

令和元年6月20日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14284

研究課題名(和文)部分システム同定と制御系分散最適化

研究課題名(英文)Partial system identification and distributed optimization of control systems

研究代表者

杉江 俊治 (Sugie, Toshiharu)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：80171148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：多数のサブシステムがネットワーク結合された大規模システムを対象としたシステム同定と制御に関するものである。個々のサブシステムの入出力データからそのモデルを構築する部分システム同定法について考察し、二つの手法を提案した。一つは部分空間法の枠組みで、核ノルム最小化と射影を用いる手法であり、他のサブシステムの情報や雑音モデルを必要としない。もう一つは仮想制御器で安定化されたモデルの出力を用いる新しい出力誤差法であり、非線形システムにも適用可能である。さらにフォーメーション制御を対象にスケーラブルな新しい制御法を提案した。これらの手法の有効性は数値例で確認している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力のスマートグリッドに代表される大規模なネットワーク結合型システムを対象とした制御が現在では不可欠となっている。その制御の基礎となるのはシステムのモデル構築であるが、このような大規模システムのモデルを入出力データから直接構成することは難しい。本研究では、部分サブシステムに着目し、その入出力データから直接にサブシステムをモデル化する手法を提案したものである。非線形システムにも対応可能である。

研究成果の概要(英文)：This study is concerned with system identification and control for large scale systems which consist of many subsystems through network connection. First, two types of subsystem identification methods are proposed. One is to exploit nuclear norm minimization and projection in the framework of subspace system identification, which does not require any information on other subsystems nor noise models. The other is a new type of output error prediction which uses the output of the model stabilized by a virtual controller, which is applicable to a class of nonlinear systems. Furthermore, a new scalable control method to achieve formation is proposed. The effectiveness of these methods are confirmed by numerical examples.

研究分野：制御工学

キーワード：システム同定 閉ループ同定 線形システム 非線形システム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電力のスマートグリッドに代表される大規模なネットワーク結合型システムを対象とした制御が現在では不可欠となっており、そのようなシステムの安定性や制御性能の向上が重要な課題となっている。制御の基礎となるのはシステムのモデル構築であるが、このような大規模システムのモデルを入出力データから直接構成することは難しく、これに対応できるスケーラブルな同定手法はあまりみあたらない。大規模システムを一度にシステム同定することは困難であるものの、個々のサブシステムをシステム同定によりモデル化できれば全体のモデルを構築できる。この場合でも、他のサブシステムとの結合関係があるため、単純に通常の開ループ系のシステム同定を利用することはできない。しかし、ある種の閉ループ同定に着目すれば解決できる可能性がある。また、粒子群最適化などの進化型計算を用いることにより、広いクラスの非線形システムやむだ時間系のモデルが得られることが期待される。一方、制御そのものに関して、受動性に基づく大規模ネットワーク系の研究などがあるものの、すべてのサブシステムが受動的であることを要請しており、この制約は一般には厳しい。そのような制約なしに、ネットワーク構造を考慮した分散最適化手法が近年整備されてきているが、高速化された進化型計算を援用することにより、広いクラスの制御問題に有効な手法が確立できるものと期待される。これらの背景から、本研究の申請に至った。

2. 研究の目的

大規模システムのモデリングと制御が近年の最重要課題となってきたが、本研究はこの課題に対して一つの解を与えることを目的とするものである。具体的には、複数の線形システムおよび非線形システムから構成される大規模結合システムを対象とし、全体の一部分として、当該入出力データから部分システムを同定する手法を確立する。また、サブシステムの集合体としての全体システムモデルを分散的に制御するスケーラブルな手法の基礎を構築する。

3. 研究の方法

(1) 線形部分システムの閉ループ同定

全体の一部であるサブシステムの場合、当該システムに加わる入力信号と出力データののみから同定する必要がある。また、サブシステム間のネットワーク結合のため、閉ループ系として取り扱う必要があるが、他のサブシステムは未知であるため、これらの詳細情報を必要としない閉ループ同定手法が必要となる。閉ループ環境下でのシステム同定は出力に加わる雑音と入力信号に相関があるため開ループの場合とは異なる困難性があることはよく知られている。また、同定対象システムとそれを安定化する制御器から構成される閉ループシステムの同定において、制御器は既知であると仮定されることがほとんどである。当該システム以外のパラメータに比較的感受度が低い手法として、伝達関数の既約分解表現を用いる Hansen の手法がある。この手法と申請者らがすでに提案しているグレイボックスモデリングの枠組みを組み合わせが可能であることは確認しており、これを利用して、サブシステムの入出力データのみから直接そのモデルを構成する手法について検討する。また、ここではモデルの次数等の情報が既知としたパラメータ推定が基礎となるが、より現実的な要請として、モデル次数が未知の場合への対応も重要となる。この問題に対しては部分空間法が一つの有力な方法として知られているが、既存手法の多くは、次数を定める際に観測雑音の影響を受けやすいという問題点があった。近年では、これに対して核ノルム最小化に着目することにより、モデル次数を定める手法が注目を集めつつある。そこで、この方向から、部分システムを閉ループ環境下で同定する手法について検討する。

(2)非線形部分システムの同定

閉ループ環境において、制御器や観測雑音モデルなどの当該システム以外のパラメータに比較的感受度が低いHansen の手法に着目し、この手法の本質的側面を抽出することにより、既約分解表現によらない手法を見つけることを検討する。シンプルな最適化問題に帰着させ、粒子群最適化など信頼できる数値最適化手法により、モデルのパラメータを同定する方向で検討する。

(3) 大規模系におけるスケーラブルな分散制御手法

ネットワーク系における制御の基本の一つであるフォーメーション制御に着目し、各サブシステムが独立に分散的に制御する手法について検討する。特に、各サブシステムにおいて検出できる相対位置情報だけから、全体のフォーメーションを実現する方法について考察し、その後、それをスケーラブルな手法へ発展させていく。

4. 研究成果

(1) 線形部分システムの閉ループ同定

第一に、部分サブシステムの入力信号に、同定用の信号が印加できる場合について検討した。特に多入力多出力システムを扱える部分空間同定法の枠組みで考察し、その中でもモデル次数の選択が容易な核ノルム最小化を利用する手法に着目した。観測雑音の影響を低減するためには長い入出力データを用いることが望ましいが、既存方法では観測データ長が長い場合には計算負荷が大きく、適切な方法とはいえなかった。これを克服するため、データを射影して、データ圧縮し、その後に核ノルムを最小化して、モデル次数を求める手法を提案した。データを射影する空間の選定が重要となるが、出力の観測雑音と相関が低く、入力の確定部分と相関が高いと期待される同定用信号から生成される空間を用いた。これにより、制御器や観測雑音の周波数特性に関する情報が未知の場合にも、閉ループ環境内にあるシステムを精度良く同定できることを種々の数値例により検証した。提案手法は閉ループでも開ループでも適用可能であり、容易に次数を決定することができることを確認した。一方で、当初想定していなかったが、数少ないデータの場合には、機械学習的な手法の援用が効果的であることがわかってきた。この手法により、ノンパラメトリックなモデルを得るシステム同定手法についても新たに検討した。まだ基礎段階であり、開ループシステムを前提としたものであるが、モデル精度向上に有益なシステム同定用の入力信号選択法について、制御の観点から需要となる周波数特性に着目した同定入力の定め方に関して知見を得た。

(2) 非線形部分システムの同定

閉ループ同定の非線形モデルへの拡張に関しては、システムの構造は既知で、そのパラメータのみが不明であるという枠組みで、同定手法について検討した。Hansen の手法では既約分解表現を用いるため非線形システムへの適用が困難であった。このため、既約分解の概念にとられることなく、Hansen の手法の本質について考察した。その結果、観測出力とモデル出力の誤差を単に最小化するのではなく、これを安定化するメカニズムを付加して最小化することが一つの本質であるという知見を得た。結果として、非線形システムを対象とした場合にも、シンプルな形式でシステム同定の問題を最適化問題に帰着できた。ウィナーモデルや入力飽和が存在するモデルなどの基本的な非線形モデルを例にとり、この手法の有効性を検証した。

(3) 大規模系におけるスケーラブルな分散制御手法

第一段階として、基本単位である3つのサブシステムから構成されるシステムのフォーメーション制御について考察した。フォーメーションが指定空間内で反転しない制御策を提案し、その安定性について解析した。この手法では相対位置情報だけを用いて、かつ少ない情報交換で目標フォーメーションを達成できる点が特徴となっている。第二段階として、これをスケラブルにするために階層的に制御する手法を提案し、数値例でその有効性を確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

[雑誌論文](計 2 件)

B. D. O. Anderson, Z. Sun, T. Sugie, S. Azuma, K. Sakurama, Formation Shape Control with Distance and Area Constraints, IFAC Journal of Systems and Control, Vol. 1, pp. 2-12 (2017) DOI: 10.1016/j.ifacsc.2017.05.001

Y. Fujimoto, I. Maruta and T. Sugie, Input Design for Kernel-Based System Identification from the Viewpoint of Frequency Response, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 63, No. 9, pp.3075-3082 (2018)

DOI: 10.1109/TAC.2018.2791464

[学会発表](計 12 件)

井上晃成, 閉ループ系の部分空間同定に関する考察, 第59回自動制御連合講演会, 2016.
岸本統明, Hansenの方法に基づいた非線形系の閉ループ同定, 第59回自動制御連合講演会, 2016.

河西航, 線形パラメータ変動システムの同定入力に関する考察, 第61回システム制御情報学会研究発表講演会, 2017

堀隆昌, 手動操縦データに基づくマルチコプターの閉ループ同定, 第61回システム制御情報学会研究発表講演会, 2017

井上晃成, 射影によるデータ圧縮を用いた部分空間同定法, 第4回制御部門マルチシンポジウム, 2017

T. Sugie, Closed-loop Subspace Identification with Long Data based on Nuclear Norm Minimization, 56th IEEE Conference on Decision and Control, 2017

B.D.O. Anderson, Distance-based rigid formation control with signed area constraints, 56th IEEE Conference on Decision and Control, 2017

T. Sugie, On Noise Tolerant Closed Loop Identification of MIMO systems, SICE Annual Conference 2017, 2017

Y. Fujimoto, Extension of First-Order Stable Spline Kernel to Encode Relative Degree, 20th IFAC World Congress (IFAC 2017), 2017,

董慧超, マルチエージェントフォーメーションのための階層型制御,

第5回制御部門マルチシンポジウム, 2018

I. Maruta, Stabilized Prediction Error Method for Closed-Loop Identification of Unstable Systems, The 18th IFAC Symposium on System Identification, 2018

T. Sugie, On a Multi-Agent Formation Shaping via Distance and Reflection Control, SICE Annual Conference 2018, 2018

6. 研究組織