

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：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21246067

研究課題名(和文)一般化周波数変数を有する動的システム論：大規模系の性能評価と自律分散推定・制御

研究課題名(英文) Dynamical System Theory for Systems with Generalized Frequency Variables: Performance Evaluation for Large-scale Systems and Decentralized Estimation and Control

研究代表者

原 辰次 (Hara, Shinji)

東京大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：80134972

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,900,000円、(間接経費) 7,770,000円

研究成果の概要(和文)：近年、制御を含む様々な工学の分野において、取り扱うシステムが大規模・複雑化している。それらは、局所的な目的を持つ多数のエージェントが互いに相互作用を行うことで大域的な目的を達成する動的マルチエージェントシステムとして捉えることができる。

そこで本研究プロジェクトでは、研究代表者が提案してきた「一般化周波数変数を有する動的システム」をベースとして、その実現に向けた新しい枠組みの構築を目指した。主要結果としては、理論的な基礎結果に加え階層化分散制御方式の提案がある。生体システムへの適用によりそれらの有用性も確認しており、気象現象やエネルギーネットワークへの展開も期待できる。

研究成果の概要(英文)：Recently, systems to be treated in various fields of engineering including control have become large and complex, and they can be treated as multi-agent dynamical systems, where a bunch of subsystems or agents perform in a decentralized way with local objectives by interacting each other to achieve the global objective.

To this end, this research project has tried to establish a new framework based on "Dynamical Systems with Generalized Frequency Variables" proposed by the Principal Investigator. The main results include several systematic design procedures for hierarchical decentralized control as well as theoretical foundations. The usefulness of the results have been confirmed by applications in bio systems, and the applications to meteorological phenomena and energy networks are expected.

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：一般化周波数を持つ動的システム マルチエージェントシステム 自律分散制御 大規模階層化動的システム ロバスト安定性 協調安定化 遺伝子制御ネットワーク 分散データ処理

1. 研究開始当初の背景

ネットワーク技術の進歩により、工学が扱う対象は大規模・複雑化してきており、それに対応すべく様々な分野において異なるアプローチでの研究が盛んに行われてきている。その中の大きな流れの一つは、マルチエージェントシステムの自律分散制御である。しかし、これまでの研究の多くは、個別の問題設定に対する個別手法の提案という形のものが多く、統一的な理論体系化への方向性が見えていないのが現状である。したがって、複数のエージェントが互いに情報交換を行い自律的に協調作業を行うような大規模・動的システムを解析・設計する統一的な手法の確立が望まれている。

そこで、研究代表者はこれまでに一般化周波数変数を有する動的システム表現を提案し、マルチエージェントシステムの統一的表現の一つとして適していることを示した。そこでは、大規模系の安定性をサイズの小さい行列不等式で判別できることを示しており、その条件が一般化 KYP 補題と密接に関係していることが判明してきた。すなわち、研究代表者がオリジナリティを有する2つの手法、一般化周波数変数を有する動的システム表現と一般化 KYP 補題、とを組み合わせ、様々な分野の異なる多くの問題をここで提案する形式に変換することにより、大規模動的システムの解析・設計に関する理論体系化の可能性が見えてきている。期待される研究成果は、制御理論に分野の新しい展開をもたらすだけでなく、様々な分野の特に社会的課題への解決に向けた社会システム設計の基盤を与えるものと思われる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、対象はネットワークで結合された大規模系を対象とし、その動的挙動を系統的に解析・設計する統一的な理論を構築することである。それを実現するため、一般化周波数変数を有する動的システム表現に基づき、一般化 KYP 補題をベースとした新しい解析手法（性能評価手法）を開発し、動的システムの3つの主要プロセスであるシステム同定・状態推定・制御のそれぞれについて系統的な自律分散設計手法を構築する。さらに、典型的な4つの異なる分野の応用問題に適用し、提案手法の有用性を確認する。具体的には、(1)解析手法：基本的な性能評価手法の確立と階層化システムへの展開および非線形系への拡張による基礎理論としての体系化、(2)設計手法：システム同定、自律分散推定手法、制御手法の系統的な手法を開発、(3)応用：分散データ処理における合意形成、ネットワークセンシングにおける計測・推定・予測、群ロボットの自律分散・協調制御、遺伝子制御ネットワーク解析・制御、の4つの分野への応用と検証。

3. 研究の方法

研究は大きく、「解析手法（性能評価法）の構築」、「設計手法（同定・推定・制御）の開発」、「応用による検証」の3つからなる。前2者の研究を総合して、一般化周波数変数を有する動的システム論としての体系化を図り、最後の応用を通してその有用性を確認する。研究の流れの基本は、「解析手法」をベースとして「設計手法」を開発し、「応用」により検証をするという標準的なものである。ただし、逆向きの流れ、すなわち「応用」から要請される「設計手法」の開発や「設計手法」から必要となる「解析手法」にも十分配慮し、この3つの階層が連携するように配慮する。

(1)「解析手法」に関しては、これまで得られた安定条件に対する結果の拡張（多入出力系、非線形系）を行うとともに、ロバスト安定条件について検討する。また、 H_2 ノルム・ H_∞ ノルムなどの制御性の評価の計算法についても検討を行う。

(2)「設計手法」に関しては、まず「可同定性（同定できるか?）」や「分散可観測性（初期状態が決定できるか?）」などの基礎的な項目に関する検討を行い、情報交換の制約のもとでの（階層化）分散制御系設計法を提案する。これは複数のエージェントが協調を行う自律分散系において「どれだけの情報が必要か?」という基本的な問いに対する答えを与えるものである。

(3)「応用」に関しては、分散データ処理における合意形成、ネットワークセンシングにおける計測・推定・予測、群ロボットの自律分散・協調制御、遺伝子制御ネットワーク解析・制御、の4つの分野を最初に設定する応用分野として設定し、「解析・設計」に関する理論的結果を適用するとともに、各種応用から要求される制御的課題を抽出し、理論研究へフィードバックする。

4. 研究成果

(1)「解析手法」:

従来得られていた線形系に対する安定条件・ロバスト安定条件を一般的な変動を含む多入出力系に拡張し、基礎理論の枠組みを確立した。

これまで得られた非線形系に対するロバスト安定条件を、各エージェントの消散性と階層間接続の低ランク性に注目することにより、階層化非線形系へ拡張した。

これまで得られた確定的な階層化システムの結果をベースに、接続が確率的に変化する場合について検討し、その確率的安定条件を導出した。

(2)「設計手法」:

上位層のグローバルな目的関数と下位層のローカルな目的関数を有する階層化最適制御問題について検討し、望みの階層・分散構造を達する問題のクラスを明らかにした。

非均質なマルチエージェントシステム

を対象に、階層間の低ランク接続に基づく逐次的階層制御アルゴリズム方式を提案した。

(3)「応用」:

「遺伝子制御ネットワーク解析・制御」に関しては、周期解の存在条件を明らかにするとともに、その存在条件の基でのプロファイル(周波数・振幅・位相)を推測する手法を開発し、生物学的パラメータとの関係を明らかにした。また、ロバスト安定条件にもとづいて、非均質な遺伝子ネットワークの解析を行うとともに、非線形階層化システムに対するロバスト安定条件を遺伝子ネットワークをサブシステムとして持つ細胞ネットワークに適用し、生物学的考察を行った。

マルチエージェントシステムの自律分散・協調制御への適用により、特に協調安定化の条件についての理論的結果を得た。

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 11 件)

S Hara, H Tanaka, T Iwasaki
Stability Analysis of Systems With Generalized Frequency Variables
IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, vol. 59, 313-326, (2014)
DOI: 10.1109/TAC.2013.2281482

T. Nakamura, Y. Hori and S. Hara,
Hierarchical Modeling and Local Stability Analysis for Repressilators Coupled by Quorum Sensing,
SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, vol. 7, No. 3, (2014) (in press)

Y Hori, M Takada, S Hara
Biochemical oscillations in delayed negative cyclic feedback: Existence and profiles
Automatica, 査読有, vol. 49 (9), 2581-2590, (2013)
DOI: 10.1016/j.automatica.2013.04.020

Y Wang, Y Hori, S Hara, F Doyle
Intercellular Delay Regulates the Collective Period of Repressively Coupled Gene Regulatory Oscillator Networks
IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, Vol. 59, 211-216, (2013)
DOI: 10.1109/TAC.2013.2270072

椿野 大輔, 吉岡 大輝, 原 辰次,
代数的特徴付けに基づく大規模動的システムの階層化最適制御,
計測自動制御学会論文集, 査読有, vol. 49, no. 12, 1154-1163, (2013)
DOI: 10.9746/sicetr.49.1154

J01:

DN/JST.Journalarchive/sicetr/49.1154

宮廻 裕樹, 堀 豊, 原 辰次
単一拡散因子による反応拡散系の Turing 不安定性解析,
計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 49, No. 12, 1164-1171, (2013)
DOI:10.9746/sicetr.49.1164
J01: DN/JST.JSTAGE/sicetr/49.1164

大澤 周平, 堀 豊, 原 辰次
環状遺伝子制御ネットワークのロバスト安定性解析, 計測自動制御学会論文集, 査読有, vol. 48, NO. 6, 318-325, (2012)
J01: DN/JST.JSTAGE/sicetr/48.318

D Tsubakino, S Hara
Eigenvector-based intergroup connection of low rank for hierarchical multi-agent dynamical systems
Systems & Control Letters, 査読有, vol. 61 (2), 354-361, (2012)
DOI: 10.1016/j.sysconle.2011.11.008

Y. Hori, T.-H. Kim and S. Hara
Existence Criteria of Periodic Oscillations in Cyclic Gene Regulatory Networks,
Automatica, 査読有, vol. 47(6), 1203-1209, (2011)
DOI:10.1016/j.automatica.2011.02.042

T.-H. Kim, Y. Hori and S. Hara
Robust Stability Analysis of Gene-protein Regulatory Networks with Cyclic Activation repression Interconnections
Systems & Control Letters, 査読有, vol. 60(6), 373-382, (2011)
DOI:10.1016/j.sysconle.2011.03.003

T.H. Kim, S. Hara, Y. Hori
Cooperative control of multi-agent dynamical systems in target-enclosing operations using cyclic pursuit strategy
International Journal of Control, 査読有, vol.83(10), 2040-2052, (2010)
DOI:10.1080/00207179.2010.504784

[学会発表](計 16 件)

D Tsubakino, T Yoshioka, S Hara
An algebraic approach to hierarchical LQR synthesis for large-scale dynamical systems
9th Asian Control Conference (ASCC), 2013/6/26, Istanbul, Turkey

Y Hori, S Hara
Noise-induced spatial pattern formation in stochastic reaction-diffusion systems

IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC), 2012/12/10-13, Hawaii, USA

Shinji Hara,
Robustness in Networked Dynamical Systems, 7th IFAC Symposium on Robust Control Design(招待講演), 2012/6/21, Aalborg, Denmark

Shinji Hara
Hierarchical Decentralized Control for Large-scale Dynamical Systems towards "Glocal Control"
Workshop on Modeling, Analysis and Control of Cyber Physical Systems(招待講演), 2012/6/12, Hong Kong, China

N. Fujimori, L. Liu, S. Hara and D. Tsubakino
Hierarchical Network Synthesis for Output Consensus by Eigenvector-Based Interlayer Connection
IEEE Conf. on Decision and Control 2011, 2011/12/12-15, Shanghai, China

T. Nakamura, S. Hara and Y. Hori
Local Stability Analysis for a class of Quorum-Sensing Networks with Cyclic Gene Regulatory Networks,
SICE Annual Conference 2011, 2011/9/14-17, Waseda University, Tokyo

Shinji Hara
Glocal Control: Realization of Global Functions by Local Measurement and Control
The 8th Asian Control Conference(招待講演), 2011/5/16, Kaohsiung, Taiwan

S Osawa, Y Hori, S Hara
Robust stability analysis for cyclic gene regulatory networks with uncertainty
The 8th Asian Control Conference (ASCC), 2011/5/16-18, Kaohsiung, Taiwan

S. Hara and H. Tanaka
D-Stability and Robust Stability Conditions for LTI Systems with Generalized Frequency Variables
IEEE CDC, 2010/12/15-17, Atlanta, U.S.A.

Y. Hori and S. Hara
Oscillation Pattern Analysis for Gene Regulatory Networks with Negative Cyclic Feedback
IEEE CDC, 2010/12/15-17, Atlanta, U.S.A.

Shinji Hara
Toward Glocal Control A Unified Approach to Decentralized Cooperative Control for

Networked Large Scale Dynamical Systems ICCAS2010, 2010/10/29, KINTEX, Gyeonggi-do, Korea

D. Tsubakino and S. Hara
Eigenvector-Based Characterization for Hierarchical Multi-Agent Dynamical Systems with Low Rank Interconnection
IEEE MSC, 2010/9/8-10, パシフィコ横浜(神奈川県)

Y. Hori, S. Hara and T.H. Kim
Periodic Oscillations in Cyclic Repressor Networks: Analytic Existence Criteria with Biological Insight
IEEE MSC, 2010/9/8-10, パシフィコ横浜(神奈川県)

K. Wathanyoo and S. Hara
Performance Analysis of Decentralized Cooperative Driving under Non-Symmetric Bidirectional Information Architecture
IEEE MSC, 2010/9/8-10, パシフィコ横浜(神奈川県)

Shinji Hara
Glocal Control - Realization of global functions by local actions
The 14th WSEAS International Conference on SYSTEMS, 2010/7/23, Corfu Island, Greece

S. Hara, T. Iwasaki and H. Tanaka
H2 and H Norm Computations for LTI Systems with Generalized Frequency Variables
ACC 2010/6/30-7/2, Baltimore, U.S.A.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 辰次 (HARA, Shinji)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：80134972

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

津村 幸治 (TSUMURA, Koji)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：80241941

石井 秀明 (ISHII, Hideaki)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授

研究者番号：50376612