五軸マシニングセンタの組立精度評価法*

坂本 重彦^{*1}, 稲崎 一郎^{*2}Evaluation of Alignment Accuracy for Five-Axis Machining Centers
Using Telescoping Ball Bar

Shigehiko SAKAMOTO and Ichiro INASAKI

A number of test codes for performance and accuracy evaluation of machine tools have been standardized worldwide. There are, however, few standards for five-axis machining centers. The standards for evaluating the motion accuracy of five-axis machining centers so far available are National Aerospace Standard 979, which was standardized by Aerospace Industries, and ASME B5.54. In our research, a method for testing the alignment accuracy of five-axis machining centers, which assumes use of a Telescoping Ball Bar, is proposed. Three parameters, which are the range of measurement values, the mean, and the standard deviation, are defined in our evaluation method. The validity of the proposed testing method is confirmed by computer simulation of the three typical types of five-axis machining centers.

Key Words: Five-Axis Machining Center, Alignment Accuracy, Telescoping Ball Bar, Measurement, Evaluation

1. 序 言

工作機械を評価する方法は、日本の JIS 規格から世界的な ISO 規格までさまざまな規格において定められている。しかしながら、五軸マシニングセンタの精度評価に関する規格は、Aerospace Industries Association of America Inc.によって定められる NAS979 や ASME B5.54 と数少ない⁽¹⁾。

五軸マシニングセンタを製造するメーカーでは、NAS979 の図 1 に示す工具側面を用いた加工評価方法や各社独自の方法によって精度評価を行っている⁽²⁾。

製品形状が複雑な金型加工では、高精度かつ高能率を達成するために五軸マシニングセンタが導入されている。この際に、図 2 に示す工具側面による加工のみならず、工具端面を任意の角度から曲面に接触させる加工も必要となる。こうした状況の中で、五軸マシニングセンタの各種形式に対応したポストプロセッサに関する研究⁽³⁾や、自由曲面を加工データで表現するた

めの CAD/CAM に関する研究が盛んに行われている⁽⁴⁾。しかし、五軸マシニングセンタの精度評価を行うためのはんだ的手法はいまだに確立されていない。本研究では、五軸マシニングセンタの精度評価を行う

Fig. 1 Test form in NAS979

(a) Side milling (b) End milling
Fig. 2 Machining with five-axis machining center

* 原稿受付 1996年4月2日。

^{*1} 正員, 慶應義塾大学大学院(〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。^{*2} 正員, 慶應義塾大学理工学部。

ための手法を提案する。そして、提案した評価法の妥当性を計算機シミュレーションによって検討する。

2. ボールバーを用いた精度評価の原理

NAS979の加工は、回転案内1軸の旋回運動と直線案内2軸の運動によって行われる。これにより、加工物側面の傾きおよび加工物半径を測定することで五軸マシニングセンタの精度評価を行っている。つまり、NAS979による評価には加工プロセスに起因する測定誤差が含まれる。本方法では、五軸マシニングセンタの案内運動を直接評価するために、ボールバーを用いた測定法を提案する。

ボールバーは、バーの軸方向における微小変位量を検出する。五軸マシニングセンタの加工空間に図3のように原点Oを定め、ボールバーのボールを固定する。また、主軸端にボールバーのもう一方のボールを取付ける。主軸端が加工空間でボールバーの長さを半径とした半球表面を描き、かつ主軸方向が半球表面に対して法線方向となるような運動を行わせる。そして半球原点と主軸端の間に設置したボールバーの伸縮量を検出することによって、五軸マシニングセンタの総合的な運動精度の評価を行う。

3. 理論的背景

ボールバーによる測定の基準状態を、図3において正のZ軸方向から工具が原点に向いているときと定める。主軸端は直線および回転案内軸の制御によって、半球面上の別の位置に移動することができる。主軸端のボール位置は、半球原点を基準とした半球表面の位置ベクトルであり、図3に示す工作物座標系において次式で表現される。

Fig. 3 Direction and position of spindle nose in the workpiece coordinates

$$\begin{Bmatrix} z \\ x \\ y \end{Bmatrix}^T = \begin{Bmatrix} R \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \\ R \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta \\ R \cdot \sin \alpha \end{Bmatrix}^T \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし半球の天頂角を α 、方位角を β とする。

五軸マシニングセンタの運動精度を評価するために、主軸端は半球表面を移動し、主軸方向が半球表面に対して法線方向となるように直線案内3軸と回転案内2軸を同時制御する。この運動にはすべての案内軸を用いる必要があるため、工作機械構造に存在するすべての組立誤差の影響が測定量に含まれることになる。天頂角 $\alpha=0^\circ$ 、方位角 $\beta=0^\circ$ の基準状態におけるボールバーの長さを基準とする [図4(a)]。天頂角 α 、方位角 β である半球面上の位置に主軸端のボールを移動したとき、ボールバーの変位量 $\Delta R_{\text{Bar}}(\alpha, \beta)$ が検出される。つまり、 $\Delta R_{\text{Bar}}(\alpha, \beta)$ は半球半径方向のずれを意味する。これらの最大値 $\text{Max}[\Delta R_{\text{Bar}}(\alpha, \beta)]$ と最小値 $\text{Min}[\Delta R_{\text{Bar}}(\alpha, \beta)]$ の差(レンジ)を真球度 $\Delta R_{\text{Bar}}(\text{Max}-\text{Min})$ と定める。

$$\Delta R_{\text{Bar}}(\text{Max}-\text{Min}) = \text{Max}[\Delta R_{\text{Bar}}(\alpha, \beta)] - \text{Min}[\Delta R_{\text{Bar}}(\alpha, \beta)] \quad \dots\dots\dots (2)$$

各点における測定値について、回転案内の案内角による影響を明確に表現するために、図4(b)に示すように天頂角 α と方位角 β を平面にとり、各点での誤差

Fig. 4 Measurement method of telescoping ball bar

$\Delta R_{\text{Bar}}(\alpha, \beta)$ を垂直方向に表す評価平面を作る。そして、平均 $E(\alpha, \beta)$ を式(3)により、

$$E(\alpha, \beta) = \sum_{(\alpha, \beta)} \frac{1}{N} \cdot \Delta R_{\text{Bar}}(\alpha, \beta) \dots\dots\dots (3)$$

さらに工具先端変位量のばらつきを評価するための分散 $V(\alpha, \beta)$ と標準偏差 $D(\alpha, \beta)$ を式(4)によって定義する。

$$D(\alpha, \beta) = \sqrt{V(\alpha, \beta)}$$

$$V(\alpha, \beta) = \sum_{(\alpha, \beta)} \frac{1}{N} \cdot \{\Delta R_{\text{Bar}}(\alpha, \beta) - E(\alpha, \beta)\}^2 \dots\dots\dots (4)$$

このように、測定結果のレンジ、平均、標準偏差によって運動誤差を評価する。

4. 計算機シミュレーション

4.1 3タイプの五軸マシニングセンタに対する精度評価 ボールバーを用いた精度評価法を、図5に示す3タイプの五軸マシニングセンタに適用して、組立誤差が運動精度に与える影響を検討する。ただし、計算機シミュレーションで用いられる組立誤差の大きさは、JIS規格における許容値程度の表1に示された値を適用する。ここに示した13個の組立誤差は、案内軸間に存在する軸心ずれ(並進)誤差や、直角度(回転)誤差などである⁽⁵⁾。また計算機シミュレーションに用いた構成要素の寸法は、すべての構造において回転案内A軸から工具先端、およびテーブル上面までの長さを同一に定める。その他の寸法も、同じ加工空間をもつ構造になるように定めた。

工具旋回形五軸マシニングセンタでは、工具軸方向

が組立誤差によって理論的な姿勢に対して傾くため、半球形状全体が図6(a)のように傾く。ボールバー変位量を評価平面によって表現すると、天頂角 $\alpha=90^\circ$ 付近においては誤差の影響がほとんど見られない。一方、天頂角 $\alpha=0^\circ$ 付近では、回転案内B軸の旋回(方位角 β の変化)によって、主軸端面の位置は大きな影響を受けている。

次に、工作物旋回形五軸マシニングセンタにおける計算機シミュレーションの結果は、図6(b)に示す縦長な半球形状となる。天頂角 $\alpha=90^\circ$ 近傍で変位量が大きく、主軸端位置は回転案内A軸の旋回運動による影響を受けている。回転案内B軸は工作物に隣接して構成されるため、方位角 β を変化させる回転案内B軸の旋回運動誤差の影響はほとんど見られない。

Table 1 Assumed alignment errors in the computer simulations

Work Tilting Type	Tool Tilting Type	Tool & Work Tilting Type	Assumed Errors
β_{XZ}	β_{XZ}	β_{XZ}	5×10^{-5} rad
α_{ZY}	α_{ZY}	α_{ZY}	3×10^{-5} rad
$\gamma_{XY}(=\gamma_{XZ})$	$\gamma_{XY}(=\gamma_{XZ})$	$\gamma_{XY}(=\gamma_{XZ})$	4×10^{-5} rad
α_{YS}	α_{AS}	α_{YA}	2×10^{-5} rad
β_{AX}	β_{YB}	β_{YA}	5×10^{-5} rad
γ_{AX}	γ_{BA}	γ_{YA}	6×10^{-5} rad
δy_{AX}	δy_{AS}	δy_{AS}	20×10^{-3} mm
δz_{AX}	δz_{AS}	δz_{AS}	15×10^{-3} mm
β_{YS}	β_{AS}	β_{AS}	3×10^{-5} rad
α_{AX}	α_{YB}	α_{BX}	4×10^{-5} rad
γ_{BA}	γ_{YB}	γ_{BX}	7×10^{-5} rad
δx_{AX}	δx_{AS}	δx_{BX}	18×10^{-3} mm
δz_{BA}	δz_{BA}	δz_{BX}	16×10^{-3} mm

Fig. 5 Five-axis machining centers of three typical type

(a) Tool-tilting type

(b) Tool-table-tilting type

(c) Table-tilting type

Fig. 6 Results of computer simulations

工具・工作物両旋回形五軸マシニングセンタにおける計算機シミュレーションの結果は、図6(c)に示すように工具旋回形と工作物旋回形の両方の特徴を示している。

4.2 誤差の大きさの影響 工具旋回形五軸マシニングセンタに対して、異なる組立誤差を仮定したときの計算機シミュレーションの結果を以下に述べる。並進誤差 $\delta_x, \delta_y, \delta_z = \pm 0.03 \text{ mm}$ と回転誤差 $\alpha, \beta, \gamma = \pm 0.001 \text{ rad.}$ を仮定する。すべての組立誤差を正としたときに得られる評価平面を図7(a)に示す。ただし図において、半球形状におけるボールバー変位量を500倍に拡大している。組立誤差をすべて負と仮定した時には、平均 $E(\alpha, \beta)$ の正負記号が逆になり、図7(b)の評価平面が得られる。しかし、仮定した誤差の大きさが同じであるため、真球度 $\Delta R_{Ba}(\text{Max-Min})$ 、および標準偏差 $D(\alpha, \beta)$ は同一の値となる。

4.3 回転案内2軸間の組立誤差の影響 五軸マシニングセンタにおける回転案内2軸間の直角度誤差と軸心ずれ誤差は、工具旋回形および工作物旋回形の構成誤差として従来の精度試験においても関心がもたれていた誤差である。図5(a)に示した工具旋回形を対象として、回転案内A, B軸間に直角度誤差 $\gamma_{BA} = 5 \times 10^{-5} \text{ rad.}$ を仮定したときの計算機シミュレーションの結果を図8(a)に示す。また、図5(b)に示した工作物旋回形に対して同様のシミュレーションを行う

(a) Values of assumed errors are positive

(b) Values of assumed errors are negative

Fig. 7 Computer simulations for five-axis machining center of tool-tilting type

Fig. 8 Computer simulations for alignment errors

と、評価平面が工具旋回形と同様に方位角 90° と 270° においてボールバー変位量が最大値と最小値となるようにうねる傾向を示す。

回転案内 A, B 軸間に軸心ずれ誤差 $\delta_{zAB} = 5 \times 10^{-3}$ mm を仮定したときの、工具旋回形に対する計算機シミュレーションの結果を図 8(b) に示す。評価平面は、ともに方位角 180° においてボールバー変位量の最小値を示し、天頂角 90° における変位量は零を示している。

5. 結 言

本研究では、ボールバーを用いて、五軸マシニングセンタの運動精度評価法を提案した。すなわち、主軸端がテーブル上においてボールバーの長さを半径とした半球表面を描き、かつ主軸方向が半球表面に対して法線方向となるような運動を行わせる。そして半球原点と主軸端の間に設置したボールバーの伸縮量を検出することによって五軸マシニングセンタの運動精度を総合的に評価するという方法である。

検出された変位量が計算される真球度 $\Delta R_{Bar(Max-Min)}$ 、および評価平面における平均 $E(\alpha, \beta)$

と標準偏差 $D(\alpha, \beta)$ を求めることによって、五軸マシニングセンタの運動精度評価の可能性を示した。ボールバー変位量の平均が小さいときは、加工空間における工具先端位置のずれが小さいことを意味し、標準偏差が小さい五軸マシニングセンタは、工具姿勢変化による主軸端位置への影響が小さい構造であるといえる。また、回転案内 2 軸間に存在する直角度誤差の影響は、方位角 90° と 270° で最も顕著に現れ、軸心ずれ誤差の影響は方位角 180° で最も顕著となることが計算機シミュレーションによって確認された。

文 献

- (1) Aerospace Industries Association of America, Inc., *National Aerospace Standard 979*, (1969), 34.
- (2) 工作機械技術振興財団, 工作機械性能試験方法調査, (1992), 6, 工作機械技術振興財団.
- (3) 竹内芳美・和田一啓・久木達也・横山信人, 5 軸制御マシニングセンタ用ポストプロセッサの研究—スピンドルチルト型, テーブル・スピンドルチルト型の場合—, 精密工学会誌, **60-01** (1994), 75.
- (4) 青村 茂, 自由曲面形状切削における工具干渉領域探索法, 機論, **56-532**, C(1990), 3430.
- (5) 坂本重彦・稲崎一郎, 五軸マシニングセンタの組立誤差が加工誤差に及ぼす影響, 機論, **62-594**, C(1996), 748.