

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06503

研究課題名(和文) 不確かな伝送遅延時間を持つサンプル値結合非線形システムの同期パターン制御

研究課題名(英文) Synchronization pattern control of sampled-data coupled nonlinear systems with uncertain transmission delays

研究代表者

小口 俊樹 (Oguchi, Toshiki)

首都大学東京・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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究を通じて、サンプル値結合非線形ネットワークにおける同期に対する理論的枠組みを開発することを試み、1) サンプル値結合非線形システムの同期のための必要条件を導出した。2) サンプル値結合システムの無向グラフネットワークの同期条件の推定法を提案した。3) 不確かな時変むだ時間非線形システムに対する安定判別法とそのようなシステムに対する安定化設計法を開発した。4) ネットワークに非同期サンプリングを用いた場合の同期への影響について検討した。5) 結合強度、サンプリングタイム、むだ時間と同期の関係性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、複数のシステムがネットワークを介して接続され、大規模ネットワークシステムを構成するようになってきている。複数の同一システムが情報ネットワークを介して接続されるとき、ネットワーク全体の振舞いを検討することは重要となる。本研究では、そのように情報ネットワークを使用した人工物のネットワークシステムを構成することで生じるサンプル値結合ネットワーク全体が生じる挙動を解析する手法を明らかにしている。

研究成果の概要(英文)：Throughout this project, we have attempted to develop a theoretical framework for synchronization in networks of nonlinear systems with sampled-data couplings. In particular, we obtained the following results: 1) We derived a sufficient condition for synchronization of nonlinear systems with mutual sampled-data couplings. 2) We proposed an estimation method of synchronization condition for undirected networks of sampled-data coupled systems. 3) We developed a stability criterion for nonlinear systems with uncertain time-varying delays, and we proposed a stabilization design method for such systems. 4) We also investigated the effect of the use of asynchronous sampled-data in networks on synchronization. 5) We clarified the relationship among the couplings strength, sampling interval, time-delay, and synchronization.

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

1. 研究開始当初の背景

近年, IoT(Internet of Things)に代表されるように, 従来は単体として扱われてきた個々のシステムが, 相互に結合され, さらにサービスなどのソフトウェアをも包含した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. 大規模ネットワークを構成することにより生じるネットワーク全体の振舞いやその特徴を明らかにすることは, システム全体の通信効率や性能を高めたネットワークシステムの構築のためには重要である.

個々がほぼ同一のダイナミクスを持つシステムが相互結合し, ネットワークを構成することで生じる結合システム全体の振舞いには, 同期現象やパターン形成がある. 研究代表者らは, これまでに同一システムの結合に伝送遅延時間が存在する遅延結合ネットワークにおける同期問題を中心に, そのネットワーク上のシステムの同期パターンやその発生条件とネットワーク構造の関係について明らかにしてきた. しかしながら, このようなネットワークシステムを人工物で実現する場合, システム間の通信データはサンプル値となり, さらに伝送遅延も不確かさや時変性を持つため, より現実的な問題設定の下でこれらの同期問題を扱う必要があるが, そのような環境が結合システムの動的挙動に与える影響を体系的に論じた研究はほとんど見当たらなかった.

2. 研究の目的

本研究では, 上述の背景をもとに, これまでの遅延結合ネットワークに対する同期条件や同期パターンの推定法などを, サンプル値ネットワークシステムに対して再構築することを目的としている. 各システムのサンプル出力を拡散結合に用いた結合系の同期及び同期制御について, より実環境に即した問題設定の下で再検討することにより, サンプリング間隔と同期条件との関係や, サンプリング間隔やネットワーク構造等の同期との関係を明らかにするとともに, 同期パターン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, 不確かな伝送遅延時間を持つサンプル値結合非線形システムの同期パターン制御のための理論構築を目的に, 次の3つのサブテーマに分割をする.

- サンプル値遅延結合ネットワークシステムの同期問題
 - 不確かな時変むだ時間サンプル値非線形システムの安定解析法
 - 不確かな時変伝送遅延時間を持つサンプル値結合非線形システムの同期パターン制御
- まず, サブテーマ a), b) を実施し, これらの結果を融合し, 最終テーマ c) に帰結させる.

4. 研究成果

本研究の遂行にあたり定めた3つのサブテーマに基づき, 3年間で得られた成果についてその概要を以下にまとめる.

a) サンプル値遅延結合ネットワークシステムの同期問題

ここでは, まず2つの同一のダイナミクスを持つカオス系の出力を同時サンプリングで観測した値を双方向結合し, ゼロ次ホルダーを介して入力された場合の同期問題を検討した(図1). サンプル値結合システムの同期誤差方程式の原点の安定性を Krasovskii アプローチによる安定判別法と比較的理を用いることで, その十分条件を

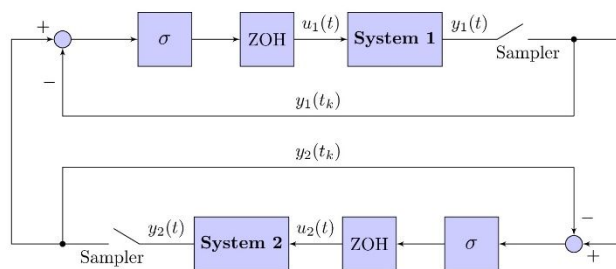


図1. 双方向サンプル値結合

導出した. ここで得られた結果は, 同期をなす結合強度とサンプリングタイム h との関係を示している(図2). また, 数値シミュレーションから得た結合強度とサンプリングタイムと同期誤差との関係とほぼ同じ形状の同期領域が生じることから, 導出した同期条件は保守的な結果ではあるが, 結合強度とサンプリングタイムが同期に与える影響を適切に表しているといえる. さらに, 遅延結合により結合したシステムにおいて結合強度と遅延時間により関係づけられる同期条件と同様のものとなっており, サンプル値結合ネットワークと遅延結合ネットワークの類似性を示唆する結果を得た. これらの結果は, 審査付き国際会議論文として, すでに発表を行っている.

さらに, この結果をもとに, 3個以上の同一ダイナミクスの出力が同期サンプリングの下で観測され, それらを拡散結合することで構成されるネットワークシステムの同期条件の推定法を検討した. ネットワーク構造が無向グラフとなることから, グラフラプラシア

ンの固有値に基づき、2つの双方向結合ネットワークで求めた同期条件を結合強度に関してスケーリングすることで、同期条件を推定することができることを示した(図3)。これらの結果をまとめた結果を論文投稿する予定である。サンプル値結合に対する同期条件は、従来では線形行列不等式条件として与えた結果はあるが、結合強度、サンプリングタイム、ネットワーク構造が同期に与える影響や関係を明確に捉えることができなかった。本研究成果は、これらの関係を明確に示すことができた。

以上は、各システムにおける出力が同期サンプリングにより取得されている場合であるが、システムごとのサンプリングは必ずしも同期せず、非同期サンプリングとなることが一般的である。そこで、非同期サンプリングの場合の同期条件について検討を行った。この場合、完全な同期は生じないが、同期誤差方程式の原点が実用漸近安定となるという意味での実用同期が生じるための条件を導出している。この結果についても、審査付き国際会議に投稿し、採択が決定している。

b) 不確かな時変むだ時間サンプル値非線形システムの安定解析法

既存の非周期サンプル値システムに対する安定解析法の考え方を応用し、不確かな時変むだ時間線形システムに対する安定解析法を開発し、加えてフィードバックゲインの設計法を提案したが、本研究ではさらに、その考え方を拡張して、近似線形化可能なクラスの非線形システムに対する安定性判別条件を導出した。得られた判別条件を用いて、非線形システムへの適用例を数値シミュレーションにより示し、導出した判別条件が妥当であることを示した。ここでの結果は、すでに論文掲載を行った。

c) 不確かな時変伝送遅延時間を持つサンプル値結合非線形システムの同期パターン制御

本サブテーマでは、上述のそれぞれのサブテーマでの検討に基づき、それらを融合するため、とりわけ、a)の結果の拡張の検討を行い、結合強度、サンプリングタイム、伝送遅延時間が同期に与える影響について検討を行った。上述した通り、サンプル値結合における同期条件は、遅延結合の場合の同期条件と非常に似た条件となるため、結合強度、サンプリングタイム、遅延時間が同期に与える影響は概ね想定通りの条件を与えることを数値シミュレーションにより確認した。また、実システムでの通信経路の一時的な断絶などを考慮するため、時変ネットワーク構造下での同期問題についても検討を行った。特に、非連結なグラフ構造を切り替えることにより、ネットワーク全体の完全同期が発生するための条件について検討した。ハイブリッドシステムの安定論を拡張し、同期問題と融合させることによって、ネットワーク完全同期のための十分条件と、それぞれの非連結グラフ構造において必要とされる滞留時間を導出し、得られた条件を数値シミュレーションにより検証し、妥当性を示した。

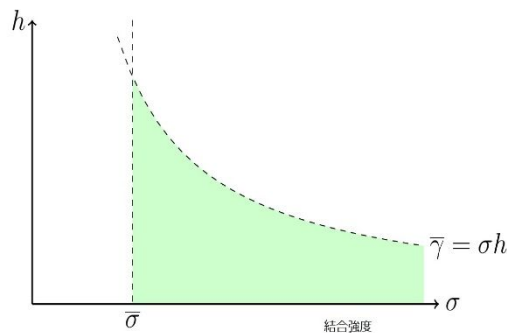


図2. サンプル値結合系の同期条件

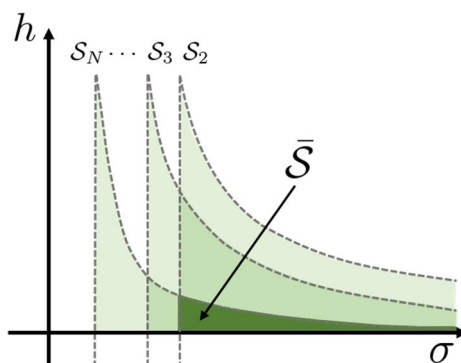


図3. スケーリングによる同期条件の推定法

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 Kanao Sakai, Toshiki Oguchi	4. 巻 52
2. 論文標題 Synchronization of Coupled Nonlinear Systems with Bidirectional Sampled-data Couplings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 .634-639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.033	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 林田泰隆, 小口俊樹	4. 巻 54
2. 論文標題 不確かな時変入力むだ時間と時変パラメータ変動をもつサンプル値システムの制御系設計	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 757 ~ 764
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.9746/sicetr.54.757	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 Kota Miyamoto, Koki Ryono, Toshiki Oguchi	4. 巻 51
2. 論文標題 Delay-independent Synchronization in Networks of Time-delay Coupled Systems with Uncertainties	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 211 ~ 216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.12.090	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 Y. Hayashida, L. Hetel, T. Oguchi, J-P. Richard	4. 巻 50
2. 論文標題 Delay-independent Synchronization in Networks of Time-delay Coupled Systems with Uncertainties	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 1257-1262
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.351	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18件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Kanao Sakai, Iori Yoshida, Toshiki Oguchi
2. 発表標題 Synchronization in networks of systems with synchronous/asynchronous sampled-data couplings
3. 学会等名 IFAC World Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haonan 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 吉田伊織, 酒井佳奈子, 小口俊樹
2. 発表標題 双方向非同期サンプル値結合による同一な非線形システムの同期
3. 学会等名 計測自動制御学会第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 望月絢斗, 小口俊樹
2. 発表標題 非線形システムのサンプル値を用いた先行同期
3. 学会等名 計測自動制御学会第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 酒井佳奈子, 吉田伊織, 小口俊樹
2. 発表標題 サンプル値結合システムのネットワーク同期
3. 学会等名 第16回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoViC 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井佳奈子, 小口俊樹
2. 発表標題 サンプル値結合による非線形ネットワークシステムの同期条件
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 Kota Miyamoto, Toshiki Oguchi
2. 発表標題 Delay-independent synchronization in networks of nonlinear systems with uncertain and non-identical transmission delays
3. 学会等名 15th IFAC Workshop on Time Delay Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山大輔, 小口俊樹
2. 発表標題 非連結グラフの切り替えによる非線形ネットワークシステムの同期
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 2019年

1. 発表者名 Zhuanglin Mei, Toshiki Oguchi
2. 発表標題 Formation control of unicycle robots with transmission delay couplings
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮本紘多, 小口俊樹
2. 発表標題 不確かさのある伝送遅延結合ネットワークシステムにおけるむだ時間非依存同期
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 酒井佳奈子, 小口俊樹
2. 発表標題 サンプル値結合による同一な非線形システムの同期問題
3. 学会等名 計測自動制御学会第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 横山大輔, 小口俊樹
2. 発表標題 非連結グラフの切り替えによる非線形ネットワークシステムの同期
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 2019年

1. 発表者名 Kota Miyamoto, Toshiki Oguchi
2. 発表標題 Delay-independent Synchronization in Networks of Time-delay Coupled Systems with Uncertainties
3. 学会等名 5th IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮本紘多, 小口俊樹
2. 発表標題 むだ時間非依存性を持つ伝送遅延結合非線形ネットワークシステムの実用同期
3. 学会等名 第15回「運動と振動の制御」シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Cao, T. Oguchi
2. 発表標題 Coordinated Control of Mobile Robots with Delay Compensation based on Synchronization
3. 学会等名 Workshop on Sensing and Control for Autonomous Vehicles (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮本紘多, 小口俊樹
2. 発表標題 伝送遅延結合非線形ネットワークシステムにおける実用同期のむだ時間非依存性
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yiran Cao, Toshiki Oguchi
2. 発表標題 Coordinated Control of Mobile Robots with Delay Compensation based on Synchronization
3. 学会等名 Workshop on Sensing and Control for Autonomous Vehicles (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 林田泰隆, 小口俊樹, L. Hetel, J-P. Richard
2. 発表標題 不確かな時変むだ時間をもつサンプル値マルチエージェントシステムのフォーメーション制御
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yiran Cao, Toshiki Oguchi	4. 発行年 2017年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 518 (495-514)
3. 書名 Coordinated Control of Mobile Robots with Delay Compensation Based on Synchronization, Sensing and Control of Autonomous Vehicles- Applications to Land, Water, and Air Vehicles, T.I. Fossen, Kristin Y. Pettersen, H. Nijmeijer (Eds.)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京都立大学 システムデザイン研究科機械システム工学域 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
--	---------------------------	-----------------------	----