

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：33302

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14631

研究課題名（和文）びびり振動回避のためのアクティブ剛性制御システムの開発

研究課題名（英文）Development of active stiffness control system to avoid chatter vibration

研究代表者

林 晃生（Hayashi, Akio）

金沢工業大学・工学部・准教授

研究者番号：50734430

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：加工時におけるびびり振動の発生を工作機械の剛性制御（動特性）により回避・抑制する手法の提案とシステムの開発を目的として研究を遂行した。FEMによる感度解析からモデル内の剛性パラメータを変更し、剛性制御の効果が得やすいフレームの設置位置の検討を行い、提案手法の有効性をシミュレーションにより示した。また実機において、工作機械のフレームに取り付けたプレスバーに張力を付与することで剛性を変更し、ハンマリング試験による機械動特性の変化を測定することで、これをもとに安定限界線図の推移を確認した。さらに加工実験により安定限界線図の推移からびびり振動の抑制効果を検証し、提案手法の妥当性と有効性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

切削加工時に発生する「びびり振動」は製品の加工精度や表面粗さなどに悪影響をおよぼすため、これを回避するために切削条件を調整して加工されている。一方で、高速・高精度な大量生産が望まれるため切削条件の変更は望ましくないことが多く、機械側での回避手法が求められている。本研究結果により、機械自体の剛性を変更することでびびり振動を回避することができ、所望の切削条件での加工が可能となることで、工作機械メーカーとしては機械に振動回避機能を付与することで新たな性能を持つ機械開発ができ、これを利用する生産現場ではさらなる製品加工の高速・高精度化が見込まれる。

研究成果の概要（英文）：We carried out research with the aim of proposing a method and developing a system to avoid and suppress the occurrence of chatter vibration during machining by controlling the rigidity (dynamic characteristics) of machine tools. The effectiveness of the proposed method was demonstrated through simulations by changing the stiffness parameters. In addition, the rigidity of the actual machine was changed by applying tension to the press bar attached to the frame of the machine tool, and changes in mechanical dynamic characteristics were measured through hammering tests. It was confirmed that the stability limit diagram changed based on the results. Furthermore, we verified the chatter vibration suppression effect based on the transition of the stability limit diagram through machining experiments, and evaluated the validity and effectiveness of the proposed method.

研究分野：加工学および生産工学関連

キーワード：工作機械 びびり振動 剛性制御 安定限界線図

## 1. 研究開始当初の背景

切削加工は工業製品の製造に多く用いられ、モノづくりにおいて最も主要な材料除去加工方法である。切削加工時に生じる問題の一つに「びびり振動」が挙げられる。びびり振動とは、加工中に工具-工作物間の振動特性と工作機械の振動特性が共振することで起こる現象である。びびり振動が発生すると、被削物表面で振動に対応した加工痕が生じ、仕上げ面性状が悪化するだけでなく、工具の異常損耗、さらには加工機の損傷へとつながる。また、工作機械の高性能化、高硬度な難削材の開発、それに対応した工具の発展とともに、さらなる高速・高精度加工に向けた過酷な切削条件での加工により、びびり振動の問題は顕在化している。したがって、びびり振動の解消は製品品質の維持だけでなく、難削材の高速・高精度加工の実現、そして高能率化による加工コストの削減へと直結する重要課題である。

びびり振動の発生要因や回避手法について多くの研究がなされており、Altintas らが提案する「安定限界線図」(図1)では切削条件での主軸回転数が決まると、びびり振動が生じない切り込み深さが得られる安定領域を、びびり振動の発生予測モデル(図2)から示している。切削条件(主軸回転数、切り込み深さ)から得られる切削力と工作機械の振動特性からびびり振動の発生を予測する本手法は広く利用され、解析ソフトウェアやびびり振動を回避するシステムを持った工作機械が登場している。

上述の通り、切りこみ量や主軸回転数などの切削条件を変更し、びびり振動が発生する周波数領域を避けることは可能で、従来はこれが主流であった。一方で、切削条件は生産性を考慮したうえで工作機械の加工能力の上限で設定されている場合が多く、びびり振動回避のために加工能率を低下させる条件への変更が求められるほか、工具の推奨切削条件から外れることによる加工精度の低下も懸念され、高精度かつ高速・高能率加工を所望する生産現場での最適な回避手法とは言い難い。また、様々な難削材が開発され、過酷な切削条件による加工が増える今日では、切削条件に影響を及ぼさないびびり振動の回避手法が必要である。

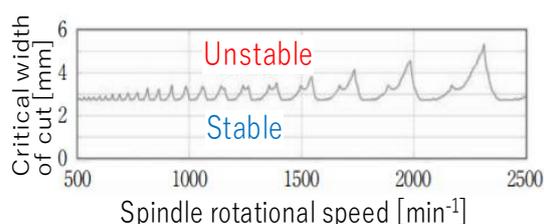


図1. 安定限界線図の例

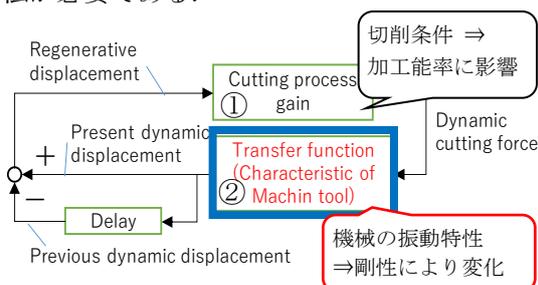


図2. びびり振動の予測モデル

## 2. 研究の目的

背景で述べたとおり、これまでは切削条件を変更することでびびり振動の発生を回避してきたが、本研究では「機械の剛性」を変更し、びびり振動が発生する周波数を予測・回避する手法を開発する。これは、びびり振動の予測モデルには、切込み幅と切削条件によって切削力が発生し、これが機械の振動特性を経て変異が生じ、次の切込み幅が変化することで切削力の変化となり、このループによりびびり振動が発生することになる。提案手法は、図2中の①切削条件によるゲインを変更してきたものを、②機械の振動特性を変更できれば、安定限界の推移が可能ではないかと考えたものである。従来の回避手法では加工能率・精度を低下させる切削条件への変更が必要になるが、本手法であれば切削条件の変更を行わずにびびり振動の回避が可能となり、加工能率・精度を維持した切削が可能となる。

機械の振動特性を変化させるために、本研究では独自に開発したパイプフレーム構造を有する工作機械で、機械を支持するトラス構造の斜材で生じるテンションを変更すると、機械の剛性が変わり振動特性が変化することを示した。これを基に、びびり振動予測モデルを用いて機械の振動特性を変えたときの安定限界線図を作成すると、安定領域がシフトすることを確認した。(図3)このように機械剛性を変化させることで所望の切削条件が安定領域に入り、加工条件に影響することなくびびり振動の発生を回避可能となる。

所望の切削条件に対応して機械剛性を変えることでびびり振動を回避することが本研究の目的であり、この技術の確立により、びびり振動の回避機能を持った、これまでにない新たな工作機械の誕生・発展につながり、高精度・高能率加工に大きく寄与することが可能となる。さらに、この剛性制御を自動化することにより加工中または指定された切削条件に応じて機械が剛性を変更して安定な状態で加工を行うシステムの開発までを目的とした。

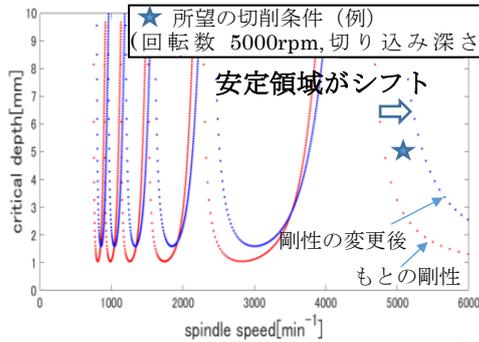


図 3. 機械剛性を変化させたときの安定限界線図の変化

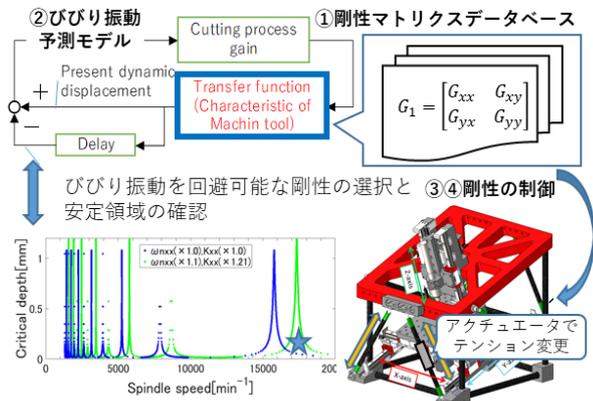


図 4. アクティブ剛性制御システム

### 3. 研究の方法

本研究は先行研究で開発した小型パイプフレーム構造工作機械を用いて実験を行う。フレームを構成する CFRP や鋳鉄などの素材の変更，ねじ機構でのテンション調整，変更フレームの位置などにより，機械の振動特性に影響を及ぼす剛性を変化させることが可能である。(図 4 右下)

工作機械の剛性（振動特性）制御によるびびり振動回避を目的とし，次の 4 項目を実施した。

- ①「工作機械の剛性マトリクス作成」
- ②「びびり振動予測モデルの作成」
- ③「びびり振動回避実験」
- ④「アクティブ剛性制御システムの構築」

びびり振動の発生する切削条件および機械の振動特性を把握するため，切削条件を変えて加工試験を行い，このときの加工面性状および加工音の測定を行い，切削理論から求まる面粗さとの比較，びびりマークと呼ばれる加工痕の有無の確認，共振による異常加工音（加工音周波数と切削周波数の共振ピーク）を評価しびびり振動の発生（切削条件）を確認する。

また，工具および工作機械の各部位で生じる振動を加速度計・変位計で測定し，振動特性を明らかにする。さらに，有限要素法や実験モード解析によって各部位の剛性を同定し，剛性マトリクス（各方向の剛性パラメータ）を持った機械振動モデルを作成する。

つぎに，機械振動モデルをベースにびびり振動モデルを作成する。びびり振動モデル内に工作機械の剛性パラメータに対応する伝達関数を組み込むことで，びびり振動の予測・安定限界線図の作成を行う。さらに，様々な剛性を変化させた場合の安定限界線図を作成し，安定限界領域の変化量やシフト方向を検証する。

びびり振動予測モデルの妥当性を検証するため，フレームテンション（ねじ部の締め付けトルクによる調整）や素材を変更（ヤング率を変更：鋳鉄などの一般的材質や CFRP）し機械剛性を変化させ，びびり振動が発生した切削条件での加工を行い，加工面性状や加工音を評価してびびり振動発生の有無を確認し，機械剛性を変化させることで予測されたびびり振動の回避が可能であることを実証する。また，機械の振動特性は固有振動数（ばね定数（剛性）と質量の比）に依存する。テンションや素材変更による剛性の変化でびびり振動が回避できない場合を考慮し，工作機械のフレーム質量を変化させて同様の加工実験を行い，びびり振動の回避を試みる。

最後に，数種類の変更可能な動剛性パラメータをデータベース化し，びびり振動が発生しない切削条件に対応した動剛性を加工中に選択・制御可能な，びびり振動を回避するための「アクティブ剛性制御システム」を構築する（図 4）。具体的には，工作機械の斜材にパルスモータを取り付け，ねじ部の締め/緩め (mm オーダ) によりテンションを増減させ剛性を変化させる。加工前にびびり振動予測モデルで所定の振幅以下となる加工条件を推定し，加工中は実測と予測とを併用しながらアクチュエータを動作させてアクティブにびびり振動を回避する。

### 4. 研究成果

- ①「工作機械の剛性マトリクス作成」
- ②「びびり振動予測モデルの作成」

本工作機械に取り付けられたプレスバー（前面に 2 本，左右に 1 本ずつ，背面に 2 本）に対し，3 通りの張力（50，100，150N）を付与し，ハンマリング試験による機械振動特性の測定を行った。共振周波数付近のコンプライアンスの高さは張力 50N，100N，150N の順となり，これにより張力を大きくすると，機械剛性が増加することがわかった。この結果をもとに安定限界線図を作成した安定限界線図を図 5 に示す。安定限界線図はプレスバーによる張力の変化，つまり工作機械の剛性の変化によって安定領域が変動することを確認できた。これにより，加工条件を変更することなく自励びびり振動を回避できることを理論的に検証できた。

なお，有限要素法や実験モード解析によって各部位の剛性を同定による剛性マトリクス（各方向の剛性パラメータ）の構築を試みたが，機械構造の解析モデル化が困難であったため，以降は実験的に測定した結果を基にびびり振動予測モデルと安定限界線図を用いて研究を進めた。

③「びびり振動回避実験」

つぎに、安定限界線図の妥当性および、プレスバーの張力変更によるびびり振動の低減効果を確認するために、加工試験を行った。アルミブロック(A5052)の側面をφ6エンドミルで加工し、そのときの変位をレーザドップラ振動計で測定した。プレスバーの張力を3通り(50, 100, 150N)に変化させ、加工中の変位を時間領域から周波数領域に変換し、びびり振動の有無を確認した。切削条件は、図5中の点に示すように軸方向切込み深さ2mm, 半径方向の切込み深さ0.05mm, 主軸回転数を4通り(22000, 25000, 26000, 27000rpm)に変化させ、加工試験を行った。22000rpmでは不安定領域に近く、25000, 26000rpmは安定領域, 27000rpmは張力が50, 150Nで不安定領域, 100Nでは安定領域となる切削条件である。これを表1に安定を○, 不安定を×, 境界線上を△として表1にまとめた。そのほかの切削条件は表2に示す。

図6に各切削条件および剛性変更時の加工面を示す。図6において、加工面の観察結果からだけでは、びびり振動の発生による面粗さの判断はできないため、図7に主軸回転数27000rpmで不安定領域の条件(張力:50N), 安定領域の条件(張力:100N)で加工したときの周波数解析の結果を示す。

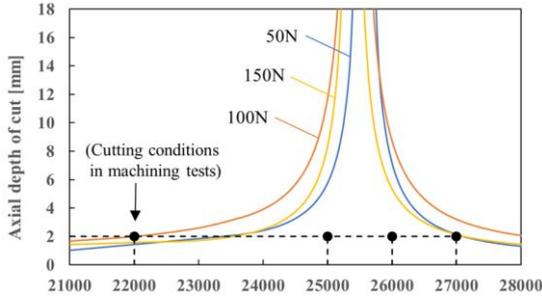


図5. 剛性変更による安定限界の推移

表2 切削条件.

Cutting direction	Down cut
Axial depth of cut [mm]	2
Radial depth of cut [mm]	0.05
Spindle speed[ $\text{min}^{-1}$ ]	22000, 25000, 26000, 27000
Tensile load [N]	50, 100, 150
Workpiece	A5052

表1 安定限界線図によるびびり振動発生の予測

Rotational speed/ Tensile load	50 N	100 N	150 N
22000 $\text{min}^{-1}$	×	△	×
25000 $\text{min}^{-1}$	○	○	○
26000 $\text{min}^{-1}$	○	○	○
27000 $\text{min}^{-1}$	△	○	△

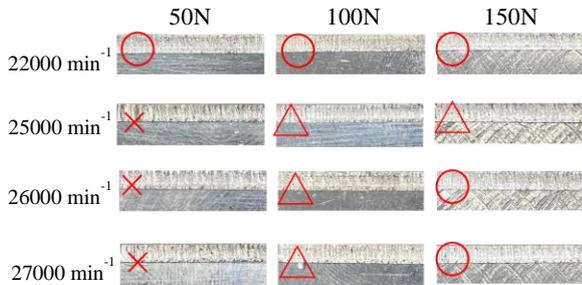


図6. 剛性変更下での加工試験結果  
(加工面の観察写真)

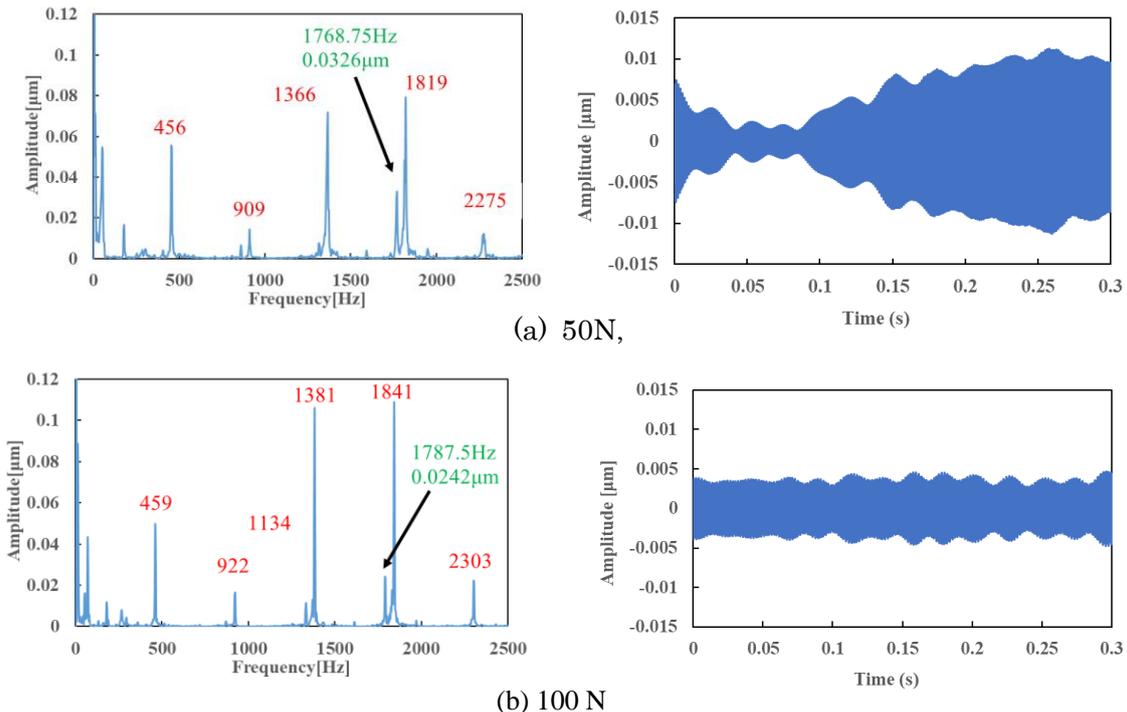


図7. 周波数解析と時間波形による自励びびり振動の抑制効果の確認

ここで、強制びり振動は周期的な振動であり、本研究は自励びり振動に着目しているため、主軸回転数の整数倍とは異なる周波数について考える。図中の赤字で示されたピーク周波数は主軸回転数(27000rpm : 900Hz)の整数倍であるため、強制びり振動であり、緑で示されるピーク周波数が自励振動と判断できる。図7で自励振動のピークは 1769, 1788Hz に見られる。そこで隣り合ったピークをバンドパスフィルタによって抽出し、それぞれの時間波形によりびり振動の確認を行った。50N の場合の波形は振幅の変化が大きく、100N の場合の時間波形は一定の振幅を維持している。50N から 100N へ張力を変えることで安定領域に推移しており、自励びり振動と考えられる 1769, 1788Hz のピーク値が 0.0326 $\mu\text{m}$  から 0.0242 $\mu\text{m}$  (25.8% 減少) に小さくなっている。張力 100N を加えたときの結果は、強制成分の変位が大きくなっているため、張力付与すなわち剛性の変更による振動の変化が確認できた。これにより、提案する手法の効果が実証された。

#### ④「アクティブ剛性制御システムの構築」

これまで機械振動特性を変化させるためのブレスバーへの張力付与はマニュアルによるねじ部の締め付けトルク管理によるものであった。これでは加工中の剛性変更ができないほか、事前にびり振動の発生を予測した場合でも締め付けトルクの調整を要することになる。よって、剛性変更をモータにより自動化することで、加工中のびり振動回避を試みる。まずは、剛性変更モータ付きブレスバーの設計・制作から、任意の剛性変更を行うためのブレスバー張力とモータ回転角との関係を調べ、これによる安定限界線図の推移の確認までを行った。図8に設計開発した剛性制御モータ付きブレスバーを換装した工作機械と、図9にこのブレスバーに 0, 50, 100N をモータにより付与したときの安定限界線図の推移を示す。図5で示した場合と同様に、張力付与すなわち剛性変更により安定限界線図が左右にシフトしていることから、びり振動回避システムにおける剛性制御部分のモータ制御化がなされたことが確認された。

最後に、モータ制御による張力付与状態での加工試験を同様に行い、提案手法およびシステムによるびり振動回避効果を確認した。軸方向切込み深さを 1.5mm で一定にし、主軸回転数を 21000, 22000, 26000rpm の条件で自動剛性制御ブレスバーの張力を 50N と 100N に変化させた。このとき、モータ付きブレスバー以外には、50N の張力を付与している。図10に加工中の工具振動の周波数解析結果を示す。(22000rpm, 張力 50N から 100N へ変化させた場合) これにより、100N に張力を変化したとき、自励びり振動の周波数における振幅値が大幅に減少していることから、安定限界が推移し、自励びり振動が十分に抑制されたことがわかる。

以上より、本研究で提案する工作機械の剛性制御によるびり振動回避手法の有効性が示され、また剛性制御の自動化が進められた。今後は、数値解析による剛性変更でのびり振動発生モデル、加工中での剛性変更によるびり振動回避システムの開発と実験による検証を課題とする。

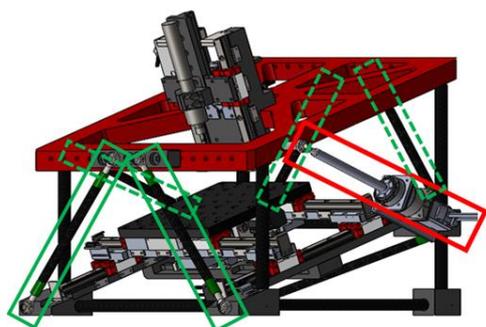


図8. 剛性制御モータ付きブレスバーを換装した工作機械

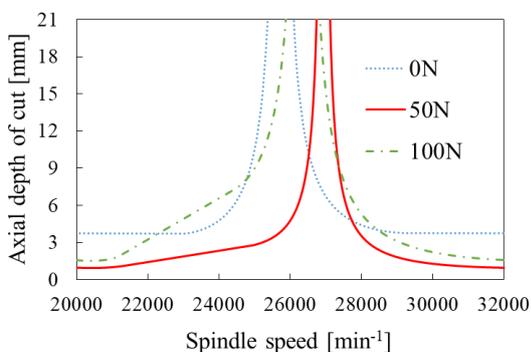


図9. 剛性変更による安定限界の推移 (モータ制御の場合)

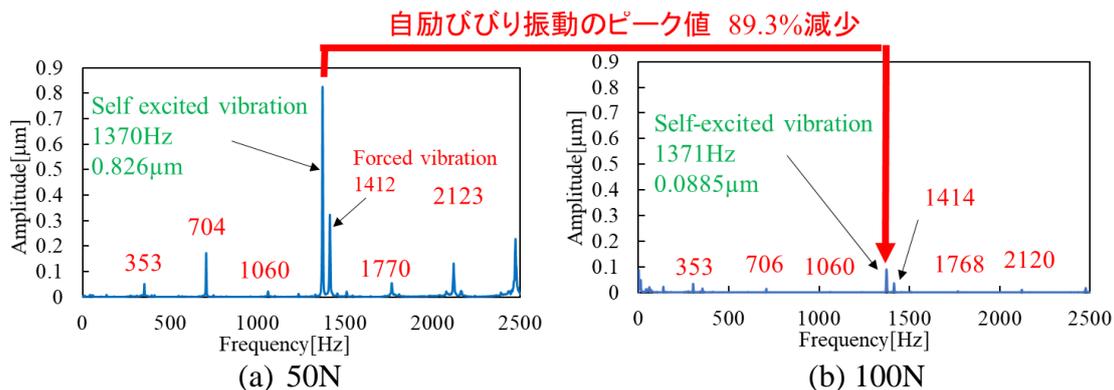


図10. 周波数解析による自励びり振動の抑制効果の確認 (モータ制御の場合)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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 Hayashi Akio, Shibata Okitoshi, Morimoto Yoshitaka	4. 巻 16
2. 論文標題 Study on Method for Avoiding Chatter Vibration by Changing Machine Tool Rigidity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 853 ~ 861
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2022.p0853	査読の有無 無
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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 柴田興利, 林晃生, 森本喜隆
2. 発表標題 びびり振動回避を目的とした工作機械の剛性制御に関する研究
3. 学会等名 2022年度砥粒加工学会学術講演会（ABTEC2022）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akio Hayashi, Yoshitaka Morimoto, Shotaro Takeuchi
2. 発表標題 Study on Dynamic Characteristics Control System of Machine Tools for Avoiding Chatter Vibration
3. 学会等名 The International Symposium on Flexible Automation 2024（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Okitoshi Shibata, Akio Hayashi, Yoshitaka Morimoto
2. 発表標題 Study on chatter vibration suppression of pipe frame machine tools
3. 学会等名 ICPE2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akio Hayashi, Okitoshi Shibata, Yoshitaka Morimoto
2. 発表標題 Study on method for avoiding chatter vibration by changing machine tool rigidity
3. 学会等名 LEM21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田怜央、柴田 興利、武田涼馬、林晃生、森本喜隆
2. 発表標題 パイプフレーム工作機械の剛性制御
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部学生会 第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田 興利、池田怜央、武田涼馬、林晃生、森本喜隆
2. 発表標題 パイプフレーム工作機械のびびり振動抑制に関する研究
3. 学会等名 精密工学会 第28回学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021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
---------	---------