

令和元年6月11日現在

機関番号：33908

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02876

研究課題名(和文) 摩擦を有する系にみられるスティック・スリップ状態とスリップ状態の境界を考える

研究課題名(英文) Boundaries between stick-slip and slip vibrations with dry friction

研究代表者

高坂 拓司 (KOUSAKA, TAKUJI)

中京大学・工学部・教授

研究者番号：80320034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：本申請では、摩擦を有する系に見られるスティック・スリップ状態とスリップ状態について検討した。また、この結果を産業応用に結びつけた。下記を実施した：

(1) 摩擦を有する機械振動系の写像構成法の提案 (2) スティック・スリップ状態とスリップ状態の遷移メカニズムの解明 (3) 周期外力を印加したダイオードを含むBVP発振器に見られるMMOsの解析 (4) 微小高調波印加による遷移メカニズムの解明 (5) 微小高調波印加が振動切削系へ与える影響 (6) 実験装置による検証

研究成果の学術的意義や社会的意義

本申請は、応用研究を見据えた基礎研究に特徴がある。基礎研究の成果は、機械振動系のみならず電気系や生体系の問題に応用できることがわかった。また、応用研究の成果は、本申請を深化させることで広く産業応用へと適用可能である。具体的には、提案した制御法は元々印加されていた周期外力に微小高調波外力をさらに印加したのみだが、性能が劇的に向上する可能性が高い。将来的には、振動プレス加工等の技術としても結実し、グリーンイノベーションの推進に役立つと期待できる。

研究成果の概要(英文)：We considered stick-slip and slip vibrations in a forced mechanical dynamical system with dry friction. Moreover, we tied the results to industrial applications. The following was implemented:

(1) Proposal for a new mapping method in a forced mechanical dynamical system with dry friction. (2) An investigation into a translation mechanism between stick-slip and slip vibrations. (3) Analysis of mixed-mode oscillations(MMOs) in Bonhoeffer-van der Pol Oscillator with ideal diode. (4) An investigation into translation mechanism for mechanical dynamics with weak harmonic periodic force. (5) Effect on a vibration cutting system by weak harmonic perturbation. (6) Experimental verification.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：スティック・スリップ振動

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

1. 研究開始当初の背景

摩擦は、機械振動、生物学等の分野に関連する問題であり、スティック・スリップ現象は摩擦を有する系に広く観察される。それゆえ、機械工学分野・トライボロジー分野等の技術者・解析者により様々な研究成果が報告されている。

2. 研究の目的

先の研究成果の大部分はスティック・スリップ状態、もしくはスリップ状態いずれかの状態のみを有している場合を前提としており、その状態遷移について詳細に検討したといえる報告はほとんど見当たらない。その理由として、スティック・スリップ状態は断続動作特性を有する非自律系、スリップ状態は滑らかな系で記述されるため、解析の基盤となる写像の構成法が異なることに起因する。そこで、本申請では、

- ・スティック・スリップ状態とスリップ状態を同時に取り扱える写像の構成法の提案
- ・スティック・スリップ状態やスリップ状態にみられる、カオス・準周期・周期解がもう一方へ遷移するメカニズムの解明
- ・微小高調波印加を用いた状態遷移制御手法の提案
- ・微小高調波印加を用いることで、振動切削加工技術の切削仕上げ面粗さが改善するかの検討を研究目的とした。

3. 研究の方法

「2. 研究の目的」を遂行するため、具体的な研究内容として：

- (1) 写像構成法の提案
- (2) スティック・スリップ状態とスリップ状態の遷移メカニズムの解明
- (3) 周期外力を印加したダイオードを含む BVP 発振器に見られる MMOs の解明
- (4) 微小高調波印加による遷移メカニズムの解明
- (5) 振動切削系への微小高調波印加
- (6) 実験装置による検証を行った。

4. 研究成果

「3. 研究の方法」に沿って記載する。(6)については、対応項目で説明する：

- (1) 写像構成法の提案
通常、断続動作特性の有無にかかわらず、非自律系は外力の周期に合わせて写像を構成することが一般的である。例えば、本申請で検討した乾燥摩擦を伴う自励系は2次元非自律系に断続動作特性を加えているため、その写像は2次元で記述される。この手法では、スティック・スリップ状態およびスリップ状態を写像して同時に記述することはできるが、その解析は難しい。そこで、静止摩擦力が最大となる時間間隔を用いた写像法を提案した。提案手法は、両方の状態を同時に観測できるのみならず、断続動作特性を有する n 次元非自律系を $n-1$ 次元の写像として定義できるという利点を有することも示した。
- (2) スティック・スリップ状態とスリップ状態の遷移メカニズムの解明
まず、乾燥摩擦を伴う最も簡素な非自律系物理モデルの運動方程式および解軌道の振る舞いを示した。次に、(1)で提案した写像を本モデルに適用した。具体的には、最大静止摩擦が作用する時刻において速度は一定、かつ加速度がゼロであることに着目することで、変位および速度、時刻をそれぞれ最大静止摩擦が作用する時刻において離散化することで写像を導出した。最後に、導出した写像を用いてスティック・スリップ状態とスリップ状態の遷移について解析を行った。結果として、スティック・スリップ状態の遷移には安定性に依存する周期倍分岐およびサドルノード分岐、解の状態に依存するグレイジング分岐が影響していることを示した。また、スティック・スリップ状態とスリップ状態の境界では共存現象が存在することを示した。さらに、スティック・スリップ状態からスリップ状態への遷移は、サドルノード分岐と不変区間の消滅が影響し、逆の遷移ではスリップ状態の周期が長くなることでスティック・スリップ状態に遷移することを明らかにした。これに関連して、スティック・スリップ状態が有する非周期的な振動がカオス振動であることを、Lasota-Yorke の定義より厳密に示すことが可能となった。実験装置に関しては上記を作成し、比較検討した。この実験に関しては、摩擦力が湿度に大きな影響を受けること、ベルトの接合部で予期しない不連続性が発生するなどして、大まかに同様の性質が観測できた程度に留まったため、今後さらに比較検討したい。
- (3) 周期外力を印加したダイオードを含む BVP 発振器に見られる MMOs の解明
(2)で述べたように、機械系においては実験装置を用いたアルゴリズムの確認が難しいことがわかった。そこで、電気系に関して同様に議論ができないかを検討した。具体的には外力の印加された BVP 発振器を考えたが、回路の非線形負性抵抗部に含まれるダイオードを理想化することで、乾燥摩擦系とほぼ同じ不連続動作特性を有することがわかった。そこで、(1)を本系に適用し、実験系とともに手法の正当性を示した。また、関連して化学実験において見出された mixed-mode oscillations (MMOs) についても検討した。MMOs に関しては古くから解析が進められているが、ダイオードを理想化、つまりスイッチとみなすことで1次元写像

として視覚的にも容易な解析が可能となった。定性的な性質を議論した結果、系に生じる不変区間が MMO 加算現象および小振幅と大振幅の組み合わせに影響を与えることがわかった。さらに、MMOs の入れ子現象等も発見できたため、今後詳細な解析を進める予定である。

(4) 微小高調波印加による遷移メカニズムの解明

(2)の系に微小高調波を印加することが、スティック・スリップ状態とスリップ状態の遷移にどのような影響を与えるのかを検討した。まず、(1)を基本調波と高調波の2つの外力が印加されている場合にも適用可能なように拡張したアルゴリズムを構築し、解析を進めた。その結果、微小高調波はサドルノード分岐、周期倍分岐といった分岐の発生パラメータをスライドさせる効用があることを示した。つまり、システムのパラメータ変更が難しい状況では、微小高調波を印加することで、望ましい状態に遷移できる可能性があることがわかった。

(5) 振動切削系への微小高調波印加

工具に周期的な振動を与えながら切削加工を行う振動切削系に対し、微小高調波を印加し、その影響について数値的、実験的に検討した。

本実験系で用いた振動切削装置は、加振器の振動ホーン部と工具をネジ締結し、振動ホーンからの強制振動により工具を共振させることで周期的な工具振動を実現している。まず、高調波振動用切削工具を開発し、工具刃先まで高調波振動が伝搬していることを確認した。次に切削速度を変化させ、慣用振動切削および高調波を重畳した振動切削実験を行った。表面粗さおよび工具変異の時系列波形より評価した。その結果、慣用振動切削では推奨切削速度以上で表面粗さが増加したが、第三高調波振動を印加した振動切削では、推奨切削速度を超えた切削速度範囲においても表面粗さの増加が少ないことを実験的に確認した。また、第三高調波振動を印加した振動切削の方が工作物変異の最大振幅が小さいこともわかった。以上より、高調波の工具への重畳は、振動切削系の挙動の変化を抑制する効用があると考えられる。また、実験系に対応する二自由度衝突振動系をモデル化し、上記同様にその有用性を数値的に確認した。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 12 件)

T. Komai, S-J Kim, T. Kousaka, H. Kurokawa, A human behavior strategy estimation method using homology search for rock-scissors-paper game, Journal of Signal Processing, 査読有, 2019 (In press)

T. Kousaka, S. Osada, H. Kato, H. Asahara, Mathematical analysis for homoclinic bifurcation in a DC-CD converter with a photovoltaic module expressed by a piecewise-linear characteristic, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 査読有, 2019 (In press)

H. Matsushita, H. Kurokawa, T. Kousaka, Saddle-node bifurcation parameter detection strategy with nested-layer particle swarm optimization, Chaos, Solitons & Fractals, 査読有, 2019, 126-134

DOI: 10.1016/j.chaos.2018.12.016

Y. Miino, D. Ito, H. Asahara, T. Kousaka, T. Ueta, A general method to stabilize unstable periodic orbits for switched dynamical systems with a periodically moving threshold, International Journal of Circuit Theory and Applications, 査読有, 2018, 2380-2393

DOI: 10.1002/cta.2573

松下春奈、黒川弘章、高坂拓司、1次元離散力学系における入れ子構造型粒子群最適化法によるサドルノード分岐点導出、電気学会論文誌(C)、査読有、2018、1646-1647

DOI: 10.1541/ieejieiss.138.1646

H. Asahara, T. Kousaka, Stability analysis method using monodromy matrix for impacting systems, IEICE Trans. Fundamentals, 査読有, 2018, 283-288

DOI: 10.1002/tee.22807

H. Takahashi, T. Kousaka, H. Asahara, N. Stankevich, N. Inaba, Mixed-mode oscillation-incrementing bifurcations and a devil's staircase from a nonautonomous constrained Bonhoeffer van der pol oscillator, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2018, 2013A02

DOI: 10.1093/ptep/pty099

D. Ito, H. Asahara, T. Kousaka, T. Ueta, Clock pulse modulation for ripple reduction in buck-converter circuits, Chaos, Solitons and Fractals, 査読有, 2018, 138-145

DOI: 10.1016/j.chaos.2018.04.015

T. Kousaka, H. Asahara, N. Inaba, Stick-slip chaos in a mechanical oscillator with dry friction, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2018, 033A01-11

DOI: 10.1093/ptep/pty016

H. Asahara, S. Banerjee, T. Kousaka, Relationship of fast-scale and slow-scale instabilities in switching circuit with multiple inputs, International Journal of Circuit Theory and Applications, 査読有, 2017, 1382-1396

DOI: 10.1002/cta.2297

T. Kousaka, Y. Ogura, K. Shimizu, H. Asahara, N. Inaba, Analysis of mixed-mode oscillation-incrementing bifurcations generated in a nonautonomous constrained Bonhoeffer van der pol oscillator, Physica D, 査読有, 2017, 48-57

DOI: 10.1016/j.physd.2017.05.001

H. Matsushita, H. Kurokawa, T. Kousaka, Period doubling bifurcation point detection strategy with nesting layer particle swarm optimization, International Journal of Bifurcation and Chaos, 査読有, 2017, 1750101-10

DOI: 10.1142/S0218127417501012

[学会発表(国際会議のみ)](計7件)

T. Yamaguchi, S. Osada, H. Asahara, S. Karube, T. Kousaka, Dynamical effect on a forced self-excited system with dry friction by weak harmonic perturbations, Proc. of 2018 International workshop on nonlinear circuits, communications and signal processing, 2018

S. Osada, H. Kato, H. Asahara, T. Kousaka, Experimental Analysis of the fast-slow characteristic circuit with the spike noise, Proc. of 2018 International workshop on nonlinear circuits, communications and signal processing, 2018

K. Shinohara, T. Kousaka, H. Kato, H. Ohtagaki, H. Asahara, Experimental study of a stabilizing method using periodic threshold to DC-DC converter with photovoltaic module, Proc. of 2018 International workshop on nonlinear circuits, communications and signal processing, 2018

A. Ikemoto, Y. Kanazawa, T. Kousaka, H. Kato, D. Ito, T. Ueta, H. Ohtagaki, H. Asahara, Stability method by changing switching timing in switched dynamical systems, Proc. of 2018 International workshop on nonlinear circuits, communications and signal processing, 2018

S. Osada, H. Asahara, T. Kousaka, Qualitative properties of fast-slow characteristic circuit with the switching delay, Proc. Of IEEE workshop on Nonlinear Circuit Networks, 2017

S. Karube, Y. Kubo, T. Kousaka, Experimental study on vibration characteristics in vibration cutting process, Proc of 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, 2017

S. Karube, T. Kousaka, Y. Kawazu, Dynamic Behavior of a Bouncing Ball, Proc of 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, 2016

[図書](計1件)

H. Asahara, T. Kousaka, T. UETA, Analysis of bifurcation in oscillatory circuits, Chapter2, Oscillator Circuits: Frontiers in Design, Analysis and Applications, The Institution of Engineering Technology, 2016, Chapter2

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 麻原 寛之

ローマ字氏名: (ASAHARA, hiroyuki)

所属研究機関名: 岡山理科大学

部局名: 工学部

職名: 講師

研究者番号(8桁): 50709615

研究分担者氏名：軽部 周
ローマ字氏名：(KARUBE, shu)
所属研究機関名：大分工業高等専門学校
部局名：その他部局等
職名：教授
研究者番号(8桁)：70370054

研究分担者氏名：稲葉 直彦
ローマ字氏名：(INABA, naohiko)
所属研究機関名：明治大学
部局名：研究・知財戦略機構
職名：研究推進員
研究者番号(8桁)：90213123

(2)研究協力者
なし

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。