

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06487

研究課題名(和文) 多次元階層的ネットワーク性に基づく大規模動的システムのロバスト制御系設計

研究課題名(英文) Robust control system design of large-scale dynamical systems based on multi-dimensional hierarchical network modeling

研究代表者

小島 千昭 (Chiaki, Kojima)

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：00456162

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、超スマート社会における電力ネットワーク、交通ネットワーク、水道ネットワークなどの社会インフラシステムを統一的に取り扱うような枠組みとして多次元階層的ネットワークシステムを提案し、そのモデリングおよび河川ネットワークの分散協調制御に関する成果を得た。電力ネットワークに適したモデリングの枠組みとして、ネットワーク化デスクリプタシステムを提案し、その消散性や安定性などの基礎的性質を明らかにし、構造保存モデルで記述される電力ネットワークへの応用を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題でのように超スマート社会で考えるような大規模システムを多次元システムと階層的ネットワークシステムとの接点から考察した研究はこれまで存在しない。これらの融合の視点で捉える点に学術的な意義が存在する。また、多次元性や階層性・ネットワーク性を考慮した大規模システムの制御の新しい枠組みを与えており、交通ネットワークや河川ネットワーク、上・下水道ネットワークなど「流れ」を持つシステムの複雑な振る舞いの予測への応用など、社会的にも大きな意義を持つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we proposed a multi-dimensional hierarchical network system as a framework to handle social infrastructure systems such as power networks, transportation networks, and water supply networks in a super-smart society in a unified framework. We obtained some results on its modeling and distributed cooperative control of river networks. We also proposed networked descriptor system as a modeling framework suitable for power networks. Then, we clarified its fundamental properties such as dissipativity and stability, and applied to power networks described by structure-preserving models.

研究分野：システム制御理論と電力・エネルギー・環境への応用

キーワード：階層的ネットワークシステム 多次元システム 分散協調制御 デスクリプタシステム 受動性 消散性 河川ネットワーク 電力ネットワーク

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1 . 研究開始当初の背景

本研究課題に関する研究開始当初の背景を , (1) 大規模システム理論 , (2) 多次元システムのロバスト制御系設計 , (3) 社会インフラシステムの制御の 3 つの側面から説明する .

- (1) 大規模システム理論 : 大規模システムの分散協調制御の系統的な枠組みとして階層的ネットワークシステムが提案されている . この枠組みに基づき , 研究代表者も大規模電力システムの安定性診断などその発展に貢献してきた . しかし , 1 次元システム (常微分方程式によって記述される単一の独立変数 (時間) を持つシステム) を前提としており , 水道ネットワークなど多くの社会インフラシステムが多次元システムにも関わらず , 振る舞いの空間的な伝播など典型的な特性を制御に活かせない問題点が存在した .
- (2) 多次元システムのロバスト制御系設計 : 動的システムのロバスト制御系設計において , その有限周波数特性 (有限に制限された周波数帯域でエネルギー収支をとらえ , 消散性より一般的な性質) は , 理論的な基盤を担う . 研究代表者もこの特性に基づく多次元システムのロバスト制御系解析に対して成果を上げている . しかし , 単一のシステムに限定されているため , 大規模複雑化する動的システムに適しない問題点が存在した .
- (3) 社会インフラシステムの制御 : 電力・情報ネットワークを中心とするスマートグリッドをさらに発展させて , 水道ネットワークや交通ネットワークなどを統合したスマート都市の視点が提唱されていた . しかし , 世界的にも 2015 年に IEEE Smart Cities Technical Committee が設立されたばかりで初期段階であり , 系統的な枠組みが確立いるとは言えなかった .

2 . 研究の目的

超スマート社会において , 電力ネットワーク , 交通ネットワーク , 水道ネットワークなどの社会インフラシステムは劇的に大規模複雑化しつつあり , 我々は適切に解決しなければならない使命に直面している . 本研究課題では , このようなシステムのサステナブルな運用に関する以下の 2 点の達成を目的とした .

- 大規模システムを , 複数の多次元システム (偏微分方程式によって記述される時間 , 空間など複数の独立変数を持つシステム) が階層的にネットワーク結合をする多次元階層的ネットワークシステムとして見通し良く記述し , その分散協調的なロバスト制御系設計の理論を確立する .
- 上の理論を超スマート社会の重要な社会インフラの一つであり , 典型的な多次元システムである大規模水道網の制御技術へと応用し , 実験による検証を通じて社会実装へと昇華を目指す .

本研究課題では , 多次元システムのロバスト制御系設計への橋渡しを行い , 電力ネットワーク , 交通ネットワーク , 水道ネットワークなどの社会インフラシステムの制御に大きく貢献することを目指した .

3 . 研究の方法

本研究課題では , 多次元階層的ネットワークシステムのモデリングをはじめに遂行した . 電力ネットワークに適したモデリングの枠組みとして , 多次元階層的ネットワークシステムに対していくつかの仮定・修正を行うことにより , ネットワーク化デスクリプタシステムを提案し , その基礎的性質に関する検討を行った . 具体的には , 以下の (1) , (2) で説明される .

(1) 多次元階層的ネットワークシステムのモデリング

はじめに , 河川や上・下水道を想定し , 「モノ」の流れを偏微分方程式による流体力学モデルで記述し , 開水路や管路の結合に対しては , グラフを用いた代数的制約によって記述した . つぎに , この枠組みを電力ネットワークや交通ネットワークも包含できるような枠組みへの一般化の検討を行った . 最後に , 時間と空間に関して離散化を行うことによって , 大規模シミュレーションに適した形式に変換した .

(2) ネットワーク化デスクリプタシステムの安定性解析

準備的な取り組みとして , 大規模異種電力ネットワークのダイナミクスを効率的に捉えることができる理論的な枠組みの構築に関する考察を行った . はじめに構造保存モデルと呼ばれる電力ネットワークを考え , 発電機や負荷をサブシステムととらえ , 送電ネットワークをネットワークシステムと考えるデスクリプタシステムとしての定式化を行った . この定式化を一般的な枠組みへと拡張を行った . 特に , ネットワークシステムについては非線形要素を含むものとし , より広いクラスのシステムに対応できるようにしている . そして , 安定性や受動性・消散性など基礎的な性質の検討を行った .

4. 研究成果

本研究課題の成果は、「3. 研究の方法」での切り分けに対応させて、以下の(1), (2)の通りに説明される。

(1) 多次元階層的ネットワークシステムのモデリング

大規模な電力ネットワーク、交通ネットワーク、河川ネットワークに代表される社会インフラシステムを想定した数理モデリングに関する検討を行った。主要な成果としては、上で述べた3種類の社会インフラシステムが、本研究課題で提案する多次元階層的ネットワークシステムとして共通に記述されることを確認し、「モノの流れ」という観点でこれらの制御を統一的に取り扱うことが可能となる点もあわせて述べた。また、都市河川に代表される河川ネットワークの分散協調制御に焦点を絞り、本研究課題で提案する枠組みが実システムへ有用となる可能性についても検討を行った。この成果は非線形性、ハイブリッド性を有するシステムに対して、本研究課題の多次元階層的ネットワークシステムの枠組みが有効に働く点を示唆するものであった。これらの成果は、自動制御連合講演会などの国内学会や国際会議 SICE Annual Conference 2018 での併設シンポジウムにおいて、予稿や口頭による発表を行った。

なお、電力ネットワークと異なる河川ネットワークや上・下水道ネットワークの大きな違いとして「流れ」を記述するダイナミクスが偏微分方程式を用いた流体力学モデルによって記述される点であることは上で述べたが、流体力学モデルを理論的に厳密に取り扱いには導出や結果の整理に時間が想定より時間を取られてしまい、空間的な振る舞いに関する有限周波数特性や消散性についても明確化に関して十分な成果に至ることができなかった。この点に関しては、今後の取り組みによって解決することを目指している。

(2) ネットワーク化デスクリプタシステムの安定性解析

(1)で述べた多次元階層的ネットワークシステムに対して、いくつかの仮定や修正をおこなうことによって、ネットワーク化デスクリプタシステムを導いた。特に、太陽光発電などの再生可能エネルギーの追加や電気自動車の充放電に対しても柔軟に対応可能とする Plug & Play 制御系となっている点が利点としてあげられる。そして、大規模な電力ネットワーク、交通ネットワーク、水道ネットワークに代表される社会インフラシステムを想定したシステムに対する消散性・受動性と安定性に関する検討を行った。

主要結果として、サブシステムの消散性に基づき、部分的な状態の局所漸近安定性と同期のための十分条件を導出した。また、構造保存モデルで記述された電力ネットワークにこの十分条件を適用し、電力ネットワークの制御系設計におけるそれらの有効性を示した。なお、有効性は理論的な条件だけでなく、計算機シミュレーションを通じても示している。本結果の重要なポイントは、以下の2点である。

サブシステムとネットワークシステムの適切な接続は Plug & Play 機能において重要な性質であるが、受動性・消散性の観点から明らかにしている。

デスクリプタシステムに基づくことで、Plug & Play 機能によりサブシステムの要素の着脱があったとしても、システム全体として安定性が適切に保存されることを示している。

この成果は非線形性を有する大規模複雑なシステムに対して、本研究課題の枠組みが有効に働く点を示唆するもので、本研究課題の今後の方向性を大きく切り開くものとなった。この成果は、国際論文誌 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration に掲載された。さらに、ネットワークシステムの受動性とサブシステムの消散性に基づく安定性の十分条件を導出し、提案する枠組みの将来展望も含めて計測自動制御学会の学会誌「計測と制御」に解説記事として発表した。

なお、上記の(1), (2)の成果を発展させて、消散性に基づく制御系設計の計算機援用法の精緻化、電気自動車の走行充電やロードヒーティングなどの電力と交通を融合した超スマート社会への提案する多次元階層的ネットワーク性の応用に関する予備的検討も行った。しかし、文献の精読や多次元階層的ネットワークシステムによるモデリングなど準備的な取り組みは行ったものの、2020年度当初より発生した新型コロナウイルスによって学内外で特殊かつ困難な状況であったため、十分な時間やエフォートを配当できず満足いく成果、および対外発表には至らなかった。これらの項目に関しては、本研究課題の後続の科学研究費補助金である基盤研究(C)「多次元性・消散性に基づく次世代電力ネットワークのマルチスケールロバスト制御系設計」における今後の取り組みを通じて十分な成果へと発展させて、学術論文、書籍や国際会議による対外成果へと結び付けていきたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 小島千昭, 滑川徹	4. 巻 58
2. 論文標題 超スマート社会のPlug & Play制御系設計-ネットワーク構造と消散性の活用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 600/605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.58.600	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chiaki Kojima, Yoshihiko Susuki, Shinji Hara	4. 巻 12
2. 論文標題 Dissipativity-Based Stability Analysis of Networked Nonlinear Descriptor Systems and Its Application to Power Grids	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 29/38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/jcmsi.12.29	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小島千昭	4. 巻 56
2. 論文標題 階層的ネットワークシステムのデータ駆動型低次元化	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 919/924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.56.919	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小島千昭
2. 発表標題 超スマート社会の実現に向けたシステム制御-多次元階層的ネットワーク性に着目したアプローチ
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2017 併設シンポジウム: Society 5.0の実現に向けて-システムズアプローチとシステム制御からの接近- (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島千昭
2. 発表標題 超スマート社会のための多次元階層的ネットワークモデリングと開水路ネットワークの分散・協調制御
3. 学会等名 計測自動制御学会 制御部門 都市インフラシステム構築と制御調査研究会 公開講演会 超スマート社会のシステムデザイン
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島千昭
2. 発表標題 開水路ネットワークの階層性に基づくモデリングと分散協調制御
3. 学会等名 第60回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島千昭
2. 発表標題 超スマート社会の予測・制御に向けた多次元階層的ネットワーク性に基づく大規模システムのモデリング
3. 学会等名 第8回 横幹連合コンファレンス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島千昭
2. 発表標題 消散性に基づくネットワーク化デスクリプタシステムの安定性解析と電力系統への応用
3. 学会等名 電子情報通信学会2020年7月高信頼制御通信研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

富山県立大学 工学部 電気電子工学科 システム制御研究室
<https://www.pu-toyama.ac.jp/IS/SC/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------