

超精密切削加工に向けたワークの形状・位置の機上計測に関する研究

東京農工大学 ○上村 啓悟, 東京農工大学大学院 ◎中本 圭一

要 旨

超精密切削加工において取り付けられたワークの形状・位置が想定と異なると加工精度に大きく影響する。このため、ワークの正確な形状・位置を知ることは必要不可欠である。そこで本研究では、加工機に取り付けた荒加工後のワークの形状・位置を機上計測機によって検出し、適切な仕上げ加工を施す手法を提案した。さらに、多軸制御による超精密切削加工を想定した加工実験でその有効性を確認した。

1. 緒 論

近年、微細で複雑な形状を有する精密部品は、電子機器や光学機器などの各種工業製品の小型化・複合機能化に伴って需要が高まっている¹⁾。精密部品を得られる加工法は様々あるが、超精密切削加工は3次元複雑形状が創成可能であること、多様な被削材が選択可能であることなどの利点を有しており、微細で複雑な形状の金型や部品を高精度に加工する技術として注目されている。超精密切削加工では、ワークや工具の取付け・取外し時に発生する誤差が加工機の位置決め分解能と比べて極めて大きいため、荒加工から仕上げ加工まで同一の小径工具を用いて誤差の発生を未然に防ぐのが一般的である。しかし、除去体積の大きい荒加工では加工速度が遅く非効率であり、また工具摩耗による加工精度の低下も懸念される。

2. 目 的

本研究では、高速加工が可能な汎用の工作機械で荒加工を施し、その後ワークを専用の加工機へ取り付けて仕上げ加工を施す高効率な超精密切削加工を提案する。これにより、荒加工時間を大幅に短縮でき、また加工機の有効利用により、加工コストの低下が見込まれる。さらに、高価なダイヤモンド工具を仕上げ加工のみに用いることで摩耗の低減による工具寿命の延長も期待できる。しかし、荒加工後のワークを取り付ける際に、加工機上のワークの形状・位置が不確かになり、適切な仕上げ加工ができない恐れがある。そこで、機上計測により荒加工後のワークの形状・位置を高精度に検出し、その結果を基に仕上げ加工用のNCプログラムを修正することで高精度、高効率な超精密切削加工を達成することを目的とする。

3. ワーク形状・位置の機上計測・補正手法の提案

本研究では図1に示す超精密切削加工機 FANUC ROBO nano-Ui および接触式の機上計測機 FANUC NANO CHECKER を用いる。ここで、工作機械テーブル上のワークの形状・位置を特定するために基準の位置となる参照点を設定する。具体的には、参照点 O の座標を機上計測機で取得し、その後図2のようにこの参照点 O からの距離を機上計測機で計測することで、ワークの形状・位置を特定する。なお、参照点として校正用基準球(半径 5.55730 mm, 真球度 0.1 μm)の最大高さを検出した点を用いた。

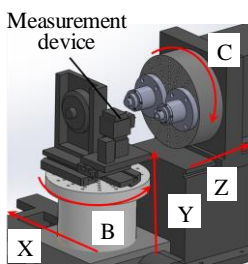


Fig. 1 Machine structure

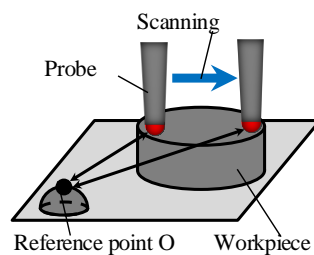


Fig. 2 On-machine measurement

ワークの形状・位置の計測結果を検証するために、深さ 3 mm, 直径 9.17 mm の球面レンズ金型を目標形状とした荒加工後のワークを対象にケーススタディを行った。荒加工では汎用旋盤でワーク (A5052) の中心に $\phi 10$ mm のドリルを用いて深さ 2.5 mm まで加工した。荒加工後のワークは加工機テーブル上に設置して、荒加工部に対して直交 2 断面で計測した。このとき超精密加工機の Y 軸と Z 軸を固定し、図3に示すように荒加工後の加工面をうoughように X 軸のみを駆動させながらプローブの変位を計測した。

この変位から計算した荒加工後のワーク形状とレーザ顕微鏡で観察された Y 軸原点を通る断面形状を比較して図4に示す。同様に、Y 軸のみを駆動させて計測し、これらの計測結果それぞれで、荒加工部の形状を最小二乗法で 2 本の直線で近似して、その交点を仕上げ加工時に必要な XY 平面上の荒加工部中心座標とした。なお、直線近似ではドリルの削り残しである先端部は無視した。以上のケーススタディの結果、荒加工後のワークの形状・位置を検出できることを確認した。

また、超精密切削加工では加工機本来の性能を十分発揮するために工具の取付け誤差も補正する必要がある。本研究では先行研究で

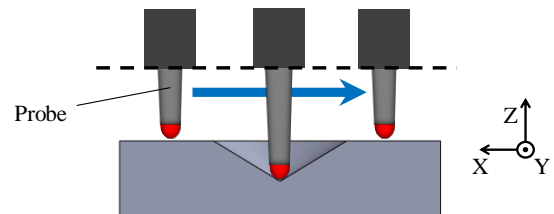


Fig. 3 Probe scanning

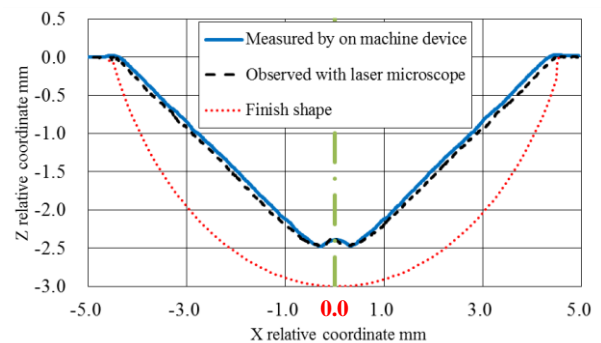


Fig. 4 Comparison of measured shapes after rough machining

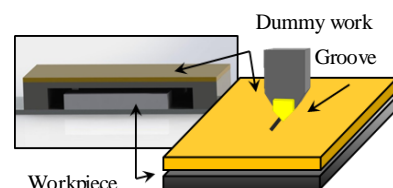


Fig. 5 Workpiece and dummy work

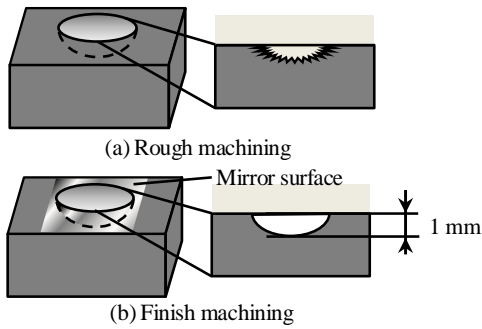


Fig. 6 Target spherical shape

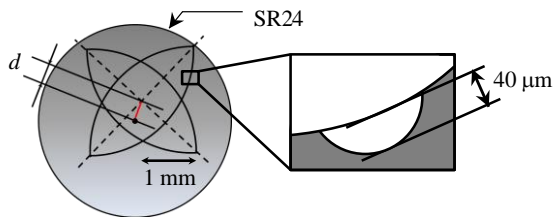


Fig. 7 Machining errors in finish grooving

提案された工具のセッティング誤差補正手法を用いる²⁾。ここではまず、図5に示すようにワーク上方に試し削り用被削材(以下ダミーワークと称す)を取り付け、これに試し削り形状を加工する。この加工痕を計測することで、工具制御点の座標を検出し、セッティング誤差を補正することができる。なお、ダミーワークを用いることでワークを取り外さずに加工痕が計測できるため、誤差補正後の加工ではワークを再度セッティングする必要はない。以上より、加工機上のワークの形状・位置、工具制御点、参照点の位置関係が明らかになる。この関係を利用してNCプログラムを修正することでワークの形状・位置の誤差を補正する。

4. 4軸制御超精密切削加工による検証

提案した誤差補正手法により高精度な加工が可能になることを検証するため、ケーススタディを行った。提案する補正の有無が異なる2種類のワークA、Bを用いて、加工精度を比較した。ワークの材質はA5052である。まず、半径24mm、深さ1mmの球面を加工するように半径2.0mmのボールエンドミルを用いて、送り速度20.0mm/min、回転数10000min⁻¹で荒加工を施した。このとき、ワークA、Bともにワークの中心からX方向、Y方向にそれぞれ0.5mm球面の中心を離れた。その後、ワークの形状・位置を机上計測してXY平面上の荒加工部の中心座標を検出し、その座標を基準として仕上げ加工を施した。

荒加工では大きなピックフィード0.55mmのため、球面の表面粗さは大きい。また、超精密加工機を用いた仕上げ加工の前には工具とワークの正確な距離を得るために再度平面出しの必要がある。このため荒加工によって得られた球面に対してさらに仕上げ加工を施す必要がある。そこで仕上げ加工は半径0.5mmのボールエンドミルを用い、送り速度20.0mm/min、回転数20000min⁻¹、ピックフィード0.27mmで球面の仕上げ加工を行った。

さらに球面上には、図6に示した半径1.0mmの1/4円を4つ組み合わせた溝加工を施した。この形状では、球面に40μmで一定の深さの溝を創成するために同時4軸制御が必要であり、また球面の中心を正確に検出しておく必要がある。このとき、ワークAではワークの形状・位置の誤差を補正することなく、ワークBでは机上計測結果を用いて補正して仕上げ加工した。なお、溝加工は送り速度10.0mm/min、回転数20000min⁻¹で行った。

図7のように目標形状においてそれぞれの円弧の端を直線で結ぶ

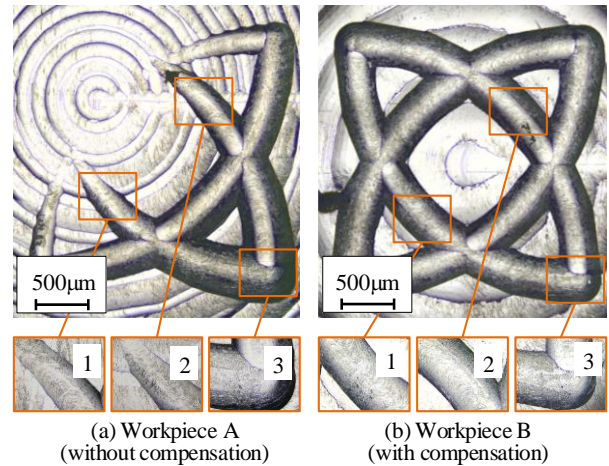


Fig. 8 Machined results

Table 1 Measured errors of machined grooves

	Workpiece A	Workpiece B
d	716.05 μm	5.10 μm

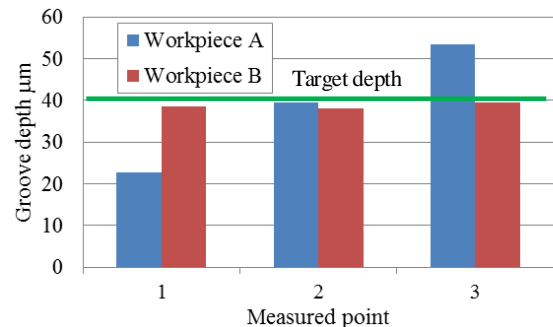


Fig. 9 Comparison of machined groove depths

ことによって溝形状の中心が分かり、この点と球面の中心までの距離を d とする。また、球面上の溝深さを図8に示した3か所でレーザ顕微鏡により測定した。これらの測定結果を表1、図9に示す。補正なしのワークAでは溝深さが測定箇所によって大きく異なっており、中心のずれ d も非常に大きく、意図的に与えたX、Y方向それぞれ0.5mmと同程度の距離となっていることが分かる。一方、ワークBの場合、 d は5μm程度で収まっている。また、球面上に施した溝深さも誤差が2μm以内となり、高精度に加工できていることが分かる。

以上のケーススタディから、机上計測によってワークの形状・位置の誤差を精度よく検出でき、その誤差を補正して加工精度を向上できることが確認できた。

5. 結 論

工作機械上で机上計測機を用いて、荒加工後のワークの形状・位置を検出し、取り付けたワークの誤差を補正する手法を提案した。また、提案した手法を用いた4軸制御による仕上げ加工のケーススタディを行い、誤差の影響を低減できることを示した。

参考文献

- 1) F. Z. Fang, X. D. Zhang, A. Weckenmann, G. X. Zhang, and C. Evans, Manufacturing and measurement of freeform optics, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 62, No. 2, pp.823-846, (2013).
- 2) S. Baba, K. Nakamoto, and Y. Takeuchi, Multi-Axis Control Ultraprecision Machining Based on Tool Setting Errors Compensation, International Journal of Automation Technology, Vol. 10, No. 1, pp.114-120, (2016).