

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：51401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14931

研究課題名（和文）平面減衰機構を適用した高速高精度精密位置決め装置の分数階微積分モデルと制御

研究課題名（英文）Modeling and control introduced a fractional-order transfer function for highly precise positioning device with a flat damper

研究代表者

櫻田 陽 (Sakurada, Akira)

秋田工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：90442681

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：積層型圧電素子と変位拡大機構を組み合わせた精密位置決め装置を高速高精度に位置決めするために、適用する平面減衰機構の特性把握および分数階微積分という数学を導入した従来にはない新しい制御手法の研究開発を進め、その有効性を実験的に検証した。平面減衰機構の特性を明らかにする市販の評価装置は、必要とする周波数を測定可能な製品が存在せず、従来にはない平面減衰機構の評価装置を新たに試作した。新たな評価装置を用いてヒステリシス特性、周波数依存性を明らかにした。さらに分数階微積分を導入した制御対象の伝達関数は、Oustaloup法により整数次数の伝達関数に近似することで制御系設計を進め、制御性能向上させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ナノスケールでの位置決めに必要なとされている広い動作範囲と制御帯域の向上を目指すPZT精密位置決め機構に対して、平面減衰機構を適用しても制御性能を低下させることなく、位置決めを実現する方法を明らかにした。今後、様々な応用分野において、本位置決め装置が求められ、導入されて行くことが予想され、これらの分野へ貢献できると期待できる。

研究成果の概要（英文）：Highly precise positioning device that combines a stacked piezoelectric element and a displacement expansion mechanism is developed. In further research, characterization of the newly applied flat damper and the mathematics of fractional calculus were introduced. I developed a new control method and experimentally verified the effectiveness of the method. There are no commercially available evaluation devices that measure the frequencies required to characterize flat damper. Then the new prototype of the evaluation device is developed. After that hysteresis characteristics and frequency dependence are identified using the new evaluation device. Furthermore, the transfer function of the controller for fractional calculus is approached to an integer order transfer function by the Oustaloup method to improve the performance.

研究分野：制御工学

キーワード：分数階微積分 高速高精度位置決め 平面減衰機構 粘弾性体特性評価装置 周波数依存性 ヒステリシス特性

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

ナノテクノロジーを支える基盤技術として、ナノスケールでの位置決め技術が必要不可欠であり、MEMS や半導体関連から一般工作機械まで多岐にわたる重要な要素である。これらの精密位置決めを行う動力源として積層型圧電素子 PZT を用いられることが多く、精密位置決めに適した推力発生素子である。研究代表者は、PZT と変位拡大機構を組み合わせた精密位置決め装置を研究開発している。この装置は、PZT の微小な変位量を、テコの原理により変位を拡大する機構と組み合わせたものである。位置決めを行う際には、DSP などの制御装置と共に用いられる。ここで重要なのは、制御系設計に必要な位置決め装置のモデル化と、現場でも容易に用いることができる制御系の設計法の 2 つであり、これにより高速高精度な位置決め性能が大よそ決定される。また、高い制御性能を実現するために、精密位置決め装置は周波数特性において、低域からのフラットな特性をなるべく高く維持し共振周波数を高く設計する必要がある。しかし、高い共振周波数は高い共振振幅である場合が多く、その共振振幅を抑制する制御システムには限界があるため、精密位置決め装置に何らかの対策を行う必要がある。その対策として、変位量を低減させないよう、変位拡大機構の駆動部分に粘弾性体を貼り付けた拘束板を貼り付け、振動方向に対しせん断に作用する薄く平面状の減衰機構を検討した。これまでの研究にて、共振振幅を抑制することを確認しているが、同時に共振周波数を高める現象を確認しており、これらの現象を表現する運動方程式およびモデルは明らかにされていない。また、粘弾性体の選定や拘束板の剛性など、減衰機構の設計指針も明らかにされていない。現在市場にて販売されている粘弾性の特性を測定する機器は、おおよそ 100Hz までの周波数にしか対応しておらず、本研究の特性解析には性能が不足している。そこで、従来まで研究してきた高速高精度位置決め測定技術を応用し、粘弾性の特性を測定する機器を試作し、粘弾性の特性を解明することにより有限要素解析などの現在使用されているソフトウェアに应用展開が期待でき、半導体産業など様々な分野で使われている精密位置決め装置の性能向上および市場の要求を満足するなど、社会的・経済的効果は非常に大きい。

## 2. 研究の目的

積層型圧電素子と変位拡大機構を組み合わせた精密位置決め装置について、高い制御性能を実現するために、高い周波数特性が必要となる。しかし、非常に高い共振振幅も発生するため、制御するためのコントローラ設計のみでは、振動抑制が難しい場合がある。そこで、最大変位を低減しないように、変位拡大機構の振動方向に対しせん断に作用する新たな平面減衰機構を検討する。その平面減衰機構に対し、高周波数における特性を明らかにする。さらに、その減衰機構の特性は、事前研究により一般的なバネ・マス・ダンパだけは、表現しにくいことを確認しているため、新たな分数階微積分という現在研究が進んでいる新たな数学的手法を導入した新しい制御法を整備し、最終的には、精密位置決め装置の高性能化を図ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

位置決め装置は、使用目的に応じて装置に要求される最大変位量が異なり、様々な変位量の位置決め装置の周波数応答を測定する必要がある。しかし、市販されている減衰特性を検証する測定装置は、おおよそ 100Hz が上限であり、本研究では性能が足りない。そこで、従来まで研究してきた精密位置決め装置を加振器として应用展開し、非接触変位計を導入することにより、高周波数に対応した測定環境を構築し、微小変位に伴う平面減衰機構の応力の特性を明らかにするため、力センサーを導入する。

つぎに、分数階微分モデルを構築するためには、減衰係数や固有角周波数、分数階の次数がモデルの周波数応答に与える影響を把握する必要がある。様々な位置決め装置に適用できる分数階微分モデルを構築するため、制御系設計用ソフトウェアを用いて、減衰係数などがモデルに与える影響について検討を行った。しかし、分数階次数を導入する場合、PID 制御器との関連づけは困難であり、新たな制御系設計法について検討を行った。制御系設計において、精密位置決め装置の共振ピーク値を制御器の反共振特性により相殺するループ整形を行っているが、この反共振特性を保持したまま離散化するため、従来までの手法は用いることができない。最先端研究の分数階微積分の解法の中で、減衰係数の分数階の解法に非線形なガンマ関数が含まれ、未だクリアできておらず、一般解が明らかになっていないのが現状である。そのため、分数階微積分にも対応した Oustaloup 法により整数次数の伝達関数に近似する手法の検討を行った。

#### 4 . 研究成果

積層型圧電素子と変位拡大機構を組み合わせた精密位置決め装置を高速高精度に位置決めするために、適用する平面減衰機構の特性把握および分数階微積分という数学を導入した従来にはない新しい制御手法の研究開発を進め、その有効性を実験的に検証した。平面減衰機構の特性を明らかにする市販の評価装置は、必要とする周波数を測定可能な製品が存在せず、従来にはない平面減衰機構の評価装置を新たに試作し良好な結果を得た。新たな評価装置を用いることで、ヒステリシス特性、周波数依存性を 100Hz 以上 1kHz 付近までの高周波数帯域にて明らかにした。さらに分数階微積分を導入した制御対象の伝達関数は、最先端研究の分数階微積分の解法の中で、減衰係数の分数階の解法に非線形なガンマ関数が含まれ、未だクリアできておらず、一般解が明らかになっていないのが現状である。そのため、分数階微積分にも対応した Oustaloup 法により整数次数の伝達関数に近似することで制御系設計を進め、制御性能向上させた。

本研究を進展させ、精密位置決め機構および制御系設計手法を超音波援用振動切削への応用を目指した研究内容の申請が、科研費（若手 22K14208）に採択された。採択年数は、2022-2023 年。関連する研究成果を発表し、研究継続している。

2020 年までの発表等の成果は 科研費電子申請システムに記入済み 2021 年以降の論文、学会発表等について記載する。

##### ○研究論文

査読済・掲載予定

Elucidation of Drilling Behavior on Workpiece Superimposed with Ultrasonic Vibration, International Journal of Automation Technology, Vol.16 No.5, 2022

##### ○学会発表

Basic properties of highly precise positioning system for ultrasonic vibration cutting, K. Sugawara, K. Sato, N. Tsuji, A. Sakurada, K. Miyawaki and H. Isobe, 6th STI-Gigaku2021, STI-9-36, 2021

A study on small-diameter drilling by ultrasonic vibration workpiece -Effects of biting behavior and cutting edge wear-, N. TSUJI, A. SAKURADA, K. MIYAWAKI and H. ISOBE, Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century (LEM21), 2021

Evaluation Of Cutting Edge In Suitable Ultrasonic Vibration-Assisted Drilling, N. TSUJI, A. SAKURADA, K. MIYAWAKI and H. ISOBE, AUN/SEED-Net Joint Regional Conference in Transportation, Energy and Mechanical Manufacturing Engineering - RCTEMME2021, Conference Room 5, ID139, 2021

ワーク励振による超音波援用小径ドリル加工に関する研究（第 3 報） 超音波振動が刃先の摩耗に与える影響とその理論的考察 ，辻尚史，高島孝太，櫻田陽，宮脇和人，磯部浩己，2022 年度精密工学会春季大会・講演論文集，E86，2022

超音波振動切削による表面テクスチャ創成技術と有用性の評価（第 4 報）-加工条件とトライボロジー特性の関係評価- ，高島孝太，櫻田陽，原圭祐，河野大輔，田浦裕生，辻尚史，磯部浩己，2022 年度精密工学会春季大会・講演論文集，E87，2022

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hiromi Isobe, Masataka Okuda, Keisuke Hara, Akira Sakurada, Jun Ishimatsu
2. 発表標題 VISUALIZATION OF DYNAMICALLY CHANGING CUTTING FORCE UNDER ULTRASONIC CUTTING CONDITION
3. 学会等名 The International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials & Processing 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤 礼皇, 櫻田陽, 原圭祐, 磯部浩巳
2. 発表標題 超音波振動切削による表面テクスチャの創成技術と有用性の評価
3. 学会等名 2020 年度精密工学会秋季大会学術講演会（オンライン開催）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 建, 川口 大輝, 石松純, 櫻田 陽, 原 圭祐, 磯部 浩巳
2. 発表標題 超音波振動援用切削によるパターンコントロール表面テクスチャの創成
3. 学会等名 2020 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会（オンライン開催）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kousei Sugawara, Reo Kondo, Akira Sakurada, Kazuto Miyawaki and Hiromi Isobe
2. 発表標題 Basic properties of highly precise positioning system for ultrasonic vibration cutting
3. 学会等名 5th STI-Gigaku2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸嶋慈音, 辻尚史, 櫻田陽, 今田良徳, 宮脇和人, 磯部浩巳
2. 発表標題 圧電素子と弾性ヒンジを用いた表面テクスチャ創成加工の基礎的実験
3. 学会等名 2021 年度精密工学会春季大会学術講演会 (オンライン開催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroto Kimura, Reo Kondo, Akira Sakurada, Kazuto Miyawaki and Hiromi Isobe
2. 発表標題 Positioning System of Ultrasonic Vibration with Making Functionality Texture
3. 学会等名 4th STIGigaku2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 戸嶋 慈音, 宮脇 和人, 櫻田 陽, 今田 良徳, 磯部 浩巳
2. 発表標題 微小刃物台の周波数応答の評価
3. 学会等名 平成31年度東北地区高等専門学校専攻科産学連携シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村 滉斗, 櫻田 陽, 宮脇 和人, 磯部 浩巳
2. 発表標題 機能性テクスチャの創成に伴う超音波振動加工システムの研究
3. 学会等名 2020年度日本機械学会東北学生会第50回卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------