

令和元年6月21日現在

機関番号：14201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16125

研究課題名（和文）一般化位相縮約理論が拓く生体リズム現象の予測と制御に向けた新展開

研究課題名（英文）Prediction and Control of Biological Rhythms by Generalized Phase Reduction Theory

研究代表者

紅林 亘 (Kurebayashi, Wataru)

滋賀大学・データサイエンス教育研究センター・助教

研究者番号：70761211

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究計画は、一般化位相縮約理論をその理論面において深化するとともに、その応用研究を加速することを意図して計画された。一般化位相縮約理論は、リミットサイクル振動子を一次元に縮約する従来の位相縮約理論を拡張したもので、大きく変動する外力の下でも適用でき、その応用可能性を広げる手法である。この新理論に基づき、本計画ではまず、強く相互作用するリミットサイクル振動子を縮約し、位相方程式を導くことを可能にする理論を確立した。また、この手法をさまざまな実システムへ応用できるように、システムへの入出力データからその同定を行う、つまり、システムの応答特性を表す感受関数と呼ばれる関数を推定する手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本計画において確立した強く結合した系における位相縮約理論は、これまで理論的な解析が難しかった多くの系においてこれを可能にし、同期特性やそのパラメータとの関連がより容易に包括的に解析できるようになると期待される。こうした系は、例えば同期を必要とする電気電子回路の設計などに直ちに应用することができると考えられる。また、本計画では、システムへの入出力データからシステム同定を行う手法の開発も行った。この手法は、リズムを持つ未知のシステムについて、簡便なシステム同定を可能にし、それによって対象を最適制御するなどの応用が可能になると期待される。

研究成果の概要（英文）：The aim of this project is to theoretically extend the generalized phase reduction theory and to promote the applied studies of this theory. The generalized phase reduction theory is a theoretical method that extends the conventional phase reduction theory by which we can reduce a limit-cycle oscillator to a one-dimensional phase equation, which enables us to apply this method to limit-cycle oscillators under largely varying external force. By using this new theory, we established a new phase reduction theory for strongly coupled limit-cycle oscillators. In addition, in order to promote the applied studies of this theory, we developed a system identification method for estimating the system's response property characterized by response functions from input-output data.

研究分野：非線形力学

キーワード：非線形力学系 リミットサイクル振動子 同期現象 システム同定 最適制御 位相縮約

1. 研究開始当初の背景

自律的なリズムを持つシステム(振動子)は、歩行等の運動制御から脳神経系における情報処理・記憶に至るまで生体内の随所に存在し、それらの相互作用によって複雑な機能が実現されている。こうした系の解析において、応用数学の分野では位相縮約理論 [Nakao, 2015] と呼ばれる基礎理論が重要な役割を演じてきた。この理論は、振動子の力学系を低次元化(縮約)して数学的に扱いやすい位相モデルで近似記述し、一般には困難な理論解析を可能にする。これにより、同期現象やパターン形成といった集団現象を理論的に予測することが可能となる。

位相縮約理論は伝統的な手法だが、最近多様な分野への応用が活発化し、これに呼応して理論面での深化・拡張も急速に進んでいる。位相縮約理論はここ数年間で、神経系や呼吸系等の生体リズム現象において動的に変化する相互作用形態のベイズ推定 [Stankovski 他, 2014] や、神経細胞の発火タイミングの最適制御 [Nabi 他, 2012]、歩行運動における冗長自由度の有効性解析等、生命科学・生物工学分野への理論的アプローチに応用され、電気・電子回路の解析 [Demir, 2000]・最適設計 [Maffezzoni, 2015] や、同期を頑健化する最適な周期入力波形の設計 [Zlotnik 他, 2013] 等、電気・制御工学分野にも波及している。また、理論面では、これまで位相縮約理論が適用できなかった多様な系に対して、適用を可能にする拡張が提案されている。確率的入力に駆動される系 [Goldobin 他, 2010]、複数の振動数を持つ系 [Demir 他, 2010]、振動子の大規模結合系 [Kawamura 他, 2010]、時間遅延を持つ系 [Novicenko 他, 2012]、反応拡散系 [Nakao 他, 2015]、ダイナミクスに不連続遷移を含むハイブリッド系 [白坂 他, 2017] 等への適用が可能となった。

しかし、位相縮約理論の適用には、入力の強度に関して厳しい理論的制約があり、この点は応用研究の障害となる重大な問題である。位相縮約理論が適用できるのは、振動子が受ける入力が十分弱い場合に限られるが、応用上必ずしもこの条件は満たされない。特に、最適制御への応用では、この制約を考慮することによって制御目標が制限されてしまう [Nabi 他, 2012]。また、真性細菌のクオラムセンシング [Garcia-Ojalvo 他, 2004] 等、強い相互作用に由来した興味深い生命現象も多いが、こうした現象に対する理論的アプローチは一般に困難であるのが現状である。

そこで我々は、この理論的制約を大幅に緩和した一般化位相縮約理論及び一般化位相モデル [紅林 他, PRL, 2013] を提案した。この手法は、入力が大きく変動する場合にも有効であり、数値シミュレーションでは従来の数十から数百倍の入力にも適用できることが示されている。さらに、このモデルの理論的な扱いやすさは従来とほぼ同様であるため、幅広い応用が期待される。一般化位相縮約理論では、振動子の状態空間に入力の自由度を加えた拡張相空間を導入し、系の性質の入力による変化を考慮に入れるという一般化を行った。この全く新しい数理的技巧は、様々な問題への応用可能性が考えられるが、その試みはまだ道半ばである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、一般化位相縮約理論を基礎として、生体リズム現象に関する従来の予測・制御手法を拡張し、より幅広い応用が可能な新しい理論的基盤を確立することである。振動子が強い入力を受ける場合や、強く相互作用する場合にも有効な手法を確立することで、これまで不可能だった状況下でも予測・制御を可能にする。また、強い入力に特有の興味深い現象に対して、初めて位相縮約による理論的アプローチを試み、その機序を数理的に解明する。

3. 研究の方法

解析的アプローチ、ならびに数値計算による検証作業による。

4. 研究成果

これまでは困難であった強く結合した振動子の位相縮約を可能にする新しい理論を確立し、こうした系の同期解析を系統的に行うことが可能になった。また、一般化位相縮約理論に基づくシステム同定手法を開発した。これにより、未知のリズム素子に対して、システム同定やさらにその最適制御を試みることが可能になると期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7 件)

1. M. Okano, W. Kurebayashi, M. Shinya, & K. Kudo, "Hybrid Dynamics in a Paired Rhythmic Synchronization-Continuation Task", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, in press (2019).
2. S. Shirasaka, W. Kurebayashi, and H. Nakao, "Phase-amplitude reduction of transient dynamics far from attractors for limit-cycling systems", *Chaos* 27(2), 023119 (2017).

3. S. Shirasaka, W. Kurebayashi, and H. Nakao, "Phase reduction theory for hybrid nonlinear oscillators", *Physical Review E* 95, 012212 (2017).
4. W. Kurebayashi, S. Shirasaka, and H. Nakao, "Optimal Model Selection for Estimating Stochastic Koopman Modes", *Proceedings of 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, p. 12 (2017).
5. W. Kurebayashi, S. Shirasaka, and H. Nakao, "Phase Reduction Theory for Strongly Coupled Limit-Cycle Oscillators", *Proceedings of 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, p. 342 (2017).
6. W. Kurebayashi, S. Shirasaka, and H. Nakao, "Optimal Parameter Selection for Kernel Dynamic Mode Decomposition", *Proceedings of 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, p. 370-373 (2016).
7. Y. Kawamura, S. Shirasaka, H. Nakao, W. Kurebayashi, "Koopman Operator Approach to Vital Sign Detection", *Proceedings of 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, p. 695 (2016).

〔学会発表〕(計 11 件)

1. 紅林 亘, 岡野 真裕, 進矢 正宏, 工藤 和俊, "ヒトのリズム協調におけるテンポ加速現象の数理解析", 日本物理学会年会, 九州大学 (2019).
2. 紅林 亘, 白坂 将, 中尾 裕也, "強く結合した振動子系の位相縮約", 日本物理学会秋季大会, 同志社大学 (2018).
3. W. Kurebayashi, M. Okano, M. Shinya, and K. Kudo, "Noise-Induced Frequency Increase in Synchronization of Human Musical Rhythms", *Dynamics Days Europe*, Loughborough, U.K. (2018).
4. W. Kurebayashi, M. Okano, M. Shinya, and K. Kudo, "Noise-Induced Frequency Increase in Synchronization of Human Musical Rhythms", *Dynamics Days U.S.*, Evanston, U.S.A. (2019).
5. W. Kurebayashi, S. Shirasaka, and H. Nakao, "Optimal Model Selection for Estimating Stochastic Koopman Modes", *2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, Mallorca, Spain (2017).
6. W. Kurebayashi, S. Shirasaka, and H. Nakao, "Phase Reduction Theory for Strongly Coupled Limit-Cycle Oscillators", *2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, Mallorca, Spain (2017).
7. M. Okano, W. Kurebayashi, M. Shinya, and K. Kudo "A Coupled Oscillator Model for Acceleration of a Paired Tapping through Mutual Timing Adjustment for Synchronization", *Studies in Perception and Action XIV*, Groningen, Netherlands (2017).
8. W. Kurebayashi, S. Shirasaka, and H. Nakao, "Optimal Parameter Selection for Kernel Dynamic Mode Decomposition", *2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, Yugawara, Japan (2016).
9. Y. Kawamura, S. Shirasaka, H. Nakao, W. Kurebayashi, "Koopman Operator Approach to Vital Sign Detection", *2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, Yugawara, Japan (2016).
10. 佐藤 孝之, 白坂 将, 中尾 裕也, 紅林 亘, "一般化位相モデルに基づいた自励振動子のシステム同定", IEICE 非線形問題研究会, 日立製作所中央研究所 (2016).
11. 紅林 亘, 白坂 将, 中尾 裕也, "カーネル化された動的モード分解法のための最適なパラメータ決定法", IEICE 非線形問題研究会, 機械振興会館 (2016).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6 . 研究組織

(1)研究分担者
なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：白坂 将
ローマ字氏名：Sho Shirasaka

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。