

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820165

研究課題名(和文)大規模ネットワークシステムに対する階層分散制御

研究課題名(英文)Hierarchical distributed control for large-scale network systems

研究代表者

石崎 孝幸 (Ishizaki, Takayuki)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：10650335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年、計算・通信技術の発達により、工学が扱う対象は飛躍的に大規模化している。このような背景のもと、電力ネットワークに代表される大規模システムを系統的にとり扱うための解析・制御手法開発の重要性は、今後とも日増しに高まることが予想される。

本研究では、モデル低次元化手法を応用することによって、ネットワークを構成するサブシステムの相互干渉情報を効率よく抽出し、その情報を処理する動的補償器と個々のサブシステムを制御する分散制御器が階層的に接続された制御系を設計している。このようにして得られる分散制御系は、従来の集中的な制御系と比較して、少ない計算・通信コストにより実装が可能となる。

研究成果の概要(英文)：With the recent development of communication and computation technology, the architecture of systems in engineering have tended to become more complex and larger in scale. In view of this, it is crucial to build a framework for analyzing and synthesizing large-scale network systems, e.g., power systems, in a systematic manner.

In this research, based on tools from model reduction theory, we design a hierarchical control system where a set of decentralized controllers for respective subsystems and a dynamical compensator handling interconnection signals among subsystems are hierarchically connected. The resultant hierarchical control system has the potential to be implemented with lower computation and communication costs compared with a conventional centralized control system.

研究分野：システム制御理論

キーワード：階層分散制御系 モデル低次元化

### 1. 研究開始当初の背景

近年、計算・通信技術の発達により、工学が扱う対象は飛躍的に大規模化している。例えば、電力ネットワークはその代表例であり、東京電力管内においては、約 200 か所の発電施設と約 2000 万世帯の需要家からなる電力システムを常に安定して運用することが求められている。このような背景のもと、大規模システムを系統的にとり扱うための解析・制御手法開発の重要性は、今後とも日増しに高まることが予想される。

これに対して、申請者はこれまでに、大規模システムに対するモデル低次元化手法（大規模システムの低次元近似モデルを求める手法）の開発とその応用に関する研究を行ってきた。特に、システムのネットワーク構造や消散性（安定なシステムのエネルギーの散逸を表す概念）など、対象とするシステムの特有の構造を保存するモデル低次元化問題を設定し、その解法を与えている。

一方で、本研究活動では、申請者が開発してきたモデル低次元化手法を制御系設計の基盤とし、大規模ネットワークシステムに適した新しいシステム制御理論を構築することが重要であると考えに至った。より具体的には、モデル低次元化を単なるシステムの近似手法として用いるのではなく、制御系設計において不可欠なシステム情報を効率的に抽出するツールとして捉え、これまでの集中的な制御系設計手法とは異なる、大規模ネットワークシステムに適した分散的な制御系設計手法を開発する。

### 2. 研究の目的

図 1 に示されるように、ネットワークシステムは、サブシステムの状態空間が相互干渉したシステムであると解釈することができる。したがって、ネットワークシステムを分散的に制御するためには、サブシステムの相互干渉の情報を抽出・処理する新しい制御系の構造が必要となる。これに対して、申請者は、図 2 に示されるような階層型の分散制御系の設計を目指す。この制御系は、個々のサブシステムを制御する分散制御器（図中  $C_1 \sim C_3$ ）と、サブシステム間の相互干渉の情報を抽出・処理する基幹制御器（図中  $C_0$ ）の 2 種類から構成される。

本研究では、階層分散的な状態オブザーバと状態フィードバックコントローラを統合することにより、階層分散制御系を設計する。具体的には、つぎの 3 つの課題を解決することが求められる。

#### 課題 1. 階層分散オブザーバの設計

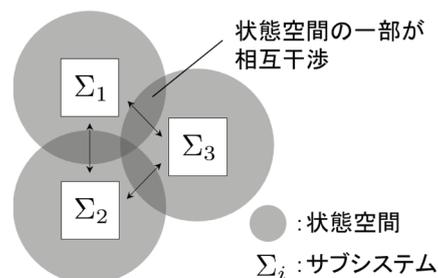


図 1 : ネットワークシステム

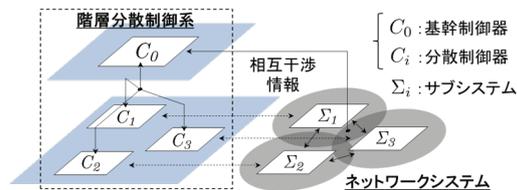


図 2 : 階層分散制御系

図 2 のように階層分散的な状態推定を行うためには、基幹オブザーバ（図中  $C_0$  に相当）によってサブシステム間の相互干渉を表わす状態空間を推定し、その推定信号を各サブシステムに接続された分散オブザーバ（図中  $C_1 \sim C_3$  に相当）へ送信する必要がある。ここで、相互干渉を表わす状態空間を抽出する問題を、モデル低次元化の枠組みに合うように、適切に定式化することが重要な課題となる。

#### 課題 2. 階層分散状態フィードバックコントローラの設計

課題 1 の階層分散オブザーバ設計問題と同様に、各サブシステムを安定化する分散的な状態フィードバックコントローラと、サブシステム間の相互干渉に関わる状態空間を安定化するための基幹コントローラを設計する。このとき、相互干渉を表わす状態空間の安定性をいかに特徴づけるかが重要な課題である。

#### 課題 3. 階層分散オブザーバと階層分散コントローラの統合

上記の課題 1, 2 において得られた階層分散型のオブザーバとコントローラを統合することにより、階層分散制御系の設計理論を構築する。このとき、制御性能や実装に要するコストなどの観点から、従来の集中的な制御系との比較により、階層分散制御系の優位性を明らかにする必要がある。また、現実の大規模ネットワークシステム（特に、電力ネットワーク）への適用に向けた、新たな課題を検討する。

本研究では、制御系設計において不可欠な情報を抽出するツールとして、モデル低次元

化の理論を応用することを考えている。これは、これまでのシステム制御理論分野には見られなかった独創的なアイデアである。ここで、本研究は、低次元モデルを用いて数値シミュレーションの計算量削減を図るなどの、モデル低次元化を単純なシステムの近似手法として利用する研究とは、一線を画する。さらに、本研究では、ネットワークシステムの階層分散的な表現を導出するために、状態空間の拡大を用いる。このように、特別な構造をもつ制御系の設計問題に対して、状態空間の拡大と縮小（低次元化）を同時に用いる点は、本研究の大きな特色である。

### 3. 研究の方法

階層分散制御系を系統的に設計するためには、サブシステムの状態空間とそれらの相互干渉を表す状態空間に、ネットワークシステム全体の状態空間を分離する必要がある。これに対して、申請者は、状態空間の一部を重複させるように拡大するシステム変換とモデル低次元化を同時に用いることにより、この状態空間の分離が実現できると考えている。これにより、サブシステムの相互干渉を低次元モデルで表現した、ネットワークシステムの階層分散的な表現が得られる。具体的な手順は以下のとおりである。

**手順(i)**：対象とするネットワークシステムの状態空間を拡大し、独立したサブシステムと相互干渉モデルに分離された階層分散表現を導出する。このシステムの拡大は、ある種の等価変換に相当しているため、ここで得られる相互干渉モデルは、もとのシステムと同程度に高い次元をもつ。

**手順(ii)**：手順(i)で得られた相互干渉モデルに対して、階層分散制御系の設計に不可欠な情報を保存するような近似問題を設定し、モデル低次元化を行う。

このようにして得られるネットワークシステムの低次元な階層分散表現は、図2に示される制御系の階層分散構造に適合している。したがって、目標とする階層分散制御系の系統的な設計が可能となる。また、低次元モデルによってサブシステム間の相互干渉が表わされているため、計算・通信コストの観点から、現実的に実装可能な階層分散制御系の設計が期待できる。

### 4. 研究成果

上述の研究の方法にしたがって、申請者は階層分散構造をもつオブザーバ設計問題に取り組んだ。この研究成果は、システム制御系の国際会議である American Control Conference 2014 にて発表している。より具体的には、図3に示すように相互作用をもつ

ネットワークシステム（図中  $\Sigma_1 \sim \Sigma_N$  のブロック）に対して、分散的なオブザーバ（図中  $O_1 \sim O_N$  のブロック）を構築し、相互作用信号の影響を補正するための動的な補償器（図中  $\Psi$ ）を階層的に接続した構造をもつオブザーバの設計を行った。この階層分散オブザーバの有効性は、電力システムの例を通して示されている。

つづいて、この階層分散オブザーバのある種の双対問題として階層分散状態フィードバックコントローラを構築し、オブザーバ併合系として階層分散制御系の設計を行った。図4に示されるように、各サブシステム  $\Sigma_1 \sim \Sigma_4$  には個別の分散コントローラ  $\kappa_1 \sim \kappa_4$  が接続され、サブシステム間の相互作用信号の影響の補正のため、動的補償器  $\Phi_1(1)$ ,  $\Phi_2(1)$ ,  $\Phi(2)$  が階層的に接続されている。この階層分散制御系の有効性も電力システムへの適用を通してしめされており、この研究成果は、国際会議 53rd IEEE Conference on Decision and Control において発表している。このような状態空間拡大に基づく階層分散制御系設計手法は申請者によって初めて提案された。

また、以上の階層分散制御系設計問題の議論を通して、全系のシステムモデルが取得できないことを前提とした、分散制御系の分散設計が重要であることが明らかになった。この着想に基づき、現在は、階層的な状態空間の拡大による、コントローラレトロフィット手法（コントローラの分散的な増改築手法）の構築を目指している。このコントローラレトロフィット手法の構築により、分散コントローラを分散的に増改築することが可能となるため、階層分散制御系などの特別な構造や特性をもつ制御系の系統的な分散設計の実現が期待される。なお、このコントローラレトロフィット手法の構築には、本研究課題の取り組みで開発されたネットワーク構造を保存する低次元化手法に基づく解析が、制御系に分散構造を与えるために必要となることが予想される。

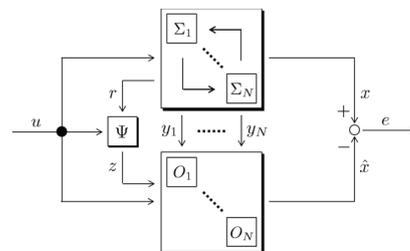


図3：階層分散オブザーバ

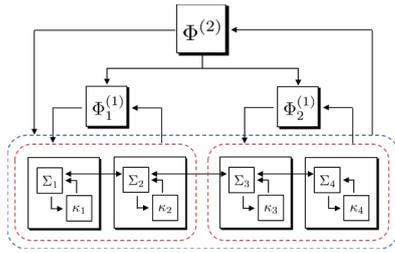


図4：階層分散制御系

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)

① Takayuki Ishizaki, Kenji Kashima, Antoine Girard, Jun-ichi Imura, Luonan Chen, Kazuyuki Aihara: Clustered Model Reduction of Positive Directed Networks, Automatica, vol.59, pp.238-247, 2015. 査読有 (DOI: 10.1016/j.automatica.2015.06.027)

② 石崎孝幸: 非負システムのモデル低次元化, システム/制御/情報, 第59巻第1号「非負システムの制御と数理」特集号, 2015. 査読無

③ Takayuki Ishizaki, Jun-ichi Imura: Clustered Model Reduction of Interconnected Second-Order Systems, Nonlinear Theory and Its Applications, Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Special Section on Complex Systems Modelling and its Transdisciplinary Applications, vol.6, no.1, pp.26-37, 2015. 査読有 (DOI: 10.1588/nolta.6.1)

〔学会発表〕 (計3件)

① Takayuki Ishizaki, Risong Ku, Jun-ichi Imura: Eigenstructure Analysis from Symmetrical Graph Motives with Application to Aggregated Controller Design, Proc. of 55th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 5744-5749, 2016. 査読有 2016年12月12日～2016年12月14日 ラスベガス

② Tomonori Sadamoto, Takayuki Ishizaki, Jun-ichi Imura: Hierarchical Distributed Control for Networked Linear Systems, Proc. of 53rd IEEE Conference on Decision and Control, pp.2447-2452, 2014. 査読有

(DOI: 10.1109/CDC.2013.6760762) 2014年12月15日～2014年12月17日 ロサンゼルス

③ Takayuki Ishizaki, Masakazu Koike, Tomonori Sadamoto, Jun-ichi Imura: Hierarchical Decentralized Observers for Networked Linear Systems, Proc. of 2014 American Control Conference, pp.5718-5723, 2014. 査読有 2014年6月4日～2014年6月6日 ポートランド

〔その他〕

申請者ホームページ:

<http://www.cyb.mei.titech.ac.jp/members/ishizaki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石崎 孝幸 (ISHIZAKI, Takayuki)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号: 10650335

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号:

(4) 研究協力者

( )