旋盤形複合加工機に存在する幾何偏差同定方法*

崔 成 日^{*1}, 東 山 憲 司^{*1}

堤 正 臣^{*2}, K. M. Muditha DASSANAYAKE^{*3}

A Method for Identifying Geometric Deviations Inherent to Multi-Tasking Turning Centers

Chengri CUI, Kenji HIGASHIYAMA,
Masaomi TSUTSUMI^{**4} and K. M. Muditha DASSANAYAKE

^{**4} Graduate School of Bio-Applications and Systems Engineering,
Tokyo University of Agriculture and Technology,
2-24-16 Nakacho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

This paper proposes a method for calibrating the geometric deviations inherent to multi-tasking turning centers with a swivel tool-spindle head. The number of geometric deviations of the turning centers is more than that of the tilting rotary table type machining centers. Therefore, six measurements by means of a telescoping ball bar are required in order to determine the inherent deviations. Simultaneous three axis motions are employed to measure the circular trajectories, and six sets of the eccentricities of the measured trajectories are taken and then the geometric deviations are calculated. Some geometric deviations measured are corrected by an NC program experimentally to confirm the effectiveness of the proposed method. It is found from the experimental results that the trajectories of the interpolation motions are considerably improved.

Key Words: Multi-Tasking, Turning Center, Five-Axis Machining Center, Identification, Geometric Deviation, Three-Axis Control Motion

1. 結 言

旋盤形複合加工機と呼ばれる多機能ターニングセンタは、近年急速に普及し始めている¹⁾²⁾。このターニングセンタの静的精度は、ISO13041³⁾に従って検査することになっているが、図1に示す形態の機械の軸数が規格で規定している機械の軸数よりも多いために、すべての幾何偏差を評価することができない。とくにB軸とC軸とに關係する幾何偏差の検査は不十分である。

一方で、図1に示した形態のターニングセンタの第2主軸と第2刃物台とを除くと、主軸頭・テーブル旋回形5軸制御マシニングセンタと同じ形態になる。この種のマシニングセンタの幾何偏差の評価方法についてはほとんど研究されず、おもにテーブル側に二つの旋回軸をもつテーブル旋回形について研究^{4)~10)}がなされてきた。

テーブル旋回形のマシニングセンタ用に開発された試験方法の中で、ターニングセンタに適用できそうな測定方法は、常に旋回1軸と直進2軸とを同時に制

御する同時3軸制御運動⁸⁾である。しかし、ターニングセンタのように工作物側と工具側とに旋回機構のあるマシニングセンタでは、固有の偏差の数が10個あり、テーブル旋回形よりも多いことが知られている⁵⁾。そのために筆者らが提案した方法を適用しようとしても同定に利用する計算式が変わるだけでなく、方法も煩雑になる可能性がある。

そこで本研究では測定器としてボールバーを用い

Fig.1 Multi-tasking turning centers

Table 1 Traveling range of each axis

X axis	-20 ~ 560mm	B axis	0 ~ 225°
Y axis	-80 ~ 80mm	C axis	0 ~ 360°
Z axis	0 ~ 1045mm		

* 原稿受付 2008年7月10日。

^{*1} 東京農工大学大学院生物システム応用科学府(〒184-8588 小金井市中町2-24-16)。

^{*2} 正員、フェロー、東京農工大学大学院共生科学技術研究院。

^{*3} (株)三共製作所(〒439-0018 菊川市本所2290)。

E-mail: tsutsumi@cc.tuat.ac.jp

motion	Positional deviations	Angular deviations
C-axis	$\delta_{xCZ}, \delta_{yCZ}$	α_{CZ}, β_{CZ}
Z-axis		α_{ZY}, β_{ZY}
Y-axis		γ_{YX}
X-axis		$\alpha_{XB}, \beta_{XB}, \gamma_{XB}$
B-axis	$\delta_{xBS}, \delta_{zBS}$	α_{BS}
Spindle		

Fig.2 Geometric deviations of multi-tasking turning center

て旋回軸を含む同時3軸制御運動を測定することによってターニングセンタに存在する固有の幾何偏差を同定する方法を開発することを目的とする。

2. ターニングセンタに存在する幾何偏差

図1に示すターニングセンタのX軸は水平面に対して60°の傾きをもっていて、それに直角な方向がY軸であるが、水平に配置されたY軸とX軸の運動を合成してY軸運動を得られるようにしている。しかし、本論文では、簡単のためにY軸は合成軸ではなくX軸と独立しているものとする。図示したターニングセンタから、第2主軸と第2刃物台とを除いて、運動要素を工作物側から工具側まで順に並べ、考慮すべき幾何偏差を求めると、図2に示すように4個の位置偏差と9個の角度偏差の合計13個の偏差になる⁵⁾。なお、 α, β, γ は、X, Y, Z軸周りの角度偏差を、 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ は、機械座標系上でX, Y, Z方向の位置偏差をそれぞれ表している。その他の大文字の添字は軸を表す。これら13個の偏差のうち、C軸とB軸とに関係する10個の幾何偏差がターニングセンタに固有の偏差であるとして同定対象とする。

これら10個の幾何偏差と四つの座標系、すなわち機械座標系($O_M-X_M Y_M Z_M$)、B軸座標系($O_B-X_B Y_B Z_B$)、工作主軸座標系($O_C-X_C Y_C Z_C$)及び工具主軸座標系($O_S-X_S Y_S Z_S$)との関係は図3に示すようになる。ここで、機械座標系は、工作物主軸のC軸の回転運動の軸心上において、B軸の旋回運動の軸心への距離が最も短くなる点を原点 O_M ととり、XYZ軸をターニングセンタの構造に合わせてとった。C軸座標系の Z_C 軸は、C軸回転運動の軸心線に一致しており、C軸の回転運動に同期して Z_C 軸周りに回転する。B軸座標系の Y_B 軸はB軸の旋回運動の軸心線に、工具主軸座標系の Z_S 軸は工具主軸の回転軸心線に一致し、B軸の旋回運動に同期して Y_B 軸周りに回転する。

Fig.3 Coordinate systems and the definition of the ten deviations

3. 旋回軸を含む同時3軸制御運動

同時3軸制御運動は、すでに報告しているように、旋回1軸を回転させ、その回転に同期させて直交2軸に円弧補間運動をさせる運動である。工具と工作物との相対位置変化を検出する測定器としてボールバーを使用するが、その感度方向は、回転軸を中心に考えると、回転軸の半径方向、軸方向及び接線方向の3方向が可能である。しかし、接線方向の運動は従来の研究によると旋回軸のピッチ誤差の影響が大きく現れるので、本研究でもこの運動は考えないことにする。

ところで、ターニングセンタは一般にZ軸の移動範囲は大きいが、それ以外の直進軸の移動範囲はテーブル旋回形マシニングセンタよりも小さい場合が多い。研究対象としているターニングセンタの各軸の移動範囲には、表1に示すように工作主軸中心に対して偏りがあるところが、5軸制御マシニングセンタとの大きな違いである。そのために、これらの範囲を考慮してボールバーがそれぞれ旋回軸の半径方向と軸方向とを常に保つような同時3軸制御運動を考える。

可能な同時3軸運動を模式的に示すと図4のようになる。図4(a)に示す運動をB軸半径方向運動と呼ぶ。この運動は、ボールバーの軸が常に工具主軸と平行になるようにして工作主軸側の球を中心として回転させる同時3軸制御運動である。このとき、ボールバーの感度方向は常にB軸の回転の中心を向いている、すなわちB軸回転の半径方向を向いている。Z, X軸の描く円弧の半径は(R_a+L_B)となる。ここで、 R_a はB軸回転中心から工具主軸側球中心までの距離、 L_B はボールバーの基準長さである。

図4(b)に示す運動をB軸軸方向運動と呼ぶ。工具主軸頭の運動は、図4(a)と同じであるが、Z, X軸の描く円弧の半径が R_a になる。ボールバーの軸が常にB軸の旋回軸に平行になるようにして工具側球を中心として

Fig.4 Simultaneous 3-axis motion

回転させる。このときボールバーの感度方向はZX面に垂直な方向になる。以上の二つの運動は、機械の干渉も考慮して90°の測定範囲において測定を行うことにする。

次に、図4(c)に示す運動をC軸軸方向運動と呼ぶ。この運動は、移動範囲の小さなY軸の運動を伴うために、円弧補間運動の半径 R_C は、Y軸の可働範囲内に入るように設定する。ボールバーの軸が常にC軸、すなわちZ軸と平行を保つように同時3軸制御運動させる。Y軸とX軸の可動範囲の制限から1周360°分のデータを取ることが難しいために測定範囲を約180°にすることにした。

最後に図4(d)に示す運動をC軸半径方向の運動と呼ぶ。この運動は360°の測定範囲を確保するためにボールバーの軸がC軸中心線と常に直交するようにし、XY軸を使って工具主軸頭を、円弧(半径 $R_d < 20\text{mm}$)を描くように運動させるか、または、 $R_d = 0\text{mm}$ の場合を考え、X、Y軸による円運動をさせることなく、C軸だけを回転させる。

4. シミュレーション及び幾何偏差の同定方法

まず、それぞれの同時3軸制御運動に対してボールバー測定を行う前に、10個の幾何偏差が円弧軌跡にどのように影響を及ぼすかについて数学モデルを使って調べ、その結果から幾何偏差を推定する方法について検討した。計算では、それぞれの同時3軸運動に対して、図3に示した10個の幾何偏差を考慮して、運動中の工作主軸側球と工具主軸側球中心の機械座標系に対する絶対座標値を幾何学的に求め、さらに空間にある2球間の距離を求めた。それぞれの同時3軸制御運動に対して運動中の、工具主軸側

球の中心Sと工作主軸側球の中心Tの機械座標系に対する座標 $(X_{OMS}, Y_{OMS}, Z_{OMS})$ と $(X_{OMT}, Y_{OMT}, Z_{OMT})$ をつぎのようにして求めた。

4.1 数学モデル

4.1.1 工具主軸側球の数学モデル 同時3軸制御運動において工具主軸側球の運動は、二つの直進軸によるB軸回転中心の円運動と、機械座標系に対するB軸の回転運動とを合成したものである。したがって機械座標系におけるB軸回転中心の運動は、

$$\begin{bmatrix} X_{OMB} \\ Y_{OMB} \\ Z_{OMB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_T \end{bmatrix} + L_B E_C \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B - Z_T \end{bmatrix} \quad (1)$$

と表せる。ここで、 Z_T は機械座標系に対する工作主軸側球のZ軸座標値、 (X_B, Y_B, Z_B) は機械座標系に対するB軸回転中心の初期値であり、例えばB軸半径方向運動の場合、図4(a)から $X_B=0, Y_B=0, Z_B=Z_T+L_B+R_a$ となる。 E_B, E_C は、B軸とC軸の回転指令を表す回転マトリックスである。

B軸回転中心に対する工具主軸側球の運動は、

$$\begin{bmatrix} X_{OBS} \\ Y_{OBS} \\ Z_{OBS} \end{bmatrix} = D_{\alpha_{XB}} D_{\beta_{XB}} D_{\gamma_{XB}} E_B D_{\alpha_{BS}} \begin{bmatrix} \delta_{xBS} \\ 0 \\ -R_a + \delta_{zBS} \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表される。ここで、 $D_{\alpha_{XB}}, D_{\beta_{XB}}, D_{\gamma_{XB}}, D_{\alpha_{BS}}$ は、図3に定義した四つの角度偏差を表す回転マトリックスである。例えば、 $D_{\alpha_{XB}}$ は機械座標系に対するB軸座標系のX軸周りの角度偏差 α_{XB} を表す回転マトリックスで、式(3)のように表される。

$$D_{\alpha_{XB}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{XB} & -\sin \alpha_{XB} \\ 0 & \sin \alpha_{XB} & \cos \alpha_{XB} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(2)と式(3)から同時3軸制御運動において、機械座標系に対する運動中の工具主軸側球の中心座標 $(X_{OMS}, Y_{OMS}, Z_{OMS})$ は、式(4)で表される。

$$\begin{bmatrix} X_{OMS} \\ Y_{OMS} \\ Z_{OMS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_T \end{bmatrix} + E_B E_C \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B - Z_T \end{bmatrix} + D_{\alpha XB} D_{\beta XB} D_{\gamma XB} E_B D_{\alpha BS} \begin{bmatrix} \delta_{xBS} \\ 0 \\ -R_a + \delta_{zBS} \end{bmatrix} \quad (4)$$

4.1.2 工作主軸側球の数学モデル B軸の半径方向と軸方向の運動をさせたときは、C軸は運動せず、ボールバーのソケットを取り付けるためだけの支持台の役割をする。そのためにC軸側に存在する四つの幾何偏差は考慮しなくてよい。

B軸が 0° (水平な状態) の初期状態においてB軸回転中心に対して工具主軸側球に幾何偏差のない理想的な位置からのずれは、式(5)のように表せる。

$$T_{OBS} = D_{\alpha XB} D_{\beta XB} D_{\gamma XB} D_{\alpha BS} \begin{bmatrix} \delta_{xBS} \\ 0 \\ -R_a + \delta_{zBS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R_a \end{bmatrix} \quad (5)$$

通常、ボールバー測定を行うときの工作主軸側球は、工具主軸側球を取り付けるためのソケットに押し当てて固定して取り付ける。そのために式(5)から本来工具主軸側球を取り付けようとした位置からずれが生じる。

したがって、運動中の工作主軸側球の座標 $(X_{OMT}, Y_{OMT}, Z_{OMT})$ は、式(6)によって求められる。

$$\begin{bmatrix} X_{OMT} \\ Y_{OMT} \\ Z_{OMT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + D_{\alpha XB} D_{\beta XB} D_{\gamma XB} D_{\alpha BS} \begin{bmatrix} \delta_{xBS} \\ 0 \\ -R_a + \delta_{zBS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R_a \end{bmatrix} \quad (6)$$

ただし、 (X_T, Y_T, Z_T) は、機械座標系に対する工作主軸側球の初期値である。

C軸の半径方向と軸方向の運動について機械座標系に対する工作主軸側球中心の座標は、式(7)から求められる。

$$\begin{bmatrix} X_{OMT} \\ Y_{OMT} \\ Z_{OMT} \end{bmatrix} = D_{\alpha CZ} D_{\beta CZ} E_C \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{xCZ} \\ \delta_{yCZ} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ただし、 $D_{\alpha CZ}, D_{\beta CZ}$ は、C軸とZ軸間に存在する角度偏差を表す回転マトリックスである。

ここでは、式(5)に示した工具主軸側球のずれによる工作主軸側球のずれを考慮していない理由は、この運動ではボールバーが工作主軸側球に対して相対運動をしないために、工作主軸側球に理想的な位置からのず

れがあっても円弧軌跡の偏心量には影響をしないためである。同様の理由によってB軸軸方向の運動においても式(5)のずれを考慮しなくても問題はない。

以上示したように、四つの同時3軸制御運動について、幾何偏差を含んだ状態における工具主軸側球と工作主軸側球の座標を求めることができる。求めた座標値を式(8)に代入し、2球間の距離を求めることでボールバー測定のシミュレーションを行うことができる。

$$L = \sqrt{(X_{OMS} - X_{OMT})^2 + (Y_{OMS} - Y_{OMT})^2 + (Z_{OMS} - Z_{OMT})^2} \quad (8)$$

4.2 シミュレーション結果 ボールバーの基準長さ $L_B = 100 \text{ mm}$, $Z_T = 100 \text{ mm}$, $R_a = 350 \text{ mm}$, $R_d = 0 \text{ mm}$, $R_c = 75 \text{ mm}$ と仮定し、位置偏差については $\pm 10 \mu\text{m}$, 角度偏差については $\pm 0.01^\circ$ を別々に与えて行ったシミュレーション結果を図5に示す。表の中の空白部分は、幾何偏差が円弧軌跡に影響及ぼさないことを示す。また、実際にはB軸半径方向の同時3軸制御運動のように 360° 測定できない運動についても円弧軌跡がどの方向に偏心するかを判断しやすくするために 360° 分のシミュレーション結果を示してある。

図からB軸軸方向では α_{XB} と γ_{XB} とが存在する場合に円弧軌跡が偏心しているが、残りの8個の幾何偏差は円弧軌跡に影響をしないことがわかる。また、 α_{XB} が存在する場合は円弧軌跡が図の左右方向に、 γ_{XB} が存在する場合は図の上下方向に偏心することがわかる。したがって、幾何偏差と偏心量との関係式を求めることで α_{XB} と γ_{XB} とを求めることができると考えられる。同様に、C軸軸方向についても α_{CZ} と β_{CZ} とを求めることができる。

B軸半径方向では δ_{xBS} と β_{BX} とによって円弧軌跡が上下方向に偏心し、 δ_{zBS} が存在した場合は左右方向に偏心することがわかる。また、これらの3個の偏差はこの運動で初めて現れるので、ここで直接推定できる幾何偏差は δ_{zBS} だけになると考えられる。

C軸半径方向について10個のうち8個の偏差において円弧軌跡が偏心している。そのうち α_{CZ} と β_{CZ} とはC軸半径方向で求められるが、残りの6個の偏差は左右方向と上下方向の偏心量にそれぞれ3個ずつ影響を及ぼすので、この運動から推定できない。

以上からテーブル旋回形マシニングセンタと違って4回の測定で全ての幾何偏差を推定することができないことがわかる。そこで、新たな条件を付加することによって、これらの式を活用しつつすべての偏差を求めることができるかどうかを検討した。

4.3 偏差の同定方法 式(8)を用いて、それぞれの同時3軸制御運動における偏差と円弧軌跡の偏心量と

	δ_{xBS}	δ_{zBS}	α_{XB}	β_{XB}	γ_{XB}	α_{BS}	δ_{xCZ}	δ_{yCZ}	α_{CZ}	β_{CZ}
B-axis Axial										
C-axis Axial										
B-axis Radial										
C-axis Radial										

Fig.5 Effects of individual geometric deviations on circular trajectories

の関係を近似的求めると、以下の式(9)~(16)に示すようになる。偏心量 (e_x , e_y , e_z) は、図5に示した偏心の方向を表している。

B 軸軸方向 : (e_x , e_z)

$$e_x = -R_a \sin \gamma_{XB} \quad (9)$$

$$e_z = R_a \sin \alpha_{XB} \quad (10)$$

C 軸軸方向 : (e_x , e_y)

$$e_x = R_c \sin \beta_{CZ} \quad (11)$$

$$e_y = -R_c \sin \alpha_{CZ} \quad (12)$$

B 軸半径方向 : (e_x , e_z)

$$e_x = -\delta_{xBS} + R_a \sin \beta_{XB} \quad (13)$$

$$e_z = -\delta_{zBS} \quad (14)$$

C 軸半径方向 : (e_x , e_y)

$$e_x = \delta_{xBS} - R_a \sin \beta_{XB} - \delta_{xCZ} - Z_T \sin \beta_{CZ} \quad (15)$$

$$e_y = R_a \sin(\alpha_{XB} + \alpha_{BS}) - \delta_{yCZ} + Z_T \sin \alpha_{CZ} \quad (16)$$

以上から、まず α_{XB} , γ_{XB} , α_{CZ} , β_{CZ} 及び δ_{xBS} については式(9)~(12)及び式(14)から求め、次に式(13)を(15)に代入して δ_{xCZ} を求めることができる。

ここまでは、提案した4種類の測定を行い、そのとき得られた円弧の偏心量から6個の偏差を求めることができることを示した。しかし、残りの4個の偏差、 α_{BS} , β_{XB} , δ_{zBS} , δ_{yCZ} については求めることができない。

そこで、これら4個の偏差を同定するために式(15)と式(16)とに着目した。これら二つの式をよく見るとそれぞれ未定の偏差が2個ずつ含まれているのがわかる。未定の偏差が含まれる項の係数を変えて測定すれば、二つ関係式が得られ、それらを連立させることによって未定の偏差を求めることができる。

未定の偏差が含まれた項で変化させて測定できる係数は、B 軸回転中心から工具主軸側球までの距離 R_a であるので、 R_{a1} と R_{a2} の二つの長さについて測定す

ばよいことがわかる。これらの偏差とそれぞれの偏心量との関係式を連立させて求めると、式(17)と(18)が得られ、 β_{XB} と α_{BS} を求めることができる。

$$\sin \beta_{XB} = \frac{e_{x2} - e_{x1}}{R_{a2} - R_{a1}} \quad (17)$$

$$\sin(\alpha_{BS} + \alpha_{XB}) = \frac{e_{y2} - e_{y1}}{R_{a2} - R_{a1}} \quad (18)$$

なお、(e_{x1} , e_{y1}), (e_{x2} , e_{y2}) は、それぞれ R_{a1} と R_{a2} とで測定したときの円弧の偏心量である。

式(17)で求めた β_{XB} を式(13)に代入して δ_{xBS} を求め、式(18)から求めた α_{BS} と、式(10), 式(12)でそれぞれ求めた α_{XB} , α_{CZ} とを式(16)に代入することによって δ_{yCZ} を求めることができる。以上から、ターニングセンタに存在する10個の偏差全てを求めることができる。

5. ボールバーの球の取付け誤差の補正

ボールバー測定を行う際に、例えばC 軸半径方向の同時3軸制御運動では工具主軸側球の中心を工具主軸の回転中心上に精確に取り付ける必要がある。しかし、ボールバー測定によく使われている工具ホルダでマグネットソケットを保持する形式では、球の中心が工具主軸の回転中心上にくるようにするのは難しく、ずれてしまうことが多い。

そこで、図6に示すようにジグを作ってボール中心を工具主軸の回転中心に合わせられるようにした。この状態で工具主軸を手で回し、ボールバーの読みが変化しないようになるように心出しを行った。本研究では、2 μ m 以下になるようにした。

工作主軸側球を、工具主軸側球用ソケットに当てて、ねじで固定するときにもねじを回す力によってずれが生じる。このずれは数 μ m から数十 μ m と大きい場合がある。B 軸半径方向運動の測定では、この取付け誤差

Fig. 6 Ball bar setting for centering the tool side ball

Fig. 7 Circular movement with X and Z axis

Table 2 Correction of eccentricities measured by three-axis motion

	e_x (μm)			e_z (μm)		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
3-axis	-226.5	-154.0	-206.0	37.4	53.6	42.7
2-axis	-51.4	21.0	-34.1	-12.4	1.5	-8.7
Corrected	-175.1	-175.0	-171.9	49.8	52.1	51.4

がそのまま測定結果に含まれてしまうために無視できない。そこで次のような工夫をした。

工作主軸側球の取付け誤差は、図7に示すようにZX軸を使った円弧補間運動を行い、得られた円弧軌跡の偏心量を同時3軸制御運動で測定された円弧軌跡の偏心量と比較し、補正した。実際に補正した結果を表2に示す。表に示したようにB軸半径方向の測定結果では3回の測定結果のばらつきは大きい、XZ同時2軸で偏心量を測定した値を補正したところ、ばらつきが大幅に小さくなっているのがわかる。

6. 実験及びシミュレーション

幾何偏差の同定方法とその結果の妥当性を調べるために、実機において幾何偏差を同定し、その結果に基づいてNCプログラムとワーク座標系とを修正して補正の程度を調べた。さらに、図8に示したように機構解析プログラムDADS (Dynamic Analysis and Design System)を用いてコンピュータ上に測定対象のモデルを作成し、実機で同定した幾何偏差を与え、同時3軸制御運動のシミュレーションから得られたデータから式(9)~(18)を使って幾何偏差を同定した。

6.1 実機の幾何偏差の同定 B軸の半径方向と軸方向の運動では、B軸回転中心から工作主軸側球中心

Fig. 8 Simulation model of the turning center

Table 3 Experimental and simulation results and identified by the proposed method

Deviations	Experiment	Simulation model
δ_{xBS} (μm)	64.7	64.8
δ_{zBS} (μm)	-39.0	-38.8
α_{XB} (")	-1.8	-1.4
β_{XB} (")	-54.7	-54.7
γ_{XB} (")	-11.9	-11.9
α_{BS} (")	-22.0	-22.0
δ_{xcz} (μm)	152.2	152.3
δ_{ycz} (μm)	-59.4	-59.4
α_{cz} (")	4.0	4.0
β_{cz} (")	-46.8	-46.8

までの距離 $R_0=366.689\text{mm}$ と測定範囲を $0^\circ\sim90^\circ$ とした。C軸半径方向の運動では、C軸だけを回転させ 360° 分のデータを採り、 R_0 は 366.689mm と 523.377mm の2通りについて行った。C軸軸方向の運動では、C軸回転中心から工作主軸側球までの距離 R_0 を 75mm として、軸の可動範囲の制限から 160° 分のデータを取得した。

機械座標系原点からC軸回転中心までの距離 Z_T については全ての測定においてテーブル側球を取り付ける位置のZ座標値を同じにした上、 $Z_T=0$ と仮定して行った。これらのパラメータはDADSモデルによるシミュレーションにおいても同様に設定した。

表3に、実機において同定した幾何偏差とその値をDADSモデルに与えてシミュレーションし、同定した結果を示す。表によると測定対象であるターニングセンタには全体的に大きな幾何偏差が存在していることがわかる。特に δ_{xcz} は $152.2\mu\text{m}$ とC軸回転中心と機械座標系間に大きな偏差が存在していることがわかる。

また、DADSモデルを用いてシミュレーションした結果を元に本研究で提案している方法を適用して同定した偏差は、与えた偏差とよく一致している。

6.2 実験に基づく幾何偏差の補正 表3に示した同定結果を用いて幾何偏差を補正した。B軸軸方向の運動では、NCデータを座標変換することで α_{XB} 、 γ_{XB}

Fig.9 B-axis: Axial direction (1div:5 μm)

Fig.10 C-axis: Axial direction (1div:10 μm)

を補正した。図9に補正前後の軌跡を示す。図によると補正した軌跡は、大幅に真円に近づいていることがわかる。しかし、1回の補正では偏差が十分に補正されず、円弧軌跡がX軸に3.4μm、Z軸方向に3.1μm偏心していた。この値から偏差を求めると $\alpha_{XB}=1.8''$ 、 $\beta_{XB}=1.8''$ となる。さらに2回目の補正を行い、これらの偏差を補正した。その結果、一回目の補正結果に比べると軌跡には大きな変化が見られないが、偏心量は $e_x=1.4\mu\text{m}$ 、 $e_z=0.4\mu\text{m}$ と更に小さくなっていることが確認できた。

同様にC軸軸方向の運動についても a_{CZ} と β_{CZ} を補正した。図10に補正前後の測定結果を示す。図示したように補正後の円弧軌跡はほぼ真円になっており、X軸方向とY軸方向の偏心量は両方とも1μm以下の値になっている。角度偏差 β_{XB} はワーク座標系を調整することで補正した。しかし、2回に渡って補正したのに関わらず、補正後も $\beta_{XB}=4.7''$ となっており、これ以上の補正はできなかった。 β_{XB} を補正した状態、すなわち $\beta_{XB}=4.7''$ の場合においてB軸半径方向の測定を行った。補正前と β_{XB} を補正した後の測定結果を図11に示す。図から β_{XB} を補正することで円弧軌跡は真円に近づいていることが分かる。

しかし、補正後の円弧軌跡は $e_x=-53.0\mu\text{m}$ 、 $e_z=58.1\mu\text{m}$ 偏心しており、この結果を用いて δ_{XBS} と δ_{ZBS} を求めるとそれぞれ $\delta_{XBS}=44.7\mu\text{m}$ と $\delta_{ZBS}=58.1\mu\text{m}$ となり、角度偏差 β_{XB} を補正する前の $\delta_{XBS}=64.7\mu\text{m}$ と $\delta_{ZBS}=39.0\mu\text{m}$ (表3)に比べ、大きく変化してしまっている。その原因は機械側に問題がある可能性がある。

Fig.11 B-axis: Radial direction (1div:20 μm)

そこで、 β_{XB} についてはこれ以上補正できないことから $\beta_{XB}=0''$ と仮定して δ_{XBS} と δ_{ZBS} をNCデータを補正することにした。ここで、 $\beta_{XB}=0''$ と仮定すると式(13)から $\delta_{XBS}=53.0\mu\text{m}$ となる。図11(c)と、図11(b)の β_{XB} のみを補正した結果とを比べると、円弧軌跡は大幅に真円に近づいていることが分かる。しかし、円弧軌跡は $e_x=29.0\mu\text{m}$ 、 $e_z=28.1\mu\text{m}$ 偏心していることから、 δ_{XBS} は $-29.0\mu\text{m}$ ($\beta_{XB}=0''$ と仮定した場合)、 $\delta_{ZBS}=28.1\mu\text{m}$ と同定された。この結果を用いて更に補正を行うと図11(d)に示したように円弧軌跡は更に真円に近づいており、円弧軌跡の偏心量は両方向とも3μm以下になった。

C軸半径方向の運動(短いほうの R_c の値)から得られた円弧軌跡のX軸方向の偏心量とY軸方向の偏心量からワーク座標系のXとY座標値を調整すると円弧軌跡の偏心量は両方向とも1μm以内に収まることが確認できた。すなわち、工具主軸側球の中心を精確にC軸回転中心に合わせることができた。これはC軸半径方向の同時3軸制御運動に影響を与える幾何偏差をまとめて補正したことになり、幾何偏差の補正が良く効いているといえる。

6.3 DADS モデルに基づく幾何偏差の補正 DADSモデルを用いてB軸の軸方向と半径方向運動について、実験と同じ方法で補正を行った。B軸軸方向運動の補正前後のシミュレーション結果を図12に示す。図からシミュレーションでは1回の補正により円弧軌跡が、ほぼ完全に真円と一致することがわかる。

B軸半径方向運動については、実験結果と比較するためにシミュレーションにおいても、 $\beta_{XB}=4.7''$ としてシミュレーションから得られた軌跡から δ_{XBS} と δ_{ZBS} を求め、更に補正をすることにした。

Fig. 12 Simulation, axial direction of B-axis (1div:5 μm)

Fig. 13 Circular trajectories of B-axis radial direction on simulation (1div:20 μm)

図 13(a), (b)に幾何偏差を補正する前と $\beta_{XB}=-4.7''$ とした場合のシミュレーション結果を示す。 $\beta_{XB}=-4.7''$ を補正した後の円弧軌跡は、 $e_x=-73.0\mu\text{m}$, $e_z=38.9\mu\text{m}$ 偏心している。式(13)から $\delta_{XBS}=64.7\mu\text{m}$, $\delta_{ZBS}=38.9\mu\text{m}$ と β_{XB} を補正する前とよく一致することがわかる。さらに $\beta_{XB}=0''$ と仮定して δ_{XBS} と δ_{ZBS} を補正して行ったシミュレーション結果を図 13(c)に示すが、円弧軌跡はよく真円と重なっていることが分かる。

以上の結果から、実機でB軸軸方向と半径方向の運動を補正するとき一回の補正では幾何偏差が十分に補正できなかったことと、B軸半径方向の運動で β_{XB} を補正した後に δ_{XBS} と δ_{ZBS} が大きく変わってしまった原因は、測定対象としている機械のB軸の運動に不具合があるためであると考えられる。

以上述べたように、本研究で提案した幾何偏差の同定方法は有効であり、実験とシミュレーションとも幾何偏差を補正することで円弧軌跡が真円に近づくことから、ターニングセンタに存在する幾何偏差を補正すれば運動精度を大幅に向上できるといえる。

7. 結 言

本研究ではターニングセンタに固有の幾何偏差を同定するための方法について検討した。その結果、次の結論が得られた。

(1) テーブル旋回形マシニングセンタを対象として開発した同時3軸制御運動を適用し、数学モデルを利用してシミュレーションを行ったところ、テーブル旋回形のマシニングセンタとは大きく異なり、ターニングセンタに固有の偏差10個のうち、6個までは、同時3軸制御運動をさせたときに得られる円弧軌跡の偏心量と幾何偏差との関係式から求められるが、残り4個の偏差は求められない。

(2) 残りの4個の偏差を求めるためには、追加の測定を行い、すべての偏差を求めるためには6通りの測定を行う必要がある。

最後に、実機の幾何偏差を同定し、補正を行った結果、円弧軌跡は真円に近づき、提案した方法が有効であることが確認できた。しかし、一部の幾何偏差につ

いては一回では十分補正できず、その原因として測定対象に問題のある可能性が示された。今後、別の機械で測定を行い、更に有効性を確認する予定である。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(B)(20360063)によって行われたものであり、関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Nakaminami, M., Latest hybrid machine, *Proceedings of the 4th Manufacturing & Machine Tool Conference of JSME*, Vol.2002, No.4, pp. 183-184, (2002)
- 2) Muraki, T., Okuda, T. and Yamamoto, H., Development of multi-tasking machine tools, *Proceedings of the 2005th JSME Annual Meeting*, No.05-1, pp. 91-92, (2005)
- 3) ISO 13041-1:2003, Test conditions for numerically controlled turning machines and turning centres - Part1: Geometric tests for machines with a horizontal spindle
- 4) Muraki, T., Kakino, Y. and Tsune, K., Improvement of motion accuracy on multi-tasking machines, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol.69, No.12, pp. 1734-1738, (2003)
- 5) Inasaki, I., et al., *Shape generation theory of machine tools - its basics and applications*, Yokendo, Tokyo, pp.95-103, (1997)
- 6) Sakamoto, S. and Inasaki, I., Identification of alignment errors in five-axis machining centers, *Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.60, No.575 pp.2475-2483, (1994)
- 7) Tsutsumi, M. and Saito, A., Identification of angular and positional deviations inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp.1333-1342, (2004)
- 8) Tsutsumi, M. and Saito, A., Identification and compensation of particular deviations of 5-axis machining centers, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.43, pp.771-780, (2003)
- 9) Tsutsumi, M., Yamamoto, K., Saito, A., Dassanayake, K. K. M. and Mikami, S., Identification of geometric deviations using simultaneous five-axis control technique in five-axis machining centers with double pivot spindle head, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72, No. 723, pp.3679-3686, (2006)
- 10) Higashiyama, K., Dassanayake, K. M. M., Tsutsumi, M. and Yamamoto, K., Identification of geometric deviations based on simultaneous five-axis motion trajectory measured in five-axis machining centres with a tilting rotary table, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 73, No. 724, pp.3679-3686, (2007)