

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：33908

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12144

研究課題名（和文）間隙を伴う系が織りなす非線形振動

研究課題名（英文）Nonlinear vibration with gap control

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、空間的な隙間（間隙）を伴う系に生じる非線形現象を考えた。具体的には、下記を実施した。まず、間隙を伴う系に対する安定性及びgrazing分岐点の計算法を確立した。次に、提案手法を歯打ち振動を模擬した機械振動系に適用し、手法の正当性及び解析結果を示した。最後に、弾性支持された工具によるびびり振動の抑制法を示した。また、これらの結果を実験装置を用いて検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空間的な隙間を伴う系に生じる非線形現象を検討した。研究成果の学術的意義としては、このような力学系の構造の解析手法を示し、その定性的性質を調査した。社会的意義としては、間隙を利用した旋盤加工法を提案した。具体的には、切削作業中に被削材または刃先が振動し、削り面に高低の跡がつく現象はびびり振動と呼ばれるが、提案法によりびびり振動を低減することに成功している。これは、切削熱を低減させるため潤滑油の使用を抑え、環境面、生産コスト面でも利点を有しているといえる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we examined the nonlinear phenomena that occur in systems with spatial gaps (interstices). Specifically, the following were conducted. First, we established a method for calculating the system's stability and grazing bifurcation points. Next, the proposed method was applied to a mechanical vibration system simulating chatter vibration and presenting the method's validity and analytical results. Finally, an elastically supported tool's technique for suppressing chattering vibration was presented. These results were also verified using an experimental apparatus.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：機械振動 間隙

1. 研究開始当初の背景

空間的な隙間(間隙)を伴う系は、機械工学等の多分野で散見される。例えば、車のアイドリング中に発生するギアの歯打ち振動、走行中に発生する歯車のかみ合い駆動などは間隙を伴う系の典型例である。また、洗濯脱水機や遠心分離機のような回転機械には、間隙を利用したパッシブな振動抑制対策が施されていることも広く知られている。この種の系に生じる問題の克服は産業的応用に直結するがゆえに、機械工学、トライボロジー等の技術者・研究者による多くの研究成果が存在する。まず、系がもつ力学的構造の理解という観点から考えると、間隙を伴うという性質上、局所的分岐だけではなく解軌道が境界に接することにより生じる grazing 分岐と呼ばれる分岐現象の理解が重要である。しかし、先に知られている報告の大部分はその現象観察に関するものであり、高次元系のパラメータ空間を解析可能な手法も見当たらない。また、間隙を利用した工学的応用例についても検討を進めたいと考えていた。一般に、切削作業中に被削材または刃先が振動することで削り面に高低の跡がつく現象は、びびり振動と呼ばれている。びびり振動の発生は、工作物の表面粗さに悪影響を与えるため、加工における大きな課題となっている。一方、振動切削のように工具を強制振動させることでびびり振動を回避する手法もあるが、加振器は高価であり、これほどの加工精度を求めない場合も散見される。そこで、慣用切削よりも性能がよく、振動切削よりも安価な旋盤加工法の実現を目指した。

2. 研究の目的

上記を鑑みて、間隙を伴う系に生じる非線形現象を検討し、この結果を産業応用に結びつけることを研究の目的とし、具体的には下記を実施した。

- (1) 間隙を伴う系に対する解析手法の確立
- (2) 機械振動系への(1)の適用
- (3) 工具と被削物間に意図的に間隙を与えた旋盤加工法の提案とモデル化
- (4) 実験装置を用いた(2)(3)の検証

3. 研究の方法

研究目的の番号に沿って研究の方法を説明する。

- (1) 間隙を伴う系に対する解析手法の確立
grazing 分岐の発生条件に基づき、数値計算に必要となる初期値およびパラメータ微分を示す。具体的には、手法の根幹となる Poincaré 写像の構成法および写像に関連する第一、第二変分方程式を数学的に得る。
- (2) 機械振動系への(1)の適用
(1)を計算機実装し、意図的な間隙が系のパラメータ空間にどのような影響を与えるのかを、安定性解析および grazing 分岐の観点から解析する。まず、(4)に基づき実験系のパラメータフィッティングを行う。次に、導出したパラメータを用いて定性的性質の解明を進める。特に、間隙をパラメータとしたとき、grazing 分岐前後で力学的構造がどのように変化するのかを解析する。
- (3) 工具と被削物間に意図的に間隙を与えた旋盤加工法の提案とモデル化
意図的な間隙を伴う旋盤加工法に対応する力学モデルを示す。具体的には、 y 軸方向の間隙を仮定し、2自由度(4次元系)として記述する。ここで、主分力および切削速度と工具の相対関係を鑑みると、単位ステップ関数および符号関数により4種類の微分方程式の組み合わせで構成する。
- (4) 実験装置を用いた(2)(3)の検証
両実験ともに、まず3次元CADを用いて製図図面を作成する。次に、実験系を構築する。また、微細な振動計測を行うため計測前にフィールドバランスを使用し、工具および工具固定金具のバランス調整を行う。最後に、振動解析データステーションを用いてこれらのデータを取得し、(2)(3)を実験的に検証する。

4. 研究成果

研究目的の番号に沿って研究成果を説明する。

- (1) 間隙を伴う系に対する解析手法の確立
各々の質点が m および n 次元系で記述される二質量衝突振動系にみられる p 周期解の解析手法を提案した。まず、 $(m+n)$ 次元二質量衝突振動系の力学モデルを記述し、その常微分方程式の解を定義した。次に、境界断面および跳躍現象を定義し、それらを含めた Poincaré 写像を構成した。最後に、Poincaré 写像の初期値に関する偏微分を用いた安定性及び分岐点計算法について示した。その結果、汎用的に使用可能な安定性計算法及び grazing 分岐点の計算が可能となった。

(2) 機械振動系への(1)の適用

いくつかの間隙を伴う機械振動系に(1)を適用したが、図1に一例を示す。解析の結果、強制外力の周波数を変化させることによって、系には様々な周期解が存在した。また、広いパラメータ空間において本系にみられる振動現象を確認すると、周期解の変化に伴い grazing 分岐が発生し、本研究の背景で考えていたように、間隙を伴う系は grazing 分岐が挙動に大きな影響を与えることが分かった。さらに、平衡点の比率 D を 0 に近づけることで質点が一体化する現象が確認されたが、これには3つの特徴的な挙動が関与していることが明らかとなった。

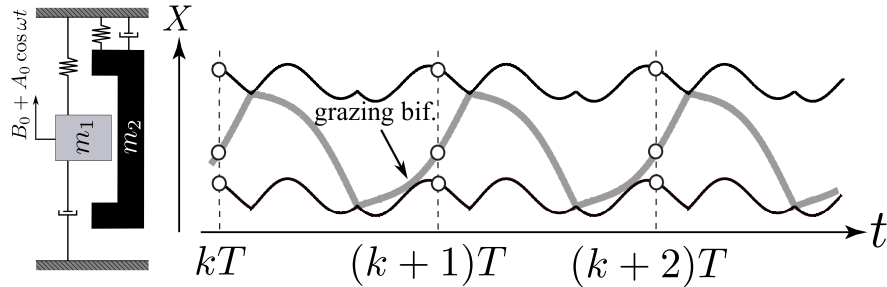


図1: 間隙を伴う系に生じる grazing 分岐の発生パラメータ付近の様子

(3) 工具と被削物間に意図的に間隙を与えた旋盤加工法の提案とモデル化

まず、Grabec の慣用切削モデルを参考にした断続振動切削法モデル(図2(a)参照)を提案し、加工精度に関する数値シミュレーションを行った。次に、シミュレーション結果より断続振動切削法と慣用切削法の加工精度を比較した。その結果、断続振動切削法は一定の値までばね定数を緩めることで、加工精度が向上する可能性があることを示した。また、主分力方向のばね定数を適切な範囲で緩めると、背分力方向の工具変位の最大値側と最小値側の波形の形が異なる傾向で変化することが分かった。特に、最小値側を大幅に減少させる効用があり、これは設定切り込み深さより深い範囲における削り過ぎの抑制につながることを示唆している。最後に、主分力方向のばね定数が背分力方向の工具変位に与える影響について考察した。

(4) 実験装置を用いた(2)(3)の検証

図2(b)に提案した切削法における工具および皿ばね部分の実験装置を示す。実験により得られた結果を下記する。詳細な実験条件については主な研究論文等を参照。

- 主軸回転数 560rpm で、2種類の慣用切削と断続振動切削を行い、各々の加工法における加工精度を算術平均粗さ R_a で評価した。その結果、金属製スパーサを用いた慣用切削は $R_a=4.158\mu\text{m}$ 、治具を用いた慣用切削は $R_a=3.721\mu\text{m}$ 、断続振動切削は $R_a=3.89\mu\text{m}$ であった。つまり工具剛性が低い場合、断続振動切削により算術平均粗さが 6.45 % 減少した。
- 主軸回転数 1030rpm で上記同様の実験を行った。金属製スパーサを用いた慣用切削は $R_a=3.662\mu\text{m}$ 、治具を用いた慣用切削は $R_a=3.367\mu\text{m}$ 、断続振動切削は $R_a=3.570\mu\text{m}$ であった。この場合も、上記同様に工具剛性が低い場合は断続振動切削により算術平均粗さ 2.51% の減少効果が得られた。
- 本実験において、主軸回転数 560rpm、1030rpm の双方において工具剛性が低い場合に比べ、断続振動切削の表面性状が向上した。つまり、提案した断続振動切削法は工具剛性が低い状況で切削を行う場合、有用であるといえる。
- パワースペクトルを用いて工具振動を評価した。560rpm、1030rpm のどちらの回転数においても、工具剛性が低い状況下ではノイズ成分が低減できる効果を示した。

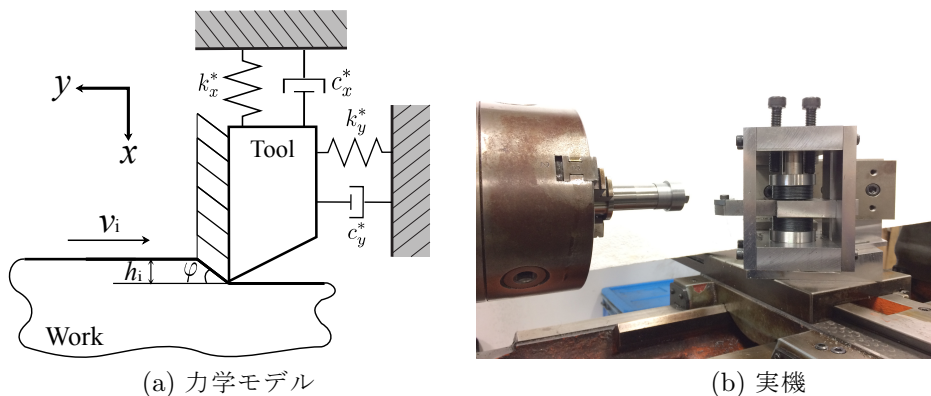


図2: 意図的な間隙を伴う旋盤加工法

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Karube, T. Kousaka, N. Inaba	4. 巻 30
2. 論文標題 Experimental and numerical study of nonsmooth maximum bounce height changes in a bouncing ball system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 103111
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0009343	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 -

1. 著者名 S. Karube, Y. Uemura, T. Kousaka, N. Inaba	4. 巻 12
2. 論文標題 Revealing the mechanism causing stepwise maximum bounce height changes in a bouncing ball system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 軽部周, 稲葉直彦, 高坂拓司
2. 発表標題 周期的な境界を有するバウンシングボール系の非線形特性
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志藤広陸, 加藤秀行, 軽部周, 高坂拓司
2. 発表標題 微小高調波を用いた振動切削法の数値的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長岡拓哉, 軽部周, 高坂拓司
2. 発表標題 微小高調波外力を受ける強制摩擦振動系に関する実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会九州支部沖縄講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 軽部周, 高坂拓司
2. 発表標題 一方向に弾性支持された工具による切削シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会九州支部沖縄講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 玉腰敦也, 軽部周, 高坂拓司
2. 発表標題 断続振動切削の切削精度について
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上向井大輝, 軽部周, 高坂拓司
2. 発表標題 弾性支持された工具によるびびり振動の抑制
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上村悠貴, 軽部周, 高坂拓司, 稲葉直彦
2. 発表標題 パウンシングボール系に生じるカオス転移メカニズム
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 玉腰敦也, 加藤海渡, 麻原寛之, 軽部周, 高坂拓司
2. 発表標題 断続振動切削法における主分力方向のばね定数の評価
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 2022年

1. 発表者名 清松東矢, 軽部周, 高坂拓司
2. 発表標題 振動を利用した歯車加工法の開発(工作物支持系のばね定数が表面粗さに与える影響)
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2022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	稲葉 直彦 (Inaba Naohiko) (90213123)	湘南工科大学・工学部・研究員 (32706)	

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	軽部 周 (Karube Shu) (70370054)	大分工業高等専門学校・機械工学科・教授 (57501)	
研究分担者	麻原 寛之 (Asahara Hiroyuki) (50709615)	岡山理科大学・工学部・准教授 (35302)	

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