

超精密切削加工におけるセッティング誤差補正のための試し削り形状の提案

東京農工大学 ○田中 匠太郎，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、工具制御点と回転中心との位置出しといったセッティング時に生じる誤差は、加工精度に大きな影響を及ぼす。そこで本研究では、誤差を効果的に検出するため形状創成理論に基づきセッティング誤差補正手法で用いる新たな試し削り形状を提案し、同時6軸制御による加工実験でその有効性を確認した。

1. 緒 論

近年では優れた光学性能を発揮する自由曲面上に微細形状を有する部品の需要が高まっている¹⁾。微細な形状を得られる超精密加工技術は種々あるが、複雑な3次元形状を創成できる点で超精密切削加工には優位性がある。しかしながら、超精密切削加工は工具の取付けや被削材の位置合わせ等のセッティング時に生じる誤差、すなわちセッティング誤差を伴う。そのため、加工機本来の性能を十分に発揮するには、このセッティング誤差を補正する必要がある。超精密6軸制御マシニングセンタにおけるセッティング時の誤差要因は主に6つあり、それらを低減する補正手法がこれまでに提案されている²⁾。

しかし、従来の補正手法で用いられている試し削り形状は、理論的裏付けがなく試行錯誤的に決められており、セッティング誤差の検出、補正に改善の余地がある。そこで本研究では、超精密切削加工におけるセッティング誤差を効果的に検出して補正するための試し削り形状を提案することを目的とする。

2. セッティング誤差補正手法

本研究では、図1に示す超精密多軸制御加工機 FANUC 社製 ROBO nano Ui を用いる。先行研究で提案されたセッティング誤差補正手法では、まずワークの上方に試し削り用被削材（以下ダミーワークと称す）を図2に示すように取り付け、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により工具制御点の座標を検出し、算出したセッティング誤差から NC プログラムを修正することで誤差を補正する。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、再セッティングの必要はない。

3. 形状創成理論に基づいた試し削り形状の提案

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ることで、工作機械の運動精度を定量的に検討でき、これを利用して工作機械の誤差を解析できる³⁾。

ここではまず、工作機械を工作物から始まり各構成要素を経て工具で終わる剛体の連鎖と考える。また、工作機械の構成要素を剛体と仮定し、形状創成運動を各要素間の相対運動の重量と考える。

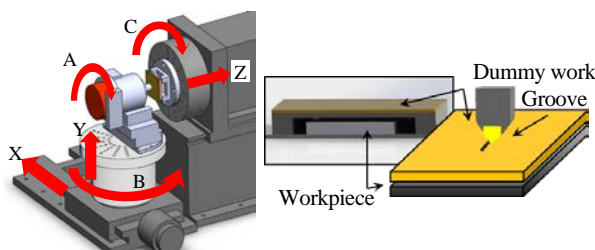


Fig. 1 Machine structure

Fig. 2 Workpiece and dummy work

剛体の運動は6自由度あるため、相対運動は工作機械の座標軸 X, Y, Z をそれぞれ 1~3, 各座標軸周りの回転運動 A, B, C をそれぞれ 4~6 と表すことができる。この数字を工作機械構成要素の連鎖の順に並べたものを機構コード k と定義し、図1の加工機を k で表すと、

$$k = 631254 \quad (1)$$

となる。このように運動形態を示すコードを設定することで、工作機械の創成運動を数学的に表現できる。さらに、この連鎖において各要素間の相対運動に対応した同時座標変換を順次行うことで、工具座標系における工具の位置ベクトルは工作物座標系に変換される。従って創成運動を形状創成関数で以下のよう表すことができる。

$$\mathbf{r}_w = A^6 A^3 A^1 A^2 A^5 A^4 \mathbf{r}_t \quad (2)$$

ここで \mathbf{r}_t は工具の位置ベクトル、 $A^j (j=1\sim6)$ は式(1)に対応する座標変換行列である。

式(2)に各回転軸の回転角度 $0\sim360^\circ$ を代入して誤差検出に適した条件を求める。図3に示す C 軸回転中心と工具制御点の誤

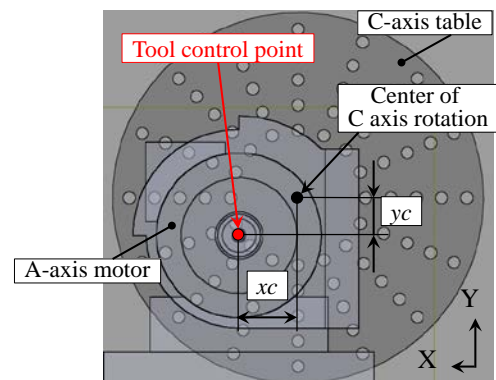


Fig. 3 Setting errors between tool control point and C-axis

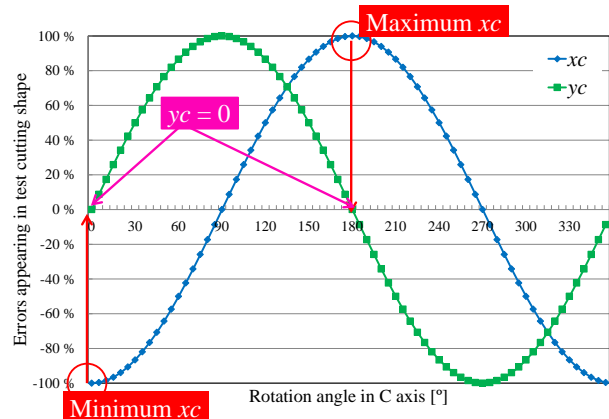


Fig. 4 Rotation angle used for error detection

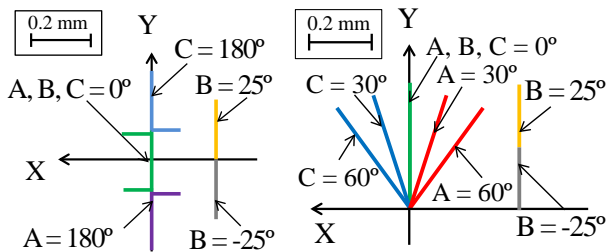


Fig. 5 Proposed trial cut shape Fig. 6 Compared trial cut shape

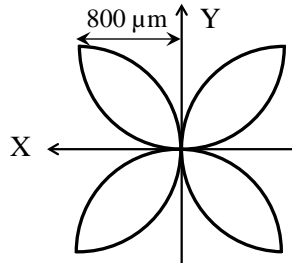


Fig. 7 Target shape

差のうち X 成分を x_c , Y 成分を y_c として, 工具制御点の X 方向に現れる C 軸誤差の検出に適した角度を例として図 4 に示す. この図から $C = 0^\circ, 180^\circ$ であれば加工痕には x_c が $\pm 100\%$ 検出され, y_c が X 成分の誤差に全く関わらないため, これらの角度が C 軸の誤差 x_c の検出に適していることが分かる. 同様にして Y 成分に現れる C 軸のセッティング誤差の検出に適した角度, 他の回転軸の誤差検出に適した角度を求めると $A = 0^\circ$ or 180° , $B = -25^\circ$ or 0° or 25° , $C = 0^\circ$ or 180° となる. これらの角度を用いて試し削り形状を考案する.

算出した条件から, 図 5 の形状を考案した. この形状は誤差が最も反映しやすい角度の溝で構成されている. また, 図に示す角度以外は全ての回転軸を 0° とすることで, 一つの誤差要因のみ検出できるため, 理論的に最も効果的にセッティング誤差を検出することができるようになっている.

4. 同時 6 軸制御加工による検証

提案した試し削り形状が誤差検出に適していることを検証するため, 形状創成理論において誤差検出に適していないと算出された条件による試し削り形状との補正精度を比較する.

試し削り形状を加工する非回転工具のすくい面方向を考慮すると, 誤差検出に不適切な角度では前章で提案した試し削り形状は加工できない. このため, 図 6 に示す比較のための試し削り形状は A, $C = 0^\circ$ or 30° or 60° で溝加工するために提案した試し削り形状とは異なる形状となっている. 溝を加工する形状としている. これらの角度では複数の誤差要因の影響を受け, 更にセッティング誤差の一部しか試し削りの加工痕に現れない. 2 つの試し削り形状を同じダミーワークに加工し, それぞれの計測値からセッティング誤差を検出して誤差を補正し, さらに補正後には図 7 に示す目標形状を半径 24 mm の球面上に加工して得られた形状を比較する. 目標形状は半径 0.8 mm の半円を 4 つ組み合わせで構成されており, 球面の法線方向に溝を創成するため同時 6 軸制御が必要な形状である.

加工結果を図 8 に示す. また, 目標形状において 4 つの半円が 1 点で交わる個所に注目し, 図 9 に示すように X 軸方向の加工誤差を dX , Y 方向を dY とする. また, 目標溝深さの 10 μm からの誤差を dZ とし, これらの測定値を表 1 に示す. 表 1 と図 8(a) から提案した試し削り形状を用いて誤差補正をした場

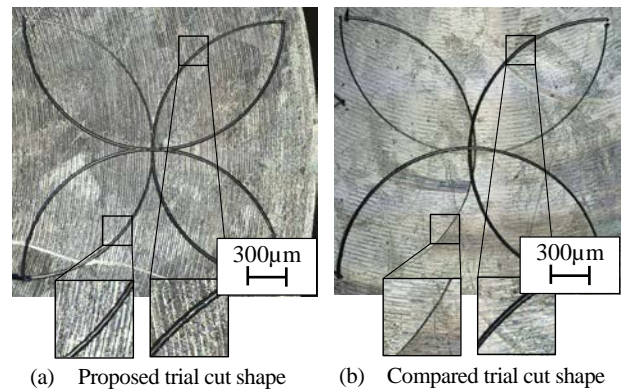


Fig. 8 Machined results

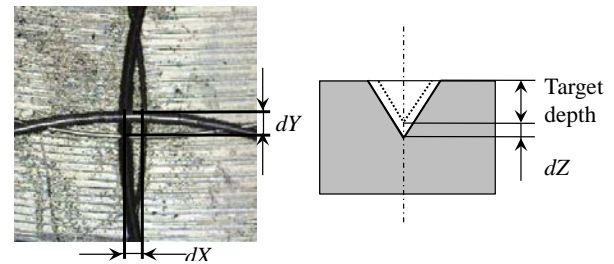


Fig. 9 Machining errors in grooved shape

Table 1 Measured errors of machined grooves

	Proposed trial cut shape	Compared trial cut shape
dX	0.93 μm	35.97 μm
dY	0.81 μm	42.40 μm
dZ	1.62 μm	5.69 μm

合, dX , dY ともに 1 μm 以内に加工できていることが分かる. また, 曲面上への溝深さも誤差が最大でも 2 μm 以内と非常に高精度に加工されている. 一方, 同図(b)では溝の深さが場所によって異なり, dX , dY も大きな誤差となっていることが確認できる. これは試し削りの際にセッティング誤差を十分に検出できず, 補正が不十分であったためと考えられる.

以上の検証実験から, 形状創成関数で求めた通り試し削り形状によってセッティング誤差の検出結果に差があることが分かった. また, 形状創成関数を用いた誤差解析により, セッティング誤差のうち工具制御点と各軸の回転中心の誤差を精度良く検出でき, 理論的裏付けに基づいた試し削り形状により, セッティング誤差を効果的に低減できることが確認できた.

5. 結 論

超精密 6 軸制御切削加工のセッティング誤差補正を効果的に行うため, 新たな試し削り形状を考案し, 以下の結果を得た.

- (1) 形状創成理論に基づき, セッティング誤差を効果的に検出できる回転軸の条件を求め, 誤差検出に適した試し削り形状を考案した.
- (2) 同時 6 軸制御加工による検証実験の結果, 誤差補正において提案形状を用いることで各セッティング誤差を大幅に低減できることを確認し, 提案形状の有用性を示した.

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, Y. Takeuchi, Multi-Axis Control Ultrprecision Machining Based on Tool Setting Errors Compensation, International Journal of Automation Technology, Vol. 10, No. 1, pp.114-120, (2016).
- 3) 稲崎一郎, 岸浪建史, 坂本重彦, 杉村延広, 竹内芳美, 田中文基: 工作機械の形状創成理論—その基礎と応用, 養賢堂, (1997).