

機関番号 : 22604

研究種目 : 基盤研究 (C)

研究期間 : 2008 ~ 2010

課題番号 : 20560424

研究課題名 (和文) 遅延結合による非線形系の同期制御とパターン形成

研究課題名 (英文) Synchronization and Pattern Formation of Nonlinear Systems with Delay Couplings

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

研究成果の概要 (和文) :

本研究では, 同一の非線形システムをサブシステムとした遅延結合ネットワーク系の同期問題に対し,

(1) 周波数領域での安定性に基づいた, より保守性の低い同期条件の導出を行った. さらに, ネットワーク構造を表すグラフラプラシアンと同期条件の関係について明らかにし, グラフラプラシアンの固有値を用いた同期条件, 部分同期条件の推定方法を示した.

(2) 遅延結合によるネットワークシステムのパターン形成について検討し, 調和平衡法に基づく解析・設計法を提案した.

研究成果の概要 (英文) :

In this project, we considered the synchronization problems in networks of identical nonlinear systems with delayed couplings. In particular, we obtained the following results:

(1) We proposed a new synchronization criterion based on a frequency domain stability condition and showed that the proposed criterion is less conservative than the conventional synchronization criteria based on the Lyapunov-Krasovskii approach. Furthermore, we showed the relationship between the network structure and the synchronization condition and developed estimation methods of synchronization and partial synchronization based on the synchronization condition for two coupled systems and the eigenvalues of the graph Laplacian.

(2) We proposed an analysis and a design method for pattern formation in networks of identical nonlinear systems with delay couplings by applying the harmonic balance methods.

交付決定額

(金額単位 : 円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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 : 制御工学, むだ時間, 非線形力学, 同期制御, 調和平衡法, 安定性

## 1. 研究開始当初の背景

近年, ロボット工学, 通信・センサーネットワークや人工知能などの工学分野に限ら

ず, 生物学や応用物理, 脳科学などの分野においても集団協調運動への関心は高まっている. たとえば, 心拍運動や概日周期 (サー

カディアンリズム)は多くの微細な非線形振動子から構成される細胞集団が協調して生み出すマクロナリズム運動であると考えられており、その現象の解明は、単に現象の理解にとどまらず、工学的な応用の観点からも重要な課題となっている。結合振動子の歴史は古いが、結合カオス系の同期現象の研究は、非線形力学の分野においても歴史が浅く、とりわけ、各サブシステム間に生じる情報の伝送遅延を陽に考慮した遅延結合により構成されたカオスネットワークの研究は緒についた段階であり、理論の体系化が十分になされていない。

他方、制御工学においては、ネットワーク化制御系における伝送遅延時間の存在などにより、システムにおけるむだ時間の制御の重要性が再認識されているが、非線形むだ時間システムに対する補償としての制御系設計理論は十分に整備されていない。その一方で、繰り返し制御やデッドビート制御や、カオス制御の代表的な手法である遅延フィードバック、先行同期現象に基づく予測理論など、むだ時間を活用した制御方策も存在しており、システムに対するむだ時間の正の効果に着目し、制御理論への応用を検討することは、制御理論をより豊かに、かつ実用的なものにすると考えられる。

以上の観点から、非線形力学理論の分野における結合カオス系の同期問題を基に、非線形力学理論と制御理論との融合を図り、新たな制御理論の創出を目指すことが、本研究の背景となっている。

## 2. 研究の目的

本研究は、非線形力学理論の分野における結合カオス系の集団同期現象の研究を基礎に、実システムにおいて生じるサブシステム間の情報伝送遅延を考慮した集団同期現象の解析と、その知見を制御工学へ応用することを目的としている。伝送遅延と結合強度パラメータにより、結合ネットワーク系は完全同期や部分同期といった現象を生じる。この同期パターンの形成は、ロボットの歩容生成や分散協調制御へ応用可能であると考えられる。そこで、より具体的に本研究では、情報伝送遅延により生じるむだ時間と結合強度をパラメータとした遅延結合ネットワーク系の完全同期・部分同期の制御手法を導出し、システム全体の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。その目的を達成するために、本研究課題では、非線形システムをサブシステムとした遅延結合ネットワーク系に対し、つぎの二つの点を明らかにすることを目指している。

- (1)遅延結合システムの完全同期・部分同期のためのネットワーク構造と同期条件の導出
- (2)遅延結合システムの部分同期におけるク

ラスタリングとパターン生成のための制御手法の開発

## 3. 研究の方法

本研究では、遅延結合により構成される非線形システムのネットワーク系における同期・部分同期とパターン形成のための制御理論の開発を目指している。そのため、次の二つのサブテーマの下に、研究を実施する。

- (1)遅延結合システムの完全同期・部分同期のためのネットワーク構造と同期条件の導出
- (2)遅延結合システムの部分同期におけるクラスタリングとパターン生成のための制御手法の開発

(1)では、周波数領域における同期条件の導出を検討している。さらに、ネットワーク構造と同期条件との関係に着目し、グラフラプシアン固有値と、結合強度と遅延時間との対からなる同期条件との関係を明らかにし、完全同期、部分同期の条件について検討する。

(2)では、遅延時間が存在しない場合の非線形振動子のパターン形成について検討している既存の結果を、遅延結合ネットワーク系に拡張する。

## 4. 研究成果

本研究では、情報伝送遅延により生じるむだ時間と結合強度をパラメータとした遅延結合ネットワーク系の完全同期・部分同期の制御手法を導出し、システム全体のパターン形成の制御手法を開発することを目的とし、そのために、本研究課題では、非線形システムをサブシステムとした遅延結合ネットワーク系に対し、つぎの二つの点を明らかにすることを目指してきた。

- (1)遅延結合システムの完全同期・部分同期のためのネットワーク構造と同期条件の導出
- (2)遅延結合システムの部分同期におけるクラスタリングとパターン生成のための制御手法の開発

各サブテーマについて3カ年で得られた成果の概要を以下に述べる。

- (1)遅延結合システムの完全同期・部分同期のためのネットワーク構造と同期条件の導出

遅延結合システムの完全同期のための十分条件は、Lyapunov-Krasovskiiの定理に基づいた条件がこれまでに提案されているが、その手法の持つ保守性の高さにより、遅延結合カオスシステムの同期条件もまた保守性が高いものとなる。本研究では、サブシステムのクラスをChua回路のようなLur'e系に対する絶対安定性の条件である円板条件を用いた同期条件の導出を行った。これらの条件の導出は、2種類の遅延結合に対して導出

されており、数値シミュレーションの結果から、従来の Lyapunov-Krasovskii の定理に基づいた同期条件よりも、保守性が低く、Chua システムからなるネットワーク系においては、シミュレーションによって得た同期条件に近い結果を与えることを明らかにした。これらの結果は、現在、論文審査中である。(Fig.1)

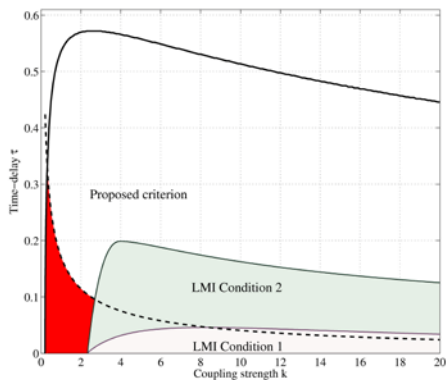


Fig. 1 遅延結合システムの同期条件の比較  
(赤色の部分は、既存の同期条件を満たさないが、提案した同期条件を満足し、結合された各システムがカオス的に振舞う領域と判定された領域を表す。)

また、従来の Lyapunov-Krasovskii の手法に基づく同期条件の保守性の緩和についても検討し、Lorentz 回路を用いた遅延結合ネットワークの同期の実験検証も行い、導出した同期条件の妥当性の検証も行っている。

一方、これまでの同期条件の導出は、ネットワーク系全体のダイナミクスから同期誤差ダイナミクスを求め、同期問題をその零解の安定問題に帰着させて求めていたが、システム数が増加するにつれ、その条件の導出は困難になる。そこで、ネットワークの構造と同期条件の関係について検討し、ネットワーク構造を表すグラフラプラシアンと同期誤差ダイナミクスとの関係を明らかにし、グラフラプラシアンの非零固有値に基づくシステム分割と同期領域のスケーリングによる同期条件の重ね合わせから得る同期条件推定法を示した。これらは Chua 回路や Fitz-Hugh-Nagumo 方程式など、Lur'e 系として表現できるシステムを対象としているが、より一般的なシステムに対しても拡張可能であると考えられる。さらに、ネットワークの構造の変化と同期条件の関係について検討を行い、連続的なネットワーク構造の変化と同期条件の関係を単純な 3 つの遅延結合系について明らかにした。これらの結果は、2011 年 7 月に開催される国際会議に採択されている。

さらに、このグラフラプラシアンの固有値に基づくスケーリングを用いることで、遅延結合ネットワークシステムの部分同期のた

めの条件を推定できることを、数値実験と解析により明らかにした。この結果は、むだ時間がない結合システムの場合の完全同期・部分同期に対するチャートを拡張したものとなっており、本研究テーマで目標としていた成果の一つであり、サブテーマ①の研究課題があるクラスのシステムに対して確立したことを意味する。また、国内外において遅延結合における部分同期と完全同期の同期条件における関係について明らかにした結果は今までになく、ここで得られた結果については、現在結果をまとめており、その後、成果発表を行う予定である。

## (2)遅延結合システムの部分同期におけるクラスタリングとパターン生成のための制御手法の開発

本サブテーマでは、遅延結合ネットワークシステムにおいて生じる同期のパターン形成について検討を行った。非線形システムの遅延結合ネットワークでは、伝送遅延と結合強度パラメータにより、サブシステムの完全同期や部分同期といった現象を生じる。そこで、本サブテーマの下では、非線形振動子の遅延結合ネットワークの動的挙動の解析手法を検討し、調和平衡法を用いた振動パターンの解析、およびパターンの設計法を導出した。これらのアルゴリズムは、遅延時間がない結合振動子系のパターン解析および設計法を遅延結合に拡張したものである。ここでは、非線形振動子システムのダイナミクスを限定して議論を行っており、今後より一般的なシステムへ拡張することが必要であるが、扱ったモデルはニューロンモデルの近似モデルとしての意味をもつため、応用の観点から意義ある結果であると考えられる。ここで得られた一連の結果については、既に国内会議において発表を行っており、その拡張された論文は 2011 年 8 月開催の国際会議に採択されている。

さらに、本研究では、本研究テーマで研究された非線形遅延結合ネットワークシステムの同期に関する理論的結果は、カオス系の同期問題のほかに、移動ロボットの制御にも応用できることを明らかにしている。非線形システムである二輪移動ロボットの同期実験として、日本-オランダ間のインターネット通信を用いた同期制御を行った。さらに、同期現象を活用した状態予測器を用い、インターネットを用いた遠隔軌道追従制御に対する制御系設計法を明らかにするとともに、異なる手法により状態予測器の設計条件ならびにシステム全体の安定条件を導出している。これらの結果は既に国際会議論文、論文として掲載されている。

加えて、移動ロボットの群制御問題として、遅延結合ネットワークシステムの同期問題

と深い関係を持つ，ロボット間通信の遅延時間を考慮したコンセンサス問題を検討した．遅延時間がない場合に対して提案された既存のコンセンサス制御のための制御則を遅延結合系のために拡張した制御則を提案し，さらに，その制御則を用いた遅延結合ネットワークの下でコンセンサスが達成されるための条件を導出した．その結果，(1)で導出したグラフラプリアンの固有値に基づく同期条件のスケーリングによる推定が，コンセンサス問題に対しても有効であることを明らかにした．これらは数値シミュレーションだけでなく，実機を用いた実験でも妥当性を確認している．この結果については，一部国内会議において発表を行っている．

以上の通り，本研究では上記二つのサブテーマに基づき研究計画を立案し，3 年間の研究を実施した．その結果，概ね当初の研究計画通りに進み，当初の目的を達成している．さらに，得られた理論的成果を工学的に活用するため，移動ロボットを用いた遠隔制御実験に適用し，より一般的なシステムに対しても有益な成果であることを明らかにした．

今後の展望としては，いずれのサブテーマに対しても，システムのクラスを限定した議論になっている部分があり，これらをより一般化する必要がある．また，ネットワーク構造の設計問題は(2)のサブテーマにおいて扱ったが，計算の簡略化のため，遅延時間を特定する必要があった．より自由度の高い制約下での設計法へと拡張する必要がある．

## 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 11 件)

- ①A. Alvarez-Aguirre, N. van de Wouw, T. Oguchi, K. Kojima, H. Nijmeijer: Remote tracking control of unicycle robots with network-induced delays, 査読有, Informatics in Control, Automation and Robotics, 2011, 12 pages, Springer-verlag
- ②E. Uchida, T. Oguchi: Pattern formation in Networks of nonlinear systems with delay couplings, Proceedings of the 18th IFAC World Congress, 2011, (採録決定) pages.
- ③T. Mimura, T. Oguchi: Synchronization and topology in networks of Lur'e systems with delay coupling, Proceedings of European Dynamics Conference 2011, 査読有, CD-ROM, 2011 年 (採録決定) 6 pages
- ④ A. Alvarez-Aguirre, H. Nijmeijer, T. Oguchi, K. Kojima: Remote control of a mobile robot subject to a communication delay, Proceedings of 7th International

Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 査読有, CD-ROM, 2010, pp. 55-62

⑤K.Kojima, T. Oguchi, A.Alvarez-Aguirre, H.Nijmeijer: Predictor-based tracking control of a mobile robot with time-delays, Proceedings of the 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, 査読有, CD-ROM, 2010, pp. 167-172

⑥ A. Alvarez-Aguirre, H. Nijmeijer, T. Oguchi: Long Distance Synchronization of Mobile Robots, Proceedings of 2010 American Control Conference, 査読有 CD-ROM 2010, pp. 3836-3841

⑦小口俊樹: 遅延結合非線形システムネットワークの安定性と同期, システム/制御/情報, 閲読有, Vol.53, No. 8, 2009, pp. 323-329

⑧T. Oguchi, H. Nijmeijer, N. Tanaka: A synchronization condition for coupled nonlinear systems with time-delay -A circle criterion approach-, Proceedings of 2nd IFAC meeting on analysis and control of chaotic systems, 査読有, USB, 2009

⑨T. Oguchi, H.Nijmeijer: Synchronization of chaotic systems in unidirectional ring networks with delay, Proceedings of European Nonlinear Dynamics Conference 2008, 査読有, CD-ROM, 2008, 6 pages

⑩T.Oguchi, H. Nijmeijer, T. Yamamoto, T.Kniknie: Synchronization of four identical nonlinear systems with time-delay, Proceedings of the 17th IFAC World Congress, 査読有, CD-ROM, 2008, pp. 12153-12158

⑪T. Oguchi, H. Nijmeijer, T.Yamamoto: Synchronization in networks of chaotic systems with time-delay couplings, Chaos (American Institute of Physics), 査読有, Vol.18, No. 3, 2008, no.037108

[学会発表] (計 12 件)

- ①兒島浩太郎, 小口俊樹: 先行同期現象に基づく 2 輪車両型移動ロボットの遠隔軌道追従制御, 第 11 回計測自動制御学会制御部門大会, 2011 年 3 月
- ②勝俣尚士, 小口俊樹, 三村俊裕: 情報遅延を考慮した群移動ロボットのコンセンサス問題, 計測自動制御学会システム情報部門学術講演会 2010, 2010 年 11 月
- ③三村俊裕, 小口俊樹: Lur'e 系の遅延結合ネットワークにおける同期条件—グラフ構造に基づいたアプローチ, 第 53 回自動制御連合講演会, 2010 年 11 月
- ④A.Alvarez-Aguirre,H.Nijmeijer,T.Oguchi: Predictor based control of a mobile robot subject to a bilateral delay, The 29th

Benelux meeting on systems and control,  
2010年3月

⑤ K. Kojima, T. Oguchi, H. Nijmeijer:  
Remote tracking control of a two-wheel  
mobile robot using a state predictor, 第1  
0回計測自動制御学会制御部門大会, 2010年  
3月

⑥内田英一, 小口俊樹: 調和平衡法を用いた  
遅延結合非線形振動子ネットワークのパタ  
ーン形成, 第10回計測自動制御学会制御部  
門大会, 2010年3月

⑦内田英一, 小口俊樹: 非線形振動子の遅延  
結合におけるパターン形成, 第52回自動制  
御連合講演会, 2009年11月

⑧ T. Oguchi: Synchronization for delay-  
coupled systems based on a frequency  
domain condition, International workshop  
on delayed complex systems, 2009年10月

⑨ A.Alvarez-Aguirre, H. Nijmeijer, T.  
Oguchi: State predictor based on  
synchronization applied to a mobile robot,  
The 28th Benelux meeting on systems and  
control, 2009年3月

⑩ T. Oguchi, H. Nijmeijer, N. Tanaka: A  
synchronization criterion for delay-coupled  
systems based on absolute stability, The  
28th Benelux meeting on systems and  
control, 2009年3月

⑪松本晃, 小口俊樹: 遅延結合カオスシステ  
ムの大域的同期条件, 第51回自動制御連合  
講演会, 2008年11月

⑫ T. Oguchi: Synchronization of nonlinear  
systems with time-varying delay coupling,  
One-day workshop on synchronization in  
complex networks, 2008年10月

[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