119 ボールバーによる5軸マシニングセンタの組立誤差同定・評価法

○正 坂本 重彦

正 稲崎 一郎

Identification and Evaluation of Alignment Errors in Five-Axis Machining Centers Using Telescoping Ball Bar

Shigehiko SAKAMOTO, Kumamoto University, 2-39-1, Kurokami, Kumamoto
Ichiro INASAKI, Keio University

This paper deals with the identification of alignment errors in five-axis machining centers. There are thirteen alignment errors in each five-axis machining center. Three alignment errors in the three translational slideways are identified by circular tests using a Telescoping Ball Bar. In this paper, assuming the use of a Telescoping Ball Bar, identification methods for the other ten alignment errors in five-axis machining centers are proposed. The theoretical background for identification is given by form shaping theory. The validity of the proposed identification method of alignment errors in the work-tilting type of five-axis machining center is confirmed by experiment.

Key Words: Five-Axis Machinig Center, Machine Accuracy, Mathematical Model, Alignment error, Measurement, Telescoping Bal Bar, Form Shaping Theory

1. はじめに

加工精度に影響を及ぼす基本的な誤差要因は、工作機械の幾何学的誤差である。従来、工作機械の運動精度試験・検査法は個々の幾何学的誤差に対する直接評価が多く、簡便な方法とは言い難い。そこで、本研究では、工作物旋回型5軸マシニングセンタに対して、工作機械構造上、最も基本的な案内軸間の位置ずれ、傾きを意味する組立誤差の同定法を提案⁽¹⁾し、その妥当性を実験的に検討する。

2. 工作物旋回型5軸マシニングセンタにおける組立誤差の定義

5軸マシニングセンタ（以下、MCと略す）において、2つの回転案内を固定した状態では、通常の3軸MCと考えることができる。例えば、図1の5軸MCでは、テーブルが旋回しなければ、横型3軸MCと見なすことが

可能である。このとき、直線案内2軸の円弧補間運動により、円運動試験を3直交平面に対して行えば、直線案内軸間の直角度誤差 $\gamma_{XY}, \alpha_{YZ}, \beta_{XZ}$ を同定することができる。案内 l 軸と案内 m 軸（ $l, m = X, Y, Z, A, B, C$ ）間に存在する X, Y, Z 軸方向への並進誤差は $\delta x_{lm}, \delta y_{lm}, \delta z_{lm}$ と、その各軸方向回りの回転誤差を $\alpha_{lm}, \beta_{lm}, \gamma_{lm}$ と記述する。

本来、2軸間には6種類の誤差が存在する。しかしながら、工作機械構造において、組立誤差として同義である誤差要因を消去することにより、5軸MCでは13個の組立誤差に集約される。工作物旋回型を例にとると、組立誤差は、図1の手順で求められる。また、そのうち直線案内と回転案内によって、誤差補正が直接可能である調整誤差は4個である。つまり、残りの9個の構成誤差が、本5軸MCの構造上本質的な幾何学誤差と言える。

図1に示す5軸MCを数学モデル化すると、次式で表現される。ただし、 r_i は i 座標系（ $i=W$:工作物、 T :工具）における位置ベクトルで、 Δr_W は工作物座標系における誤差ベクトルを意味する。 $A_{(k)}^j$ （ $j=1\sim5, k=x, y, z, \phi, \psi$ ）は案内運動を表す同次座標変換行列で、 ε_{lm} は案

Figure 1 Alignment errors in work-tilting type of five-axis machining center

内 l 軸と m 軸 ($l, m = X, Y, Z, A, B, C, S$) 間の組立誤差である。

$$\begin{aligned} r_W + \Delta r_W = & A_{(\psi)}^5 A_{(\phi)}^4 A_{(x)}^1 A_{(z)}^3 A_{(y)}^2 r_T \\ & + A_{(\psi)}^5 \cdot \varepsilon_{BA} \cdot A_{(\phi)}^4 A_{(x)}^1 A_{(z)}^3 A_{(y)}^2 r_T \\ & + A_{(\psi)}^5 A_{(\phi)}^4 \cdot \varepsilon_{AX} \cdot A_{(x)}^1 A_{(z)}^3 A_{(y)}^2 r_T \dots (1) \\ & + A_{(\psi)}^5 A_{(\phi)}^4 A_{(x)}^1 \cdot \varepsilon_{XZ} \cdot A_{(z)}^3 A_{(y)}^2 r_T \\ & + A_{(\psi)}^5 A_{(\phi)}^4 A_{(x)}^1 A_{(z)}^3 \cdot \varepsilon_{ZY} \cdot A_{(y)}^2 r_T \\ & + A_{(\psi)}^5 A_{(\phi)}^4 A_{(x)}^1 A_{(z)}^3 A_{(y)}^2 \cdot \varepsilon_{ZS} \cdot r_T \end{aligned}$$

形状創成理論を応用することにより、5 軸 MC に存在する組立誤差が工作機械の運動精度に与える影響を理論的に解析できる。そして提案する組立誤差同定法について、数学的表現で検討することが可能となる。

3. 組立誤差同定の実験的検証

工作物旋回型 5 軸 MC の組立誤差に関する同定手順は、図 2 ようにまとめられる。測定に際しては、工具と工作物間の相対距離を求めることを目的に、ボールバーを用いる。始めに、旋回テーブルを固定して、直交 3 軸間に存在する 3 つの組立誤差 $\gamma_{XY}, \alpha_{YZ}, \beta_{XZ}$ を各 2 次元平面での円弧補間運動により同定する。XZ 平面における円弧補間精度試験の結果を図 3(a) に示す。その結果より、直角度誤差成分 $\beta_{XZ} = 2.8 \times 10^{-4}$ rad. を数値計算上取り除くと、図 3(b) のような結果となる。同様に、残り 2 つの直角度誤差 γ_{XY}, α_{YZ} もそれぞれ同定される。

Fig. 2 Process of identification for structure errors in MC

Fig. 3 Result of circular test in the X-Z plane

次に、スピンドル側に 2 種類の工具長となる位置にボールバーを固定した状態で、それぞれ図 4 に示す運動を行

行わせて、X,Y,Z 軸 3 方向への変位量を測定する。回転案内 A 軸を旋回させながら、工作物と工具先端の距離を一定に保つように直線案内 Y, Z 軸を円弧運動させた場合を図 4(a) に示す。このとき、測定結果の一例として、X,Y 軸方向の変位量を図 5 に示す。同様に、回転案内 B 軸を回転させながら、直線案内 X, Z 軸を円弧運動させて図 4(b) のように測定する。

Fig. 4 Measurement for work-tilting type of 5-axis MC

Fig. 5 Measurement result of A-axis tilting test

テーブル旋回による一連の測定結果を、理論式に当てはめて解析することにより、残り 10 個の組立誤差が同定される。例えば、A 軸旋回による測定から、組立誤差が $\alpha_{YS} = -5.5 \times 10^{-5}$ rad. $\beta_{AX} = -1.4 \times 10^{-5}$ rad. ... と図 2 に示す手順で同定される。

4. まとめ

筆者らがこれまで提案したボールバーを用いる 5 軸 MC の組立誤差同定・評価法について、工作物旋回型の実機にて実験的検討を行い、その妥当性を示した。

文 献

- (1) 坂本, 稲崎他: ボールバーによる五軸マシニングセンタの組立誤差同定法, 機論 C, 63-605, (1997), 262.
- (2) 坂本, 稲崎: 5 軸マシニングセンタの組立誤差同定法, 機論 C, 60-575, (1994), 2475.