

5 軸マシニングセンタの加工試験法の開発

Development of machining test method for 5-axis machining center

電子・機械技術部 機械・加工科 小野裕道 坂内駿平 渡邊孝康 富永隼輔
南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 小林翼
日本大学工学部 機械工学科 齋藤明德

段取りの省力化を目的に導入の進む5軸マシニングセンタは、旋回軸を有することから幾何偏差が多く存在し、加工精度が低いとされる。この幾何偏差は較正可能だが、タッチプローブやボールバーによる測定が必要であり、ユーザには難しかった。タッチプローブなどが不要な加工試験を提案するために、旋回軸を回転させながら加工するターンミリング加工を対象に、幾何偏差が加工結果に与える影響について、シミュレーションにより予測した。また幾何偏差に応じて加工形状が変化することを確認した。

Key words: 5 軸マシニングセンタ、幾何偏差、運動精度

1. 緒言

近年、段取りの省力化を目的に5軸マシニングセンタ（以下5軸MC）の導入が進んでいる。5軸MCは工作物を傾斜・回転させるため2つの旋回軸を有することから、旋回軸間あるいは旋回軸と直進軸間の軸ずれに起因する幾何学的な偏差が多く存在し、加工精度が低いとされる。この幾何学的な偏差は、5軸MCの使用条件や設置環境などの影響を受けることから、ユーザが定期的に補正することが必要である。そのため、工作機械メーカーはタッチプローブと基準器による幾何偏差のキャリブレーションを勧めている。

他方、ユーザには、5軸MCの幾何偏差が正しく補正されているかを、簡便な段取りで、短時間で確認したいとの要望がある。これまでも、幾何偏差を算出可能な加工試験はあったが、旋回軸の角度を割出して加工する例が多く¹⁾、試験結果からユーザが幾何偏差の状態を理解することは難しかった。また旋削加工と穴加工を組み合わせた試験も報告されている²⁾が、工作機械に旋削加工が可能な旋回軸を備える必要があり、一般に用いることは難しかった。

そこで、本研究では、ユーザが試験結果を理解しやすい5軸MCの加工試験を提案するために、工作物を旋回軸で回転させながらエンドミル加工を行うターンミリング加工に着目し、シミュレーションと実験によって幾何偏差が加工結果に与える影響を明らかにした。

上面が位置する構造である。

この5軸MCにおいて、直動3軸に関する誤差は出荷時に制御器により補正されており、十分に小さいため、旋回軸に関する幾何偏差のみを測定対象とした。旋回2軸に関連して、X軸とA軸の位置偏差 δ_{xAX} と δ_{yAX} 、 δ_{zAX} 、角度偏差 α_{AX} と β_{AX} 、 γ_{AX} 、A軸とC軸の位置偏差 δ_{yCA} および角度偏差 β_{CA} の合計8個の幾何偏差が存在する³⁾。加工シミュレーションは、これら8個の偏差を考慮した解析モデルを用いた。

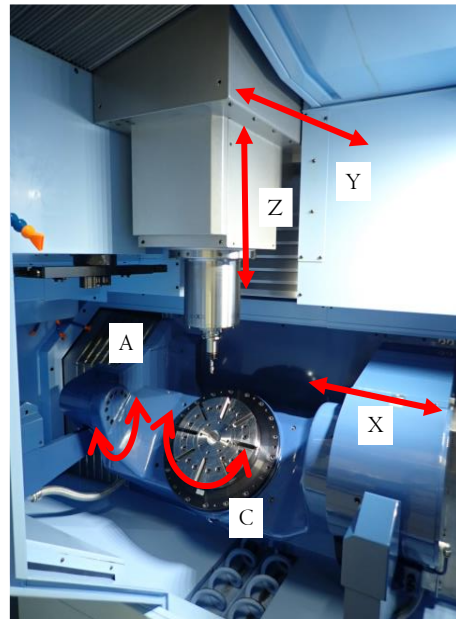


図1 実験に使用した5軸MCの軸構成

2. 実験

2. 1. 5 軸MCの幾何偏差

本研究では、国内で普及の進むテーブル旋回形5軸MCを対象とした。実験には、当所が保有する5軸MC（松浦機械製作所製 MX-520）を使用した。装置の概略と移動軸を図1に示す。旋回軸はA軸とC軸に有し、A軸0°の状態ではA軸の中心線より下にテーブル

2. 2. A 軸によるターンミリング

本報告では、A軸の運動に係る幾何偏差を対象とした。加工形状は、CNCシミュレーションソフトウェア（CGTech社製 VERICUT）に加工機のモデルを導入し、シミュレーションした。この際、シミュレーションソ

フト内のモデルに任意の幾何偏差を与え、加工後の形状を算出した。

これまでに、使用した5軸MCにおいて、図2に示すように、C軸を回転させながらエンドミル加工を行うターンミリング加工を行うことで、8個の幾何偏差の中で、 δ_{xAX} と δ_{yAX} 、 α_{AX} 、 β_{AX} 、 δ_{yCA} 、 β_{CA} の6個が、スクエアエンドミルの側面で加工した円柱の真円度、底面に加工した円環部の平面度に影響を与えることを示した⁴⁾。この試験結果は、A軸が0°]におけるC軸中心線の状態を表しており、ユーザ側にもわかりやすいと考えられる。しかし、この加工試験だけでは、図1に示すようにC軸がA軸上に配置されている構造であるため、8個の幾何偏差の中で、 δ_{xAX} 、 α_{AX} だけが推定できることになる。

そこで、A軸においてもボールエンドミルを用いたターンミリングを検討した。ボールエンドミルは先端部が半球であるため、幾何偏差の感度方向が広げられると考えられる。図3(a)に示す通り、YZ平面内の円弧運動とA軸回転運動を同期させ加工する。また、機械座標系における基準を設けるため、図3(b)に示したYZ平面内の2軸円弧補間加工も併せて実施する。どちらも5軸MCのA軸とC軸の交点であるノミナルな原点 O_N を工作物原点とし、ボールエンドミルの半径は5[mm]とする。まずC軸の中心からX軸方向に12[mm]離れた位置にて2軸円弧補間加工で180°]分の円弧を加工する。次に、X軸20[mm]の位置でA軸を加えた同時3軸で加工する。この加工では、工具が180°]分の円弧補間運動する間にA軸を90°]分回転させ、90°]分の円弧を加工する。

加工形状の評価は、ボールエンドミル先端による円弧状の円形の溝と側面による円環部とによって行う。

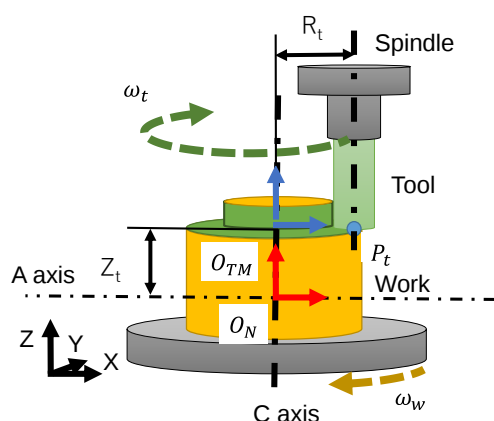
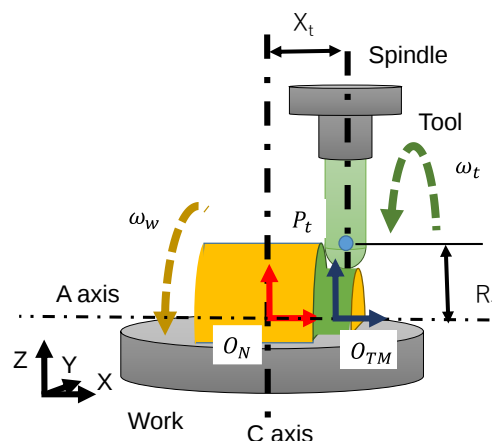
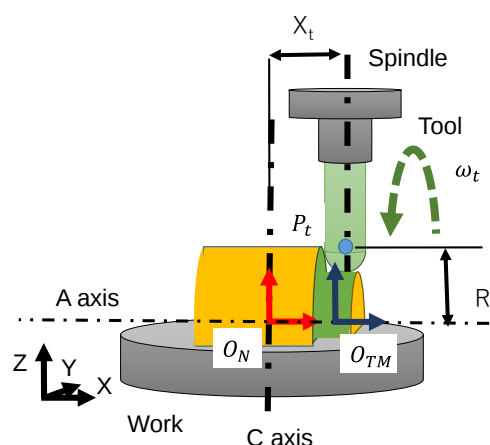


図2 C-axis turn-milling



(a) 3 axis machining



(b) 2 axis machining

図3 A-axis turn-milling with ball end mill

表1 Processing conditions

Tool	Ball end mill
Tool radius	5 mm
Work	Aluminum alloy (A5052)
Work radius	79 mm
Spindle speed	2000 min ⁻¹
Feed	80 mm/min
Depth of cut	0.2 mm

図3に示したボールエンドミルによるターンミリングは、シミュレーションソフトウェアと実機において行う。加工条件を表1に示す。加工後の工作物の形状は三次元座標測定機（ミットヨ製 CRYSTA-Apex S776）により計測した。形状測定は、偽い測定として、122[mm]の円弧長さに対して、11400点の測定点を取得した。ボールエンドミルによる半径5[mm]の円形溝に対して、スタイラスの直径は3[mm]のものを用了。

3. 結果

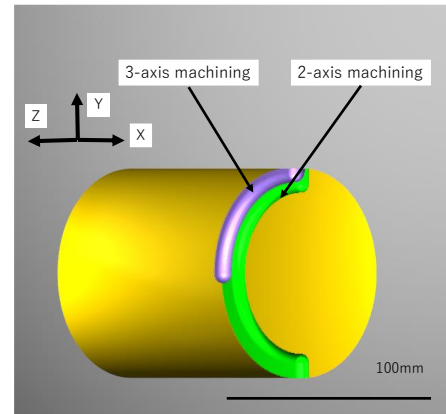
3. 1. 加工シミュレーションの結果

5 軸MCに幾何偏差が存在した場合の加工形状を、VERICUT によりシミュレーションした結果を図 4 に示す。幾何偏差による形状変化を明確に表すため、位置偏差 10[μm]、角度偏差 0.005[$^\circ$]を 1000 倍して与えている。

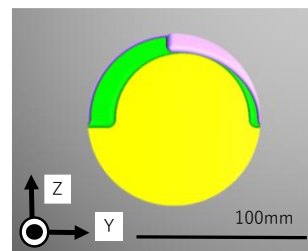
円弧補間の YZ 軸による 2 軸加工では、Y 軸方向の位置偏差 δ_{yAX} と δ_{yCA} 、Z 軸方向の位置偏差 δ_{zAX} のいずれも、ノミナルな原点 O_N に対して、円弧の中心座標が偏心した。これに対し YZ 軸及び A 軸による 3 軸加工では、四分の一円弧を見ると、位置偏差 δ_{yCA} は円弧中心のずれとなって現れた。一方 δ_{yAX} と δ_{zAX} は円弧が楕円のようにつぶれた形状となった。また、角度偏差 α_{AX} と β_{AX} 、 β_{CA} のいずれも工具側面で加工された円環部の平面度に影響を及ぼした。

3. 2. 加工実験

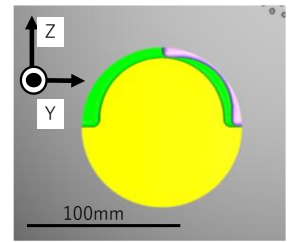
三次元座標測定機で測定した加工試験で得られた円形溝底の断面形状を図 5 に示す。基準球とタッチプローブによる校正により測定した加工機のノミナルな A 軸を、Y 軸と Z 軸の円弧補間運動の中心と一致させ加工した。図 5(a)に示すとおり、YZ の 2 軸加工による半円弧の形状偏差は、真円度 7.4[μm]であった。図中の点線の基準円に対し、形状偏差を 1000 倍に拡大して表示している。このうち、Z 軸が反転する位置で 4[μm]ほどの突起があり、円弧形状の形状偏差は 4[μm]ほどである。これに対し YZ 軸及び A 軸による加工により、四分の一円弧を加工した結果は、図 5(b) のとおり 70[μm]と非常に大きかった。この原因は、幾何偏差の δ_{zAX} に、工具長の測定誤差が含まれたためと考えられる。更に、図(b)の初期状態から、A 軸と C 軸中心のノミナルな原点を、Y 軸と Z 軸のそれぞれ 10[μm]変更して、幾何偏差 δ_{yAX} と δ_{zAX} を与えた。その結果の図 5(c) (d)を見ると、 δ_{yAX} は Y 軸方向に半径が減少し、Z 軸方向に半径が増加しており、図 4(b)と同じ傾向である。また、 δ_{zAX} は Y 軸方向に対し 45[$^\circ$]方向に凹形状となり、これも図 4(c)と一致している。



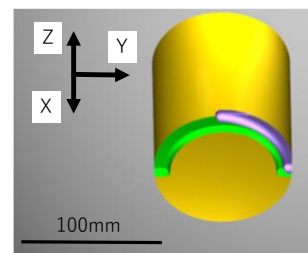
(a) Machining without geometric deviation
Sample of expression of values



(b) $\delta_{yAX} = -10 \text{ mm}$

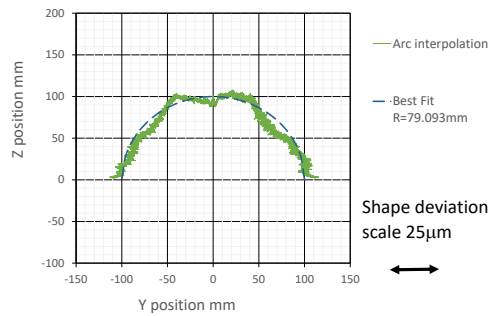


(c) $\delta_{zAX} = -10 \text{ mm}$

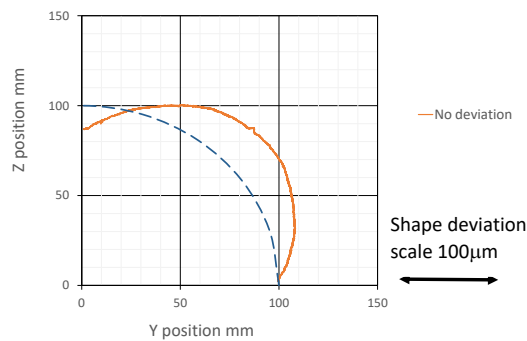


(d) $\beta_{AX} = 5^\circ$

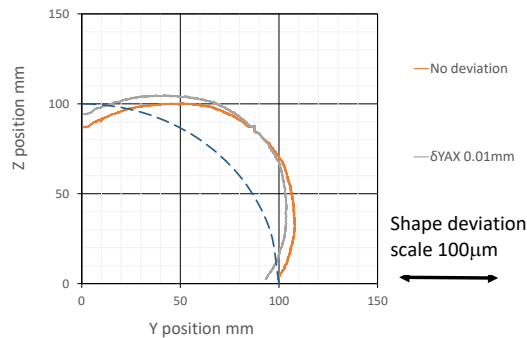
図 4 Simulation of machined shapes including geometric deviations



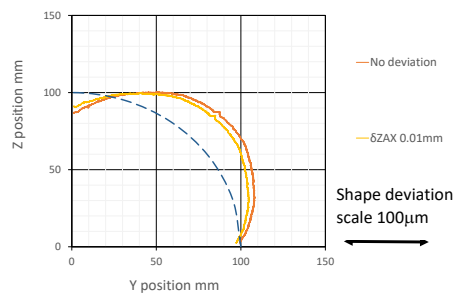
(a) 2-axis machining



(b) 3-axis machining (initial condition)



(c) 3-axis machining ($\delta_{yAX} = -10\mu\text{m}$)



(d) 3-axis machining ($\delta_{zAX} = -10\mu\text{m}$)

図5 Measurement results of workpiece

4. 結言

テーブル旋回形5軸MCのA軸に係る幾何偏差を評価するため、工作物をA軸で回転させてボールエンドミルによって円形溝を加工するターンミリングに着目し、幾何偏差が加工形状に与える影響を検討した。VERICUTによるシミュレーションと加工試験を行い、次の結果を得た。

- (1) シミュレーションによって、ボールエンドミルを用いたYZ軸の円弧補間運動とA軸回転とを同時に行う3軸加工において、幾何偏差が加工形状に及ぼす影響を明らかにした。
- (2) 加工試験において、幾何偏差 δ_{yAX} と δ_{zAX} を与えた場合、YZ軸とA軸による3軸加工ではシミュレーションと同様に加工形状が変化した。

参考文献

- 1) 太田祐輔, 茨木創一. 5軸制御工作機械の運動精度評価を目的とした工作試験方. 2013年度精密工学会春季学術講演会講演論文集, 2013, p.65-66.
- 2) Soichi, I., Ibuki, Y., Tetsushi, A.. A machining test to identify rotary axis geometric errors on a five-axis machine tool with a swiveling rotary table for turning operations. Precision Engineering. Vol. 55, No. 1, 2019, p. 22-32.
- 3) 茨木創一. 工作機械の空間精度. 森北出版, 2017.
- 4) 小野裕道, 齋藤明德 他. 5軸マシニングセンタの加工試験法の開発. 2024年度精密工学会春季学術講演会論文集, 2024, p.776-777.