5 軸制御マシニングセンタの キャリブレーション方法に関する研究 (第 2 報) *

— 同時 3 軸制御運動を用いた位置偏差および角度偏差の推定 —

齋藤 明徳** 堤 正臣** 牛久健太郎***

Development of Calibration Methods of 5-axis Controlled Machining Centers (2nd Report)
— Estimation of Positional and Angular Deviation by Means of Simultaneous 3-axis Motion —

Akinori SAITO, Masaomi TSUTSUMI and Kentaro USHIKU

Various types of 5-axis controlled machining centers have been developed to produce molds, dies and mechanical parts with complicated shape as well as aero parts. The most fundamental cause of the machining errors is the deviation of the configuration of the machining center. However, any calibration method for the 5-axis machining centers including two rotary axes has not been investigated. In this paper, a calibration method using simultaneous 3-axis control technique is proposed for 5-axis machining centers with a tilting rotary table. The ball-bar system is used as a measurement instrument. In this method, one rotary axis and two linear axes are simultaneously controlled and the sensitive direction of the ball bar system is kept constant in radial, tangential or axial accordingly. The influence of the positional and angular deviations on 3-axis motion is evaluated through the characteristic diagrams. In the experiments, the positional and angular deviations existing in the 5-axis machining center are estimated by the proposed method. The results show that the deviations can be estimated with high accuracy.

Key Words : 5-axis machining center, calibration, ball-bar method, 3-axis control, motion accuracy, positional deviation, angular deviation

1. 緒 言

5 軸制御マシニングセンタ (以下 5 軸 MC) が広く利用されるようになってきた。この 5 軸 MC のように旋回軸をもつ機械では、軸の旋回中心の位置や旋回軸と直交軸との平行度・直角度など、従来の直交 3 軸 MC に比べて加工精度を左右する幾何学的な偏差が多く存在する¹⁾。

5 軸 MC の幾何学的な精度や空間精度に関する研究は、Soons ら²⁾、Kiriden ら³⁾、垣野ら⁴⁾、坂本ら^{5)~7)}、Suh ら⁸⁾、Mayer ら⁹⁾、著者ら¹⁰⁾によって行われている。とくに坂本らは、旋回軸系の組立て誤差について測定データと理論式とを用いた曲線回帰による同定方法を発表している。著者らは、同時 4 軸制御運動を適用して偏差を推定する方法を提案し、シミュレーションによってその有効性を確認している¹⁰⁾。

最近、ISO TC39 の会議では、5 軸 MC の検査方法開発の重要性が指摘され、各国で検討が開始され始めた。その代表的な案は、直定規とダイヤルゲージとを使用する簡便な方法¹¹⁾であるが、上で述べた旋回軸を含む角度偏差や位置偏差の評価方法に関しては全く手が付けられていない。

そこで、本論文では、直交 2 軸と旋回 1 軸とを同時 3 軸制御したときの工具—工作物間の相対距離変化を、専用の測定器であるボールバーを使用して測定し、そのデータに基づいて 5 軸 MC に存在する偏差を精度よく推定する方法を提案し、その方法の有効性を実験によって確認している。

2. 同時 3 軸制御運動

2.1 5 軸 MC に存在する位置と角度の偏差

測定対象とした 5 軸 MC は、立て形 3 軸 MC のテーブル上に旋回軸である A 軸と C 軸とをもつ傾斜円テーブルをのせたものである¹⁰⁾。この構造の 5 軸 MC の場合には図 1 に示すように各軸間に位置偏差 4 個、角度偏差 9 個の合計 13 個の偏差が存在する¹⁾。この 13 個の偏差のうち Y 軸と A 軸との角度偏差 (α_{AY} , β_{AY} , γ_{AY}) および位置偏差 (δ_{xAY} , δ_{yAY} , δ_{zAY})、A 軸と C 軸との角度偏差 (β_{CA}) および位置偏差 (δ_{yCA}) の合計 8 個の偏差を評価する方法について検討する。これら以外の偏差は、通常の静的精度検査¹²⁾や位置決め精度検査¹³⁾を行うことで評価できる。

2.2 旋回軸を含む同時 3 軸制御運動

本研究ではボールバーを用いて運動軌跡を測定するが、ボールバーは 2 球間のバーの伸縮量を、内蔵した 1 次元変位計

Fig.1 Coordinate system of a tilting rotary table and the definition of deviations

* 原稿受付 平成 14 年 7 月 17 日

** 正 会 員 東京農工大学大学院 (東京都小金井市中町 2-24-16)

*** 学生会員 東京農工大学大学院

Fig.2 Simultaneous 3-axis motion (A, Y and Z axes)

で検出する測定器である。著者らがすでに提案した同時4軸制御運動による測定¹⁰⁾では、ボールバーのバーの向きが3次元的に変化するために、得られた軌跡のどの部分にどの方向の影響が現れているかを直感的に把握することは難しい。また、幾何学的な偏差以外の誤差要因が、例えば後述するウォームギアのかみ合いの不具合による影響などが入っている場合には、その影響が大きく現れる可能性が高く、精度良く評価できない可能性がある。

そこで、ボールバーの運動に制限を加え、1つの回転軸の回転運動に対して常に一定の方向を保ちながら、3つの直交軸と2つの回転軸との相互の関係、すなわち、上に述べた8個の偏差を評価する方法を検討し、その1つの運動として同時3軸制御運動を考案した。なお、坂本ら⁹⁾は、ボールバーの伸縮方向である感度方向を常に直交軸のうちの1軸に平行に保つようにして回転軸を含む複数の軸を同時制御運動させていることから、本研究で提案する感度方向の設定方法とは異なる。

この同時3軸制御運動は、直交2軸を同時制御して円運動させ、回転軸の回転とその円運動とを同期させる運動である。A軸を回転軸とした場合には、YZ面内でY軸とZ軸とを同時制御して円運動させる。この場合に考えられるボールバーの感度方向は、図2に示すように、①A軸の半径方向、②A軸の接線方向および③A軸の軸方向の3つである。

同様に、C軸を回転軸とした場合には、図3に示すようにXY面内でX軸とY軸とを円運動させ、その運動にC軸の回転を同期させる。その場合に考えられるボールバーの感度方向は、④C軸の半径方向、⑤C軸の接線方向および⑥C軸の軸方向である。このC軸の軸方向と接線方向の測定方法とは、類似のボールバーの設置方法がANSI B5.54の付属書に記載されているが、本研究とは目的が全く異なる¹⁴⁾。

2.3 偏差と軌跡のシミュレーション

2つの回転軸に対してそれぞれ3とおりの感度方向を設定

Fig.3 Simultaneous 3-axis motion (C, X and Y axes)

したが、これら6とおりの測定を行った場合に回転軸を含む系に存在する8個の偏差の影響が軌跡にどのように現れるかをシミュレーションによって確認することにした。

シミュレーション方法については、すでに詳細に報告¹⁰⁾しているのでA軸を回転軸とした同時3軸制御運動を例に説明する。図1に示した機械座標系、A軸座標系およびC軸座標系の間にある8個の偏差を考慮して、同時3軸制御運動させたときの機械座標系におけるボールバーの2球の中心座標を幾何学的に計算する。

主軸側の球はA軸の回転角度に同期させて円運動を行う。そのために機械座標系における主軸側の球の中心座標Sは、運動開始時の主軸側の球の座標 S_{XYZ} を用いて式(1)で表すことができる。ここで円運動は回転座標行列 E_R で表す。

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = E_R \begin{bmatrix} x_{s_{xyz}} \\ y_{s_{xyz}} \\ z_{s_{xyz}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

機械座標系でのテーブル側の球の座標Tは、C軸座標系でのテーブル側の球の座標 T_c を用いて、式(2)で表すことができる。ここで、行列 E_{AYZ} はA軸座標系から機械座標系への回転座標変換行列、行列 D_u は角度偏差 u を表す。また、行列 E_{CA} はC軸座標系からA軸座標系への回転座標変換行列を表すが、C軸は回転させないため単位行列となる。

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = D_{\beta AY} D_{\mu AY} E_{AYZ} \left[D_{\beta CA} E_{CA} \begin{bmatrix} x_{Tc} \\ y_{Tc} \\ z_{Tc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \delta_{yCA} \\ 0 \end{bmatrix} \right] + \begin{bmatrix} \delta_{xAY} \\ \delta_{yAY} \\ \delta_{zAY} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ボールバーで検出するのは、2球間の距離の基準長さ L_B （例えば、100mm）からの偏差である。そのためシミュレーションではA軸の0～90°の運動に応じて、主軸側の球の中心座標Sおよびテーブル側の球の中心座標Tを算出する。C軸を回転軸とする同時3軸制御運動についても同様の方法でシミュ

Fig. 4 Influence of deviation on simulated circular trajectories of 3-axis motion

 — Positive — Negative 1div.: 10 μm

レーションする。

シミュレーションの結果は、計算で求めた 2 球の中心座標をもとに中心間の距離 L を算出し、基準長さ L_B との差 ΔL を求めて、基準円上に表示倍率をかけて極座標表示した。そのシミュレーション結果を図 4 に示す。このシミュレーションでは、図 3(a) に記号を説明するように、A 軸の旋回軸中心線からテーブル側の球の中心までの距離を $Z_{TC}=200\text{mm}$ 、C 軸の旋回軸中心線からテーブル側の球の中心までの距離を $R_B=100\text{mm}$ と仮定し、角度偏差に $\pm 0.005^\circ$ 、位置偏差に $\pm 10\mu\text{m}$ を別々に与えている。なお、図 4 の空欄部分は、シミュレーションで求めた軌跡が基準円弧または基準円と一致する場合を表している。

① A 軸の半径方向では、偏差 $\delta_{xAY}=10\mu\text{m}$ の場合に軌跡は 90° の位置で基準円弧から外側に外れ、 $\delta_{xAY}=-10\mu\text{m}$ の場合には基準円よりも内側に入り込んでいる。 δ_{xAY} が存在した場合は、 δ_{yAY} が存在した場合とは逆に 0° の位置で基準円弧から外れている。これら以外の偏差については基準円と一致している。偏差 δ_{yAY} と δ_{zAY} との影響だけが軌跡に現れる理由は、この A 軸の半径方向での測定では、Y 軸方向と Z 軸方向の変位だけを検出しているからである。

② A 軸の接線方向の場合も半径方向の場合と同様に、 δ_{yAY} 、 δ_{zAY} による変化が大きい。しかし、 α_{AY} 、 δ_{yCA} に対しては半径の異なる円が描かれている。③ A 軸の軸方向においても同様に、 β_{AY} 、 γ_{AY} の変化に対して半径方向と同様の軌跡を描くことがわかる。旋回軸を 1 軸だけ含む同時 3 軸制御運動の軌跡には、ボールバーの検出方向に関係した特定の複数の偏差が影響を及ぼすことがわかる。

次に、④ C 軸の半径方向、⑤ C 軸の接線方向および⑥ C 軸の軸方向のシミュレーション結果をみると、A 軸の結果とは異なり、8 個の偏差の影響がほとんどの場合に現れ、その大部分が偏心した円となっている。このうち、C 軸の軸方向の結果だけは、空欄が多く、3つの偏差(α_{AY} 、 β_{AY} 、 β_{CA})の影響で偏心した円となっている。

以上の結果から、8 個の偏差の中から、まず 2 個の偏差を推定するためには、1/4 円だけが描かれた① A 軸の半径方向の測定データから偏心量を読みとれば、 δ_{xAY} と δ_{yAY} の 2 個の偏差を推定できる。同様に、③ A 軸の軸方向のデータから偏心量を読みとり、適当な変換をすれば、角度偏差 β_{AY} と γ_{AY} とを求めることができると考えられる。さらに、⑥ C 軸の軸方向のデータからすでにわかっている β_{AY} を除いて α_{AY} と β_{CA} とを求め、最後に偏差を求めるのに使っていない他のデータのうち④ C 軸の半径方向のデータを使って残りの偏差 (δ_{xAY} と δ_{yCA}) を推定できると考えられる。そこで、次にその推定方法について詳細に検討する。なお、② A 軸の接線方向および⑤ C 軸の接線方向を使用しない理由は、次章で述べる。

3. 偏差の推定

3.1 同時 3 軸制御運動を用いた偏差推定方法

図 4 のシミュレーション結果を基に 8 個の偏差がすべて検出できる組み合わせとして① A 軸の半径方向、③ A 軸の軸方向、④ C 軸の半径方向、そして⑥ C 軸の軸方向を選び、これらの測定データから偏差を推定する手順の詳細を検討する。

図 4 に示したように、シミュレーション結果には偏差の向きによって半径の異なる円弧になるものがあるが、半径の大

小は、テーブル側の球が理想的な位置に設置されない場合にも起こる。それを防ぐためにこのテーブル側の球の設置誤差を無視できるオーダまでに小さくすることは容易ではない。そこで、この半径の大小を生じる軌跡は使用しないで、偏心するデータだけを利用して偏差を推定する。

(1) 手順 1：①A 軸の半径方向の運動では、偏差 δ_{yAR} と δ_{zAR} が存在した場合に軌跡は変化する。A 軸の半径方向の運動において偏差 δ_{yAR} と δ_{zAR} が存在した場合のボールバーの位置を図 5 に示す。本研究で対象とした実機の A 軸の可動範囲は、 $-20^{\circ} \sim 110^{\circ}$ であるために A 軸を運動させる範囲を 90° までに制限しているが、図に示すように、 360° まで広げるとボールバーで検出される偏心量が偏差と等しくなることがわかる。測定データの 90° 位置（機械座標系の Y 方向）の偏心量 e_y 、 0° 位置（Z 方向）の偏心量 e_z について、式(3)、(4)が成り立つ。したがって、偏差 δ_{yAR} と δ_{zAR} とを求めることができる。

$$e_y = -\delta_{yAR} \quad (3)$$

$$e_z = -\delta_{zAR} \quad (4)$$

(2) 手順 2：次に、③A 軸の軸方向の運動では、偏差 γ_{AR} が存在した場合のボールバーの基準長さ L_B との差 ΔL を計算すると、式(1)、(2)から式(5)で表される。ここで、式(5)において、 γ_{AR} が微小な場合には、近似的に式(6)で表すことができる。

$$\Delta L = \sqrt{(L_B - Z_{TC} \sin \gamma_{AR} \sin \varphi)^2 + Z_{TC}^2 \sin^2 \varphi (\cos \gamma_{AR} - 1)^2} - L_B \quad (5)$$

$$\Delta L = -Z_{TC} \sin \gamma_{AR} \sin \varphi \quad (6)$$

この式は周期が 360° で振幅が $Z_{TC} \sin \gamma_{AR}$ の正弦波を表しており、近似的に偏心量は $-Z_{TC} \sin \gamma_{AR}$ であると考えることができる。同様に、偏差 β_{AR} が存在した場合には、ボールバーの基準長さとの差 ΔL は、式(7)で表される。

$$\Delta L = -Z_{TC} \sin \beta_{AR} \cos \varphi \quad (7)$$

ここで、偏差 β_{AR} と γ_{AR} が存在した場合を考えると、式(6)と(7)とでは位相が 90° 異なることから、測定データの Y 方向の偏心量 e_y と Z 方向の偏心量 e_z について、式(8)、(9)が成り立つ。

$$e_y = Z_{TC} \sin \gamma_{AR} \quad (8)$$

$$e_z = -Z_{TC} \sin \beta_{AR} \quad (9)$$

したがって、式(8)、(9)から角度偏差 β_{AR} と γ_{AR} を求めることができる。

(3) 手順 3：⑥C 軸の軸方向の運動では、ボールバーの基準長さとの差を算出すると、近似的に測定データの 0° 方向（機械座標系の X 方向）の偏心量 e_x と 90° 方向（Y 方向）の偏心量 e_y について式(10)、(11)が成り立つ。

$$e_x = R_B \sin \beta_{CA} + R_B \sin \beta_{AR} \quad (10)$$

$$e_y = -R_B \sin \alpha_{AR} \quad (11)$$

ここで、手順 2 に示した式(9)からすでに求めた偏差 β_{AR} と式(10)とを使って偏差 β_{CA} を求め、式(11)から偏差 α_{AR} を求めることができる。

(4) 手順 4：④C 軸の半径方向の運動では、位置偏差 δ_{xAR} が X 方向の偏心量、 $\delta_{yAR} + \delta_{yCA}$ が Y 方向の偏心量となる。それに加えて角度偏差 α_{AR} 、 β_{AR} 、 β_{CA} が存在した場合のボールバーの基準長さとの差を考慮すると、X 方向の偏心量 e_x と Y 方向の偏心量 e_y について式(12)、(13)が成り立つ。

Fig.5 Effects of eccentricity between the center of A-axis and the origin of the machine

Table 1 Estimated deviations at initial conditions

α_{AR}	$-0.0022^{\circ} (-7.9^{\circ})$
β_{AR}	$-0.0022^{\circ} (-7.9^{\circ})$
γ_{AR}	$-0.0149^{\circ} (-53.6^{\circ})$
β_{CA}	$0.0043^{\circ} (15.5^{\circ})$
δ_{xAR}	-0.009 mm
δ_{yAR}	-0.011 mm
δ_{zAR}	0.025 mm
δ_{yCA}	0.005 mm

Table 2 Estimated deviations after compensation

α_{AR}	$0.0004^{\circ} (1.4^{\circ})$
β_{AR}	$-0.00006^{\circ} (-0.2^{\circ})$
γ_{AR}	$0.00009^{\circ} (0.3^{\circ})$
β_{CA}	$0.00006^{\circ} (0.2^{\circ})$
δ_{xAR}	0.0 mm
δ_{yAR}	-0.003 mm
δ_{zAR}	-0.001 mm
δ_{yCA}	0.004 mm

$$e_x = -\delta_{xAR} - Z_{TC} \sin \beta_{CA} - Z_{TC} \sin \beta_{AR} \quad (12)$$

$$e_y = -\delta_{yAR} - \delta_{yCA} + Z_{TC} \sin \alpha_{AR} \quad (13)$$

これらの式(12)に式(9)、(10)の結果を、式(13)に式(3)、(11)の結果をそれぞれ代入すれば、偏差 δ_{xAR} と δ_{yCA} とを求めることができる。

測定データの円弧中心の偏心量をボールバーの出力から読みとり、計算式に従って順番に求めることで 8 個の偏差すべてを求めることができる。

3.3 実機によるキャリブレーション

偏差の推定方法とその結果の妥当性を調べた。具体的には実機の初期状態に存在する偏差を推定し、次にそれを補正し、さらに故意に偏差を与えて、与えたその偏差を正しく推定できるかどうかを調べた。

ボールバーのテーブル側の球を $R_B = 100 \text{ mm}$ となるように設定した。5軸 MC の可動範囲の制限から A 軸の半径方向の測定では $Z_{TC} = 150 \text{ mm}$ とし、それ以外の測定では $Z_{TC} = 200 \text{ mm}$ とした。送り速度は直進 2 軸による円運動が $F = 1000 \text{ mm/min}$ になるように設定した。測定に用いたボールバーの精度は $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 、分解能は $0.1 \mu\text{m}$ である¹⁵⁾。

表 1 に 5 軸 MC の初期状態において推定した偏差を示す。図 6 に AYZ 軸、図 7 に CXY 軸によるそれぞれの同時 3 軸制御運動の測定データと推定した偏差が 5 軸 MC に存在した場合のシミュレーション結果とを合せて示す。

図 6、7 に示すように、偏差の推定に用いた A 軸の半径方向、A 軸の軸方向、C 軸の半径方向、C 軸の軸方向の測定で

Fig. 6 Circular trajectories of 3-axis motion (A, Y and Z axes)

Fig. 7 Circular trajectories of 3-axis motion (C, X and Y axes)

は、測定データとシミュレーション結果とがよく一致しているのがわかる。一方、偏差の推定に用いていない A 軸および C 軸の接線方向の測定データには、周期的な変動が認められる。これはウオームギヤのかみ合いの不具合によるもので、その変動数はウオームホイールの歯数と一致している。この変動を除くと、図 6(b)に示すように A 軸の接線方向の測定データには、70°~90°においてシミュレーションと一致していない部分がある。これは A 軸が 90°の位置に近づくとき傾斜円テーブルの上面が垂直に近づく、傾斜円テーブルの可動部に作用する重力によるたわみが生じているために一致しない部分が現れると考えられる。

図 7(b)に示すように、C 軸の接線方向の測定データには 100°付近にウオームギヤの不具合と考えられる 15μm 程度の凹形の段差が見られる。この部分は、ウオームギヤの偏摩耗によるもので、この部分を除けば測定データとシミュレーションとは 2μm 程度の差があるものの、かなり近い形状となっている。

以上述べたように、測定データと推定した偏差を反映したシミュレーション結果とはよく一致することがわかった。次に機械側でそれぞれの偏差を補正した。3つの位置偏差 (δ_{xAR} , δ_{yAR} , δ_{zAR}) については、推定した偏差分を変更することでワーク座標系の原点を補正した。その他の 5つの偏差の補正は、推定した偏差を基に NC データの直交 3 軸の指令値に修正を加えることで行った。その補正値は、各軸間の偏差 α_{AR} , β_{AR} , β_{CA} , γ_{AR} , δ_{CA} を考慮し、偏差が存在した場合の機械座標系における工具先端座標を算出することで求めた。

Table 3 Estimation of the deviations

Condition	δ_{xAR}		δ_{yAR}	
	Given deviation	Estimated deviation	Given deviation	Estimated deviation
I	0.0 mm	-0.003 mm	0.0 mm	-0.001 mm
II	0.0 mm	-0.002 mm	-0.010 mm	-0.011 mm
III	0.0 mm	-0.003 mm	-0.020 mm	-0.020 mm
IV	0.0 mm	-0.004 mm	-0.040 mm	-0.039 mm

同時 3 軸制御運動による補正後の偏差の推定結果を表 2 に示す。この表によると、偏差は、角度偏差 0.0004°以内、位置偏差 4μm 以内にまで補正されていることがわかる。しかし、補正しても偏差が 0 にならない原因には、5 軸 MC が温度管理された環境に設置されていないことや、上に述べたように A 軸の運動には重力の影響が反映されることなどが考えられるが、今後の検討が必要である。

さらに、この同時 3 軸制御運動で推定した偏差を用いて同時 4 軸制御運動の補正を試みた。補正方法は同時 3 軸制御運動と同様の方法で行った。

$Z_{TC}=200\text{mm}$ における補正前と補正後の測定結果を図 8 に示す。補正前の軌跡は基準円弧から大きく狂っており、第 1 象限では基準円弧よりも 48μm も外側にふくらみ、第 2 象限では内側に 32μm も入り込んでいる。また、軌跡をよく見るとボールバーの検出方向に対応して、部分的にウオームギヤのかみ合いによる周期的な変動が現れている。一方、補正後の軌跡は、周期的な変動が存在するものの、基準円弧よりも外

Fig. 8 Circular trajectories of 4-axis motion with and without compensation

側に $16\mu\text{m}$, 内側に $15\mu\text{m}$ 入っている程度に改善されていることがわかる。

このように、同時3軸制御運動で推定した偏差を用いて同時3軸および同時4軸制御運動の軌跡を補正したが、この補正したMCにおいて、ワーク座標系の原点を変更することで、表3に示す4つの条件で偏差 δ_{AY} だけに偏差を与えてA軸の半径方向について測定し、その測定データをもとに偏差を推定した。

偏差 $\delta_{AY} = -10, -20, -40\mu\text{m}$ を与えた場合についてシミュレーションと測定データとの比較を図9に示す。また、測定データから推定した偏差を表3に示す。図9に示すように測定した軌跡は、シミュレーションとよく一致しており、与えた偏差の大きさに応じて大きく変化している。測定データとシミュレーションとに 0° の位置近くでわずかに差が見られるが、これは表2に示したように補正後にも偏差が存在するためである。

表3に示すように、推定した偏差は、与えた偏差とほぼ等しい値となっている。同様に、偏差 δ_{AX} , δ_{AY} についても、C軸半径方向の測定を行い、与えた偏差を推定できることを確認した。したがって、同時3軸制御運動を用いた偏差推定方法によって、5軸MCに存在する偏差が推定できると言える。

4. 結 言

本論文では、5軸MCに存在する位置および角度の偏差を同時3軸制御運動の軌跡から評価する方法について検討し、その方法を実機に適用し、偏差の推定、偏差の補正を行い、提案した方法の妥当性を検討した。その結果を要約すると次のようになる。

- (1) ボールバーを使用して、直進軸2軸と旋回軸1軸とを同時3軸制御運動をさせたときの工具側と工作物側の相対距離変化から、旋回軸を含む系に存在する位置および角度の偏差を推定する方法を提案した。
- (2) 旋回軸を含む同時3軸制御運動のうち、それぞれの半径方向および軸方向の測定を行うことによって、8個の偏差を推定する手順を示した。
- (3) 提案した方法および手順を使って実機の偏差を推定し、その値をもとにシミュレーションした結果は、測定データとよく一致した。
- (4) 故意に偏差を与えて、測定とシミュレーションとを行った結果は、わずかな差はあるが、よく一致した。

Fig. 9 Influence of the deviation δ_{AY} on the circular trajectories

以上、提案した方法は、テーブル旋回形5軸MCのキャリブレーション方法として十分に利用できるもので、今後は、検査標準として整備していくために、提案した方法の信頼性・安定性について検討していく予定である。

なお、本研究は、平成14年度科学研究費補助金（若手研究B 課題番号14750081）、マザック財団および工作機械技術振興財団の研究助成金の一部で行ったものであることを付記し、関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 稲崎一郎, 岸浪健史, 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, 養賢堂, (1997), 98.
- 2) J. A. Soons, F. C. Theuvs and P. H. Schillekens: Modeling the errors of multi-axis machines: a general methodology, Precision Engineering, 14-1(1992), 5-19.
- 3) V. Kiridena and P. M. Ferreira: Mapping the effects of positioning errors on the volumetric accuracy of five-axis CNC machine tools, Int. J. Mach. Tools. Manufact., 33-3 (1993), 417-437.
- 4) 垣野義昭, 井原之敏, 佐藤浩毅, 大坪寿: NC工作機械の運動精度に関する研究(第7報) —DBBによる5軸制御工作機械の運動精度の測定, 精密工学会誌, 60-5(1994), 718-722.
- 5) 坂本重彦, 稲崎一郎: 5軸マシニングセンタにおける組立誤差同定方法, 日本機械学会論文集(C編), 60-575 (1994), 2475-2483.
- 6) 坂本重彦, 稲崎一郎: ボールバーによる五軸マシニングセンタの組立誤差同定方法, 日本機械学会論文集(C編), 63-605 (1997), 262-267.
- 7) 坂本重彦, 稲崎一郎: 五軸マシニングセンタの組立精度評価方法, 日本機械学会論文集(C編), 63-605 (1997), 268-272.
- 8) S.-H. Suh, E.-S. Lee and S.-Y. Juns: Error modeling and measurement for rotary table of five-axis machine tools, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 14, (1998), 656-663.
- 9) J. R. R. Mayer, Y. A. Mir and C. Fortin: Calibration of a five-axis machine tool for position independent geometric error parameters using a telescoping magnetic ball bar, Int. MATADOR Conf., 33 (1999), 275-280.
- 10) 齋藤明徳, 宮川元成, 堤正臣: 同時4軸制御による5軸制御マシニングセンタの位置偏差および幾何偏差推定方法, 精密工学会誌, 67-2 (2001), 306-310.
- 11) ISO/TC39/SC2/WG3, N104, Test code for machining centers, Draft addendum D, Geometric tests for tilting tables (2001).
- 12) JIS B 6191, 工作機械—静的精度試験方法及び工作精度試験方法通則, 日本規格協会, (1999).
- 13) JIS B 6192, 数値制御による位置決め精度試験方法通則, 日本規格協会, (1999).
- 14) ANSI B5.54, Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centers, (1992), 130-137.
- 15) レニショー株式会社, キャリブレーションシステムカタログ, (1998), 1.