

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：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820179

研究課題名(和文)ノンパラメトリック区分的線形モデルに基づく制御手法の構築

研究課題名(英文)Construction of control method based on non-parametric piecewise affine models

研究代表者

丸田 一郎 (Maruta, Ichiro)

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：20625511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では複雑なシステムの制御を、精密なモデルに基づいて行う制御手法の構築に取り組んだ。研究の結果、制御に精密なモデルを必要とする部分と必要としない部分にシステムを分ける性質を明らかにし、精密なモデルを効率的に構築するうえで有用な知見を得た。また、比較的小規模なシステムを対象として、データに基づいて構築された精密なモデルを利用して高精度な制御を実現する方法を開発した。さらに、実験を通して、より複雑なシステムに大しては、戦略的なフィードバックと戦術的なフィードバックの二つのレベルで制御器を設計するアプローチが有効であるという知見を得た。

研究成果の概要(英文)：In this research, we tried to construct a control method which is based on precise models and is applicable to complicated systems. As a result, we found some criteria for discriminating whether a system is controllable without precise models or not. The criteria will be useful for constructing precise models in an efficient manner. Also, we developed a control method which utilize precise models directly constructed from experiment data and is applicable to relatively small systems. For larger systems, we conducted experiments and found that an approach which combines strategic and tactical controllers is effective in designing controllers.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学

1. 研究開始当初の背景

研究動向および位置づけ: 制御系設計において対象システムの適切なモデリングは重要であり、データに基づいたモデリング手法、すなわちシステム同定法は制御の実応用において重要な技術である。しかし、非線形性を持つシステムの同定に関しては、適切なモデル形式や、実用レベルの計算量と対雑音性を備えた汎用的な手法が未だに確立されていない。したがって、システムが持つ非線形性を考慮した汎用的な制御手法の研究は、立脚すべきモデルの形式に関しても議論の余地がある未成熟な段階にあるといえる。本研究は新たな形式のモデルを導入することによって、非線形性を持つシステムの精密かつ高効率な制御を行う実用的な手法の構築をめざすものである。

着想に至った経緯: 研究代表者らは非線形システムに対し、大規模なデータ集合で表現されるノンパラメトリック区分的線形モデルを構築する新たな手法を提案しており(参考文献[1])、実際の機械系に対しても精密なモデリングが実現できることを確認している(図1参照)。したがって、この手法で構築したモデルに基づいて制御を行うことができれば、複雑な非線形性を持ったシステムをより適切に制御できると考えられる。

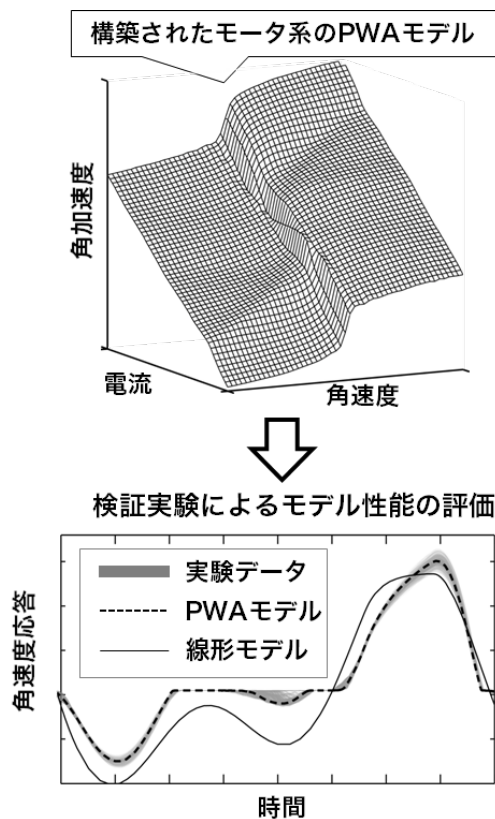


図1 モータ系に対する研究代表者らのモデリング手法の性能

しかし、この手法によって構築されるモデルは非常に多数(図1の例では約30万)のモードを持つノンパラメトリック区分的線形モデルであり、少数のモードを持つ区分的線形モデルを前提とした従来の制御手法を適用することは計算量の観点で困難である。また、このモデリング手法で得られるモデルは通常の区分的線形モデルが持たないモード間の接続構造を備えており、制御アルゴリズムの構築には本質的に異なったアプローチをとることが適切であると考えられる。

これらの背景から、申請者は非線形性を持つシステムの制御問題に対し、ノンパラメトリック区分的線形モデルに特化した制御手法を構築するという着想に至った。

参考文献

[1] I. Maruta, T. Sugie: (Book Chapter) "Identification of nonparametric piecewise affine models via data compression", in *Developments in Control Theory Towards Global Control*, The Institute of Engineering and Technology, pp.89/98 (2012)

2. 研究の目的

安価なコンポーネントで制御系を構成する場合や、高効率の制御を追求する場合、対象システムの非線形性を反映した精密なモデルに基づく制御が必要になる。研究代表者らはこれまでに、システムの非線形特性を多数のモードを持ったノンパラメトリック区分的線形モデルによってモデリングする高性能な手法を提案している。しかし、従来の制御手法では計算量の問題のために多数のモードを持った区分的線形モデルを扱うことは困難である。そこで、本研究ではノンパラメトリック区分的線形モデルに基づいた制御手法を構築し、非線形システムの精密かつ高効率な制御を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

まず、比較的小規模なノンパラメトリック区分的線形モデルを対象として、スーパーコンピュータでのシミュレーションが可能な程度の計算量で動作するモデル予測制御法を開発する。これによってノンパラメトリック区分的線形モデルを制御に用いることで得られる制御性能や計算量に関する知見、最適な制御入力を持つ性質などが得られる。つぎに、これらの知見をもとに実際の制御器の実装に用いることができる高速な制御入力計算法を開発する。研究においては高並列計算機やメタヒューリスティックな最適アルゴリズムを利用し、状況に応じて制御入力を

量子化されたものに限定して最適解を探索する手法についても考察する。

4. 研究成果

本研究の内容は大きく2つに分けられる。

(1) モデル予測制御のアプローチによる非線形システム制御の検討

現実的な計算量で複雑な非線形システムに対応できるモデル予測制御を実現するために、従来と異なる二つのフィードバックシステムを持つ図2のような制御系を提案した。この制御系は局所的な安定性に寄与する戦術的なフィードバックを実現するスイッチング線形制御器と、より長い時間スパンでの最適性に寄与する戦略的なフィードバックを実現するモデル予測制御器からなるものである。これらを組み合わせることで安全かつ最適性が高い制御を現実的な計算量で実現することができると考えられる。研究ではメタヒューリスティックな最適化アルゴリズムを用いた数値例でこの制御系の有効性を確認し、制御系の一部分を実際の実験装置に実装して実問題への適用可能性を確認した。この結果から非線形システムの制御に必要なモデルについても、これらの二つのフィードバックシステムに対応する情報が重要であるという知見を得た。

戦術的なフィードバック制御についてはさらに、データに基づいた一段先モデル予測に基づく手法を提案し、実機に適用して有効性を確認した。

また、戦略的なフィードバックを効果的に行うための手法として、制御入力を量子化されたものに限定して A-star アルゴリズムを導入し、いくつかの例で有効性を確認した。

さらに効率的な戦略的なフィードバックを行う手法を開発するために、米国のノースイースタン大学に訪問研究員として滞在して国際共同研究を行った。滞在中は近年注目されている最適化理論の応用について議論を行い、スイッチモデルで表現されるシステムの扱いに劣モジュラ最適化が有効であるという知見を得た。

(2) 効率的なモデル構築法の開発

ノンパラメトリック型区分的線形モデルの構築法について検討し、より効率的なアルゴリズムによるモデル構築と、得られるモデル精度の理論的な解析を行った。また、ノンパラメトリック区分的線形モデルを構成するデータ集合からの重要データの抽出について検討し、一つの手法を提案した。これによって、モデルに基づいた制御において必要とされる計算量を大幅に削減できるだけでなく、従来は現実的なデータ量での表現が困難であった複雑なシステムに対しても、モデルを構築することが可能になる。また重要なデータの傾向について得られた知見は、今後

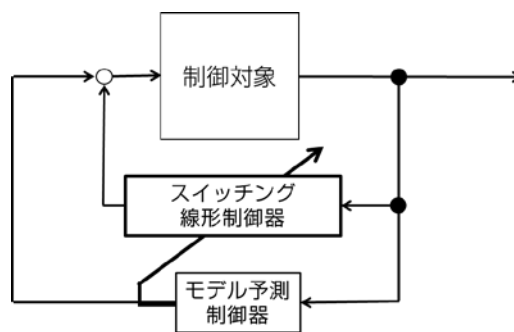


図2 二つのフィードバックシステムからなる制御系の構成

より複雑なシステムの制御について検討する上で有用であると考えられる。

さらに、モデルをほぼ必要としない簡便な制御手法を適用可能なシステムのクラスを明らかにした。また、モデルのパラメータとシステムから得られるデータの関係を可視化する手法を開発した。これらは将来的に、制御において必要不可欠な部分にしばった効率的なモデリングを行う手法を開発するうえで有用な知見となると考えられる。

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4件)

- ① 藤本 悠介, 丸田 一郎, 杉江 俊治: ノンパラメトリック表現を用いたデータ駆動制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 12, pp. 829-835, 2015
DOI: 10.9746/sicetr.51.829
- ② 杉山 開路, 丸田 一郎, 杉江 俊治: 能動的外乱除去制御器を用いた場合の閉ループ系の安定性解析とその応用, 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 7, pp. 494-502, 2015
DOI: 10.9746/sicetr.51.494
- ③ 藤本悠介, 丸田一郎, 杉江俊治: 推定 Hessian を利用したノンパラメトリック PWA モデルの構築法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 3, pp. 197-205, 2015
DOI: 10.9746/sicetr.51.197
- ④ 藤本悠介, 丸田一郎, 杉江俊治: ノンパラメトリック区分的アフィンモデルの11最適化に基づく単純化 システム制御情報学会論文誌, Vol. 27, No. 4, pp. 141-148, 2014
DOI: 10.5687/iscie.27.141

[学会発表] (計8件)

- ① I. Maruta, Analysis of Difficulty in Estimating Physically-Meaningful Model Parameters Based on Normalized Parameter Sensitivity Plot, The 54th IEEE Conference on Decision and

Control, 2015. 12. 18, 大阪府立国際会議場 (大阪府大阪市)

DOI: 10.1109/CDC.2015.7403272

- ② 四方田真美, A-star アルゴリズムによる有限アルファベット制御, 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2015. 5. 22, 中央電気倶楽部 (大阪府大阪市)
- ③ Y. Fujimoto, Error bound analysis and optimal construction of non-parametric PWA models, The 53rd IEEE Conference on Decision and Control, 2014. 12. 17, Los Angeles (USA)
DOI: 10.1109/CDC.2014.7040413
- ④ 藤本悠介, 入出力データに基づくノンパラメトリック型制御器の設計, 第 57 回自動制御連合講演会, 2014. 11. 11, ホテル天坊 (群馬県渋川市)
- ⑤ I. Maruta, Compression Based Identification of PWA Systems, The 19th IFAC World Congress, 2014. 8. 26, Cape Town (South Africa)
DOI:10.3182/20140824-6-ZA-1003.02090
- ⑥ 藤本悠介, 効率的なノンパラメトリック PWA モデルの構築, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 2014. 3. 7, 電気通信大学 (東京都・調布市)
- ⑦ 加茂和史, スイッチング線形制御器のリアルタイム設計に基づいた非線形モデル予測制御, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 2014. 3. 5, 電気通信大学 (東京都・調布市)
- ⑧ 藤本悠介, 少数の点からなるノンパラメトリック PWA モデルの構成に関する一考察, 平成 25 年度 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 若手研究発表会, 2014. 1. 17, 学校法人常翔学園大阪センター (大阪府・大阪市)

[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]

○研究代表者のホームページ

<http://ctrl.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~maruta/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸田 一郎 (MARUTA ICHIRO)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号: 20625511

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし