

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420445

研究課題名(和文) 瞬時リアプノフ指数指定による非線形システムの非安定化に関する研究

研究課題名(英文) Research on Destabilization of Nonlinear Systems by Assigning Instantaneous Lyapunov Exponent

研究代表者

松尾 孝美 (Matsuo, Takami)

大分大学・工学部・教授

研究者番号：90181700

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、摩擦がある場合に部分線形化モデルを用いて、振子がホモクリニック軌道に達する倒立振り制御系を構成した。このようなコントローラは、不安定な制御系を用いて振子の振り上げを可能にできることを示唆している。まず、振り部分システムに対して、提案したコントローラが、倒立点を含むホモクリニック軌道に漸近的に収束することを、負値をもつエネルギー関数の2乗値を用いたリアプノフ関数を用いて証明した。ついで、台車の安定性を保証するために、forwarding的な手法を導入する。台車部分システムに対して、1次安定システムの2乗をリアプノフ関数として定義することにより、安定化を達成した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we deal with the control method for rotational movements of a pendulum using a separatrix. We design a controller that attains a homoclinic motion or a heteroclinic motion of the pendulum and the asymptotic stability of the cart by using a kind of forwarding control design. First, we derive a controller that converges to a homoclinic orbit via a Lyapunov function of the pendulum subsystem. Next, we give a nonlinear stabilizing controller via another Lyapunov function of the cart subsystem. Moreover, using the third Lyapunov function and adding a complementary control input, we guarantee that the pendulum converges to the homoclinic orbit and the cart is stabilized. The simulation and the experiment using the rapid controller prototyping system are performed to demonstrate the forward upward circling and the giant swing of the pendulum. Moreover, we propose an estimation method for the Malthus parameter to calculate the instantaneous Lyapunov exponent.

研究分野：制御理論

キーワード：非線形制御理論 リアプノフ関数 リアプノフ指数 適応オブザーバ フォワードリング手法

1. 研究開始当初の背景

従来提案されているリアプノフ指数は、動的システムの各時刻における 2 つの軌道間の広がり率として定義され、指数関数 $\exp(\lambda t)$ で近似した時に傾き λ で表わされる量である。しかしながら、従来提案されているリアプノフ指数は、無限時間区間での極限值が必要で、また、動的システムのパラメータが既知であるなどの制約条件がある。我々は、時系列データが基準関数と比較したときの減衰/成長度を与える瞬時リアプノフ指数を提案している。特に、基準関数を時間の指数乗で与えることにより、指数関数よりも遅い減衰/成長度を評価することができる特徴を持っている。さらに、定義した瞬時リアプノフ指数において、時系列データの微分値を用いることにより平衡点からの局所的減衰/成長度を与えることができること、また、直接時系列データを用いることにより、指定した基準点からの大域的減衰/成長度を与えることができることを明らかにしている。また、制御理論における推定器の推定性能を評価するために、2 つの軌道が同一時刻で指定した許容誤差内に存在するかどうかを判定する同期度を提案している。リアプノフ指数は、安定性の数式的証明が難しい非線形システムにおいて、その時系列データの減衰/成長度の指標として瞬時リアプノフ指数や同期度を見ることにより、現時点での減衰/成長度や同期度をリアルタイムに評価できることを明らかにしている。

また、従来のリアプノフ指数を指定する入力を用いることにより、安定化およびカオス化を達成するリアプノフ指数配置法が提案されている。この手法は、制御理論からみれば、近似線形系の極配置であり、唯一の違いは、不安定固有値を指定することにより、非線形系をカオス化できることである。このため、リアプノフ指数配置とい

っても、特に非線形系の特性を指定しているわけではない。これは、従来のリアプノフ指数が局所的成長度・減衰度をみていることに起因している。そこで、大域的な成長・減衰度の尺度である瞬時リアプノフ指数を用いることにより、非線形系特有の特性を指定することが可能ではないかと考えている。さらに、従来法では、対象の Jacobi 行列が必要であるが、我々の提案した瞬時リアプノフ指数では、時系列データのみで計算が可能であるので、ダイナミクスの未知な対象にも用いることができる。このように、瞬時リアプノフ指数配置は、線形系の極配置の非線形系への本質的拡張であり、非線形系の安定化、不安定化、カオス化を、制御理論の枠組として構築することが期待される。

2. 研究の目的

まず、理論的には、これまで我々が提案している 2 種類の瞬時リアプノフ指数の非線形系における特性を明らかにする。特に、ホモクリニック軌道やヘテロクリニック軌道などの非線形系特有の周期軌道における特性を明らかにする。これにより、安定化、周期化、不安定化、カオス化など非線形特性を指定するための瞬時リアプノフ指数の希望値を導出する。次いで、時間的極限をとる従来の瞬時リアプノフ指数と異なり、我々が提案している瞬時リアプノフ指数はダイナミクスをもつことから、瞬時リアプノフ指数が満足する非線形微分方程式を導出する。この微分方程式から、希望するリアプノフ指数をもつような入力は、通常の制御理論を活用することにより、達成できる。本研究では、特に、瞬時リアプノフ指数から構成されるリアプノフ関数を用いて、指定した瞬時リアプノフ指数に収束するような制御系設計法を提案する。特に、周期軌道と瞬時リアプノフ指数の関係について着目し、非線形系の周期軌道の振幅・周波数をどこまで調整できるのかに

ついて探求する。提案手法の有効性は、数値シミュレーションにおいては、我々がこれまで研究してきた周期軌道を有する植物の光合成ダイナミクスに適用することにより、指定した周期軌道を達成するような制御入力（外部二酸化炭素濃度および光の強度）を構成することにより検証する。さらに、どのような瞬時リアプノフ指数を指定すると、光合成系がカオス化するのかを特定し、カオス化を起こさないような制御則を提案する。

次に本研究では、特に周期軌道と瞬時リアプノフ指数の関係について着目することから、実験においても、周期軌道を有する倒立振り子系に着目する。従来エネルギー関数を用いた振り上げ制御法の中には、ホモクリニック軌道に収束させる制御則が提案されている。ホモクリニック軌道が達成された場合には、ちょうど鉄棒の大車輪と同じ周期軌道の運動が実現され、我々もこれまで、他手法と異なる制御則で、このような軌道を実現し、実験において確認している。本研究では、エネルギー関数ではなく、倒立振り子の瞬時リアプノフ指数を希望値に指定することにより、ホモクリニック軌道を実現する制御則を構成し、実験により、その有効性を検証する。また、振り子系は、カオス運動も生成することから、カオス化を達成するような制御則を、瞬時リアプノフ指数指定から達成できることを実験的に明らかにする。

3. 研究の方法

研究は、制御理論解析（松尾）、実験およびデータ解析（末光）から構成される。

(1) 制御理論解析・数値シミュレーション：瞬時リアプノフ指数の非線形系における特性解析、瞬時リアプノフ指数の動特性方程式の導出、およびリアプノフの安定論を用いた瞬時リアプノフ指数配置法を非線形制御理論と力学系理論から導出する。さらに、光合成系における提案手法の有効性を数値シミュ

レーションにより検証する。

(2) 実験およびデータ解析：倒立振り子実験系を用いて、瞬時リアプノフ指数配置によるホモクリニック軌道に収束する制御則の有効性を実証する。また、実験により得られた時系列データに対する瞬時リアプノフから倒立振り子の周期運動とカオス運動の相違を明らかにする。さらに、振り子運動のカオス化を達成する瞬時リアプノフ指数の特定と実験による検証を行う。

4. 研究成果

本研究では、以下の分野に分けて非線形システムの非安定化と同期現象およびリアプノフ指数の関係について、以下の成果が得られた。

(1) 倒立振り子制御系

倒立振り子の安定化は、非線形制御システムの安定化問題として有名な問題である。本研究では、摩擦がある場合に Spong らの部分線形化モデルを用いて、振子がホモクリニック軌道に達する倒立振り子制御系を構成した。このようなコントローラは、不安定な制御系を用いて振子の振り上げを可能にできることを示唆している。まず、振り子部分システムに対して、提案したコントローラが、倒立点を含むホモクリニック軌道に漸近的に収束することを、負値をもつエネルギー関数の 2 乗値を用いたリアプノフ関数を用いて証明した。ついで、台車の安定性を保証するために、forwarding 的な手法を導入する。台車部分システムに対して、1 次安定システムの 2 乗をリアプノフ関数として定義することにより、安定化を達成した。さらに、全体の安定性を保証するために、振り子系のリアプノフ関数に台車系のリアプノフ関数を追加することにより、振り子と台車の相互干渉に対するフィードバック補償項を導出し、この補償項が振り子のスウィングコントローラと台車の安定化コントローラの比率を重み付けする機能を

持っていることを示した。最後に、提案したコントローラの有効性を、計算機シミュレーションと実験により確認した。

(2) 心拍リズムの信号解析

Lyapunov 指数のうち最大のものを、最大 Lyapunov 指数といい、非線形システムの解(フロー)が遠ざかっていく速さのもっとも大きなものを代表している。以前、我々は未知パラメータを含む場合でも計算できる時系列を用いた新たな Lyapunov 指数である瞬時 Lyapunov 関数 (instantaneous Lyapunov exponent, ILE) を定義し、指数の符号を用いて安定性の判別が可能であることを示した。一方、本研究では、マルサス係数は、線形化した微分方程式の増殖率であることから、マルサス係数により、時間発展の増幅率/減衰率を評価することができると考え、我々がこれまで提案している適応速度推定器を応用することにより、時系列データからマルサス係数を推定するための機構を適応オブザーバを用いて構成することを提案した。さらに、数値的検証のための時系列として、心拍リズムを用いた。特に、Gois らの Van der pol 振動子モデルから得られる各種疾患のシミュレーションデータとデータベース physionet の実測データを用いて、瞬時リアプノフ指数、マルサス係数推定値、およびリカレンスプロット間で、どのような特徴がでるのかを、正常波形、心室粗動波形、および洞性除脈波形と比較したが、モデルから導出したシミュレーションデータと physionet の実測データで特徴が大きく異なっていたことがわかり、シミュレーションモデルの妥当性を検証するための手法として、提案手法が適用可能ではないかとの結論に至った。

(3) 光合成リズムの同期解析

自己組織化の有名な例として、植物の光合成がある。特に、サボテンなどの多肉植物は、CAM 型光合成 (crassulacean acid metabolism, ベンケイソウ型有機酸代謝) と呼ばれる乾燥

環境に高度に適応した炭素代謝機構を進化させている。Blasius らは、1つの細胞の生体時計の機構を4次の非線形微分方程式としてモデル化している。本研究では、このモデルをもとに、細胞質内二酸化炭素濃度および細胞質内リンゴ酸濃度が測定可能という条件下で、液胞内リンゴ酸濃度と液胞膜内リン脂質分子の輸送現象を特定する膜並び非線形特性を推定するオブザーバを提案し、MATLAB シミュレーションを行った。その結果、2つの細胞間で結合がない場合と結合のある福田らのモデルでは差が出ることで追いつき結合の場合には、同期が弱くなることをケイ線機シミュレーションにより示した。

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 8件)

Hiroya Oka, Yuji Maruki, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo: Nonlinear Control for Rotational Movement of Cart-pendulum System Using Homoclinic Orbit, International Journal of Control, Automation and Systems, 査読有, accepted

Tsuyoshi Ohba and Risa Matsuda, Haruo Suemitsu and Takami Matsuo: Improvement of EMC in MPPT Control of Photovoltaic System Using Auto-Tuning Adaptive Velocity Estimator, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, 27-5, 489-495 (2015) doi: 10.20965/jrm.2015.p0489.

Yuji Maruki, Kohei Kawano, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo: Adaptive Backstepping Control of Wheeled Inverted Pendulum with Velocity Estimator, International Journal of Control, Automation and Systems, 査読有, 12-5, 1040-1048 (2014), doi: 10.1007/s12555-013-0402-4.

M. Zheng, T. Matsuo, A. Miyamoto, O. Hoshino: Tonically Balancing Intracortical Excitation and Inhibition by GABAergic Gliotransmission, Neural Computation, 査読有, 26, 1690-1716 (2014), doi:10.1162/NECO_a_00612.

Yasuhito Eguchi, Tsuyoshi Ohba, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo: Auto-Tuning Velocity Estimator by Using Adaptive Observer, ICIC Express Letters, 査読有, 8-2, 427-433 (2014).

Kohei Kawano, Yuji Maruki, Haruo

Suemitsu, and Takami Matsuo : Computational and Experimental Validation of Partially Backstepping Controller for Inverted Pendulum, ICIC Express Letters, 査読有, 8-2, 553-559 (2014).

Takami Matsuo, Yusuke Totoki, and Haruo Suemitsu : Adaptive Estimation of Biological Rhythm in Crassulacean Acid Metabolism with Critical Manifold, ISRN Applied Mathematics, 査読有, vol. 2013, Article ID 856404, 9 pages, 2013. doi:10.1155/2013/856404.

Yasuhiro Kawakami, Yasuhito Eguchi, Tsuyoshi Nimiya, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Velocity and Acceleration Estimation by Iterative Learning Observer and Performance Validation with MEMS-Based Inertial Sensors, Int. J. of Advanced Mechatronic Systems, 査読有, 5-2, 113-121 (2013), oi:10.1504/IJAMECHS.2013.056001.

〔学会発表〕(計 12件)

Chisato Matoba, Haruo Suemitsu and Takami Matsuo: Dual State-Parameter Estimation of ECG Signals with Recursive Bayesian Filters, The 47th ISIC International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, Honolulu(USA), 12/5-12/8, 2015

Ryo Sakamoto, Chisato Matoba, Haruo Suemitsu and Takami Matsuo: Feedback Control of Biological Rhythm in Crassulacean Acid Metabolism by CO₂-Uptake Signal, Preprints of the 4th IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems, 首都大学東京(八王子市, 東京都), August 26-28, pp.59-64 (2015)

Chisato Matoba, Keisuke Imamasu, Haruo Suemitsu and Takami Matsuo: Parameter Estimation of Normal and Abnormal ECG Signals Using Recursive Bayesian Filters, SICE Annual Conf. 2015, July 28-30, 2015, Hangzhou(China), 129-134 (2015).

Hiroya Oka, Haruo Suemitsu and Takami Matsuo: Stabilizing Control of Inverted Pendulum via Interlaced Backstepping and Forwarding Method, SICE Annual Conf. 2015, July 28-30, 2015, Hangzhou (China), 608-613 (2015).

Chisato Matoba, Keisuke. Imamasu, Haruo Suemitsu and Takami Matsuo: Detection of Cardiac Diseases from ECG Using Nonlinear Stochastic Filters, The 46th ISIC International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, 京都工芸繊維大学(京都市, 京都府), Nov.1-2, 59-64 (2014).

Yuji Maruki, Hiroya Oka, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Forwarding Control of Cart-Pendulum System by Following

Homoclinic Orbit and Stabilizing Cart, 2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems, Oct. 22-25, 2014 in KINTEX, Gyeonggi-do(Korea), pp.105-110 (2014).

Hiroya Oka, Kohei Kawano, Yuji Maruki, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Adaptive Stabilization of Inverted Pendulum by Two-Step Control Method, SICE 2014, 北海道大学(札幌市, 北海道) 17-20, Sept 10-12, 2014.

Chisato Matoba, Keisuke Imamasu, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Dynamics Estimation of ECG by Recursive Bayesian Filtering, SICE 2014, , 北海道大学(札幌市, 北海道), 1168-1172, Sept 10-12, 2014.

Keisuke Imamasu, Chisato Matoba, Haruo Suemitsu and Takami Matsuo: Parameter Estimation of Heart Rhythm Dynamics Using Adaptive Observer, Int. Conf. on Advanced Mechatronic Systems, 東海大学(熊本市, 熊本), 73-77, Aug 10-11, 2014.

Tsuyoshi Ohba, Risa Matsuda, Haruo Suemitsu and Takami Matsuo: Improvement of EMC in MPPT Control of Photovoltaic System Using Adaptive Observer, Int. Conf. on Advanced Mechatronic Systems, 東海大学(熊本市, 熊本), 78-82, Aug 10-11, 2014.

Yuji Maruki, Kohei Kawano, Haruo Suemitsu, and Takami Matsuo : Swinging and Stabilization of Inverted Pendulum with Homoclinic Orbit, Proc. of SICE2013, 名古屋大学(名古屋市, 愛知県), 721-724 (2013).

Ryo Sakamoto, Akira Goto, Haruo Suemitsu and Takami Matsuo : Phase Shift of Biological Rhythm in Crassulacean Acid Metabolism by Controlling Light Intensity, Proc. of SICE2013, 名古屋大学(名古屋市, 愛知県), 783-786 (2013).

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:

番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://matlab0.hwe.oita-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 孝美(MATSUO TAKAMI)
大分大学・工学部・教授
研究者番号: 90181700

(2) 研究分担者

末光 治雄(SUEMITSU HARUO)
大分大学・工学部・助教
研究者番号: 50162839

(3) 連携研究者

該当なし