E12 5 軸マシニングセンタにおける 3 次元円弧補間運動の誤差曲線に及ぼす検査条件の影響

Influence of test conditions on motion trajectories of three-dimensional circular interpolation in 5-axis Machining Centers

○学 土橋 祐(東京農工大学)
加藤 紀之(東京農工大学)

正 堤 正臣(東京農工大学)
崔 成日(三井精機)

Masaomi TSUTSUMI, Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16, Nakacho, Koganei, Tokyo, 184-8588 Japan

Yu TSUCHIHASHI, Tokyo University of Agriculture and Technology

Noriyuki KATO, Tokyo University of Agriculture and Technology

Chengri CUI, MITSUI SEIKI

6-13, Hachiiman, Kwasimacho, Hikigun, Saitama, 350-0193 Japan

The machining test of cone-frustum specified in NAS 979 is only one method to evaluate the machining accuracy of five-axis machining centers. This paper analyzes the influence of the apex angle, inclination angle and center position of the cone frustum on the moving range and feed velocity of five axes when the cone-frustum is machined under simultaneous five-axis control. When the center of the cone moves along the X direction it gives a singular condition that the X-axis or Z-axis does not move. The offset along the Y direction gives larger moving range of liner axes and independent reversal points in every axis. The larger apex angle gives the less influence on motion trajectories of the A-axis. Therefore, it is recommended to move the center position of cone frustum along the Y direction.

Keywords: Machining Center, Five-axis, Machining Test, Ball Bar, NC Data, Center Offset, Cone frustum

1. 結 言

近年、複雑形状の加工や加工能率向上を背景とし、5 軸制御マシニングセンタ(以下 5 軸 MC)が広く普及するようになってきた。しかし、5 軸 MC は、従来の直進 3 軸に旋回 2 軸を加えた機械であるために、各軸間の幾何誤差が増え、加工精度低下の原因となっている。そのため、5 軸 MC の精度を測定する試験方法が必要とされている。

現在、5 軸 MC の精度試験規格として、主軸頭旋回形 MC を対象とした NAS 979 が存在する。この規格では、試験片(円すい台)の切削方法、真円度や同軸度などの測定方法を規定している。しかし、性能評価の規格であるため、同期誤差や幾何誤差が試験結果に及ぼす影響については記述されていない。また、この規格をテーブル旋回形 MC に適用した場合、円すい台の取付け条件(特にオフセット位置、取付け角度)が規定されていないため、試験条件が決まらない。

そのため本研究では、テーブル旋回形 MC を対象とした円すい台加工試験を行う場合の、適切な試験条件を決定し、試験結果に影響を及ぼす誤差を分析することを目的とする。

2. 解析条件

本研究では、同時 5 軸制御で円すい台の仕上げ加工することを前提として、CAM ソフトを用いずに形状創成理論⁽¹⁾に基づいて指令値を作成する。ここで、円すい台の半頂角を θ 、傾き角を β 、基準半径を L (円すい台の母線に対して垂直にとる)、円すい台底面中心のオフセット位置を $O_T(X_T, Y_T, Z_T)$ (座標原点は旋回 2 軸の交点とする)、切削送り速度を F とする。 $L=100$ mm, $Z_T=200$ mm, $F=1000$ mm/min とし、試験片のオフセット位置、半長角及び傾き角を変化させた指令値を作成する。そして、各軸の運動範囲、運動方向の反転位置を比較する。

また、上記の条件で作られた指令値から、本研究室で構築したシミュレーションモデル⁽²⁾を用いて、基準半径方向の誤差線図を描き、ウォームギアのピッチエラーやバックラッシュといった誤差が及ぼす影響を調べる。なお、本報告では半頂角 θ が傾き角 β より大きい場合についてのみ考察し、工作機械の測定は、円すい台切削の代わりにボールバーを用いて運動精度を測定する。

3. 指令値の比較

$\theta=15^\circ$, $\beta=10^\circ$ の場合について、X, Y 方向にオフセット位置を変化させ、各軸の移動範囲を調べた。その結果を図 1 に示す。なお、 X_T を変化させた場合 $Y_T=0$ mm, Y_T を変化させた場合 $X_T=0$ mm とする。

X_T を変化させた場合、X 軸は $X_T=-70$ mm 近傍で、Y, Z 軸は $X_T=+40$ mm 近傍で極小値をとる。そのため、正負どちらの方向にオフセットさせても、 $X_T=0$ mm の場合より、いずれかの軸の移動範囲が小さくなる可能性がある。特に X, Z 軸は移動範囲がゼロになる条件が存在し、この場合 5 軸運動ではないため試験条件として不適切である。

Y_T を変化させた場合、3 軸すべてが $Y_T=0$ mm で極小値をとり、正負どちらにオフセットさせても移動範囲が大きくなることがわかる。以上のことから、オフセット位置を変化させる場合は、Y 方向にオフセットさせたほうが、直進軸の移動範囲を大きくするのに有効であることがわかる。ただし A, C 軸はオフセット位置を変化させても指令値が変化しないため、図には示していない。

次に、半頂角と傾き角の比を一定($\beta/\theta=2/3$)にし、各軸の移動範囲を調べた。その結果を図 2 に示す。半頂角と傾き角を変化させると、オフセット位置を変化した場合と異なり、A 軸の旋回範囲が変化しており、比例的に増加している。これは $\theta>\beta$ の場合 A 軸の旋回範囲が 2β で与えられるた

Fig.1 Travel range of liner axes

Fig.2 Travel range of each axes

Fig.3 Reversal point

Fig.4 Error trajectories

めである。またZ軸も移動範囲が増加し、X軸も僅かながら増加している。一方、Y軸の傾向は異なって $\theta < 45^\circ$ の範囲では増加しているが、それ以降は減少している。このことから $\beta/\theta = 2/3$ の場合では、 $\theta < 45^\circ$ のとき、半頂角と傾き角を大きくすると、C軸以外の移動範囲が大きくなるといえる。

4. 反転位置の比較

図3に各軸の反転位置を示す。C軸は $\theta > \beta$ の場合では 360° 回転して反転しない。 $X_T=50 \text{ mm}, Y_T=0 \text{ mm}$ の場合を見ると 0° と 180° の角度位置でY, Z, A軸、が同時に反転していることがわかる。一方、 $X_T=0 \text{ mm}, Y_T=50 \text{ mm}$ 場合、Y軸とZ軸が 0° と 180° 以外の角度位置で反転し、C軸以外のすべての軸が独立して反転する。そのため、各軸が反転する際に生じる誤差の影響を調べるためには、Y方向にオフセットさせるのが有効である。

5. 誤差曲線の比較

図4に基準半径方向の誤差曲線を示す。測定結果とシミュレーション結果とはほぼ一致しており、本研究で構築したシミュレーションモデルが、測定対象の工作機械の特徴をよく現わしているといえる。図(a)と(b)とを比べると、どちらも 180° の角度位置で段差状の誤差が見られる。この角度位置はY, Z, A軸の反転位置と重なるが、シミュレーションモデルには直進軸のバックラッシュを与えていない。そのため、どちらもA軸の反転による誤差が原因であると考えられる。また、(a)の場合、 0° の角度位置でも同様の誤差が見られるが(b)では誤差が小さい。これは、本研究では、母線(主軸)に対して垂直方向に基準距離を取ったため、ボールバー感度方向とA軸接線方向の間の角度がA軸の旋回角度と等しく、 0° の角度位置では、(a)の場合 25° 、(b)の場合 75° 傾いた状態で反転する。そのため、より 90° に

近い旋回角度で反転する(b)では、反転誤差が測定結果に現れなかったと考えられる。

また、(a)と(b)どちらにも波状の誤差が現われている。これは、A軸のウォームギアのピッチ誤差によるものであるが、(b)の方では周期が短く、また振幅が小さい。(b)の周期が短い原因は、A軸の旋回範囲が大きいためである。一方、振幅が小さい原因は、段差状の誤差と同じくボールバーの感度方向とA軸の接線方向が異なるためである。A軸の旋回範囲は θ と β で決まり、 $\theta > \beta$ の場合 $\theta - \beta \sim \theta + \beta$ の範囲をとる。そのため、A軸旋回範囲が 90° に近い(b)の方が、A軸のウォームギアのピッチ誤差が誤差曲線に与える影響が小さくなる。

以上のことから、A軸が 90° に近い旋回範囲を取る場合、A軸の運動誤差が結果に反映されにくいことがわかった。

6. 結言

本研究では、検査条件が各軸の移動範囲や反転位置、誤差曲線に与える影響について考察した。

本研究から得られた知見をまとめると次のようになる。

- (1) オフセット位置を変化させた場合、X方向に変化させると移動範囲が小さくなる時があり、特定の条件ではX, Z軸が移動せず、4軸運動になってしまう。一方、Y方向に変化させたとき、必ず直進軸の移動範囲が大きくなる。
- (2) A軸が 90° に近い指令値を取る場合、A軸の誤差が測定結果に反映されにくい。

参考文献

- (1) 稲崎 一郎, 岸根 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, 養賢堂, p166
- (2) 弓座 大輔: 5軸マシニングセンタの運動精度試験方法に関する研究, 東京農工大学修士論文(2007年)