

# 産業用ロボットを用いた超精密加工機へのワークの取付けに関する研究

東京農工大学 ○北川 廉, 東京農工大学大学院 ◎中本圭一

## 要 旨

超精密切削加工の工具やワークの取付け時には熟練した作業者でも数  $\mu\text{m}$  程度の誤差が生じ、加工精度に大きな影響を与える。しかし、この誤差の測定と補正は非常に煩雑で時間と労力を要す。これまでに工具の取付け誤差を補正する手法は提案されているが、ワークについては検討されていなかった。そこで本研究では、産業用ロボットを用いたセッティング作業の自動化に向け、ワークの取付け誤差を机上計測して補正する手法を提案する。

## 1. 緒 論

各種工業製品の高性能化・小型化が進み、非球面レンズに代表される光学素子などではナノメートル単位の形状精度や表面粗さが求められている。一方で、超精密切削加工は他の加工法に比べて低コストで材質の制限が少なく、微細な3次元形状を得るのに適した加工法と考えられる。しかし、工具やワークの取付けの際に生じる数  $\mu\text{m}$  程度の<sup>1)</sup>取付け誤差が加工精度を悪化させる要因になっていることが高精度化の課題として挙げられる。

先行研究では、工具の取付け誤差の影響を低減させる補正手法が提案され、その有用性が確認されている。しかし、作業は手間がかかるため加工を行うまでには長い時間を要し、生産性に課題を残していた。また、ワークの取付け誤差は考慮されていなかった。そこで本研究では、産業用ロボットによるセッティング作業の自動化を目指し、ワークの取付け誤差を補正することで効率と加工精度の向上を図る。

## 2. 実験装置及び工具の取付け誤差補正手法

本研究で用いる超精密多軸制御加工機(FANUC ROBO nano Ui)及び産業用ロボット(FANUC Robot LR Mate 200iD 7L)を **図1** に示す。加工機は、並進運動 1 nm、回転運動  $10^{-5}$  deg. の分解能を持ち、ストロークは X 軸 200 mm、Y 軸 20 mm、Z 軸 100 mm、B 軸と C 軸 360 deg. である。産業用ロボットは、J1~6 軸の 6 軸制御で繰返し位置決め精度は  $\pm 30 \mu\text{m}$  である。また、ロボットアーム先端のハンドは圧縮空気で開閉してワークを掴むことができる。

工具を B 軸テーブル上に設置したとき、**図2** のように工具制御点が B 軸と C 軸の回転中心からどの程度離れているかを正確に検出する必要がある。先行研究で提案された手法では、本加工の前に黄銅などの転写性の良い材料に試し削りを施し、その加工痕から工具制御点を算出して、本加工用の NC プログラムを修正することで取付け誤差を補正する<sup>2)</sup>。

## 3. 産業用ロボットによるワークの取付け

先行研究ではボルト締結によりワークを固定していたが、本研究ではロボットによるワークの取付けを容易にするため、固定方法を真空チャックとした。また、加工機のテーブルに設置できる小型で軽量な真空チャックを製作し、約 0.5 MPa の圧縮空気を供給することで -85~-90 kPa の真空を発生させ、ワークを吸引した。

産業用ロボットを用いて真空チャックにワークを取り付けた場合の繰返し位置決め精度を調査した。加工機付近の台上に置いた加工前のワークを、C 軸テーブル上の真空チャックに取り付けるといった想定でロボットの操作プログラムを作成し、取付けを 10 回繰り返した。このときのワークの位置及び XY 平面上の回転をレーザ変位計(KEYENCE 超高速インラインプロファイル測定器 LJ-V7300)で測定した。レーザ変位計の繰返し精度は X 軸方向

5  $\mu\text{m}$ 、Y 軸方向 60  $\mu\text{m}$  であり、分解能はそれぞれ 1  $\mu\text{m}$ 、300  $\mu\text{m}$  である。

1 回目のワーク取付け位置を基準とした測定結果を **図3** と **図4** に示す。ワークの位置は X 軸方向に最大で 54  $\mu\text{m}$ 、Y 軸方向に最大で 23  $\mu\text{m}$  程度、回転は 0.003 deg. 程度の誤差が生じており、要求される加工精度に対して非常に大きい。この結果には、ロボットの運動誤差、ロボットハンドのワーク着脱で生じる誤差、ワークを真空で吸引し固定する際に生じる誤差が含まれると考えられるが、位置決め誤差の影響をナノメートル単位にまで低減させるためには、ワークを取り付ける度に測定する必要があることが分かる。

## 4. ワーク取付け誤差の補正手法

本研究では、加工機上におけるワークの位置・姿勢を正確に検出することで加工用の NC プログラムを修正し、取付け誤差の影響を低減させる。そこで、ワークの位置・姿勢を測定するために、

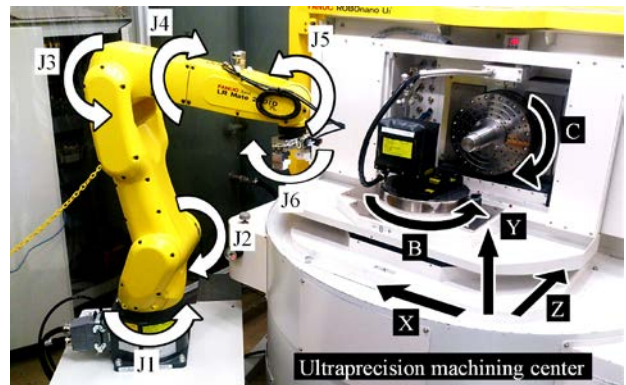


Fig. 1 Ultraprecision machining center and industrial robot

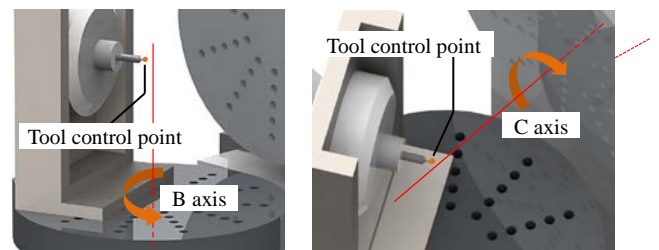


Fig. 2 Setting errors of cutting tool against rotation center

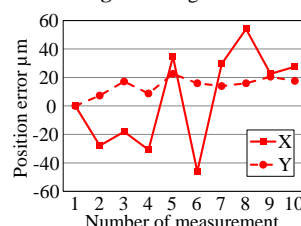


Fig. 3 Workpiece position error

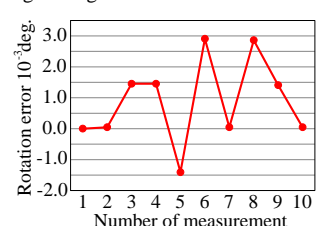


Fig. 4 Workpiece rotation error

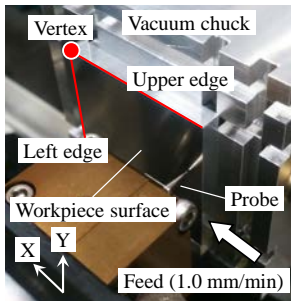


Fig. 5 Measurement by on-machine measurement device

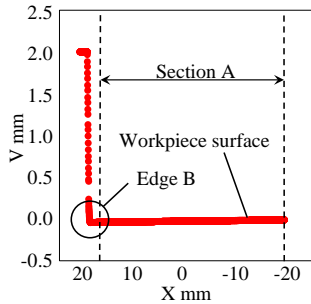


Fig. 6 Measurement result of workpiece edge and surface

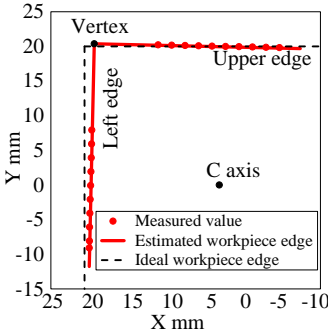


Fig. 7 Measured workpiece position

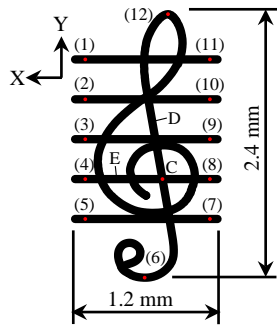


Fig. 8 Target shape

接触式机上計測機(FANUC NANOCHECKER)を用いた。机上計測機は工具を把持するイケールと同様に B 軸テーブル上に設置して、プローブがワークを触るように走査させる。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 1 ms のサンプリング周期で連続的に記録できる。プローブの先端球は材質がダイヤモンド、半径は 0.06 mm である。

本研究ではワークの形状は既知とし、寸法は 40×40×5 mm、材質は A5052 で、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た。測定及び加工の原点は Fig. 5 に示す頂点とし、加工面の +X 方向のエッジを左エッジ、+Y 方向のエッジを上エッジと呼ぶ。加工面にプローブを接触させ、+X 方向に走査すると Fig. 6 の結果が得られた。このときの区間 A の傾きから加工面の傾きを得ることができ、Y 座標を変化させて測定を繰り返したときのエッジ B の位置を XY 平面にプロットすると左エッジを推定することができる。上エッジについても同様にプロットしたものを Fig. 7 に示す。測定値の線形近似直線から、プローブ先端球の半径分オフセットした直線をワークの各エッジと推定し、その交点を基準の頂点とした。ワークの中心が C 軸中心と一致する場合を基準とした位置・姿勢の誤差を表 1 に示す。Z 軸方向の取付け誤差は先に述べた試し削りから算出したものである。

次に本研究で提案する補正手法の有用性を確認するため、Fig. 8 に示すト音記号を模した形状の溝を半径 0.5 mm のボールエンドミルで加工した。工具の取付け誤差の影響を最小限に抑えるため、並進軸のみ用いる 3 軸制御加工とした。Fig. 8 の点 C は直線 D、E の交点で、目標形状を加工する際の基準とする点とした。表 1 に示したワークの取付け誤差の影響を低減させるように、NC プログラムの制御点を座標変換して補正した。取付け誤差を補正していない場合と補正した場合の 2 通りで、ワークの頂点を原点としたワーク座標系で点 C が  $(x, y) = (-5.0, -20.0)$ 、 $(-8.0, -20.0)$  となるように 2 か所にそれぞれ加工した。

加工結果を Fig. 9 に示す。Fig. 8 に示した括弧付き数字 12 か所の溝深さ、交点 C の XY 座標、直線 E の傾きを机上計測機で測定し、目標形状が所望の位置・姿勢で加工できているか調べた。直

Table 1 Workpiece setting errors

	Error mm		Error deg.
X	-1.443831	A	-0.00344
Y	0.367209	B	-0.00229
Z	0.001264	C	1.30759

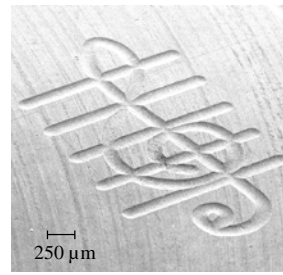


Fig. 9 Machined result

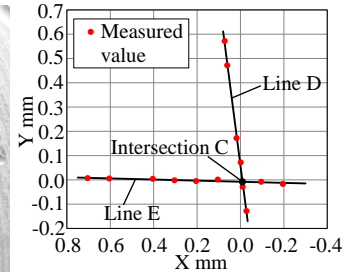


Fig. 10 Estimated line D, E and intersection C after compensation

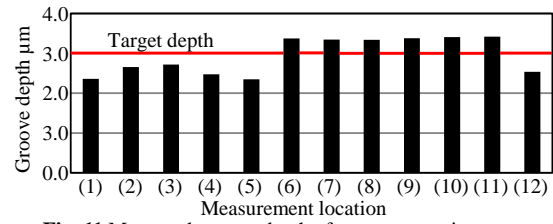


Fig. 11 Measured groove depth after compensation

Table 2 Measured errors of machined grooves

	Without compensation	With compensation
Distance from left edge to C	124.991 μm	9.726 μm
Distance from upper edge to C	-56.281 μm	7.728 μm
Slope of line E	1.30071 deg.	0.00998 deg.
Groove depth (average)	-0.206 μm	0.055 μm

線 D、E に直交するようにプローブを走査したときの溝の最深部の XY 座標から直線 D、E を推定した結果を Fig. 10 に、12 か所の溝深さを Fig. 11 に示す。これらの測定結果から得られる上エッジ及び左エッジから交点 C までの距離、直線 E の傾き、溝深さに生じた誤差を補正の有無で比較して表 2 に示す。全ての項目において、補正した場合には加工形状の位置・姿勢の誤差が大きく低減しており、特に溝深さの誤差は 0.1 μm 以下に、直線 E の傾きの誤差は 0.01 deg. 以下に抑えられた。しかしながら、左エッジ及び上エッジから交点 C の距離の誤差は 10 μm 程度生じていることが分かった。これは、机上計測機で加工面を走査してワークのエッジを検出しているために、エッジの面取りやバリの影響を受けたことにより、XY 平面上におけるワーク位置が正しく検出できなかったためと考えられる。

5. 結論

産業用ロボットを用いて加工機上の真空チャックにワークを取り付けた際の繰返し位置決め精度を調査し、超精密切削加工に要求される精度として不十分であることを確認した。また、ワークの取付け誤差の測定結果からその影響を低減させるように NC プログラムを修正して加工した結果、加工形状は目標に近づき補正の効果を確認することができた。一方、加工形状の位置は誤差が大きく、今後はより正確な取付け位置の誤差補正が課題となることが分かった。

参考文献

- 1) 佐々木崇, 園 真, 石田 徹, 河合知彦, 竹内芳美: 5 軸制御超精密フライス加工による 3 次元微小彫像の創成, 精密工学会誌, **73**, 11 (2007) 1256.
- 2) 田中匠太郎, 馬場慎之佑, 中本圭一, 竹内芳美: 多軸制御超精密切削加工の高性能化に向けたセッティング誤差補正手法の開発, 精密工学会誌, **82**, 8 (2016) 758.