

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13773

研究課題名（和文）リーマン多様体上の最適化手法を用いた大規模電力ネットワークシステムの同定法の開発

研究課題名（英文）Development of identification method of large-scale power networked system using Riemannian optimization method

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） 2,600,000 円

研究成果の概要（和文）：同期現象はグラフラプラシアンと呼ばれる行列によって特徴付けられることに着目し、与えられた行列データからグラフラプラシアンを高速に構築する方法を提案した。また、グラフラプラシアンに関係した正定値対称行列を正確に同定するために同定問題をリーマン多様体上の最適化問題として定式化した。さらに、電力ネットワークシステムのような大規模なシステムを制御するためにリーマン多様体上の最適化手法を用いてH2ノルムの意味で最適となるモデル低次元化法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意味や社会的意義は以下の2点である。

- (1)太陽光などの再生可能エネルギーが電力ネットワーク上に多数普及した場合には、気象の影響で電力ネットワークシステムは時々刻々と変化すると考えられる。本研究で提案するモデルは入出力データを用いたモデルなので、その変化を検出し、リアルタイムでモデルを更新することが可能である。
- (2)リーマン多様体上の最適化手法を積極的に応用しているシステム制御工学の研究者は世界的にも非常に少ない状況であるが、本研究の成果によってリーマン多様体上の最適化手法に興味を持つシステム制御工学の研究者が増えることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Because a synchronization is characterized by a matrix called the graph Laplacian, we proposed an efficient construction method of the graph Laplacian using a given matrix data. Moreover, we formulated a Riemannian optimization problem for identifying a symmetric positive definite matrix related to the graph Laplacian. Furthermore, to control a large-scale system such as a power networked system, we proposed an H2 optimal model reduction method using a Riemannian optimization method.

研究分野：システム制御工学

キーワード：システム同定 モデル低次元化 最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電力を安定的に供給するためには、電力ネットワーク内のそれぞれの発電機は発電する際に一定の周波数を持つ交流電力を同期させる必要がある。しかし、太陽光などの再生可能エネルギーが大量に導入された将来の大規模電力ネットワークでは、気象の影響を受けやすくなり、ネットワーク内の同期の安定性を定量的に評価することが難しくなる。したがって、大規模化された電力ネットワークシステムに対しても適用可能な同期安定性解析法の研究は重要であり、様々な研究が成されてきた。特に、電力ネットワークシステムの中でも発電所と変電所の電圧の位相のダイナミクスに着目し、そのダイナミクスを力学系理論でよく研究されている蔵本モデルに似た形の動揺方程式として数理モデル化することが多い。動揺方程式はエネルギー保存則に基づくモデルであり、その中には様々なパラメータが含まれる。このような数理モデルを用いて同期安定性を解析している研究では、モデルに含まれる様々なパラメータを同じ値として仮定する。このように単純化することで数理的に深く解析を行えるようになるが、このアプローチには以下の問題点がある。

- (1) 「パラメータはすべて同じ値である」という仮定は実際のところ現実的ではない。
- (2) 気象によって出力が影響される太陽光などの再生可能エネルギーが大量に導入された場合には、そもそも蔵本モデルに類似したモデルを採用することが妥当なのかも定かではない。
- (3) リアルタイムで数理モデルを更新できない。太陽光などの再生可能エネルギーが電力ネットワーク上に多数普及した場合には、電力ネットワークシステムのモデルは時々刻々と変化すると考えられるが、この時間的な変化を考慮できない。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では同期している大規模電力ネットワークシステムを入出力データから同定する方法を開発し、その同定法が同期安定性解析に応用できることを示すことを目的とした。この目的が達成された際には次の二つの意義があると考えている。

- (1) 太陽光などの再生可能エネルギーが電力ネットワーク上に多数普及した場合には、気象の影響で電力ネットワークシステムは時々刻々と変化すると考えられる。本研究で提案するモデルは入出力データを用いたモデルなので、その変化を検出し、リアルタイムでモデルを更新することが可能である。
- (2) リーマン多様体上の最適化手法を積極的に応用しているシステム制御工学の研究者は世界的にも非常に少ない状況であるが、本研究の成果によってリーマン多様体上の最適化手法に興味を持つシステム制御工学の研究者が増えることが期待される。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、同期現象はグラフラプラシアンと呼ばれる行列によって特徴付けられることに着目した。しかし、既存のシステム同定法は同定すべきパラメータ（行列変数）をベクトル変数として扱うため同期している大規模電力ネットワークシステムの同定を行うことが難しい。なぜなら、同期している大規模電力ネットワークシステムをモデル化する際に現れるグラフラプラシアンに関係した行列変数をベクトル化すると、グラフラプラシアンが持っていた同期現象を表す性質が失われてしまうからである。しかし、裏を返せば、グラフラプラシアンに関係した行列変数をベクトル化せずに行列パラメータのまま扱うことで、同期している大規模電力ネットワークシステムの同定を行うことが可能であると考えた。

本研究では、まず行列データからグラフラプラシアンを構築する効率的な方法を考案した。次に、グラフラプラシアンに関係した正定値対称行列を正確に同定するために同定問題をリーマン多様体上の最適化問題として定式化した。この最適化問題の解は行列の形で得られ、さらに、その行列には同期現象を特徴付ける性質がある。このことが既存のシステム同定法と本研究で提案するシステム同定法の最も大きな違いである。

4. 研究成果

(1) 「グラフラプラシアン及び非負行列の構築法の開発」

雑誌論文[3]では与えられた行列データから L_1 ノルムの意味で最も近いグラフラプラシアンを高速に構築する方法を提案した。これはグラフラプラシアンの性質を有するはずの行列を同定した際に、雑音などの影響で、グラフラプラシアンの性質を持っていない場合に適用できる方法である。本研究の目的であった同期している大規模電力ネットワークシステムのダイナミクスはグラフラプラシアンで特徴付けられるため、[3]で提案した方法を応用することが可能である。また、提案法はネットワークのノード数を n としたときに $O(n^2)$ の計算量であるが、大規模な凸最適化問題を解く際によく利用される交互方向乗数法 (ADMM) は $O(n^3)$ となることも示した。さらに、数値実験によって理論をサポートする結果が得られたことを[3]では報告している。

また、雑誌論文[2]では与えられた行列データからグラフラプラシアンと密接に関係している非負行列の構築法を近接交互線形最小化法 (PALM) を用いて提案している。PALM は最適化分野において比較的最近になって提案された手法であり、システム制御の問題への応用はこれが最初である。

このテーマに関しては学会発表[1]で口頭発表もした。

(2) 「正定値対称行列を備えたダイナミクスの同定法の開発」

同期している電力ネットワークシステムは連続時間グラフラプラシアンダイナミクスで記述されると仮定した際に、ネットワーク構造が無向だとすると、対応する離散時間ダイナミクスの中に正定値対称行列が自然に現れる。雑誌論文[1]では、その正定値対称行列をリーマン多様体上の最適化法を用いて同定する方法を提案した。その際に、ダイナミクスを表現する行列の3つ組が属す積多様体に対して直交群の作用を定義し、そこから定義される商多様体の幾何学を詳しく解析した。また、数値実験によって提案法の有効性も確認している。

また、学会発表[2]の論文では、データが逐次的に得られる場合に正定値対称行列をリアルタイムに同定する方法を提案した。

このテーマに関しては学会発表[5]、[6]で口頭発表もした。

(3) 「大規模システムのモデル低次元化法の開発」

電力ネットワークシステムのような大規模なシステムを大規模なまま制御することは難しいため適当に低次元化する必要がある。雑誌論文[4]ではリーマン多様体上の最適化法を用いて H^2 ノルムの意味で最適となるモデル低次元化法を提案した。その際に、安定行列が2つの正定値対称行列全体の集合と1つの反対称行列全体の集合との直積の要素から構成される行列で表現できることを証明した。このことから最適化すべき変数はリーマン多様体に含まれるとみなすことができるようになり、リーマン計量を導入し、リーマン多様体上の最適化法を利用することが可能になった。数値実験では、システム制御の分野で最も有名な平衡実現打ち切り法と比較し、提案法の有効性を示した。

このテーマに関しては学会発表[3]、[4]で口頭発表もした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sato Kazuhiro	4. 巻 103
2. 論文標題 Optimal graph Laplacian	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 374 ~ 378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2019.02.005	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	4. 巻 7
2. 論文標題 Riemannian Optimal Model Reduction of Stable Linear Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 14689 ~ 14698
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2019.2892071	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, Takeda Akiko	4. 巻 4
2. 論文標題 Construction Methods of the Nearest Positive System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 97 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2019.2921838	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, Sato Hiroyuki, Damm Tobias	4. 巻 未定
2. 論文標題 Riemannian optimal identification method for linear systems with symmetric positive-definite matrix	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2019.2957350	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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 佐藤一宏
2. 発表標題 リーマン多様体上の最適化によるモデル低次元化法
3. 学会等名 第6回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤寛之、佐藤一宏、Tobias Damm
2. 発表標題 対称性を備えた連続時間線形システム同定に対するリーマン多様体上の最適化によるアプローチ
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤寛之、佐藤一宏、Tobias Damm
2. 発表標題 幾何学的最適化に基づく対称性をもつ連続時間線形システムの新しい同定法
3. 学会等名 日本応用数理学会2018年度年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤一宏
2. 発表標題 リーマン多様体上の最適化によるモデル低次元化法
3. 学会等名 第6回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤一宏
2. 発表標題 リーマン多様体上の最適化法を用いたシステム制御のための構造保存モデル低次元化
3. 学会等名 京都大学数理解析研究所研究集会「諸科学分野を結ぶ基礎学問としての数値解析学」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sato, K. Sato
2. 発表標題 Riemannian gradient online identification method for linear symmetric continuous-time systems
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 K. Sato, A. Takeda
2. 発表標題 Construction methods of the nearest positive system
3. 学会等名 58th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究協力者	佐藤 寛之 (Sato Hiroyuki)		