円すい台加工を模擬した 5 軸制御マシニングセンタの 3 次元円弧補間運動軌跡の解析*

加藤 教之^{*1}, 堤 正臣^{*2}, 土橋 祐^{*3}, 佐藤 隆太^{*4}
弓座 大輔^{*5}, 崔 成日^{*6}, 井原 之敏^{*7}

Analysis of Three-Dimensional Circular Motion Trajectories of Five-Axis Machining Centres Simulating Cone-Frustum Cutting

Noriyuki KATO ^{*1}, Masaomi TSUTSUMI, Yu TSUCHIHASHI, Ryuta SATO
Daisuke YUMIZA, Chengri CUI and Yukitoshi IHARA

^{*1} Tokyo University of Agriculture and Technology, Dept. of Mechanical Systems Engineering
2-24-16, Nakacho, Koganei Tokyo, 184-8588 Japan

In the present paper, a mathematical model was developed to represent the pitch error of the axes of rotation of five-axis machining centers having a tilting rotary table. The parameters used in the model were determined based on data measured for simultaneous three-axis motion. In experiments and simulations, the center offset and half apex angle of the cone-frustum are varied. In addition, the sensitive direction of the ball bar is varied to be either perpendicular to the conical surface or parallel to the bottom surface of the cone frustum. The simulation results obtained for different half apex angles, center positions of the cone-frustum, and sensitive directions of the ball bar are in good agreement with the experimental data. Then, the effects of the friction torque of the linear axes and the backlash and pitch error of the axes of rotation are simulated in order to analyze the experimentally obtained circular trajectories. When the center position of the cone-frustum is located far from the center line of the axis of rotation in the Y direction, the circular trajectory is affected by the sensitive direction of the ball bar and the half apex angle of the cone-frustum. In particular, for the case of a half apex angle of 45 degrees, the trajectory is strongly affected by the errors of the axis of rotation.

Key Words : Five-Axis Machining Center, Three-Dimensional Circular Interpolation, Ballbar Measurement, Center Offset, Cone Frustum, Pitch Error Model, Machining Test

1. 緒 言

現在, 5 軸制御マシニングセンタ (以下, 5 軸 MC という.) の工作精度検査は, 1969 年制定の米国航空宇宙規格 NAS 979^①に規定されている円すい台の仕上げ切削試験方法に基づいて行われている. この試験方法は, 主軸頭旋回形 5 軸 MC を対象としたものであるが, 最近, 普及し始めたテーブル旋回形 5 軸 MC の検査にも適用され, 仕上げた円すい台の真円度の良さが競争になっている^②. しかし, 円すい台の仕上げ加工を行うためには, 工作物や工具, テーブル上に取り付けるジグなどが必要だけでなく, 形状測定のために真円度測定器や 3 次元測定機が必要になり, 試験の準備から結果を得るまでに時間がかかる. これを解決するために, 円すい台を仕上げ削りする代わりに, ボールバーを使って測定する方法が提案^③された.

* 原稿受付 2011 年 10 月 3 日

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

^{*2} 正員, フェロー, 東京農工大学大学院工学研究院 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

^{*3} 東京エレクトロン(株) (〒107-6325 東京都港区赤坂 5-3-1)

^{*4} 正員, 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

^{*5} (株) ニコン 精機カンパニー (〒244-8533 神奈川県横浜市栄区長尾台 471)

^{*6} 三井精機工業(株) (〒350-0193 埼玉県比企郡川島町八幡 6-13)

^{*7} 正員, 大阪工業大学工学部 (〒535-0002 大阪府大阪市旭区大宮 5-16-1)

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

ISO/TC39/SC2/WG3 は、ボールバーを用いた方法を ISO/DIS10791-6 (補間運動試験規格草案)⁽⁴⁾に規定することを決め、草案をほぼ固めたところである。この規格草案の中では、すでに著者らが報告⁽⁵⁾したように、半頂角が 15° 及び 45° の2種類の円すい台を想定して測定することを検査事項として定めている。しかも、この WG3 は、ボールバーを利用したときにボールバーの軸と球を磁力で支えるソケットとが干渉しないようにするために、ボールバーの軸を仮想円すい台の円すい面に垂直に保持することを条件として決めた。

円すい台を想定したボールバーによる測定とその結果の応用については、松下ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾によって精力的に研究され、半頂角 30° の円すい台を想定した3次元円弧補間運動の軌跡から幾何誤差を推定するには、傾斜角を 15° よりも 75° としたほうが適していると報告している。Hong ら⁽⁸⁾も同じ条件で、円すい台の円弧形状に及ぼす幾何偏差の影響を解析している。著者ら⁽⁵⁾は、ISO で審議されている“半頂角 15° 、傾き角 10° ”と“半頂角 45° 、傾き角 30° ”の二つの条件に対する NC データの解析を行い、半頂角 45° の条件は、半頂角 15° の条件と比べて Y 軸、Z 軸及び A 軸の移動範囲が大きくなるだけでなく、中心位置をずらすとその移動範囲が一層大きくなり、かつ、全ての軸の運動方向反転位置を独立させて出現させることができることを明らかにした。しかし、半頂角 15° と 45° の条件で測定したときの軌跡の差異やボールバーの感度方向に関しては検討されてこなかった。さらに回転軸に特有のバックラッシュやピッチ誤差の影響が軌跡にどのように現れるかなどについても検討されてこなかった。

そこで本研究では、すでに開発したシミュレーションモデル⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾に新規に回転軸ピッチ誤差の詳細モデルを組み込み、円すい台を模擬した3次元円弧補間運動のシミュレーションを行い、測定結果と比較し、シミュレーションモデルの妥当性を明らかにする。次に、そのシミュレーションモデルを用いて、直進軸の摩擦トルクと追従遅れの影響、二つの回転軸のバックラッシュとピッチ誤差の影響についてシミュレーションし、円すい台の半頂角、取付位置、及びボールバーの感度方向による軌跡形状の特徴を明らかにする。

2. シミュレーション方法

2・1 ボールバーによる測定

本研究では、構造形態が w-ACYbXZ-t で表されるテーブル旋回形の5軸 MC を用いて円すい台仕上げ削りと同じ運動を行うことを前提⁽⁵⁾とし、シミュレーションと測定とで同じ NC データを使用する。この NC データは、すでに報告したように CAM ソフトを用いずに形状創成理論⁽¹¹⁾に基づいて作成している。

仮想の円すい台とボールバー (分解能, $0.1\mu\text{m}$, 測定範囲 $\pm 1.0\text{mm}$)⁽¹²⁾の取付け状態を図1に示す。図示したように円すい台の半頂角を θ 、傾き角を β とし、長さ L のボールバーを取り付ける。この状態で、3次元円弧補間運動をさせたときのテーブル側球の中心 $O_T(X_T, Y_T, Z_T)$ と主軸端に取り付けられた球の中心との間の距離変化をボールバーの伸縮量として測定する。ここで、その伸縮方向を測定の感度方向⁽⁴⁾と定義する。図1(a)は、ボールバーを円すい面に垂直に取り付けた状態を表し、図1(b)は、ボールバーを円すい台底面に平行に取り付けた状態を表している。実験に使用した5軸 MC は、直交3軸仕様の MC のテーブル上に2軸のテーブルを搭載した構造をしている。そのためにテーブルを傾斜させる軸である A 軸の中心線からテーブル側球中心までの距離 Z_T が 155

Fig. 1 Two sensitive directions of ball bar for measuring the conical movement
(Half apex angle $\theta=45^\circ$, ball bar length $L=100\text{ mm}$)

mm と高い。

測定は、ワーク座標系における工具の送り速度を 1000 mm/min と一定とし、3次元円弧補間運動を2周行わせ、得られたデータから最初の 180°と最後の 180°の部分を取り除くことによって運動開始時及び終了時の影響が入らないようにしている。なお、測定とシミュレーションでは、ボールバーを円すい台底面の中心位置 $O_T(X_T, Y_T, Z_T)$ から円すい面に垂直に取り付けた場合及びその底面に平行に取り付けた場合について、半頂角 θ を 15°と 45°とに変えて行っている。それぞれ円すい台の傾き角 β は 10°と 30°としている。半頂角 $\theta=15^\circ$ の場合には問題にならないが、半頂角 $\theta=45^\circ$ の場合には、図 1(b)に示すように底面に平行にボールバーを取り付けるとボールバーが干渉を起こし実際には測定はできない。

2・2 シミュレーションモデル

シミュレーションに用いた直進軸及び旋回軸のブロック線図を図 2 に示す。このモデルは、すでに筆者らが開発したもので⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾1 自由度系の数学モデルを用いている。主な特徴は、直進軸では外乱 F (摩擦トルク) を考慮し、旋回軸ではテーブル駆動機構のバックラッシュとピッチ誤差とを考慮しているところである。直進 2 軸を用いて円運動を行なうと、摩擦の影響によって軸の反転位置で象限突起を生じるように、同時 5 軸運動においても同様の現象が生じることから摩擦トルク F を考慮している。また、このモデルは、直進軸、旋回軸のいずれも速度が速くなれば、追従遅れを生じるようになっている⁽¹⁰⁾。直進軸は、ボールねじを介して AC サーボモータの回転運動 (回転角度 θ_m) を直進運動に変換し、旋回軸は、ウォーム歯車を介して減速比 R でテーブルを駆動している。

なお、図示したブロック線図で用いている記号 J は、機構の総慣性モーメント、 C は粘性係数、 l はボールねじのリード、 R はウォーム歯車の減速比、 K_{pp} は位置ループ比例ゲイン、 K_{vp} は速度ループ比例ゲイン、 T_i は速度ループ積分時間、 F は摩擦トルク、 G は Z 軸だけに生じる重力による負荷トルクである。

2・3 旋回軸のピッチ誤差モデル及びパラメータの同定方法

本研究では、より詳細なシミュレーションを行うために旋回軸のピッチ誤差モデルを検討した。すでに著者の一人が報告⁽¹³⁾したように、旋回軸のピッチ誤差は、同時 3 軸制御運動の接線方向の運動によって測定できることから、C 軸と X, Y 軸、及び A 軸と Y, Z 軸とを、それぞれ同時制御して測定した。得られた曲線を高速フーリエ変換 (以下、FFT という。) し、同時 3 軸制御運動の軌跡を高次成分まで表示できるようモデル化した。その式(1)に示す。

$$R = R_{all} + \sum_{i=1}^n W_i \sin(N_i R_{all} \theta_m + \phi_i) \quad (1)$$

ここで、 R_{all} は、モータ回転角から旋回軸の回転角までの減速比、 θ_m はモータ回転角度、 ω_m はモータ回転角速度、 W_i は i 番目のピッチ誤差の振幅、 N_i は i 番目のピッチ誤差の 1 回転当たりの山の数、 ϕ_i は i 番目のピッチ誤差の位相角である。実機の誤差を的確に表現するためには、式(1)のパラメータをできるだけ実機のピッチ誤差曲線に合うようにする必要がある。その曲線適合の方法は、次のようにして行った。

(1) A 軸は 0°から 90°、C 軸は 0°から 360°まで等速で回転させ、その回転に同期するようにそれぞれ Y, Z 軸、及び X, Y 軸に円弧補間運動をさせ、ボールバーを用いて旋回軸に対する接線方向の誤差を測定する。得られた波形を FFT 解析して振幅の大きい n 個の N_i を取得する。この同時 3 軸制御運動で得られる軌跡は、時計回り (CW) と反時計回り (CCW) とで振幅及び位相角が異なることから、A 軸と C 軸の二つの旋回軸について CW と CCW 方向の測定を行う。

Fig. 2 Simulation models of linear and rotary axes

円すい台の加工を模擬したシミュレーションを行うとき、すでに報告⁶⁾したようにA軸は往復運動し、C軸は、半頂角 θ が傾き角 β よりも大きい場合は、一方向に回転するだけであるが、両方向のデータを解析し、それぞれパラメータを同定した。

A軸とC軸のCW及びCCW方向の軌跡をFFT解析した結果を図3に示す。A軸のピッチ誤差成分には、ウォームホイールの歯数に比例する60山の整数倍成分とそれ以外の成分が存在していることがわかる。そこでA軸の数学モデルは、60山を基本とし、その整数倍の成分と、360山の前後に現れる328山と388山の成分を用いてモデル化した。ただし、CW方向とCCW方向とは考慮する山の数とパラメータとが異なる。図ではわかりにくいですが、240山と720山についてはCCW方向ではほとんど特定できない振幅であるので考慮していない。

同様にC軸についてFFT解析した結果を図3(b)に示す。この図に示すように山の数には、A軸よりも少なく、歯数に等しい72山に比例する成分と、90山に比例する成分が現れている。C軸のCW方向の場合は、ウォームホイールの歯数に等しい $N_1=72$ 山が特に大きい。次には歯数とは関係しない $N_2=90$ 山の成分がCCWに、その整数倍成分である180山がCWに現れている。なお、328山と388山の発生原因については不明である。

(2) 測定したままの生データには、A軸の場合は60山成分（ピッチ誤差成分）よりも小さな成分、C軸の場合は72山成分よりも小さな成分が存在する。これらの代表的な成分である偏心成分とバックラッシュとを取り除いた後、FFT解析を行い、ハイパスフィルタを用いて N_1 以上の成分を取得した。その後、 N_1 よりも小さな成分を完全に取り除いたFFT解析した結果を逆FFTすることによってピッチ誤差成分を含む修正データを取得した。

(3) 式(1)に示すパラメータ R_{all} は、旋回テーブルに固有の減速比で仕様書に書かれている値である。それ以外の振幅 W_i と位相角 ϕ_i を同定する。まず、図3から振幅が最大の N_1 の振幅を読み取り、その値を用いて位相角を変化させて求めた同定データとすでに求めた修正データとの差の和が最小になる位相角を求め、その位相角を用いて再び振幅を同定する。この操作を収束するまで繰り返し、 N_1 の振幅と位相角を決定する。次に $N_2 \sim N_8$ について同様の操作を繰り返し、全ての振幅と位相角とを求める。

Fig. 3 Amplitude spectrum of pitch errors of A and C axes

Fig. 4 Raw data, modified data and identified data of pitch errors of A and C axes

以上のようにして求めた振幅と位相角を用いて生成したピッチ誤差曲線を図4に示す. この図には, 同時3軸制御運動の生データ, N_1 以下の成分を取り除いた修正データ及び同定データを同時に示してある. 図によると, 生データは, 偏心しているためにかなりひずんだ形状になっているのが, 修正データと同定データとはよく一致していることがわかる.

図4(c)に示すC軸のピッチ誤差曲線のうち, 修正データにおいて 35° , 125° , 215° 及び 305° 付近に現れている突起は, 直進軸の反転時に生じる突起である. この突起は, 生データにも認められるが識別しにくい.

そこで, 次には, 同定したパラメータを用いてシミュレーションを行い, 条件を様々に変えてボールバーで測定した結果と比較し, その妥当性を確認する. さらに, このモデルを用いて, 円弧軌跡上に現れる偏差の原因についても検討する.

3. シミュレーション結果の妥当性

3・1 半頂角 15° の円すい台中心位置の影響

まず, 円すい台底面の中心位置の影響を調べるために, 半頂角 $\theta=15^\circ$ (傾き角 $\beta=10^\circ$) の円すい台において, その中心位置がテーブル中心線上にある場合と, X方向に50 mm及びY方向に50 mmそれぞれ離して取り付けた場合とについてシミュレーションと測定とを行った. 図5に基準円からの偏差を拡大して極座標表示した結果を示す. シミュレーションは, 送り速度1 000 mm/minで行い, 送りの向きをCCW方向とした. なお, 測定結果及びシミュレーション結果ともに, 最小二乗中心法によって偏心量を取り除いている.

図5(a)に示すように, 0° と 180° の位置に大きな段差が現れ, 0° から 180° に向かう軌跡には周期的な変動が3山存在し, また, 180° から 0° に向かう軌跡は基準円の外側に拡大し, 周期的な変動が3山識別できる. A軸の歯数60枚のウォームホイールが 20° 回転⁽⁵⁾することから, この山の数, ウォームホイールのピッチ誤差が現れたものと考えられる.

円すい台の中心位置をX方向に50 mmずらすと, 図5(a)の軌跡とは概略の形状は似ているものの, 図5(b)に示すように周期の長い変動に加えて 90° と 270° の近傍に周期の短い変動が見られるようになる. ところがY方向に50 mmずらすと図5(c)のように, 0° の近傍では, 図5(b)に現れたような周期の変動がはっきりと見られ, 180° 近傍ではさらに短い周期の変動が見られるようになる. また, 90° と 270° の近傍では図5(b)に見られた周期の短い変動は現れていない. これらの原因については, 次の章で述べる.

このような特徴ある挙動は, 測定結果だけでなくシミュレーション結果にも同様に現れており, シミュレーション結果は, 測定結果とよく一致していると言える. しかし, 135° から 180° の間においては, 測定した円弧軌跡が内側に切れ込んでいるが, シミュレーションではそれほど切れ込んでおらず, わずかな差を生じており, 完全には測定結果を表現しきれていないと言える. この原因については特定できていない.

ところで, ISO/DIS10791-6では, 半頂角を 45° とした場合も測定することを条件としている. そこで, この条件においても同様の測定とシミュレーションを行い, シミュレーション方法の妥当性を検討することにした.

Fig. 5 Comparison between measurements and simulations in sensitive direction of ball bar perpendicular to conical surface of a half apex angle of 15 degrees

3・2 半頂角 45°の円すい台中心位置の影響

半頂角を 45°とした場合の測定結果とシミュレーション結果とを重ねて図 6 に示す。図示したように、全体の軌跡形状を見ると、シミュレーション結果は測定結果とよく一致していることがわかる。半頂角が 15°の場合の結果と比較すると、0°から 180°までの間に 3 山ほど現れていた長周期の変動が、図 6(a)からわかるように 10 山ほどの変動になっている。これは、A 軸のウォームホイールの歯数が 60 枚、1 歯当たり 6°テーブルが回転するので、同時 5 軸制御運動の間にウォームホイールが 60°回転⁽⁵⁾することから、そのピッチ誤差が 10 山現れたものである。

中心位置を X 方向にずらすと 45°から 135°の間及び 225°から 315°の間に周期の短い成分の山が現れる傾向が見られ、Y 方向にずらすと 45°から 135°の間では、中心位置をずらさなかった場合と同様の変動が得られ、135°から 225°の間ではさらに短い周期の変動が現れている。半頂角が 15°の場合には、315°から 45°の間でも周期の短い変動が現れたが、半頂角が 45°の場合には、ほとんどその変動が現れない。このように条件を変えてもシミュレーションモデルは、実機の挙動をよく表現できると言える。

そこで、次章では、このモデルを利用して、直進軸の反転誤差、A 軸のバックラッシュとピッチ誤差及び C 軸のピッチ誤差がそれぞれ軌跡にどのように現れるかを調べることにした。さらに、5 章で半頂角が 45°の場合に図 6 に示したように 0°前後で周期的変動が小さくなる理由について考察する。

4. 半頂角 15°の場合の機構誤差の影響

一般の工作機械の場合、旋回軸の精度検査は、主軸を対象とした検査⁽¹⁴⁾になるが、テーブル旋回形 5 軸 MC の場合は、主軸の他にテーブル旋回軸の精度検査も重要な検査事項⁽¹⁵⁾になる。特に、テーブル旋回軸のピッチ誤差は、穴あけや歯車加工のときの割出し精度に影響を及ぼしたり、回転むらとなって現れて製品に縞模様を発生させたりするおそれがある。そこで、本章ではシミュレーションモデルを用いて、前章で検討した段差、周期の大きな変動と小さな変動の現れ方が中心位置を変えるとどのように変化するかについて考察する。

図 2 に示したシミュレーションモデルは、直進軸においては、運動の反転位置で現れる象限突起を考慮できるようにするために、外乱 F を導入している (図 2(a)参照)。また、A 軸においては機構誤差としてバックラッシュとピッチ誤差を、半頂角 θ が傾き角 β よりも大きい条件では C 軸は一方方向に回転するだけであることから、C 軸の機構誤差としてピッチ誤差だけを考慮し、それぞれの影響を調べた。

4・1 摩擦トルク及び軸の追従遅れ

バックラッシュとピッチ誤差の影響を調べる前に、直進軸に存在する外乱 F (摩擦トルク) と、直進軸の追従遅れの影響を調べた。その結果を図 7 に示す。図は、中心位置を $O_T(0, 0, 155)$ にとった場合のシミュレーション結果である。図示したように、象限突起と同様の突起が、0°と 180°以外に 131°, 151°, 209°及び 229°に現れてい

Fig. 6 Comparison between measurements and simulations in sensitive direction of ball bar perpendicular to conical surface of a half apex angle of 45 degrees

ることがわかる。これらの突起の発生位置は、すでに報告したように NC プログラムを分析することによって把握することができる⁽⁵⁾。

機構誤差がない場合のもう一つの特徴は、 180° の近傍で軌跡が内側にわずかに窪んでいるところである。そこで、中心位置 O_T を変えてこの 180° 近傍の軌跡がどのように変化するかを調べた。その結果を図 8 に示す。この図は、中心位置を正方向に $+50\text{ mm}$ 、 $+200\text{ mm}$ ずらした場合と、負方向に -50 mm 、 -200 mm ずらした場合の軌跡を重ねて示したものである。図示したように、中心位置を X 軸及び Y 軸の正方向にずらすといずれも窪みが大きくなり、負方向にずらすと凸状に膨らむことがわかる。これは軸の追従遅れによるものと考えられる。

そこで、この点を確認するために、X 方向と Y 方向にそれぞれ中心位置を $\pm 200\text{ mm}$ 、 $\pm 50\text{ mm}$ ずらした場合の X 軸、Y 軸及び C 軸の指令速度を調べた。その結果を図 9 に示す。図によると、X 方向にずらした場合は、X 軸が 180° の位置で極値をもち、Y 方向にずらした場合は、Y 軸が 180° の位置で極値をもっていることがわかる。また、C 軸は、 180° 位置で極大値をもつが、中心位置をずらしても極大値に変化はみられない。

図 9(a) に示す中心位置を $X_T=200\text{ mm}$ ずらした場合には、 180° の位置で X 軸の最大速度は 8000 mm/min 、C 軸の最大速度は 1750 deg/min にもなる。このように急激に速度が上昇する場合には、応答遅れが発生し、窪みや膨らみが発生することから⁽¹⁰⁾、図 8 の 180° の位置における窪みや膨らみは、これら二つの軸の追従遅れによって現れた可能性がある。一方、Y 軸の送り速度を見ると 180° の位置ではゼロになっているが、 $180^\circ \pm 15^\circ$ 付近で極値をとっており、この角度位置辺りでは Y 軸の遅れも現れていると考えられる。中心位置をずらさない場合でも図 9(a) に示すように X 軸と C 軸の速度が 180° の位置で最大になっていて、図 7 に示したように窪みが現れていることから、この窪みの発生には、X 軸と C 軸が関係している可能性がある。ところが、 $X_T=-50\text{ mm}$ にずらしたとき、X 軸の速度は最大で 700 mm/min 程度であり、ほとんど変化しなくなることから、C 軸の追従遅れが影響していれば、窪みか又は膨らみが生じると考えられるが、図 8(a) に示すように、 180° の角度位置では窪みも膨らみも生

Fig. 7 Effect of friction of linear axes

Fig. 8 Influence of center offset on the trajectories without mechanism errors

Fig. 9 Velocity changes of X, Y and C axes

じていない。したがって、 180° の位置で発生する窪みが膨らみに変化するのは、X軸の速度の影響が大きく、C軸の速度変化は、軌跡形状に影響を与えていないと言える。

同様にY方向にずらした場合には、Y軸の送り速度が6000 mm/minに達するような変化をする。C軸の速度変化は、図9(a)と変わらず、中心位置をずらしても変化しない。図8(b)の窪みや膨らみの量を見ると、図8(a)よりも小さくなっているのがわかる。これは、Y軸の最高速度がX方向にずらしたときよりも低いことから、この窪みや膨らみもY軸の追従遅れの影響によるものと考えられる。

ところが+50mmずらした場合でも窪みを生じたままになっている。このとき、X軸の最大速度が約2200 mm/min、Y軸の最大速度が1800 mm/min程度になっていて、この両方の軸の追従遅れが現れていると考えられる。さらに-50mmにずらすと、X軸とY軸の最大速度は+50mmずらしたときと同じであるが、X軸の速度の向きとY軸の速度の向きとが異なっていることから、X軸の遅れによって窪み、Y軸の遅れによって膨らんで、互いに打ち消し合って 180° の位置で窪みが見られないものと考えられる。

以上のようにバックラッシュとピッチ誤差がない場合は、直進軸の摩擦トルクの影響で円弧補間運動に見られる象限突起と同様の突起が現れ、かつ、 180° の位置では主に直進軸の追従遅れから窪みや膨らみを生じると言える。このような現象をさらに解析するには、各軸にフィードフォワードを入れて追従遅れが発生しないようにしてシミュレーションを行う必要がある⁽¹⁰⁾。次に、バックラッシュとピッチ誤差の影響について検討するが、以下のシミュレーションでは、摩擦トルクが作用せず、軸には追従遅れがないものとして行っている。

4・2 A軸バックラッシュ及びピッチ誤差の影響

テーブル旋回形5軸MCを半頂角 15° 、傾き角 10° の条件で運転すると、テーブル旋回軸(C軸)は、一方方向に回転し、A軸は、 0° と 180° の位置で運動の向きを反転する。そのために、A軸にバックラッシュが存在すると、この二つの角度位置で段差が現れる。そこで、A軸のバックラッシュが軌跡形状にどのように影響するかを調べた。その影響は、図10(a)に示すように、 0° と 180° の位置で大きな段差となって現れているのがわかる。なお、図示していないが、中心位置をずらしても軌跡形状はほとんど変化せず、特にY方向に中心位置をずらした場合は、 0° と 180° の位置に現れる段差の変化は確認できない。

次にA軸のピッチ誤差の影響が軌跡にどのように現れるかを調べた。その結果を図10(b)に示す。図示したようにA軸のピッチ誤差は、上下対称の軌跡になっている。この軌跡には、3山ほどの長周期の変動が認められ、その山の上に周期の短い変動が乗ったA軸固有の現象が現れている。図示はしていないが、A軸のピッチ誤差の影響は中心位置を変えても変わらない。

4・3 C軸ピッチ誤差の影響

C軸にピッチ誤差が存在する場合について、中心位置を変えてシミュレーションした。中心位置が $O_T(0,0,155)$ にある場合、C軸ピッチ誤差の影響は、図5に示したように全く現れることはないが、X方向、Y方向のどちらに中心位置をずらしてもその影響がはっきりと現れる。しかし、X方向にずらすか、Y方向にずらすかによってその影響の現れ方が異なる。その様子を図11に示す。図示したようにX方向にずらすことによって 90° 及び 270° 付近で振幅が最大になり、 0° と 180° 付近ではその振幅が最小になる変動を示す。また、ずらす量を大きくすると、

周期は変わらずに振幅だけが大きくなる。一方で Y 方向にずらすと、 0° 付近と 180° 付近で最大振幅になり、 90° と 270° でほとんどゼロに近くなるが、ピッチ誤差の周期が大きく変化するところに特徴がある。 0° 付近の周期は長く、最も粗になり、 180° 付近で周期が最も密になっているのがわかる。したがって Y 方向にずらした軌跡を FFT 解析して C 軸の周期が現れているかどうかを判断するのは難しい。以上述べたように、中心位置をずらすことによって C 軸のピッチ誤差が現れるが、その現れ方は、中心位置をずらす方向によって異なると言える。

以上のシミュレーションを通して、円すい台の中心位置 O_T をずらしたときに変化する成分は、直進軸の反転位置における突起の発生位置、X 軸・Y 軸の追従遅れによる 180° 付近の窪み又は膨らみ、及び C 軸のピッチ誤差成分であり、A 軸のバックラッシュ及びピッチ誤差成分は変化しないことがわかった。

5. 半頂角 45° の場合の軌跡及び感度方向

5・1 円弧軌跡に及ぼす機構誤差の影響

半頂角 θ を 45° (傾き角 $\beta=30^\circ$) とすると、 0° 付近の段差が小さくなり、かつ、ピッチ誤差の振幅も小さくなることがわかった。そこで、シミュレーションモデルを利用して、 0° 付近の軌跡の振幅が小さくなる理由について検討した。

まず、図 12 に摩擦トルクと直進軸の追従遅れだけを考慮した場合の軌跡を示す。この軌跡は、誤差の影響をわかりやすくするために、円すい台の中心位置を X 方向又は Y 方向にそれぞれ ± 200 mm ずらした場合について示してある。図に示すように中心位置を正方向にずらすと、 180° 近傍で軌跡は窪み、負方向にずらすと膨らみになる点は、図 8 と同じであるが、それぞれの窪む量と膨らむ量は、半頂角 15° の場合よりも大きい。

次に A 軸のバックラッシュの影響について調べた。その結果を図 13 に示す。図 13(a) に示すように、中心位置を X 方向にずらしても段差の大きさは変わらないが、負方向にずらすと、曲線の形が変化して半円を水平に切って互いにずらした形状になっている。正方向にずらした場合は、下側の半円が大きく、上側の半円が大きい図 10(a) と同様の形になっている。これが、Y 方向にずらすと、 0° と 180° の位置における段差の大きさに差異が生じ、 0° の位置のほうがかなり小さくなる。

A 軸ピッチ誤差の影響についてシミュレーションした結果を図 14 に示す。図 14(a) に示すように、中心位置を X 方向にずらした場合に、正方向と負方向にずらしたときとでは、右半分の軌跡に差異があるが、中心位置を Y 方向にずらした場合に、図 14(b) に示すように、正方向にずらすと図の上半分にピッチ誤差を含む軌跡が現れ、負方向にずらすと下半分に同様にピッチ誤差が現れる。

最後に C 軸のピッチ誤差の影響を調べた。その結果を図 15 に示す。図は、正方向にずらした場合の結果だけを表示している。これは、負方向にずらした場合は、現れるピッチ誤差の周期が、正方向と逆になっているだけであるのでここには示していない。図示したように、中心位置を X 方向にずらすと 90° と 270° で振幅が最大になる変動をする。この点は、図 11(a) に示した結果と同じである。それに対して図 15(b) に示すように中心位置を Y 方向にずらすと左半分と右半分とでは振幅に大きな差が現れ、右半分が小さくなっている。このことは、図 11(b) に示した結果と大きく異なる。

以上から +Y 方向にずらすと、半頂角 15° の場合と比べて 270° から 90° に至る右半分の軌跡において、A

($\theta=45^\circ$, $\beta=30^\circ$, CCW, $Z_T=155$ mm, Feed speed = 1 000 mm/min)

Fig. 12 Effect of friction of linear axes

($\theta=45^\circ$, $\beta=30^\circ$, CCW, $Z_T=155$ mm, Feed speed = 1 000 mm/min)

Fig. 13 Effect of backlash of A-axis

Fig. 14 Effect of pitch errors of A-axis

Fig. 15 Effect of pitch errors of C-axis

軸のバックラッシュ及びC軸のピッチ誤差の影響が小さくなっているのがわかる。

そこで、このような軌跡がA軸とC軸の運動誤差を的確に表現できているかどうかを確かめるために、ボールバーの感度方向に着目し、ボールバーの軸を円すい台底面に平行に取り付けた場合の結果と比較することにした。

5・2 ボールバーの感度方向の影響

すでに述べたように ISO TC39/SC2/WG3 は、ボールバーの感度方向を、円すい面に垂直にすることを決めた。これは、Bossori⁽¹⁶⁾の研究に基づき半頂角を $\theta=45^\circ$ とすると軸の運動範囲を広くとれるという理由から、この条件が加わったことと関係している。この条件で、ボールバーの感度方向を円すい台の底面に平行にとると、図 1(b) に示したようにボールバーの球を保持する磁気ソケットと球を固定しているボールバーの軸とが干渉を起こす。もう一つの根拠は、工作機械主軸の振れの測定方法として、主軸端が円すい形状であれば、ダイヤルインジケータの測定子をその円すい面に垂直に当てて測定することが基本⁽¹⁷⁾になっていることによるものである。以上の理由から、円すい面の真円度の測定は、測定子を円すい面に垂直に当てて行うことになった。

ボールバー、円すい台、主軸、テーブルとの相対位置関係は図 1 に示したとおりである。図 1(a)に示したように、ボールバーの軸を円すい面に垂直、すなわち主軸に垂直に当てる場合は、X、Y、Z、A、C の 5 軸をすべて制御して運動させても、ボールバーの感度方向と Z 軸（主軸の軸方向）の運動とが垂直になっているために、ボールバーで Z 軸方向の運動誤差を検出することはできない。すなわち、円すい面に垂直に測定する場合は、Z 軸を除く 4 軸の運動によって発生する誤差を測定していることになる。その一方で、図 1(b)に示したように、円すい台の底面に平行にボールバーを取り付けると、ボールバーの球を支持する軸とソケットとが干渉するために測定できなくなるが、この場合には、Z 軸運動の影響をボールバーで検出することができる。そこで、二つの感度方向で測定した場合の軌跡にどのような差異が生じるかを検討することにした。

X 方向に 200 mm ずらした場合と Y 方向に 200 mm ずらした場合について、(a)摩擦トルクと軸の追従遅れ、(b) A 軸バックラッシュ、(c)A 軸ピッチ誤差、(d)C 軸ピッチ誤差の影響をそれぞれ調べた。その結果を図 16、図 17 に示す。なお、図示した曲線は、図 16(d)では、垂直に当てたほうを上、図 17(d)では、平行に当てたほうをそれぞれ上に重ねて描いてある。

まず、摩擦トルクと追従遅れを考慮した場合には、図 16(a)と図 17(a)に示すように、軌跡の形は 180°の近傍で窪む形になっており、その窪みの量は、円すい面に垂直に当てたほうが大きく、かつ、X 方向にずらしたほうが大きいことがわかる。次に、A 軸のバックラッシュの影響を見ると、0°の位置における段差の大きさは、中心位置を X 方向にずらした場合は、ほとんど差がないが、Y 方向にずらした場合は、平行にして設定したほうが大きい。180°の位置における段差は、X 方向にずらした場合は、垂直に当てたほうが約半分程度の大きさになっている。Y 方向にずらした場合は、大きさは同じであるが平行に当てたほうが若干窪むことがわかる。

A 軸と C 軸のピッチ誤差の影響について見ると、図 16(c)、(d)に示すように、円すい面に垂直にボールバーを当てた場合には、A 軸と C 軸のピッチ誤差による影響はほとんど現れていない。それに対して Y 方向にずらした場合には、図 17(c)、(d)に示すようにボールバーの感度方向によって A 軸と C 軸のピッチ誤差の現れ方が大きく異なる。図 17(c)に示すように、A 軸のピッチ誤差の影響は、ボールバーの感度方向を円すい面に垂直にとった場合には、40°から 200°までの間に現れるが、感度方向を底面に平行にとった場合には、40°から 320°まで現れる。

Fig. 16 Comparison of two measuring methods shown in Fig. 1.

Fig. 17 Difference between two measuring methods shown in Fig. 1.

C軸のピッチ誤差の影響の表れ方も図17(d)に示すように大きく異なる。円すい面の垂直な方向にボールバーの感度方向をとった場合は、90°から270°の間で変動が大きくなり、270°から90°の間では、ほとんどその影響が現れない。それが底面に平行な方向に感度方向をとると、270°から90°の間でも変動が大きくなり、0°の位置で最大になる。

以上述べたようにボールバーの感度方向については、中心位置をずらす方向によって、0°の角度位置におけるA軸とC軸のバックラッシュとピッチ誤差の現れ方が大きく異なり、X方向にずらした場合は、A軸のバックラッシュの大きさが180°の位置で小さくなり、C軸のピッチ誤差の影響が全体に少し小さくなるが、Y方向にずらした場合には、A軸の0°の位置のバックラッシュとC軸のピッチ誤差の影響がかなり小さくなり、かつ、A軸のピッチ誤差の現れ方が異なることがわかった。

なお、結果を示していないが、半頂角15°の場合は、円すい面に垂直な方向と底面に平行な方向とで測定した結果には半頂角45°のような大きな差はない。

6. 結 言

本研究では、旋回軸のピッチ誤差の詳細なモデルを作成し、シミュレーションを行ったところ、測定した軌跡とよく一致することを確認した。比較は、半頂角が15°と45°のときの測定結果と行い、細部までシミュレーションで表現できることを示した。このモデルを使って、円すい台の半頂角及び中心位置を変えたときに現れる、直進軸の反転による突起、旋回軸のバックラッシュ及びピッチ誤差の影響を個々に調べた。また、ボールバーの感度方向と測定条件との関係についても調べた。その結果、次のような結論を得た。

- (1) 円すい台の中心位置をずらしたときに変化する成分は、直進軸の反転位置における突起の発生位置、X軸及びY軸の追従遅れによる180°付近の窪み又は膨らみ、及びC軸のピッチ誤差の影響であり、A軸のバックラッシュ及びピッチ誤差は変化しない。
- (2) ボールバーの感度方向によって、誤差成分の現れ方が異なる。特にその傾向は半頂角を45°としたときに顕著になり、0°の位置で誤差が小さく現れる傾向が強い。
- (3) 半頂角45°の場合には、ボールバーの感度方向の影響を強く受け、円すい面に垂直に測定した結果では、A

軸のバックラッシュ及びC軸のピッチ誤差の影響が小さく現れる。それに対して半頂角 15° の場合は、ボールバーの感度方向の影響は小さい。

以上から、旋回軸のピッチ誤差を詳細にモデル化し、本論文で示したシミュレーション方法を使えば、円すい台の輪廓曲線に現れる誤差を診断することが可能になると言える。なお、今後は、ボールバーで測定したときの感度解析を行い、円周上に現れる軸の誤差のうち、どの軸による誤差が大きく現れるかを検討する予定である。また、5軸機に固有の幾何偏差が、本論文で取り上げた軌跡にどのように反映されるかも合わせて検討する予定である。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B) (課題番号 20360063) の補助を受けて行った研究の一部であり、関係各位に感謝する。

文 献

- (1) NAS979, Uniform cutting tests — NAS series, metal cutting equipment specifications, (1969), pp.34-37.
- (2) Wakamoto, H., Wakana T., and Kubozono, T., “Technologies of High-Precision 5-Axis Machine $\mu V1-5X$ and Machining Examples”, *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, Vol.45, No.3 (2008), pp.39-42.
- (3) 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.
- (4) ISO/DIS 10791-6, Test conditions for machining centers — Part 6, Accuracy of feeds, speeds and interpolations, (2011).
- (5) 加藤教之, 堤正臣, 土橋祐, 弓座大介, 崔成日, 井原之敏, “同時5軸制御による円すい台仕上げ加工試験用NCデータの解析”, 日本機械学会論文集C編, Vol.77, No. 780(2011), pp. 3149-3160.
- (6) 松下哲也, 沖忠洋, 松原厚, “テーブルチルト型5軸制御工作機械によるテーパコーン加工精度”, 精密工学会誌, Vol.74, No.6(2008), pp.632-636.
- (7) 松下哲也, 松原厚, “テーパコーン DBB 測定によるテーブル旋回形5軸制御工作機械の幾何偏差の同定と補正”, 精密工学会誌, Vol. 77, No.6(2011), pp.594-598.
- (8) Hong, C., Ibaraki, S., and Matsubara, A., “Influence of position-dependent geometric errors of rotary axes on a machining test of cone frustum by five-axis machine tools”, *Precision Engineering*, Vol.35, Issue 1 (2011), pp.1-11.
- (9) SATO, R., and TSUTSUMI, M., “Dynamic synchronous accuracy of translational and rotary axes”, *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, Vol.4, No. 3/4 (2011), pp.201-219.
- (10) Tsutsumi, M., Yumiza, D., Utsumi, K., and Sato, R., “Evaluation of synchronous motion in five-axis machining centers with a tilting rotary table”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 1, No.1 (2007), pp.24-35.
- (11) 稲崎一郎, 岸浪建史, 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—その基礎と応用—, (1997), pp.148-161, 養賢堂.
- (12) レニショー社カタログ, “QC20-W ワイヤレスボールバーシステムの詳細と仕様”, (2010), p3.
- (13) 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, Issue 8(2003), pp. 771-780.
- (14) ISO 230-1, Test code for machine tools — Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions, (1996).
- (15) ISO 230-7, Test code for machine tools—Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation, (1999).
- (16) Bossoni, S., “Geometric and dynamic evaluation and optimization of machining centers”, Dissertation of ETH Zurich, No. 18382 (2009), pp.142-154
- (17) ISO 10791-1, Test conditions for machining centres — Part 1: Geometric tests for machines with horizontal spindle and with accessory heads (horizontal Z-axis), (1998).