5 軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正*

西 口 直 浩** 佐 藤 隆 太*** 白 瀬 敬 一***

Evaluation and Compensation of
Dynamic Behavior of Rotary Axis by Motion Direction Changes in 5-Axis Controlled Machining Center

Tadahiro NISHIGUCHI, Ryuta SATO and Keiichi SHIRASE

The motion accuracy of 5-axis controlled machining centers typically is inferior to the accuracy of 3-axis controlled machining centers. Especially, the motion error of rotary axis by motion direction changes in particular has bad influence to machined surfaces in comparison with the motion error of translational axis, because it is amplified by the distance from the center of the rotary axis to the machining point. In this study, a measurement system and a machining test method are proposed to evaluate the dynamic characteristics of rotary axis by motion direction changes, and the compensation method is considered. It is confirmed by the measuring system and the machining tests that the influence of tracking error on the machined surface is related with the size/shape of the tools and geometrical relationships between the tracking error and the machined surface. In addition, the method to improve the machining accuracy by the dynamic characteristics of rotary axis around the motion direction changing point is proposed, and the effect is confirmed by the actual machining tests.

Keywords: 5-axis controlled machining center, rotary axis, dynamic behavior, motion direction changes, machined surface, compensation

1. 結 言

機械部品や金型の加工において、複雑な形状の加工が可能な 5 軸制御マシニングセンタによる同時 5 軸制御加工が用いられている。一般的な 5 軸制御マシニングセンタは直進軸 3 軸と旋回軸 2 軸を有し、工具と工作物の相対位置と相対姿勢の制御を可能にしている。しかし、軸間の幾何誤差や各軸の運動誤差が累積することから、3 軸加工機と比べ運動精度が劣る傾向があり、5 軸制御マシニングセンタの普及の障害となっている。とくに回転軸による加工誤差は、加工点から回転中心までの距離に回転軸による角度誤差を乗じたものとなり、直進軸の運動誤差と比べても加工面に対して悪影響を及ぼす。

回転軸の運動特性を評価する方法として、ボールバーや R-test を用いた測定方法や、円すい台加工による評価方法といった数多くの方法^{1)~6)}が提案されているが、それらは回転軸と直進軸の同期運動を用いる方法である。このため、加工面品位に悪影響を及ぼす運動方向反転時には、多くの場合に回転軸の運動方向反転に伴い直進軸の運動方向も反転してしまうことから、回転軸の運動方向反転時の挙動のみを評価することはできなかった。

本研究では、直進軸による影響を受けずに回転軸の運動方向反転時の挙動を評価するための測定方法およびそのための測定装置を開発するとともに、測定方法と同じ同期運動による加工方法を提案する。提案した測定方法および加工方法により、回転軸の運動特性、とくに加工面品位に悪影響を及ぼす運動方向反転時の挙動について評価した。さらに、回転軸の運動方向反転時に生じる運動誤差による影響を補正して工作精度を向上

するための方法を提案し、実験によりその有効性を検証したので報告する。

2. 運動精度測定方法

2.1 測定対象

本研究では、回転軸の運動方向反転時の挙動を評価するための測定方法と加工方法を提案し、その有効性を検証するために、図 1 に示す 5 軸制御マシニングセンタ（株式会社エグロ製 E-32V、以下 5 軸 MC）を用いて測定実験と加工試験を行った。この 5 軸 MC は、主軸を X・Y・Z 軸方向へ移動させる 3 つの直進軸と、テーブルを X 軸回りに傾斜させる A 軸とテーブルを Z 軸回りに回転させる C 軸とを有する。

運動精度測定方法として、本研究では、これまでに多くの研究¹⁾²⁾が報告されている 3 つの変位センサと基準球とから構成される測定装置を用いる方法を採用した。回転軸が動作する際基準球と変位センサ間の相対位置を一定に保つように直進軸を動かし、その際に発生する変位を測定する。

Fig.1 Configuration of the five-axis machining center (EGURO_E-32V)

* 原稿受付 平成 28 年 4 月 22 日
掲載決定 平成 28 年 7 月 15 日

** 正 会 員 長野県工科短期大学校（長野県上田市下之郷 813-8）

*** 正 会 員 神戸大学大学院（兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1）

Fig.2 Developed measurement system

2.2 測定装置

本研究では、回転軸の運動方向反転時の挙動について評価するための測定装置を試作した。まず、回転軸を動作させた際に測定対象と測定装置の姿勢が変化しても、その相対位置を高精度に測定できるように、測定対象として直径 19 mm、真球度 $1\ \mu\text{m}$ 以下の基準球（レニショー(株)製）を採用した。変位センサには、測定対象である球の表面までの距離を直接測定可能で、高加速度で発生する運動方向反転時の運動誤差を捉えることができ、さらに測定対象である基準球の曲率の影響を受けないことを条件とし、レーザ式の変位センサを採用することとした。また上記条件に加え、使用した 5 軸 MC の大きさに合わせて小型で、比較的安価であることも考慮した結果、本測定器の変位センサには株式会社キーエンス製のレーザ式変位センサ (IL-S025) を採用した。

測定装置は、テーブル旋回時に発生するケーブルの干渉を避けるため、変位センサを主軸側、測定対象である球をテーブル側に配置する構成とした。また、変位センサはそれぞれ X, Y, Z 軸の 3 方向から測定する設計とした。それら 3 方向の測定データ、球の取付け位置、回転軸の角度から、回転軸の運動方向反転時の運動誤差を求める。開発した測定装置および 5 軸 MC への設置状況を図 2 に示す。

2.3 測定方法および測定結果

測定には、回転軸の移動指令に対し直進軸を同期させるよう作成した NC プログラムを用いるが、一般的な動作では回転軸の反転に伴い直進軸も反転するため、回転軸の運動方向反転時の運動誤差のみを捉えることは困難となる。これまでに、例えば円すい台加工では、回転軸の運動方向反転時の挙動を評価できることがわかっている。また、テーブル側に回転軸をもつ 5 軸 MC で円すい台の加工を行う場合、工作物をテーブル上のどの位置に設置するかにより機械の各軸の運動が変化することも知られている^{7,8)}。しかし、回転軸の運動方向反転に伴う軌跡誤差が最大となる回転軸の接線方向に注目し、それが加工面に現れるよう加工面と垂直に設定した加工方法を検討した例は見当たらなかった。そこで本研究では、2 つの回転軸の運動を組み合わせることで、測定対象である回転軸の運動方向反転時の運動誤差のみを評価するための運動と、測定装置の 3 つの変位センサによる測定結果から回転軸の運動誤差を算出するための方法を提案する。本研究では、2 つの回転軸 (A, C 軸) のうち、ストロークに制限があるため反転が起こりやすく、回転中心と加工点とを近づけることが難しい傾斜軸 (今回用いる 5 軸 MC では A 軸) を測定対象とした。

A 軸を回転させると、基準球と変位センサとの相対位置を一定に保つためには、直進軸である Y 軸および Z 軸を動かす必

Fig.3 Schematic of measurement movement at C-axis rotational angle of 180°

Table 1 Measurement motion of C, A-axis

Axis	Motion °						
C	-90.0	+	0.0	+	180.0	+	270.0
A	-45.0	+	-27.0 (Reverse)	-	-63.0 (Reverse)	+	-45.0

Fig.4 Measurement motion of each axis

要があり、その 3 軸のみで同期運動を行うと、A 軸の反転と同時に直進軸の運動方向も反転する。そこで、図 3 のように C 軸を一方へ回転させながら A 軸を反転させることで、機械座標系の YZ 平面における C 軸による速度ベクトルと A 軸による速度ベクトルの合成速度ベクトルを反転動作前後で一つの象限内に収まるようにすることにより (図 3 では YZ 平面の第 3 象限)、A 軸の運動方向反転時に Y, Z 軸が反転しないようにした。

図 4 は、表 1 に示す A 軸を -27° から -63° へ往復動作中に C 軸を $+$ 方向に -90° から $+270^\circ$ まで動かす測定における X, Y, Z, A 軸の移動指令である。このとき、測定対象である基準球のテーブル上の設置位置を、YZ 平面内において基準球の中心と C 軸回転中心とが一致するように設置することで (図 3 は C 軸 180° の場合)、YZ 平面内における C 軸の速度ベクトルは最大となる。また、本研究で用いた 5 軸 MC では設計上の A 軸中心と C 軸中心とが直交しているため、C 軸が 0° および 180° のときに A 軸を反転させることにより、YZ 平面内における C 軸の速度ベクトルを A 軸の反転動作による速度ベクトルの変化より大きくすることで、図 4 に示すように、A 軸の反転動作と Y 軸および Z 軸の反転動作とを分離できる。このとき、A 軸とともに X 軸の運動方向も反転するが、X 軸方向に発生する誤差は A 軸回転中心線と平行であり A 軸の接線方向の測定結果へは影響を及ぼさない。また、X 軸の運動方向反転による Y, Z 軸方向の誤差が本実験動作では発生しないことは、A 軸指令を除いた動作にて確認された。A 軸運動方向反転時の測定結果を図 5 に示す。

(a) $\theta_A = -27.0^\circ$ (b) $\theta_A = -63.0^\circ$

Fig.5 Comparison of measured motion errors

Fig.6 Coordinate transformation between machine and A-axis coordinate systems

図5に示す3方向の測定結果から、A軸の運動方向反転時の運動誤差を求める。A軸の運動方向反転に伴う最大の軌跡誤差が発生する方向は、A軸回転の接線方向となる。このとき、YZ平面内において基準球の中心とC軸の回転中心は一致するように設置されており、C軸中心とA軸中心も直交していることから、図6のA軸座標系におけるZ'軸と基準球の中心は一致する。また、A軸回転の接線方向は、図6のA軸座標系におけるY'軸方向となる。このことから、機械座標系上で測定された3方向の測定データ $[X, Y, Z]^T$ およびA軸の回転角度 θ_A から、A軸座標系上における運動誤差は式(1)により計算でき、よって、Y'軸方向の成分は式(2)により表される。図5の測定結果から求めたA軸の運動方向反転時の運動誤差の接線方向成分を図7に示す。ここで、図中の符号は、実加工試験における加工面を基準として凸形状となる方向を正とし、加工面に食い込む側の誤差を負として表示している。

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_A & \sin \theta_A \\ 0 & -\sin \theta_A & \cos \theta_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Y' = Y \cos \theta_A + Z \sin \theta_A \quad (2)$$

(a) $\theta_A = -27.0^\circ$ (b) $\theta_A = -63.0^\circ$

Fig.7 Measured motion errors along A-axis tangential direction

Fig.8 Cylindrical machining motion

3. 実加工試験

提案した測定方法により測定されたA軸の運動方向反転時の運動誤差が、加工面への様な影響を及ぼすか、測定時の運動と同じ運動によって円筒面を加工することで検証する。

提案した測定方法では、テーブル上に設置された基準球の中心と主軸側に設置した測定装置の相対位置を維持するように直進軸と回転軸を同期運動させるのに対し、同じ同期運動による円筒加工を実現するため、図8に示すように、実加工試験のための工具経路は工作物中心の移動経路から工作物の半径と工具半径の合計分だけオフセットさせる。

Fig.9 Cylindrical machining condition

Table 2 Experimental condition for machining

Tool	Type	Ball-end mill
	Number of flutes	2
	Diameter	16 mm
Workpiece	Material	AL5056
	Form	Column
	Diameter	25 mm
Machining	Cut depth	2.5 mm
	Cross feed	0.25 mm
	Spindle speed	5000 rpm

このような工具経路による円筒加工を実現するため、図 9 および表 2 に示す加工条件を用いて、工作物上部から下部に向かうヘリカル加工を行った。このとき、工作物の形状に加工条件による影響が現れないようにするため、理論カスプ高さが $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下となるように加工条件を選定し、工具は直径 16 mm の 2 枚刃ボールエンドミル、ピックフィード量を 0.25 mm、加工する円筒の直径を 20 mm とした。また、回転軸の運動誤差による影響は回転中心位置から加工点までの距離により変化することから、A 軸の回転中心位置から加工点までの距離が測定時の基準球の中心位置までの距離と同じになるようにした。

以上の方法により加工した円筒を真円度測定機で測定した結果を図 10 に示す。A 軸 -27.0° における測定結果である図 7(a)によると、軌跡誤差の大きさが $-14\text{ }\mu\text{m}$ であったのに対し、加工結果に現れた形状誤差（加工誤差）は $-12\text{ }\mu\text{m}$ （図 10(b)）となりほぼ一致している。一方、A 軸 -63.0° では、図 7(b)の測定結果には $+28\text{ }\mu\text{m}$ の軌跡誤差が確認できるにもかかわらず、加工結果（図 10(a)）にはそのような加工誤差を確認することはできなかった。

4. 軌跡誤差と加工結果との関係

加工面に対して凸形状に現れる軌跡誤差が加工結果に現れなかったことの原因を明らかにするため、軌跡誤差の特性と加工結果との関係について検討した。

(a) $\theta_A = -63.0^\circ$ (b) $\theta_A = -27.0^\circ$

Fig.10 Machined workpiece

Fig.11 Tool trajectory with a convex motion error

Fig.12 Cutting test for convex error

運動方向反転時の軌跡誤差を図 11 に示すような①②③④⑤を通る経路と仮定した場合、②～④の軌跡誤差の高さ H に比べ、加工面に現れる凸形状の加工誤差の高さ l は、④の位置で工具に削られることで小さくなると考えられる。この加工誤差の高さ l は、工具軌跡の高さ H より小さい場合、幅 W と工具半径 R から式(3)により求められる。

Fig.13 Relationships between width of motion error W and height of machining error l with various tool radius R

Fig.14 Relationships between width of motion error W and height of machining error l with various height of motion error H

$$l = \begin{cases} R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2} & (W \leq L) \\ R + H - \sqrt{\left(\frac{2RH}{W}\right)^2 + R^2} & (W > L) \end{cases} \quad (3)$$

$$L = \sqrt{2H(H^2 + 4R^2)^{1/2} - 2H^2}$$

このことを実験的に検証するため、図 12 に示すように模擬的な軌跡誤差を故意に設けた加工試験を、軌跡誤差の高さ H 、幅 W 、工具半径 R を変化させて行い (H : 0.25~1.0 mm, W : 0.5~6.0 mm[0.5 mm 毎], R : 1.0, 4.0, 7.0 mm), 加工誤差の高さ l を表面粗さ計により測定した。その測定結果と式(3)による計算結果とを、図 13、図 14 に示す。図によると、式(3)による計算結果と実験結果はよく一致していることがわかる。

この凸形状に生じる軌跡誤差の特性が、円筒加工面において測定結果と加工結果に違いが生じたことの原因である。図 7(a) に示す A 軸反転時に生じる軌跡誤差の測定結果によると、軌跡誤差の高さは 28 μm 、幅は 0.157 mm であり、加工に使用した工具半径 (8.0 mm) から式(3)により加工面に表れる加工誤差の大きさを計算すると、約 0.4 μm となる。よって、本研究で示した測定結果に現れた運動誤差は、加工結果に影響を及ぼさないといえる。

5. 軌跡誤差の特性を考慮した補正方法

これまで、送り軸の運動方向反転動作を含む運動誤差が加工面に及ぼす影響を軽減することを目的として多くの方法^{9)~12)}が提案されているが、いずれも運動誤差そのものを小さくすることによって加工精度を改善する方法であり、その多くは送り軸系の数学モデルなどに基づく制御技術を用いている。しかし、テーブルや主軸に設置する工作物や工具ホルダの質量、重心位置の変化などに対し、制御モデルの再同定作業や、経年変化により実機と設定パラメータの適合性に差異が生じた場合にメンテナンス作業等が必要となる。そこで本研究では、これまでに得られた回転軸の運動方向反転により生じる軌跡誤差と加工面との間の関係に基づき、より簡便な方法で加工精度を向上できるか、実験的に検証した。

本研究により、回転軸の運動方向反転時に加工面に対して凸形状となる軌跡誤差は工具径との関係により加工面には転写されにくい特性を持っていることが確認されている。このことから、凹形状の軌跡誤差が発生する運動方向反転箇所において、工具軌跡を加工面に対し凸形状になるように NC プログラム指令を変更することで、加工面への影響を軽減することが可能か確認した。

円筒加工面に発生した凹形状の軌跡誤差は、直進軸に対して A 軸の反転動作が遅れることで発生していると考えられること

Fig.15 A measurement result of the compensated motion errors at $\theta_A = -27.0^\circ$

から、A 軸の反転直後の動作指令を本来の移動量よりも大きくすることにより、加工面に対して凸形状の軌跡誤差を発生させることとした。具体的には、A 軸の反転位置である(A, C) = $(-27.0^\circ, 0.0^\circ)$ の次の指令位置が $(-27.04^\circ, 0.20^\circ)$ であるのに対し、移動量を 0.03° 大きく指令し $(-27.07^\circ, 0.20^\circ)$ へ変更した。

この移動量の変更（以下、補正）を 0.03° としたのは、以下二つの理由が挙げられる。一つ目は、加工点に於いて凹形状の軌跡誤差を凸形状へ変更するのに十分な補正を、指令動作へ加える必要がある。これには、A 軸への補正が加工点における軌跡の変化としてどの程度現れるのか求め、これが A 軸 -27.0° の反転時に加工点で発生している $-14 \mu\text{m}$ の凹形状の軌跡誤差を、凸形状の軌跡誤差へ変更するのに十分な大きさを有しているか確認しなければならない。そこで、補正量 0.03° に回転中心から加工点までの距離 70 mm を乗じることで、加工点における A 軸の動作指令が直進軸に比べ約 $37 \mu\text{m}$ 先行することがわかり、そこから凹形状の軌跡誤差 $-14 \mu\text{m}$ を差し引くことで、 $23 \mu\text{m}$ 程度の凸形状の軌跡誤差が発生すると予測することができる。

二つ目の理由には、この A 軸の移動量を大きくしすぎると、反転動作後に一旦停止や再度の反転等を引き起こしてしまうことが挙げられる。すなわち、変更したブロックの更に次のブロックにおける A, C 軸の指令位置が $(-27.08^\circ, 0.40^\circ)$ であり補正量を 0.03° 以上にすると、このブロックの指令位置を追い越す移動量となり、一旦停止や再度の反転が起こる。

補正後の運動軌跡を今回提案した測定方法により確認した結果を図 15 に示す。図から、加工面に対して高さ約 $20 \mu\text{m}$ の凸形状の軌跡誤差を確認できる。この軌跡誤差（高さ $H: 20 \mu\text{m}$ 、幅 $W: 0.126 \text{ mm}$ ）と工具径 16 mm から、式(3)により加工面に発生する凸形状の加工誤差の高さは約 $0.3 \mu\text{m}$ となる。求められたこの結果が、実際に加工結果と一致するか提案した加工実験を行った。実加工試験の結果を図 16 に示す。図からわかるように、加工面に生じた凹形状の形状誤差はなくなり、補正により生じさせた凸形状の軌跡誤差も加工面に表れていないことが確認できる。ここで、補正後の加工結果である図 16 は補正前の図 10 に比べ形状全体が変化しているが、そのことの原因を明らかにするには至っていない。

以上の結果から、加工面に対して凸形状となる軌跡誤差を故意に生じさせることで、本研究により明らかとなった、凸形状の軌跡誤差、工具径と加工面との関係により加工精度を改善できることがわかる。

6. 結 言

本研究では、回転軸の運動方向反転時の挙動を評価するための測定方法および加工試験方法を提案し、その有効性を検証するために、3 つのレーザ変位計と基準球とからなる測定装置を

Fig.16 Cylindrical machining with compensation at $\theta_A = -27.0^\circ$

試作して実際に測定実験を行うとともに、実加工試験を行って加工結果と測定結果の違いについて考察した。さらに、その結果に基づいた補正方法を提案し、その有効性を実加工試験により検証した。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

- (1) 2 つの回転軸を組み合わせて動作させることで、回転軸の運動方向反転時の挙動を直進軸のそれと分けて測定できる。
- (2) 提案した測定方法と同じ運動でボールエンドミル加工を行うと、回転軸の運動方向反転時の挙動が加工面に転写され、加工結果から回転軸の運動方向反転時の挙動を評価できる。
- (3) 測定結果と同様の運動で加工を行うと、回転軸の運動誤差の方向と加工面の方向との関係により測定結果とは異なる形状が得られる。
- (4) 加工面に対して凸形状となる軌跡誤差は、工具径との関係により加工面には転写されにくい。
- (5) 凸形状の軌跡誤差がもつ上記特性を用いることで、軌跡誤差が加工面に及ぼす影響を軽減することが可能である。

今後、回転軸の運動誤差による影響を直進軸により補正する方法についても検討する予定である。

参 考 文 献

- 1) Yamaji, M., Hamabata, N. and Ihara, Y.: Design of Motion Accuracy Measurement Device with Three Displacement Sensors for Machine Tool and Comparison of Its Setting Method, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 8, 4 (2014) 14-00094.
- 2) Weikert, S. and Knapp, W.: R-test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools, *Annals of the CIRP*, 53, 1 (2004) 429.
- 3) Hong, C., Ibaraki, S. and Matsubara, A.: Influence of Position-dependent Geometric Errors of Rotary Axes on a Machining Test of the Cone Frustum by Five-axis Machine Tools, *Precision Engineering*, 35, 1 (2011) 1.
- 4) Kato, N., Tsutsumi, M., Tsuchihashi, Y., Sato, R. and Ihara, Y.: Sensitivity Analysis in Ball Bar Measurement of Three-dimensional Circular Movement Equivalent to Cone-Frustum Cutting in Five-Axis Machining Centers, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 7, 3 (2013) 317.
- 5) Sato, R. and Tsutsumi, M.: Motion Control Techniques for Synchronous Motions of Translational and Rotary Axes, *Proceedings of the 5th CIRP International Conference on High Performance Cutting*, 1 (2012) 265.
- 6) NAS979 Uniform Cutting Tests - NAS series, *Metal Cutting Equipment Specifications*, (1969).
- 7) 加藤教之, 堤正臣, 土橋祐, 弓座大輔, 崔成日, 井原之敏: 同時 5 軸制御による円すい台仕上げ加工試験用 NC データの解析, *日本機械学会論文集(C 編)*, 77, 780 (2011) 3149.
- 8) 加藤教之, 堤正臣, 土橋祐, 佐藤隆太, 弓座大輔, 崔成日, 井原之敏: 円すい台加工を模擬した 5 軸制御マシニングセンタの 3 次元円弧補間運動軌跡の解析, *日本機械学会論文集(C 編)*, 78, 787 (2012) 964.
- 9) 長島一男, 勝木雅英, 河上邦治: NC 工作機械の象限切替え突起量の理論解析と入力適応系による補正, *日本機械学会論文集(C 編)*, 66, 648 (2000) 2877.
- 10) 杉江弘, 岩崎隆至, 中川秀夫, 幸田盛堂: 工作機械における漸増型ロストモーションのモデル化と補償, *システム制御情報学会論文誌*, 14, 3 (2001) 117.
- 11) 佐藤隆太, 横堀祐也, 堤正臣: 5 軸制御マシニングセンタにおける直進軸と旋回軸の動的同期精度, *精密工学会*, 72, 1 (2006) 73.
- 12) 佐藤隆太, 井出裕, 堤正臣: 多軸同期制御精度向上のための送り駆動系の制御系設計方法, *日本機械学会論文集(C 編)*, 73, 727 (2007) 693.