

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06078

研究課題名(和文) オンマシン動剛性計測に基づく低剛性工作物の加工プロセスの提案

研究課題名(英文) Machining process for thin-walled workpiece using on-machine measurement of workpiece dynamic stiffness

研究代表者

河野 大輔 (Kono, Daisuke)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80576504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：薄肉低剛性工作物の加工支援のために、工作物の動剛性の機上計測結果に基づいた加工プロセスの研究を行った。工作物上にセンサを設置せずに、工作物の動剛性を測定する方法を提案した。提案した方法に基づいて、自動的に工作物の動剛性測定を行うシステムを開発した。加工の直前に測定した動剛性を用いて、加工時の振動振幅をシミュレートすることにより、振動の小さい加工条件を求めることができることが示された。本プロセスでは、支持具のクランプボルトの締め忘れなど、不適切な支持具の据え付け条件を検知し、修正することもできる。本プロセスは航空機産業での実加工への適用が検討されており、今後の普及が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

測定対象物の応答を測定するためのセンサを必要としない新しい動剛性の測定方法を実現できた。本方法によって、工作物の動剛性の実地測定結果に基づいて、支持具の調整や加工条件の設定を行う加工プロセスを実現できた。本研究の成果により、航空機部品の加工など、低剛性で振動しやすいために、加工条件の設定が難しかったプロセスにおいて、振動の小さい適切な加工条件を早く確実に設定できるようになった。

研究成果の概要(英文)：In this study, a machining process based on an on-machine measurement of workpiece dynamic stiffness was proposed to support machining condition determination for thin-walled workpieces. A dynamic stiffness measurement method which does not require a sensor to measure the workpiece response was proposed. Owing to the proposed measurement method, an on-machine measurement system was developed to automatically measure the workpiece dynamic stiffness. The experimental results showed that appropriate machining conditions leading small workpiece vibrations can be determined by a simulation using the workpiece stiffness measured just before machining. Inappropriate jig conditions such as loosened clamping bolts can also be detected and modified in this process. The contribution of the proposed process in a near future is promising because a discussion has been begun to apply the proposed process to a practical production of aerospace industries.

研究分野：機械工学

キーワード：低剛性工作物 動剛性 機上計測 自動化 振動 切削加工

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、省エネルギー化への要求から、新型の航空機用エンジンが次々と開発され、その開発周期が短くなっている。このため、エンジン部品の生産現場には、加工ラインの早い立ち上げが求められている。

しかし生産現場では、加工反力によって生じる振動が問題となり、加工ラインの立ち上げは容易ではない。これは、薄肉構造の部品が多く、工作物の動剛性が低くなるためである。このため現状では、以下の2つの方法により問題を解決している。

- ・加工反力による振動が小さくなるように、切削速度や切込み量などの加工条件を調整する。
- ・治具によって工作物を支持し、工作物の動剛性を補って加工を行う。

つまり、安定した加工ラインを早く立ち上げるには、適切な加工条件の設定と治具の設計・据え付け手順の確立を早く実現しなくてはならない。このためには、治具を含めた工作物の動剛性評価が重要である。また、荒加工から仕上げ加工へと加工が進むにつれて、工作物の厚さが薄くなるために、加工工程における幾つかの段階において動剛性を評価する必要がある。

従来、インパルスハンマを用いたインパクト試験によって、工作物の動剛性が評価されてきたが、実加工工程においてこのような試験を実施するのは、必要とされる測定者のスキルと測定時間を考えると現実的ではない。そこで、机上計測によって自動的に工作物の動剛性を評価するシステムがあれば、上記のような動剛性評価のニーズに対応できると考えた。

2. 研究の目的

工作機械の主軸に取り付けた動剛性測定用のプローブを用いて、工作物の動剛性を机上計測する方法を研究する。さらに、工作物動剛性の机上計測に基づいた低剛性工作物の加工プロセスを提案する。このために、以下の点を明らかにする。

- (1) 動剛性測定用のプローブを開発し、工作物上にセンサを設置せずに、工作物の動剛性を測定する方法を確立する。
- (2) 測定された動剛性と加工における工作物の動剛性を比較し、両者の差を明らかにする。
- (3) 工作物の動剛性の机上計測結果に基づいて、加工条件の設定と治具の評価・改良を行う加工プロセスを提案する。

3. 研究の方法

(1) 動剛性測定用のプローブの開発

動剛性測定用のプローブを開発する。プローブは工具ホルダを用いて工作機械の主軸に取り付けられるものとする。負荷力の周波数は0~2kHz、負荷力の大きさは最大500N、圧電素子の最大変位量20 μ m、力センサの分解能0.01N程度とする。

(2) 動剛性の測定精度の検証

圧電素子への印加電圧をモニタリングするためのモニタ用電圧と圧電素子の変位を同期して測定し、電圧から変位を推定するモデルを構築する。変位の振幅と位相の推定精度を検証する。薄い立壁(平板)を測定対象とし、開発したプローブを用いて動剛性の測定を行い、測定精度を検証する。プローブ-工作物間の相対変位を変位センサで測定し、比較対象とする。

(3) プローブによる動剛性の測定値と加工における工作物の動剛性の比較

開発したプローブを用いて測定した動剛性が、加工における工作物の動剛性(つまり工作物と工具が接触したり離れたりしながら工作物が振動している状態での動剛性)とどの程度一致するかを検証する。

(4) 動剛性測定法における測定系の動剛性の考慮

工作機械とプローブの剛性と比較して工作物の剛性が十分小さくない場合は、動剛性の測定結果から測定系の剛性の影響を取り除く必要がある。そこで、どの程度の工作物剛性から測定系の剛性を考慮する必要があるかを実験により調べる。

(5) 机上動剛性計測の加工プロセスへの適用

工作物の机上動剛性計測の結果に基づき、加工条件の設定、治具の改良、治具の据え付け調整によって、加工中の工作物の振動を低減する方法を提案する。

4. 研究成果

(1) 動剛性測定用のプローブの開発

具体的には、動剛性の逆数であるコンプライアンスを評価することとした。工作物の応答を測定する必要がないコンプライアンス(動剛性の逆数)の測定方法である Displacement sensorless Piezoexcitation (DSPE)法を提案した。図1に加振器と加速度計を用いた従来の測定法である Piezoexcitation 法(PE法)とDSPE法の模式図を示す。どちらの方法も圧電型の加振器を用いて

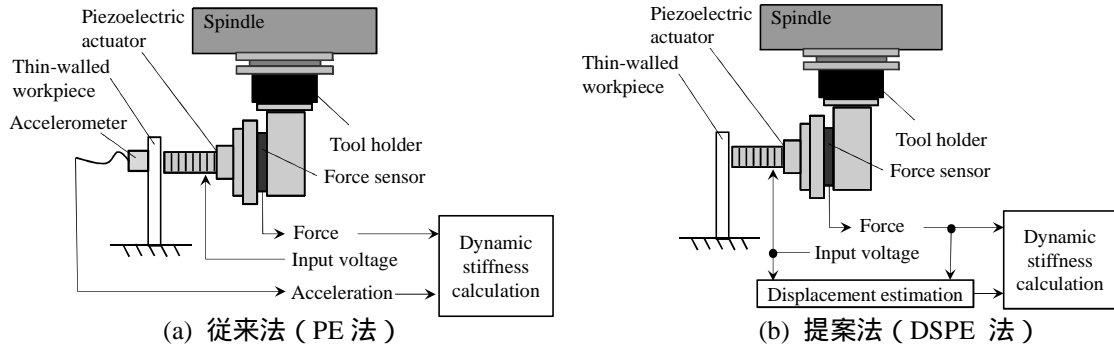


図 1 工作物の動剛性の測定方法

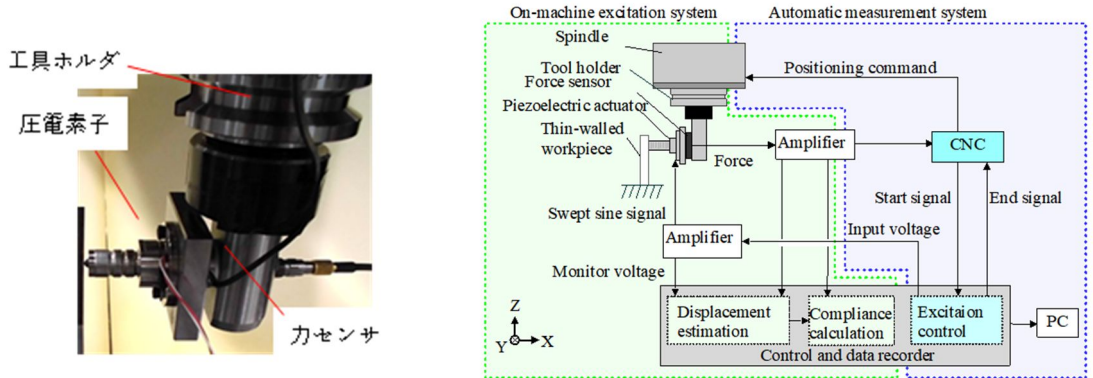


図 2 開発した動剛性の測定プローブ

図 3 工作物の動剛性を工作機上で自動測定するシステム

工作物を加振し、力センサを用いて加振力を測定している。DSPE 法では、圧電素子への印加電圧と加振力から、式を用いて工作物の変位を推定することで、工作物の応答を測定するためのセンサを不要とした。

$$x = \frac{1}{k_p} (F + \theta_p V). \quad (1)$$

ここで、 x は工作物の変位、 k_p は圧電素子の剛性、 θ_p は電気機械結合係数、 V は圧電素子への印加電圧、 F は加振力である。 x は圧電素子の変位であるが、測定系の剛性と比較して、工作物の剛性が十分低い場合は工作物の変位と等しいとみなせる。

図 2 に DSPE 法に基づいて開発したコンプライアンスの測定プローブを示す。本プローブを用いて、工作機械上で自動的に工作物のコンプライアンス測定を行うために構築したシステムの模式図を図 3 に示す。同システムはコンプライアンスの測定プローブと測定の自動化のためのシステムから構成されている。測定プローブを工作物に押し当てることで予圧を与え、測定プローブと工作物を常に接触させた状態を保つ。また、薄肉の低剛性な工作物を対象としており、加振力によって生じる主軸側の変位は工作物の変位に比べて十分小さいことを前提とする。これらの条件により、前述の通り工作物の変位は測定プローブ先端の変位と等しいとみなすことができる。

測定の自動化のためのシステムでは、工作機械の CNC と外部制御装置を使用して、測定プローブの位置決め、予圧の管理、加振の開始・終了、コンプライアンスの測定を自動で行うことができる。

(2) 動剛性の測定精度の検証

電圧から変位を推定するモデルは(1)で述べた通り構築した。開発したプローブを用いた動剛性の測定精度を検証するために、圧電型の加振器と加速度センサを用いた従来のコンプライアンス測定 (PE 法) およびインパクト試験 (Impact Test) との比較を行った。図 4 に DSPE 法と PE 法における実験のセットアップを示す。一般的な構造用炭素鋼の薄板のコンプライアンスの測定を行った。従来のコンプライアンス測定においては、工作物に加速度センサを取り付けた。

図 5 に測定結果の比較を示す。3 つの方法の測定結果は類似しており、開発したプローブを用いて、従来のコンプライアンス測定である PE 法と同等の測定結果が得られることが分かる。DSPE 法と PE 法では、1250 Hz および 1750 Hz 付近でインパクト試験と異なる結果が得られている。これは測定系の動剛性の影響である。

共振ピークの位置から、DSPE 法と PE 法によって測定された固有振動数がインパクト試験での固有振動数よりも低いことが分かる。これは、測定プローブが付加的な質量として作用したた

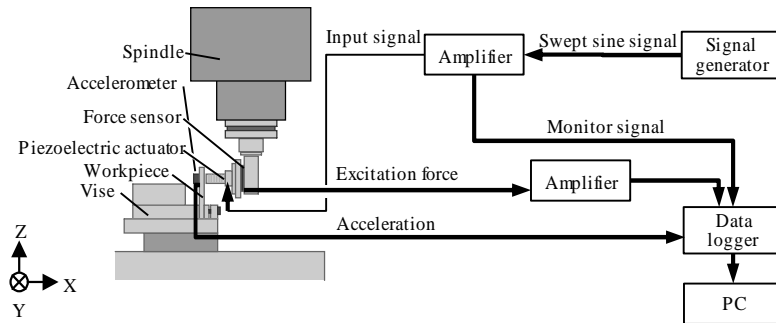


図4 検証実験におけるセットアップ

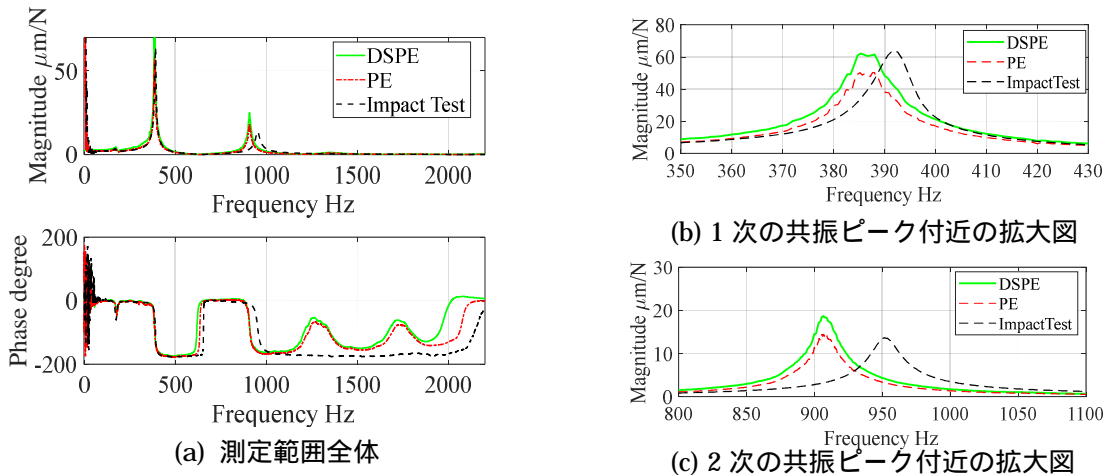


図5 コンプライアンスの測定結果の比較

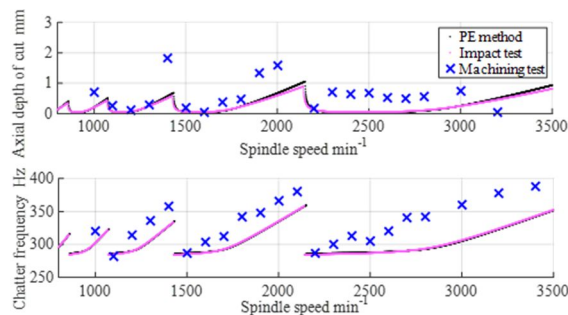


図6 安定限界線図の比較

めである。この付加的な質量の影響は、工作物の質量が大きいくほど小さくなる。今回の工作物は $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ という小型の工作物であったが、航空機の部品のように比較的大型の工作物では、付加的な質量は大きな問題にならないと推測される。

(3) プロブによる動剛性の測定値と加工における工作物の動剛性の比較

エンドミルを用いた薄い片持ち梁状の工作物の側面加工を対象として、開発したプロブを用いて測定したコンプライアンスから、実験における再生びり振動の安定限界線図を推定できるかを検証した。安定限界線図とは、主軸回転数と軸方向切り込み量の組み合わせにおいて、自励振動が発生するかどうかを示す図である。図6に安定限界線図の比較を示す。実験値と推定値は定性的によく一致しており、プロブを用いて測定したコンプライアンスによって、実加工におけるコンプライアンスを推定できることを示している。

(4) 動剛性測定法における測定系の動剛性の考慮

インパルスハンマを用いたハンマリング試験によって、測定系の動剛性を評価した。図7にフリーフリー支持における動剛性測定プロブのコンプライアンスを示す。同図から、最もコンプライアンスの大きい共振周波数は 2300 Hz であり、一般的な低剛性工作物の固有振動数よりも大きいことが分かる。図8にプロブを工作機械の主軸に取り付けた状態でのプロブ先端のコンプライアンスを示す。同図から、コンプライアンスが約 $0.1\text{ }\mu\text{m/N}$ 以下と小さい。このことから、工作物のコンプライアンスがおおよそ $1\text{ }\mu\text{m/N}$ 以上、つまり測定系のコンプライアンスの10倍以上である場合は、測定系の動剛性を考慮する必要がないと言える。一般的に工作物が低剛性で加工が難しいかどうかの基準は約 $1\text{ }\mu\text{m/N}$ であるため、今回開発したシステムでは、測定系の動剛性の影響を考慮する必要はないと言える。

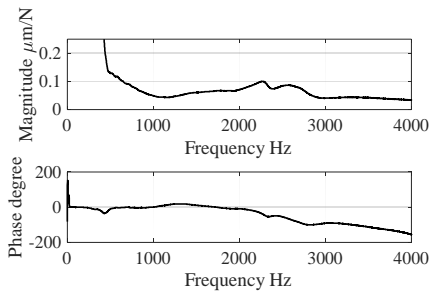


図7 フリーフリー支持での測定プローブのコンプライアンス

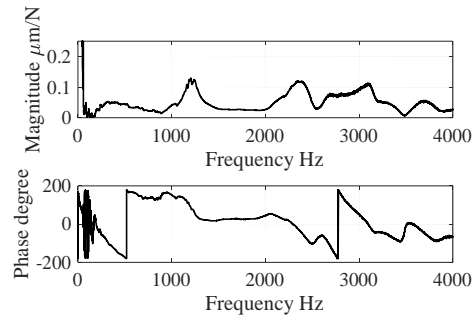


図8 主軸に取り付けた測定プローブのコンプライアンス

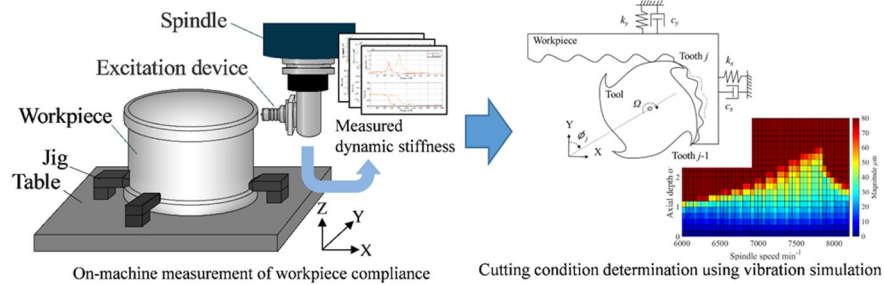


図9 機上動剛性計測に基づいた加工プロセス

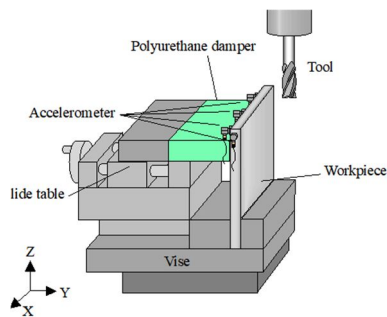
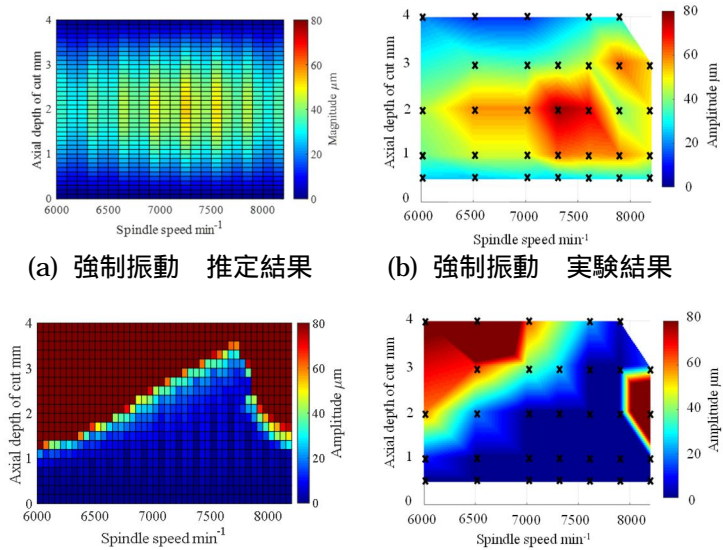


図10 実験セットアップ



(c) 再生びびり振動 推定結果 (d) 再生びびり振動 実験結果

図11 安定限界線図の比較

(5) 機上動剛性計測の加工プロセスへの適用

図9に提案した加工プロセスの概要を示す。まず加工前において、開発したコンプライアンスの機上測定システムを用いて、設置された工作物のコンプライアンスを自動測定する。コンプライアンスの測定後、測定結果を用いて、振動振幅の小さい加工条件の導出を行う。具体的には、エンドミル加工における振動モデルを用いて、振動振幅の時間応答シミュレーションを行う。振動モデルのパラメータを測定したコンプライアンスから決める。加工条件を変更してシミュレーションを繰り返すことで、加工条件と振動振幅の関係を求めることができる。この関係から、振動振幅の小さい加工条件を求める。提案するプロセスでは、加工直前における工作物のコンプライアンスを測定することを想定している。このため、支持具の剛性不足やクランプボルトの締め忘れなど、不適切な支持具の据え付け条件を検知し、修正することができる。

図10に示すエンドミル加工において、実加工における加工条件と振動振幅の関係を求めることができるかを検証した。図11に主軸回転数と軸方向切り込み量の組み合わせに対する振動振幅のマップを、時間応答シミュレーションと実験結果から求めた結果を示す。強制振動と再生びびり振動(切削加工でよく問題となる自励振動)のそれぞれにおいて、推定結果と実験結果は定性的によく一致しており、振動の小さい加工条件を求めることができると言える。本加工プロセスは航空機産業での実加工への適用が検討されており、今後の普及が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Takuma Umezu, Daisuke Kono, Atsushi Matsubara	4. 巻 77
2. 論文標題 Evaluation of on-machine measuring method for dynamic stiffness of thin-walled workpieces	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Procedia CIRP	6. 最初と最後の頁 34～37
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.procir.2018.08.204	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 -

1. 著者名 Daisuke Kono, Takuma Umezu	4. 巻 60
2. 論文標題 On-machine measurement method for dynamic stiffness of thin-walled workpieces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 299～305
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.precisioneng.2019.08.015	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 -

1. 著者名 Takuma Umezu, Daisuke Kono	4. 巻 13
2. 論文標題 Machining Process for a Thin-Walled Workpiece Using On-Machine Measurement of the Workpiece Compliance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 631～638
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2019.p0631	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6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 梅津拓真, 河野大輔
2. 発表標題 オンマシン動剛性計測に基づく低剛性工作物の加工プロセス
3. 学会等名 第18回国際工作機械技術者会議（IMEC2018）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Kono, Takuma Umezu
2. 発表標題 A measuring device for dynamic stiffness of thin-walled workpiece
3. 学会等名 6th International Conference on Virtual Machining Process Technology (VMPT) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 梅津拓真, 河野大輔, 松原厚
2. 発表標題 薄肉工作物の機上動剛性測定法の評価
3. 学会等名 2018年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高田 希恵, 梅津 拓真, 河野 大輔, 松原 厚
2. 発表標題 薄肉部品の切削加工における振動の安定性の解析
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古澤 正崇, 河野 大輔, 梅津 拓真
2. 発表標題 ファイバーレーザー干渉計を用いた工作物の機上動剛性測定装置の開発
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masataka Furusawa, Daisuke Kono
2. 発表標題 ON-MACHINE MEASURING INSTRUMENT OF WORKPIECE COMPLIANCE USING LASER INTERFEROMETER
3. 学会等名 The 2020 International Symposium on Flexible Automation ISFA2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学工学研究科マイクロエンジニアリング専攻精密計測加工工学研究室研究紹介 https://mmc.me.kyoto-u.ac.jp/research_ja https://mmc.me.kyoto-u.ac.jp/research</p>

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