

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14760

研究課題名(和文)大規模ネットワークシステムの最適設計アルゴリズムの開発

研究課題名(英文)Development of Optimal Design Algorithms for Large-Scale Network Systems

研究代表者

佐藤 一宏 (Sato, Kazuhiro)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号：00751869

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)：大規模ネットワークシステムの最適設計問題の定性的アプローチと定量的アプローチの適用範囲を以下のように拡張した。

- (1) 定性的アプローチ：微分方程式と代数方程式が混在したディスクリプタシステムを可制御にするために必要な最小入力数を求めるアルゴリズムを提案した。
- (2) 定量的アプローチ：大規模性に起因する最適設計の困難性を克服するために効率的なモデル縮約法の提案、大規模モデルの同定の困難さを避けるためのデータ駆動型制御法の提案、新たな中心性指標の提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、微分方程式に加えてキルヒホッフの法則等の物理法則によってモデル化した際に現れる代数方程式が混在したディスクリプタシステムを最小入力数で可制御にするアルゴリズムが初めて得られた。また、大規模性に起因する困難性を解消するために非凸最適化法やクロン縮約による新たなモデル縮約法を提案したが、その際に新たに考案された方法論や概念は、本研究に限らず他の研究でも利用可能な適用範囲の広いものである。さらに、大規模ネットワークシステムの状態ノードに関する新たな中心性指標を提案しており、この指標を用いることで制御すべき状態ノードを新たな観点から考察することが可能になった。

研究成果の概要(英文)：We have extended the application scope of qualitative and quantitative approaches to the optimal design problem of large-scale network systems as follows:

- (1) Qualitative approach: We proposed an algorithm for determining the minimum number of inputs required to achieve controllability of descriptor systems involving a mixture of differential and algebraic equations.
- (2) Quantitative approach: To overcome the challenges in optimal design due to large-scale nature, we proposed efficient model reduction techniques, data-driven control methods to avoid difficulties in identifying large-scale models, and introduced new centrality metrics.

研究分野：制御工学

キーワード：最適化 可制御性 モデル低次元化 ネットワークシステム

1. 研究開始当初の背景

ネットワークの要素が相互に影響を及ぼすことで起こる動的な変化は、感染症の拡大、送電網による電力の供給、脳の活動、社会ネットワークにおける世論の変化など、現実世界の様々な状況に現れる。このようなネットワークを動的ネットワークと呼び、広い応用を持つ動的ネットワークを制御することは工学の観点から重要である。

動的ネットワークシステムを制御する際に、最も重要な概念は可制御性である。可制御性とは、適切な制御入力を行うことで有限時間のうちにネットワークの状態を任意の状態へ到達させることが可能であるという性質のことであり、Kalman によって導入されて以降様々な研究がなされている。特に最近では、動的ネットワークシステムのどのエージェントを制御するかを決める制御ノード選択問題が活発に研究されている。この問題はシステム行列の各成分がゼロであるか否かという構造の情報だけで研究を進める定性的アプローチと、各成分の具体的な値が分かっているとして研究を進める定量的アプローチで研究が進められてきた。しかし、定性的アプローチでは適用可能な数理モデルが微分方程式で表現されたものに限られており、キルヒホッフの法則等の物理法則によってモデル化した際に現れる代数方程式系を扱うことができなかった。また、定量的アプローチでは大規模性に起因する最適設計の困難性が生じていた。

2. 研究の目的

以上の背景から、大規模ネットワークシステムの最適設計問題の定性的アプローチと定量的アプローチの適用限界を広げることが本研究の目的とした。より具体的には、定性的アプローチでは微分方程式と代数方程式が混在するディスクリプタシステムを可制御にするために必要な最小入力数を求めるアルゴリズムを与えることを目的とした。また、定量的アプローチでは、大規模性に起因する最適設計の困難性を克服するための効率的なモデル縮約法の提案、大規模モデルの同定の困難さを避けるためのデータ駆動型制御法の提案、新たな中心性指標の提案を目的とした。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、以下の方法を用いた。

- (1) グラフ理論による方法：大規模ネットワークシステムを可制御にするために必要な最小入力数を求める問題は基本的な問題であるが、微分代数方程式系で表現されるディスクリプタシステムに対しては未開拓だった。本研究では2部グラフに対する Dulmage-Mendelsohn(DM)分解を用いて研究した。
- (2) 代数的グラフ理論による方法：代数的グラフ理論といわれる線形代数的な方法を用いて有向グラフで表現される大規模ネットワークシステムの縮約の問題を研究した。
- (3) 非凸最適化手法による方法：大規模ネットワークシステムは非負システムとしてモデル化することが自然な場合が多いことに着目し、非負システムを非負システムのまま低次元化する方法を開発した。具体的には、非負制約付きのリーマン多様体上の最適化手法と射影勾配法による方法を開発した。
- (4) データ駆動型アプローチによる方法：大規模ネットワークシステムは、大規模性より、従来のアプローチのようにモデル化が正確に行えるとは限らない。本研究では、機械学習の知見を利用して、出力データだけから、最適な出力フィードバックゲインを設計する方法を開発した。
- (5) 凸最適化法と線形代数による方法：凸最適化問題は非凸最適化問題に比べて解きやすいことは良く知られているが、解が存在したとしても一般には解が一意とは限らない。大規模ネットワークシステムを構成する状態ノードの重要度は一意であることが理解のしやすさから望ましく、その重要度のある凸最適化問題の解として与えたい場合は、その凸最適化問題の目的関数は狭義凸関数であることが望ましい。本研究では凸最適化問題と線形代数による方法を利用して、状態ノードの重要度を可制御性の観点から特徴付ける方法を提案した。また、その凸最適化問題に対応する目的関数の勾配はリプシッツ連続ではないため、リプシッツ定数を利用しない最適化アルゴリズムも提案した。

4. 研究成果

以下のように、研究の方法に記載した番号に対応した研究成果を得た。

- (1) 大規模な構造化ディスクリプタシステムの可制御性解析：本研究では状態間の作用を有向グラフで表現する微分代数方程式系で表現される大規模な構造化ディスクリプタシステムの最小可制御性問題（最小の入力数でシステムを可制御性にする問題）を研究した。特に、最小可制御性問題は多項式時間で解けるクラスと NP 困難になるクラスがあることを明らかにした。また、入力を加えることが可能なノードに制約を付けた場合にも多項式時間の解法アルゴリズムを与えた。
- (2) Kron 縮約と有効抵抗の概念の有向グラフへの一般化：大規模な無向グラフに対応するラプラシアン行列の縮約手法として Kron 縮約が有名であるが、有向グラフの場合にも利用できる形で概念を拡張した。さらに、その結果と、電気回路とマルコフ連鎖との関連性を利用し、無向グラフに対して定義されていた有効抵抗の概念を有向グラフに対して拡張し、無向グラフの場合に対して知られていた結果が有向グラフに対しても自然に拡張できることを示した。
- (3) 大規模ネットワークシステムのモデル低次元化法の開発：大規模ネットワークシステムは様々な応用に現れる。そのようなシステムを制御する際には適切なモデル低次元化を行うことが重要である。本研究ではリーマン多様体上の最適化や射影勾配法に基づく低次元化法を提案した。また、ランダム射影を利用した低次元化法も提案した。
- (4) データ駆動型制御器設計法の開発：出力データだけを利用して、指定された構造を備えたフィードバックゲインの設計法を提案した。
- (5) 可制御性スコア概念の創造：外部入力の影響を受ける大規模ネットワークシステムを所望の状態へ制御するためには、ネットワークを構成する各エージェントの重要性を特徴付ける中心性指標を調べることが重要である。本研究では、外部入力の影響を考慮した可制御性スコアという新たな中心性指標を提案した。この可制御性スコアは大規模ネットワークシステムを定義するシステム行列を用いて定められる凸最適化問題の一意的な解として与えられることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11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 Terasaki Shun, Sato Kazuhiro	4. 巻 67
2. 論文標題 Minimal Controllability Problems on Linear Structural Descriptor Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 2522 ~ 2528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2021.3079359	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 Misawa Sota, Sato Kazuhiro	4. 巻 6
2. 論文標題 H2-Optimal Reduction of Positive Networks Using Riemannian Augmented Lagrangian Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 2539 ~ 2544
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2022.3166640	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 佐藤 一宏	4. 巻 60
2. 論文標題 リーマン多様体上の最適化法を用いた大規模システムのモデル低次元化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 375 ~ 380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.60.375	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 Kazuhiro Sato, Akiko Takeda	4. 巻 4
2. 論文標題 Controllability maximization of large-scale systems using projected gradient method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 821 ~ 826
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2020.2993983	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 SATO Kazuhiro, AZUMA Shun-ichi	4. 巻 E104.A
2. 論文標題 Analysis and Design of Aggregate Demand Response Systems Based on Controllability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 940 ~ 948
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2020EAP1093	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 佐藤一宏	4. 巻 31
2. 論文標題 大規模システムの可制御性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用数理	6. 最初と最後の頁 4 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Sakamoto Hiroki, Sato Kazuhiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Random projection preserves stability with high probability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JSIAM Letters	6. 最初と最後の頁 17 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14495/jsiaml.15.17	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 Sato Kazuhiro	4. 巻 未定
2. 論文標題 Reduced Model Reconstruction Method for Stable Positive Network Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2022.3218620	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 Sugiyama Tomohiro, Sato Kazuhiro	4. 巻 44
2. 論文標題 Kron Reduction and Effective Resistance of Directed Graphs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications	6. 最初と最後の頁 270 ~ 292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1137/22M1480823	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 Takakura Shokichi, Sato Kazuhiro	4. 巻 未定
2. 論文標題 Structured Output Feedback Control for Linear Quadratic Regulator Using Policy Gradient Method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2023.3264176	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 Terasaki Shun, Sato Kazuhiro	4. 巻 未定
2. 論文標題 Minimal controllability problem on linear structural descriptor systems with forbidden nodes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2023.3268288	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6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 寺崎峻, 佐藤一宏
2. 発表標題 大規模ネットワークシステムにおける状態ノードの可制御性スコア
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高倉将吉, 佐藤一宏
2. 発表標題 方策勾配法を用いた線形2次レギュレータの制約付き出力フィードバック制御
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉山友浩, 佐藤一宏
2. 発表標題 有向グラフのクロン縮約と有効抵抗
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤一宏
2. 発表標題 大規模システムにおける可制御性スコア
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本大樹, 佐藤一宏
2. 発表標題 ランダム射影による大規模な線形安定システムの低次元化
3. 学会等名 日本応用数理学会2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本大樹, 佐藤一宏
2. 発表標題 ガウス埋め込みに基づく確率集中不等式の絶対定数の推定
3. 学会等名 日本応用数学会第19回研究部会連合発表会
4. 発表年 2023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