

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14704

研究課題名(和文)モデル集合のみで展開する大規模複雑系の解析・設計論

研究課題名(英文) Model-Set-Based Analysis and Design of Large-Scale Complex Systems

研究代表者

井上 正樹 (Inoue, Masaki)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・講師

研究者番号：80725680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：交通ネットワークや電力系統のような大規模システムを制御・管理するための基礎理論構築に取り組んだ。大規模システムの記述に適した数理モデルとして、システム内部のエネルギーの増減を表現する消散不等式を採用し、安定性や外乱性能などの解析方法、さらに制御方策までを提案した。また、理論を応用し広く産業界で使われるモデル予測制御の超高速化と安定性保証でも成果を得た。さらに、研究過程で得た着想をもとに、人と機械の協調システムに対する「弱い制御」という新しい概念を提案した。その実現を与えたあと、エネルギー管理システムや航空管制システムへの応用展開まで取り組み成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の情報通信技術の発展により工業製品から社会インフラまで様々なシステムは大規模化されてきた。これらはもし適切に制御や運用されるならば我々の暮らしを豊かにする一方で、大規模ゆえに従来どおりの制御・運用手法には限界も見えてきている。本研究課題は、大規模複雑システムを想定した新たな制御や運用のための基礎理論に取り組んできた。開発してきた解析・制御方策は直接的または間接的にも様々なシステムの制御・運用方法に貢献することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：This research project aims at developing fundamental theory for control and management of large-scale systems. The systems are expressed by the dissipation inequality. Then, the stability and control performance analysis of the large-scale systems has been performed, which contributes to reliable control-systems design. The project has also addressed the cooperative control problem for human-machine interactive systems and has presented a novel concept of "weak control". The concept has been realized in design problems of reliable energy management and air traffic control systems.

研究分野：システム制御工学

キーワード：モデルセットベース制御 消散性 大規模システム 弱い制御 モデル予測制御 航空管制システム
エネルギー管理システム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、様々な分野において大規模複雑系の取り扱いの重要性が認識されるようになってきた。特に、本研究で想定している実社会の問題には、社会インフラの中でも特に太陽光発電や風力発電などの自然エネルギー発電が大量導入された電力系統の設計が挙げられる。直接電力系統に接続された自然エネルギー発電は、その不確かさから、系統周波数(50, 60Hzが目標)へ大きな変動を与えてしまう。解決策として蓄電池や高性能インバータを自然エネルギー発電に併設し、それらに動特性をもたせることで系統全体の周波数変動を抑制する検討がされている。このとき、膨大な数が想定される蓄電池やインバータの制御規則をどのような方策のもと設計して、系統全体の周波数変動を抑制するかが社会的にも重要な課題である。

制御分野では、通常、システムを状態方程式など詳細な数理モデルで記述して、定性的または定量的な解析と設計をおこなっている。ただ、大規模複雑系、多種多様な構成要素からなる動的システムでは規模の拡大により全体のモデルの自由度が膨大なものとなるため、詳細モデルをもとにした解析や設計には限界がある。一つのアプローチとして、モデル低次元化を適用することでモデルの自由度を減らし、解析や設計を行うことが考えられる。ただ、大規模系に対しては低次元化を適用する以前にそもそも大自由度のモデルを構築すること自体が容易ではない。効果的で実用的な解析や制御のためには大規模複雑系ならではのシステム表現から考えていく必要がある。

2. 研究の目的

本研究では大規模複雑系に適した数理モデルから考える。動的システムを詳細なモデルで記述するのではなく、一部の性質のみ表現できるモデルの集合に属するものとみなす。そして、モデル集合のみを用いた規模によらないスケラブルな形での大規模系の解析や設計を行うことを目的とする。従来の詳細モデルによるシステムの記述との違いを図1に示す。

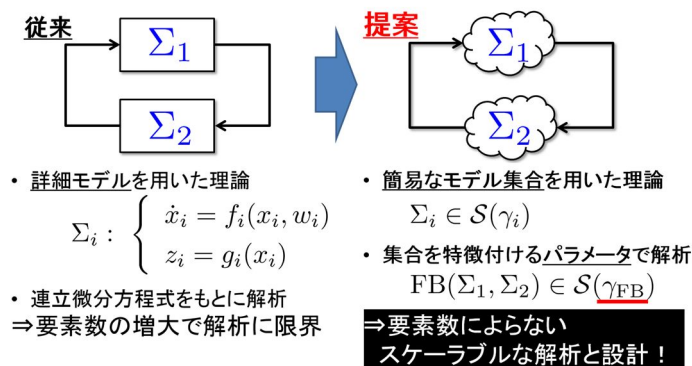


図1: モデル集合によるシステムの記述

3. 研究の方法

大規模複雑系の定量的解析や設計の基礎理論を目指して次の問題に取り組む。

(1) パラメータ付き受動性に属するシステムからなるネットワーク結合系の解析を行う。特に、システムの結合をパラメータの遷移として表現することで系全体の定量的な解析まで可能とし、結合数と安定性能の関係を明らかにする。

(2) ボトムアップ設計論への展開: (1)の結果から、小規模の動的システムを徐々に結合することで性能を向上させ、最終的に所望の性能を持つ大規模系を構築する新しい設計論を提案する。

(3) 理論を電力系統制御など様々な都市インフラシステムの制御や運用方策へ応用展開する。特に電力系統に自然エネルギーを導入した際の周波数安定性解析と定量的な安定性能を向上させるための設計問題に取り組む。

4. 研究成果

消散不等式に基づくネットワーク結合系の解析・設計論として、狙い通り以下の成果を得た。

(1) サブシステムを少数パラメータで特徴づけた消散不等式で記述し、ネットワーク結合系の定量的な性能解析をおこなった。特にネットワークのグラフ構造と系全体の外乱抑制性能の関係を示したことが一番の成果である。その後、パラメータを行列や周波数依存の行列値関数の場合に拡張し、より精密な解析や設計を可能とした。得られた研究成果は最高峰の国際雑誌論文に複数編掲載済みである。また、国際会議でも成果発表をおこない学会賞も受賞している。

(2) (1)の結果をもとに既存の制御システムに新たな制御器を付与していくボトムアップ設計法を開発した。特に電力系統制御への応用として、図2に示すように電力系統の平均周波数変動 i を観測してそれをもとに電力注入を行う複数の制御器 K_1, K_2 を順に設計していく問

題に取り組み成果を得た．大規模複雑系である既存の電力系統は詳細な状態方程式モデルを得ることが難しい．そこで，簡易的な消散不等式モデルにより既存系統を記述し，提案してきた設計法をもとに制御器をそれぞれ独立に設計し独立に実装した．その結果である電力系統モデルを用いたシミュレーション結果を図3に示す．図では，青線，赤線，黒線は順番に制御器なしの場合，制御器一つを付与した場合，制御器二つを付与した場合の周波数応答を表している．提案する理論のもとでは制御器を付与するほど外乱抑制性能が向上していることが見て取れる．これらの研究成果は国際雑誌論文や国際会議論文にて発表済みである．

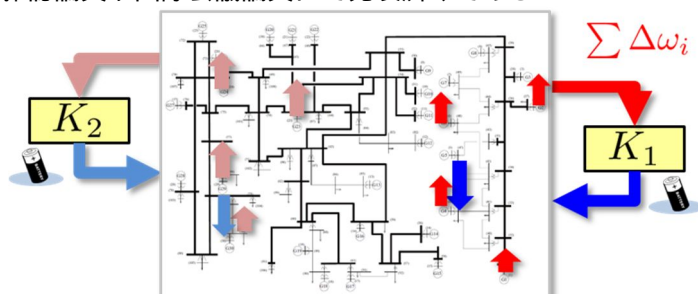


図2：電力系統に対する制御器設計

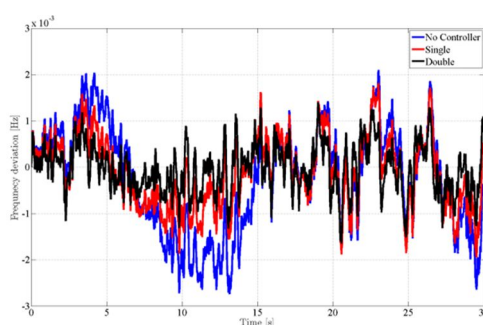


図3：周波数変動のシミュレーション結果

(3)(1)で得られた消散不等式に基づくネットワーク結合システムの安定性や外乱抑制性能解析をもとにして，産業界で広く利用されるモデル予測制御(MPC)の近似による超高速化と制御システムの安定性保証をおこなった．高速化された新たな制御方策を instant MPC と名付け，理論研究だけでなく航空機の姿勢制御などの実問題にも適用し成果をあげた．成果は既に国際雑誌論文に掲載され，国際会議・国内会議でも発表済みである．

また，当初の計画になかった以下の成果もあげることができた．

(4)本研究課題で取り扱うモデル集合や集合値信号の考え方から着想を得て，人の意思決定が制御ループに内在する系(Human-in-the-loop Systems, 図4参照)に対する制御問題に取り組み，新しい概念として「弱い制御」を提案した．そして，その実現例として，パイロットの意思決定を含む航空管制システムや需要家の意思決定を含むエネルギー管理システムの効果的な制御や運用方法を開発した．研究成果は制御系の学会だけでなく航空宇宙学会などでも発表し，広く他分野への貢献もおこなった．

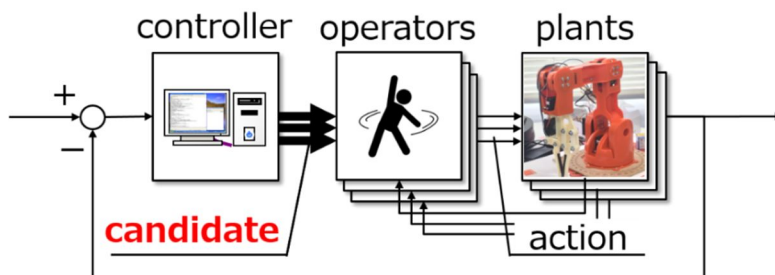


図4：人と機械の協調制御

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Urata Kengo, Inoue Masaki, Ishizaki Takayuki, Imura Jun-ichi	4. 巻 65
2. 論文標題 Performance Improvement via Iterative Connection of Passive Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 1325 ~ 1332
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAC.2019.2930806	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 Saito Yuki, Yoshimura Sho, Inoue Masaki, Takahashi Masaki, Sugihara Yurika	4. 巻 52
2. 論文標題 Optimal Trajectory Planning of Aircraft for Fair-Sharing of Noise	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 271 ~ 276
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ifacol.2019.08.082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yoshida Keisuke, Inoue Masaki, Hatanaka Takeshi	4. 巻 3
2. 論文標題 Instant MPC for Linear Systems and Dissipativity-Based Stability Analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 811 ~ 816
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LCSYS.2019.2918095	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 Inoue Masaki	4. 巻 2
2. 論文標題 Persistence in Control Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 387 ~ 392
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LCSYS.2018.2839760	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 Inoue Masaki, Urata Kengo	4. 巻 95
2. 論文標題 Dissipativity Reinforcement in Interconnected Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 73 ~ 85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2018.05.006	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 Inoue Masaki, Urata Kengo	4. 巻 9
2. 論文標題 Quantitative Analysis of Passive Systems Interconnected on Graphs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 185 ~ 195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.9.185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Urata Kengo, Inoue Masaki	4. 巻 28
2. 論文標題 Dissipativity Reinforcement in Feedback Systems and its Application to Expanding Power Systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Robust and Nonlinear Control	6. 最初と最後の頁 1528 ~ 1546
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/rnc.3965	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19件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 本間俊貴、井上正樹、井村順一
2. 発表標題 安全性保証付きでの階層制御器の部分的学習
3. 学会等名 第7回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上正樹、吉田圭佑、原啓太
2. 発表標題 消散性仕様のもとでのモデル予測制御の“近似”
3. 学会等名 第7回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田真治、齊藤有紀、吉田圭佑、井上正樹
2. 発表標題 航空機の到着制御へのMIQPによるアプローチ
3. 学会等名 第7回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴崎紗菜、荒幡充、井上正樹
2. 発表標題 需要家に自由な意思決定を許す節電制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原啓太、井上正樹、瀬部昇
2. 発表標題 クープマンモデルを用いた消散性制約つき学習
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田圭佑、井上正樹、畑中健志
2. 発表標題 instant MPCと消散性に基づく安定性解析
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 斎藤有紀
2. 発表標題 フローコリドー内での自律分散的な航空機の衝突回避制御：パイロットの負担軽減を目指した制御方策
3. 学会等名 第57回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田圭佑
2. 発表標題 インスタントモデル予測制御を用いた航空機の姿勢制御と計算負荷の低減
3. 学会等名 第57回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshida Keisuke、Inoue Masaki、Hatanaka Takeshi
2. 発表標題 Instant MPC for Linear Systems and Dissipativity-Based Stability Analysis
3. 学会等名 58th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Saito Yuki、Yoshimura Sho、Inoue Masaki、Takahashi Masaki、Sugihara Yurika
2. 発表標題 Optimal trajectory planning of aircraft for fair-sharing of noise
3. 学会等名 10th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上正樹
2. 発表標題 受動性再訪：モデル集合のみでのシステムの記述から解析・設計まで
3. 学会等名 第6回制御部門マルチシンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Inoue Masaki
2. 発表標題 Persistence in control systems
3. 学会等名 57th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齊藤有紀，吉村翔，井上正樹，高橋正樹，杉原有理花
2. 発表標題 騒音の広域分担を目的とした航空機の最適軌道計画
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉村翔
2. 発表標題 航空機群への自由度を残した経路計画
3. 学会等名 第56回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上正樹
2. 発表標題 制御系のパーシステンス
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Inoue Masaki、Suzumura Mizuki、Urata Kengo
2. 発表標題 Inhibiting disturbance propagation in large-scale systems and Its application to power system control
3. 学会等名 2018 European Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Inoue Masaki、Ishizaki Takayuki、Suzumura Mizuki
2. 発表標題 Parametrization of all retrofit controllers toward open control-systems
3. 学会等名 2018 European Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Urata Kengo、Inoue Masaki
2. 発表標題 Performance analysis of feedbacked passive systems for decentralized design of large-scale systems
3. 学会等名 56th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Urata Kengo、Inoue Masaki
2. 発表標題 Performance analysis in iterative feedback connection of passive systems
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

受賞2件 ・Kengo Urata, SICE Annual Conference 2017, Young Author's Award ・齋藤有紀, 第57回飛行機シンポジウム 学生優秀講演賞

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