

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820021

研究課題名(和文)コンプライアンスの3次元測定システムを用いた工作機械の振動特性の評価法

研究課題名(英文)Evaluation of vibration characteristic of machine tools using measuring system for three-dimensional compliance

研究代表者

河野 大輔 (Kono, Daisuke)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80576504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、3次元的な工作機械のコンプライアンスを評価する方法を研究した。つまり、作業領域内のある1点において、工具-工作物間が放射状のある方向に加振された場合に、工具-工作物間の相対変位がどのように生じるかを俯瞰的に評価した。具体的には、コンプライアンスの測定システムを構築した。さらに、俯瞰的に測定結果を理解できるカラーマップとコンプライアンスを比較するための評価指標を提案した。その結果、提案するカラーマップと評価指標が、工作機械の構造がコンプライアンスの方向依存性に与える影響の考察と、加工中の振動予想・低減に有用であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：A method was proposed to evaluate the machine tool compliance in three dimensions. The proposed method comprehensively evaluates the relative vibration between the tool and the workpiece caused by an excitation force in an arbitrary direction in a three-dimensional space. A system was developed to measure the machine tool compliance. Then, a color map and simple criteria were proposed for the compliance evaluation. Experimental results showed that the proposed method was useful in analyzing the influence of the machine tool structure on the direction dependency of the compliance. In addition, the vibration in actual endmilling process was decreased using the proposed evaluation method.

研究分野：工学

キーワード：工作機械 コンプライアンス 俯瞰的评价 振動特性 方向依存性

1. 研究開始当初の背景

近年、航空機産業では高能率な切削加工への要求が高まっている。このような加工では、工具-工作物間に生じる振動、いわゆるびびり振動が高能率化を制限し、問題となっている。びびり振動では、切削反力に対する工具-工作物間の相対変位の動的応答(工具-工作物間コンプライアンス)が重要である。

工作機械のコンプライアンスは、機械の構造だけでなく、作業領域内の位置によっても変化する。特に、航空機産業でよく使用される5軸制御工作機械では、テーブルや主軸の傾斜角度によって大きくコンプライアンスが変化すると言われている。しかし、工作機械メーカーにおいて、工作機械のコンプライアンスは積極的に評価されていない。これは、他の性能、例えば位置決め精度などの評価法と比較して、コンプライアンスの評価法が十分でないためである。

2. 研究の目的

本研究では、3次元的な工作機械のコンプライアンスを評価する方法を確立する。このために、以下の点を明らかにする。

- (1) 工具-工作物間を加振し、工具-工作物間の3次元的なコンプライアンスを測定するシステムを構築する。
- (2) 3次元的なコンプライアンスを俯瞰的に理解できる測定データの表示法を提案する。また、本表示法を用いて作業領域内の位置によるコンプライアンスの変化を評価する方法を確立する。
- (3) 異なる機械のコンプライアンスを比較するための評価指標を提案する。

3. 研究の方法

(1) コンプライアンスの3次元測定システムの構築

工具-工作物間を加振し、工作機械の3次元的なコンプライアンスを測定するシステムを構築する。本システムはつまり、作業領域内のある1点において、工具-工作物間が放射状のある方向に加振された場合に、工具-工作物間の相対変位がどのように生じるかを評価するシステムである。本システムでは、加振力を入力、工具-工作物間の相対変位を出力とする周波数応答を測定する。

(2) 3次元的なコンプライアンスを俯瞰的に理解できる測定データの表示法の提案

構築したコンプライアンスの3次元測定システムの測定結果を俯瞰的に理解できる表示法を考える。さらに、俯瞰的な評価のためには加振方向がどの程度必要であるかを実験によって調査し、作業領域内の位置によるコンプライアンスの変化を評価する方法を確立する。

(3) 異なる機械のコンプライアンスを比較するための評価指標の提案

上記(2)の表示法で表示したある1点での測定データをまとめて、工作機械のコンプライアンスの良否を評価する指標を提案する。

3軸制御や5軸制御の工作機械など、複数の種類の工作機械において評価指標を求め、構造と評価指標の関係を考察する。また、エンドミルを用いた加工実験を行い、加工時の振動振幅が評価指標によって評価できるかを検証する。

4. 研究成果

(1) コンプライアンスの3次元測定システムの構築

図1に構築したコンプライアンスの3次元測定システムの模式図を示す。機械に疑似工具と疑似工作物を設置し、両者の間に挟んだ圧電素子により加振力を与える。本システムにより、加振力に対する工具-工作物間の変位の周波数応答(工具-工作物間コンプライアンス)を測定する。

本システムでは、加振力を測定するために、疑似工具には3軸力センサを設置している。また、疑似工具と疑似工作物には3軸加速度計を取り付けている。FFTアナライザを用いて、加速度計と力センサの測定値からアクセラランスを求め、これを積分して工具-工作物間コンプライアンスを求める。

図2に疑似工作物の形状を示す。疑似工具の先端形状も図2と同様である。疑似工具と疑似工作物はどちらも直径20mmの円柱であり、圧電素子と加速度計の固定のために、先端に平面(1)、(2)、(3)を設けてある。疑似工具はツールホルダを用いて主軸に固定し、疑似工作物はコレットチャックを用いて固定する。このため、圧電素子を挟むための平面(3)、つまり加振方向をXY平面内の任意の方向に向けることができる。さらに平面(1)、(2)を用いることにより、加振方向をXY平面からZ方向に45°と60°傾けることもできる。

測定システムの帯域は2000 Hz、力センサ

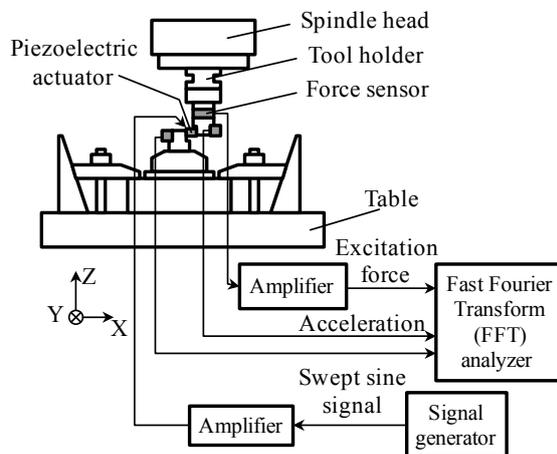


図1 コンプライアンスの3元測定システム

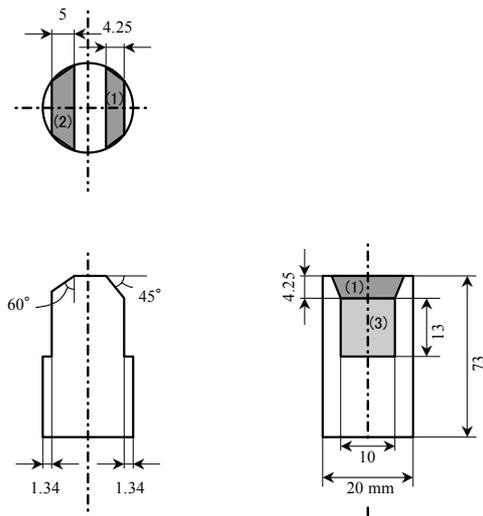


図2 疑似工具と疑似工作物の先端形状

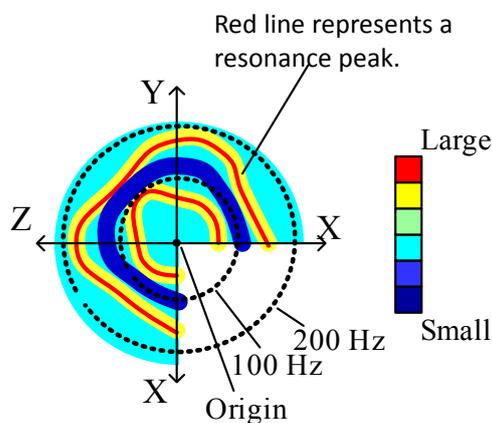


図3 コンプライアンスマップの例

の感度はXY方向:7.8 pC/N, Z方向:3.8 pC/N, 加速度計の感度は 50 mV/m/s²である。

(2) 3次元的なコンプライアンスを俯瞰的に理解できる測定データの表示法の提案

①コンプライアンスマップの提案

コンプライアンスの3次元測定システムの測定結果を俯瞰的に理解するため、コンプライアンスマップを提案した。図3にコンプライアンスマップの例を示す。同図はコンプライアンスの大きさの方向依存性を評価するための図であり、極座標系での偏角と半径が加振方向と周波数をそれぞれ表し、カラースケールがコンプライアンスの大きさを表す。3次元の方向を2次元で表現するために、第一象限がXY平面内の方向、第二象限がYZ平面内の方向、第三象限がZX平面内の方向をそれぞれ表している。

コンプライアンスマップを用いることで、例えば方向による共振ピークの変化を読み取ることができる。また、全方向においてコンプライアンスが小さくなる周波数帯域を求めることもできる。これらの情報は加工機

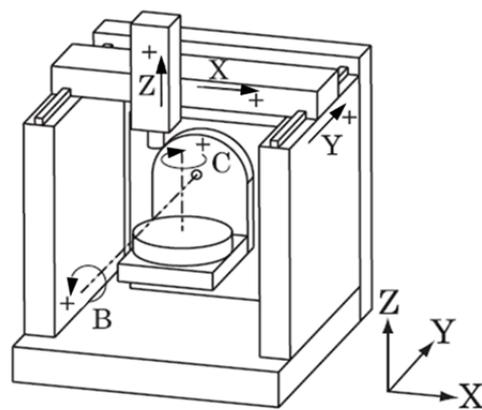


図4 実験に用いた5軸加工機

の設計や加工条件の設定、特に工具の刃数と回転数の設定に有用である。

②俯瞰的な評価のために必要な測定

構築したシステムを用いて、3次元空間における全ての方向においてコンプライアンスを測定するには、手間がかかる。そこで、直交する3方向の工具—工作物間コンプライアンスの測定値を用いて、3次元空間における他の方向のコンプライアンスを求めることが可能かを実験により検証した。

[実験方法]

図4に示す5軸制御の立形の工作機械を実験対象とした。本実験における測定方向は、X, Y, Zの直交3軸方向を含む計9方向とした。後述の方法によって、XYZ方向での測定結果から他の方向のコンプライアンスを推定し、測定結果と比較する。測定位置は通常加工を行う位置であるXY軸のストローク中央付近とした。

加振では、機械の送りをを用いて圧電素子に約 50 N の予圧を与えた状態で、圧電素子に正弦波状の電圧を印加し、電圧の周波数を 1 Hz から 250 Hz の範囲で 60 秒間掃引した。サンプリング周波数は 4096 Hz とした。

[コンプライアンスの推定方法]

直交3軸方向に加振を行って得られた9つのコンプライアンスから、XY, YZ, ZX平面内における斜め方向のコンプライアンスを推定する。このために、XYZ直交座標系を座標変換によってUVW直交座標系に変換し、U軸方向のコンプライアンスを求める。図5にXYZ直交座標系からUVW直交座標系への変換の様子を示す。角度φ, θは球面座標系における経度と緯度である。

つまり、コンプライアンスを2階のテンソルと考え、任意の角度におけるコンプライアンス行列を、式(1)を用いて推定する。

$$\hat{G}(\theta, \varphi) = (K_{\varphi}^T * K_{\theta}^T) * G * K_{\theta} * K_{\varphi} \quad (1)$$

ただし、 $\hat{G}(\theta, \varphi)$: 任意の角度におけるコンプライアンス行列、 G : XYZ方向への加振によって測定したコンプライアンス行列、 K_{θ} と

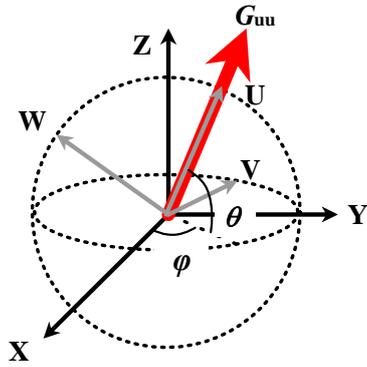


図5 XYZ座標系からUVW座標系への座標換

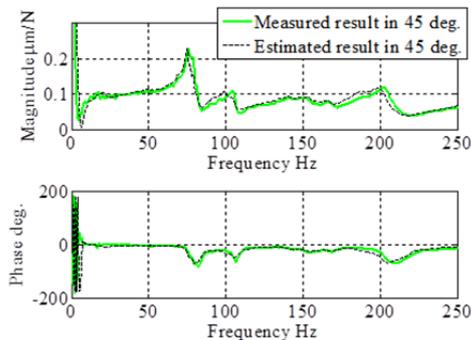


図6 コンプライアンスの推定値と測定値の比較

K_φ : 回転行列であり、それぞれ式(2)から式(5)で表される。

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} G_{uu} & G_{uv} & G_{uw} \\ G_{vu} & G_{vv} & G_{vw} \\ G_{wu} & G_{wv} & G_{ww} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$G = \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} & G_{xz} \\ G_{yx} & G_{yy} & G_{yz} \\ G_{zx} & G_{zy} & G_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$K_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、下付き文字は、加振方向と応答の方向を表す。例えば G_{xz} は X 方向に加振した場合の Z 方向のコンプライアンスである。U 軸方向のコンプライアンス G_{uu} が任意の方向のコンプライアンスである。

[実験結果]

推定結果と測定結果の比較の例として、XY 平面内における 45 度方向のコンプライアンスを図 6 に示す。同図より、推定結果は測定結果とよく一致しているように見える。

コンプライアンスが推定可能であるかを

表1 推定値と測定値間の決定係数

Excitation direction	Magnitude	Phase
XY45	0.86	0.92
XY60	0.88	0.92
YZ45	0.88	0.89
YZ60	0.91	0.84
ZX45	0.85	0.95
ZX60	0.90	0.92

定量的に評価するため、表 1 に、斜め方向におけるコンプライアンスの大きさと位相について、測定結果と推定結果の間のそれぞれの決定係数を示す。同表において、例えば XY45 とは、XY 平面内で X 方向から 45 度の角度をなす方向を表す。

表 1 より、決定係数がすべて 0.80 以上であることから、直交 3 軸方向のコンプライアンスから XY, YZ, ZX 平面内における斜め方向のコンプライアンスの推定は可能であると判断した。したがって、直交 3 軸方向のコンプライアンスを測定することで、XY, YZ, ZX 平面内におけるすべての方向のコンプライアンスが推定でき、さらには 3 次元空間内の任意の方向のコンプライアンスを求めることができるようになった。

③コンプライアンスマップの測定

3 軸の加工機においてコンプライアンスマップを測定し、コンプライアンスの方向依存性を評価した。実験には図 7 に示すような、3 軸立型マシニングセンターの実験機を用いた。機械サイズは幅×奥行×高さ=1.2 m×2.0 m×2.6 m であり、質量は約 5500 kg である。各軸はボールねじ駆動であり、案内には転がり案内を用いている。

測定位置は通常加工を行う位置である XY 軸のストローク中央付近とした。加振では、機械の送りをを用いて圧電素子に約 50 N の予圧を与えた状態で、圧電素子に正弦波状の電圧を印加し、電圧の周波数を 1~250 Hz と 1~1600 Hz の範囲でそれぞれ 60 秒間掃引した。

図 8 に測定したコンプライアンスマップを示す。同図より、以下のことがわかる。

- ・全周波数帯域において、Z 方向付近では他の方向と比較してコンプライアンスが小さい。
- ・X 方向付近において、90 Hz 付近のコンプライアンスが大きい。
- ・250 Hz 以上の周波数帯域において、XY 平面での方向依存性が小さい。

X 方向付近において、90 Hz 付近でコンプライアンスが大きくなるのは、コラムのねじれモードによる振動のためである。また、250 Hz 以上の周波数帯域において XY 平面での方向依存性が小さくなるのは、スピンドル・

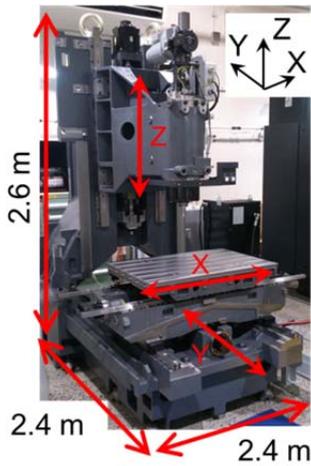


図7 実験に用いた3軸加工機

表2 コンプライアンスの評価指標の比較

		5-axis machine	3-axis machine
3D space	Max. magnitude $\mu\text{m}/\text{N}$	0.24	0.28
	Max. - Min. $\mu\text{m}/\text{N}$	0.11	0.19
XY plane	Max. magnitude $\mu\text{m}/\text{N}$	0.24	0.28
	Max. - Min. $\mu\text{m}/\text{N}$	0.03	0.14

工具ホルダ周辺の部材形状がX軸とY軸に対して対称であるためと考えられる。

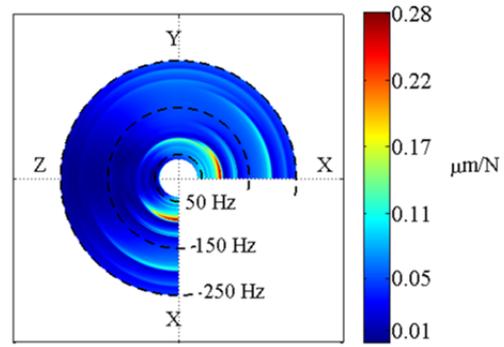
以上の結果から、コンプライアンスマップによって、作業領域内の1点におけるコンプライアンスを俯瞰的に評価できるといえる。さらに、複数地点のマップを比較することで、位置や姿勢の変化によるコンプライアンスの変化を評価することができる。

(3) 異なる機械のコンプライアンスを比較するための評価指標の提案

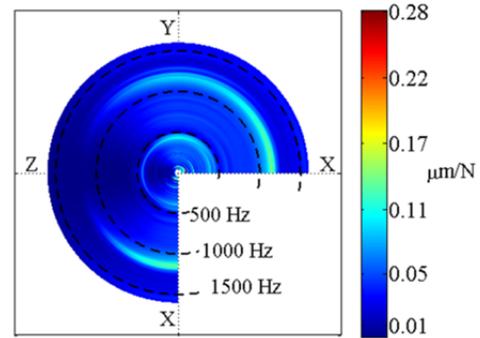
コンプライアンスを比較する評価指標として、コンプライアンスマップにおけるコンプライアンスの最大値と、最大値と最小値の差を提案した。前者は振動振幅の大きさを評価するための指標であり、後者は振動振幅の方向依存性を評価するための指標である。

①異なる機械のコンプライアンスを比較する実験

提案する評価指標を用いて、図7に示す3軸加工機と図4に示す5軸加工機のコンプライアンスを比較する。表2にコンプライアンスマップにおけるコンプライアンスの最大値と、最大値と最小値の差の比較を示す。周波数の範囲は40 Hzから250 Hzである。3次元空間全方向における結果から、両加工機でのコンプライアンスの最大値の差は、3軸加工機での最大値の14%程度であり、両加工機はほぼ同等である。しかし、最大値と最小値の差は5軸加工機の方が40%程度小さく、方向依存性が小さいことが分かる。XY平面



(a) 周波数：40 Hz～250 Hz での結果



(b) 周波数：40 Hz～1600 Hz での結果

図8 3軸加工機のコンプライアンスマップ

内での結果では、方向依存性の違いはさらに大きく、5軸加工機における差の方が75%程度小さい。

以上の結果より、5軸加工機の方が方向依存性の小さい機械といえる。これは、工具側の応答の方向依存性が小さいためである。図4に示す5軸加工機は、XY軸に対して移動体がほぼ対称であり、この対称性が、方向依存性が小さい原因だと考えられる。

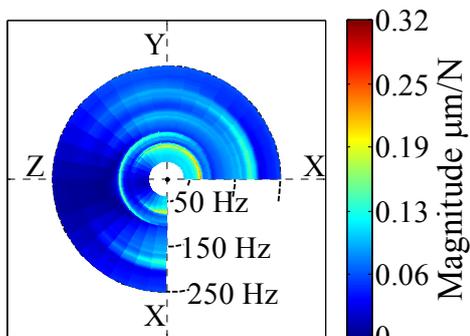
②5軸加工機の回転軸がコンプライアンスに与える影響の調査

図4に示す5軸加工機において、B軸の回転角度とクランプの有無がコンプライアンスに与える影響を調査した。回転角度：0°、90°、クランプ：有り、無しの場合4通りの条件でコンプライアンスマップを測定した。

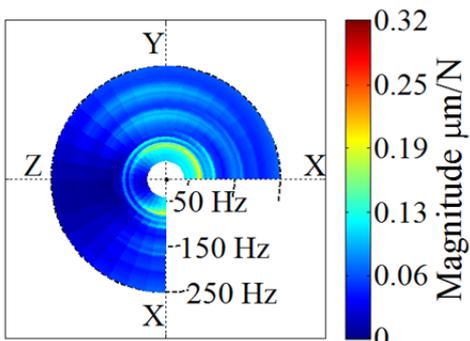
例として、図9にB軸角度0°におけるクランプ有り無しでのコンプライアンスマップの比較を示す。X軸方向付近において、180 Hz付近のコンプライアンスを比較すると、クランプ無しの結果の方が小さいことがわかる。B軸角度を90°とした場合も同様に、コンプライアンスの減少が見られた。上記のコンプライアンスの減少は、B軸移動体の振動モードの変化に起因している。

③加工実験による検証

マップから読み取れるコンプライアンスの変化が加工中の振動振幅と矛盾しないかを検証するため、②で述べた調査におけるコンプライアンスの減少が、エンドミル加工で



(a) B 軸角度 : 0° , クランプ有



(b) B 軸角度 : 0° , クランプ無

図9 5軸加工機のコンプライアンスマップ

も見られるかを調べた。具体的には、B 軸角度を 0°とし、クランプ有り無し状態でエンドミル加工を行い、主軸頭とテーブルの振動を測定した。

エンドミルには直径 6 mm のコーティッドラジラスエンドミルを使用し、工作物はチタン合金 Ti-6Al-4V とした。工作物は 3 軸動力計を用いてテーブルに設置した。主軸頭とテーブルの振動は 3 軸加速度計を用いて測定した。動力計はクランプ有り無しで加工で切削抵抗が大きく変化していないことを確認するために使用している。3 軸加速度計は 4 章(1)で述べたシステムで使用した加速度計と同様のものを使用した。加工条件を表 4 に示す。サンプリング周波数は 3000 Hz とした。

図 10 にテーブル加速度の振幅スペクトルを示す。同図から、クランプ有り無しでの結果を比較すると、クランプ無しの方が、186 Hz における振幅が半分以下になっていることがわかる。ゆえに、加工における振動振幅の減少は、②の調査で述べたコンプライアンスの減少と対応している。つまり、コンプライアンスマップを活用することで、加工中の振動を予想・低減することができると言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Daisuke Kono, Atsushi Matsubara, Investigation of direction dependency of tool-workpiece compliance of machine tools, Procedia CIRP, 査読有,46, 2016, 529-532

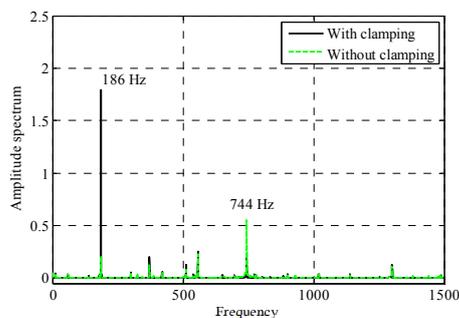


図 10 加工中のテーブル加速度の振幅スペクトルの比較

doi:10.1016/j.procir.2016.03.134

[学会発表] (計 3 件)

① Daisuke Kono, Philip Roh, and Atsushi matsubara , "Investigation on position dependency of tool-workpiece compliance," ; the 38th MATADOR Conference (MATADOR 2015), 3921 , Invited paper, Huwei, Taiwan, 29th, March 2015

②河野大輔：工作機械のコンプライアンスの位置依存性と方向依存性に関する研究 第二報－方向依存性の評価のための測定－, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, D38, 仙台, 2015 年 9 月

③河野大輔, 松原 厚, : 工作機械のコンプライアンスの位置依存性と方向依存性に関する研究, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会, F24, 東京, 2015 年 3 月

[その他]

ホームページ：河野大輔 研究紹介

http://mmc.me.kyoto-u.ac.jp/people/kono/research_top.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

河野 大輔 (KONO DAISUKE)
京都大学・工学研究科・助教
研究者番号：80576504

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし