発表 論文)。特に後者では、制御とモデルの同時更新という観点からも確立できている。(1)でも述べたようにこれらは多入出力系にも展開ができています。有効性は数値シミュレーションにより行った。

さらに、LQ 問題の逆問題に基づく ILQ サーボ系の制御ゲインが目標応答とモデルパラメータにより表現可能であるということに着目し、ILQ サーボ系を用いた応答のためのゲイン・モデル・仕様を同時に更新することを試みた(発表<sup>23</sup>)。一応の更新はできているものの、やはりこの三者を同時に更新するには、理論的保証や展開がまだの状態であり、今後の課題として引き続き取り組んでいる。しかし、今後続く有益な結果が出たと考えている。

- (3) さまざまな仕様について：FRIT の考えを応用した擬似外生信号を、ある種の外乱オブザーバを構成したものに適用することで、周期外乱を除去するメカニズムを考案し、数値例で有効性を確認した(論文)。感度関数の整形については、外乱がない状況でも実験が可能であるという前提であるが、感度最小化を行うような評価関数の提案を行った(論文解説)。

FRIT や VRFT の評価関数を考察し、前者は目標値応答を、後者は一巡伝達関数を、おの おの着目してチューニングを行っていることがわかった(発表<sup>21</sup>)。このことに

着目し、まず、VRFT を用いてナイキスト軌跡の整形を検討した(発表)。結果は高周波数帯域での情報が少ないために、良い結果は現時点ではまだ解決すべき問題は多いが、データ駆動制御により安定化に関する特性をチューニングできることは重要な成果である。また VRFT を閉ループ系の整形に、FRIT を目標値応答の特性に、おの おの役割を分担することで、効果的な二自由度制御系のチューニング法も提案した(発表)。さらにロバスト制御と関連の深い一般化内部モデル制御のノミナル性能回復をデータ駆動制御器更新により行う手法も検討した(発表)。

安定化については、VRFT をベースにして、感度関数に制御対象の不安定極をその零点としてパラメタライズすることで、対象の不安定極が同定可能なことと、調整したあとの感度関数に対象の不安定極を零点として持たせる方法を考案した(発表)。このように安定化については、未開な点が多いが、今後続くような重要な基礎結果を得たと考えている。

- (4) 非線形系や時変系への展開：ヒステリシスやウィーナーモデルに代表される非線形系について、FRIT を内部モデル制御に適用することで、良好なチューニングが行える手法を提案した(発表)。成果は空気圧ゴム人工筋肉を題材にした実験例で確認した(発表)。これは方法(6)の成果ともなっている。さらに、あるクラス(入力データと出力データが1対1する性質)の非線形系について FRIT で目標応答が達成できるメカニズムを内部モデル制御の枠組みで理論的に明らかにした(発表)。これは理論的礎を与えたという意味で非常に重要な結果である。

時変系に対しても、時変関数の形や構造が既知の場合には、その時変パラメータを、やはり時変型内部モデル制御に対する FRIT の適用により実現できることを確認した(発表)。さらに、逐次変動するような系に対して、制御器も逐次的に更新する手法を考案した(発表)。この際は、FRIT の計算を過去の有限ホライズンに対して行うことで実現している。また一般化内部モデル制御系に対してもリアルタイムで更新する手法を提案している(発表)。そして代表者がかつて取り組んだに自由度制御系のフィードフォワード部のリアルタイム更新において、リアルタイム計算にかかる部分を Toeplitz 行列の計算に基づく最適性保証フィルタの演算も内包させる方法も提案し(発表)、さらに非最小位相系にも拡張している(発表)。

- (5) 制御とモデルの同時更新：代表者のこれまでの成果をベースにして、全状態オブザーバ、最小次元オブザーバなどが制御対象のパラメータで表現されることに着目することで、制御器とモデルの同時更新法を

提案した(論文 発表 ).Qパラメータもつけた制御器も同時更新が可能であり(発表 ),これは安定化のためのユーラパラメトリゼーションにも関連する結果でもある.むだ時間系に対する状態予測制御系にも制御とモデルの同時更新法とその解析を行った(論文 発表 ).

また(4)で述べた非線形系や時変系のIMCに対するFRIT適用によっても制御とモデルの同時更新を行えることを検討した(発表 ).

以上のように,多入出力化という観点ではデータ駆動制御器更新 FRIT の理論的保証を与えた.そして現代制御の枠組みでのデータ駆動制御器更新の基礎を確立した点は非常に大きな進歩である.更新後のロバスト化や安定化を保証する方法という点では,完全に解決するような方法ができたわけではないが,今後の展開に有益なくつかの基礎的性質や方法を与えることができた.これらは引き続き研究を遂行する.そして制御器とモデルのデータドゥ型同時更新という点でも,考え得る対象や制御器のクラスを拡大することで,より汎用的な同時更新法を与えることができたといえる.

## 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6件)

金子 修, 浅野 佑治, 山本 茂, 最小次元オブザーバを併用した積分型サーボ系における制御器とモデルの FRIT ベースド同時更新, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.29, No.6. 2016, 印刷中

浅野 佑治, 金子 修, 山本 茂, むだ時間系に対する全状態オブザーバを併合した状態予測サーボ系における制御器とモデルの FRIT ベースド同時更新, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.51, No.11, 2015, pp.769-778

奥谷 明大, 金子 修, 山本 茂, FRIT を用いた多入出力むだ時間系に対するスミス補償器のチューニング -出力にむだ時間を持つ場合, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.28, No.2, 2015, pp.58-65

魚住 文彬, 金子 修, 山本 茂, 周期的な未知外乱を除去するためのデータ駆動型制御器パラメータチューニング, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol.134, No.11, 2014, pp.1696-1702

金子 修, 宮島 健, 山本 茂, 全状態オブザーバを併用した積分型サーボ系における制御器とモデルの FRIT ベースド同時更新, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.27, No.3, 2014, pp.122-131

金子 修, データ駆動型制御器チューニング FRIT アプローチ, 計測と制御, 査読無 Vol.52, No.10, 2013, pp. 853-859 解説記事

[学会発表](計23件)

金子 修, 不安定系に対する VRFT, 第60回システム制御情報学会研究発表講演会 2016年5月27日, 京都テルサ(京都府)

細川 昌太, 金子 修, ILQ サーボ系とオフラインオブザーバを併用した制御器とモデルの FRIT ベースド同時更新, 第3回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2016年3月9日, 南山大学(愛知県)

金子 修, データ駆動型制御器チューニング コストダウンへの貢献とモデリングへの展開, 計測自動制御学会制御部門パイオニア技術賞受賞記念講演, 第3回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2016年3月8日, 南山大学(愛知県)

奥谷 明大, 金子 修, 一般化内部モデル制御器のデータ駆動型リアルタイム更新, 第3回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2016年3月8日, 南山大学(愛知県)

本田 拓也, 金子 修, 線形時変系を対象とした線形時変型内部モデル制御器に対するFRIT, 第3回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2016年3月8日, 南山大学(愛知県)

三宅真立, 金子 修, VRFT/FRIT に基づく二自由度制御系のフィードフォワード部のデータ駆動型リアルタイム更新 非最小位相系への拡張, 第3回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2016年3月8日, 南山大学(愛知県)

北崎 良彦, 金子 修, 全状態オブザーバと Youla パラメータを併合した積分型サーボ系における制御器とモデルの FRIT ベースド同時更新, 第3回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2016年3月8日, 南山大学(愛知県)

三宅真立, 金子 修, 鍛冶 達郎, VRFT/FRIT に基づく二自由度制御系のフィードフォワード部のデータ駆動型リアルタイム更新, 第58回自動制御連合講演会, 2015年11月15日, 神戸大学(兵庫県)

奥谷 明大, 金子 修, FRIT を用いた一般化内部モデル制御器のデータ駆動型更新, 第58回自動制御連合講演会, 2015年11月15日, 神戸大学(兵庫県)

北崎 良彦, 金子 修, FRIT と VRFT の評価関数の比較に基づいた二自由度制御系のデータ駆動型チューニング, 第58回自動制御連合講演会, 2015年11月15日, 神戸大学(兵庫県)

Kaneko O., Fictitious Reference Iterative Tuning of Internal Model Controllers for a Class of Nonlinear Systems, IEEE Multi Conference on

Systems and Control 2015, 2015年9月21日, Novotel Sydney Manly Pacific (Australia)

Kaneko O., The Canonical Controller Approach to Data-Driven Update of State Feedback Gains, Asian Control Conference 2015, 2015年6月2日, Sutera Harbour Resort (Malaysia)

金子 修, あるクラスの非線形系を対象とした内部モデル制御系に対する FRIT, 第2回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2015年3月6日, 東京電機大学(東京都)

浅野 佑治, 金子 修, 山本 茂, 最小次元オブザーバを併用した積分型サーボ系に対する制御器とモデルの FRIT ベース同時更新, 第2回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2015年3月5日, 東京電機大学(東京都)

Takada S., Kaneko O., Nakamura T., and Yamamoto S., Data-Driven Tuning of Nonlinear Internal Model Controllers for Pneumatic Artificial Muscles, Australian Control Conference 2014, 2014年11月17日, Australian National University (Australia)

浅野 佑治, 金子 修, 浅野 佑治, むだ時間系に対する全状態オブザーバを併用した状態予測サーボ系の制御器とモデルの FRIT ベース同時更新, 第57回自動制御連合講演会, 2014年11月11日, ホテル天坊(群馬県)

Okano Y., Kaneko O., Sawakawa F., and Yamamoto S., FRIT Based Recursive Update of Feedback Gains in the Integral Type Servo Systems, SICE Annual Conference 2014, 2014年9月10日, 北海道大学(北海道)

Takada S., Kaneko O., and Yamamoto S., Fictitious Reference Iterative Tuning of Internal Model Controllers for Nonlinear Systems with Hysteresis, The 5<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Control of Industrial Process, 2014年5月28日, メルパルク広島(広島県)

奥谷 明大, 金子 修, 山本 茂, FRIT を用いた多入出力むだ時間系に対するスミス補償器のチューニング 出力に複数のむだ時間を持つ場合, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 2014年5月23日, 京都テルサ(京都府)

岡野 祐貴, 金子 修, 澤川 史明, 山本 茂, FRIT に基づく積分型サーボ系のオンライン型逐次更新, 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2014年3月7日, 電気通信大学(東京都)

21 金子 修, FRIT と VRFT のループ特性の比較, 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2014年3月5日, 電気通信大学(東京都)

22 金子 修, 目標値追従のための正準制御器からみた内部モデル制御と FRIT・VRFT について, 第1回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2014年3月5日, 電気通信大学(東京都)

23 澤川 史明, 金子 修, 山本 茂, ILQ サーボ系を利用した FRIT によるモデル・目標応答・制御ゲインの同時獲得, 第56回自動制御連合講演会, 2013年11月16日, 新潟大学(新潟県)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕  
ホームページ等 なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金子 修 (KANEKO OSAMU)  
電気通信大学・情報理工学研究科・教授  
研究者番号: 00314394

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携協力者

なし