

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 21 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420444

研究課題名(和文) PFCを併用した実践的スマート適応制御システムの構築に関する研究

研究課題名(英文) Research on a Development of Practical Smart Adaptive Control Systems with a PFC

研究代表者

水本 郁朗 (Mizumoto, Ikuro)

熊本大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：30239256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、希望する特性を達成するためのPFCの実践的かつよりスマートな設計法を確立し、蓄積されたデータを利用した、モデルフリーなPFC設計法の開発を行った。また、オンラインでPFCを設計するデータ駆動型のPFC調整法への拡張を行い、よりスマートなPFC構成法の実現をした。さらに、PFCを併用した新しい適応型の制御系設計法の開発を目指し、PFCを併用した単純な構成の予測器の実現を考え、フィードバック制御系以外でのPFCの活用についても検討した。また、構築した制御系を実機のシステムに適用して実証的な検討を行い、より実践的なスマート適応制御システムの構築について検討した。

研究成果の概要(英文)：In this research, in order to realize a smart and practical design scheme of a PFC which renders a new controlled augmented system with desired properties, a data based and model free PFC design scheme are firstly developed by using system's data which is obtained from operations. The model free PFC design scheme was expanded to a data driven one-line PFC adjusting method and thus more smart PFC design scheme was proposed. Furthermore, to aspire to becoming development of a novel adaptive-type control system design, we consider to develop an adaptive predictor design scheme with simple structure using a PFC, and then we investigated additional availability of the PFC in the control system design. The developed control system design schemes were validated through numerical simulations and experiments for practical systems, and development of practical and smart adaptive control system was investigated.

研究分野：制御工学

キーワード：適応制御 データ駆動型制御 予測制御 並列フィードフォワード補償器 スマート適応制御 モデルフリー設計

1. 研究開始当初の背景

多くの産業分野で実際に使われている制御手法の多くは、未だに PID 制御手法である。この理由の一つは、PID 制御手法が、構造が簡単で、制御器パラメータの物理的意味が明確、現場の技術者にその挙動が理解されやすいといった単純な構造であるにも関わらず、ある程度の不確かさや外乱に対するロバスト性がある、ということである。しかしながら、産業界において、新しいより高性能な制御器に対する期待は、近年、製品の高性能化や省エネ化およびコストパフォーマンスの面から日々高まっている。このような背景から、構造が単純で高性能かつ対象システムの不確かさに対するロバスト性に優れた制御手法の一つとして、「単純適応制御 (Simple Adaptive Control)」手法に代表されるシステムの受動性を利用した出力フィードバック形式の制御手法の研究が行われており、メカニカルシステム、宇宙構造物、飛行体、化学プロセス、さらには医療の分野においての利用が検討されその一部においてはすでに実用化もなされている。

この単純適応制御に代表される出力フィードバック形式の制御手法が適用できるためには、システムは「出力フィードバックにより強受動化可能」でなくてはならず、多くの実システムがこの条件を満足しないことから、この条件を簡単に緩和する一つの手法として、「並列フィードフォワード補償器 (PFC)」を導入する手法が提案されている。この手法は、図 1 に示されるように、PFC を制御対象に対して並列に付加することで、希望する特性を有する拡張された新しい制御対象を構成し、この新しい拡張制御対象に対し、制御系を設計しようとするものである。この PFC を導入する最も重要な特徴は、通常、フィードバックのみではシステムの極のみしか変化させることができないのに対し、PFC を並列に付加することで、システムの相対次数およびシステムのゼロ点 (ゼロダイナミクス) の特性を自由に变化させることができる点である。この PFC の導入により、単純適応制御等のシステムの受動性に基づく、構造の簡単な出力フィードバック形式の制

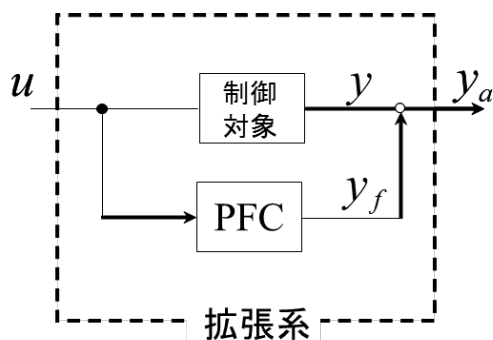


図 1 拡張制御対象

御手法の応用範囲は、格段に広げられた。この PFC は単純なアイデアであるが、システムの特性を並列に付加されたフォワードシステムにより希望する特性に変化させることにより、理想的な制御系を非常に単純な構造で実現できる手法であり、非常にパワフルな手法である。しかし、このアイデアは、これまでのところ、研究代表者らが中心となって研究を行ってきた単純適応制御に代表される出力フィードバック形式の手法への適用に限定されており、さらに、この手法を適用するためには、適切な PFC を制御対象に合わせて設計しなければならなかった。

2. 研究の目的

上述したように、並列に補償器を付加することで、制御系設計において重要となる相対次数およびゼロダイナミクスの特性を变化させることができることから、この原理を応用することで、これまで、限定された制御系設計法しか適用できなかったシステムに対しても PFC を伴う新しい構造の単純な制御系設計法開発の可能性が期待できる。また、種々の制御問題に対し、より簡単でロバスト性の向上した制御器の開発を行うことは、実用的かつ実践的な制御系を構成する上で、非常に重要な課題である。さらに、構成される制御システムは、システムの変化、環境の変化等に対して、制御性能を自動で判断し、かつ、それに応じて自動で (適応的に) 制御システムを变化させる機能を持ったスマートなシステムでなければならない。以上のことから、本研究では、制御系設計のために、希望する特性を達成するための PFC のより実用・実践的かつスマートな設計法の開発、および、PFC を併用したスマート制御系設計法に関する総合的な研究を行い、PFC 利用による実践的な制御系設計法の確立を目指す。具体的には、本研究では、初めに、希望する特性を達成するための PFC の実践的かつよりスマートな設計法の確立を目指し、蓄積されたシステムに関するデータ (操業データや実験データ) を利用した、対象システムのモデルによらないモデルフリーな PFC 設計法の開発を行う。この PFC 設計法の開発により、これまで、システムの構造や近似モデルが既知でなければ設計できなかった PFC を、より実用的かつ実践的に設計する手法の確立を目指す。また、システムの変化に応じてオンラインで PFC を設計するデータ駆動型の PFC 調整法への拡張を行い、よりスマートな PFC 構成法の実現を目指す。さらに、本研究では、PFC 設計法の構築と並行して、PFC を併用した新しい適応型の制御系設計法を開発を目指す。具体的には、過去、現在および未来のデータを駆使した、より実用的かつ実践的なスマート適応制御システムの構築を目指す。未来のデータ取得には、PFC を併用した単純な構成の予測器の実現を考え、フィードバック制御系以外での PFC の活用の可能性についても検討する。また、構

築した制御系を実験室レベルではあるが、実機のシステムに適用して実証的な検討を行いその有用性について検証する。

3. 研究の方法

本研究では、はじめに、希望する特性を有する新しい拡張制御対象を構成するための、より実用・実践的かつスマートな PFC の設計法の開発、を目指し、制御対象のモデルによらないモデルフリーな PFC 設計法の開発を行うための理論的検討を行った。また、いくつかの制御問題に対して PFC を併用した制御系設計法の理論的検討も並行して行った。さらに、蓄積された操業データを基に、システムの変化に応じてオンラインで PFC を設計するデータ駆動型の PFC 調整法への拡張を行い、よりスマートな PFC 構成法を実現するための理論的研究を行うと同時に、検討した PFC を併用した制御系設計法と組み合わせることで、データに基づくよりスマートな適応的制御系設計法開発を念頭にした制御系設計法の理論展開を行い、より実用・実践的かつスマートな制御系構築のための総合的な理論的検討を行った。なお、最終的にこの研究を遂行・完結するために、制御性能を評価するためのパフォーマンスモニタリングやパフォーマンス評価の知識が不可欠となるため、この部分に関しては、その分野のパイオニアの一人である、カナダアルバータ大学の S. L. Shah 教授に助言を仰ぎながら、研究を進めた。（スマート制御系概念図参照）。

具体的には、各年度で下記のような計画で研究を遂行した。

(1) 平成 25 年度の研究計画・方法

平成 25 年度は、PFC の蓄積データを下にしたモデルフリー設計法および PFC を併用した各種制御系設計法の検討、に関して、それぞれに対し個別に理論的検討を中心に基礎研究を行った。具体的には、以下の項目に対して、個別に検討を行った。

蓄積データを基にした PFC のモデルフリー設計に関する検討

PFC の設計法は、これまで申請者らの開発した手法も含めその多くが対象システムのモデルに依存したものであった。これに対し、近年、申請者らは FRIT 手法によるいくつか

の PFC のモデルフリー設計法が提案されているが、これらは、出力フィードバック（閉ループ系）を念頭にした設計法であった。そこで、より一般的な、希望する拡張制御系（開ループ系）を構成するためのデータに基づくモデルフリー PFC 設計法の検討を行った。

PFC を併用した種々の制御系設計法の検討

PFC を併用することにより、制御対象の次数およびゼロダイナミクスを任意に変化させることができる。このことを利用した、制御系設計法について再検討する。具体的には、下記の検討を行った。

(2) 平成 26 年度以降の研究計画・方法

平成 26 年度以降は前年度に理論的検討を行った、モデルフリー PFC 設計法を基に、並行して検討を行った制御手法のデータに基づく適応的手法への拡張を行い、開発した PFC を併用した制御手法のスマート化を図った。さらに、構築したスマート適応制御手法の有用性を数値シミュレーションおよび実機での実証実験により検討し、実用を目指したスマート制御系構築のための総合的な検討を行った。具体的には、以下の点に重点を置き拡張する。

データに基づくスマート適応制御系設計法開発

(a) 開発した予測制御手法に関して、プロセス系およびネットワーク制御系への応用を念頭に、マルチレートシステム（非一様サンプリングを含む）への拡張を行い、任意のサンプリング周期に対応したスマート適応予測制御手法を開発した。

(b) むだ時間を有するメカニカルシステムを念頭に、検討した適応出力フィードバック制御手法とむだ時間系に対する手法を融合させたスマート適応出力フィードバック制御手法の開発を行った。

開発した手法では、データに基づくモデルフリー PFC をパフォーマンス評価に応じて必要に応じて再設計することにより、システムの特性変動にオンラインで対応したスマート制御手法を目指した。

実証実験による検討

本研究により構築したスマート適応制御手法の有効性および実用性を実験室レベルの実験装置により検証した。

(a) タンクプロセスによる制御実験

研究室所有の非線形 3 タンクプロセス実験装置により、新しく開発したスマート適応予測制御手法の有用性の検討を実験的に行った。

(b) 磁気浮上システムによる制御実験

研究室所有の磁気浮上実験装置により、人為的にむだ時間を発生させることにより、既存の実験装置においてむだ時間制御系を仮想的に実現し制御実験を行った。

以上、本研究では、実践的かつ実用的なスマート適応制御手法の開発を行い、さらに、その有用性を実験により検証することで、開発手法の実用化への検討を行った。

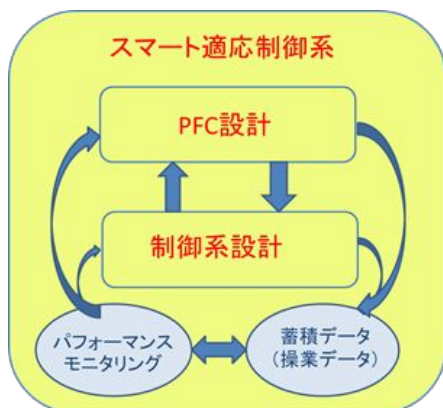


図 2 スマート制御系概念図

4. 研究成果

本研究では、初めに、希望する特性を達成するための PFC の実践的かつよりスマートな設計法の確立し、蓄積されたシステムに関するデータ（操業データや実験データ）を利用した、対象システムのモデルによらないモデルフリーな PFC 設計法の開発を行った。また、システムの変化に応じてオンラインで PFC を設計するデータ駆動型の PFC 調整法への拡張を行い、よりスマートな PFC 構成法の実現をした。さらに、本研究では、PFC 設計法の構築と並行して、PFC を併用した新しい適応型の制御系設計法の開発を目指し、PFC を併用した単純な構成の予測器の実現を考え、フィードバック制御系以外での PFC の活用の可能性についても検討した。また、構築した制御系を実験室レベルではあるが、実機のシステムに適用して実証的な検討を行いその有用性について検証し、より実用的かつ実践的なスマート適応制御システムの構築について検討した。

具体的には、以下の項目について成果が得られた。

(1) 蓄積データを基にした PFC のモデルフリー設計に関する検討

PFC のこれまでの設計法の多くは、対象とするシステムのモデルに依存したものであったが、本研究では FRIT 手法を拡張したデータに基づくモデルフリーPFC 設計法の検討を行い、連続時間系および離散時間系に対するより一般的な希望する拡張制御系を構成するための新しいデータに基づくモデルフリーPFC 設計法を開発した。

(2) PFC を併用した種々の制御系設計法の検討

PFC を併用した制御系設計法に関しては、(a)PFC を併用した適応出力フィードバック系の設計法の再検討
(b)PFC を用いた出力推定器の開発とその予測制御への応用の検討
(c)むだ時間を有するシステムに対する制御系設計に関する検討

を行った。(a)では、PFC を付加することによる PFC 出力からのバイアス効果の影響により、実出力にオフセット誤差が残ってしまう問題を解決する手法について再検討を行い、その設計法を理論的に検討した。(b)では、PFC を併用した単純な構造の出力推定器の開発を行い、その予測制御への応用について理論的に検討した。さらに(c)では、むだ時間を有するシステムに対する、PFC を併用した制御系設計法の検討を行い、これまで取り扱ったの難しかったむだ時間系への効果的かつロバストな制御系設計法の理論的検討を行い新しい制御系設計法の提案を行った。

(3) データに基づくスマート適応制御系設計法開発

(1),(2)で理論的検討を行った、モデルフリーPFC 設計法をデータに基づく適応的手法へ拡張し、開発した PFC を併用した制御

手法のスマート化を図った。特に、開発した予測制御手法に関して、プロセス系およびネットワーク制御系への応用を念頭に、マルチレートシステム（非一様サンプリングを含む）への拡張を行い、任意のサンプリング周期に対応したスマート適応予測制御手法の開発が行えた。さらに、むだ時間を有するメカニカルシステムを念頭に、適応出力フィードバック制御手法とむだ時間系に対する手法を融合させたスマート適応出力フィードバック制御手法の検討を行った。開発した手法では、データに基づくモデルフリーPFC 設計法による補償器の設計により、モデルの不確かなシステムに対するスマート御手法を目指しており、過去、現在、未来のデータを駆使したスマート適応制御手法の構築を図ることができた。

(4) 数値シミュレーションおよび実証実験による検討

理論的検討を行ってきた、適応的モデルフリーPFC 設計法および、開発した PFC を併用したスマート化を図った制御手法の有効性および実用性を数値シミュレーションおよび実際の実機実験により検証し、実践的かつ実用的なスマート制御系の開発および実用化への検討を行った。

具体的には、

(a)研究室所有の非線形 3 タンクプロセス実験装置により、新しく開発したスマート適応予測制御手法の有用性の検討を実験的に行った。この実験では、公称モデルに大きな不確かさが存在する場合を想定した実験を行い、開発したスマート適応制御手法のロバスト性、制御性能を確認することができた。

(b)研究室所有の磁気浮上実験装置により、メカニカルシステムへの適用可能性について、実験的検討を行った。この実験では、人為的にむだ時間を付加した装置に対して適応出力フィードバック制御手法とむだ時間系に対する手法を融合させたスマート適応出力フィードバック制御手法の有用性の検証を行うことができた。

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 20 件)

Ikuro Mizumoto and Taro Takagi: Output Tracking Control of Discrete-Time Nonlinear Systems by Output Feedback based Adaptive PID, 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 6954-6959 2015.

Ikuro Mizumoto, Seiya Fujii and Masataka Ikejiri: Control of a Magnetic Levitation System via Output Feedback Based Two DOF Control with an Adaptive Predictive Feedforward Input, 2015 IEEE Multi-Conference on Systems

and Control, pp.71-76, 2015.

Ikuro Mizumoto, Ikejiri Masataka, Kai Ding and Seiya Fujii: Output Feedback Based 2DOF Control with a Robust Predictive Feedforward Input, SICE Annual Conf. 2015, pp.720-723, 2015.

T. Takagi, I. Mizumoto, J. Tsunematsu: Performance-Driven Adaptive Output Feedback Control with Direct Design of PFC, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.27, No.5, pp.462-468, 2015.

Ikuro Mizumoto, Masataka Ikejiri and Taro Takagi Stable Adaptive Predictive Control System Design via Adaptive Output Predictor for Multi-rate Sampled Systems, Proc. of the 9th International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, IFAC, pp.1040-1045, 2015.

Ikuro Mizumoto and Masataka Ikejiri: ASPR Based Output Feedback Control with an Adaptive Predictive Feedforward Input, Proc. of the 10th Asian Control Conference 2015(ASCC2015), 2015.

Ikuro Mizumoto, Yotaro Fujimoto, Masataka Ikejiri: Adaptive Output Predictor based Adaptive Predictive Control with ASPR Constraint, Automatica, Vol. 57, 152-163, 2015. DOI:10.1016/j.automatica.2015.04.020

Ikuro Mizumoto, Hiroaki Miyanaga, Masataka Ikejiri, Taro Takagi: Predictive Control System Design with Adaptive Output Estimator for Non-uniformly Sampled Multi-rate Systems and Its Application to Liquid Level Control, 2014 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), Part of 2014 IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp. 1437-1442, 2014.

Ikuro Mizumoto and Taro Takagi: Adaptive Output Feedback based Output Tracking Control for a Time-delay Systems with a PFC, Asian Journal of Control, Vol. 17, No. 6, pp. 1-15, 2015 ; DOI: 10.1002/asjc.1014

高木太郎, 水本郁朗: 離散時間系に対する適応 NN フィードフォワードを併用した適応 PID 制御, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.134, No.9, pp.1175-1181, 2014.

Ikuro Mizumoto and Yotaro Fujimoto: Fast-rate output feedback control system design with adaptive output estimator for nonuniformly sampled multirate systems, International Journal of Adaptive Control and Signal

Processing, Vol.28, No.7-8, pp.686-707, 2014. DOI:10.1002/acs.2407.

Taro Takagi, Ikuro Mizumoto and Junpei Tsunematsu: Performance-Driven Adaptive Output Feedback Control and Its Application to Two-Tank System, Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS2014), pp. 254-259, 2014.

Ikuro Mizumoto and Taro Takagi: ASPR based Adaptive Output Feedback Control System Design via T-S Fuzzy Model for Nonlinear Systems, Proc. of 2014 European Control Conference (ECC), pp.2090-2095, 2014.

Taro Takagi and Ikuro Mizumoto: Adaptive and Performance-Driven PID Control System Design for Discrete-time Systems with a Parallel Feedforward Compensator Designed via FRIT, Proc. of 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, pp.90-95, 2014.

Ikuro Mizumoto, Taro Takagi, Sota Fukui, Sirish L. Shah: PFC design via FRIT approach for adaptive output feedback control of discrete-time systems, Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi), 187(1):24-32, 2014.

水本 郁朗, 宮永 浩彰: 適応出力予測器による予測制御系設計, システム制御情報学会論文誌, Vol.27, No.3, pp.101-107, 2014.

Taro Takagi and Ikuro Mizumoto: Performance-Driven Adaptive Control System Using a Direct PFC Design Scheme via Input/Output Data for Discrete-time Systems, ICIC Express Letters, Volume 8, Number 1, pp.257-262, 2014.

高木太郎, 水本郁朗: 離散時間系に対する適応出力フィードバック制御のための疑似 T-S Fuzzy モデルを用いた FRIT による PFC 設計, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.133 No.6 pp.1120-1128, 2013.

Ikuro Mizumoto and Taro Takagi: Performance-Driven Adaptive Control System Design with a PFC Designed by System's Input/Output Data, Proc. of 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, pp. 570-575, 2013.

Ikuro Mizumoto, Taro Takagi and Kenshi Yamanaka: Parallel Feedforward Compensator Design and ASPR based Adaptive Output Feedback Control for a

Time-delay System, Proc. of 2013
American Control Conference (ACC), pp.
4916-4921, 2013

6 . 研究組織

(1)研究代表者

水本 郁朗 (MIZUMOTO IKURO)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：3 0 2 3 9 2 5 6

(4)研究協力者

Sirish L. Shah

アルバータ大学(カナダ)・教授

研究者番号：なし