

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560538

研究課題名(和文) ネットワークシステムのロバスト安定化を誘発する相互作用の解析と設計

研究課題名(英文) Analysis of robust stabilization of network systems and design of mutual interaction for inducing it

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、サブシステムの相互作用によって構成されるネットワークシステムに発生する現象の検討を行った。具体的には、複雑系科学分野とシステム制御工学を知見を活かした学際的なアプローチにより、様々な状況のネットワークシステムに生じる振動停止現象がロバストに誘発される相互作用の設計を行った。特に、サブシステム間の相互作用に伝送遅延が伴う場合の振動停止現象については、多くの知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：This study deals with dynamics in network systems consisting of several sub-systems with mutual interaction. An interdisciplinary approach of complex science and control theory allows us to design the mutual interaction for inducing amplitude death for various types of networks. In particular, we obtain several important results on time-delay-induced amplitude death.

研究分野：制御工学

キーワード：振動停止 複雑系 複雑ネットワーク ロバスト安定 時間遅延

1. 研究開始当初の背景

(1) 相互作用に伴う諸問題

我々をとりまく自然界のシステムでは、システム内に存在する多くのサブシステムが、各自で情報を処理し、互いに情報を介して相互作用することで、システム全体が機能している。しかし、所望の機能を有する人工的なシステムを作り上げることは容易なことではない。たとえば、様々な方式で発電された電力を、効率よくかつ安定に消費するスマートグリッドは、その代表的なシステムであろう。このシステムの要素技術(例:太陽電池、燃料電池、スマートメータなど)の開発は、各分野で進展しているが、これらサブシステムが相互作用したネットワークシステムでは、その安定性が未解決であり、現在でも、多くの理論的な研究がなされている。

(2) 異分野融合

スマートグリッドのような応用分野のシステム構築を行うには、ネットワークシステムのダイナミクスに関する基盤的知見が重要な役割を果たす。ネットワークダイナミクスの発生メカニズムや、新たな現象の発見は、複雑系科学分野において、従来から活発に実施されている。一方、工学的な応用を念頭に置き、ネットワークダイナミクスを利用するには、

*要素や相互作用の設計

*ロバスト制御理論の活用

という発想が必要であるが、残念ながら、複雑系科学分野には無い。そこで、異分野であるシステム制御工学の知見が必要不可欠となる。複雑系科学分野で扱われていた現象を、システム制御工学というツールで、いかに解析・制御・設計するか?という課題は、学术界・産業界に大きく貢献すると思われる。

2. 研究の目的

(1) 目標

本研究では、相互作用によって発生する非線形現象のうち、不要な振動の除去に応用できる可能性があるという理由で、工学的に利用価値が高いとされる「相互作用が誘発する安定化現象」の解析とシステム設計について検討する。ただし、この目標から派生した諸問題や、これらをベースにした新たな展開も、積極的に扱う。

(2) 意義

本研究は、ネットワークシステムに生じる不要な振動を避けるためだけでなく、相互作用によって創発される自己組織的な現象の利用を目指した相互作用の解析・設計の礎にな

る可能性がある。

3. 研究の方法

本研究では、主に以下の課題(1)~(5)について検討を行った。

(1) 実システムの環境では、各サブシステムが WWW や無線通信などで相互に影響を与えあうことも多いと推測される。この場合、伝送情報はパケット化され、かつ、伝達にはある程度の時間を要する。このパケット化と伝送遅延が、N 個のサブシステムシステムに与える影響を理論的に調べる。具体的には、N 個のランダム・スチュワート発振器を、FIFO キューで実装した線路で相互作用させ、各発振器に内在されている平衡点の安定性を検討した。このネットワークには、数学的に取り扱いづらい「パケット化」と「伝送遅延」が含まれている。しかし、準量子化手法を用いることで、平衡点近傍の線形ダイナミクスは、離散時間ダイナミクスへ帰着でき、このダイナミクスを丁寧に解析することも可能となる。

(2) サブシステムが空間に移動する場合や、伝送媒体の時間変動などにより、サブシステム間の伝送遅延が、時間と共に変化することは珍しくない。そこで、先行研究では、伝送遅延が高い周波数で振動する相互作用に誘発された安定化現象が理論的に検討されていた。しかしながら、この現象の実験的な検証は行われておらず、その理論の正当性が不明であった。そこで、本研究では、サブシステムにカオス発振回路を、振動する伝送遅延に PIC を用いて、2 個から成る結合発振回路を構築し、その挙動を実験的に検証した。

(3) 一般的に、システムの動作には遅延が伴う。この遅延は、システムを不安定化させ、びびり振動のような自励発振を誘発する。このような遅延を伴う発振器の安定化は、工学的にも価値のある問題である。そこで、遅延発振器を、伝送遅延が伴う相互作用で結合させる。そこに生じる振動停止現象を解析し、ロバスト安定論を活用することで、相互作用の設計手順を導出した。

(4) 直流給電マイクログリッドは、再生可能エネルギーの活用に有効なシステムとして、今後の展開が期待されている。しかし、このシステムには、DC/DC コンバーターを介した定電力負荷が存在すると、ある条件下で自励振動が生じる。各負荷で生じる自励振動をサブシステムと見なすと、直流給電マイクログリッドは、複数のサブシステムが相互作用するネットワークシステムだと考えることができる。このシステムの安定化を目指すべく、最初のステップとして、単体の直流給電システムの分岐解析と、遅延を伴うコントローに

よる安定化を試みる。

(5) 上記の(1)～(4)から派生した諸問題や、研究目的に沿った様々な課題も、システム制御工学などの知見を活用し、その解決へ積極的に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) パッケージ化した情報で相互作用するN個の発振器の安定性について、以下の結果が得られた。

① 平衡点の安定性を記述する特性方程式は、簡単なものに帰着できる。この特性方程式から、安定境界線が導出できた。

② 安定境界線によって算出された安定領域を観察すると、FIFO キューのバッファ数が少ないほど、安定領域は広がることがわかった。

(2) 高い周波数で振動する伝送遅延を伴う相互作用で結合されたカオス発振回路の実験的検討について、以下の結果が得られた。

① 振動する伝送遅延に伴う振動停止現象が実験的に観測できた。

② 振動停止現象が生じるパラメータ領域を解析的に得た。さらに、実験回路のパラメータを様々な値に設定し、解析的な領域と比較検討した。その結果、両者は極めて正確に合致していることを確認した。

③ 伝送遅延の振動周波数は、あまり高いものでなくても、振動停止現象が誘発されることを実験的に観測した。

(3) 伝送遅延を伴った相互作用によって遅延発振器に誘発された振動停止現象について、以下の結果が得られた。

① 平衡点の安定性を記述する特性方程式は、対角化などの数学的な処理を施すことにより、簡単な方程式に帰着させることができた。

② この簡単な特性方程式には、相互作用のトポロジーに依存したパラメータが含まれている。トポロジーや発振器の個数に依存しない相互作用の設計は、このパラメータを不確かさで見なしたロバスト安定論によって、比較的簡単に扱うことができた。

③ 相互作用における結合強度と伝送遅延の系統的な設計手順を導出した。特に、伝送遅延が長くても安定性が保持できる設計手法も提示した。

(4) 直流給電マイクログリッドの安定化については、以下の結果が得られた。

① 従来のパワエレ分野のように、回路方程式を直接扱うのではなく、適切な変数変換を施すことで、パラメータ数を大幅に削減することができた。

② 分岐解析を行うことで、平衡点(動作点)の安定化・不安定化のメカニズムを、非線形力学的の視点で明らかにした。

③ 自励振動を抑制する遅延コントローラーの設計手法を提案した。また、その特性を数値シミュレーションで検証した。

(5) 上記の(1)～(4)から派生した諸問題や、研究目的に沿った様々な課題の解決で得られた主な結果は以下の通りである。

① 極めて弱い結合によってサブシステムに誘発される周期的な振動現象の解明

② 遅延を伴うON/OFFコントローラーによるサブシステムの安定化

③ 複数の伝送遅延を伴う結合遅延発振器に生じる振動停止現象を誘発するパラメータ設計

④ 振動する伝送遅延が一部の相互作用に伴う結合発振器に生じる振動停止現象の調査

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 12 件)

① K. Konishi, Y. Sugitani, and N. Hara, Analysis of a dc bus system with a nonlinear constant power load and its delayed feedback control, Physical Review E, vol. 89, p. 22906, 2014, 査読有, 10.1103/PhysRevE.87.042908

② L.B. Le, K. Konishi and N. Hara, Topology-free design for amplitude death in time-delayed oscillators coupled by a delayed connection, Physical Review E, vol. 87, p. 42908, 2013, 査読有, 10.1103/PhysRevE.87.042908

③ Y. Sugitani, K. Konishi, and N. Hara, Stability analysis of amplitude death induced by a partial time-varying delay connection, Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 18-21, 2013, 査読有

④ K. Konishi, Luan Ba Le, and N. Hara,

⑤ K. Konishi, Y. Sugitani, and N. Hara, Stability analysis of amplitude death induced by a partial time-varying delay connection, Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 18-21, 2013, 査読有

⑥ K. Konishi, Luan Ba Le, and N. Hara,

- Stabilization of a steady state in oscillators coupled by a digital delayed connection, European Physical Journal B, vol. 85, p. 166, 2012, 査読有, 10.1140/epjb/e2012-30012-8
- ⑤ Y. Sugitani, K. Konishi and N. Hara, Experimental verification of amplitude death induced by a periodic time-varying delay-connection, Nonlinear Dynamics, vol. 70, pp. 2227-2235, 2012, 査読有, 10.1007/s11071-012-0613-x
- ⑥ Luan Ba Le, K. Konishi, and N. Hara, Design of amplitude death in a pair of time-delayed chaotic oscillators coupled by a multiple delay connection, Proc. of IEEE Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, pp. 257-260, 2012, 査読有
- ⑦ Y. Sugitani, K. Konishi, and N. Hara, Stabilization of steady states in oscillators coupled by a partial time-varying delay connection, Proc. of IEEE Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, pp. 261-264, 2012, 査読有
- ⑧ Y. Sugitani, K. Konishi, and N. Hara, Stability analysis of amplitude death induced by a time-varying delay connection in network oscillators, Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 922-925, 2012, 査読有
- ⑨ Luan Ba Le, K. Konishi, and N. Hara, Design of amplitude death in time-delay oscillators coupled by a delayed connection, Proc. of Physcon, CSI-3, 2011, 査読有
- ⑩ K. Mizobata, K. Konishi and N. Hara, Stable periodic orbits induced by an extremely-weak diffusive connection in a pair of coupled chaotic oscillators, Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 623-626, 2011, 査読有
- ⑪ Y. Sugitani, K. Konishi and N. Hara, Time-varying delay-connection induced amplitude death in a pair of double-scroll circuits, Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 666-669, 2011, 査読有
- ⑫ K. Kanaoka, K. Konishi, Luan Ba Le and N. Hara, Experimental verification of delayed feedback control based on act-and-wait concept, Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 705-708, 2011, 査読有
- [学会発表] (計 20 件)
- ① 築地美由樹, 原尚之, 小西啓治, 結合振動子系を用いたロボット群のフォーメーション制御と実証実験, 電気学会全国大会, 2014年03月18日, 愛媛大学(愛媛県・松山市)
- ② 渡辺智彦, 杉谷栄規, 小西啓治, 原尚之, 遅延結合写像系におけるカオス同期の収束性とネットワーク構造の関係, 電気学会全国大会, 2014年03月18日, 愛媛大学(愛媛県・松山市)
- ③ 杉谷栄規, 渡辺智彦, 小西啓治, 原尚之, 結合遅延に関係なく同期が誘発される一次元写像系の設計, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2014年03月10日, 上智大学(東京)
- ④ L. B. Le, Y. Sugitani, K. Konishi, N. Hara, Amplitude death in high-dimensional oscillators coupled by a delayed connection, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2014年03月10日, 上智大学(東京)
- ⑤ 築地美由樹, 原尚之, 小西啓治, 結合振動子系を用いたロボット群のフォーメーション制御, 自動制御連合講演会, 2013年11月17日, 新潟大学(新潟県・新潟市)
- ⑥ 渡辺智彦, 杉谷栄規, 小西啓治, 原尚之, 結合遅延に依存せず同期現象が生じる遅延結合カオス写像系の設計, 自動制御連合講演会, 2013年11月17日, 新潟大学(新潟県・新潟市)
- ⑦ 小西啓治, 杉谷栄規, 原尚之, 定電力負荷を伴う直流マイクログリッドシステムの遅延フィードバック制御, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2013年10月29日, サポートホール高松(香川県・高松市)
- ⑧ 小西啓治, 杉谷栄規, 原尚之, 定電力負荷を伴う直流マイクログリッドシステムの分岐解析, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2013年9月27日, 岐阜大学(岐阜県・岐阜市)
- ⑨ Y. Sugitani, K. Konishi, and N. Hara, Delay independent design for chaotic synchronization in delay-coupled Bernouilli map networks, Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, 2013年07月11日, Palazzo Ateneo(バーリ・イタリア)
- ⑩ レルアン バ, 小西啓治, 原尚之, Design of a delayed connection for inducing amplitude death in a topology-uncertain time-delayed oscillator network, システム制御情報

学会研究発表講演会, 2013年05月16日, 兵庫県民会館(兵庫県・神戸市)

- ⑪ 杉谷栄規, 小西啓治, 原尚之, 同期現象が生じる遅延結合カオス写像系の設計～結合遅延に依存しない設計手法の提案～, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2013年03月15日, 千葉大学(千葉県・千葉市)
- ⑫ 杉谷栄規, 小西啓治, 原尚之, 部分的時変遅延結合により誘発される振動停止現象の実験的検証, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2013年01月25日, 北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑬ 小西啓治, 原尚之, 動的結合ネットワークの振動停止現象を誘発する結合パラメータの設計, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2012年12月17日, 福井市地域交流プラザ(福井県・福井市)
- ⑭ 杉谷栄規, 小西啓治, 原尚之, 時変ネットワーク構造を有する遅延結合発振器群に生じる振動停止現象, 自動制御連合講演会, 2012年11月18日, 京都大学(京都府・京都市)
- ⑮ 上野結貴, 杉谷栄規, LuanBa Le, 小西啓治, 原尚之, 遅延を伴うカオス発振器の動的遅延フィードバック制御, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2012年09月12日, 富山大学(富山県・富山市)
- ⑯ 杉谷栄規, 小西啓治, 原尚之, 時変遅延結合された発振器ネットワークに生じる振動停止現象の安定性解析, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2012年04月20日, いせシティプラザ(三重県・伊勢市)
- ⑰ 小西啓治, 遅延信号が誘発するシステムの安定化現象, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会, 2011年11月23日, オリンピック記念青少年総合センター(東京)
- ⑱ 杉谷栄規, 小西啓治, 原尚之, 時変遅延結合を伴うカオス結合発振器に生じる振動停止現象の実験的検証, 自動制御連合講演会, 2011年11月20日, 豊橋技術科学大学(愛知県・豊橋市)
- ⑲ 溝端和範, 小西啓治, 原尚之, 非常に弱く拡散結合された2つのカオス発振器に生じる周期軌道安定化, 自動制御連合講演会, 2011年11月20日, 豊橋技術科学大学(愛知県・豊橋市)
- ⑳ 金岡和裕, 小西啓治, レルアンバ, 原尚之, Act-and-wait 遅延フィードバック制御系の実装, 電気関係学会関西支部連合大会, 2011年10月29日, 兵庫県立大学(兵庫県・姫路市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小西 啓治 (KONISHI KEIJI)
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号：90259911

(2) 研究分担者

原 尚之 (HARA NAOYUKI)
大阪府立大学・工学研究科・助教
研究者番号：10508386