

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560537

研究課題名(和文) 構造設計を含む大規模非線形遅延結合ネットワーク系の巨視的同期制御

研究課題名(英文) Synchronization control of large-scale nonlinear network systems with delay couplings including topological design

研究代表者

小口 俊樹 (Oguchi, Toshiki)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：50295474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、同一の非線形システムの遅延結合による大規模ネットワークにおける同期問題に対し、1.スケーリングに基づいて完全同期と部分同期の発生条件の推定法を示し、直積ネットワークに基づく同期ネットワークの構成法を示した。2.外部入力の印加による部分同期の同期パターンの発生原理を明らかにした。この結果は、外部入力の印加により、同期パターンの制御が可能であることを示唆している。3.直積グラフで表される遅延結合ネットワークにおける完全同期、部分同期の条件を導出した。さらに、有向グラフで表現されるネットワークに対し、グラフ理論に基づく同期パターンの解析を行い、同期に基づくシステムの縮約法を示した。

研究成果の概要(英文)：For the synchronization problem in large-scale networks of identical nonlinear coupled systems with delay couplings, we obtained the following results:

1. We showed how to estimate conditions for full synchronization and partial synchronization in networks by using the scaling property. We also proposed how to design a network structure such that the network is completely synchronized. 2. For the synchronization pattern formation problem, we clarified what synchronization pattern can be emerged by applying external inputs. This result indicates that the synchronization pattern can be controlled by external inputs. 3. We derived conditions for full synchronization and partial synchronization in the Cartesian product networks with delay couplings. In addition, for network systems represented by directed graphs, we proposed a graph theoretic approach for analysis of synchronization patterns and a system reduction method based on synchronization.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御理論 複雑系 同期 非線形システム むだ時間 パターン形成 ネットワーク系

1. 研究開始当初の背景

生物学や応用物理、脳科学などで観察される集団強調運動への関心の高まりは、現象の解析に留まらず、その工学的応用へと広がり続けている。たとえば、非線形振動子モデルで構成される CPG (中枢パターン生成器) を組み込んだ多足ロボットの歩容生成や、生態の持つ概日リズムのロバスト性についてのシステム制御理論の観点からの研究が行われてきている。また、自律ロボットのフォーメーション制御に代表される協調制御は、自然界における渡り鳥などの協調運動にその原理を見出すことができ、とりわけ、コンセンサス問題は同期問題と密接に関係している。このように多数のシステムからなるネットワーク結合系の研究は、そのシステム全体が生みだすマクロ運動の理解だけでなく、工学的応用として不可欠ものとなってきている。そして、より現実的な環境を考えたとき、システム間の伝送遅延を陽に考慮した遅延結合ネットワークにおけるマクロ運動の解析・制御へと、研究の関心は広がってきている。

研究代表者らはすでに、遅延結合ネットワーク系における同期問題について、その同期条件の解析方法について研究を進めてきていたが、大規模ネットワークシステムの同期問題において、複数のネットワークの統合・分離により大規模ネットワークが構成あるいは離散する場合、そのようなネットワーク構成の変化に対して、システム全体、あるいは部分ネットワークにおいて同期状態を維持するためには、どのようなネットワーク構成が望ましいのか、また、部分ネットワークの結合により、大規模ネットワークのクラスターによるパターン形成を実現するには、どのように結合を設計するべきか、といった制御設計の観点からの疑問が生じる。しかし、このようなサブネットワークの統合・分離など、ネットワーク構造の設計を含む遅延結合による大規模遅延結合ネットワークシステムの同期制御問題は、ほとんど検討されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、多数のサブシステムから構成される大規模遅延結合ネットワークシステムの同期制御問題を考え、従来のシステム間の結合強度と遅延時間に関する同期条件の導出だけでなく、ネットワーク構造を含めた同期ネットワークの設計法を導出することである。さらに、巨視的同期挙動を解析するためのダイナミクスの縮約法を検討し、新たな同期及びパターン形成の制御手法を開発することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、遅延結合により構成される大規模ネットワークの同期のための制御理論の構築を目指し、主に次の3つのサブテーマ

について研究を行った。

- (a) 構造設計を伴う遅延結合ネットワークシステムの同期問題
- (b) 外部入力による遅延結合ネットワークシステムの同期問題
- (c) 大規模遅延結合ネットワークシステムの縮約と同期制御・パターン形成

これらは、理論解析のほか、数値シミュレーションによる検証に加え、一部については Hindmarsh-Rose ニューロンモデルを実現した回路を用いた実験による検証を行った。

4. 研究成果

本研究では、多数のサブシステムからなる大規模遅延ネットワークシステムの同期問題を考え、従来のシステム間の結合強度と遅延時間に関する同期条件の導出だけでなく、ネットワーク構造を含めた同期ネットワークの設計法を導出することを目的に、3つのサブテーマを設け、研究を実施した。まず、それぞれのサブテーマの下で得られた成果について述べる。

- (a) 構造設計を伴う遅延結合ネットワークシステムの同期問題

ネットワーク構造をあらわすグラフラプラシアン固有値と、結合強度、遅延時間からなる同期条件との関係に基づく解析から、二つのサブシステムを遅延双方向結合で結合した場合の同期条件を結合強度に関してスケールリングすることから、任意のネットワークの同期条件を推定可能であることをすでに明らかにしているが (Fig. 1)、その解析をさらに進め、ネットワークの一部が同期条件を生じる部分同期現象の解析にも適用可能であることを明らかにし、そのような条件下で観察される部分同期パターンはグラフラプラシアンに対応する固有ベクトルから導出できることを明らかにした。

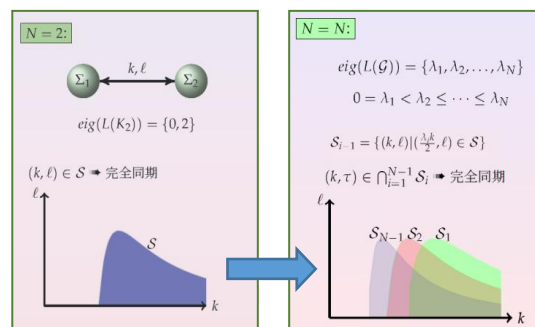


Fig. 1 スケールリングによる双方向遅延結合ネットワークの同期条件の推定

この解析から、例えば Fig.2 に示す 10 個のサブシステムからなるネットワークシステムの同期問題を考えた場合、遅延のない双方向結合の下で、各システム間の同一の結合強度に依存して、すべてのシステムが同期をする完全同期と、Fig. 2

で色分けされた部分同期のパターンが生じることがわかるが、さらに、遅延時間を加えたとしても、観測される部分同期パターンは、Fig. 2 に示されたパターン以外に存在しないことがわかる。

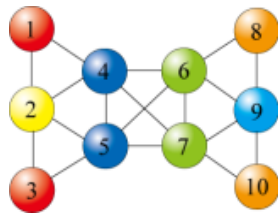


Fig.2 Sandglass ネットワークにおける部分同期パターン

さらに、各サブシステムが強準受動性を有しない場合、結合により各システムが発散する場合があるが、Lur'e 系をサブシステムとしたネットワークにおいても結合強度を上げることで、同期状態から状態の発散が生じる。そのような発散が生じるための条件についても、同様の解析手法により推定が可能であることを明らかにしている。

以上で概略を述べたような完全同期、部分同期が生じるための条件の推定法を用いて、ネットワークの直積構造とそのグラフラプラシアン固有値、固有ベクトルとの性質に着目し、与えられた同期条件の下で同期を発生するネットワークの設計法を明らかにした。一般に、結合されるサブシステム数が増加すると、完全同期を生じるために許容される最大遅延時間は短くなる傾向があるが、この設計法を用いることにより、サブシステム数が増加した場合にも、許容される最大遅延時間を下げることとなる同期が可能となるネットワークの構成法を示した。

(b) 外部入力による遅延結合ネットワークシステムの同期問題

ネットワークシステムの部分同期パターンは、そのネットワーク構造をあらわすグラフラプラシアン固有ベクトルに依存することが(a)から明らかとなったが、ここではグラフ理論の観点から、外部入力を一部のサブシステムに印加した場合に生じる部分同期パターンについて、検討を行った。

まず、グラフ理論における公平分割の概念を導入し、外力の有無によらず、発生しうる部分同期パターンはいずれも公平分割で特徴付けられることを明らかにしている。その上で、ネットワーク上の一部のシステムに外部入力印加される場合について検討し、外部入力印加がシステムの状態に無関係であり、システム間の結合が十分に大きい状況においては、ネットワークのグラフ構造から一意に定まる最大公平分割に基づいた

同期パターンが発現することを明らかにしている (Fig. 3)。これは、外部入力がないもとでの同期多様体を外部入力により縮小させることで発生する部分同期に対する結果である。

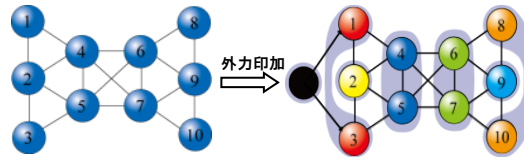


Fig.3 完全同期状態に外部入力を印加することにより生じる部分同期パターン

さらに、外部入力がない状況において、ネットワークが部分同期を生じるような結合強度の下で、外部入力を印加した場合においても、完全同期の場合と同様に、外部入力がない場合に発生している部分同期に基づくサブシステムの集合と、サブシステムを分割した集合と、外部入力に相当する入力ノードをネットワークに加えたグラフにおける最大公平分割により得られるサブシステムの集合との積集合により、外部入力を印加することにより生じる部分同期パターンが同定できることを示している (Fig. 4)。

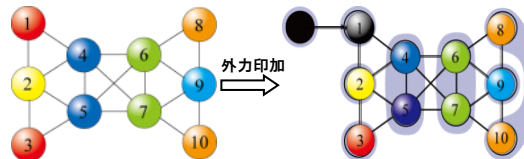


Fig.4 部分同期状態に外部入力を印加することにより生じる部分同期パターン

一連のこれらの結果は、外部入力を印加するサブシステムを選択することにより、発生する部分同期のパターンを選択的に制御することが可能であることを示唆している。

(c) 大規模遅延結合ネットワークシステムの縮約と同期制御・パターン形成

このサブテーマでは、(a),(b)での結果を元に、より大規模なネットワークシステムの同期問題への拡張を試みている。

まず、直積構造を持つネットワークシステムの部分同期パターンの形成条件について検討を行い、遅延のない場合の拡

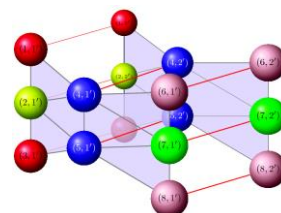


Fig.5 直積ネットワークにおける部分同期

散結合による完全同期, 部分同期の条件, 遅延拡散結合による完全同期, 部分同期の条件について, 検討を進めた. ここで解析結果については, 数値シミュレーションだけでなく, Hindmarsh-Rose ニューロンモデルを実現した回路を用いた実験を実施した. 実システムにおける個体差による誤差は伴うものの, 概ね推定通りの結果が得られることを確認した.

さらに, ここでは(b)での結果を, 結合システムが一方方向結合を含むネットワークで構成されている場合や, 各結合強度が均一ではなく, 各結合に重みが与えられている場合など, ネットワーク構造が有向グラフで表される場合に拡張した.

また, ここで提案した部分同期パターンの解析結果を元に, 部分同期に基づくシステムの縮約方法について示し, 部分同期を生じるネットワークの縮約による低次元化手法を明らかにしている.

なお, 大規模ネットワークシステムに対して, 公平分割の導出アルゴリズムの開発も並行しておこなったが, 分割問題の性質上, システム数の増加とともに導出が困難になることが予想され, より効率的なアルゴリズムの開発が必要になると思われる.

以上の通り, 3つのサブテーマを通して, 同一のダイナミクスを持つ非線形システムを結合することで構成されるネットワークシステムにおいて生じる同期パターンについて, そのパターンの決定原理を明らかにするとともに, 外生入力の印加による同期パターン制御のための理論の構築がなされた. ここでの結果は, 群移動ロボットなどの群制御にも活用可能であることも, 実験を用いた実験により検証を行っている.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① A. A. Albarez-Aguirre, N. van de Wouw, T. Oguchi, H. Nijmeijer, Predictor-based remote tracking control of a mobile robot, IEEE Trans. on Control Systems Technology, 査読有, 掲載決定
- ② K. Ryono, T. Oguchi, A cluster control of nonlinear network systems with external inputs, Proceedings of 9th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, 2013, IFAC-PapersOnline, Elsevier, 査読有
DOI:10.3182/20130904-3-FR-2041.00208
- ③ E. Steur, T. Oguchi, C. van Leeuwen, H. Nijmeijer, Partial synchronization in

diffusively time-delay coupled oscillator networks, Chaos (American Institute of Physics), 査読有, Vol. 22, article no. 43144, 2012 DOI: 10.1063/1.4771665

- ④ T. Mimura, T. Oguchi, Partial synchronization of Lur' e type Nonlinear systems with delay couplings, Proceedings of 3rd IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic systems, 2012, IFAC-PapersOnline, Elsevier, 査読有, DOI:10.3182/20120620-3-MX-3012.00064
- ⑤ T. Oguchi, Finite Spectrum Assignment for nonlinear time-delay systems using synchronization-based predictor, Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, pp. 3874-3879. 2012, DOI:10.1109/CDC.2012.6426085
- ⑥ T. Oguchi, H. Nijmeijer, A synchronization condition for coupled nonlinear systems with time-delay: A frequency domain approach, International Journal of Bifurcation and Chaos, 査読有, Vol. 21, pp. 2525-2538, 2011, DOI: 10.1142/S0218127411029902
- ⑦ E. Uchida, T. Oguchi, Pattern formation in networks of nonlinear systems with delay couplings, Proc. of the 18th IFAC World Congress, 2011, IFAC-PapersOnline, Elsevier, 査読有, Vol. 18, pp. 5118-5123, DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.03773

[学会発表] (計 17 件)

- ① 漁野康紀, 小口俊樹, 外部入力を伴う非線形ネットワーク・システムの同期パターン形成, 第 1 回計測自動制御学会制御部門大会マルチシンポジウム, 2014 年 3 月 5 日, 電気通信大学
- ② 棚原泰隆, 小口俊樹, ランダマイズドアルゴリズムを用いた不確かなむだ時間システムの制御系設計, 第 1 回計測自動制御学会マルチシンポジウム, 2014 年 3 月 6 日, 電気通信大学
- ③ 小口俊樹, W. Oomen, C. Murguia, H. Nijmeijer, (遅延)結合非線形システムの直積ネットワークにおける部分同期, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013 年 11 月 16 日, 新潟大学
- ④ 漁野康紀, 小口俊樹, 外部入力を伴う非線形ネットワークシステムの部分同期, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013 年 11 月 16 日, 新潟大学
- ⑤ 小口俊樹, 同期に基づく状態予測器を用いた非線形むだ時間システムの安定化, 第 13 回「運動と振動の制御」シンポジウ

- ム, 2013年8月27日, 九州産業大学
- ⑥ 小口俊樹, カオス結合系の同期問題とその応用, 第57回システム制御情報学会研究発表講演会(招待講演), 2013年5月16日, 兵庫県民会館
- ⑦ 漁野康紀, 小口俊樹, 外部入力による遅延結合非線形ネットワークシステムのクラスタ制御, 第57回システム制御情報学会研究発表講演会, 2013年5月16日, 兵庫県民会館
- ⑧ 漁野康紀, 小口俊樹, 外部入力による非線形ネットワーク・システムのクラスタ制御, 第13回計測自動制御学会制御部門大会, 2013年3月, アクロス福岡
- ⑨ 小口俊樹, H. Nijmeijer, カオス(遅延)結合ネットワーク・システムの部分同期, 第55回自動制御連合講演会, 2012年11月18日, 京都大学
- ⑩ 中村ももこ, 小口俊樹, 拡散遅延結合による直積ネットワークシステムの同期条件, 第55回自動制御連合講演会, 2012年11月18日, 京都大学
- ⑪ 三村俊裕, 小口俊樹, 遅延結合されたLur'e系における部分同期とネットワーク構造, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2012年3月28日, 福江市
- ⑫ 中村もも子, 小口俊樹, 同期条件に基づく拡散遅延結合ネットワークの構造設計, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2012年3月28日, 福江市
- ⑬ 棚原泰隆, 勝俣尚士, 三村俊裕, 小口俊樹, 遅延結合による二輪車両ロボット群のコンセンサス達成条件とネットワーク構造, 第12回計測自動制御学会制御部門大会, 2012年3月16日, 奈良市
- ⑭ 三村俊裕, 小口俊樹, 遅延結合ネットワークにおける部分同期, 第54回自動制御連合講演会, 2011年11月20日, 豊橋市
- ⑮ Toshihiro Mimura, Toshiki Oguchi, Synchronization and Topology in Networks of Lur'e Systems with Delay Couplings, The 5th European Nonlinear Dynamics Conference, 2011年7月26日, ローマ
- ⑯ 小口俊樹, 三村俊裕, 遅延結合カオスネットワークの完全同期と部分同期, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2011年6月30日, 斜里町

[図書] (計 2 件)

- ① T. Oguchi and E. Uchida (分担執筆), Delay systems: From Theory to Numerics and Applications (Part 2: Analysis and Design of Pattern Formation in Networks of Nonlinear Systems with Delayed Couplings), T. Vyhldal et al. 編, Springer, ISBN978-3-319-01695-5, 2013年
- ② A. Alvarez-Aguirre, N. van de Wouw, T. Oguchi, K. Kojima and H. Nijmeijer (分

担執筆), Remote Tracking Control of Unicycle Robots with Network-Induced Delays, In Informatics in Control, Automation and Robotics, Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, DOI 10.1007/978-3-642-19539-6_15, 2011年

[その他]

ホームページ等

<http://ctrl.mech.se.tmu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小口俊樹 (OGUCHI, Toshiki)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 50295474