

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23517

研究課題名（和文）データを活用した非線形複雑制御モデルの低次元化

研究課題名（英文）Data-driven model reduction of nonlinear complex systems

研究代表者

河野 佑（Kawano, Yu）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・准教授

研究者番号：40743034

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：非線形大規模システムを対象とし、解析・制御に重要な要素を抽出する「モデル低次元化」に関する研究をシステムモデルと実験データを融合するデータ同化の観点から実施した。研究の主眼を1. ネットワーク系の多くが有する単調性の利活用, 2. モデル予測制御の計算量削減の2つに置き、それぞれに関する理論を構築した。また、遺伝子発現ネットワークやリミットサイクルへと提案法を応用し、その有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

IoT技術の躍進によるシステムの大規模ネットワーク化、要素技術の発展によるシステムモデルの精密化（非線形化）により、大規模非線形ネットワークとして幅広いシステムがモデル化される。記述能力が高いモデルであるものの、その複雑さから解析・制御系設計が難しいことが多い。本研究の成果は、このような問題を解決するための手助けになることが期待される。

研究成果の概要（英文）：To extract essential components for analysis or control design from nonlinear large-scale systems, we have developed model reduction methods by data assimilation approaches, where data assimilation is a methodology for improving accuracy of estimating system behavior by integrating a system model and its historical data. In particular, we have constructed two model reduction method; one is for monotone network systems, and the other is to reduce computational complexity of model predictive control. The proposed methods are illustrated by gene regulatory networks and limit cycles.

研究分野：制御工学

キーワード：モデル低次元化 非線形システム 大規模システム 単調システム DCゲイン グラミアン

1. 研究開始当初の背景

IoTに代表されるような科学技術の発展に伴い、近年、システムの大規模化やネットワーク化が急速に進んでいる。技術の発展はモデルの精密化をも促し、例えばシステムバイオロジー分野においては、遺伝子発現ネットワークモデルを含め、生体内の機能を表現する精密な非線形モデルが構築されつつある。今後は、システムの挙動をより包括的かつ詳細に記述するために、モデルの非線形化(精密化)、大規模化、ネットワーク化に拍車がかかると予想される。しかしながら、詳細なモデルはより複雑であり、必ずしも解析や設計の見通しを良くするわけではない。

システム制御工学においては、大規模なシステムモデルから解析や設計に重要な要素を抽出する手法である「モデル低次元化」が、80年代に線形システムに対して提案され、90年代に非線形システムに対して拡張された。後者は、理論的側面が強く、適用には非線形偏微分方程式を解くことが要求されている。この要求は現在でも緩和することが難しく、実用面において課題が残る。事実、適用対象が中小規模かつ安定なシステムへと留まることが多い。

2. 研究の目的

本研究の目的は、システムモデルとその入出力データを利活用するデータ同化的アプローチにより、非線形偏微分方程式を解くことを必要としない非線形モデル低次元化手法を構築することである。

具体的には、つぎの二つの問題へと取り組む。

- 1) 様々なシステムが数多くのサブモジュールからなるネットワークシステムとして構築されている。これに伴いネットワーク構造を活かした解析手法や制御系設計手法が提案されている。その一方で、従来のモデル低次元化手法がネットワーク構造を保存しないことが指摘されている。したがって、本来ネットワーク制御システムであるにも関わらず、それらに特化した手法を低次元モデルには適用できないという不都合が生じる。そこで、本研究では、非線形ネットワーク制御システムに対して、ネットワーク構造を保存する低次元化手法の提案を図る。
- 2) モデル予測制御則では、システムモデルと制御目標に基づいて、各時刻で制御入力を数値計算で求める。その数値計算速度は、計算機の発達に伴い上昇しているものの、さらなる改善が必要である。そこで、各時刻の計算量削減を図るために、制御入力の計算に用いるシステムモデルを逐次簡略化することを考える。より具体的には、(1)得られた制御入力に対して、元のシステムと振舞いの近い低次元モデルを計算し、(2)その低次元モデルをつぎの時刻における制御入力の計算に用いる、という(1)と(2)を繰り返す。したがって、低次元モデルは時々刻々と変化する。このような状況に特化した、低次元モデルの効率的な構築法を明らかにする。

さらに、提案手法を遺伝子発現ネットワークのように大規模なシステムやリミットサイクルのように非線形システム特有の挙動を有するシステムへと適用することで、その有効性を検証する。

3. 研究の方法

2で述べたそれぞれの目的に対して以下の方法で研究を実施する。

- 1) 生化学反応ネットワーク、交通ネットワーク、社会システムネットワークの多くは、単調性と呼ばれる特殊な構造を持つ。単調な線形システムに対しては、「DCゲイン」が入出力特性の把握に役立ち、また簡単なシミュレーションで計算できる。そこで、単調性とDCゲインに着目したモデル低次元化理論を構築する。
- 2) モデル予測制御では、現在の軌道と制御目標に基づいて制御入力が逐次設計される。制御系設計には軌道周りで近似精度の高いモデルがあれば良い。線形システムに対する実験的グラミアンのアイデアを活用することで、一つの軌道周りで低次元モデルの構築方法を明らかにする。

4. 研究成果

- 1) 単調性に着目したネットワーク構造を保存するモデル低次元化
単調(モノトーン)動的ネットワークに対して、データを駆使したネットワーク構造の

簡略化法（モデル低次元化手法）を構築した．単調性を活用する事で，ネットワークが非線形性を有していたとしても，ネットワーク内の各ノード（状態量）の重要度が DC ゲインを用いて評価できることを明らかにした．具体的には，単調動的ネットワークの DC ゲインはその誘導無限大ノルムと等しいことと，DC ゲインが可制御性の尺度として用いられることを明らかにした．ネットワーク構造の簡略化は，重要でないノードを打ち切る，もしくは重要度が近いノードをクラスタリングする事で達成できる．理論結果として，双方の簡略化手法が，ネットワーク構造，単調性と安定性を保存することを明らかにした．実用面として，DC ゲインは定数入力を印加するだけで求まるため，ネットワークの次数が高くとも，提案法は数値的/実験的に容易に実装できる．したがって，動的ネットワークのクラスを単調なものに限定しながらも，性能保証と実用性の双方を両立する非線形モデル低次元化手法を構築できた．提案法の有効性を遺伝子発現ネットワークに対して検証した．まず，図 1 左の 50 次元の遺伝子発現ネットワークから図 1 右の 14 次元の低次元ネットワークをクラスタリングによって構築し，つぎに図 2 のように低次元ネットワークから元の遺伝子発現ネットワークの DC ゲイン特性が復元できることを確認した．

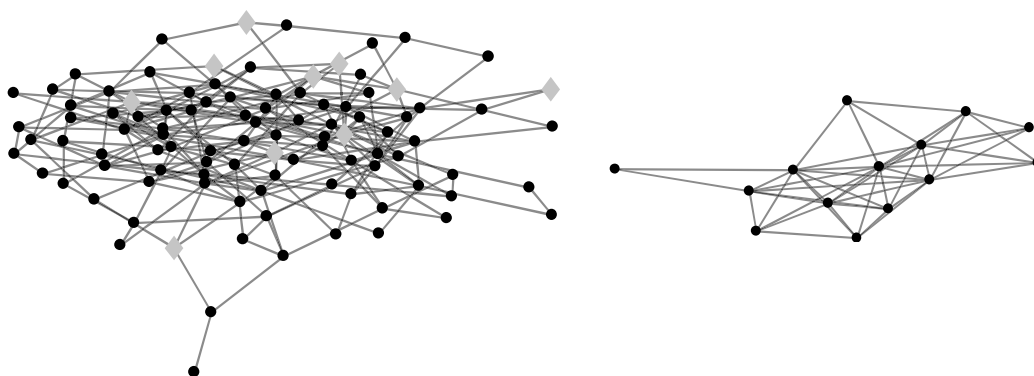


図 1 50 次元の遺伝子発現ネットワーク(左)とその 14 次元の低次元化ネットワーク(右)

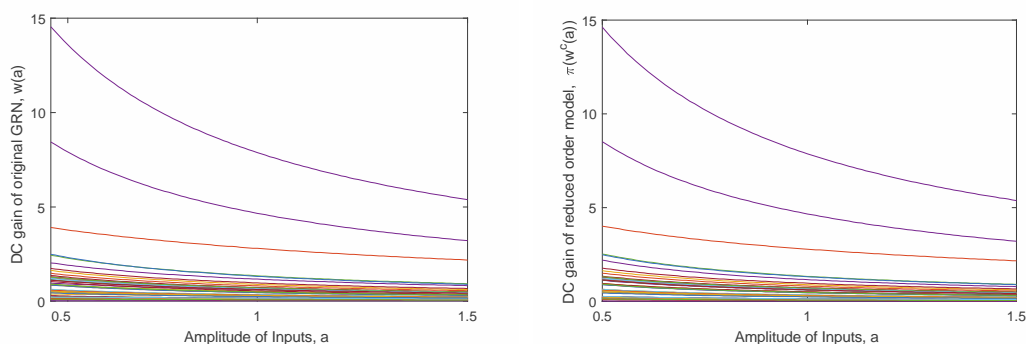


図 2 50 次元の遺伝子発現ネットワークの DC ゲイン (左) と 14 次元の低次元化ネットワークから復元した DC ゲイン (右)

2) モデル予測制御の計算量低減に向けたモデル低次元化

非線形モデル予測制御の計算量低減を目指して，制御系設計に使用される軌道周りでのモデル低次元化手法を構築した．ある一つの軌道に焦点を置けば，全状態空間での高い近似精度を目指す場合とは異なり，非線形偏微分方程式を解くことなく，モデル低次元化が達成できることを明らかにした．必要な計算は，シミュレーションに基づく軌道周りでの感度解析と行列の特異値計算であり，非線形システムに対しても提案手法は比較的容易に実装可能である．さらに，クロスグラミアンに着想を得て，対称なシステムに対しては計算量が削減できることを明らかにした．カーネル法を駆使することで，計算量のさらなる低減も可能である．数値例を通して，平衡点での線形近似モデルを用いた低次元化手法と比較した提案法の優位性検証や，構築した低次元モデルが非線形システム特有の現象であるリミットサイクルを保存することの確認を行なった．さらに，近似精度を高めたい軌道が複数ある場合に対して，提案手法の拡張を試みた．研究を進めていく上で，大規模ネットワーク系に対して，ネットワーク構造を保存する低次元化の実現可能性も見出した．モデル低次元化手法単体の構築には成功したものの，提案手法とモデル予測制御の融合についてはさらなる検証が必要である．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yu Kawano, Jacquelin M.A.Scherpen	4. 巻 127
2. 論文標題 Empirical differential Gramians for nonlinear model reduction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 109534
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.automatica.2021.109534	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 該当する
1. 著者名 Yu Kawano	4. 巻 122
2. 論文標題 Converse stability theorems for positive linear time-varying systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 109193
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.automatica.2020.109193	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 Arvo Kaldmae, Yu Kawano, Uille Kotta	4. 巻 30
2. 論文標題 Realizations in feedforward forms of nonlinear input-output equations with time-delays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Robust and Nonlinear Control	6. 最初と最後の頁 7560/7573
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/rnc.5194	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 該当する
1. 著者名 Yu Kawano, Krishna Chaitanya Kosaraju, Jacquelin M.A. Scherpen	4. 巻 66
2. 論文標題 Krasovskii and shifted passivity based control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAC.2020.3040252	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 該当する

1. 著者名 Yu Kawano, Bart Besselink, Jacquélien M.A. Scherpen, Ming Cao	4. 巻 65
2. 論文標題 Data-driven model reduction of monotone systems by nonlinear DC gains	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 2094/2106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2019.2939191	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 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 横川 佳祐, 河野 佑
2. 発表標題 一般化微分平衡実現に基づく非線形システムのモデル低次元化
3. 学会等名 第29回計測自動制御学会中国支部 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 広野 浩平, 河野 佑
2. 発表標題 脳の大規模ネットワークに対する平均可制御性解析
3. 学会等名 第29回計測自動制御学会中国支部 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Kawano, Fulvio Forni
2. 発表標題 Scalable control design for K-positive linear systems
3. 学会等名 24th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

第29回計測自動制御学会中国支部 学術講演会 優秀賞受賞
第29回計測自動制御学会中国支部 学術講演会 奨励賞受賞

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

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			
米国	University of Notre Dame			
オランダ	University of Groningen			
エストニア	Tallinn University of Technology			
英国	University of Cambridge			