

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22760313

研究課題名(和文)大規模消散システムの階層化ネットワーク同定

研究課題名(英文)Hierarchical Network Identification for Large-Scale Dissipative Systems

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) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、階層化ネットワークシステムを対象として、はじめにその可同定条件を導出し部分空間同定に基づく同定手法を与えた(以下では、階層化ネットワーク同定と呼ぶ)。そして、階層化ネットワーク同定の発展として、分散固有直交分解によるモデル低次元化の手法も与えた。さらに、階層化ネットワーク同定を消散的なシステムへと拡張し、発展として供給率の同定手法も与えた。また、準備的な結果の導出の過程で、結合系・分布定数系のLyapunov安定性、消散性、有限周波数特性に関するいくつかの新たな成果も得た。一方で、本研究課題の成果の応用による検証やツールボックス開発に関しては、今後の課題として残った。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we considered hierarchical network systems and first derived a sufficient condition for identification of the system and gave an identification method (called hierarchical identification method) based on subspace identification method. As an extension of the method, we also developed a model reduction method based on distributed proper orthogonal decomposition. Moreover, we extended the hierarchical network identification method to dissipative systems and also derived an identification method for identification of supply rates. We should also stress that we derived some original results on Lyapunov stability, dissipativity and finite frequency properties of interconnected and distributed parameter systems in deriving preliminary results necessary to this project. On the other hand, it remains a future work to give a validation by application of the results of this project and toolbox developments.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・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 システム同定 消散性 固有直交分解 有限周波数特性 分布定数系

## 1. 研究開始当初の背景

本研究課題が基礎をおく(1)消散性理論と(2)システム同定について、それぞれの研究開始当初の背景を説明する。

- (1) 消散性理論は、Willems, Trentelman (1998) によってこれまで確立されており、申請者もいくつかのオリジナルな結果を与え、その理論の発展に貢献してきた。しかし、この理論は(階層化ネットワーク構造のない)一様なシステムを基本的に対象とするため、本研究課題が対象とするような大規模システムには適合しにくい問題点があった。
- (2) システム同定の理論は Verhaegen, Dewilde (1992) などによって確立されてきたが、この理論もシステムの一様性を仮定しその外部表現(伝達関数)までしか決定できないため、階層構造やネットワーク構造の決定には直接適用できないという問題点があった。また、物理的に自然な同定や同定精度の向上のためには消散性などエネルギーに関する情報の利用は明白であるが、このような考え方はほとんど見られなかった。

以上で述べた背景から、研究代表者は、本研究課題を着想した。

## 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同定に適用する。具体的には、入出力データとシステム構造に関する先見情報に基づいて、(a)サブシステムの実現、(b)階層化ネットワーク構造を同時に決定する階層化ネットワーク同定を提案し、その理論を構築することを目指した。さらに、大規模システムが本来の性質として保有する消散性に着目し、そのエネルギーに関する情報も階層化ネットワーク同定に陽に活用する理論体系を確立させることも目標とした。具体的には、以下の(1)から(3)までの内容を達成することを目的とした。

- (1) 階層化ネットワーク同定  
入出力データからなる線形行列方程式(行列入出力方程式)に基づき、階層化ネットワーク同定が可能であるための入出力信号に関する条件(可同定条件)を導く。さらに、行列入出力方程式に基づく階層化ネットワーク同定のための手法を開発する。
- (2) 消散性に基づく同定  
階層化ネットワークシステムの消散性を、エネルギーのデータからなる線形行列方程式(行列消散方程式)によって等価的に特徴付け、その数値的な解法を与える。さらに、消散的なシステムの可同定条件と手法を行列消散方程式に基づき与える。
- (3) 応用による検証  
(1)(2)で与えた同定手法を大規模システム(気象や生体系など)のモデリングとシミュレーションへと応用する。さらに、センサネ

ットワークの実験に、(2)の同定手法を適用する。最後に、本研究課題で提案した同定手法を実装する 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、「2. 研究の目的」の各項目と対応させて説明する。

- (1) 階層化ネットワーク同定  
サブシステムが均質の場合に対する階層化ネットワーク同定の可同定条件とその手法を部分空間同定法の理論に基づき導出する。  
の結果を、サブシステムが不均質の場合に対して発展させる。  
の発展として、階層化ネットワークシステムに対する分散固有直交分解の理論的な手法を与える。
  - (2) 消散性に基づく同定  
今後の展開を視野に入れて、準備的な取り組みとして(a)結合系の Lyapunov 安定性・消散性解析、(b)分布定数系の Lyapunov 安定解析・消散性解析を行った。と同様に今後の展開を見据えて、(a)有限周波数特性の消散性に基づく特徴づけ、(b)有限周波数特性を満たすシステム設計に対する条件を与える。  
(1)の結果を発展させて、消散的な階層化ネットワークシステムに対する階層化ネットワーク同定の可同定条件とその手法を与える。  
の発展として、消散的な階層化ネットワークシステムにおける供給率の可同定条件とその理論的な手法を与える。
  - (3) 応用による検証  
(1)(2)の同定手法を大規模システム(気象や生体ネットワークなど)のモデリングとシミュレーションへと応用する。さらに、センサネットワークの実験に、(2)の同定手法を適用する。  
本研究課題で提案した同定手法を実装する 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) 階層化ネットワーク同定  
サブシステムが均質である場合に対して、階層化ネットワークの可同定条件を導出し、理論的な同定の枠組みと部分空間同定に基づく同定アルゴリズムを与えた。従来考えられていたアプローチではネットワーク構造の同定が困難であったが、本成果ではその同定を可能としている点に意義がある。本成果は、国内学会において発表した([学会発表])。さらに、この成果を国際会議において発表し([学会発表])、国際論文誌に投稿した。

の成果を、サブシステムが不均質な場合に拡張し、国内学会において発表した〔学会発表〕。なお、サブシステムが不均質の場合には、サブシステムとネットワークの同定を分離して実行できない問題点が判明したが、この問題点を反復的なアルゴリズムにより解決し、同定誤差も漸近的に低減化することが可能となった。この成果は、現在論文誌に投稿の準備中である。

階層化ネットワーク同定は入出力のデータに基づき低次元化モデルを求める枠組みであると言えるが、本項目では階層化ネットワーク同定の発展として、状態のデータに基づき低次元化モデルを求める分散固有直交分解を提案し、その低次元化のための理論的な手法を与えた。これにより、ネットワークの物理的な構造を保存し、かつ興味レベルに応じてサブシステム毎に低次元化の度合いを指定しながら低次元化を実行することが可能になった。この成果は、国内学会〔学会発表〕において発表した。さらに、この成果は、国際会議に採録決定となり、現在国際論文誌に投稿準備中である。なお、本項目は、階層化ネットワーク同定の発展として、研究課題終了後も研究代表者のメインテーマとして、積極的に研究を進めている。

## (2) 消散性に基づく同定

(a)については、プラントとコントローラの消散不等式に基づく安定条件を与え、安定なシステム設計に関する指針を導いた。この成果は、海外論文誌において論文発表を行った〔雑誌論文〕。

(b)の2次元分布定数系のLyapunov安定性解析については、2次元分布定数系の安定性の必要十分条件を、2次微分形式と周波数依存型の多項式行列方程式を用いてそれぞれ与え、その解法に関する考察を行った。この成果は、国際会議にて発表した〔学会発表〕。また、(b)の2次元分布定数系の消散性解析については、消散的な2次元分布定数系の同定の可能性が見いだされたため、当初の研究予定を変更し遂行した。具体的には、平成25年9月に金沢大学金子修准教授の下に滞在し、ビヘイビアアプローチの観点から2次元分布定数系の消散性の特徴付けに関する議論を行った。その結果、2次元分布定数系の消散性に関して、消散不等式・方程式を用いた特徴付けを得た。この結果は、従来研究によって困難と考えられてきた2次元分布定数系のスペクトル分解に関する問題点を解決したことによるものである。この成果は、国際会議に採録決定となった〔学会発表〕。一方で、消散的な2次元分布定数系の同定への展開については、今後の課題として残り、現在も今後の課題として継続中

である。

(a)有限周波数特性の消散性に基づく特徴づけでは、集中定数系の有限周波数特性が、変化率に制約のあるサブシステムの消散性に等価であることを示した。この成果は、国際論文誌〔雑誌論文〕および国内雑誌〔雑誌論文〕において発表した。

(b)の有限周波数特性を満たすシステム設計については、集中定数系に対してその必要十分条件を消散不等式を用いて与え、国際会議にて発表した〔学会発表〕。さらに、この結果を分布定数系へと一般化し、国際会議にて発表した〔学会発表〕。これらの成果は、国際論文誌に投稿を準備中である。

消散的な階層化ネットワークシステムの同定については、消散方程式に基づき可同定条件と理論的な同定手法を与えた。これにより、サブシステムの消散性を保存する同定手法を導出した。本成果は、国内学会〔学会発表〕において発表し、国際会議にも投稿中である。

の発展として、行列消散方程式に基づいて、消散的な階層化ネットワークシステムにおける供給率の可同定条件とその理論的な手法を与えた。これによって、再生可能エネルギーが導入された電力系統における電力配分問題における需要家の意志決定基準の同定などへの適用可能性が見いだされた。本成果は、国際学会にて発表した〔学会発表〕。

## (3) 応用による検証

応用による検証については、気象、電力系統、化学反応・生体系、センサネットワークなどへの適用可能性に関する調査を十分な時間をかけて行うことで、本研究課題で考える階層化ネットワーク同定の方向性が意義あるものであり貢献しうる可能性があることがわかった。一方で、研究期間内に学会発表や論文投稿までには至らず、この項目の進展に関しては今後の課題として残った。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。

ツールボックス開発に関しても、同じく研究期間内に学会発表や論文投稿までには至らなかった。この部分に関しても、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3件)

小島千昭、有限周波数特性の時間領域における特徴づけ-2次微分形式に基づくアプローチ、システム/制御/情報、査読有、

第 55 号第 8 卷, 2011, pp. 320-325,  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/11000871198>  
6

Paolo Rapisarda and Chiaki Kojima,  
Stabilization, Lyapunov Functions,  
and Dissipation, Systems and Control  
Letters, 査読有, Volume 59, 2010, pp.  
806-811, DOI:

10.1016/j.sysconle.2010.09.008

Chiaki Kojima, Yusuke Kaizuka and  
Shinji Hara, Characterization of  
Finite Frequency Properties Using  
Quadratic Differential Forms, SICE  
Journal of Control, Measurement, and  
System Integration, 査読有, Volume 3,  
2010, pp. 466-475,

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcmsi/3/6/3\\_6\\_466/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcmsi/3/6/3_6_466/_pdf)

〔学会発表〕(計 10 件)

Chiaki Kojima and Osamu Kaneko,  
Conditions for Dissipativeness of 2-D  
Discrete-Time Behaviors Based on  
Quadratic Difference Forms, The 21st  
International Symposium on  
Mathematical Theory of Networks and  
Systems, 2014 年 7 月, グローニンゲン,  
オランダ

小島千昭: 大規模システムの階層化ネッ  
トワーク同定 - 消散方程式に基づくアプ  
ローチ, 計測自動制御学会第 13 回制御部  
門大会, 2013 年 3 月, 福岡県福岡市

Chiaki Kojima, Issei Kawasaki, Satoshi  
Moriyama and Jun Wada, Model Reduction  
of Large-Scale Networked Dynamical  
System - An Approach Based on Proper  
Orthogonal Decomposition and  $l_1$ -Norm  
Minimization, 計測自動制御学会第 41  
回制御理論シンポジウム, 2012 年 9 月,  
神奈川県葉山町

Kazuaki Shibata, Chiaki Kojima and  
Koji Tsumura, Identification of a  
Quadratic Performance Index in  
Multi-Agent Network, SICE Annual  
Conference 2012, 2012 年 8 月, 秋田県  
秋田市

Chiaki Kojima, Hierarchical Network  
Identification of Large-Scale Systems  
- Homogeneous Case, 2012 American  
Control Conference, 2012 年 6 月, モン  
トリオール, カナダ

小島千昭, 大規模システムの階層化ネッ  
トワーク同定 - 不均質なサブシステムの  
場合, 第 12 回計測自動制御学会制御部門  
大会, 2012 年 3 月, 奈良県奈良市

Chiaki Kojima, Ryuta Hashimoto and  
Shisei Nakano, Hierarchical Network  
Identification of Large-Scale  
Systems - Homogeneous Case, 計測自動制  
御学会第 40 回制御理論シンポジウム,

2011 年 9 月, 大阪府大阪市

Chiaki Kojima and Shinji Hara, An  
Achievability Condition for  
 $n$ -Dimensional Behaviors with a Finite  
Frequency Specification: Dissipation  
Inequalities Approach, The 49th IEEE  
Conference on Decision and Control,  
2010 年 12 月, アトランタ, アメリカ合  
衆国

Chiaki Kojima and Shinji Hara,  
Controller Synthesis for Multiple  
Finite Frequency Specifications:  
Dissipation Inequalities Approach,  
SICE Annual Conference 2010, 2010 年 8  
月, 台北, 台湾

Paolo Rapisarda, Kiyotsugu Takaba and  
Chiaki Kojima, A Polynomial-Algebraic  
Approach to Lyapunov Stability  
Analysis of Higher-Order 2-D Systems,  
The 19th International Symposium on  
Mathematical Theory of Networks and  
Systems, 2010 年 7 月, ブダペスト, ハ  
ンガリー

〔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/memb  
ers/chiaki/index.html](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：