

令和 2 年 4 月 19 日現在

機関番号：12605

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2019

課題番号：16KK0144

研究課題名（和文）複雑3次元形状のナノ切削を導く加工シミュレータの構築と微小径工具の機上成形（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Complex 3D Shape Creation Based on Cutting Simulator and On-Machine Tool Shaping (Fostering Joint International Research)

研究代表者

中本 圭一（NAKAMOTO, Keiichi）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：90379339

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,800,000円

渡航期間： 10ヶ月

研究成果の概要（和文）：加工形状の機上計測により算出された加工誤差から目標形状への修正加工を実現するとともに、任意の位置に所望の形状の工具を成形することで、セッティング後の工具の位置合わせ誤差を根本的に解消した。さらに、予測機能として構築した加工シミュレータと、ダイヤモンド工具の機上成形技術を基に、究極の超精密自律型工作機械を開発して、工具成形やセッティング、ワークの測定を含む総生産時間の短縮による超精密切削加工の高能率化を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工作機械は所望の形状を創成するために使用されるにも関わらず、加工形状を直接保証している訳ではない。しかし、機上で成形した工具を用いて加工した形状を機上計測により保証する、究極の超精密自律型工作機械が開発できれば、マイクロ・ナノオーダーの微細な加工形状の高精度化だけでなく、セッティングや測定を含む総生産時間の短縮につながる。また、光学素子や微小な機械部品などの設計自由度を高められるなど、関連研究分野に対しても広く貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Setting errors of located tool and workpiece are estimated by using an on-machine measurement device and compensated with high accuracy by modifying NC data. Also, machining errors are detected with the on-machine measurement device and a specific cutting edge of diamond tool is created by the proposed on-machine shaping. These also solve the problem of setting errors caused by the change of worn tool during a machining operation. Moreover, an autonomous machine tool with a cutting simulator is developed to contribute to a fully automated setting operation including tool shaping and workpiece measurement for achieving highly efficient ultraprecision machining.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：超精密切削加工 セッティング誤差 金型加工 ダイヤモンド工具

## 様式 F-19-2

### 1. 研究開始当初の背景

工業製品の小型化・高集積化に伴い、高機能で微細な3次元形状を創成できる超精密切削加工の重要性が増している。しかし、対象が微細な超精密切削加工では、加工後の測定のための工作機械からの取外しや修正加工のための取付け直しで生じる誤差が、加工精度よりも格段に大きい。また、超精密切削加工における精度悪化の主要因は、作業者の技能に頼らざるを得ない工具の位置合わせ誤差である。そこで、機上で工具を成形・再生し、工具の位置合わせ誤差を根本的に解消するとともに、ワークの取外し・取付けを必要としない機上計測により、インプロセスで加工形状をフィードバックすることが望まれている。また、プリプロセスでも形状情報をフィードバックして工具の成形・再生、工程設計や工具経路生成の最適化を図るために、工具形状の転写により創成される加工形状の制約、加工プロセスで生じる切削力や工具摩耗などの誤差要因のモデル化と予測が不可欠となっている。

### 2. 研究の目的

工作機械は所望の形状を創成するために使用されるにも関わらず、工作機械自身が加工形状を直接保証している訳ではない。しかし、特に対象が微細な超精密切削加工では、工作機械が機上計測機能を具備することが合理的であり、高付加価値化に不可欠である。さらに、機上で工具が成形できれば精度悪化の主要因である工具の位置合わせの誤差を根本的に解消できる。そこで、超精密自律型工作機械が予測機能を具備するための加工シミュレータの構築と微小径ダイヤモンド工具の機上成形による切削加工の更なる微細化を目的とし、工具成形やセッティング、ワークの測定を含む総生産時間の短縮による超精密切削加工の高能率化を目指す。

### 3. 研究の方法

超精密切削加工機に機上で加工形状を計測できる機能を加え、機上計測で得られた測定結果から加工誤差を算出して、目標形状への修正加工を達成する。また、機上計測を援用して任意の位置に所望の形状の工具を成形し、セッティング後の工具の位置合わせ誤差を根本的に解消する。さらに、大面積への微細構造の付与など、加工時間が長く、摩耗の進展により工具交換が必要になる状況を想定し、機上計測からの形状情報のフィードバックを基に工具の刃先を再生しながら加工を継続する、工作機械の自律的機能を実現する。

また渡航先で提案されている独自の計算法を基に、工具形状の転写により創成される加工形状を数学的に解析する手法を確立する。種々の工具形状へ適用できる工具モデルの一般化と、複雑な5軸あるいは6軸同時制御加工の加工動作への拡張に取り組み、自らのこれまでの実験結果だけでなく渡航先の工作機械による加工形状と突き合わせて、構築する加工シミュレータの妥当性と一般性を検証し、複雑微細な3次元形状の超精密切削加工を実現する。

さらに、超精密切削加工用工具の設計や製作に関する知見を参考にして、微小径で複雑な刃先をもつダイヤモンド工具を成形する技術を確立し、精度悪化の要因となる工具交換を省いて加工を続ける工作機械の自律的機能を実現するため、摩耗したダイヤモンド工具の刃先を機上で再生する成形手法も確立する。

### 4. 研究成果

複雑で微細な3次元形状を創成する加工法として超精密切削加工には優位性があるものの、使用する加工機の位置決めや工具形状の誤差、加工条件、環境などの非常にわずかな変動であっても加工精度に大きな影響を与える。特に多軸制御時においては、工具や被削材の取付け時に発生する相対的な位置決め誤差（以下、セッティング誤差）の影響が支配的であり、高い分解能を有した加工機本来の性能は十分に発揮できていない。

そこで、試し削り用被削材（以下、ダミーワーク）を用いた新たな誤差補正手法を開発した。この誤差補正手法は大きく分けて3つの手順からなる。まず、加工機に被削材を取り付け、回転工具を用いて平面出しする。その後、図1に示すように被削材の上方を覆うようにダミーワークをジグに設置し、ジグをテーブルへ固定する。ダミーワークにも同様に平面出しを行い、2つの平面の相対距離を加工機の機械座標から算出する。実際の工具中心点は、ダミーワークを取り外し、試し削りで施した溝を高分解能のレーザ顕微鏡で測定して検出する。次に、試し削りとしてダミーワークに単純形状を構成する溝を加工し、この加工痕を測定して実際の工具中心点の位置から理想的な工具中心点である回転軸中心までの距離を求め、セッティング誤差を検出する。最後に、セッティング誤差を補正するようにNCデータを修正する。

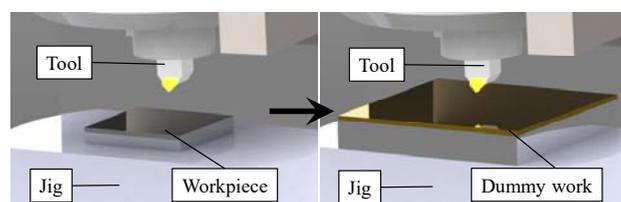


Fig. 1 Dummy work for trial cutting to detect setting errors

また、工作機械の創成運動に関する数学モデル、すなわち工作機械の形状創成理論を用いてセッティング誤差が創成運動に与える影響を解析することで、セッティング誤差を効果的に検出できる条件を求め、新たな試し削り溝も考案した。

提案したセッティング誤差補正手法を基に3次元複雑形状を加工し、その有効性を検証した。自由曲面を有する3次元形状を高精度に加工することができれば、複合機能を持つ光学素子や微細な機械部品などに対して超精密切削加工の適用範囲の拡大が期待できる。図2に示す目標形状は自由曲面を有する高さ2.25 mm、幅2.2 mmのタービンブレードを模した形状であり、厚さは曲面の位置によって異なり、最も厚い部分では0.4 mm、最も薄い部分では0.1 mmとなっている。工具経路は市販CAMシステム(DP Technology: ESPRIT 2015)を用いて生成し、半径0.5 mmの単結晶ダイヤモンドボールエンドミルを用いて荒加工は3軸制御、曲面の仕上げ加工は同時5軸制御で加工した。

加工実験の結果を比較して図3に示す。セッティング誤差を意図的に残した場合には目標形状通りに加工ができておらず、オーバーカットやアンダーカットが発生していることが分かる。目標形状の上面の各寸法とそれらをレーザ顕微鏡で測定した結果、回転工具による同時多軸制御においても目標形状と10 μm程度の誤差に収まっていることから、自動化したセッティング誤差補正において高精度な3次元形状が得られており、提案するセッティング誤差補正手法の有効性が確認できた。

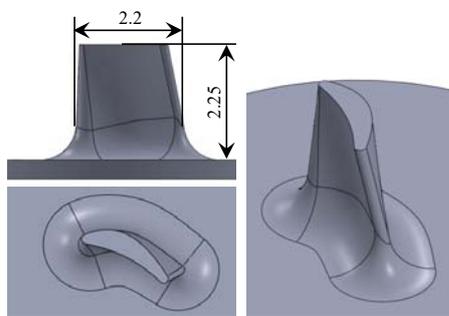
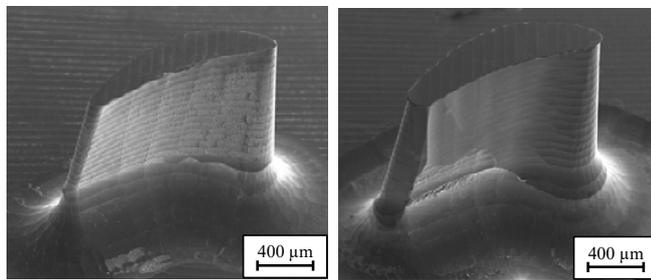


Fig. 2 Targeted 3D complex shape



(a) After compensation (b) With intentional setting errors

Fig. 19 Machined results of 3D complex shape

上記により工具のセッティング誤差の影響を排除する補正手法を確立したが、ワークのセッティング誤差は考慮されていなかった。また、工具やワークの取付けは手作業であるため、取付け精度は作業者の技能に依存し、加工開始までに長い時間を要するなど、生産性には課題を残していた。そこで、超精密切削加工の高能率化に向けて、産業用ロボットで工具とワークを取り付け、それらのセッティング誤差を机上計測して補正することにより、取付け作業の自動化を達成する手法を考案した。

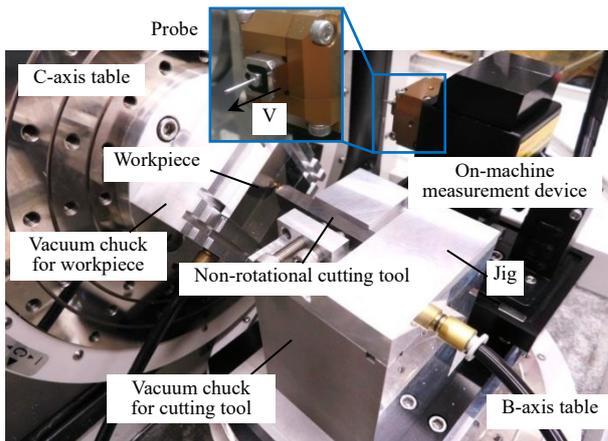


Fig. 4 Tool and workpiece setting on ultraprecision machining center

ロボットで取り付けた工具とワークの位置は、図4に示す接触式机上計測機(FANUC NANOCHECKER)で検出した。この机上計測機は工具と同様にB軸テーブル上に設置して、加工機の軸運動によりプローブがワーク表面を触るようには走査させることでC軸テーブルに取り付けられたワークの形状を加工機から取り外すことなく測定できる。プローブの変位V軸の分解能は1 nmであり、加工機の各軸の座標とともに50 msのサンプリング周期で記録する。このとき、加工機のB軸回転によって机上計測機を回転させ、ワーク表面に対するプローブの姿勢を変化させることもできる。プローブの先端球は測定対象の形状や材質に応じて変更できるが、回転軸を用いて高精度に机上計測するためには、プローブ先端球の中心点と回転軸中心との位置関係を正確に把握する必要がある。そこで、机上計測機を加工機に取り付けたのち、基準球及び傾斜ミラーと呼ばれる専用の器具を用いてプローブ中心点の位置を算出する。

様々な位置、姿勢を正しく推定するためには、机上計測で高精度に検出できる基準が必要となる。ワーク加工面のエッジや端面も候補にはなるが、バリが残存した場合や端面の面粗さが悪化した場合には高精度な検出が困難となる。そこで本研究では、弓形の断面の2つの溝を十字状にワークへ予め加工しておき、位置、姿勢の基準として利用する。十字

状の溝を加工し、位置、姿勢の基準として利用する。十字

溝を加工したワークは、C 軸テーブル上に設置した真空チャックにロボットで取り付けられた後、2 つの溝にそれぞれ交差するように机上計測機のプローブを走査させて十字溝の位置、姿勢を推定する。このとき、プローブ変位から得られる溝の断面を円弧近似することで溝の中心を検出し、十字溝の交点の位置や回転角度を推定する。

ワークのセッティング誤差補正の有用性を検証するため、L 字状のマイクロ溝を 5 本加工した。はじめにロボットを用いて、十字溝が予め加工されたワークを C 軸テーブルへ取り付け、机上計測機で基準となる十字溝を検出した。机上計測機のプローブの先端球には半径 0.25 mm のルビーを用い、測定時の送り速度は 1 mm/min. とした。その後、検出結果からワークのセッティング誤差を推定し、誤差の影響を排除するように修正した NC プログラムで L 字溝を加工した。この取り付けから加工までの一連の作業をさらに 4 回繰り返し、L 字溝が並行で等間隔に加工されているかをレーザ顕微鏡で測定して検証した。

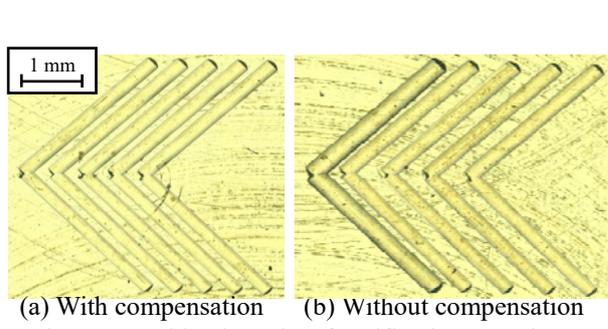


Fig. 5 Machined results of verification experiment of workpiece setting errors compensation

補正した場合及び補正しなかった場合の加工結果を図 5 に、測定結果を図 6 にそれぞれ示す。補正した場合には、溝同士の間隔が数  $\mu\text{m}$  程度の誤差に収まり、補正しなかった場合と比べて大幅に誤差が減少し、補正しきれていない工具のセッティング誤差を考慮すると、精度よくワークのセッティング誤差を補正できていることが確認できた。一方、溝同士の角度では最大で 0.01 deg. を超える誤差も生じたが、これは L 字溝の長さが 3 mm と短かったため、測定結果のばらつきが溝の角度の算出に影響を与えたものと考えられる。

多軸制御加工機を含む工作機械は一般に NC プログラムにより制御され、その NC プログラムを用いて工具干渉を検出する市販の加工シミュレータも存在するが、複雑で微細な形状を創成する超精密切削加工を対象としていない。また、ナノメートル単位での加工精度が求められる超精密切削加工では、判別が困難な工具の逃げ面と工作物との微小な干渉が最も危惧される。これは加工途中の工作物の正確な形状の把握が難しいことが一因であり、工作物と逃げ面の干渉は加工精度の大幅な低下を招き、異常摩耗や欠損による工具寿命の短命化などの問題を招く。

このため、超精密 5 軸制御マシニングセンタによる超精密切削加工を対象とした加工シミュレータを開発した。ここでは、工具刃先が NC プログラムによって掃引される形状を切削領域として算出する。次に、加工前の素材形状から切削領域を除去することで加工形状を算出し、同時に工具干渉を検出するこれにより素材形状が削り取られていく切削状況を逐次再現し、工具干渉が検出された場合には、該当する NC プログラムの行数と内容を表示する。その後、目標形状と加工形状を比較することで、オーバーカットと削り残しを算出する。最後に、オーバーカット部分を赤色、削り残し部分を青色に着色して加工誤差を描画する。

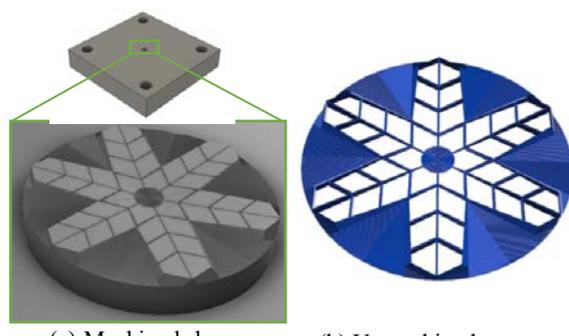


Fig. 7 Result of cutting simulator

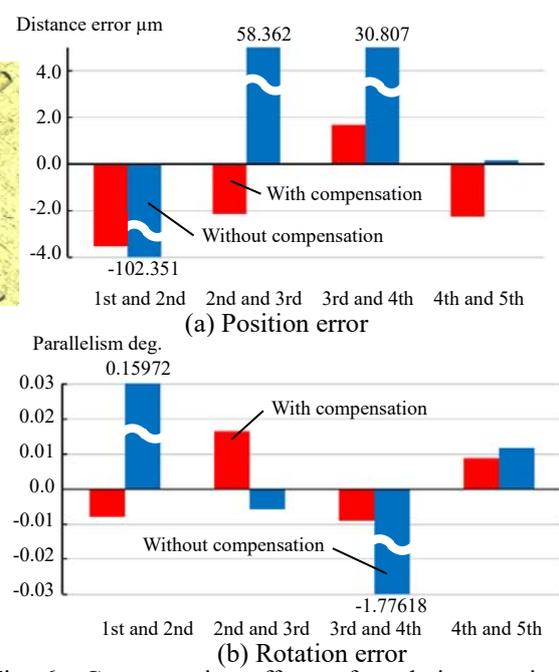


Fig. 6 Compensation effects of workpiece setting

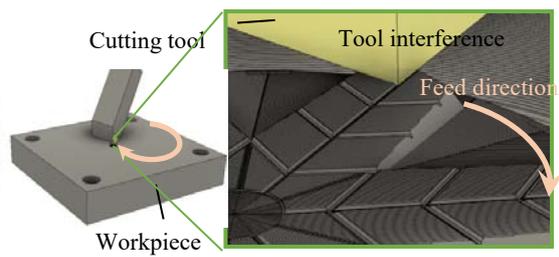
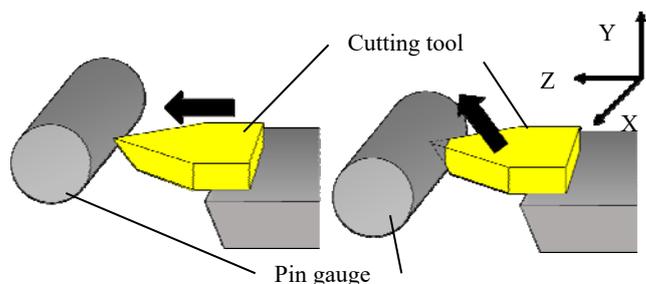


Fig. 8 Tool interference during cutting operation

マイクロ複雑形状を目標形状としてケーススタディを実施した。目標形状は実寸大の雪の結晶を模しており、微細で工具干渉が発生しやすい形状として採用した。直径は  $640\ \mu\text{m}$ 、中心と端で  $40\ \mu\text{m}$  の高低差がある。曲面上には幅  $5\ \mu\text{m}$  の溝加工を施し、雪の結晶の周りに円形で深さ  $60\ \mu\text{m}$  の高低差を付ける。素材形状は底面が1辺  $50\ \text{mm}$  の正方形、高さが  $10\ \text{mm}$  の直方体であり、素材形状の上面の中央に目標形状を創成する。工具には剣先  $90$  度のダイヤモンド工具を用いた。

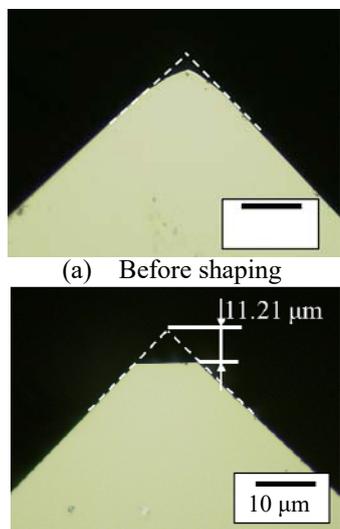
素材形状、目標形状を基に、ピックフィード  $8\ \mu\text{m}$ 、切込み深さ  $10\ \mu\text{m}$  で走査線状の工具経路となるように NC プログラムを生成し、開発したシミュレータに入力した。算出された加工形状と加工誤差を図7に示す。 $8.59\ \mu\text{m}^3$  の削り残しが発生しているものの、オーバーカットは発生することなく、目標通りの形状が得られていることが確認できた。一方、加工途中には、図8に示す工具の逃げ面と工作物との工具干渉が検出された。これは加工面に生じたカスプと呼ばれるピックフィード間隔の凹凸に、工具の逃げ面が干渉したものである。以上より、加工形状を算出して加工誤差を算出し、工具干渉を検出できることから、開発した加工シミュレータの有効性を確認できた。

一方、超精密切削加工では本質的に、加工中に工具摩耗が発生し、加工精度に影響を及ぼす恐れがある。このため摩耗した工具は取り外して再研磨するとともに、加工機に新たな工具を再度取り付ける必要がある。また、工具を再度取り付ける際には、工具中心点を正確に検出しなければならず、その補正に時間と労力を要する。工具の再セッティングにおける誤差の発生や再研磨する手間を解消するには機上成形が有効である。そこで、超精密切削加工で用いられるダイヤモンド工具の刃先を意図的に摩耗させる機上成形において、超硬合金ピンゲージを利用した際の適切な成形条件を調査し、工具の逃げ面と適切な切れ刃形状を成形した。

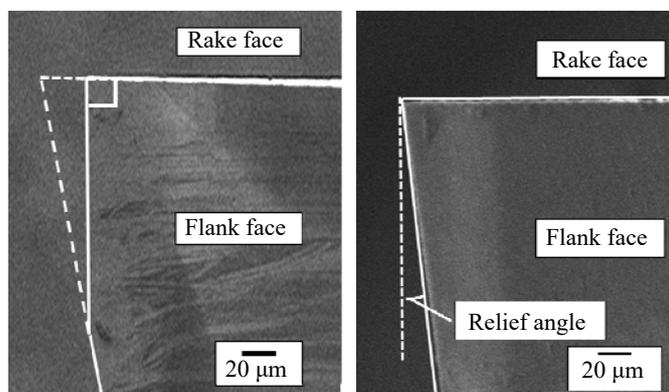


(a) Edge shape creation (b) Relief angle creation  
Fig. 9 Proposed on-machine shaping method

本成形手法では図9(a)のように、超硬ピンゲージをダイヤモンド工具に向かって移動させ、その後図(b)のように、逃げ面に沿ってピンゲージを移動させ逃げ面を成形する。なお、チップピングの発生を防いで成形後の工具刃先を鋭利にするため、成形荷重が一定の値より小さくなるまでスパークアウトを繰り返してから次の微小切込みを与える。また超硬ピンゲージの軸方向に切込み毎に工具を移動させ、図10に示すように工具刃先の丸みを抑えて、刃先を任意形状に成形できるようにした。所望の逃げ面に沿ってピンゲージを移動させることで、図11に示すように、ダイヤモンド工具の逃げ角が  $0$  度の刃先から  $10$  度の逃げ角を付与できることを確認し、本提案手法の実現可能性が確認できた。



(a) Before shaping (b) After shaping  
Fig. 10 Creation of edge shape



(a) Before shaping (b) After shaping  
Fig. 11 Creation of relief angle

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 北川 廉, 徐 萌, 中本圭一, 竹内芳美	4. 巻 85巻, 8号
2. 論文標題 多軸制御超精密切削加工の高能率化に向けたセッティング誤差補正に基づく工具とワークの自動取付け	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 722-726
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 M. Xu, K. Nakamoto, Y. Takeuchi	4. 巻 Vol. 14, No. 1
2. 論文標題 Compensation Method for Tool Setting Errors Based on Non-Contact On-Machine Measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 66-72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.20965/ijat.2020.p0066">https://doi.org/10.20965/ijat.2020.p0066</a>	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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 M. Xu, R. Kitakawa, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2. 発表標題 Automated Workpiece Setting Operation and Its Errors Compensation on an Ultraprecision Machine Tool
3. 学会等名 19th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Yokoyama, M. Xu, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2. 発表標題 A Study on On-Machine Shaping of Diamond Tool to Realize Highly Efficient Ultraprecision Cutting
3. 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Hirano, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2 . 発表標題 A Study on Tool Path Generation for Ultraprecision Cutting of Free Form Surface with Micro Texture
3 . 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Kitakawa, T. Kon, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2 . 発表標題 Three-dimensional Micro Shape Creation by On-machine Scanning Measurement
3 . 学会等名 18th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 R. Kitakawa, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2 . 発表標題 Three-dimensional Micro Shape Creation on a Workpiece Located by Industrial Robot
3 . 学会等名 International Symposium on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Xu, R. Kitakawa, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2 . 発表標題 A Study on Tool Setting Errors Compensation by Means of Non-contact Measurement on an Ultraprecision Machine Tool
3 . 学会等名 17th International Conference on Precision Engineering ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 北川 廉, 徐 萌, 中本圭一, 竹内芳美
2. 発表標題 超精密切削加工の自動セッティングに向けたワークの取付け誤差補正に関する研究
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kon, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2. 発表標題 A Study on Machining Error Estimation of Micro Complicated Shapes by On-machine Scanning Measurement
3. 学会等名 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Kitakawa, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2. 発表標題 A Study on Automatic Compensation of Workpiece Setting Errors in Ultraprecision Machining
3. 学会等名 7th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<http://web.tuat.ac.jp/~nakalab/>

## 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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ブリングシュマイアー エッカード  (Brinksmeier Ekkard)	ブレーメン大学・Foundation Institute of Materials Engineering・Professor	
その他の研究協力者	リーマー オルトマン  (Riemer Oltmann)	ブレーメン大学・Laboratory for Precision Machining・Director	
その他の研究協力者	オウリッヒ ヤン  (Aurich Jan)	カイザーслаウテルン大学・Institute for Manufacturing Technology and Production System・Professor	