

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03306

研究課題名（和文）遅延時間を活用した丈夫で多様なネットワークダイナミクス設計・構築とその応用展開

研究課題名（英文）Design of delayed networks with various dynamics and its applications

研究代表者

小西 啓治（KONISHI, Keiji）

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：90259911

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,600,000円

研究成果の概要（和文）：複数のサブシステムから構成されるネットワークのダイナミクスは、サブシステム間の相互作用に伴う遅延時間から大きな影響を受ける。本研究では、遅延がダイナミクスに与える安定化と多様化について、有用な基礎的な知見と応用例を得ることができた。具体的には、遅延結合発振器ネットワークに生じる振動停止現象・振動抑制現象や遅延結合された反応拡散系に生じる不安定現象などの基礎的な成果を得た。さらに、結合発振器のダイナミクスを埋め込んだロボット群のフォーメーション制御や直流給電システムの安定化制御などの応用例についても、有益な結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の身の回りには「遅延」は、システムのパフォーマンスを低下させるネガティブな要因として扱われてきた。本研究は、この「遅延」がポジティブに活用できるのでは？という視点で、遅延が誘発する現象について、理論的な「基礎研究」と実用を目指した「応用研究」に取り組んだ。独創性の強い取り組みであるため、本成果をさらに深く・広く展開すれば、今までは発想できなかったような機能を持つシステムが創造できるかもしれない。

研究成果の概要（英文）：Time delays of interactions on networks induce the following two phenomena: stabilization and diversification. This study provides us some fundamental results and useful applications on these phenomena. For the fundamental results, we obtain analytical results of stabilization of delay-coupled oscillators and of instability of delay-coupled reaction diffusion systems. For the applications, we show the formation control of robotics based on dynamics of coupled oscillators and the stabilization of DC power system by delayed-feedback control.

研究分野：非線形科学・制御工学

キーワード：遅延時間 ネットワーク ダイナミクス 制御工学 複雑系科学

1. 研究開始当初の背景

我々の生活を支える重要なインフラである「通信/交通/物流/エネルギー」などのネットワークには、ネットワークの要素間を移動する「情報/人/物/エネルギー」が動的に変化する。この挙動を理解するには、それらの流れ・ダイナミクスだけでなく、要素間の流れには必然的に含まれる「遅延」を把握しなければならない。ところが、この遅延はネットワークにおける流れ・ダイナミクスの把握を困難にするとの理由で、ネットワークのダイナミクスを扱う研究の多くが、この遅延を無視している。しかし、今後、このネットワークの規模はますます大きくなり、ネットワークの構造も複雑化することは容易に想像できる。すなわち、未来のネットワークを自由自在に安定運用することは、現在の知見だけでは困難になるであろう。

2. 研究の目的

本研究の目的は、「遅延」がネットワークのダイナミクスに及ぼす効果を、基礎と応用の視点で調査・研究することである。具体的には、「遅延」が持つ2つの特性である「ダイナミクスの安定化」「ダイナミクスの多様化」に基づき、工学的に利用することを念頭に置き、複数のサブテーマで展開を図る。

3. 研究の方法

本研究では、課題(1)～(4)を中心に取り組んだ。また、これらの課題から派生した調査課題も検討した。

(1) 振動停止現象：

- ① [非同一致振器] 遅延結合で誘発される振動停止現象は、20年以上前から精力的に調査されており、多数の理論的な成果が報告されている。しかしながら、これら理論的な成果の大半は、全ての発振器が同一であるとの前提で導出されている。その理由としては、非同一致振器を対象にすると、理論解析が非常に複雑となり、見通しの良い成果が得られないということであった。しかし、実際の結合発振器では、同一である方が不自然であり、非同一致振器から構成される結合発振器を対象にすべきである。本研究は、この困難な問題に正面から取り組んだ。具体的には、システム制御理論の安定論（特に遅延システムの安定論）を丁寧に適用する試みを行った。
- ② [拡張遅延結合] 遅延結合による振動停止現象を誘発するには、結合強度と結合遅延を狭い領域から選ぶ必要があり、振動停止現象の活用を妨げる要因となっていた。そこで、遅延結合にいろいろな工夫を凝らすことで領域を拡大させる研究が盛んに実施されている。本研究は、上記と同じような目的で、遅延フィードバック制御の制御則を拡張した「拡張遅延フィードバック制御」を、結合発振器に適用した。
- ③ [結合反応拡散系] 振動停止現象は発振器群に生じるものである。他の形式の結合システムには生じないのであるだろうか？本研究はこの疑問に答えるべく、2個の反応拡散系を遅延結合させた「結合反応拡散系」を研究対象とした。特に、振動性の特徴を有する2個の反応拡散系に着目し、遅延結合を施すことで生じる不安定性に焦点を絞り解析的に調査した。

(2) 振動抑制現象： 遅延結合発振器において、そのネットワークトポロジーをゆっくりと切り替えることで発生する現象を調査した。また、切り替える方策のバリエーションも増やし、調査範囲を広げて検討を行った。

(3) ロボット群制御： 複数の位相振動子の結合にバイアスを印可することは、結合に遅延を施

すことと等しい。そこで、結合位相振動子に生じる様々な同期現象を再現するロボット群に、結合バイアスを導入し、その振る舞いを実験的に調べた。

- (4) 直流給電システムの制御： 遅延フィードバック制御を制御対象に施すと、遅延が含まれた制御系全体の次元は無限大となり、初期値領域の定義が難しく、外乱への耐性を明確にできない。一方、遅延フィードバックを ON-OFF した「Act-and-wait 遅延フィードバック制御」を施すと、制御系全体の次元は有限となり、初期値領域が明確になる。本研究は、この Act-and-wait 遅延フィードバック制御を直流給電基本回路に施し、回路の振る舞いを調査した。さらに、直流給電基本回路の定電力負荷が理想的な特性を示さない場合に遅延フィードバック制御を施すと、どのような現象が生じるのか？についても調べた。

4. 研究成果

(1) 振動停止現象：

- ① [非同発振器] 異なる発振周波数で自励振動する 2 個の発振器に遅延結合を施した結合発振器を調査対象とした。振動停止現象の発生条件の導出はかなり複雑であるが、諸条件を丁寧に整理して解きほぐすことで、比較的シンプルで見通しの良い解析的な成果を得ることができた。具体的には、結合強度・結合遅延から成るパラメータ空間において、平衡点の安定性の境界線を理論的に示した。
- ② [拡張遅延結合] 拡張遅延フィードバック制御を結合に施した「拡張遅延結合」を提案した。この結合を利用すると、振動停止現象を誘発する結合強度と結合遅延の領域は広がることがわかった。さらに、通常の遅延結合と拡張遅延結合が混在する結合発振器についても調査を行い、拡張遅延結合の位置が振動停止現象に与える影響の特徴も掴んだ。
- ③ [結合反応拡散系] 振動性の特徴を有する 2 個の反応拡散系に遅延結合を施すと、Hopf 不安定、Wave 不安定、Robust 安定という現象を観察できることを明らかにした。さらに、これらを理論的に深く調べ上げ、これらに明確な関係性が存在することも示した。

- (2) 振動抑制現象： 4 個の発振器から構成される遅延結合発振器に焦点を絞った。複数の双方向リング型トポロジーを切り替え続けることで、発振器の振動が抑制される現象を発見した。また、この現象を回路実験でも再現し、さらに、この現象を誘発する結合強度・結合遅延の設計手順も導出した。また、この現象は、一方向リング型の遅延結合発振器の場合、結合方向を切り替えるだけで生じること、さらに、これを格子状に拡張できることも示した。

- (3) ロボット群制御： 結合にバイアスを印可したロボット 3 台を作成した。ロボット間の位相差を縦軸・横軸にとった相平面図でロボット群の振る舞いを可視化した。特に、相平面図上に平衡点や多様体をプロットすることで、この振る舞いの理解が進み、複数のフォーメーションの初期値領域なども明確にすることができた。実機のロボット群の振る舞いもこの相平面図上にプロットすることで、結合遅延に相当するバイアスがこの初期値領域に与える影響を実験的に確認することができた。

- (4) 直流給電システムの制御： Act-and-wait 遅延フィードバック制御を施した直流給電基本回路の初期値領域を可視化するアルゴリズムを提案した。これにより、外乱に対する耐性を明確にすることができた。また、この制御系を実機で作成し、上記の結果と矛盾しないことも確認した。一方、理想的な特性を示さない定電力負荷を使用した場合、大域的な安定性が実現できることを、分岐解析を通じて示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 T. Iwamoto, Y. Sugitani, S. Masamura, K. Konishi, N. Hara	4. 巻 102
2. 論文標題 Amplitude suppression of oscillators with delay connections and slow switching topology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 32206
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.102.032206	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 テキ博偉, 小西啓治, 原尚之	4. 巻 J103-A
2. 論文標題 遅延結合した複素Ginzburg-Landauモデルに生じる不安定性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 165-175
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 K. Yoshida, K. Konishi, N. Hara	4. 巻 -
2. 論文標題 Global stabilization of DC bus system with delayed feedback control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications	6. 最初と最後の頁 191-194
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 T. Fujii, K. Konishi, N. Hara	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental investigation on circular formation of two-wheeled mobile robots controlled by coupled oscillators with bias	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications	6. 最初と最後の頁 195-198
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 K. Yoshida, K. Konishi, N. Hara	4. 巻 98
2. 論文標題 Experimental observation of destabilization in a DC bus system and its stabilization with delayed feedback control	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 1645-1657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11071-019-05273-2	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 S. Masamura, T. Iwamoto, Y. Sugitani, K. Konishi, N. Hara	4. 巻 99
2. 論文標題 Experimental investigation of amplitude death in delay-coupled double-scroll circuits with randomly time-varying network topology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 3155-3168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11071-019-05461-0	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 T. Iwamoto, K. Konishi, Y. Sugitani, N. Hara	4. 巻 -
2. 論文標題 Amplitude suppression of one-way ring delay-coupled oscillators with slow change of coupling direction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications	6. 最初と最後の頁 50-53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 S. Mizukami, K. Konishi, Y. Sugitani, N. Hara	4. 巻 -
2. 論文標題 Amplitude death of oscillator networks with extended delay connections	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications	6. 最初と最後の頁 93-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 K. Yoshida, K. Konishi, N. Hara	4. 巻 -
2. 論文標題 Estimation of a basin in a DC bus system with act-and-wait delayed feedback control	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications	6. 最初と最後の頁 637-640
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 T. Iwamoto, K. Konishi, Y. Sugitani, N. Hara
2. 発表標題 Design of time-varying network topology for inducing amplitude suppression in delay-coupled oscillator networks
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Mizukami, K. Konishi, Y. Sugitani, N. Hara
2. 発表標題 Amplitude death in oscillator networks with partial extended delay connections
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水上慎祐, 小西啓治, 杉谷栄規, 原尚之
2. 発表標題 遅延結合した非同一発振器に振動停止現象を誘発するパラメータ領域の導出
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩本哲, 小西啓治, 杉谷栄規, 原尚之
2. 発表標題 結合方向の時間的变化を伴う格子状ネットワークにおける遅延結合発振器群の振動抑制
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 2021年

1. 発表者名 岩本哲, 小西啓治, 杉谷栄規, 原尚之
2. 発表標題 遅延結合の方向の切り替えによりリング型発振器ネットワークに誘発される振動抑制現象
3. 学会等名 システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田晃基, 小西啓治, 原尚之
2. 発表標題 Act-and-wait 遅延フィードバック制御された直流給電システムのロバスト性の検証実験
3. 学会等名 電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井尚史, 小西啓治, 原尚之
2. 発表標題 バイアスを伴った結合位相振動子によって駆動されるロボット群の円形フォーメーション形成実験
3. 学会等名 自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水上慎祐, 小西啓治, 杉谷栄規, 原尚之
2. 発表標題 部分拡張遅延結合が誘発する振動停止現象の安定性解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水上慎祐, 小西啓治, 杉谷栄規, 原尚之
2. 発表標題 拡張型遅延結合が誘発する振動停止現象の解析
3. 学会等名 自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田晃基, 小西啓治, 原尚之
2. 発表標題 Act-and-wait 時間遅延フィードバックが施された直流給電システムのベイスンの推定
3. 学会等名 自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水上慎祐, 小西啓治, 原尚之
2. 発表標題 発振器群に振動停止現象を誘発する拡張型遅延結合のパラメータ設計
3. 学会等名 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 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担者	大谷 真弘 (OTANI Masahiro) (10353301)	奈良工業高等専門学校・電気工学科・准教授 (54601)	
研究 分担者	原 尚之 (HARA Naoyuki) (10508386)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (24403)	
研究 分担者	杉谷 栄規 (SUGITANI Yoshiki) (40780474)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・助教 (12101)	

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