

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13774

研究課題名(和文)大規模ネットワークシステムに対するレトロフィット制御理論の構築

研究課題名(英文)Development of Retrofit Control Theory 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・准教授

研究者番号：10650335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、社会インフラシステムなどに代表される、多数の主体によって段階的に増改築されていくネットワークシステムに対して、その持続的発展を可能にするシステム制御理論の構築を行った。より具体的には、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)に関する理論を基盤として、分散制御系を構成するコントローラやサブシステムを局所的に改変・拡張することによって、安定性や可制御性など、大局的なシステム特性や制御性能を段階的に改善するためのレトロフィット制御理論を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存の関連研究では、システム特性や制御性能の改善に向けてシステム自体の段階的な変化を議論することは一般にされていなかった。一方で、本研究におけるレトロフィット制御理論では、制御系の局所的な増改築により、与えられた分散制御系を所望の分散制御系へ改変・拡張していくことを考えている。このような制御系レトロフィットの発想は独自のものである。また、本研究は、これまでのシステム制御理論では扱うことが難しかったオープンシステム(不特定多数の主体により逐次的に改変され得るシステム)の制御に関する基礎理論となり得る。

研究成果の概要(英文)：In this work, we have developed a systems and control theory for network systems subject to change due to extension and reconstruction of subsystems, which enables sustainable development of control systems. In particular, on the basis of a controller retrofit method (a method for distributed design of local controllers), proposed by PI in past works, we have developed a new retrofit control theory to enhance global system properties, such as stability and controllability, by extension and reconstruction of local subsystems and controllers.

研究分野：システム制御工学

キーワード：分散協調制御 レトロフィット制御 オープンシステム

## 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。これに伴い、従来までの集中制御系に代えて、空間的な広がりをもつネットワークシステムに適した分散制御系に注目が集まっている。特に、大規模ネットワークシステムに対するスケーラブルな分散制御系設計手法の開発は、その重要性が今後とも日増しに高まることが予想される。

近年のシステム制御理論分野では、分散制御系の解析・設計に関する多くの研究結果が報告されている。しかし、それらの手法は、設計されたコントローラが分散的に実装可能な一方で、その設計手順は、全系のシステムモデルが取得できることを前提にした集中的な計算に基づいている。一般に、電力システムなどの大規模系に対して、詳細なパラメータ値を含めた完全なシステムモデルを得ることは難しいため、このような集中的な制御系設計手法は現実的ではない。さらに、システムの一部が改変・拡張された場合には、制御系のすべてを再設計する必要がある点も実応用における課題となる。実際、東京電力管内の電力システムは、約 2000 万世帯の需要家や 100 機以上の火力発電機から構成されており、集中的な制御系の再設計は現実的でない(図 1)。したがって、多数の主体による部分的なシステムの改変や拡張が、システム全体の詳細なモデル情報を必要とすることなく可能となるための原理と方法を明らかにすることが求められていた。

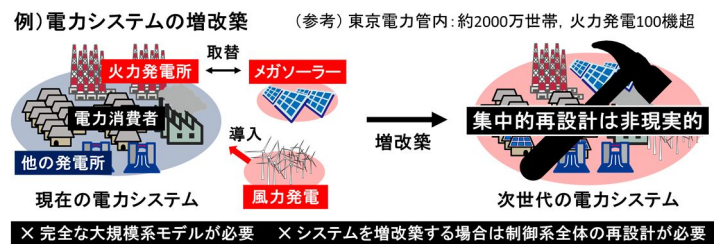


図 1：従来の集中的な制御系設計によるシステムを増改築

## 2. 研究の目的

本研究では、研究代表者がこれまでが開発してきた、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)に関する理論を基盤として、局所的なシステムを増改築により、分散制御系の大局的なシステム特性や制御性能を段階的に改善し、所望の分散制御系を実現するためのレトロフィット制御理論を構築することを目的としている(図 2)。



図 2：提案するレトロフィット制御手法

## 3. 研究の方法

本研究では、具体的につぎの 3 つ課題に取り組んだ。

### 課題 レトロフィット前後におけるシステムの安定性の補償

システムの段階的な増改築を可能とするためには、制御系レトロフィットの前後でシステムの安定性が保持されることが必要条件となる。例えば、電力系統制御において特定のエリアに対する局所コントローラのフィードバックゲインを独立に高くすると、それぞれのエリアを安定化するコントローラを実装しているにも関わらず全系が不安定化してしまう。

### 課題 レトロフィットの繰り返しによるシステム特性の変化の解析

大規模システムに対して、所望の制御系を一度の増改築によって実現することは困難である。したがって、所望の分散制御系を設計するためには、どのようなレトロフィットの繰り返し、どのようなシステム特性を実現するのかを明らかにしなければならない。

### 課題 最適レトロフィットスキームの開発

課題 において得られた解析結果に基づき、所望の分散制御系を実現するレトロフィットスキームを開発した。より具体的には、与えられた分散制御系の評価指標に関する最適化アルゴリズムを、レトロフィットの繰り返しによって実現・実装することなどが必要となる。

上記の課題 ~ を解決するために、コントローラレトロフィット手法の開発で研究代表者が考案した、図3の状態空間の拡大に基づく等価変換を利用することを考えた。

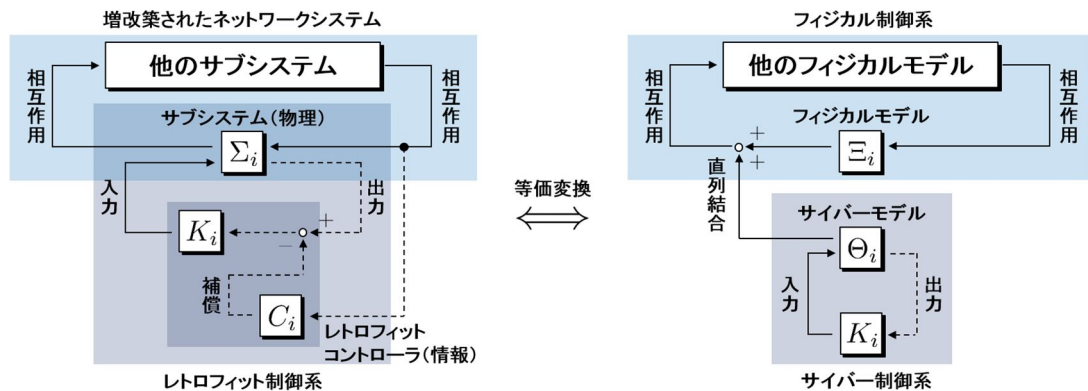


図3：制御系レトロフィットのためのアプローチ（実線は物理信号，破線は情報信号を表す）

左図はレトロフィット後の分散制御系を表しており、注目するサブシステムとレトロフィットコントローラを合わせたものが増改築された制御系である。このとき、上記の制御系が座標変換を介して等価であり、左図のサブシステムの状態が、右図のフィジカルモデルとサイバーモデルの状態の和と一致すること（状態空間の拡大）が示される。ここで、右図は、フィジカル制御系とサイバー制御系の直列結合系となっている。したがって、全系の安定性は、フィジカル制御系とサイバー制御系がともに安定であることと等価である。

#### 4．研究成果

本研究では、上記に示された社会インフラシステムなどに代表される、多数の主体によって段階的に増改築されていくネットワークシステムに対して、その持続的発展を可能にするシステム制御理論の構築を行った。より具体的には、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）に関する理論を基盤として、分散制御系を構成するコントローラやサブシステムを局所的に改変・拡張することによって、安定性や可制御性など、大局的なシステム特性や制御性能を段階的に改善するためのレトロフィット制御理論を構築した。これは上記の課題 ~ に対する解を与えたことに対応している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Takayuki Ishizaki, Takahiro Kawaguchi, Hampei Sasahara, Jun-ichi Imura	4. 巻 107
2. 論文標題 Retrofit Control with Approximate Environment Modeling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 442-453
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.automatica.2019.06.010	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 浦田 賢吾, 石崎 孝幸, 井村 順一	4. 巻 55(3)
2. 論文標題 制御器設計の局所化可能性に対する定量解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 148-155
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.55.148	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takayuki Ishizaki, Kengo Urata
2. 発表標題 Geometric Controller Specification Via Nyquist Surface Segmentation
3. 学会等名 The 2021 American Control Conference（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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
---------	---------