

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820177

研究課題名(和文)有限周波数特性を厳密に保存する大規模システムの適応的階層化ネットワーク低次元化

研究課題名(英文)Adaptive Hierarchical Network Model Reduction of Large-Scale Systems Strictly Preserving Finite Frequency Properties

研究代表者

小島 千昭(KOJIMA, CHIAKI)

東京大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：00456162

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、まず有限周波数特性より強い概念である消散性を保存する時系列データに基づく低次元化法を導いた。さらに、大規模システムの有効な低次元化手法の一つである固有直交分解に対して分散的なアプローチを提案し、近似誤差の上界値もあわせて理論的に保証した。この成果を用いて、電力ネットワークの過渡安定性診断の手法も導いた。また、準備的な取り組みの中で、多次元システムの有限周波数特性を消散不等式を用いて特徴づけ、オリジナルな結果を与えた。さらに、拡散戦略を有する分散カルマンフィルタの推定性能を明確化し、フィルタ設計に有用な結果を得た。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we first derived a model reduction method preserving dissipativity which is stronger property than finite frequency properties. Next, we proposed a distributed approach to the proper orthogonal decomposition which is one of efficient model reduction method of large-scale systems, and theoretically guaranteed an upper bound of an approximation error. Based on this approach, we also derived a method for transient stability diagnosis of power networks. In addition to these results, we characterized finite frequency properties of multi-dimensional systems in terms of dissipation inequality, which can be regarded as an original result. Moreover, we clarified an estimation performance of a distributed Kalman filter with diffusion strategies. This can be an efficient result for a design of the filter.

研究分野：システム制御工学

キーワード：制御理論 階層化ネットワークシステム モデル低次元化 固有直交分解 有限周波数特性 安定性診断 分散カルマンフィルタ 電力ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の背景について、階層化ネットワークシステムの適応的低次元化と有限周波数特性を保存する低次元化の2つの観点から説明する。

階層化ネットワーク構造に着目したモデル低次元化は、引用文献などいくつか存在した。また、申請者も、システム同定に基づき階層化ネットワークモデルの構築を、引用文献などこれまで行ってきた。今後の展開として、構造(低次元化)と時系列データ(同定・適応)に基づく枠組みの融合(適応的なモデル低次元化)が求められていたが、それを実現するような理論体系は十分に確立されていなかった。

有限周波数特性は、システムの周波数帯域毎の特性(安定性、振動性も含む)を周波数依存の行列不等式で統一的に記述しその特徴を典型的に表す。これまで口バスト制御で主に考えられてきたが、申請者も消散方程式による特徴づけ(引用文献)などその発展に貢献してきた。有限周波数特性の保存はモデル低次元化の際も必須となるが、有限周波数特性の厳密な保存可能性や階層化ネットワークシステムへの適用可能性に関する問題点が存在した。

<引用文献>

H. Sandberg and R.M. Murray, Model reduction of interconnected linear systems, Optimal Control Applications and Methods, Opt. Contr. Appl. Methods, Vol. 30, No. 3, pp. 225-245, 2009

C. Kojima, R. Hashimoto and S. Nakano, Hierarchical Network Identification of Large-Scale Systems - Homogeneous Case, 2012 American Control Conference, 2012年, モントリオール市(カナダ)

C. Kojima, Y. Kaizuka and S. Hara, Characterization of Finite Frequency Properties Using Quadratic Differential Forms, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 3, No. 6, pp. 466-475, 2010

2. 研究の目的

本研究課題では、「1. 研究開始当初の背景」で述べた着想を大規模システムのモデル低次元化に適用し、以下で与えるテーマ(1)-(3)の内容を達成するモデル低次元化の新しい理論と手法を構築することを目的とした。

(1) 有限周波数特性を保存する低次元化

- 階層化ネットワークシステムの有限周波数特性を、消散方程式を用いて特徴づ

ける。

- ネットワーク・サブシステムの有限周波数特性を厳密に保存するモデル低次元化の理論と手法を、消散方程式に基づき与える。

(2) 適応的な低次元化

- 時系列データと消散方程式を用いた適応的な低次元化の理論を与える。
- 時系列データが取得可能ではないクラスタに対して、カルマンフィルタによる推定を組み込んだ適応的な低次元化の理論を与える。

(3) 応用による検証

- (1)(2)で与えた手法を電力システムの周波数変動抑制の実験に適用し、その効率化に応用する。
- 本研究課題の低次元化手法を実装する Matlab, Maple のツールボックスを開発する。

3. 研究の方法

研究の方法について、その各サブテーマを「2. 研究の目的」の各項目と対応させて説明する。

(1) 有限周波数特性を保存する低次元化

準備として、階層化ネットワークシステムの有限周波数特性を消散方程式で特徴づける。

消散方程式に基づき、有限周波数特性を厳密に保存したモデル低次元化の理論を、打ち切り法に基づき与える。

の理論的な考察を、消散方程式に基づく具体的な低次元化手法として実現する。

(2) 適応的な低次元化

サブテーマ(1)の結果を利用し、消散方程式を用いた適応的な低次元化の理論的考察を行う。

一般には内部状態の時系列データ取得が不可能なクラスタが存在することが多いため、この状況に対して、カルマンフィルタによるデータ推定と組み合わせた低次元化の理論を与える。

サブテーマ(1)との結果を組み合わせることにより、消散方程式の時系列データからなる行列方程式をモデルパラメータの線形方程式に帰着させ、適応的な低次元化モデル更新の手法を導く。

(3) 応用による検証

電力システムの実験に対しては、サブテーマ(2)の手法をデマンドレスポンス(価格応答)による周波数変動抑制へと適用し、提案手法の有効性を確認し、実用への展望について検討する。

本研究課題の低次元化手法を実装する Matlab, Maple のツールボックスを開発する。

4. 研究成果

研究成果について、「3. 研究の方法」の各

項目と対応させながら説明する。

- (1) 有限周波数特性を保存する低次元化
準備として、ビヘイビアアプローチの観点から、多次元システムの有限周波数特性を消散不等式を用いて解析的に特徴づけた。また、この結果は、多次元システムの消散性理論の観点からもオリジナルな結果を与えている。さらに、この結果を、国際論文誌 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration に採録となった（[雑誌論文]）。

有限周波数特性より強い概念である消散性を保存する時系列データに基づく低次元化法を導き、国際会議 IFAC World Congress 2014 において発表した（[学会発表]）。しかし、時系列データに基づく場合には、（システムが取りうる時系列データの全ての組に対するという意味で）有限周波数特性や消散性は厳密には保存されない問題点が判明した。この点に関しては、今後の展開において克服される必要がある。

- (2) 適応的な低次元化

本研究課題の主たるサブテーマとして、大規模システムの有効な低次元化手法の一つである固有直交分解に対して、分散的なアプローチを提案した。これについて、以下の3点の成果を得た。

- 階層化ネットワークシステムの低次元化に対して、低次元化誤差の上界値も理論的に保証する形での低次元化手法を与えた。この成果は、線形システムに対して国際会議 European Control Conference 2013 において発表した（[学会発表]）。
- 上の成果を非線形システムに対しても拡張し計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム（2014年3月）にて発表した（それぞれ[学会発表]）。さらに、非線形システムに対する低次元化による近似誤差のよりタイトな上界値も理論的に導出し、国際会議 European Control Conference 2014 と計測自動制御学会のワーキンググループにて発表した（それぞれ[学会発表]）。
- 分散固有直交分解に対して、より数値的に有効なアルゴリズムを導出するために、同時最適化に基づくアルゴリズムを提案した。この成果は、第58回自動制御連合講演会において発表した（[学会発表]）。

これら一連の成果は、申請者の現在の取り組みにおいて、現在論文誌に投稿する準備中である。

内部状態のデータ推定と組み合わせた

低次元化に向けた準備的な取り組みとして、拡散戦略を有する分散カルマンフィルタを考えマルチエージェントシステムの観点からその推定性能の解析を行い、拡散行列の設計に有用な結果を得た。この成果は、この成果は、システム制御情報学会第59回研究発表講演会において発表した（[学会発表]）。

消散性に基づく適応的な低次元化については、準備的な取り組みをサブテーマ(1)とあわせて、国際会議 IFAC World Congress 2014 において発表した（[学会発表]）。

- (3) 応用による検証

電力システムの周波数変動抑制に関しては、以下の2点の成果を得た。

- 準備的な取り組みとして、モード分解に基づく電力ネットワークの揺動不安定化現象の解析を行った。この結果は、SICE Annual Conference 2014 にて発表した（[学会発表]）。また、日本鉄鋼協会のセミナーでも招待講演を行い、システム制御工学や電力系統工学以外の分野からも高い評価を受けた（[学会発表]）。

- 上の成果を進展させて、分散型固有直交分解に基づき、適応的な低次元化の観点から、大規模電力ネットワークの過渡安定性診断の手法を与えた。一方で、電力ネットワークの安定性診断の有効な手法の一つであるエネルギー関数法との関連に関しては、適切な低次元化後のサブシステムの次元の決定指針などいくつかの解決すべき点が判明し、今後の取り組みにおいて解決すべき理論的課題として残った。この成果は、国際会議 SICE Annual Conference 2015 にて発表した（[学会発表]）。

上記の成果は、現在論文誌に投稿準備中である。一方で、デマンドレスポンスへの展開や実験による有効性の検証については、今後の課題として残った。

ツールボックス開発に関しては、今後の課題として研究代表者の現在の取り組みにおいて引き続き検討中である。

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2件)

- (1) Chiaki Kojima and Shinji Hara: Characterization of Finite Frequency Properties for n-Dimensional Behaviors Using Quadratic Differential Forms, SICE Journal of

Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 7, No. 2, 2014, pp. 112-121
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcmsi/7/2/7_112/_article

- (2) Chiaki Kojima and Shinji Hara: Characterization of Finite Frequency Properties for n-Dimensional Behaviors Using Quadratic Differential Forms, Mathematical Engineering Technical Reports, Department of Mathematical Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 査読無, METR 2013-12, 2013, 28pp.
<http://www.keisu.t.u-tokyo.ac.jp/research/techrep/data/2013/METR13-12.pdf>

〔学会発表〕(計 11 件)

Chiaki Kojima, Distributed Proper Orthogonal Decomposition for Large-Scale Networked Dynamical Systems, Proceedings of the 2013 European Control Conference, 2013 年 7 月 19 日, チューリヒ市(スイス)

小島千昭, 分散固有直交分解による大規模システムの低次元化の誤差特徴付け, 計測自動制御学会 第 1 回 制御部門マルチシンポジウム, 2014 年 3 月 6 日, 電気通信大学(調布市)

小島千昭, 分散固有直交分解による大規模システムのモデル低次元化, 計測自動制御学会先端融合システムズアプローチ創出委員会大規模問題に対するシステムズアプローチワーキンググループ 2014 年度第 1 回研究会, 2014 年 5 月 24 日, キャンパスプラザ京都(京都市)

Chiaki Kojima, Distributed Proper Orthogonal Decomposition for Large-Scale Networked Nonlinear Systems with Approximation Error Bound, Proceedings of the 13th European Control Conference 2014, 2014 年 6 月 26 日, ストラスブール市(フランス)

Chiaki Kojima, Hierarchical Network Identification of Large-Scale Systems - an Approach Based on Dissipation Equalities, Proceedings of the 19th IFAC World Congress, 2014 年 8 月 27 日, ケープタウン市(南アフリカ)

Masato Hirata, A Characterization of Energy Transfer in Swing Instability of Power Networks Based on Mode Decomposition, Proceedings of the SICE Annual Conference 2014, 2014 年 9 月 12 日, 北海道大学(札幌市)

小島千昭, モード分解に基づく電力ネットワークの動揺不安定化現象の解析, 日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会計測制御システム分野における産学若手交流フォーラム計測制御システム分野における産学若手交流セミナー「大規模・複雑問題を対象としたモデリング・状態推定」, 2014 年 9 月 19 日, 鬼怒川けごん荘(日光市)

小島千昭, 階層的電力ネットワークに対する分散固有直交分解, システム制御情報学会 第 59 回 研究発表講演会, 2015 年 5 月 20 日, 中央電気倶楽部(大阪市)

鈴木惇, 拡散戦略を有する分散カルマンフィルタの推定性能, システム制御情報学会 第 59 回 研究発表講演会, 2015 年 5 月 21 日, 中央電気倶楽部(大阪市)

Chiaki Kojima, Distributed Proper Orthogonal Decomposition for Hierarchical Power Networks and its Application to Transient Stability Analysis, Proceedings of the SICE Annual Conference 2015, 2015 年 7 月 30 日, 杭州市(中国)

小島千昭, 分散固有直交分解による大規模システムの低次元化: 同時最適化に基づくアプローチ, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015 年 11 月 15 日, 神戸大学六甲台第 2 キャンパス(神戸市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.cyb.ipc.i.u-tokyo.ac.jp/members/chiaki/index.html>

6. 研究組織
(1) 研究代表者

小島 千昭 (KOJIMA CHIAKI)
東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教
研究者番号：00456162

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：