テーブル旋回形5軸制御マシニングセンタの 幾何偏差同定方法の一般化*

深山直記^{*1}, 佐伯智之^{*1}
崔成日^{*2}, 堤正臣^{*3}

Generalization of Identification Method of Geometric Deviations for Five-Axis Machining Centers with a Tilting-Rotary Table

Naoki MIYAMA, Tomoyuki SAIKI,
Chengri CUI and Masaomi TSUTSUMI^{*4}

^{*4} Institute of Symbiotic Science and Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology,
2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

This paper describes the method of measuring the geometric deviations inherent to five axis machining centers with an inclined A-axis and a rotary table. As the conventional method is not applicable to the machine with the inclined A-axis, four axis movements are newly proposed. However, the inherent deviations are defined same as the machine with a cradle type table, if the inclination angle of the A-axis is an initial value and its angular deviation is also superimposed on it. Simultaneous three axis control movement which has already been proposed applies to the C-axis for rotary table. Relational expressions between geometric deviations and eccentricities of the trajectories of three axis control movement of C, X and Y and of four axis control movement of A, X, Y and Z were derived. The procedure for identifying the deviation by using the relational expressions was shown. The relational expressions clarify that the cradle type is also applicable. In addition, validity and the application limit of the proposed method are clarified.

Key Words: Five-Axis Control, Machining Center, Geometric Deviation, Ball Bar, Three-Axis Motion, Four-Axis Motion, Identification

1. 緒 言

5軸MCの幾何精度測定方法は、マシニングセンタの検査規格であるISO 10791-1の附属書B⁽¹⁾に規定されている。しかし、この規格は主軸側に旋回2軸をもつ主軸頭旋回形を対象としたもので、それ以外の形態を対象としたものではない。そのために、筆者らはテーブル側に旋回2軸をもつテーブル旋回形MC^{(2)~(5)}、主軸頭側に旋回2軸をもつ主軸頭旋回形^(6,7)、テーブル側と主軸頭側にそれぞれ旋回軸をもつ混合形⁽⁸⁾の3種類を対象とした幾何精度の測定方法を提案し、実験またはシミュレーションでその有効性を確認してきた。

ところが、これら提案したすべての方法は、2つの旋回軸が直交するように配置された機械だけを想定して開発してきたもので、それ以外の軸配置、例えば、水平に対して45°傾いた面で回転する軸と水平面内

で回転する軸とから構成される軸配置に適用することは考えていなかった。

5軸MCの構造形態は多様であり、テーブル旋回形だけを数えても少なくとも3種類が確認されている。一つは、もっとも普及しているトラニオン形とよばれる揺りかごを両端で支持する形態である。もう一つは、この揺りかごを片持ちにした形態である。これらの種類の二つの旋回軸はいずれも直交している。それに対

(a) Horizontal position (b) Vertical position
Fig. 1 Side view of a five-axis machining center
with an inclined A-axis

* 原稿受付 2009年2月16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} 東京農工大学大学院共生科学技術研究院。

^{*3} 正員, フェロー, 東京農工大学大学院共生科学技術研究院。

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

して、最近、図1に示すような2つの回転軸が直交しない形態の5軸MCが登場してきた。この形態は、テーブルの下部全体をベッド側の軸受面で支持する構造になっていて、テーブル剛性が高く、大きな工作物を積載できるとされている。ところが、ZX面内でテーブルを前方に傾斜させるには、揺りかご形5軸MCでは傾斜軸だけを回転させればよかったが、この形態の5軸MCの場合は、2つの回転軸だけでなく直進軸も同時に制御しなければならない。このように揺りかご形では簡単に見えた運動軸の組合せが複雑になる可能性がある。また、テーブル上面の傾斜角は、揺りかご形の場合には100°以上が確保されているが、この形態では90°と小さくなる。

そこで本論文では、傾斜軸が水平面に対して任意の角度をもつ形態を取り上げ、通常のテーブル旋回形5軸MCに適用してきた同時3軸制御運動と同様の運動をさせて測定し、その結果をもとに5軸MCに固有の幾何偏差を同定する方法を提案し、さらに、この方法は従来の揺りかご形にも適用できることを示し、提案した方法の妥当性及び適用限界についても検討する。

2. 対象とする機械の幾何偏差及び同定方法

2.1 機械の座標系と幾何モデル 本論文で取り上げる5軸MCの全体図を図2に示す。図1に示したように傾斜した軸をA軸と呼ぶことにする。

形状創成理論⁹⁾から導かれた揺りかご形のテーブル旋回形5軸MC固有の偏差は、図3のようになる。図示したように、幾何偏差には、原点位置の相対的な狂いとそれぞれの座標系を構成する軸の直角度の狂いが存在する。形状創成理論によれば、5軸MCに存在する13個の偏差のうち、X、Y、Zの直進軸間に存在する偏差5個を除く8個の幾何偏差が揺りかご形に固有の

偏差になる。研究対象である図2に示す構造形態の場合もA軸がY軸周りに角度 β_0 だけ傾いているとし、それに角度偏差 β_{AX} が加わっているとすれば、揺りかご形と同じ8個の偏差が存在することになる。

そこで従来の研究⁽²⁾⁽³⁾と同じように、機械座標系($O_M-X_M Y_M Z_M$)の上にA軸座標系($O_A-X_A Y_A Z_A$)を載せ、さらにその上にC軸座標系($O_C-X_C Y_C Z_C$)を載せた幾何モデルを考えることにする。その幾何モデルを図4に示す。この図は、それぞれの座標系に狂いがあるとして描いたもので、座標系に狂いがなければ、 O_A と O_C とは O_M に一致する。図2に示す構造形態と通常の揺りかご形との違いは、A軸がY軸周りに β_0 傾いて取り付けられているところである。そこで、揺りかご形の構造形態における β_{AX} と β_{CA} にそれぞれ β_0 と $-\beta_0$ の初期値を与えることで、図2の形態を表現することにした。

2.2 同時3軸制御運動 従来の研究⁽²⁾⁽³⁾では、同時3軸制御運動、すなわち、直進2軸と回転1軸とを同時に制御して運動させたときに得られる軌跡の偏心量と幾何偏差との関係式を、数学モデルをもとに導き、近似式を求めて偏差を同定してきた。

そこで、従来⁽²⁾⁽³⁾と同様に3軸制御のできる軸の組合せについて検討した。図2の構造形態を見ると、C軸

	Positional deviations	Angular deviations
Spindle		$\alpha_{ZS} \quad \beta_{ZS}$
Z-axis		β_{YZ}
Y-axis		$\alpha_{XY} \quad \gamma_{XY}$
X'-axis	$\delta_{xAX} \quad \delta_{yAX} \quad \delta_{zAX}$	$\alpha_{AX} \quad \beta_{AX} \quad \gamma_{AX}$
A'-axis	δ_{yCA}	β_{CA}
C'-axis		

Fig.3 Geometric deviations existing in the conventional five axis machining center with a tilting rotary table

Fig. 2 Five-axis machine with an inclined tilting axis

Fig.4 Form and Coordinate frames in the tilting rotary table incline A-axis type

と X, Y 軸の同時 3 軸制御運動は傾斜した A 軸の運動を含まないことから, C 軸を回転させ, その回転に同期させて X 軸と Y 軸とを用いて円弧補間運動させる運動である。この運動は揺りかご形⁽²⁾⁽³⁾とまったく同じである。

測定方法は, 図 5 に示すようにボールバーの感度方向を回転軸に対して, 半径方向と軸方向の 2 通りに設定することにした。なお, 接線方向の運動軌跡には, C 軸を駆動する要素の誤差が影響して C 軸に回転むらが見れることから, ここでは使用しないことにした。

これに対して, A 軸の回転に同期させて直進軸に円弧補間運動を行わせるには, 傾斜した A 軸の回転面内で複数の直進軸を用いて円弧補間運動を行わせなければならない。このときの円弧軌跡は, 水平でも, 垂直でもない A 軸に直交する面内で描かれることになる。そのために円弧補間運動は, 3 つの直進軸を用いて行うことになる。すなわち, X, Y, Z の 3 軸をすべて用いる 3 次元円弧補間運動になる。したがって, 傾いた A 軸の回転に同期させて, 従来と同じ考えに立って直進軸に円弧補間運動をさせるには同時 4 軸制御運動が必要になる。

そこで, 本研究では A 軸の回転運動に対して図 6 に示すような同時 4 軸制御運動を行わせることにした。ボールバーの感度方向は回転軸に対して, 半径方向及び軸方向の 2 通りに設定した。

3. 軌跡測定結果に及ぼす偏差の影響

3.1 シミュレーション方法 シミュレーションは 5 軸 MC に存在する幾何偏差と各軸の動作とを図 4 に示すような幾何モデルで表現し, 同時 3 軸制御運動と同時 4 軸制御運動におけるボールバーの 2 球の中心座標を機械座標系で求めることを行った。得られた 2 球の座標から, 2 球間の距離変化を求めて極座標表示している。同時に得られた軌跡の中心座標のオフセット量を求めている。

3.1.1 主軸側球の中心座標

(1) C 軸座標系から A 軸座標系への変換 まず, C 軸座標系における主軸側球の座標 $S_C(x_{SC}, y_{SC}, z_{SC})$ を, A 軸座標系における座標 $S_A(x_{SA}, y_{SA}, z_{SA})$ に変換する。C 軸座標系は, A 軸座標系に対し Z 軸周りに角度 θ 回転することから, その回転マトリックス E_{CAS} は, 式(1)のように表せる。

また, C 軸座標系と A 軸座標系の間には角度偏差の初期値として $\beta_{CA} = -\beta_0$ が存在するので, その回転マトリックス $D_{\beta CAS}$ は, 式(2)のように表せる。

したがって, S_A はこれらの回転マトリックスを用い

(a) C-axis radial direction (b) C-axis axial direction
Fig.5 Sensitive direction of ball bar in simultaneous three axis motion of X, Y and C axes

(a) A-axis radial direction (b) A-axis axial direction
Fig.6 Sensitive direction of ball bar in simultaneous four-axis motion of X, Y, Z and A axes

て, 式(3)のように表せる。

$$E_{CAS} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$D_{\beta CAS} = \begin{bmatrix} \cos(-\beta_0) & 0 & \sin(-\beta_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-\beta_0) & 0 & \cos(-\beta_0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$S_A = D_{\beta CAS} E_{CAS} S_C \quad (3)$$

(2) A 軸座標系から機械座標系への変換 次に, S_A を機械座標系における座標 $S(x_S, y_S, z_S)$ に変換する。A 軸座標系は機械座標系に対し X 軸周りに角度 ϕ 旋回していることから, その回転マトリックス E_{AXS} は, 式(4)のように表せ, A 軸座標系と機械座標系の間には角度偏差の初期値として $\beta_{AX} = \beta_0$ が存在するので, その回転マトリックス $D_{\beta AXS}$ は, 式(5)のようになる。したがって, S はこれらの回転マトリックスを用いることによって式(6)のように表せる。

$$E_{AXS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$D_{\beta AXS} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_0) & 0 & \sin(\beta_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta_0) & 0 & \cos(\beta_0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$S = D_{\beta AXS} E_{AXS} S_A \quad (6)$$

3.1.2 テーブル側球の中心座標

(1) C 軸座標系から A 軸座標系への変換 まず, C 軸座標系におけるテーブル側球の座標 $T_C(x_{TC}, y_{TC}, z_{TC})$ を A 軸座標系における座標 $T_A(x_{TA}, y_{TA}, z_{TA})$ に変換する. C 軸座標系は A 軸座標系に対し Z 軸周りに角度 θ 回転することから, その回転マトリックス E_{CAT} は, 式(1)と同様に式(7)のように表せる.

$$E_{CAT} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$D_{\beta CAT} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_{CA} - \beta_0) & 0 & \sin(\beta_{CA} - \beta_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta_{CA} - \beta_0) & 0 & \cos(\beta_{CA} - \beta_0) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$D_{\delta CAT} = \begin{bmatrix} 0 \\ \delta_{yCA} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T_A = D_{\beta CAT} E_{CAT} T_C + D_{\delta CAT} \quad (10)$$

(2) A 軸座標系から機械座標系への変換 次に, T_A を機械座標系における座標 $T(x_T, y_T, z_T)$ に変換する. A 軸座標系は機械座標系に対し X 軸周りに角度 ϕ 旋回し, 角度偏差として α_{AX} を含むことから, その回転マトリックス E_{AXT} は, 式(11)のように表せる.

$$E_{AXT} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi + \alpha_{AX}) & -\sin(\phi + \alpha_{AX}) \\ 0 & \sin(\phi + \alpha_{AX}) & \cos(\phi + \alpha_{AX}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$D_{\beta AXT} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_{AX} + \beta_0) & 0 & \sin(\beta_{AX} + \beta_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta_{AX} + \beta_0) & 0 & \cos(\beta_{AX} + \beta_0) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$D_{\gamma AXT} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{AX} & -\sin \gamma_{AX} & 0 \\ \sin \gamma_{AX} & \cos \gamma_{AX} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

また, 位置偏差 δ_{xAX} , δ_{yAX} , δ_{zAX} も存在し, これらに

よる位置偏差の行列 $D_{\delta AXT}$ は, 式(14)のように表せる. したがって, T は, これらの回転マトリックスと行列を用いて式(15)のように表せる.

$$D_{\delta AXT} = \begin{bmatrix} \delta_{xAX} \\ \delta_{yAX} \\ \delta_{zAX} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$T = D_{\beta AXT} D_{\gamma AXT} E_{AXT} T_A + D_{\delta AXT} \quad (15)$$

$T(x_T, y_T, z_T)$ と $S(x_S, y_S, z_S)$ から, これら 2 球間の距離 L を求める. この距離 L とボールバー基準長さ L_B との差が, ボールバーの伸縮量 ΔL になり, 式(16)で表される.

$$\Delta L = \sqrt{(x_S - x_T)^2 + (y_S - y_T)^2 + (z_S - z_T)^2} - L_B \quad (16)$$

3.2 幾何偏差の影響 図3に示した 13 個の偏差のうち, テーブル旋回形に固有の 8 個の偏差が軌跡にどのような影響を及ぼすかについて式(16)を用いてシミュレーションした. シミュレーションでは, $\beta_0 = 45^\circ$, $Z_{TC} = 200 \text{ mm}$, $R_B = 100 \text{ mm}$, $L_B = 100 \text{ mm}$ とした. 偏差は, 角度偏差として 0.005° , 位置偏差として $10 \mu\text{m}$ を一つずつ与え, それぞれの偏差によってどのように軌跡が変化するかを調べた. その結果を図7に示す.

Fig. 7 Influence of geometric deviations on circular trajectories (1 division = $10 \mu\text{m}$)

従来の研究では、ボールバーの接線方向の結果を示していたが、接線方向の軌跡にはテーブルの回転や傾斜軸の回転のピッチ誤差が含まれることから、利用しないこととし、2つの感度方向、すなわち、半径方向と軸方向について求めた軌跡を示す。

例えばA軸半径方向運動では、 β_{AX} , δ_{xAX} , δ_{zAX} が存在すると図中横軸のz軸方向に、 γ_{AX} , δ_{yAX} が存在すると縦軸であるy軸方向に偏心した円弧軌跡になる。また、 β_{CA} が存在しても偏心としては現れず、半径の大小として現れる。

各偏差に注目すると、 β_{AX} のように四つの運動すべてに影響を及ぼす偏差もあれば、 δ_{yCA} のように一つの運動にしか影響を及ぼさない偏差もある。また、同じ偏差でも運動によって影響の及ぼし方が異なり、偏心量も異なっている。すなわち、これは偏差によって鈍感な方向と敏感な方向とが存在することを意味する。

ボールバーは2球間の相対的な距離の変化を測定するものであり、基準半径からの増減を測定することは難しいが、偏心量は容易に求められる。したがって、以下では偏心量について議論していく。

4. 幾何偏差同定方法

4.1 偏心量と幾何偏差との関係式の導出 筆者らはすでに図7に示すのと同様の結果をもとに偏差の同定手順を提案し、それぞれの測定方向で順番に2個ずつの偏差を同定すれば、揺りかご形5軸MCに固有の8個の偏差を順番に同定できることを示した⁽²⁾⁽³⁾。

図7に示す結果を見ると、A軸軸方向は β_{AX} と γ_{AX} の2個の偏差が偏心として影響を及ぼすだけであるので、従来と同様に扱えそうである。この2個の偏差がわかっているものとして、C軸軸方向の偏差を同定すれば、4つの角度偏差がすべてわかることになる。ところが、これら4つの角度偏差がわかったとしてもA軸半径方向は5個の偏差が影響し、すでにA軸軸方向の結果から求めた2個を差し引いても3個の偏差を求めなければならない。また、A軸とC軸の軸心間のオフセット量 δ_{CA} については、8個の偏差のうち7個の偏差が影響を及ぼすC軸半径方向のデータからしか推定できない。このように筆者らがすでに提案した方法⁽²⁾⁽³⁾では、簡単に同定できそうにもない。

そこで、式(16)から個々の偏差が存在したときの円弧軌跡の偏差を求める近似式を導出することにした。

(1) A軸半径方向

式(16)を、A軸が β_0 だけ傾き、幾何偏差として β_{AX} のみが存在した場合について計算するとA軸半径方向の円弧軌跡の偏差は、式(17)のようになる。

$$\Delta L = \left\{ (L_B - Z_{TC} \sin \beta_0 \sin \beta_{AX} \cos \phi)^2 + 2 \left[Z_{TC}^2 \sin^2 \beta_0 + \cos^2 \beta_0 (Z_{TC}^2 + L_B Z_{TC} \cos \phi) \right] (1 - \cos \beta_{AX}) - Z_{TC}^2 \sin^2 \beta_0 \sin^2 \beta_{AX} \cos^2 \phi \right\}^{1/2} - L_B \quad (17)$$

ここで、 $|\beta_{AX}| \ll 1$ であるので、式(17)において $1 - \cos \beta_{AX} = 0$ 及び $\sin^2 \beta_{AX} = 0$ と近似でき、式(17)はA軸の回転角度 ϕ を変数として式(18)のように表すことができる。

$$\Delta L = -Z_{TC} \sin \beta_0 \sin \beta_{AX} \cos \phi \quad (18)$$

式(18)をよく見ると、周期が $\phi = 360^\circ$ で、振幅が $|Z_{TC} \sin \beta_0 \sin \beta_{AX}|$ の正弦波となっていることがわかる。この式で求めた ΔL を基準円上に展開すると、この振幅分だけZ方向に偏心した円となる。すなわち、測定された円弧の偏心量は、この振幅と等しくなり、その向きは $\sin \beta_{AX}$ の符号に依存する。

同様に、偏差 γ_{AX} , δ_{xAX} , δ_{yAX} , δ_{zAX} がそれぞれ存在した場合の ΔL を求めると、以下ようになる。

$$\Delta L = -Z_{TC} \sin \beta_0 \sin \gamma_{AX} \sin \phi \quad (19)$$

$$\Delta L = -\delta_{xAX} \sin \beta_0 \cos \phi \quad (20)$$

$$\Delta L = \delta_{yAX} \sin \phi \quad (21)$$

$$\Delta L = -\delta_{zAX} \cos \beta_0 \cos \phi \quad (22)$$

式(18)~(22)を見ると、式(18), (20), (22)は、A軸の回転角 ϕ の余弦成分を、式(19)と(21)とは、正弦成分を表していることがわかる。8個の固有の偏差は互いに独立していることから、これら8個の偏差がすべて存在した場合に得られる円弧軌跡の偏心量は、y方向では式(19)と式(21)との和で表され、z方向では式(18), 式(20), 式(22)の和で表される。すなわち、y方向の偏心量 e_y とz方向の偏心量 e_z は、式(23)及び(24)のような関係が成り立つ。

$$e_y = Z_{TC} \sin \beta_0 \sin \gamma_{AX} - \delta_{yAX} \quad (23)$$

$$e_z = -Z_{TC} \sin \beta_0 \sin \beta_{AX} - \delta_{xAX} \sin \beta_0 - \delta_{zAX} \cos \beta_0 \quad (24)$$

これでA軸半径方向における円弧軌跡の偏心量と幾何偏差とを関係付けることができた。

上述のような方法を、残りのA軸軸方向、C軸半径方向及びC軸軸方向における円弧軌跡の計算に適用し、個々の幾何偏差に対する偏心量 ΔL を求めた。その結果を表1に示す。表には、A軸半径方向の式(18)~(22)に示した偏心量 ΔL も示してある。

表1に基づいて式(23), (24)と同様に余弦成分と正弦成分ごとに和をとると以下ようになる。

Table 1 Approximate expression which gives circular deviations corresponding to each geometric deviation

	A-axis		C-axis	
	radial	axial	radial	axial
α_{AX}			$Z_{TC} \cos \beta_0 \sin \alpha_{AX} \sin \theta$	$-R_B \cos \beta_0 \sin \alpha_{AX} \sin \theta$
β_{AX}	$-Z_{TC} \sin \beta_0 \sin \beta_{AX} \cos \phi$	$Z_{TC} \cos \beta_0 \sin \beta_{AX} \cos \phi$	$-Z_{TC} \sin \beta_{AX} \cos \theta$	$R_B \sin \beta_{AX} \cos \theta$
γ_{AX}	$-Z_{TC} \sin \beta_0 \sin \gamma_{AX} \sin \phi$	$Z_{TC} \cos \beta_0 \sin \gamma_{AX} \sin \phi$	$Z_{TC} \sin \beta_0 \sin \gamma_{AX} \sin \theta$	$-R_B \sin \beta_0 \sin \gamma_{AX} \sin \theta$
β_{CA}			$-Z_{TC} \sin \beta_{CA} \cos \theta$	$R_B \sin \beta_{CA} \cos \theta$
δ_{xAX}	$-\delta_{xAX} \sin \beta_0 \cos \phi$		$-\delta_{xAX} \cos \theta$	
δ_{yAX}	$\delta_{yAX} \sin \phi$		$-\delta_{yAX} \sin \theta$	
δ_{zAX}	$-\delta_{zAX} \cos \beta_0 \cos \phi$			
δ_{yCA}			$-\delta_{yCA} \sin \theta$	

(2) A 軸軸方向

$$e_y = -Z_{TC} \cos \beta_0 \sin \gamma_{AX} \quad (25)$$

$$e_z = Z_{TC} \cos \beta_0 \sin \beta_{AX} \quad (26)$$

(3) C 軸半径方向

$$e_x = -Z_{TC} \sin \beta_{AX} - Z_{TC} \sin \beta_{CA} - \delta_{xAX} \quad (27)$$

$$e_y = Z_{TC} \cos \beta_0 \sin \alpha_{AX} + Z_{TC} \sin \beta_0 \sin \gamma_{AX} - \delta_{yAX} - \delta_{yCA} \quad (28)$$

(4) C 軸軸方向

$$e_x = R_B \sin \beta_{AX} + R_B \sin \beta_{CA} \quad (29)$$

$$e_y = -R_B \cos \beta_0 \sin \alpha_{AX} - R_B \sin \beta_0 \sin \gamma_{AX} \quad (30)$$

以上で、表 1 に示した個々の幾何偏差に対応する偏心量を、測定方向ごとに得られた円弧軌跡の偏心量と関係付けることができた。

そこで、次にこれらの関係式が、筆者らが過去に取り上げてきた揺りかご形⁽²⁾⁽³⁾のように A 軸と C 軸とが直交する機械にも適用できるかどうかを検討することにした。

4.2 A 軸と C 軸とが直交する機械への適用

本研究で取り上げた傾斜した A 軸をもつ機械について求めた式(23)~(30)に、 $\beta_0=0^\circ$ を代入することによって A 軸と C 軸とが直交している機械にも適用できることを確認する。

式(23)、(24)に $\beta_0=0^\circ$ を代入すると、A 軸半径方向の測定における偏心量は、

$$(e_y, e_z) = (-\delta_{yAX}, -\delta_{zAX}) \quad (31)$$

となって、文献(2)、(3)に示した式と一致する。

式(25)、(26)は、

$$(e_y, e_z) = (-Z_{TC} \sin \gamma_{AX}, -Z_{TC} \sin \beta_{AX}) \quad (32)$$

となって同様に一致する。

さらに、式(27)と(28)及び式(29)と(30)から、それぞれの偏心量は、

$$(e_x, e_y) = (-Z_{TC} \sin \beta_{AX} - Z_{TC} \sin \beta_{CA} - \delta_{xAX}, Z_{TC} \sin \alpha_{AX} - \delta_{yAX} - \delta_{yCA}) \quad (33)$$

$$(e_x, e_y) = (R_B \sin \beta_{AX} + R_B \sin \beta_{CA}, -R_B \sin \alpha_{AX}) \quad (34)$$

となり、一致する。

以上示したように傾斜した A 軸をもつ機械において求めた結果は、A 軸と C 軸とが直交する機械にも適用できることから、本研究で提案した関係式は、A 軸が任意の角度をもっているテーブル旋回形に適用できる一般関係式であるといえる。

4.3 偏差の同定手順 従来の研究⁽²⁾⁽³⁾⁽⁶⁾と同様に、同定手順について考える。

- (1) 手順 1 : A 軸軸方向の運動で測定した円弧軌跡の偏心量 (e_y, e_z) を、式(25)と式(26)にそれぞれ代入して、偏差 γ_{AX} と β_{AX} を求める。
- (2) 手順 2 : 次に、偏差 γ_{AX} と β_{AX} とがわかっているのて、C 軸軸方向の運動から、式(29)、(30)を使って偏差 β_{CA} と α_{AX} とをそれぞれ求める。
- (3) 手順 3 : A 軸半径方向の運動の測定結果の偏心量 e_y と手順 1 で求めた γ_{AX} から δ_{yAX} を求める。
以上 3 つの手順で、5 個の偏差が求められたことになる。残りの 3 個については次のような手順で行う。
- (4) 手順 4 : A 軸半径方向の運動の結果を用いる式(24)と、C 軸の半径方向の運動の結果を用いる式(27)、(28)の 3 つの式を使って連立方程式をとくことで、 δ_{xAX} 、 δ_{yCA} 、 δ_{zAX} を求める。

5. 提案方法の妥当性と適用限界

5.1 提案方法の妥当性 A 軸が傾斜したテーブル旋回形 5 軸 MC の実機がないので、機構解析ソフト (DADS) を用いて数値実験を行い、提案した方法の

Fig.8 DADS model for numeric experiment

Fig. 9 Influences of inclination angle of A-axis on identified results

妥当性を確認することにした。DADS の計算精度は 8 桁程度あり、その計算誤差はモデルから求める偏心量よりも小さい。したがって、解析精度がシミュレーション結果に及ぼす計算誤差の影響は無視できる程度に小さくなる。

図 8 に機構解析ソフト (DADS) で作成したモデルを示す。このモデルには、図示したようにボールバーを取り付けて、2 球間の距離の変化を抽出できるようにしてある。このモデルに表 2 の示す 8 個の偏差を一度に与えて、前章で提案した方法と手順に従って偏差を同定することにした。

表 2 の左側の欄には与えた 8 個の偏差の値を示す。これらの値には、筆者らがテーブル旋回形 5 軸 MC で実際に求めた値⁽²⁾⁽³⁾に類似した値を採用した。前章の手順どおりに円弧軌跡を求め、偏心量を求めた。その結果を表 3 に示す。この表に示す式(31)~(34)に該当する欄の偏心量を、それぞれ代入して、偏差を同定した。

Table 2 Geometric deviations given for numeric experiment and identified values

Given values	Geometric deviations	Identified values
-0.0022	α_{AX} (°)	-0.00218
-0.0022	β_{AX} (°)	-0.00220
-0.0149	γ_{AX} (°)	-0.01493
0.0043	β_{CA} (°)	0.00429
-0.009	δ_{xAX} (mm)	-0.00899
-0.011	δ_{yAX} (mm)	-0.01114
0.025	δ_{zAX} (mm)	0.02498
0.005	δ_{yCA} (mm)	0.00512

Table 3 Eccentricities of circular trajectories measured by numeric experiment (unit: mm)

Measurement direction	A-axis		C-axis	
	Radial Eq.(31)	Axial Eq.(32)	Radial Eq.(33)	Axial Eq.(34)
e_x	—	—	0.0017	0.0037
e_y	-0.0257	0.0368	-0.0362	0.0211
e_z	-0.0059	-0.0054	—	—

その結果を表 2 の右側の欄に示す。表 2 を見ると、与えた値と同定した値との差は、角度偏差で 0.0001°以下であり、位置偏差で 0.14 μm 以下といずれも小さな値になっていて、正しく同定できているといえる。

以上から、本研究で提案した同定に用いる近似式及び同定の手順は妥当であるといえる。次にこの方法の適用限界について調べた。

5.2 提案手法の適用限界 モデルに、角度偏差として 0.005°, 位置偏差として 10 μm を与え、 β_0 を変化した場合に、与えた幾何偏差と同定された値との差がどのように変化するかを調べた。その結果を図 9 に示す。図示したように α_{AX} と δ_{xAX} は、 $\beta_0 < -75^\circ$, $\beta_0 > 75^\circ$ のときに急激に大きくなっているのがわかる。これは上述の同定手順において α_{AX} と δ_{xAX} が以下の式から同定されることによる。

$$\alpha_{AX} = \sin^{-1} \left(-\tan \beta_0 \sin \gamma_{AX} - \frac{e_y}{R_b} \frac{1}{\cos \beta_0} \right) \quad (35)$$

$$\delta_{xAX} = -Z_{TC} \tan \beta_0 \sin \beta_{AX} - \delta_{xAX} \tan \beta_0 - e_z \frac{1}{\cos \beta_0} \quad (36)$$

式(35), (36)には $\tan \beta_0$ と $1/\cos \beta_0$ が含まれている。

これらは $\beta_0 = 0^\circ$ のとき0と1である。 β_0 を大きくしていくと、 $\beta_0 = 45^\circ$ のとき1と1.4になり、 $\beta_0 = 60^\circ$ で1.7と2、 $\beta_0 = 75^\circ$ で3.7と3.9になって、これ以後急激に増大していく。 $\tan \beta_0$ や $1/\cos \beta_0$ が増大すると、これらの係数にあたる $\sin \gamma_{AX}$ や e_9 など、これまでに同定した値及び測定値に含まれる誤差が拡大されてしまうことになる。また、 $\beta_0 = 90^\circ$ のとき解をもたない。

この2個の偏差以外の偏差においては、与えた値と同定された値との差は、変位で最大0.2 μm 、角度で最大0.0001°程度である。したがって、本研究で提案した方法は、 $-75^\circ \leq \beta_0 \leq 75^\circ$ の範囲の機械に適用できるといえる。

6. 結 言

本研究では、A軸が傾斜したテーブル旋回形5軸MCの幾何偏差を、従来の揺りかご形5軸MCと同様の手法によって同定する方法について検討し、数学モデルを用いて、同時3軸制御運動と同時4軸制御運動のときに描かれる円弧軌跡の偏心量と幾何偏差との関係式を求めた。そして、その関係式が、A軸が水平の機械にも適用できることを確認し、A軸が任意の角度傾いていても成り立つことを示した。さらに、数値実験を行い、提案した方法、関係式、同定手順の有効性について検討し、本方法の適用限界についても検討した。その結果、次のような結論が得られた。

- (1) 傾斜したA軸をもつ機械では、幾何偏差の同定に必要な運動のうち、C軸周りの運動は同時3軸制御運動になるが、A軸まわりの運動は同時4軸制御運動になる。
- (2) 傾斜したA軸をもつ機械に対して求めた偏心量と幾何偏差との関係式は、A軸が水平になった揺りかご形にも適用できる。
- (3) 提案した関係式は、適用できる傾斜角度に限界がある。

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。

文 献

- (1) ISO 10791-1, Test conditions for machining centers - Part 1, Geometric test for machines with horizontal spindle and with accessory head (horizontal Z-axis), (1998).
- (2) 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).
- (3) Saito, A., Tsutsumi, M. and Ushiku, K., Calibration method of five-axis control machining center (2nd Report)—Estimation of angular and positional deviations by means of simultaneous three axis motion, *Journal of Japan Society of Precision Engineering*, Vol.69, No.2, pp.268-273 (2003).
- (4) 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).
- (5) 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. 735, pp.3291-3297 (2007).
- (6) Tsutsumi, M., Yamamoto, K., Saito, A., Dassanayake, K. M. 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)
- (7) Dassanayake, K. M. M., Tsutsumi, M. and Saito, A., A strategy for identifying static deviations in universal spindle head type multi-axis machining centers, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.46, pp.1097-1106 (2006).
- (8) Cui, C.R., Higashiyama, K., Tsutsumi, M. and Dassanayake, K. M. M., A method for identifying geometric deviations existing in multi-tasking turning centers, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 749, pp. 476-483 (2009)
- (9) Inasaki, I., Kishinami, K., Sakamoto, S., Sugimura, N., Takeuchi, Y. and Tanaka, F., *Shape generation theory of machine tools - its basics and applications*, Yokendo, Tokyo, (1997), 95-103 (in Japanese)