512 5軸加工機における回転軸系の運動誤差の診断手順

Diagnosis of Motion Error of the Rotary Axes in 5-axis Control Machine Tools

○正 黎 子椰 (上越教育大) 川島章弘 (上越教育大) 正 垣野義昭 (京都大)

正 山路伊和夫 (京都大) 正 井原之敏 (大阪工業大) 脇坂宗生 (森精機)

Zi-Ye LI, Akihiro KAWASHIMA, Joetsu University of Education, Yamayashiki, Joetsu

Yoshiaki KAKINO, Iwao Yamaji, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto

Yukitoshi IHARA, Osaka Institute University, Asahi-ku, Osaka

Munetaka WAKIZAKA, Moriseiki Co.LTD.,

Critical motion error sources of rotary axes with respect to linear axes in 5-axis machine tools (MC) include: 1) the alignment error of rotary axes, and 2) the angular error due to e.g. the inclination of rotary axes. Each motion error has a particular "sensitive" direction where it causes the largest motion error in DBB measurement plane. In this paper, the diagnosis method for the motion error sources of rotary axes is proposed as: the first is to find out such the sensitive direction of each motion error source by using numerical simulation, and the second is to determine the diagnosis procedure according to the simulation results. Moreover, the applicability and effectiveness of the proposed diagnosis method is validated by this experiment.

Key words: NC machine tool, 5-axis control, DBB test, motion error, diagnosis procedure, rotary axes

1. 緒 言

5軸マシニングセンタ (以下 MC と略す) の回転軸系においては、様々な運動誤差が上げられるが、回転軸の最も基本的な誤差は、直交軸のアライメント誤差と回転軸の傾きなどの回転位置決め誤差である。DBB 測定の原理と 5 軸 MC の構造から、それらの誤差は特定の DBB 測定平面で顕著に表れ、それぞれ異なるセンシティブ方向をもっていることが考えられる。従って個々の誤差のセンシティブ方向を考慮した DBB 測定パターンを用いれば、測定された DBB 誤差軌跡から誤差の原因を確実にかつ効率よく診断できると考えられる。しかし、多自由度をもつ機械においては、実験的に個々の誤差のセンシティブ方向を見出すのは容易ではない。そこで、本研究では、シミュレーション解析によって DBB 測定を行う際の各誤差のセンシティブ方向を見出し、この結果を用いて定めた DBB 測定パターンと診断手順を用い誤差診断を行う診断法を提案することとした。

2. 回転軸系の運動誤差

本研究で、対象とする 5 軸 MC の基本構成を図 1 に示す。B 軸と X 送り軸に座標系を定めると、2 つの座標系間には、6 つの誤差すなわち、X、Y、Z 軸方向への並進誤差 δ_{XB} 、 δ_{YB} 、 δ_{ZB} 及びその各軸方向回りの回転誤差 α_{BX} 、 β_{BX} 、 γ_{BX} が考えられ

Fig.1 Structure of the 5-axis machining center

る。また、B 軸と C 軸の座標系の定め方によって、B 軸と C 軸間には並進誤差 δ_{XC} と回転誤差 α_{CB} のみを考慮すればよい¹⁾。本研究では、回転誤差 α_{BX} 、 β_{BX} 、 γ_{BX} 及び α_{CB} を取り上げ、この 4 つの回転誤差のセンシティブ方向及び診断手順について検討する。

3. 運動誤差のセンシティブ方向を考慮した診断手順

Fig.2 Basic concept of the diagnosis method

提案している診断法の流れを図 2 に示す。まず、5 軸 MC の運動誤差モデルを用いて、種々の DBB 測定パターンについて、シミュレーション解析によって DBB 誤差軌跡パターンを求め、各誤差のセンシティブ方向を見出す。言い換えれば、DBB 誤差軌跡パターンには 1 つの誤差または 2 つの誤差の影響しか現れない DBB 測定パターンを見出す。次に、この結果を用いて診断手順を定める。さらに、定めた測定パターンと診断手順を用いて DBB 測定を行い、誤差診断を行う。

本研究でいた解析手法の基本的な原理は参考文献 1) になっている。上述のように解析した結果、各回転誤差は 1 つ以上のセンシティブ方向を持っていることが分かった。本研究では現場でも測定しやすい、精度の高い DBB 測定パターンを選んだ。図 1 に示した MC を例に取り、シミュレーションによって求めた診断手順は次のようになる。

Fig.3 DBB measurement pattern 1 (3-axis motion, C, X and Y-axis)

Fig.4 DBB measurement pattern 2 (3-axis motion, B, X and Z-axis)

- (1) 図3に示すような測定パターン1を用いて DBB 測定を行う。B 軸の旋回角を0とし、C 軸の回転中心線から円運動半径 R だけ離れたところにテーブル側の座を取り付ける。DBB のバーをテーブルに対して垂直になるように取り付ける。X, Y 軸の円弧補間送りとC 軸の回転($0 \rightarrow 360^\circ$)を同期運動させて測定する。この場合、測定された誤差軌跡のX 方向には回転誤差 β_{BX} , Y 方向には回転誤差 $\alpha_{BX} + \alpha_{CB}$ の影響しか表れないので、 β_{BX} を容易に診断できる。
- (2) 図4に示すような測定パターン2を用いて DBB 測定を行う。すなわち、C 軸を任意の角度に固定し、テーブル側の座をB 軸の回転中心線から円運動半径 R だけ離れたところに設置し、DBB のバーをY 軸に平行になるように取り付ける。X, Z 軸の円弧補間送りとB 軸の回転($0^\circ \rightarrow 90^\circ$)を同期運動させて測定する。この場合、測定された誤差軌跡パターンのX 方向には回転誤差 γ_{BX} , Z 方向には回転誤差 α_{BX} 影響しか表れないので、 γ_{BX} と α_{BX} を容易に診断できる。ただし、B 軸は $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ しか測定しないので、誤差軌跡の中心のずれ量を読み取ることが難しい。その場合は、DBB 装置に付属されたデータ処理のソフトにより最小二乗法で求めた誤差軌跡パターンの中心のずれの値を利用する。
- (3) (1)で求めた $\alpha_{BX} + \alpha_{CB}$ の値から、(2)で求めた α_{BX} の値を減じて α_{CB} の値を求める。

Fig.5 Characteristic pattern under angular errors of B and C-axis

4. 誤差診断のシミュレーション

上述の診断手順に従って、図1に示したMCについて回転誤差 $\alpha_{BX} = \gamma_{BX} = 0.008^\circ$, $\beta_{BX} = 0.005^\circ$, $\alpha_{CB} = -0.003^\circ$ として与えた場合の DBB 誤差軌跡をシミュレーションによって求めた。図5(a)は測定パターン1を用いて計算したDBB 誤差軌跡パターンである。この図からバーの伸縮量 Δl_1 , Δl_2 を読み取り、 β_{BX} の大きさを次式で求める。

$$\beta_{BX} (\text{deg}) = \frac{180(\Delta l_1 - \Delta l_2)}{2\pi R} \quad (1)$$

同様に、誤差軌跡パターンのY 方向のずれ量から回転誤差 $\alpha_{BX} + \alpha_{CB}$ の値を算出する。また、測定パターン2を用いたDBB 誤差軌跡を図5(b)に示す。図5(b)に示したように誤差軌跡パターンの中心のずれ Δ_x を読み取り、次式で γ_{BX} を診断する。

$$\gamma_{BX} (\text{deg}) = \frac{180\Delta_x}{\pi R} \quad (2)$$

同様に誤差軌跡中心のZ 方向のずれ Δ_z から、 α_{BX} を診断できる。さらに、 $\alpha_{BX} + \alpha_{CB}$ の値から、 α_{BX} の値を減じて α_{CB} の値が得られる。

5. 検証実験

本研究で、提案している診断法と診断手順の妥当性を検証するため、図1に示した被測定機の元の状態（以下初期状態と呼ぶ）、及びあらかじめ被測定機の回転軸系（B, C 軸）に回転誤差を与えた状態について、DBB 装置を用い実機測定を行った。ただし、回転誤差 $\alpha_{BX} = \gamma_{BX} = 0.008^\circ$, $\alpha_{CB} = -0.003^\circ$, $\beta_{BX} = 0.005^\circ$ とした。また、 β_{BX} , γ_{BX} はB 軸, C 軸をそれぞれ角度 β_{BX} , γ_{BX} だけ回転させることによって与える。 α_{BX} , α_{CB} はNC コード G68（3次元座標変換）を利用し、元のワーク座標系をX 軸回りに角度 $\alpha_{BX} + \alpha_{CB}$ だけ回転させる座標変換を行うことによって、円弧補間させる指令値に誤差を与える。

測定パターン1を用いて初期状態及び運動誤差を与えた状態について測定した結果を図6に示す。図6(a)から、初期状態で測定した軌跡パターンの中心は基礎円に対してY 方向に約 $3.5 \mu\text{m}$ ずれており、図6(b)から、誤差を与えた時の軌跡の中心は、初期状態時の軌跡の中心より、さらにX 方向に約 $6.5 \mu\text{m}$, Y 方向に約 $6.5 \mu\text{m}$ ずれていることがわかった。これらの値を式(1)に代入し、 $\alpha_{BX} + \alpha_{CB} = 0.0047^\circ$, $\beta_{BX} = 0.0047^\circ$ と推定した。測定した誤差軌跡から求めた回転誤差の値は予め与えた誤差の値とよく一致していることが分かった。

6. 結 言

本研究では、5 軸制御 MC の運動誤差モデルに基づいて、シミュレーション解析によって DBB 測定する時の回転誤差のセンシティブ方向を見出し、その結果により回転誤差診断用 DBB 測定パターン及び診断手順を定める診断法を提案した。さらに、実機測定により、提案した診断法の有効性と実用性を確認した。

Fig.6 Results of DBB tests by using measurement pattern 1

参 考 文 献

- 1) 稲崎一郎, ほか5名: 工作機械の形状創成理論, 養賢堂, 1997.