

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04109

研究課題名(和文) 多関節ロボットのカオスから自然動作を抽出し安定化する；分岐理論の援用

研究課題名(英文) Stabilization of natural motions embedded in chaotic responses of a multilink robot; Applications of bifurcation theory

研究代表者

上田 哲史 (UETA, Tetsushi)

徳島大学・情報センター・教授

研究者番号：00243733

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)：2リンクロボットに関するホモクリニック軌道について検討した。各関節には摩擦が存在し、一定トルクを印加することを仮定すると、4次元自律系となる。分岐図を計算し、それによって平衡点の個数、それらの位相的性質について説明することができた。また、存在し得る多様体の場合を洗い出し、それらを接続するホモクリニック軌道に関する定式化を行なった。変分方程式の数値解などを援用し、いくつかの場合については計算することができ、第二種周期解との関係も検討できた。Pythonにより解析ツールを開発し、2リンクロボットの動作シミュレータなどにより結果の視覚化も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2リンクロボットではあっても、正弦関数・余弦関数が複雑に絡む方程式となり、その非線形力学系としての解析結果はあまり例をみない。また、この系に関するホモクリニック軌道の検討例もいくつかは存在するが、摩擦を考慮しない特殊な場合を対象としている。よって摩擦を鑑みた、より実モデルに近い系におけるホモクリニック軌道や、第二種周期解について解析を行った取組は他にはないと思われる。

研究成果の概要(英文)：We studied the homoclinic orbits of a two-link robot in which a friction loss and a constant torque at each joint are applied. The system becomes a four-dimensional autonomous system including many nonlinear functions. We calculated the bifurcation diagram which is able to explain the number of equilibrium points and their topological properties. We also identified all possible cases of the manifolds regarding equilibria and formulated the conditions of existence for a homoclinic orbit. Using numerical methods for solving variational equations, we computed several homoclinic orbits and investigated their relationship with the cylindrical periodic solutions. We developed analytical tools using Python and visualized the dynamical behavior of a two-link robot simulator.

研究分野：非線形力学系の解析

キーワード：ロボット 旋回運動 多様体 分岐 ホモクリニック軌道 カオス サドル型平衡点

1. 研究開始当初の背景

低摩擦の二重振り子は、初期値として位置エネルギーを十分に与えれば、最終的に安定平衡点に至るとしても、過渡応答は極めて複雑となる。減衰振動に移行するかと思えば再び励振し、手先リンクが旋回を始める。複数回旋したのち、突如逆回転を行なうなど、回転速度も様々変化し、カオスの挙動が視覚化される好例となっている。単振り子のジョイントにねじれ復元力を考慮したモデルでトルクを印加する場合は、サドルに関してホモクリニック軌道が発生し、そこから第二種周期解が剥離することは知られていた。しかし最近、改めて多重振り子の力学系を振り返っていると、摩擦の無いハミルトン系における第二種周期解の言及はみかけが、ダンピングを有し、かつトルクを印加するロボット(振り子)の周期解はあまり論じられていないことに気がついた。これは、制御工学の倒立二重振り子問題などのプロトタイピング以外、実用として旋回運動そのものの需要が十分には論じられていないためと考えられる。多重振り子であればリンク数 n に応じて平衡点は $2n$ 個生じ、そのほとんどがサドルとなり、かつホモクリニック軌道を取り得る。よって第二種周期解もパラメータの変化に応じて次々発生する。本研究グループでは、馬蹄写像に記号力学を組み合わせ、所望の周期を持つ不安定周期解を検索する手法の開発を手掛けており、近年、解析手法を数値計算パッケージ化できつつある。よって、多関節ロボットにおけるカオスについて取り組む機運が高まっている。

2. 研究の目的

多関節ロボットは高次元非線形微分方程式で記述され、状態空間は位相的に単位円を複数含み、摩擦が少なければその運動はカオス的である。しかしながら、力学系本来のこれらの運動はロボットの実際の運動設計ではあまり利用されていない。本研究では、各関節に定トルクが印加されたロボットについて、カオスに内包される不安定周期軌道の網羅的な計算により、その運動の不規則性を解きほぐす。まず糸口としてサドル型平衡点に関するホモクリニック軌道を、円の回転数を鑑みて計算する。それらの情報をもとに強制系の馬蹄写像を同定し、記号力学の援用により不安定周期軌道を高精度で求める。得られた軌道は不安定ではあるが、方程式本来の自然動作であると考えられる。これら軌道を対象としてカオス制御を適用し、安定化を図るとともに、従来のロボット制御系と比較し、制御にかかるエネルギーを評価する。さらに重力だけによる無トルク自由応答を積極的に活かした省エネルギー化を図る。

3. 研究の方法

研究期間は3年間とし、数理モデルについての理論、数値計算手法の開発、ならびにそれらを利用した分岐データの取得、データベースの製作を行う。主に2関節ロボットモデルについて、ホモクリニック軌道の計算、安定周期解の分岐について検討する。次に、様々なサドルに対するホモクリニック軌道を計算する。

まず、ロボットが2関節をもつ場合(二重振り子)について、リンク構造を同定した上、トルクをパラメータとして、サドルの位置を計算する。計算方法は極めて素朴であり、サドルから不安定多様体を正時間、安定多様体を逆時間でそれぞれ軌道を積分し、ある点でそれらが合致する条件について連立方程式を立てる。解法としてはニュートン法を用いるが、そのヤコビ行列の構成に必要な軌道の微分に関しては、変分方程式の数値積分を用いて高精度で与えることができる。ところで、状態変数やその他必要な変数・パラメータについての連立方程式、およびそのヤコビ行列はきわめて複雑になり得るが、数式処理に扱うことによって、近似誤差ならびにヒューマンエラーの発生を最小化することができる。変分方程式は、微分方程式やヤコビ行列のテンソル積で表現されるため、解析に必要な第一変分および第二変分方程式の自動導出アルゴリズムを実現する。

次に、ホモクリニック軌道が発生したあと、第二種周期解が発生・剥離する。その周期解について安定性を求めるとともに、局所分岐の発生を計算する。リンクパラメータ、摩擦係数、トルク値などをスキャンしながら、安定な第二種周期解の存在を探索する。分岐理論を用いて周期解の分岐を求める。サドルの安定多様体・不安定多様体やその変分方程式に関する条件を連立し、ニュートン法を用いてホモクリニック軌道を精度高く求める。求解した軌道は、その時系列、パラメータ、サドルの情報とともにデータベースに登録する。

さらに、上記ホモクリニック軌道を示すパラメータにおいて、トルクに周期摂動を加え、安定多様体・不安定多様体を追跡し、その交差(ホモクリニック点)と記号力学系を対応させて周期を見出し、ニュートン法により不安定周期軌道を計算する。

最後に n リンクロボットについて、サドルに関するホモクリニック軌道を洗い出す。これらの結果を一般化し、 n 個の関節を持つロボットについても、ホモクリニック軌道が求められるよう拡張を行う。

4. 研究成果

2 リンク平面ロボットについて解析を行った。運動方程式は一階 4 次元には整理できるものの、関節変数の正弦や余弦の関数が複雑に含まれる非線形自律系となる。まず、平衡点の位相的分類を行った。各関節には摩擦を仮定し、それぞれ一定トルクが入力される場合、平衡点は 4 つとなるが、内訳は漸近安定なものは 1 つ、完全不安定なものが 2 つ、サドル型が 2 つとなる。ロボットの姿勢もそれぞれに対応した 4 つのポジションが考えられるが、安定なものは鉛直下に近いものだけである。他のポジションは通常はフィードバック制御などを行い、安定性を補償する必要がある。さらに手先に近い関節のトルクを増加させると、安定平衡点とサドル型平衡点、ないしは完全不安定平衡点とサドル型平衡点のそれぞれが接線分岐を起こし、平衡点が消滅し、シリンダ相平面を巡回する第二種周期解が発生する。原点にある関節に印加するトルクがあるしきい値（計算可能）を超えるとこの関節に関しても巡回を始める。したがってそれぞれの関節での巡回（第二種周期解）が発生し、これらの運動を説明する、トルクと摩擦係数による分岐図が得られた。しかしながら両関節で巡回するトーラス運動が発生するパラメータ領域は分岐図からは説明できなかった。

次にホモクリニック軌道の計算を行った。まず、各平衡点における安定多様体、不安定多様体を洗い出した。すべて一次元多様体となる場合、2 次元多様体が 1 つある場合、2 次元安定多様体が 2 つある場合の 3 ケースが存在し、まずは最初の場合を検討した。具体的には、不安定多様体の線形近似である固有ベクトルを平衡点近傍で同定し、安定固有ベクトルから出発し、正時間である位置にきた軌道と、不安定固有ベクトルから出発し、逆時間である位置にきた軌道が一致する条件を定式化した。これらの条件と変数の関係を整理し、そのヤコビ行列を求めた。このとき、軌道に関する微分が必要となるが、これは変分方程式の解を求解することによって充てた。まずこのアルゴリズムにより、大きい摩擦係数に関するホモクリニック軌道が計算できた。残りの場合についての計算は、複素固有値にかかる 2 次元平面が関わってくるため、軌道の一意な位置を変数にした定式化が困難となる。そこで、平衡点まわりの線形 2 次元平面内に軌道が回り込んだときに、正規直交化した他の 1 次元不安定固有ベクトルとの内積がゼロとなる条件に置き換え計算するアルゴリズムを開発した。当該 4 次元系に適用すると幾何学的なイメージによるデバッグが難しいため、1 次元不安定多様体と 2 次元安定多様体が絡むホモクリニック軌道（シルニコフ軌道）が存在することが確定している系においてまずは数値実験を開始しており、研究期間終了後もその妥当性について検討を続けている。

これらの取り組みとは並列に、カオス制御や非線形力学系の解析一般に関する研究を同時進行させた。それらの結果は当該研究課題にやがて応用される予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yoshikawa Masaki, Ono Kentaro, Ueta Tetsushi	4. 巻 14
2. 論文標題 Bifurcations in a forced Wilson-Cowan neuron pair	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 366 ~ 377
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.14.366	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 UETA Tetsushi, AMOH Seiya	4. 巻 16
2. 論文標題 To Tackle Bifurcation Problems with Python	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE ESS Fundamentals Review	6. 最初と最後の頁 139 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/essfr.16.3_139	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 Katayama Michiru, Ikeda Kenji, Ueta Tetsushi	4. 巻 34
2. 論文標題 Stabilization of Laminars in Chaos Intermittency	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Bifurcation and Chaos	6. 最初と最後の頁 1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S021812742450024X	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24件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 山口 力也, 美井野 優, 伊藤 大輔, 上田 哲史
2. 発表標題 定トルクを加えた減衰単振り子の大域的分岐
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会 (Web会議)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田 哲史
2. 発表標題 ダイオードを含む回路の逆時間ダイナミクス
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会四国 支部連合大会 (Web会議)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田 哲史
2. 発表標題 分岐問題再考
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tetsushi Ueta
2. 発表標題 Backward-Time Dynamics in an RLC Circuit with an Inverted Diode
3. 学会等名 IEICE, NSLW2021 (Web会議) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉川 聖輝, 天羽 晟矢, 上田 哲史
2. 発表標題 Python を用いた分岐解析ツールの開発
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片山 充二, 天羽 晟矢, 上田 哲史
2. 発表標題 シナプス結合 FitzHugh-Nagumo モデルにおける周期解の分岐
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田 哲史
2. 発表標題 連鎖律の Python 実装について
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野 健太郎, 上田 哲史
2. 発表標題 強制Wilson-Cowan ニューロン対の分岐現象
3. 学会等名 電気・電子・情報 関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaki Yoshikawa, Kentaro Ono, Tetsushi Ueta
2. 発表標題 Bifurcations in a forced Wilson-Cowan neuron pair
3. 学会等名 IEICE NOLTA 2022 (Web会議) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田 哲史
2. 発表標題 分岐問題計算再考 --続報--
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 2023年

1. 発表者名 吉田 隆一, 天羽 晟矢, 上田 哲史
2. 発表標題 平衡点のない3次元自律系にみられる周期解とその発生シナリオ
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会 (Web会議)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口 力也, 伊藤 大輔, 美井野 優, 上田 哲史
2. 発表標題 2 リンクロボットにおける大域的分岐
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会 (Web会議)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 張 全凱, 上田 哲史
2. 発表標題 生物スイッチの数理モデルにおける分岐現象解析
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 2023年

1. 発表者名 片山 充二, 上田 哲史
2. 発表標題 間欠性カオスのラミナーを微小制御量で安定化させる
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 2023年

1. 発表者名 片山 充二, 池田 建司, 上田 哲史
2. 発表標題 間欠性カオスにおけるラミナー安定化制御
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 2023年

1. 発表者名 張 全凱, 上田 哲史
2. 発表標題 生物スイッチの数理モデルにおける分岐現象解析とシミュレーション
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 2023年

1. 発表者名 石垣 龍人, 上田 哲史
2. 発表標題 Basin boundary 構造変化の3次元視覚化
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齊藤 雅門, 天羽 晟矢, 上田 哲史
2. 発表標題 電磁誘導Hindmarsh-Rose モデルの分岐
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤本 進太郎, 上田 哲史
2. 発表標題 ハミルトン力学系を用いたカオス暗号
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Michiru Katayama, Kenji Ikeda, Tetsushi Ueta
2. 発表標題 Laminar stabilization control in chaos intermittency
3. 学会等名 IEICE NOLTA2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tetsushi Ueta
2. 発表標題 Python Expressions of Variational Equations
3. 学会等名 IEICE NOLTA2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 片山 充二, 上田 哲史
2. 発表標題 2 次元非自律系の逆時間応答・分岐について
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 2024年

1. 発表者名 吉川 聖輝, 天羽 晟矢, 上田 哲史
2. 発表標題 3 個のWilson-Cowan ニューロンモデルの分岐
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 2024年

1. 発表者名 石垣 龍人, 上田 哲史
2. 発表標題 3 次元自律系における2 次元平衡点安定多様体の視覚化
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 2024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	美井野 優 (MIINO Yuu) (70845049)	鳴門教育大学・大学院学校教育研究科・講師 (16102)	

6. 研究組織（つづき）

	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	伊藤 大輔 (ITO Daisuke) (90759250)	岐阜大学・工学部・助教 (13701)	

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