

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04538

研究課題名（和文）時変ネットワークを含むサンプル値結合非線形システムの同期制御

研究課題名（英文）Synchronization Control of sampled-data coupled nonlinear systems including time-varying networks

研究代表者

小口 俊樹 (Oguchi, Toshiki)

東京都立大学・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：50295474

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ほぼ同一ダイナミクスを持つ複数のシステムがネットワークで結合されることにより同期やパターン形成といった現象が生じる。そのようなネットワークシステムで生じる現象は広く学際分野で研究されている。ネットワークシステムの同期を制御問題に応用する際、システム間の結合はサンプル値データで構成され、さらにネットワーク構造は通信コストや入力コストの観点から時変となりうる。本研究では、時変ネットワークを含むサンプル値結合非線形システムの同期問題を扱い、サンプル値非線形システムの時変ネットワークにおける同期に関する理論的枠組みを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ほぼ同一なダイナミクスを持つシステムが結合して構成されるネットワークシステムにおいて生じる同期現象は、様々な分野で研究がなされている学際的研究課題である。そのようなネットワーク同期は、工学分野においては、スマートグリッドやマルチエージェントの協調制御における合意問題や群制御問題と直接的に関係している。そのような人工物を考えたとき、システム間の結合はサンプル値データを用いた結合となること、また常に一定のネットワークを維持するには、通信コストや入力コストがかかることから、ネットワーク構造は時変となりうる。そこで、本研究ではサンプル値非線形システムの時変ネットワーク下での同期条件を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Synchronization or pattern formation may occur when multiple systems with nearly identical dynamics are coupled in networks, and the phenomena caused in network systems have been widely studied in interdisciplinary fields. To apply the synchronization of network systems to control problems, the couplings between systems consist of sampled data, and the network structure may be time-varying due to the viewpoint of communication and input costs. This project dealt with the synchronization problem of sample-coupled nonlinear systems including time-varying networks, and we developed some theoretical frameworks for synchronization in time-varying networks of sampled-data nonlinear systems.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 複雑系 同期 非線形系 サンプル値系 ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

IoT (Internet of Things)に象徴されるように、従来は単体で扱われていた個々のシステムが情報ネットワークを介して相互に結合され、巨大なネットワークシステムを構築する流れが加速している。そのような大規模ネットワークにおける全体の振る舞いや特徴を明らかにすることは、システム全体の効率化や高性能化のために重要である。ほぼ同一のダイナミクスを有する複数のシステムが結合し、ネットワークを構成することにより生じる全体の振る舞いには、同期現象やパターン形成があり、広く学際的に研究が進められていた。工学分野においては、これらはスマートグリッドやマルチエージェントの協調制御における合意問題や群制御問題と直接的に関係している。しかしながら、ネットワークシステムの同期を人工物の制御問題に応用する場合、結合のサンプル値化は避けられず、また一定のネットワーク構造を維持するには通信コストや入力コストの増大の懸念があるが、そのようなネットワークシステムの同期問題を扱うための理論的枠組みは構築されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、上述の背景をもとに、時変ネットワークを含むサンプル値結合非線形システムの同期問題を扱い、ネットワーク同期とシステムパラメータ、サンプリングタイム、結合共同、時変ネットワーク構造と各ネットワーク構造ごとの滞留時間などのパラメータとの関係を明らかにすると共に、時変ネットワーク構造の設計を含むネットワーク同期制御のための理論的枠組みを構築することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、上述のように時変ネットワークを含むサンプル値結合(図1)で相互に結合された非線形システムの同期問題に対する理論的枠組みの構築を目的に、本研究課題を次の3つのフェーズに分割し、研究を遂行した。

- (I) サンプル値矩形パルス結合による2方向結合非線形システムの同期問題
- (II) サンプル点間不変ネットワークにおける非周期サンプル値結合ネットワークシステムの同期問題
- (III) 時変ネットワークにおけるサンプル値結合ネットワークシステムの同期制御問題

これらの結果を段階的に結びつけることで、本研究課題に対する結果を得ることを目指した。また、得られた同期条件の妥当性については、数値シミュレーションによる検証を行った。

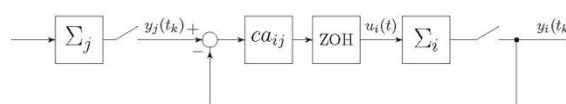


図1 サンプル値結合

4. 研究成果

本研究では、あらかじめ定めた3つのフェーズに基づき、時変ネットワークを含むサンプル値結合非線形システムの同期問題に対する理論的枠組みの構築について3年間の研究を実施した。本研究を通じて得られた成果について、その概要をまとめる。

本研究では、時変ネットワークシステムの同期問題を考える上で、まず2つの双方向結合システムの同期問題を考え、特に、サンプル値矩形パルス結合による双方向結合非線形システムの同期条件を検討した。ここでは、まず2つのシステムがサンプル値データを用いた双方向結合において結合されているシステムについて、入力を矩形パルス波とした結合非線形システムの同期問題を考え、矩形パルス波のパルス幅と結合強度、サンプリング間隔が同期に与える影響を検討し、それらの関係を同期条件として導出した。この結合は、ゼロ次ホールド入力をサンプル点間において0入力に切り替えることに相当し、その双方向結合による同期問題は、システム間の結合の有無に対応する。そのため、2つのシステムの完全グラフネットワークと完全非連結グラフネットワークが切り替わる時変ネットワークとしてみなすことができる。そこで、切り替え頻度及び平均零入力時間の概念を導入し、この場合の同期条件を導出した。その上で、結合システム数を一般化し、N個の結合システムに対して、全ての結合の有無の2つのネットワークの切り替え問題(図2)に帰着させること

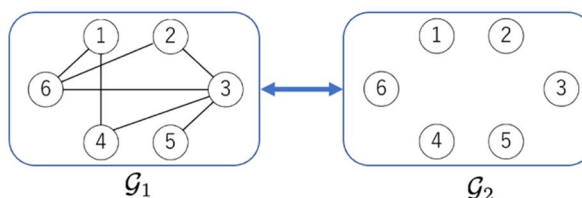


図2. 連結グラフと完全非連結グラフの切替

してみなすことができる。そこで、切り替え頻度及び平均零入力時間の概念を導入し、この場合の同期条件を導出した。その上で、結合システム数を一般化し、N個の結合システムに対して、全ての結合の有無の2つのネットワークの切り替え問題(図2)に帰着させること

で、サンプル値矩形パルス結合による同期条件を導出した。この結果は、連結グラフと完全非連結グラフが切り替わる時変ネットワークシステムの同期問題への同期条件となっている。

そこで、この方向での検討をさらに進めることで、時変ネットワークにおけるサンプル値結合ネットワークシステムの同期問題を検討した。ここでは、平均滞留時間の概念を導入し、平均滞留時間に基づく時変ネットワークにおけるサンプル値結合ネットワークシステムの同期条件を導出した。フェーズ1の結果は、二つのモードを交互に切り替える場合に相当し、これを一般化し、3つ以上のモードをランダムに切り替える場合(図3)についても適用可能な同期条件を導出することができた。

さらに、本研究では、ハイブリッドシステムにおける安定論の考えを組み込むことで、非連結グラフを含めた時変ネットワークシステムにおける同期条件の導出を行った。さらに、システムのサンプリングの非同期性に着目し、非同期サンプリング結合システムの同期問題を扱い、非同期サンプリングと伝送遅延を含めたネットワークシステムの同期条件の導出を行った。

また、切り替えにより取りうるネットワーク構造をあらかじめ定めることなく、ある特定のノードシステムと他のノードシステムとの結合の有無に着目した同期条件の導出も行い、保守的ではあるものの、時変ネットワークに関する事前情報を狭めた条件下での同期条件が導出できた。これら一連の研究成果は、主に Hindmarsh-Rose ニューロンモデルを結合して構成されるネットワークシステムを対象として、数値シミュレーションによる妥当性の検証を行っている。

なお、本研究を通じて、当初予定していた以外にいくつかの新たな関連する研究成果を得ることができた。サンプル値結合の下での先行同期の検討や、その制御系設計への応用や、非同期サンプリング下でのシステム間の同期条件の導出における考え方を応用して、非同期・非周期サンプリングデータを用いた分散オブザーバの設計問題を扱い、非同期かつ非周期サンプル値データに基づく分散オブザーバの設計条件を導出した。この結果は、研究代表者らが開発した先行同期に基づく非線形システムの状態予測器を拡張した分散予測器の研究への動機づけを与えた。また、時変のネットワーク構造を検知する方法として Koopman 作用素を用いたネットワーク構造の逐次同定手法を開発した。

以上のように、3つのフェーズを通して得られた時変ネットワークを含むサンプル値結合非線形システムの同期制御及び関連研究について、8件の雑誌論文及び国際会議論文として発表したほか、13件の学会発表を行なっている。また、一部は国際会議(IFACなど)に投稿し、採択が決定している。

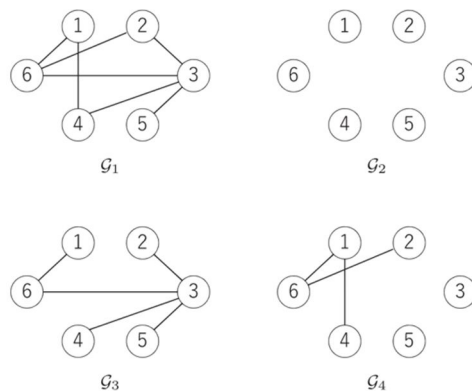


図3 モード切替に対応する時変ネットワーク

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 吉田伊織, 小口俊樹 | 4. 巻 58 |
| 2. 論文標題 時変ネットワークにおけるサンプル値結合非線形システムの同期 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集 | 6. 最初と最後の頁 568-574 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.58.568 | 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 Zhuanglin Mei, Toshiki Oguchi | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Network Structure Identification Based on Measured Output Data Using Koopman Operators | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Mathematics | 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) 10.3390/math11010089 | 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 Mei Zhuanglin, Oguchi Toshiki | 4. 巻 54 |
| 2. 論文標題 A real-time identification method of network structure in complex network systems | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Systems Science | 6. 最初と最後の頁 549 ~ 564 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00207721.2022.2135416 | 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 Zhuanglin Mei, Toshiki Oguchi | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Network structure identification via Koopman analysis and sparse identification | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE | 6. 最初と最後の頁 477-492 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.13.477 | 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 望月 絢斗、小口 俊樹 | 4. 巻 J105-A |
| 2. 論文標題 サンプル値結合によるルーリエ系の先行同期 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 電子電子情報通信学会論文誌A 基礎・境界 | 6. 最初と最後の頁 18~25 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transfunj.2021JAP1011 | 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 Bingyi Liu and Toshiki OGUCHI | 4. 巻 54-17 |
| 2. 論文標題 Synchronization of Coupled Nonlinear Systems via Bidirectional Sampled-data Couplings with Delay | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine | 6. 最初と最後の頁 87-92 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2021.11.030 | 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 Ryuta Machida and Toshiki OGUCHI | 4. 巻 54-18 |
| 2. 論文標題 Synchronization-Based Prediction Control for Nonlinear Systems with Parameter Uncertainties and Input Time-Delay | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine | 6. 最初と最後の頁 157-162 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2021.11.132 | 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 Sakai Kanako, Yoshida Iori, Oguchi Toshiki | 4. 巻 53 |
| 2. 論文標題 Synchronization in networks of systems with synchronous/asynchronous sampled-data couplings | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine | 6. 最初と最後の頁 2891~2896 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2020.12.961 | 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 - |

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 小口俊樹 |
| 2. 発表標題 同期に基づく非線形システムの分散状態予測器 |
| 3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 三沢拓也, 小口俊樹 |
| 2. 発表標題 伝送遅延を含んだ非線形サンプル値結合システムの同期 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 三沢拓也, 小口俊樹, 漁野康紀 |
| 2. 発表標題 伝送遅延を持つ非線形サンプル値ネットワークシステムの同期 |
| 3. 学会等名 計測自動制御学会第10回制御部門マルチシンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小太刀竜也, 小口俊樹 |
| 2. 発表標題 先行同期に基づくサンプル値ルーリエシステムの分散予測器 |
| 3. 学会等名 計測自動制御学会第10回制御部門マルチシンポジウム |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Toshiki Oguchi, Zafer Yazici, Erik Steur |
| 2. 発表標題 A Distributed Synchronisation-based Predictor for Lur'e-type Nonlinear Systems |
| 3. 学会等名 IFAC World Congress 2023 (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Zhuanglin Mei and Toshiki Oguchi |
| 2. 発表標題 Data-Driven Network Structure Identification Via Koopman Analysis and Sparse Identification |
| 3. 学会等名 2021 European Control Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Zhuanglin Mei and Toshiki Oguchi |
| 2. 発表標題 Real-Time Network Structure Identification Using the Koopman Operator |
| 3. 学会等名 SICE Annual Conference 2001 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 林田泰隆, 小口俊樹 |
| 2. 発表標題 非同期サンプリング分散オブザーバの設計 |
| 3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小太刀竜也, 小口俊樹 |
| 2. 発表標題 先行同期を用いた二輪車両口ボットのマルチレートサンプリング制御 |
| 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 Haoon Fan, Rifat Sipahi, Toshiki Oguchi |
| 2. 発表標題 Predictor-Based Stabilization of Multiple Differential-wheeled Robots under Measurement Delays: Controller Gain Design for Fast Consensus |
| 3. 学会等名 2020 American Control Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 望月絢斗, 小口俊樹 |
| 2. 発表標題 サンプル値結合を用いたルーリエ系の先行同期 |
| 3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 町田隆太, 小口俊樹 |
| 2. 発表標題 入力遅延とパラメータ不確かさを持つ非線形システムの先行同期に基づく制御 |
| 3. 学会等名 第8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 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 劉柄邑, 小口俊樹 |
| 2. 発表標題 むだ時間を有する双方向サンプル値結合による結合非線形システムの同期 |
| 3. 学会等名 第8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 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| 東京都立大学制御工学研究室 http://ctrl.mech.se.tmu.ac.jp |
|--|

| 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 | | |
|---------|------------------------------------|--|--|
| オランダ | Eindhoven University of Technology | | |
| 米国 | Northeastern University | | |