ボールエンドミル加工による加工面の市松模様に基づく 5 軸制御マシニングセンタの幾何偏差の評価*

齋藤 明徳^{*1}, 近藤 和喜^{*2}

Evaluation of Geometric Deviations Inherent to 5 Axis Machining Center Based on Checkered Pattern of Machined Surface Using Ball End Milling

Akinori SAITO^{*1} and Kazuyoshi KONDO

^{*1} Nihon Univ. College of Engineering Dept. of Mechanical Engineering
1 Nakagawara, Tokusada, Tamura-machi, Koriyama-City, Fukushima, 963-8642 Japan

Generally, ball bar instruments are used for the calibration of 5 axis machining centers. Also, some evaluation techniques using the R-test and tracking interferometer have been proposed. As those measurement instruments are expensive, the test method of machining accuracy that doesn't need special instruments is useful for the users of machine tools. In this study, a test method of machining accuracy is proposed for 5 axis machining centers. The test method uses the checkered pattern milling proposed for conventional three axis machining centers. In the checkered pattern milling for 5 axis machining centers, the hollow grooves are machined with a ball end mill in one direction. After that, the finished surface of the workpiece is painted, and the hollow grooves in orthogonal direction are machined by the simultaneous three-axis control motions of one rotary axis and two linear axes. The influence of the eight geometric deviations inherent to the tilting rotary table type 5 axis machining center on the checkered pattern is investigated by a simulation. As a result, when the four deviations exist separately in the 5 axis machining center, the checkered pattern changes individually at the checked intersections. Also, a new test method that is based on the checkered pattern milling for 5 axis machining centers is proposed. The new test method can evaluate all eight deviations to distinguish difference in the checkered pattern.

Key Words : Machine Tool, Measurement, Accuracy, Generating Motion

1. 緒 言

ここ数年、5 軸制御マシニングセンタ（以下 MC）が普及し、ワンチャッキングで全ての加工を終えることができる利便性に加えて、精度についても、従来の 3 軸制御 MC と同等もしくはそれ以上であることが求められている。こうした状況を受けて、これまでに 5 軸制御 MC の精度を評価する様々な方法や装置が提案されている。

例えば、坂本ら⁽¹⁾は、テーブル旋回形、主軸頭旋回形、主軸頭・テーブル旋回形の 3 つの形態について、5 軸制御 MC に存在する幾何偏差の同定方法を提案している。著者ら^{(2)~(4)}は、測定の利便性と精度そして様々な構造形態への対応を考え、5 軸制御 MC に存在する幾何偏差などの誤差因子の評価方法を提案してきた。井原ら⁽⁵⁾は、円錐台を加工する運動を用いた 5 軸制御 MC の検査方法を提案している。茨木ら⁽⁶⁾は、旋回軸の運動精度を診断する方法を提案している。これらの測定方法は、いずれも円運動の測定装置として ISO230-1 に規定されているボールバー⁽⁷⁾を用いた方法である。それに対して、Bringmann ら⁽⁸⁾は、球と 3 つの変位計を用いた R-test 装置によって、5 軸制御 MC 幾何偏差の同定を試みている。また、Schwenke ら⁽⁹⁾は、トラッキングレーザを用いた方法を提

* 原稿受付 2011 年 7 月 12 日

^{*1} 正員, 日本大学 工学部 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

^{*2} 日本大学 工学部 (現 群馬精工 (株), 〒371-0811 群馬県前橋市朝倉町 3-31-8)

E-mail: asaito@mech.ce.nihon-u.ac.jp

Fig.1 Cutting procedure of checkered pattern

Fig.2 Width L_w of checked intersection

案している。これらは、特殊な測定装置を使うことが前提であり、有効な方法であっても高価な装置が必要不可欠となる。

一方、工作精度試験としては、NAS979⁽¹⁰⁾が、1969年に規定され、現在も航空機分野で用いられることが多い。NAS979では円錐台を加工するが、幾何偏差だけでなく、制御系の誤差も評価できる方法として、堤ら⁽¹¹⁾は、四角すい台を加工する方法を提案している。また、山本ら⁽¹²⁾は、熱変形を評価するための微細溝を加工する方法を工作精度試験に応用している。こうした工作精度試験は、工作機械の精度だけでなく、加工に関する影響が含まれることもあり、工作機械の運動を直接測定する補間運動精度試験に重きを置くことが多い。しかし、工作機械のユーザの立場から考えると、工作精度試験は、加工部品の精度を検査する測定装置を用いて評価が行えるため、定期点検などには有用な方法である。そのため、これまで以上に誤差因子の評価が簡単な工作精度試験があれば、ユーザとしてのメリットは大きい。

そこで、3軸制御MCの工作精度試験として用いられているボールエンドミルで市松模様を加工する方法を5軸制御MCへ応用し、5軸制御MCに存在する位置偏差および角度偏差がその市松模様に及ぼす影響をシミュレーションによって明らかにした。それを基に、市松模様の変化から位置偏差および角度偏差が簡便に評価できる工作精度試験方法を検討した。

2. 交差目加工法

本研究で提案する工作精度試験には、生産現場で用いられる交差目加工法⁽¹³⁾を応用する。交差目加工は、図1に示すように、直交する2方向からボールエンドミルを用いて、工作物に円弧形の溝を一定のピックフィード量で加工するものがある。加工の手順としては、1方向からの加工後、表面に着色を行い、残りの1方向を加工する。その結果、表面には45°傾いた市松模様が現れる。工作機械に存在する誤差因子によっては、模様にくるいが生じるため、図2のような模様の交差部の交差目幅 L_w によって、工作機械の性能を評価することができる。

そこで、5軸制御MCの交差目加工は、次の手順で行うこととする。ワーク座標系の X_w 方向へはX軸運動のみで加工する。その後、表面を着色し、これに直交する Y_w 方向へは、図3に示すように、A、Y、Z軸の同時3軸制御で加工を行う。このA、Y、Z軸による加工では、加工開始時の工具傾斜角度 β_0 を30°とし、加工終了時の-30°まで、工具傾斜角度を単位時間あたり一定に変化させる。このとき、ワーク座標系におけるボールエンドミ

Fig. 3 Ball end milling in Y_w direction

Fig. 4 5-axis controlled machining center and geometric deviations

ル刃先の中心の Z_w 座標が一定の L_H に保たれるようにする。

この交差目加工の切削条件を表 1 に示す。 L_H は 25mm とする。加工に用いるボールエンドミルは、刃先 R が大きいほど、市松模様にくるいが生じた場合、交差目幅が大きくなることが明らかにされている⁽¹³⁾。そのため、一般的に入手できるソリッドボールエンドミルの刃先 R の最大である $R6$ とする。また、ピックフィード量は、 X_w および Y_w 方向共に 10mm とし、工作物は 1 辺 60mm の正方形とする。工作物は、その中心をテーブルの中心に合わせて設置する。

Table 1 Cutting conditions

L_H	Radius of ball end mill	Workpiece	Pick feed
25mm	6mm	60×60mm	10mm

これらの条件において、実機で工作精度試験を試みた場合、工具の形状精度、旋回軸の運動精度などが工作精度に影響を及ぼす。そこで、まず幾何偏差による影響だけを評価するために、本研究は、全てシミュレーションによって行った。

3. 解析方法

3・1 5 軸制御 MC に存在する幾何偏差

解析対象としたテーブル旋回形 5 軸制御 MC を図 4(a) に示す。この構造形態の場合、図 4(b) に示すように全部で 13 個の幾何偏差が存在する。この中で 3 軸制御 MC にも存在する幾何偏差 5 個を除けば、5 軸制御 MC に固有の偏差は $\alpha_{AY}, \beta_{AY}, \gamma_{AY}, \beta_{CA}, \delta_{xAY}, \delta_{yAY}, \delta_{zAY}, \delta_{yCA}$ の 8 個となる⁽³⁾。幾何偏差の表記方法については、ISO841⁽¹⁴⁾に基づいて、例えば、A 軸と C 軸との XZ 面内における直角度 β_{CA} であれば、Z 軸に対する C 軸の Y 軸まわりの角度偏差 E_{BOC} と X 軸に対する A 軸の Y 軸まわりの角度偏差 E_{BOA} を用いて、 $E_{BOC} - E_{BOA}$ と表すような機械座標系を基準にした表記方法もある。しかし、5 軸制御 MC の数学モデルを考える場合、3 つの直進軸と 2 つの旋回軸との間に幾何偏差を考えたほうが簡潔にモデルを表記できるため、図 4 のような幾何偏差の定義を用いる。8 個の

 Fig. 5 Position of ball end mill in ball end milling of Y_w direction

偏差の中で, α_{AY} は, NC 装置における A 軸の初期角度の設定で, δ_{xAY} , δ_{yAY} , δ_{zAY} は, ユーザ座標系の原点の設定で調整することができる. また, δ_{yCA} は, CAM システムに偏差量を定義すれば, その影響を考慮した NC プログラムが得られるため, 補正できる.

3・2 数学モデルによる解析

シミュレーションでは, 加工中のボールエンドミル刃先の中心の軌跡を算出する. この刃先の中心の送り速度に対して, 主軸回転速度は十分に大きいものと仮定する. そのため, ボールエンドミル先端の形状は, 切れ刃 1 枚ずつを考慮せずに球として扱い, 工作物上でその球が通過した部分を工作物から除くことによって, 加工後の工作物の表面形状を求める. 具体的には, ワーク座標系において, 工作物を縦横等間隔の格子状に区切り, ボールエンドミルの刃先の球面が通過したときの格子上的位置と高さを記録して, 工作物全体の 3 次元形状を算出している.

シミュレーションにおけるボールエンドミル刃先の中心の軌跡の算出には, これまで, 著者らの研究^{(3)~(4)}において, 実機での実験とシミュレーションによって, その有効性が確認されている数学モデルを用いた. この数学モデルでは, ワーク座標系での工具上の基準点であるボールエンドミルの刃先 R の中心の座標 T_W を, 機械座標系での工具上の基準点 T_M を用いて, 図 4 に示した機械座標系とワーク座標系との間にある 8 個の幾何偏差を考慮し, 式(1)で表すことができる.

$$\begin{bmatrix} x_{T_W} \\ y_{T_W} \\ z_{T_W} \end{bmatrix} = E_{AC} D_{-\beta_{CA}} \left[E_{XYZA} D_{-\gamma_{AY}} D_{-\beta_{AY}} \begin{bmatrix} x_{T_M} \\ y_{T_M} \\ z_{T_M} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{xAY} \\ \delta_{yAY} \\ \delta_{zAY} \end{bmatrix} \right] - \begin{bmatrix} 0 \\ \delta_{yCA} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで, 行列 E_{XYZA} は機械座標系から A 軸座標系への回転座標変換行列, 行列 E_{AC} は A 軸座標系から C 軸座標系すなわちワーク座標系への回転座標変換行列, 行列 D_u は角度偏差 u を表し, それぞれ式(2)~(6)で表せる. 各偏差の符号が負であるのは, 機械座標系を基準に偏差を定義しているためである.

$$E_{XYZA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\varphi - \alpha_{AY}) & -\sin(-\varphi - \alpha_{AY}) \\ 0 & \sin(-\varphi - \alpha_{AY}) & \cos(-\varphi - \alpha_{AY}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$E_{AC} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) & 0 \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D_{-\gamma_{AY}} = \begin{bmatrix} \cos(-\gamma_{AY}) & -\sin(-\gamma_{AY}) & 0 \\ \sin(-\gamma_{AY}) & \cos(-\gamma_{AY}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$D_{-\beta_{CA}} = \begin{bmatrix} \cos(-\beta_{CA}) & 0 & \sin(-\beta_{CA}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-\beta_{CA}) & 0 & \cos(-\beta_{CA}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$D_{-\beta_{AY}} = \begin{bmatrix} \cos(-\beta_{AY}) & 0 & \sin(-\beta_{AY}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-\beta_{AY}) & 0 & \cos(-\beta_{AY}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

交差目加工の A, Y, Z 軸によるボールエンドミル加工では、工具上の基準点と工作物との関係は、図 5 のように表される。図中の L_T は、 $\angle TSO_T$ を考えると、工具傾斜角度 β 、加工開始点での工具傾斜角度 β_0 、および工作物の幅 L_L によって、次の式(7)で表すことができる。これに Y_W 方向へのピックフィード量 P_f を考慮すると、機械座標系における i 番目の溝の切削での工具上の基準点 T_M は、式(8)で表すことができる。

$$L_T = L_L \cdot \tan \beta / (2 \cdot \tan \beta_0) \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} x_{T_M} \\ y_{T_M} \\ z_{T_M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_f \cdot i \\ L_T \cdot \cos \beta - L_H \cdot \sin \beta \\ L_T \cdot \sin \beta + L_H \cdot \cos \beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(7)(8)を式(1)に代入し、C 軸は固定するため、C 軸旋回角度 $\theta = 0$ とし、加工中の A 軸の旋回角度 ϕ は、工具傾斜角度 β と一致するため、 $\phi = \beta$ とすると、 β に応じたワーク座標系上での工具上の基準点の軌跡を求めることができる。

一方、X 軸による j 番目のボールエンドミル加工では、機械座標系での工具上の基準点 T_M は、その X 座標を任意に k とすると、Z 座標は、 L_H と一定であるため、 X_W 方向へのピックフィードを考慮して、次の式(9)で表される。

$$\begin{bmatrix} x_{T_M} \\ y_{T_M} \\ z_{T_M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \\ P_f \cdot j \\ L_H \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)を式(1)に代入し、A, C 軸は固定するため、C 軸旋回角度 θ と A 軸旋回角度 ϕ を 0 とすることによって、 k に応じた工具上の基準点の軌跡が求められる。

このように、5 軸制御 MC に幾何偏差が存在した場合のワーク座標系における工具上の基準点の軌跡を算出して、半径 R の球状の切れ刃を考慮して、加工後の工作物の表面形状を求める。A, Y, Z 軸による加工と X 軸による加工のシミュレーションは、工作物幅 L_L より大きな範囲で行い、工作物の大きさに該当する部分を表面形状の解析結果とする。 $L_L = 60\text{mm}$ の場合、A, Y, Z 軸による加工は、工具傾斜角度 β を 30.5° から -30.5° まで変化させて、工作物の表面に換算すると両端に 0.6mm ほど加わった 61.2mm の範囲でシミュレーションを行った。X 軸による加工のシミュレーションも同じ範囲で行った。

こうして得られた表面形状は、式(1)～(9)を用いて算出した工具上の基準点の軌跡を 3DCAD 上に展開し、球状の切れ刃の通過部分を工作物から除去した 3D モデルと比較し、表面に同様の市松模様が得られることを確認している。

4. 幾何偏差が市松模様にも及ぼす影響

4・1 幾何偏差と市松模様との関係

角度偏差に 0.2° 、位置偏差に 0.2mm の幾何偏差をそれぞれ別々に与えて幾何偏差が市松模様にも及ぼす影響を調べた。これらの偏差量は、一般的に工作機械でとりうる値に比べて、10 倍以上大きい。紙面で市松模様の変化をわかり易くするために、このような値を与えた。その中で、市松模様にくるいを生じたものを図 6 に示す。ここで、市松模様は、ワーク座標系の $+Z_W$ 方向から見た視点で表示している。

δ_{yAY} , δ_{zAY} , β_{AY} , γ_{AY} の 4 個の偏差において市松模様にくるいが生じ、その他の偏差では模様に変化は現れなかった。これは、 Y_W 方向のボールエンドミル加工が、A 軸を回転させながら行うため、A 軸に関係した 4 個の偏差だけが模様に影響を及ぼしたと考えられる。 δ_{yAY} , δ_{zAY} , β_{AY} , γ_{AY} の市松模様は、それぞれ異なった模様となっている。 β_{AY} の市松模様は、 X_W 軸に沿って変化している。 γ_{AY} では、市松模様が、工作物の中心を基準として点対称になっている。 δ_{yAY} と δ_{zAY} の市松模様は、 Y_W 軸に沿って変化しているが、 δ_{zAY} では、工作物の中心を通る X_W 軸に対して対称になっている。

このように、 δ_{yAY} , δ_{zAY} , β_{AY} , γ_{AY} の偏差が存在した場合、異なった市松模様が現れるため、それぞれの偏差を区別することができる。ここで、交差目幅 L_W に注目すると、位置偏差では、交差目幅が生じる部分と X_W 軸との距離が大きくなるほど交差目幅が大きくなっている。また、角度偏差では、交差目幅が生じる部分と工作物の中心との距離が大きくなるほど、交差目幅が大きくなっている。したがって、位置偏差と角度偏差のどちらも図 6 に拡大して示した工作物の 4 隅において、最大の交差目幅を評価することができる。さらに、工作物の 4 隅の交差目幅は、現れる方向に X_W 方向と Y_W 方向があり、その方向の組合せが 4 カ所で異なっている。そのため、模様全体の特徴と合せて、この 4 隅を評価すれば、存在する偏差とその偏差量を明確に評価することができる。偏差量の正負は、例えば、偏差 γ_{AY} の市松模様では、偏差量が正の場合、図 6(b) に示すように、右上から時計回りに Y_W , X_W , Y_W , X_W 方向となっているが、負の場合、 X_W , Y_W , X_W , Y_W となることを確認している。他の偏差でも、同様に偏差量の正負が識別できる。

図 6 のシミュレーションでは偏差量を大きく与えたが、5 軸制御 MC の評価に必要な偏差量で、交差目幅がどのように変化するかを調べた。交差目幅は、工作物の中心が原点となるワーク座標系において、図 6 に示した A の位置 ($X_W=20\text{mm}$, $Y_W=20\text{mm}$) で評価した。その結果を図 7 に示す。いずれの偏差も、偏差量に応じて、交差目幅が大きくなっている。一方、交差目幅への感度を偏差ごとに見ると、角度偏差では、 β_{AY} が γ_{AY} の 1/2 程度、位置偏差では、 δ_{zAY} も δ_{yAY} の 1/2 程度しかないことがわかる。しかし、 β_{AY} でも、偏差量 0.01° のときに 0.106mm 、 δ_{zAY} では、偏差量 0.01mm のときに 0.180mm の交差目幅があり、実体顕微鏡などを用いれば、十分に偏差を評価できると考えられる。

このように、A, Y, Z 軸の同時 3 軸制御による交差目加工法で得られる市松模様の特徴とその幅を評価するこ

Fig.6 Checkered pattern of simultaneous 3-axis motion of A, Y, Z axis

Fig. 7 Relationship between deviation and checked intersection width

Fig. 8 Relationship between tilting angle and checked intersection width

Fig. 9 Relationship between workpiece size and checked intersection width

とによって、5軸制御 MC のA軸に関する δ_{yAY} 、 δ_{zAY} 、 β_{AY} 、 γ_{AY} の4個の偏差を評価できる。したがって、A、Y、Z軸の同時3軸制御による交差目加工法は、A軸だけに限定した評価に使用できると考えられる。

4・2 切削条件と交差目幅との関係

5軸制御 MC に存在する偏差の評価は、交差目加工によって得られた市松模様の交差目幅が大きいほど容易に行える。そこで、切削条件として加工開始時の工具傾斜角度 β_0 、工作物の設置位置および工作物の大きさが交差目幅に及ぼす影響を調べた。

加工開始時の工具傾斜角度と交差目幅との関係を図8に示す。ここでは、 δ_{yAY} 、 δ_{zAY} に0.01mm、 β_{AY} 、 γ_{AY} に0.01°を与え、交差目幅を工作物上の $X_w=20\text{mm}$ 、 $Y_w=20\text{mm}$ の位置で評価した。すべての偏差の交差目幅が、加工開始時の工具傾斜角度の大きさに応じて、大きくなっている。したがって、工具やツールホルダと工作物やテーブル

Fig.10 Proposed cutting procedure of checkered pattern

Fig.11 Influence of geometric deviations on checkered pattern

との干渉が生じない範囲において、加工開始時の工具傾斜角度を大きくとれば、交差目幅を拡大して評価できる。

さらに、工作物の設置位置として、A 軸の回転中心から工具上の基準点までの距離 L_H が交差目幅に及ぼす影響を調べたが、 L_H を 300mm まで大きくしても交差目幅にはほとんど影響を及ぼさないことがわかった。角度偏差の影響は、旋回軸の中心から距離が離れるほど、大きく現れるが、 β_{AY} 、 γ_{AY} が存在した場合、A 軸の回転中心から工具上の基準点までの距離が大きくなっても、交差目幅に影響を及ぼす加工面に垂直な方向の工具位置のくろいが小さいためだと考えられる。

工作物の大きさと交差目幅との関係を図 9 に示す。ここでは、 δ_{yAY} 、 δ_{zAY} を 0.01mm、 β_{AY} 、 γ_{AY} を 0.01° と一定とした。交差目幅を測定する位置 $A\phi$ (C_X 、 C_Y) を $C_X=C_Y$ として変更し、その位置での工具傾斜角度 β が、図 6 の A での工具傾斜角度 $\beta=22.1^\circ$ と一致するようにして解析を行った。ピックフィード量は工作物のすべての大きさで、 X_W および Y_W 方向共に 10mm とした。位置偏差では、工作物を大きくしても、その影響は交差目幅に現れないが、角度偏差については、工作物を大きくするほど、交差目幅が大きくなることがわかる。

したがって、A、Y、Z 軸の同時 3 軸制御による交差目加工法では、幾何偏差が存在した場合に、切削条件として、工作物の大きさおよび加工開始時の工具傾斜角度を大きくとれば、交差目幅をより拡大できる。

Fig. 12 Relationship between deviation and checked intersection width

5. 新しい工作精度試験方法の提案

5・1 旋回 2 軸を用いた交差目加工法

A, Y, Z 軸の同時 3 軸制御による交差目加工では, 5 軸制御 MC に固有の 4 個の偏差しか評価できない. そこで, 残りの偏差を評価するため, 加工工程に C 軸の回転を加えることで, すべての偏差が評価できると考えた. これまで述べたように 4 個の偏差 δ_{AY} , δ_{AY} , β_{AY} , γ_{AY} は, 同時 3 軸制御による交差目加工によって, 工作物の 4 隅の模様の変化から識別できるため, 市松模様の中央の十字部分だけを C 軸を回転させた後に加工することとした.

旋回 2 軸を用いた交差目加工法は, 以下の手順で行う. 手順の概略を図 10 に示す.

- (1) ワーク座標系の X_w 方向を中央の 1 行を除いて, X 軸だけを用いて切削する.
- (2) C 軸を用いて, 工作物を 180° 回転させる.
- (3) X_w 方向の残りの中央の 1 行を, X 軸だけを用いて切削する.
- (4) 工作物の表面を着色する.
- (5) ワーク座標系の Y_w 方向の中央の 1 行を, A 軸, Y 軸, Z 軸の同時 3 軸制御で切削する.
- (6) C 軸を用いて, 工作物を 180° 回転させる.
- (7) Y_w 方向の残りのすべての行を, A 軸, Y 軸, Z 軸の同時 3 軸制御で切削する.

5・2 市松模様の評価方法

3・2 で述べた数学モデルを用いて, 旋回 2 軸を用いた交差目加工法において幾何偏差が市松模様に及ぼす影響を調べた. 角度偏差には 0.2° , 位置偏差には 0.2mm をそれぞれ別々に与えた. シミュレーション結果を図 11 に示す. 図 11(e)から(h)の δ_{AY} , δ_{AY} , β_{AY} , γ_{AY} については, 図 6 と同様に工作物の 4 隅で評価できる. α_{AY} の市松模様を見ると, Y_w 方向の中央の一行だけ模様に変化していることがわかる. β_{CA} では, X_w 方向の中央の一行の模様に変化している. いずれも交差目幅は変化した列に沿って徐々に大きくなり, 中央で交差目幅が現れる方向が変わっている. また, β_{AY} の中央の十字の部分が β_{CA} と同じ模様となるが, 十字以外の部分の模様の違いからこれらは区別できる. 一方, δ_{xAY} , δ_{yCA} は一見すると, 市松模様に変化は現れていない. しかし, 図中の拡大部において円で囲んだ部分で, 右上から時計回りに, δ_{xAY} では, Y_w , Y_w , X_w , X_w 方向に, δ_{yCA} では, X_w , Y_w , Y_w , X_w 方向に交差目幅が現れており, それぞれを異なった模様となっている. そこで, α_{AY} , β_{CA} については, 工作物上の B ($X_w=0$, $Y_w=20$), C ($X_w=20$, $Y_w=0$) の部分の交差目幅, δ_{xAY} , δ_{yCA} は, D ($X_w=5$, $Y_w=5$) の部分の交差目幅と偏差量との関係を調べた. 図 12 にその結果を示す. α_{AY} , β_{CA} については, 偏差量に応じて, 交差目幅が大きくなっており, α_{AY} , β_{CA} の交差目幅は, γ_{AY} の 2 倍程度に拡大されている. 一方, δ_{xAY} , δ_{yCA} では, 偏差量と交差目幅とが比例しており, 偏差量の 2 倍の交差目幅となっているが, その拡大率は小さい. こうした感度の違いが評価にどのような影響を及ぼすのかは, 今後, 実験によって確認する必要がある.

このように, 交差目幅への感度は, 偏差によって差があるものの, 新たに提案した工作精度試験方法によって,

5 軸制御 MC に存在する 8 個の偏差すべてを評価することができる。

6. 結 言

本論文では、テーブル旋回形の 5 軸制御 MC に存在する位置偏差および角度偏差がボールエンドミル加工で得られる工作物表面の市松模様に及ぼす影響をシミュレーションによって、明らかにした。さらに、位置偏差および角度偏差を評価するための工作精度試験方法を提案し、次のようなことが明らかになった。

- (1) A, Y, Z 軸の同時 3 軸制御によるボールエンドミル加工で得られた工作物表面の市松模様には、テーブル旋回形 5 軸制御 MC に存在する 8 個の位置偏差および角度偏差のうち、A 軸に関係した特定の 4 個の偏差だけが影響を及ぼす。
- (2) 新たに考案した工作精度試験方法によって、テーブル旋回形 5 軸制御 MC に存在する 8 個の位置偏差および角度偏差を工作物表面の市松模様の特徵から評価できる。

文 献

- (1) 坂本重彦, 稲崎一郎, “五軸マシニングセンタの組立て精度評価法”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.63, No.605(1997), pp.262-267.
- (2) Tsutsumi, M. and Saito, A., “Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.43(2003), pp.771-780.
- (3) 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(2004), pp.1333-1342.
- (4) Dassanayake, K. M. M., Yamamoto, K., Tsutsumi, M., Saito, A. and Mikami, S., “Simultaneous five-axis motion for identifying geometric deviations in machining centers with a double pivot head”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.2, Issue1(2008), pp.47-58.
- (5) 井原之敏, 田中和也, “多軸工作機械での円錐台加工試験に対応したボールバー測定法(第 1 報)―主軸旋回形 5 軸 MC でのボールバー測定と実加工との比較―”, 精密工学会誌, Vol.71, No.12(2005), pp.1553-1557.
- (6) 茨木創一, 垣野義昭, 赤井孝行, 高山直士, 山路伊和夫, 小川圭二, “ボールバー測定を用いた 5 軸制御加工機の運動誤差原因の診断 (第 1 報) ―誤差成分の分類と改良型ボールバー装置(DBB5)の開発―”, 精密工学会誌, Vol.76, No.3(2010), pp.333-337.
- (7) ISO230-1, “Test conditions for machine tools Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions”, (1996).
- (8) Bringmann, B. and Knapp, W., “Model-based ‘chase-the-ball’ calibration of a 5-axes machining center”, *Annals of the CIRP*, Vol.55, Issue 1(2006), pp.531-534.
- (9) Schwenke, H., Schmitt, R., Jatzkowski, P. and Warmann, C., “On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs using a tracking interferometer”, *Annals of the CIRP*, Vol.58, Issue 1(2009), pp.477-480.
- (10) NAS979, “Uniform cutting tests - NAS series, metal cutting equipment specifications”, (1969), pp.34-37.
- (11) Tsutsumi, M., Kiotoshi, K., Tsuchihashi, Y. and Cui, C., “Machining test for five-axis machining centers using truncated square pyramid”, *Proceedings of the 14th International Machine Tool Engineer's Conference*, (2010), pp.101.
- (12) 山本通, 長谷部孝男, 堤正臣, “微細溝切削による 5 軸制御マシニングセンタの工作精度試験方法の開発”, 精密工学会誌, Vol.77, No.4(2011), pp.405-410.
- (13) 戸澤幸一, 小林義和, 白井健二, 原靖彦, 菊地照彦, “機械加工による表面テクスチャ生成システムの開発” 精密工学会誌, Vol.71, No.10(2005), pp.1271-1275.
- (14) ISO841, “Industrial automation systems and integration - Numerical control of machines - Coordinate system and motion nomenclature”, (2001).