

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：32644

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700276

研究課題名(和文)直観的・効果的な制御を実現する区分的双線形モデル予測制御手法の開発

研究課題名(英文)Developments of intuitive and effective control methods using piecewise bilinear model predictive control systems

研究代表者

谷口 唯成(Taniguchi, Tadanari)

東海大学・情報教育センター・准教授

研究者番号：70392032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：実プロセスの制御エンジニアが効果的に制御系設計を行う設計手法として、区分的双線形モデル予測制御手法の開発を行った。さらに多入力多出力非線形システムに対する制御手法の開発、不確かさを有するモデルに対する制御手法の開発、ルックアップテーブル型制御器設計手法の開発、多入力多出力系サーボ制御システムの開発、状態オブザーバの設計手法の開発を行った。実プロセスの制御エンジニアが直観的にモデリング、制御系設計を行う設計手法として、本設計手法に対するフィードバック誤差学習手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Despite the many analysis and synthesis methods proposed for nonlinear control systems, difficulties remain in dealing with nonlinear control systems, compared to linear systems, and the major reason lies in the lack of a general parametric expression for nonlinear systems. In addition, it is not easy to handle nonlinear control theories for onsite control engineers. To overcome the difficulties, we aimed to develop a control method which was not difficult to design the nonlinear control systems. In this work, we developed intuitive and effective control methods using piecewise bilinear model predictive control system. As the control performance, we proposed a piecewise controller for multi-input and multi-output nonlinear systems, the robust controller, a look-up-table type controller, a servo controller and an observer system. We also proposed a piecewise bilinear models for feedback learning based on on-line feedforward controller design.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：知的制御 区分的双線形モデル モデル予測制御 非線形制御 制御系設計

### 1. 研究開始当初の背景

現在、多くの非線形システム制御が行われている。大域的にモデリング、安定解析を行う従来の制御手法に対して、局所的、区分的にモデル化、設計する手法が研究されている。当初は取り扱いが容易な半面、理論的な安定解析等で劣っている点が存在したが、最近では、安定解析の理論的研究が進み、制御系設計の保守性を回避する手法とされている。中でも区分的線形制御手法、ゲインスケジューリング手法、高木-菅野のモデルによるファジィ制御手法等の研究が行われており、優れたモデリング性能、制御性能を実現している。しかし実際の産業分野では、モデリングや制御性能に劣る PID 制御等が使われており、制御性能よりもエンジニアの感覚による調整の容易さが重要視していることがわかる。現在、研究されている非線形制御では、現場のエンジニアの使い勝手、設計過程の容易性についてはほとんど考慮されていない。

申請者は区分的双線形モデルによる非線形制御手法の研究を行っている。この制御手法の特徴として、

- ・任意の非線形システムをモデル化可能、区分領域数でモデル化精度を任意に変更可能
  - ・区分モデルをファジィ if-then ルールで表現可能である
  - ・状態空間を矩形領域で分割し、モデルの動特性を矩形領域の端点の内挿で表現しているので、モデル化が容易でイメージしやすく、安定条件が必要十分条件(2次元)。
- 安定化制御手法として、区分的双線形モデルに入出力フィードバック線形化手法、フィードバック線形化手法を適用することで、ベンチマーク的な非線形問題に対する基本的な安定化制御器設計を実現している。

### 2. 研究の目的

従来行なわれてきた、機械システムなど実プロセスに対する安定性、ロバスト性、最適性などの制御性能に加えて、今後、環境問題や省エネルギー等の社会的なニーズによる制御性能を含めた高度な制御設計の需要がより高まることが予想される。本研究では、実プロセスに対して必要とされる非線形制御を実現するとともに、現場のエンジニアにとって扱いやすく、効果的な設計手法を提案することが目的である。3年間で制御系設計のための理論構築と設計ツールのプロトタイプ作成を目指す。

現在研究されている非線形制御手法によって、優れたモデリング性能、制御性能を実現している。しかし現場のエンジニアの使い勝手、設計過程の容易性についてはほとんど考慮されていない。本研究では、

- ・区分的双線形モデルによるモデル化のイメージを掴みやすいモデル化性能の高いモデリング手法

- ・現場のエンジニアが必要とする制御性能を考慮しやすいモデル予測制御手法
  - ・小脳の働きを模した脳型フィードバック制御によるチューニングが容易で、高速かつ滑らかな制御を実現する手法を開発する。
- 本研究は、実プラントの制御手法としてよく用いられている PID 制御手法(モデル化性能、制御性能ともに高いとは言えない)に代わる非線形制御系設計の一手法となることが目標である。この本設計手法が現場の多くのエンジニアに使用されることで、通常の制御性能だけでなく、環境問題など社会的なニーズを含めた制御を実現する。

### 3. 研究の方法

実プロセスの制御エンジニアが直観的、効果的にモデリング、制御系設計を行える設計手法の確立を目指し、制御系設計に必要な理論構築を行う。

(1) 本研究の制御系設計の基礎理論として、区分的双線形システムを用いた非線形モデル予測制御の開発を行う。

(2) 効果的な制御器設計手法として、区分的双線形モデルの多入力多出力システムの安定化手法、ロバスト安定化制御器、ルックアップ制御器の設計手法の開発、サーボ制御器、オブザーバの設計手法の開発を行う。

(3) 直観的なモデリング手法として、区分的双線形モデルを用いた脳型フィードフォワード制御系の設計手法の開発を行う。

### 4. 研究成果

(1) 直感的・効果的な制御を実現する区分的双線形モデル予測制御手法の開発として、平成 23 年度はフィードバック線形化手法を用いた区分的双線形モデル予測制御手法の理論構築を行った。具体的な内容は以下の通りである。

入出力線形化手法による区分的双線形モデル予測制御手法の開発：制御対象の状態空間を矩形領域に分割し、各領域の端点値による凸結合としてモデル化を行うため、モデル化が容易であることが特徴である区分的双線形システムを用いたモデル予測制御手法を開発した。制御系の安定化には、対象システムの入出力に着目した入出力線形化手法を用いた。区分的双線形モデルとモデル予測制御を組み合わせることで、実システムの高度な制御系設計を行うための基礎理論を提案した。

厳密な線形化手法による区分的双線形モデル予測制御手法の開発：非線形制御系を取り扱うモデルとして区分的双線形システムを用い、制御系の安定化には、全ての状態に関して線形化を行う厳密な線形化手法によるモデル予測制御手法を提案した。また本研究の意義、重要性として、区分的双線形モデルにモデル予測制御手法を用いることで、モデル化が容易であることに加えて、種々の制御性能の考慮が容易になり、高度な制御系設

計を行うための基礎を構築できた、状態全てに対する線形化と入出力関係に着目した線形化手法による設計手法を開発したことにより、適用できる制御対象のクラスを拡張することができた等が挙げられる

(2)平成24年度は区分的双線形モデル制御手法を実際の制御対象に適用するために必要な理論構築を行った。具体的な内容は以下の通りである。

多入力多出力非線形システムに対する区分的双線形モデル制御手法の開発：前年度では1入力1出力の非線形システムに対する制御手法を提案した。実際の制御対象では多入力多出力系のシステムが多数存在する。この研究では、多入力多出力非線形システムに対する区分的双線形モデル制御器設計手法を提案した。

不確かさを有する区分的双線形モデル制御手法の開発：本手法は制御対象を弱い非線形を有する区分的双線形モデルに近似化する手法のため、モデルの不確かさが発生することは避けられない。モデルの不確かさを許容する区分的双線形制御手法を提案した。

ルックアップテーブル型制御器設計手法の開発：ルックアップテーブル型制御器は自動車の制御をはじめ幅広い産業分野で用いられている。本研究では区分的双線形モデル制御器をルックアップテーブル型制御器として設計する手法を提案した。本研究の意義、重要性として、前年度の提案した制御系設計の基礎理論に加えて、実際の制御対象に適用するために重要な上記の3点(多入力多出力制御系への適用、モデルの不確かさを考慮した制御系設計、ルックアップテーブル型の制御器設計)について提案を行った。

(3)平成25年度は区分的双線形モデルを用いたフィードバック誤差学習手法を提案した。本手法では脳型フィードフォワード制御器の学習アルゴリズムと制御対象の疑似逆モデルのオフライン同定アルゴリズムを提案した。また区分双線形モデルによる制御性能として、多入力多出力系サーボ制御システムの提案、状態オブザーバとして区分的双線形モデルによる同一次元オブザーバシステム、最小次元オブザーバシステムの提案を行った。

本研究の意義、重要性として、従来のフィードバック誤差学習法に比べて計算負荷が低く、操作系の扱いやすさを実現している。さらに様々な制御系設計に対応するために具体的な制御系設計手法について提案を行った。

#### 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1件)

Tadanari Taniguchi, Luka Eciolaza and Michio Sugeno, LUT Controller Design with Piecewise Bilinear Systems Using Estimation of Bounds for Approximation Errors, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 査読有, vol. 101, 2013, 828-840  
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=JACII001700060007.xml>

〔学会発表〕(計12件)

1. Tadanari Taniguchi, Luka Eciolaza and Michio Sugeno, Designs of Minimal-Order State Observer and Servo Controller for a Robot Arm Using Piecewise Bilinear Models, International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2014, 2014年3月13日, Hong Kong, China
2. Tadanari Taniguchi, Luka Eciolaza and Michio Sugeno, Full-Order State Observer Design for Nonlinear Systems Based on Piecewise Bilinear Models, 2014 2<sup>nd</sup> International Conference on System Modeling and Optimization, 2014年2月21日, Barcelona, Spain
3. 谷口唯成, 菅野道夫, 区分的双線形モデルによる非線形モデル追従制御器の設計, 第23回インテリジェント・システム・シンポジウム, 2013年9月26日, 九州大学, 福岡県
4. Luka Eciolaza, Tadanari Taniguchi and Michio Sugeno, Piecewise Bilinear Models for Feedback Error Learning: On-line Feedforward Controller Design, 2013 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2013年7月10日, Hyderabad, India
5. Tadanari Taniguchi, Luka Eciolaza and Michio Sugeno, Look-Up-Table Controller Design for Nonlinear Servo Systems with Piecewise Bilinear Models, 2013 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2013年7月10日, Hyderabad, India
6. Tadanari Taniguchi, Luka Eciolaza and Michio Sugeno, Nonlinear Control for Multiple-Input and Multiple-Output Nonlinear Systems with PB Models Based on I/O Linearization, 2nd World Conference on Soft Computing, 2012年12月05日, Baku, Azerbaijan
7. 谷口唯成, 菅野道夫, 区分的双線形モデルによる多入力多出力非線形システムの安定化制御, 第22回インテリジェント・システム・シンポジウム, 2012年08月31日, 那覇市, 沖縄

8. Tadanari Taniguchi and Michio Sugeno, Robust Stabilization of Nonlinear Systems Modeled with Piecewise Bilinear Systems Based on Feedback Linearization, 14th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems, 2012年7月11日, Catania, Italy
9. Tadanari Taniguchi and Michio Sugeno, Design of LUT-controllers for Nonlinear Systems with PB Models Based on I/O Linearization, WCCI 2012 IEEE World Congress on Computational Intelligence, 2012年06月14日, Brisbane, Australia
10. Tadanari Taniguchi and Michio Sugeno, Nonlinear Model Predictive Control of Piecewise Bilinear Systems Based on Feedback Linearization, 12th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, 2011年9月29日, Suwon, Korea
11. 谷口唯成, 菅野道夫, 厳密な線形化手法による非線形モデル予測制御, 第21回インテリジェント・システム・シンポジウム, 2011年9月1日, 神戸大学, 兵庫県
12. 谷口唯成, 菅野道夫, 入出力線形化手法による区分的双線形モデル予測制御, ファジィシステムシンポジウム2011, 2011年9月13日, 福井大学, 福井県

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

谷口 唯成 (TANIGUCHI, Tadanari)  
東海大学・情報教育センター・准教授  
研究者番号: 70392032