

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560533

研究課題名(和文) 制御対象の部分構造情報と入出力データに基づく制御系設計

研究課題名(英文) Control System Design Based on Partial Structure Information and Input-Output Data

研究代表者

若佐 裕治 (Wakasa, Yuji)

山口大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60263620

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、制御対象の部分的な構造情報を利用して、モデルを構成することなく、データから直接制御系を設計する方法を開発した。とくに、不感帯、ヒステリシス、飽和、バックラッシュなどの非線形性の存在のみが既知で具体的な特性が未知である状況において、先行研究よりも良好な制御結果を与える方法を確立することができた。また、通常オフラインで実行される手法をオンライン化し、より簡便な手法への展開を図るとともに、Excel上での制御器調整ソフトウェアの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed direct control system design methods based on input and output data in which we utilize partial structure information of a plant without using any mathematical models of a plant. In particular, we consider control systems with plants where only the existence of nonlinearities such as dead-zone, hysteresis, saturation, and backlash is known, but their detailed properties are unknown. For such control systems, we have proposed several controller tuning methods that can provide better control performance than the conventional methods. Moreover, we have developed an online controller tuning method by applying an adaptive algorithm to the standard offline controller tuning method. We also have developed a controller tuning tool which can be used on Microsoft Excel.

研究分野：制御工学

キーワード：制御系設計 非線形性 入出力データ

1. 研究開始当初の背景

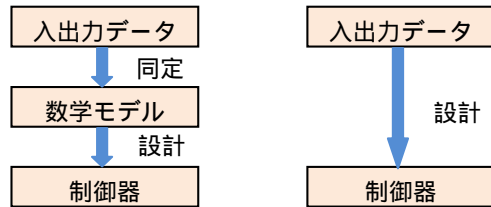


図 1: 一般的な制御系設計手順 (左) とデータに基づく制御系設計手順 (右)

制御系設計を行う際には、まず制御対象の数学モデルを得た後に、モデルに基づいて制御器を設計するのが通常の手順である。数学モデルが物理的考察によって得られない場合は、制御対象に対する入出力実験データに基づいてシステム同定を行うことになる。このようなモデル化と制御器設計の二段階の手順を経ることなく、入出力データから直接制御器を設計できれば、制御系設計にかかる負担を軽減することができる (図 1 参照)。こうした観点から、近年入出力データに基づく制御器パラメータの調整法がいくつか提案されている。とくに、Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT)、Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) と呼ばれる調整法は反復的な実験を必要とせず、一回の入出力実験に基づく実用的な方法として注目されていた。

これらの方法は理論的には主に線形システムに対して発展されている。しかし、実際の制御対象には、不感帯、ヒステリシス、飽和など考慮すべき非線形要素がしばしば含まれている。非線形システムに対してもある種の最適性が成り立つことが示されているが、実用的には、望ましい精度で制御器パラメータの調整ができない場合が多い。したがって、一般的な非線形システムでなくとも、少なくともこれらの典型的な非線形要素をもつシステムに対する実用的な精度の制御器調整法の開発は意義があると考えられた。

2. 研究の目的

本研究では主につぎの事項を目的とした。

- (1) FRIT、VRFT を発展させ、制御対象の部分的な非線形性の情報を利用した、データに基づく制御系設計法を導く。また、さまざまな条件を想定したシミュレーションにより提案法の有効性を明らかにする。
- (2) 不感帯特性をもつ超音波モータ、ヒステリシス特性をもつ形状記憶合金アクチュエータ、バックラッシュ特性をもつギヤ付き DC モータの各実験システムを構築し、提案法を適用して有効性を検証する。
- (3) FRIT、VRFT に有効な最適化手法を検討する。また、FRIT、VRFT は基本的にオフラ

イン手法であるが、オンライン手法への展開を検討する。

- (4) MATLAB、Excel マクロによる制御系設計ソフトウェアを開発する。

3. 研究の方法

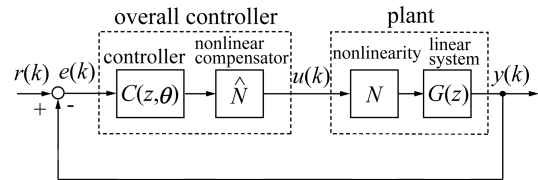


図 2: 非線形性を含む制御対象に対して非線形補償器を導入した制御系の構成

研究の目的の 4 項目に対するアプローチを説明する。

- (1) 図 2 のように、制御対象が非線形部と線形部から構成され、制御器が線形制御器と非線形補償器から構成される制御系を考える。このとき、非線形補償器が十分に制御対象の非線形性を補償するならば、線形制御器で制御対象の線形部を調整すればよいことになる。このアイデアに基づいて、線形制御器だけでなく、非線形補償器も同時に FRIT、あるいは VRFT によって調整する手法を展開した。非線形性としては、不感帯、ヒステリシス、飽和、バックラッシュなどを扱う。手法の有効性を MATLAB によるさまざまなシミュレーションによって確認する。
- (2) 図 3 のようなモータ制御実験システムを構築した。モータ部は、不感帯特性に対しては超音波モータとし、バックラッシュ特性に対してはギヤ付 DC モータとして、それぞれの特性に応じたシステムを構築した。また、ヒステリシス特性に対しては図 4 のような形状記憶合金アクチュエータ制御システムを構築した。これらの制御実験システムを用いて、提案法の有効性の実験検証を行った。

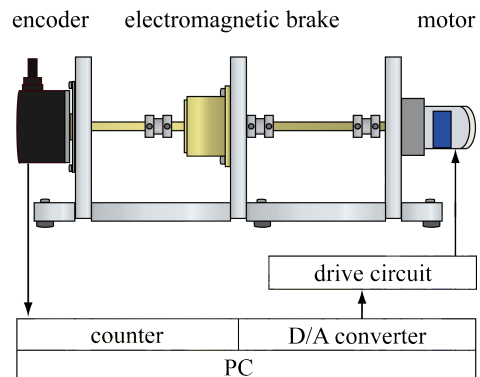


図 3: モータ制御実験システム

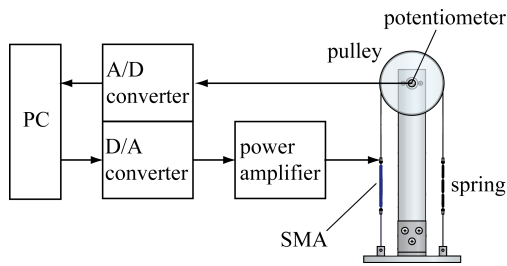


図 4: 形状記憶合金アクチュエータ制御実験システム

- (3) FRIT と逐次最小 2 乗法により、オンラインで制御器を調整する方法を開発する。1 自由度制御系だけでなく、2 自由度制御系のフィードフォワード制御器の調整も対象とする。
- (4) MATLAB Excel Builder EX Toolbox を用いて、表計算ソフトウェアである Excel 上で FRIT を実行できる環境を構築する。FRIT を実行できる Excel アドインを生成するとともに、Excel VBA プログラミングを行い、マクロの活用によって操作性を向上させる。

4. 研究成果

本研究の当初の目的は十分に達成された。まず、さまざまな非線形性に対する FRIT による制御器調整法に関しては、不感帯（雑誌論文[16]）、ヒステリシス（雑誌論文[13]）、バックラッシュ（雑誌論文[3]）、飽和（雑誌論文[1]）の各非線形特性を扱い、いずれにおいても有効性のある方法が開発できた。これらの結果を学会誌の解説記事（雑誌論文[12]）において統一的にまとめて紹介した。

また、オンライン型制御器調整法を発表し、通常オフラインで行う手法をオンライン化することで、より簡便な手法となることを明らかにした（雑誌論文[6]）。この方法をさらに非線形制御対象に拡張すべく、粒子フィルタの適用を検討し、その効果を確認することができた（雑誌論文[2]）。

Excel 上のソフトウェアについては、実際に開発した手順や無償での配布手順を公表した（学会発表[3]）。企業においては、MATLAB の使用環境がなく、C 言語を用いて計算を行う場合も少なくない。さらに、Microsoft Excel によりデータ管理をする場合も多い。Excel による制御系設計が可能となれば、企業における開発・研究者には魅力的であり、容易にその方法を試行できると期待される。

上述のように、当初の研究目的は達成されたが、それだけにとどまらず、本研究に派生して、新たな類似手法の開発や応用研究の成果を得ることができた。FRIT では制御出力、VRFT では制御入力に関する評価関数を設定するのにに対し、雑誌論文[4]、[5]では、制御偏差に関する評価関数を扱う制御器調整法

を提案し、この方法に関する解析を行った。また、正弦波 PWM インバータの制御器構造に注目し、その制御器調整に FRIT を適用し、有効性を示すことができた（雑誌論文[7]）。このように通常の雑誌論文、学会発表を通して研究成果を発表するだけでなく、チュートリアル講演（学会発表[2]）や公開講座（学会発表[11]）の講師を務めることにより、積極的に研究成果の発信に努めた。

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 17 件)

[1] Yuji Wakasa and Shojiro Adachi, Fictitious reference iterative tuning considering input saturation, IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering, vol. 10, no. S1, 2015 (to appear). 査読有。

[2] 若佐裕治, 粒子フィルタによる制御器パラメータ調整, 計測自動制御学会論文集, vol. 50, no. 3, pp. 281-286, 2014. 査読有。

[3] Yuji Wakasa and Ryo Azakami, Direct controller parameter tuning for systems with backlash, Proc. SICE Annual Conference 2014, pp. 6-11, 2014. 査読有。

[4] Yuji Wakasa, Ryo Azakami, Kanya Tanaka, and Shota Nakashima, Modified virtual reference feedback tuning and its application to shape memory alloy actuators, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol. 6, no. 6, pp. 369-375, 2013. 査読有。

[5] Yuji Wakasa, Kanya Tanaka, and Shota Nakashima, Modified virtual reference feedback tuning and its application to ultrasonic motors, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, vol. 9, no. 11, pp. 4321-4329, 2013. 査読有。

[6] 若佐裕治, 阿座上 諒, 増田士朗, 田中幹也, 中島翔太, FRIT と逐次最小 2 乗法によるオンライン型制御器調整, 電気学会論文誌 C, vol. 133, no. 10, pp. 1950-1956, 2013. 査読有

[7] 若佐裕治, 馬場雄介, 田中俊彦, FRIT による正弦波 PWM インバータの制御器調整, 電気学会論文誌 D, vol. 133, no. 8, pp. 859-860, 2013. 査読有。

[8] Yuji Wakasa, Approximate analysis of direct controller tuning methods, Proc. SICE Annual Conference 2013, pp. 1470-1474, 2013. 査読有.

[9] Yuji Wakasa, Kanya Tanaka, and Shota Nakashima, Model-free controller parameter tuning via particle filtering, Proc. 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, pp. 343-348, 2013. 査読有.

[10] Yuji Wakasa, Ryo Azakami, Kanya Tanaka, and Shota Nakashima, FRIT and RLS-based online controller tuning and its experimental validation, Proc. 9th Asian Control Conference, 2013. 査読有. DOI: 10.1109/ASCC.2013.6606193.

[11] Yuji Wakasa, Kanya Tanaka, and Shota Nakashima, Controller parameter tuning based on particle filtering, Proc. 44th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, pp. 67-72, 2013. 査読有.

[12] 若佐裕治, データ駆動型制御における非線形補償と最適化手法, 計測と制御, vol. 52, no. 10, pp. 872-877, 2013. 査読無 (解説記事).

[13] Yuji Wakasa, Shinji Kanagawa, Kanya Tanaka, and Yuki Nishimura, Controller parameter tuning for systems with hysteresis and its application to shape memory alloy actuators, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol. 5, no. 3, pp. 162-168, 2012. 査読有.

[14] Yuji Wakasa, Futa Takayama, and Kanya Tanaka, Modified VRFT and its application to ultrasonic motors, Proc. SICE Annual Conference 2012, pp. 182-186, 2012. 査読有.

[15] Yuji Wakasa, Kanya Tanaka, and Yuki Nishimura, Online controller tuning via FRIT and recursive least-squares, Proc. 2nd IFAC Conference on Advances in PID Control, pp. 76-80, 2012. 査読有.

[16] Yuji Wakasa, Shinji Kanagawa, Kanya Tanaka, and Yuki Nishimura, FRIT for systems with dead-zone and its application to ultrasonic motors, IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, vol. 131, no. 6, pp. 1209-1216, 2011. 査読有.

[17] Yuji Wakasa, Shinji Kanagawa, Kanya Tanaka, and Yuki Nishimura, Direct PID tuning for systems with hysteresis and its application to shape memory alloy actuators, Proc. SICE Annual Conference 2011, pp. 2933-2938, 2011. 査読有.

〔学会発表〕(計 11 件)

[1] 足立祥二郎, 若佐裕治, ヒステリシスを考慮した FRIT に基づく制御器調整法, 第 23 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2014.11.29, 福山大学宮地茂記念館 (福山)

[2] (チュートリアル講演) Yuji Wakasa, Nonlinear compensation and optimization methods for data-driven control, SICE Annual Conference 2014, Tutorial 1, Data-Driven Controller Tuning: Basics and New Developments, Lecture 3, 2014.9.9, 北海道大学 (札幌)

[3] 若佐裕治, 尾藤輝行, 田中幹也, 中島翔太, 表計算ソフトを用いた制御器調整ツールの開発, 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2013.5.17, 兵庫県民会館 (神戸)

[4] 若佐裕治, 最適化への発見的アプローチ-PSO の解析と MATLAB ツールの比較-, 2013 年電子情報通信学会総合大会, (チュートリアルセッション)信号処理における最適化: 凸最適化とヒューリスティックアプローチ, 2013.3.20, 岐阜大学 (岐阜)

[5] 若佐裕治, 田中幹也, 中島翔太, 粒子フィルタによる制御器パラメータ調整, 第 13 回計測自動制御学会制御部門大会, 2013.3.6, アクロス福岡 (福岡)

[6] 阿座上 諒, 若佐裕治, 田中幹也, 中島翔太, 逐次最小 2 乗法によるオンライン型 FRIT の実験検証, 第 21 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2012.11.24, 広島工業大学 (廿日市)

[7] 若佐裕治, 田中幹也, 中島翔太, 直接的制御器調整法の近似的解析, 第 41 回制御理論シンポジウム, 2012.9.19, IPC 生産性国際交流センター (神奈川・葉山)

[8] 若佐裕治, 高山風太, 田中幹也, 修正型 VRFT とその超音波モータへの応用, 第 56 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2012.5.23 京都テルサ (京都)

[9] 若佐裕治, 田中幹也, 西村悠樹, FRIT と逐次最小 2 乗法によるオンライン型制御器調整, 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 2012.3.15, 奈良県文化会館 (奈良)

[10] 若佐裕治, 田中幹也, 西村悠樹, 逐次最小 2 乗法によるオンライン型 FRIT, 第 20 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2011.11.26, 岡山大学 (岡山)

[11] 若佐裕治, 非線形性をもつシステムに対する FRIT, 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 (Fictitious Reference Iterative Tuning) 法の基礎理論とその応用-, 2011.9.22, 京都テルサ (京都)

〔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

若佐 裕治 (WAKASA YUJI)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 60263620

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし