

## R-test を用いた 5 軸制御加工機の運動誤差の測定と補正 (第 2 報)

- 旋回軸の component errors の同定と補正 -

京都大学 ○大山智瑛, 京都大学 茨木創一, 大坪技術研究所 大坪寿

Measurement and compensation of motion errors on 5-axis machine tool by R-test (Second report)  
-Identification and compensation of component errors on rotary axes-

Kyoto University Chiaki OYAMA, Kyoto University Soichi IBARAKI, Otsubo Engineering Research Center Hisashi OTSUBO

This paper presents more efficient methodology to calibrate motion error sources on 5-axis machine tool by using the R-test. Besides kinematic errors, the most fundamental error sources in 5-axis kinematics, there are more complex error sources that may impose significant influence on the machine's contouring performance. Such errors, including the gravity-induced deformation, angular positioning errors of a rotary axis, and run-out of a rotary axis, are modeled as angular-dependent kinematic errors, and are collectively called component errors of a rotary axis in this paper. In this second report, we show the methodology to identify component errors associated with rotary axes on 5-axis machine tools.

## 1. 緒言

5 軸制御加工機や複合加工機では通常、直進軸の上に旋回軸が積み重なる構成となるため、各軸の運動誤差、及びそれらの組み立ての際に誤差が累積し、最終的な工具・ワーク間の相対位置の誤差として現れる。工作機械の運動精度を高めるためには、まずそれを正確に計測することが必要である。

R-test 測定では、ボールバー測定と比べて、測定器のセットアップを変更する必要がないため、測定時間の短縮が期待できる。また、一旦セットアップすれば機械を自動運転させるだけで測定が完了するので、測定の自動化にも有利である。また、第 1 報[1]では、R-test 測定を用いて運動誤差の要因の 1 つとなる幾何誤差の同定を行う手法を示した。しかし、重力による変形、旋回軸の回転位置決め誤差、回転に伴う旋回軸の振れやアンギュラモーションなど、より複雑な誤差原因が 5 軸制御加工機の運動精度の支配的要素となる場合も多い。そこで第 2 報では、幾何誤差をさらに発展させ、より複雑な、旋回軸の回転角度に依存して変化する誤差要因を診断する方法を構築することを目的とする。

## 2. 同定の対象とする旋回軸の component errors

本論文では、第 1 報[1]と同様のテーブル旋回型の軸構成をもつ 5 軸制御加工機を対象とする。

第 1 報[1]での 2 章で示したように、5 軸制御加工機の旋回軸について、それぞれの位置・姿勢に対して 6 個の誤差パラメータが定義され、これらを旋回軸の角度によらず一定値とした場合、一般に幾何誤差と呼ばれる。例えば B 軸に対する C 軸の回転中心の位置の誤差 ( $\delta_{x_{CB}}$ ,  $\delta_{y_{CB}}$ ) が B は C 軸の角度に依らず一定と定義されている。そのため、C 軸の回転振れを幾何誤差を用いて表現することはできない。しかし、 $\delta_{x_{CB}}$ ,  $\delta_{y_{CB}}$  が C 軸の角度に依存して変動するとすれば、C 軸の回転振れをモデル化することができる。同様に、重力の影響により、B 軸の旋回に伴って旋回部に生じた Z 方向の変形は、 $\delta_{z_{BY}}$  が B 軸の角度に依存して変動するとすればこれをモデル化することができる。

このように、幾何誤差が旋回軸の角度に依存して変動するとモデル化することで、5 軸制御加工機が持つ運動誤差成分の大部分を表現することができる。なお、このような旋回軸の角度に依存する誤差は ISO230-7[2]規格に定義された旋回軸の component errors に対応する。また、幾何誤差は同規格の location errors に対応する。

本論文では、component errors まで対象を広げ、5 軸制御加工機の運動誤差原因を第 1 報よりも正確に診断することを目指す。本論文でも、直進軸の運動誤差は旋回軸のそれと比べて十分小さいと仮定する。また、簡単のため、B 軸に関する誤差  $\delta_{x_{BY}}$ ,  $\delta_{y_{BY}}$ ,  $\delta_{z_{BY}}$ ,  $\alpha_{BY}$ ,  $\beta_{BY}$ ,  $\gamma_{BY}$  のみを B 軸の回転角にのみ依存するものとし、C 軸に関する誤差  $\delta_{x_{CB}}$ ,  $\delta_{z_{CB}}$ ,  $\alpha_{CB}$ ,  $\gamma_{CB}$  は一定値とする。

## 3. Component errors の同定

B 軸のある回転角度  $B(i)$  における component errors をそれぞれ  $\delta_{x_{BY}}(B(i)) \sim \gamma_{BY}(B(i))$  と定義する。

主軸側に取り付けられた球の位置を基準とし、R-test 測定器のグローバル座標系上での指令位置を  ${}^r p_0$ 、実際の位置を  ${}^r p$  とする。このとき、両者の位置の差は、 ${}^r p$  が  ${}^r p_0$  に対して X, Y, Z 方向の並進誤差  $\Delta X(B(i))$ ,  $\Delta Y(B(i))$ ,  $\Delta Z(B(i))$  と X, Y, Z 軸まわりの回転誤差  $\Delta A(B(i))$ ,  $\Delta B(B(i))$ ,  $\Delta C(B(i))$  により生じていると考えることができる。すなわち：

$${}^r p(B(i), C(j)) = D_x(\Delta X(B(i))) D_y(\Delta Y(B(i))) D_z(\Delta Z(B(i))) \cdot D_a(\Delta A(B(i))) D_b(\Delta B(B(i))) D_c(\Delta C(B(i))) {}^r p_0(B(i), C(j)) \quad (3.1)$$

ここで、 $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  は X, Y, Z 軸方向への平行移動、 $D_a$ ,  $D_b$ ,  $D_c$  は X, Y, Z 軸まわりの回転移動を表す同次変換行列である。第 1 報 5.1 節で示したように、R-test 測定では各  $B(i)$  において、C 軸を  $360^\circ$  回転し  ${}^r p(B(i))$ ,  $C(j)$  を測定する。これらのデータの組を使って、最小二乗法により  $\Delta X(B(i)) \sim \Delta C(B(i))$  を計算することができる。

一方、形状創成理論に基づく機構学モデルを用いて、component errors と  ${}^r p(B(i))$ ,  $C(j)$  の関係は以下のように表すことができる。

$${}^r p(B(i), C(j)) = {}^r T_B {}^B T_w {}^w p_0(B(i), C(j)) \quad (3.2)$$

$${}^r p_0(B(i), C(j)) = D_b(B(i)) D_c(C(j)) {}^w p_0 \quad (3.3)$$

ここで、 ${}^w p_0$  はワーク座標系での R-test 測定器の位置である。また、

$${}^r T_B = D_x(\delta_{x_{BY}}(B(i))) D_y(\delta_{y_{BY}}(B(i))) \cdots D_c(\gamma_{BY}(B(i))) D_b(B(i)) \quad (3.5)$$

$${}^B T_w = D_x(\delta_{x_{CB}}) D_z(\delta_{z_{CB}}) D_a(\alpha_{CB}) D_c(\gamma_{CB}) D_c(C(j)) \quad (3.6)$$

であり、これらを用いると、component errors と  $\Delta X(B(i)) \sim \Delta C(B(i))$  の関係は次のような線形近似で表すことができる。

$$\Delta X(B(i)) = \delta_{x_{CB}} \cos B(i) + \delta_{z_{CB}} \sin B(i) + \delta_{x_{BY}}(B(i)) \quad (3.7)$$

$$\Delta Y(B(i)) = \delta_{y_{BY}}(B(i)) \quad (3.8)$$

$$\Delta Z(B(i)) = -\delta_{x_{CB}} \sin B(i) + \delta_{z_{CB}} \cos B(i) + \delta_{y_{BY}}(B(i)) \quad (3.9)$$

$$\Delta A(B(i)) = \alpha_{CB} \cos B(i) + \gamma_{CB} \sin B(i) + \alpha_{BY}(B(i)) \quad (3.10)$$

$$\Delta B(B(i)) = \beta_{BY}(B(i)) \quad (3.11)$$

$$\Delta C(B(i)) = -\alpha_{CB} \sin B(i) + \gamma_{CB} \cos B(i) + \gamma_{BY}(B(i)) \quad (3.12)$$

全ての  $i$  に対する  $\Delta X(B(i)) \sim \Delta C(B(i))$  を用いて、最小二乗法により component errors を同定する。

## 4. ケーススタディ

## 4.1 component errors の同定

3 章で述べた手法により component errors を同定し、得られた結果を図 1 に示す。なお、(a) は並進誤差を、(b) は回転誤差を示す。

図 1 より、B 軸の component errors の大きさは、B 軸の回

転角度が0°を中心にしてほぼ対称となっており、B軸の回転角度が大きくなるにつれて誤差も大きくなることわかる。ここで、 $\beta_{BY}$ はB軸の回転位置決め誤差、 $\delta z_{BY}$ は重力によるB軸回転ユニットのZ方向への変位を表すと考えることができる。また、 $\delta x_{BY}$ 、 $\delta z_{BY}$ は位相が90°ずれた正弦波のように見え、これはB軸の振れ(あるいはアンギュラモーション)を示していると考えられる。 $\alpha_{BY}$ 、 $\gamma_{BY}$ も同様にB軸のアンギュラモーションを示唆している。

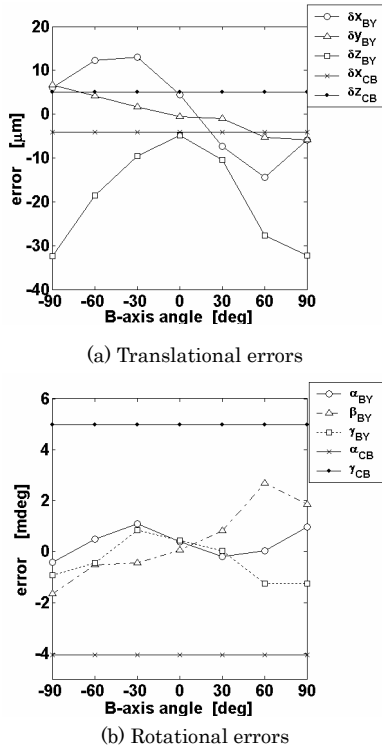


Fig.1: Identified component errors of rotary axis

4.2 R-test 測定器の位置のグローバル座標系での表示

主軸に取り付けられた球位置を基準として、R-test 測定により得られた測定器の位置および前節で同定した component errors を用いてシミュレーションした測定器の位置をグローバル座標系(地面に固定された座標系)に変換し、 $B=30^\circ$ および $90^\circ$ の場合においてYZ平面、XZ平面に投影したものを図2に示す。また、 $B=0^\circ$ から $90^\circ$ までのR-test 測定器の位置を、B軸に固定された座標系に変換したものを図3に示す。ここで、誤差は10,000倍に拡大して表示している。また、図中の実線はテーブルのおおまかな位置と向きを表している。

図2より以下が観察できる。第1報の図2と比較して、(b)、(d)より、幾何誤差では正確にシミュレーションできなかったY軸まわりの傾きの誤差が、component errors を用いるとほぼ一致している。

また、図3より以下が観察できる。実験結果(×)とシミュレーション結果(△)の円状の軌跡の半径の大きさについて、 $B=0^\circ$ ではほぼ両者は一致している。しかし、B軸の回転角度がおおきくなるにつれて、半径の差も大きくなっていることがわかる。特に、 $B=90^\circ$ では、実験結果の軌跡の半径は約15 μm、シミュレーション結果では約10 μmで約5 μmの差がある。この原因は、C軸の回転に伴う振れであると考えられる。 $B=0^\circ$ ではC軸の振れは小さいものの、B軸の角度が大きくなると、重力の影響でC軸の振れが大きくなることを示唆している。

B軸に関する component errors は定量的に同定できるものの、C軸に関する component errors は対象外となる。しかし上記の考察のように、図3には明確にC軸の component errors の影響が現れており、それまで同定の対象を拡大することは可能であると考えている。

5. 結言

本論文では、R-test 測定器を用いて5軸制御加工機の運動誤

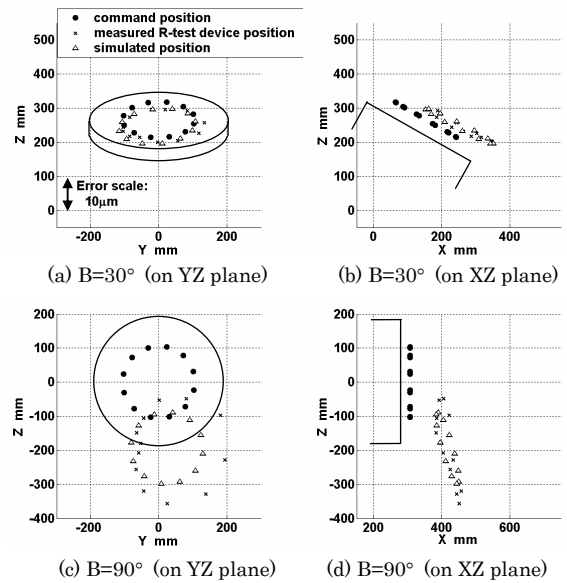


Fig.2: Ball position in the global coordinate system (Errors are magnified by a factor of 10,000)

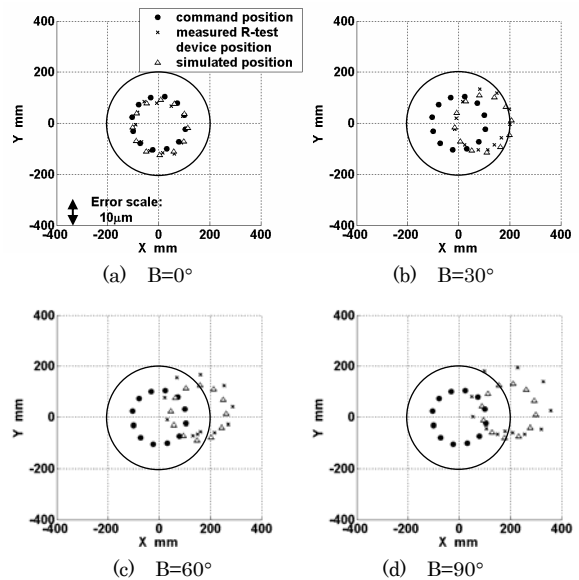


Fig.3: Ball position in the coordinate system attached to B-axis (Errors are magnified by a factor of 10,000)

差の要因の診断を目的とし、幾何誤差からさらに進展した component errors について同定およびそれらの影響のシミュレーションを行った。

幾何誤差を用いた場合と比較して、実験結果とシミュレーション結果の間の誤差は大きく減少した。B軸の回転位置決め誤差、重力によるZ方向への変位、B軸のアンギュラモーション、C軸の振れの重力による増大、などのより複雑な誤差原因を、R-test によって診断できると考えるが、同定結果の精度の検証は現時点では行っていない。

参考文献

[1] 茨木創一他: R-test を用いた5軸制御加工機の運動誤差の測定と補正(第1報), 精密工学会秋季大会学術講演会論文, (2009).  
 [2] ISO 230-7: Test code for machine tools – Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation, (2006).