

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：51401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14208

研究課題名（和文）機能性テクスチャを創成する平面減衰機構を適用した超音波振動源のFC制御系設計

研究課題名（英文）FC control system for ultrasonic vibration source applied flat damper to generate functional textures.

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） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：機能性テクスチャを創成する超音波援用加工では、高速および高精度を両立することが難しい場合がある。そのため振動方向に対しせん断に作用する薄い平面減衰機構およびその減衰機構の特性を分数階微積分（FC：Fractional Calculus）という新たな数学の手法を導入した制御法を適用し加工の短縮化を目指した。

本研究進捗に伴い超音波振動源の熱揺らぎから加工振幅量に変化することを確認し、その対策として、その変化することを抑制する駆動アンプを開発した。平面減衰機構と超音波振動源へのFC制御技術の効果は限定的であるものの、加工振幅量を変化することを抑制する駆動アンプが予想以上に効果が高いことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超音波援用加工に必要なとされる高速および高精度を両立し、加工における熱揺らぎの影響を抑制する研究は非常に重要な項目の一つとなっている。非線形性を有する制御対象に分数階微積分（FC：Fractional Calculus）という新たな数学の手法の導入は、新たな研究分野の開拓の一步と期待でき、今後も研究を継続していく。加工性能を低下させることなく、加工振幅を維持する方法を明らかにした本研究は、本制御技術とシステムが種々の対策の手法として検討され、機械加工分野へ貢献できると期待できる。

研究成果の概要（英文）：The study of blade edge control in ultrasonic-assisted cutting for the generation of functional textures was investigated. In ultrasonic-assisted cutting, it is sometimes difficult to combine high speed and high accuracy. New mathematical method called Fractional Calculus (FC) is introduced for thin-flat damper applied shear to the direction of vibration and new control method was applied with the purpose of reducing cutting tact time. This study confirms that the ultrasonic vibration cutting amplitude of the ultrasonic vibration byte changes from the thermal vibration fluctuations of the ultrasonic vibration source. As a solution, a drive amplifier has been developed to prevent changes in the cutting amplitude. The effect of FC control techniques on flat damper and ultrasonic vibration sources is limited. However, a drive amplifier that prevents changes in the processing amplitude was found to be more effective as expected.

研究分野：制御工学

キーワード：機能性テクスチャ 平面減衰機構 超音波援用加工 分数階微積分 Fractional Calculus 熱揺らぎ FC制御

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

圧電素子(以下 PZT)は、入力電圧をミリボルトオーダーで制御することで高精度な変位を発生させることが可能な駆動源である。しかし、最大変位量が数十 nm から数 μm と非常に小さく変位拡大機構を組み合わせることで、各種分野にて応用展開されている。これらの技術が応用された精密位置決め装置の性能向上は、ナノテクノロジーを支える基盤技術として非常に重要な項目となっている。本研究の目的は、令和元年から3年にかけて採択された若手研究(19K14931)の更なる発展と産業への応用にある。一般的に制御対象の共振現象を抑制するために減衰機構を適用すると共振ピークを下げるが、同時に共振周波数も下がることとなり、制御対象の高速化という点において制御性能を低下させる。しかし、若手研究(19K14931)にて検討した手法である振動方向に対しせん断に作用する薄い平面減衰機構およびその減衰機構の特性を分数階微積分(以下 FC: Fractional Calculus)という新たな数学の手法を導入した新しい制御法を適用することで、高速化を実現できる。この高速化の制御手法を応用するアプリケーションの一つとして、バイオミメティクス(自然からの学び)工学から始まった、機能性テクスチャを創成する素材など、従来の工作機械では難しい微細加工を実現する超音波援用加工の刃先制御の検討を進めている。

2. 研究の目的

超音波援用加工に必要な仕様として、数十 kHz の周波数およびサブマイクロメートルオーダーの切り込み高さ制御が要求されている。従来までの工作機械の加工において、一般的に良く数百 Hz、局所的には数 kHz が上限とされてきた。一方、超音波援用加工において、周波数を数十 kHz まで高めることは可能であったが、切り込み高さ制御が難しい技術であった。これらの制御性能を上回るために、令和3年までの若手研究(19K14931)における拘束板と粘弾性体にて構成される平面減衰機構および FC の制御手法を応用展開する。

先行研究の精密位置決め装置では、従来まで固定部と支持部分との間にゴムや紙などを減衰材として挟み込み、部品同士や締結ネジ面間の接触摩擦によって、共振振幅を減衰させるなどの機械的な対策をしていた。これらの手法は、アプリケーションによっては、位置決めや軌道生成の精度に影響するため、精密位置決めを目標とする機構の固定方法として本来は望ましいものではない。また、機構の動作を拘束するような付加的な機構は、たとえ減衰性能が上がったとしても最大変位を減少させたり、共振周波数を低域に移動させたりする可能性が大きいため、共振振幅の減少と引き換えに別の問題が発生するのが一般的である。そこで、最大変位を減少させないように、変位方向に対してせん断方向に減衰力が働くよう精密位置決め装置の可動部の表面に減衰機構を張り付けることを検討した。その特性を超音波援用加工の振動源に適用させる。

3. 研究の方法

1年目に、超音波援用加工の振動源の振動方向に対し、せん断方向に作用する薄い平面減衰機構について検討を行い、周波数応答から伝達関数として FC を導入した数学モデルを構築する。そのモデルに対し、制御系設計を行い DSP に実装する。

超音波援用加工の振動源に適用する前に、振動源単体にて制御実験を行い、変位の精度評価、ステップ応答実験、機能性テクスチャの加工品質に影響すると検討している変位軌跡の評価を行う。その後、超音波援用加工の振動源に適用し、制御実験を進める。加工された機能性テクスチャの性能を評価する。得られた解析結果をもとに、超音波援用加工の振動源の構造と平面減衰機構の拘束板と粘弾性体を見直し、機能性テクスチャの性能改善を進める。

最終的に高い周波数にて振動する加工に適用した振動源の構造および拘束板と粘弾性体から構成される平面減衰機構の設計指針を明確にし、新たな機能性テクスチャの形状加工時の研究開発のタクトタイムの短縮化を目指す。

4. 研究成果

○査読付き論文

Elucidation of Drilling Behavior on Workpiece Superimposed with Ultrasonic Vibration, Naofumi Tsuji, Kota Takashima, Akira Sakurada, Kazuto Miyawaki, Hiromi Isobe, International Journal of Automation Technology, Vol. 16 No.5, pp.552-561, 2022

Enhancing Engagement Behavior in Small-Diameter Deep Drilling through Ultrasonic Vibration-Assisted Drilling and Quantitative Evaluation of Hole Dimensions, Naofumi TSUJI, Akira SAKURADA, Kota TAKASHIMA, Keisuke HARA, Hirofumi KAWAMURA, Kazuto MIYAWAKI, Hiromi ISOBE, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing(JAMDSM), 2024/02/01 accept

○学会発表

Controller design for L-type precision positioning equipment with a damper, Kousei Sugawara, Naofumi Tsuji, Akira Sakurada, Kazuto Miyawaki and Hiromi Isobe, 7th STI-Gigaku2022, STI-9-51

Investigation of Wear Behavior Considering Critical Rotational Speed in Ultrasonic Vibration-Assisted Drilling, N. TSUJI, K. TAKASHIMA, A. SAKURADA, K. HARA, K. MIYAWAKI and H. ISOBE, Proceedings of the 19th International Conference on Precision Engineering (ICPE2022 in Nara), C250

Evaluation of Tribological Properties of Surface Textures Generated by Ultrasonic Vibration Cutting, K. TAKASHIMA, A. SAKURADA, K. HARA, D. KONO, H. TAURA, N. TSUJI, and H. ISOBE, Proceedings of the 19th International Conference on Precision Engineering (ICPE2022 in Nara), C219

Improvement of engagement behavior utilizing ultrasonic vibration-assisted drilling, N. TSUJI, A. SAKURADA, K. TAKASHIMA, K. HARA, H. KAWAMURA, K. MIYAWAKI and H. ISOBE, Proceedings of The International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials & Processing LEM&P 2023, LEMP2023-034

Improved tribological properties with the surface texture generated by ultrasonic vibration cutting, K. TAKASHIMA, N. TSUJI, D. KONO, A. SAKURADA, K. YANAGISAWA, H. KAWAMURA, K. HARA, H. ISOBE, Proceedings of The International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials & Processing LEM&P 2023, LEMP2023-044

Evaluation of bolt-clamped Langevin type transducer to drilling utilizing ultrasonic-assisted processing, Yuyu Orino, Naofumi Tsuji, Akira Sakurada, Kazuto Miyawaki and Hiromi Isobe, STI-Gigaku2023, STI-9-96

Effect of High-aspect Ratio Drilling Utilizing Ultrasonic Vibration, Proceedings of the 25th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2023)

Evaluation of Tribological Properties of Pattern-Controlled Surface Texture Generated by Ultrasonic Vibration Cutting, Proceedings of the 25th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2023)

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Naofumi Tsuji, Kota Takashima, Akira Sakurada, Kazuto Miyawaki, Hiromi Isobe	4. 巻 Vol.16 No.5
2. 論文標題 Elucidation of Drilling Behavior on Workpiece Superimposed with Ultrasonic Vibration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 pp. 552-561
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2022.p0552	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高島孝太, 櫻田陽, 河野大輔, 辻尚史, 川村拓史, 原圭祐, 磯部浩巳
2. 発表標題 超音波振動切削により創成された表面テクスチャにおける真実接触状態の可視化（第2報） - 3次元有限要素法による内部応力の解析 -
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会・講演論文集, F88
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kousei Sugawara, Naofumi Tsuji, Akira Sakurada, Kazuto Miyawaki, Hiromi Isobe
2. 発表標題 Controller design for L-type precision positioning equipment with a damper
3. 学会等名 7th STI-Gigaku2022, STI-9-51
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻尚史, 高島孝太, 櫻田陽, 原圭祐, 宮脇和人, 磯部浩巳
2. 発表標題 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4報)シンニングされた小径ドリルの食いつき挙動に関する実験的考察
3. 学会等名 2022年度砥粒加工学会学術講演会（ABTEC2022）, C41
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高島孝太, 亀ヶ谷尚志, 櫻田陽, 原圭祐, 河野大輔, 田浦裕生, 辻尚史, 磯部浩巳
2. 発表標題 超音波振動切削により創成された表面テクスチャにおける真実接触状態の可視化
3. 学会等名 2022年度精密工学会秋季大会・講演論文集, E87
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高島孝太, 櫻田陽, 原圭祐, 河野大輔, 田浦裕生, 辻尚史, 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-
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会・講演論文集, E87, pp.387-388
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

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