

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月24日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18107

研究課題名(和文) 内部ダイナミクスを利用しない疑似周期軌道情報を用いた新しいカオス制御法の開発

研究課題名(英文) A new chaos controlling scheme using pseudo periodic orbit without mathematical model of dynamics

研究代表者

伊藤 大輔 (Ito, Daisuke)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：90759250

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：非線形力学系の特性を活用した、数理モデルを利用しない新たなカオス制御手法の提案を行った。Floquet理論により、元の系の安定性の指標を用いることで、フィードバック系の安定性を求めることが可能であることが示された。これは、制御ゲイン設計に有益な結果であるといえる。また、実問題応用へ向けて、パワーエレクトロニクス回路の一種である降圧型スイッチングコンバータ回路にて有効性を確認した。本研究の派生である不安定軌道探索問題への応用に関しては、当初の予想通り、稠密なアトラクタが確認できる系においては種々の不安定閉軌道を取得することができることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、数理モデルを取得することができない問題に対して利用できる新たなカオス制御手法を提案している。例えば、動作条件が正確に推定できない場合や不確定要素が多いシステムに対して、観測結果から自律的に系の安定化を実現することができる有用性の高い制御スキームである。

研究成果の概要(英文)：A new chaos controlling method that uses no mathematical models of target systems is proposed. From the Floquet theory, the controlling gain of proposed controller can be designed based on the stability analysis of the target systems. It is confirmed that this controlling scheme is suitable for practical application, i. e., switching DC/DC converter as power electrical circuits. On the other hand, the proposed scheme can be applied for analysis of unstable periodic orbit.

研究分野：非線形力学系

キーワード：カオス制御 非線形力学系 不安定周期軌道

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

システムの振る舞いが常微分方程式によって記述され、その方程式が非線形性や高次元の特性を持つ場合、それらの影響でシステムの振る舞いが非常に複雑になる現象が観測される。これはカオス現象と呼ばれ、決定論的システムから生み出されるにも関わらず、定常状態で周期的な振る舞いを示さず、長期的な予測が困難となる性質を持つ。そのため、一部の工学分野では、敬遠されることが多い。

カオス現象を抑制するため、様々な制御方法が提案されているが、これら制御方法の多くに共通していることは、1) 目標軌道は、システムが本来持つ不安定な周期軌道である。2) 制御完了後、目標軌道が現れ、制御量は0に収束する。3) 目標軌道の形状や安定性等、詳細な情報を必要とする。つまり、従来のカオス制御手法は制御目標とする不安定周期軌道はもとより、対象の数理モデルが明らかでなければ、利用が難しいといえる。

### 2. 研究の目的

先行研究においては、 $n$ 次元連続時間力学系に生じる周期解の接線分岐について、その残留アトラクション領域を用いて安定化する研究に従事した。本研究では、上記安定化手法を拡張し、疑似周期軌道と呼ばれる不安定周期軌道の近傍を巡る解軌道を用いてシステムの状態を観測するのみで制御器を設計する枠組みを開発し、数理モデルが明らかでないシステムにも適用可能で、かつ限られた情報で安定化できる高性能制御系を確立する。

### 3. 研究の方法

(1) カオス軌道から得られる疑似周期軌道と不安定周期軌道との整合性の調査  
安定性・分岐解析を用いて、疑似周期軌道の定義及び得られた軌道と不安定周期軌道との相似度・相対的位置関係を明らかにする。これら取り組みは、安定化制御・不安定周期軌道探索へ活用される。

(2) 疑似周期軌道を用いた高効率なフィードバック制御機構の検討  
疑似周期軌道を用いた安定化制御機構としてフィードバック制御をもとに検討する。主に数値実験により安定領域や応答速度を視覚化し、先行制御法の制御性能とロバスト性、可制御ゲイン範囲や応答速度を比較する。

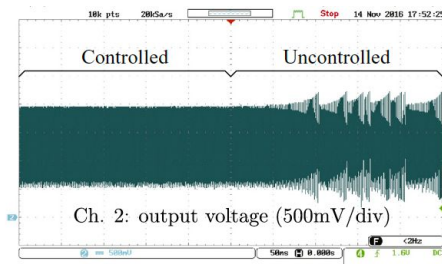
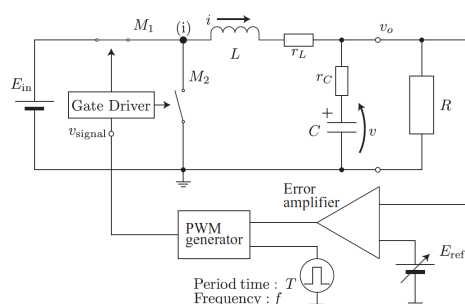
(3) 実問題への適用性及びその場合の効率・ロバスト性の調査  
実問題を想定し、高次元化・複雑システムへの対応を行う。また実回路実験も行い、数値実験と実回路実験での制御結果の過渡応答を比較し整合性を評価する。

(4) 不安定周期軌道自動探索機構の検討  
得られた知見を非線形・分岐理論へフィードバックするため、不安定周期軌道を探検・解析する機構を確立する。これは、安定化制御問題の拡張となっており、ここまでの知見により十分実現可能である。

### 4. 研究成果

(1) 3次元自律系における安定性解析を行いカオスの稠密性と不安定軌道の距離の定量化、可視化を行った。疑似周期軌道を得るためには、不安定軌道に十分近い準閉軌道を得る必要があり、これにはカオスの再帰性に依る部分が多い。研究成果より、稠密なカオスの場合、比較的容易に疑似周期軌道を得ることができるが、そうでない場合、目標の閉軌道がカオスアトラクタから空間的に離れた場所に位置するため、疑似周期軌道を得るのが困難になる場合が明らかとなった。

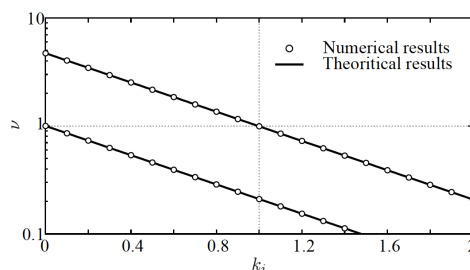
また、実問題応用への準備として、パワーエレクトロニクス回路の一つである降圧型スイッチングコンバータ回路を対象として、分岐構造の解析を行った。数値解析の結果から、回路が不安定擾乱を起こす負荷-動作周波数の組み合わせをパラメタ空間として明らかにした。また、不安定周期軌道の情報を蓄積し、擾乱時の回路の振る舞いと不安定周期軌道の関係性を明らかにした。それらの成果を制御問題へ発展させるため、コンバータ回路を駆動するクロックパルスを変調することで不安定周期軌道を安定化し、回路の擾乱を抑制する新たな制御法を提案することに成功した。



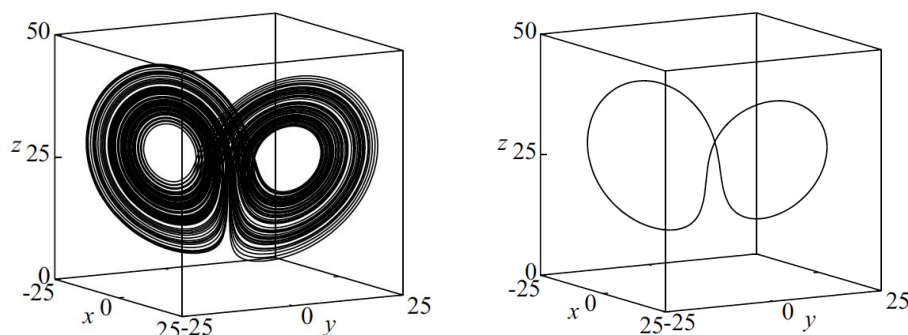
(c) Time response with and without stabilization (50msec/div)

(2) 制御系設計のための、フィードバック系の安定性に関する数学的理論背景を検討した。Floquet 理論により、元の系の安定性の指標を用いることで、フィードバック系の安定性を求めることが可能であることが示された。これは、数値シミュレーション結果との比較より非常に良く一致していることが確認され、制御ゲイン設計に有益な結果であるといえる。

これまで、提案する疑似周期軌道を用いた安定化制御手法におけるフィードバックゲインの設計は試行錯誤が主であった。これは、疑似周期軌道が数学的に存在しない軌道であるため、理論的な考察が行えないためである。Floquet 理論を拡張することにより、フィードバック系の安定性が評価できることが確認された。これにより、制御ゲイン設計への応用が可能となった。



(3) 実問題応用へ向けて、パワーエレクトロニクス回路の一種である降圧型スイッチングコンバータ回路を対象として、簡易数理モデルによる提案制御手法の有効性を確認した。その結果、スイッチの切り替わりを示す、断続イベント発生前後に制御系の安定性を崩す不安定な動作が確認された。本現象がスイッチの切り替わりによるものかを確認するため、非線形性が高く、なめらかな高次の電気回路系である BvP 回路や Lorenz model にて同様の実験を行い、提案手法の有効性を確認した。よって、本手法において、断続特性が引き起こす不連続性が制御の振る舞いに少なからず影響することが明らかとなった。



(4) 本研究の派生である不安定軌道探索問題への応用に関しては、稠密なアトラクタが確認できる系においては種々の不安定閉軌道を取得することができるが、アトラクタの引き込み領域外に存在する、安定・不安定軌道の探索は困難であることが確認された。しかし、解の収束には Newton's 法を用いた高速な収束性を有し、Newton's 法の課題である初期値問題を解決できる点で、有効な手法であると言える。

## 5. 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] ( 計 2 件 )

1. Daisuke Ito, Tetsushi Ueta, and Kazuyuki Aihara, “ Bifurcation analysis of eight coupled degenerate optical parametric oscillators, ” Journal of Physica D: Nonlinear Phenomena, Elsevier, vol. 372, pp. 22–30, 10.1016/J.PHYSD.2018.01.010, 2018, 査読有.
2. Daisuke Ito, Hiroyuki Asahara, Takuji Kousaka, Tetsushi Ueta, “ Clock pulse modulation for ripple reduction in buck-converter circuits, ” Chaos, Solitons and Fractals: the interdisciplinary journal of Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena, Vol. 111, pp. 138–145, 2018, 査読有.

[ 学会発表 ] ( 計 6 件 )

1. 伊藤大輔, 中村誠, 高坂拓司, “ハイサイド MOS-FET ゲートドライバ回路で発生する断続特性の数理モデルの検討,” 2019 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会, pp. NLS-1, 2019 年, 査読有.
2. 小倉駿介, 山本皓平, 伊藤大輔, “降圧型 DC-DC コンバータのクロック変調による臨界モード維持制御手法,” 2017 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会, pp. NLS-29, 2017 年, 査読有.

3. D. Ito, “ Chaos controlling with clock pulse modulation for DC-DC converter circuit, ” Proceedings 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 71 74, 2016, 査読有.
4. 伊藤大輔, 上田哲史, “ External force control における制御ゲインと安定性の関係の理論検討, ” 第 59 回自動制御連合講演会, SaA2-2, 1078 1081 頁, 2016 年, 査読無 .
5. 三宅雄貴, 伊藤大輔, “ 周期パラメタ摂動によるパルス変調型カオス制御手法の提案, ” 2016 年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会, pp. NLS-9, 2016 年, 査読有.
6. 伊藤大輔, 上田哲史, “ Lorenz model に対する External force control とその安定性解析, ” 電子情報通信学会技術報告, vol. NLP2016-17, pp. 83 86, 2016 年, 査読無.

〔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〕

無し

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者

無し

(2)研究協力者

無し

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。