



# 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誤差の同定と補正\*

松 下 哲 也\*\* 松 原 厚\*\*\*

Identification and Compensation of Geometric Errors in Five-axis Machine Tools with a Tilting Rotary Table  
Using Conic Trajectories Measured by Double Ball Bar

Tetsuya MATSUSHITA and Atsushi MATSUBARA

Geometric error, such as a pivot offset of the rotational axis, squareness between axes and so forth, is one of fundamental factors that decrease the machining accuracy for five-axis controlled machine tools. And it is important to identify the geometric errors in order to improve the machining accuracy, so that many methods to identify or diagnose the geometric errors of the rotational axes have been suggested. Meanwhile, the most general method for the accuracy test of five-axis controlled machine tool is the cone frustum machining test, which is prescribed in NAS979. In our previous work, we showed that the geometric errors in five-axis controlled machine tools with a tilting rotary table influence the accuracy of machined cone frustum, and it depends on the location, apex angle, tilt angle or diameter of the cone frustum. It indicates that the geometric errors might be identified with the profiles of cone frustum. In this paper, we suggest a method to identify the geometric errors of linear and rotational axes in five-axis controlled machine tools with a tilting rotary table, which uses the multiple trajectories of the conic motion measured by double ball bar device. Moreover we develop the compensation system of the geometric errors. We also show the result of the compensation of the identified geometric errors by the suggested method.

**Key words:** machine tool, five-axis control, geometric error, cone frustum, ball bar, identification, compensation

## 1. 緒 言

直進 3 軸と回転 2 軸で構成される 5 軸制御工作機械（以下、5 軸機）は、工作物に対する工具の相対位置および姿勢を制御して加工を行うことができる。この機能により、複雑形状部品の加工において、段取り換えの削減による加工精度の向上やリードタイム削減が可能となる。しかし、5 軸機は、直進 3 軸のみで構成される 3 軸制御工作機械（以下、3 軸機）と比較して加工精度が低い。この要因の一つとして、回転軸の芯ズレや各軸間の直角度などの軸配置に起因する幾何誤差があげられる。5 軸機では、軸数が増加することにより幾何誤差の種類が増加し、運動精度が低下するためである。

加工精度に対する 5 軸機の幾何誤差の影響は直感的ではないことがわかっている。例えば、5 軸機の精度試験法の一つである NAS979<sup>1)</sup> のテーパコーン（円錐台）の同時 5 軸加工を、テーブルに 2 軸の回転軸を持つテーブル旋回形 5 軸機にて行う場合に、幾何誤差に起因するテーパコーンの真円度が工作物の配置（位置および姿勢）や寸法に依存して変化する<sup>2)</sup>。この様な複雑な現象は 3 軸機による円筒加工では発生しない。したがって、5 軸機の精度向上のためには幾何誤差の同定や補正が重要となる。

幾何誤差を診断・同定する方法として、DBB (Double Ball Bar) を用いた測定により得られた円弧軌跡誤差から同定する方法<sup>3) 4)</sup>、変位センサを用いた球中心位置の計測結果から同定する方法<sup>5) 6)</sup>、加工した同定用の工作物の精度から同定する方法<sup>7)</sup>、タッチプローブを用いたアーティファクトの計測結果から同定する方法<sup>8) 9)</sup>な

どが提案されている。これらの方法は直進軸を基準として測定・加工を行い、回転軸に関する幾何誤差のみを同定している。しかし、実際には直進軸に関する幾何誤差も存在するため、その影響で同定精度が低下する。また、実際の加工時の動作とは異なる運動を用いて幾何誤差を同定するため、幾何誤差以外の誤差要因の影響で同定精度が低下し、同定値を用いて補正を行っても運動精度の向上が十分得られない。

本研究では、テーパコーンの加工誤差に対する幾何誤差の影響が工作物の配置や寸法に依存して変化することに着目する。この結果を利用すれば、テーパコーン加工誤差から幾何誤差を同定することが可能である。しかし、加工結果を評価するためには、治具のセットアップ、工作物の取り付け、加工、工作物の取り外し、機外計測を行わなければならない。また、加工結果には運動誤差のみならず加工現象による誤差が含まれるため同定精度が低下する。そこで、加工の代わりに DBB を用いてテーパコーン加工動作における運動誤差を測定する<sup>10)</sup>。以下、この測定法をテーパコーン DBB 測定と呼ぶことにする。そして、テーパコーン DBB 測定により得られた複数の運動誤差軌跡からテーブル旋回形 5 軸機の直進軸および回転軸に関する幾何誤差を同時に同定する方法を提案する。さらに、同定した幾何誤差を制御的に補正する幾何誤差補正システムを開発する。提案する同定法と補正システムにより、5 軸機の運動精度を向上できることを示す。

## 2. 幾何誤差の同定法

### 2.1 幾何誤差

本研究では、図 1 に示すテーブル旋回形 5 軸制御マシニングセンタを対象とする。この機械は、X、Y、Z 軸の 3 つの直進軸と、A、C 軸の 2 つの回転軸を有しており、主軸に装着される工具からテーブル上に固定される工作物までを軸の連鎖として考えると、

\* 原稿受付 平成 23 年 1 月 13 日

\*\* 正 会 員 オークマ (株) (愛知県丹羽郡大口町下小口 5-25-1)

\*\*\* 正 会 員 京都大学大学院工学研究科 (京都府京都市左京区吉田本町)

Z, X, Y, A, C の順番で連結されている。なお, A 軸と C 軸は交差しており, その交点を座標指令の原点とする。

対象機には, 表 1 中に示す幾何誤差が存在する。このうち,  $\delta_{ZT}$ ,  $\alpha_{ZT}$ ,  $\beta_{ZT}$  は工具に依存する誤差であり, 測定用工具を 1 種類だけ用いる場合,  $\delta_{ZT}$  と  $\delta_{AY}$ ,  $\alpha_{ZT}$  と  $\delta_{AY}$ ,  $\beta_{ZT}$  と  $\delta_{CA}$  が冗長な関係になり分離して同定できない。このため,  $\delta_{ZT}$ ,  $\alpha_{ZT}$ ,  $\beta_{ZT}$  を同定対象から除く。一方,  $\delta_{WC}$ ,  $\delta_{YC}$ ,  $\delta_{XC}$  は工作物の取り付け誤差であり機械自身の誤差ではない。しかし, DBB のテーブル側球をテーブルに取り付ける際に, その中心位置誤差が発生し運動誤差軌跡に影響する。このため,  $\delta_{WC}$ ,  $\delta_{YC}$ ,  $\delta_{XC}$  を同定対象とする。したがって, 同定対象となる幾何誤差を,  $\delta_{CA}$ ,  $\delta_{CA}$ ,  $\alpha_{CA}$ ,  $\beta_{CA}$ ,  $\delta_{AY}$ ,  $\delta_{AY}$ ,  $\beta_{AY}$ ,  $\gamma_{AY}$ ,  $\gamma_{XZ}$ ,  $\alpha_{XZ}$ ,  $\beta_{XZ}$ ,  $\delta_{WC}$ ,  $\delta_{YC}$ ,  $\delta_{XC}$  の 14 個とする。

## 2.2 幾何誤差の同定計算

テーパコーン DBB 測定により得られた運動誤差軌跡から幾何誤差の同定を行う。このため, 幾何誤差と運動誤差の関係式が必要になり, 形状創成理論<sup>10)</sup>を応用した幾何誤差モデル<sup>2)</sup>を利用する。

DBB 測定により得られる運動軌跡 $\Delta r$ を, 各送り軸の動作指令 $T$ と $n$ 個の幾何誤差 $\Delta P = [\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_n]$ の関数 $f$ として表すと次式となる。

$$\Delta r = f(T, \Delta P) \quad (1)$$

幾何誤差が微小であり, 運動誤差との関係が線形近似可能であると仮定すると,  $i$  番目の測定条件における $j$ 番目の指令点での運動誤差 $\Delta r_{ij}$ は次式で表すことができる。

$$\Delta r_{ij} = \frac{\partial f_{ij}}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial f_{ij}}{\partial p_2} \Delta p_2 + \dots + \frac{\partial f_{ij}}{\partial p_n} \Delta p_n \quad (2)$$

ここで,  $\partial f / \partial p$  は, 運動誤差に対する幾何誤差の感度であるので, 幾何誤差の感度係数と呼ぶ。

一方, 3.5 節に後述する最適な測定条件セットの選定の際に, 膨大な量の計算を行うため, 計算量の低減が必要となる。そこで, 1 つの測定条件における 1 周分の運動誤差と感度係数をフーリエ級数展開し, 必要な次数までのフーリエ級数のみを用いて計算を行う<sup>11)</sup>。具体的には, 1 つの測定条件で得られる運動誤差をフーリエ級数展開し, 0 次から $t_F$ 次までのフーリエ余弦係数とフーリエ正弦係数を求める。また, 感度係数についても同様にフーリエ余弦係数とフーリエ正弦係数を求める。これらの係数ベクトルと幾何誤差の関係を次式にまとめる。

$$\Delta R_F = S_F \Delta P \quad (3)$$

ここで,

$$\begin{aligned} \Delta R_F &= [\Delta R_{D1} \quad \Delta R_{D2} \quad \dots \quad \Delta R_{Dm_C}]^T \\ \Delta R_{Di} &= [\alpha_{R0i} \quad \alpha_{R1i} \quad \beta_{R1i} \quad \alpha_{R2i} \quad \beta_{R2i} \quad \dots \quad \alpha_{Rt_Fi} \quad \beta_{Rt_Fi}]^T \\ S_F &= [S_{D1} \quad S_{D2} \quad \dots \quad S_{Dm_C}]^T \\ S_{Di} &= \begin{bmatrix} \alpha_{S0i1} & \alpha_{S1i1} & \beta_{S1i1} & \alpha_{S2i1} & \beta_{S2i1} & \dots & \alpha_{St_Fi1} & \beta_{St_Fi1} \\ \alpha_{S0i2} & \alpha_{S1i2} & \beta_{S1i2} & \alpha_{S2i2} & \beta_{S2i2} & \dots & \alpha_{St_Fi2} & \beta_{St_Fi2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{S0in} & \alpha_{S1in} & \beta_{S1in} & \alpha_{S2in} & \beta_{S2in} & \dots & \alpha_{St_Fin} & \beta_{St_Fin} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ここで,  $m_C$  は測定条件の数,  $\alpha_{Rji}$  は $i$ 番目の運動誤差軌跡の $j$ 次フーリエ余弦係数,  $\beta_{Rji}$  は $i$ 番目の運動誤差軌跡の $j$ 次フーリエ正弦係数,  $\alpha_{Sjik}$  は $i$ 番目の測定条件における $k$ 番目の幾何誤差の感度係数の $j$ 次フーリエ余弦係数,  $\beta_{Sjik}$  は $i$ 番目の測定条件における $k$ 番目の幾何誤差の感度係数の $j$ 次フーリエ正弦係数である。また,  $S_F$  は $(2t_F + 1) m_C$  行 $n$ 列の行列であり,

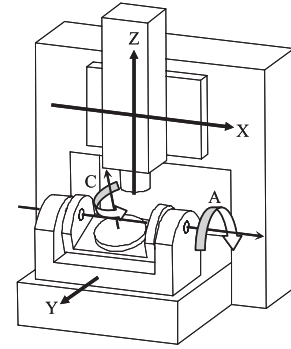


Fig. 1 Five-axis controlled machining center with tilting rotary table

Table 1 Geometric errors in CAYXZ-type machine

| Symbol         | Geometric Error                         | Type                    |
|----------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| $\delta_{CA}$  | C-axis pivot offset in X direction      | Rotational axis         |
| $\delta_{YCA}$ | Offset between C-axis and A-axis pivots |                         |
| $\alpha_{CA}$  | A-axis angle offset                     |                         |
| $\beta_{CA}$   | Perpendicularity between C-A axes       |                         |
| $\delta_{AY}$  | A-axis pivot offset in Y direction      |                         |
| $\delta_{AZ}$  | A-axis pivot offset in Z direction      |                         |
| $\beta_{AY}$   | Perpendicularity between A-Z axes       |                         |
| $\gamma_{AY}$  | Perpendicularity between A-Y axes       | Linear axis             |
| $\gamma_{XZ}$  | Perpendicularity between X-Y axes       |                         |
| $\alpha_{XZ}$  | Perpendicularity between Y-Z axes       |                         |
| $\beta_{XZ}$   | Perpendicularity between Z-X axes       |                         |
| $\delta_{ZT}$  | Tool length error                       | Tool                    |
| $\alpha_{ZT}$  | Perpendicularity between spindle-Y axes |                         |
| $\beta_{ZT}$   | Perpendicularity between spindle-Y axes |                         |
| $\delta_{WC}$  | Workpiece location error in X direction | Workpiece setting error |
| $\delta_{YC}$  | Workpiece location error in Y direction |                         |
| $\delta_{ZC}$  | Workpiece location error in Z direction |                         |

幾何誤差の感度行列と呼ぶ。式(3)は,  $S_F$  の疑似逆行列  $S_F^+$  を用いて次式に変形できる。

$$\Delta P = S_F^+ \Delta R_F \quad (4)$$

## 3. 最適測定条件の選定法

### 3.1 テーパコーン DBB パラメータ

テーパコーン加工では, スクエアエンドミルを用いて円錐台形状の工作物の円錐面を同時 5 軸制御加工する。テーパコーンの形状は, 図 2 に示す円錐底面の直径 $D$ , 円錐の半頂角 $\theta$ , 円錐中心軸の傾斜角 $\phi$ , 円錐底面の中心位置座標 $(W_x, W_y, W_z)$ によって決定される。ここで, 円錐の傾斜は, Y 軸もしくは Z 軸周りに傾斜させても C 軸回転により X 軸周りに傾斜と等価となるため, X 軸周りに限定して考える。これらパラメータと機械の軸構成から各送り軸の動作指令が求まる。

一方, テーパコーン DBB 測定では, DBB の一方の球が円錐軸線上でテーブル上に固定された球面座に取り付けられ, もう一方の球は工具に備えられた球面座に取り付けられる。したがって, 送り軸の動作を決定するパラメータとしては, 円錐底面の中心位置座標の代わりにテーブル側球の中心位置座標 $(O_x, O_y, O_z)$ を設定する必要がある。さらに, DBB の長さ $L$ がパラメータに加わる。これら,  $D, \theta, \phi, L, O_x, O_y, O_z$  の 7 個のパラメータを,

テーパーコーン DBB パラメータと呼ぶことにする。

### 3.2 測定条件の数

測定条件の数を見積もるために、1 つの測定条件における 1 周分の幾何誤差の感度係数のフーリエスペクトルを求め、幾何誤差の感度解析を行う。

図 3 は、テーパーコーン DBB パラメータが、 $L = 100\text{mm}$ 、 $D = 170\text{mm}$ 、 $\theta = 30^\circ$ 、 $\phi = 75^\circ$ 、 $O_x = 0\text{mm}$ 、 $O_y = -100\text{mm}$ 、 $O_z = 100\text{mm}$  の場合における 1 周分の感度係数のフーリエ振幅スペクトルを示している。ここで、0 次成分は円軌跡の半径誤差、1 次成分は円の中心偏差、2 次成分は楕円形状である。図から、3 次までの低次成分が主であり、5 次以上の高次成分に対する感度はほとんどないことがわかる。これは、1 つの運動誤差軌跡の真円度（2 次成分以上）だけでは十分な情報が得られないことを示唆している。

0 次から  $t_F$  次までのフーリエ級数が有効であるとする、1 つの測定条件における運動誤差軌跡から  $2t_F + 1$  個の式が得られる。すなわち、 $n$  個の幾何誤差を求めるためには、測定条件の数  $m_C$  は次式を満足する必要がある。

$$m_C \geq \frac{n}{2t_F + 1} \quad (5)$$

### 3.3 測定条件の候補

各送り軸の動作を決定するテーパーコーン DBB パラメータが測定条件である。しかし、2.1 節で述べたように、テーブル側球中心位置 ( $O_x, O_y, O_z$ ) の取り付け誤差 ( $\delta x_{WC}, \delta y_{WC}, \delta z_{WC}$ ) も幾何誤差とみなして同定対象としており、測定条件によってテーブル側球の中心位置を変えると、その分だけ取り付け誤差が増加する。このため、テーブル側球の中心位置を固定する必要がある。テーブル側球の中心位置を固定すると、円錐底面の中心位置が変化しないが、 $D$  や  $\phi$  などの他のテーパーコーン DBB パラメータが変化すれば、円錐底面の中心位置が移動し、幾何誤差の感度も変化する。

一方、既存の DBB は測長範囲が数 mm 以内であり、DBB 長さ  $L$  を大きく変化できない。そこで、DBB 長さ  $L$  を固定し、最適測定条件セット選定時の測定条件の候補から除外する。

以上をまとめると、選定する測定条件としてのテーパーコーン DBB パラメータは、 $D, \theta, \phi$  の 3 個となる。

### 3.4 測定制約パラメータ

実際に機械を用いてテーパーコーン DBB 測定を行う際には、測定器の干渉、機構の特異点、送り軸の可動範囲などの制約が存在し、測定できない場合がある。このような測定の制約となるパラメータを測定制約パラメータと呼ぶことにする。本研究では、以下の 4 つの測定制約パラメータを考慮する。

- (1) DBB の軸と工具側球面座中心軸との間の角度  $\eta_A$
- (2) DBB の軸とテーブル側球面座中心軸との間の角度  $\eta_B$
- (3) 円錐半頂角と円錐傾斜角の角度差  $\psi$
- (4) A 軸動作最大角度  $\alpha_R$

図 4 に各測定制約パラメータを示す。

(1)と(2)について説明する。DBB 測定において、測定条件によっては DBB のバーと 2 つの球面座が干渉する場合がある。これら干渉を回避するためには、 $\eta_A$  と  $\eta_B$  が閾値以上である必要がある。 $\eta_A, \eta_B$  は次式から求めることができる。

$$\begin{cases} \eta_A = 90^\circ - \theta + \sigma \\ \eta_B = 90^\circ - |\phi| + \sigma \end{cases} \quad \left( \sigma = \cos^{-1} \frac{D}{2L} \right) \quad (6)$$

(3)について説明する。 $|\theta| = |\phi|$  の条件は機構の特異点となり、

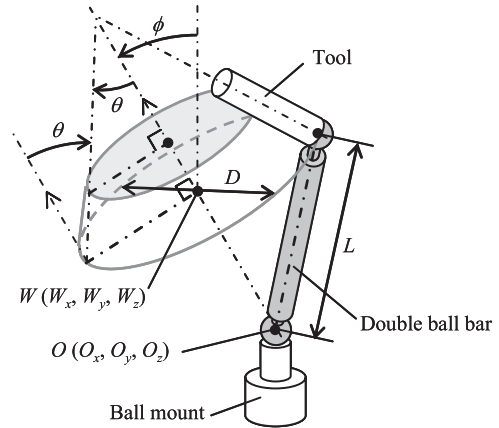


Fig. 2 Taper cone DBB parameters

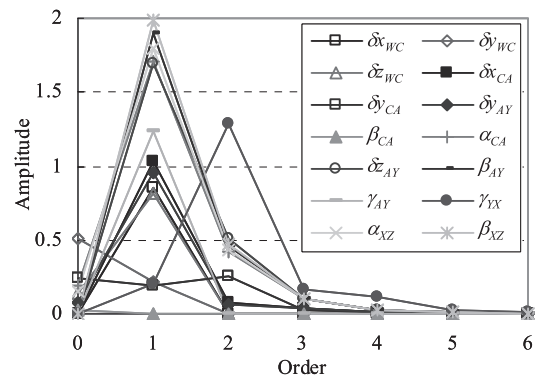


Fig. 3 Fourier series amplitude of sensitivity coefficient

( $L = 100, D = 170, \theta = 30^\circ, \phi = 75^\circ, O_x = 0, O_y = -100, O_z = 100$ )

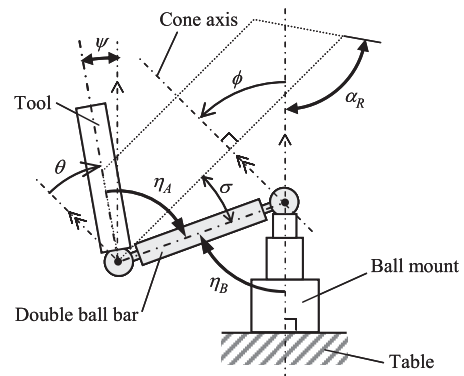


Fig. 4 Measurement constraint parameters

その近傍も含めて測定条件としては適さない<sup>2)</sup>。したがって、 $|\theta|$  と  $|\phi|$  をある程度離れた値にする必要がある。 $|\theta|$  と  $|\phi|$  の差の絶対値を円錐半頂角と円錐傾斜角の角度差  $\psi$  と呼ぶ。機構特異点およびその近傍を回避して測定するためには、 $\psi$  が閾値以上である必要がある。 $\psi$  は次式で表すことができる。

$$\psi = ||\theta| - |\phi|| \quad (7)$$

(4)について説明する。旋回軸（対象機における A 軸）は測定動作では 1 周回転できず、通常、その可動範囲も狭いため、測定条件の大きな制約となる。テーパーコーン動作の A 軸動作指令の最小・最大値は同じ符号であるため<sup>2)</sup>、それらの絶対値の大きい方が、同じ符号の A 軸動作リミット値の絶対値以下で測定する必要

がある。A 軸動作指令値の絶対値の最大値を A 軸動作最大角度  $\alpha_R$  と呼ぶ。  $\alpha_R$  は次式となる。

$$\alpha_R = |\theta| + |\phi| \quad (8)$$

### 3.5 最適測定条件の選定手順

幾何誤差を精度良く同定するためには、幾何誤差の感度が高い測定条件を用いる必要がある。また、3.2 節で述べたように、複数の測定条件が必要になるため、測定条件の組合せ方も重要となる。本研究では測定条件セットの最適性の指標として、幾何誤差の感度行列の条件数（最大特異値と最小特異値の比）を用いる。すなわち、感度行列の条件数が最も小さい測定条件セットを最適測定条件セットとする。

最適測定条件セットの選定は以下のステップで行う。

- 1)  $D$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  を任意の範囲内で任意の間隔で変化させ、測定制約パラメータが閾値を満足する測定条件（以下、測定可能条件と呼ぶ）を求める。ここで、各パラメータの変化範囲は、 $D$  が  $0 \sim 2L$ 、 $\theta$  と  $\phi$  が  $-90 \sim 90^\circ$  以内とする。
- 2) 各測定可能条件について、 $t_F$  次までのフーリエ級数感度行列  $S_{Dt}$  を求める。
- 3) 次数  $t_F$  と同定する幾何誤差の数  $n$  から測定条件の数  $m_C$  を決める。
- 4) 測定可能条件の中から  $m_C$  条件を選び、その測定条件セットのフーリエ級数感度行列  $S_F$  の条件数を求める。
- 5) 4) の計算を測定条件セットの組合せの総数だけ行う。
- 6) 条件数が最も小さい感度行列の測定条件セットを最適測定条件セットとする。

なお、 $D$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  の変化範囲・間隔や  $t_F$ ,  $m_C$  によっては、5) の計算量・時間が膨大になるため、計算環境を考慮してこれらの値を決定する。

## 4. 幾何誤差の補正

### 4.1 幾何誤差補正システム

同定した幾何誤差を補正することで運動精度を向上させる。このため、幾何誤差モデルを応用し、工具先端点の位置の誤差を補正する幾何誤差補正システムを開発する。

幾何誤差補正システムの制御の流れを図 5 に示す。幾何誤差補正值演算部では、NC プログラムをもとに生成された送り軸動作指令値を用いて各軸の補正值が演算される。各軸の補正值はそれぞれの軸の指令値に加算され、各軸のサーボコントローラに送られる。補正された指令値に対してサーボモータが各軸を制御することで、工具先端点の位置誤差が補正される。

## 5. 検証

### 5.1 最適測定条件セットの選定

最適測定条件セットの選定を、3.5 節で述べたステップに従って行う。テーブル側球の中心位置については、運動誤差に対する幾何誤差の感度を高くするため、 $O_x = 0\text{mm}$ 、 $O_y = -100\text{mm}$ 、 $O_z = 100\text{mm}$  とする。一方、DBB 長さについては、使用する DBB (RENISHAW 製 QC20-W) の基本長さである  $L = 100\text{mm}$  とする。以下に選定の過程を示す。

- (1) 表 2 中に示すようにテーパコーン DBB パラメータを変化させ、表 3 中に示す測定制約パラメータの閾値を満足する測定可能条件を求めた。その結果、207 条件が得られた。
- (2) 得られた測定可能条件についてフーリエ級数感度行列を求めた。ここで、フーリエ級数の次数  $t_F = 3$  とした。同定対象

の幾何誤差の数  $n = 14$  であるため、式(5)から、必要な測定条件の数  $m_C \geq 2$  が得られた。

- (3) 測定条件の数  $m_C = 2 \sim 4$  として、全ての組合せ（それぞれ、21321, 1456935, 74303685 通り）の測定条件セットの感度行列の条件数を計算した。その結果、表 4 中に示す条件セット O4 が最適測定条件セットとなった。ここで、条件セット O4 の 4 番目の条件（以下、O4-4）は、テーパコーン動作ではなく円運動パターンになっている。また、表中の条件セット O2 では条件数が非常に大きな値であるため、3 条件以上が必要であることがわかる。

### 5.2 幾何誤差の同定シミュレーション

前節で得られた最適測定条件セットにより幾何誤差同定精度が向上するかをシミュレーションにより検証する。幾何誤差が存在するとして、表 4 中の条件セット O3 と O4 において、テーパコーン DBB 測定の運動誤差のシミュレーションを行う。運動誤差のシミュレーション結果に、 $-0.5 \sim +0.5\mu\text{m}$  の疑似乱数を測定

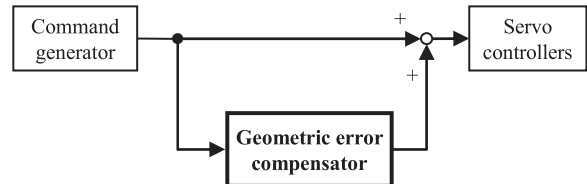


Fig. 5 Control flow of geometric error compensation system

Table 2 Taper cone parameters

| Parameter     | Start | End | Pitch |
|---------------|-------|-----|-------|
| $D$ mm        | 50    | 200 | 25    |
| $\theta$ deg. | 0     | 90  | 15    |
| $\phi$ deg.   | -90   | 90  | 15    |

Table 3 Constraint parameters

| Parameter        | Threshold value |
|------------------|-----------------|
| $\lambda_A$ deg. | 75              |
| $\lambda_B$ deg. | 75              |
| $\psi$ deg.      | 10              |
| $\alpha_R$ deg.  | 105             |

Table 4 Selected optimum condition set

| Condition set        |                 | O2      | O3   | O4   |
|----------------------|-----------------|---------|------|------|
| Number of conditions |                 | 2       | 3    | 4    |
| Condition number     |                 | 3350403 | 63.5 | 22.7 |
| Condition 1          | $D_1$ mm        | 125     | 50   | 75   |
|                      | $\theta_1$ deg. | 45      | 15   | 30   |
|                      | $\phi_1$ deg.   | 60      | 45   | 60   |
| Condition 2          | $D_2$ mm        | 125     | 150  | 50   |
|                      | $\theta_2$ deg. | 60      | 30   | 60   |
|                      | $\phi_2$ deg.   | −30     | −45  | −30  |
| Condition 3          | $D_3$ mm        | −       | 50   | 125  |
|                      | $\theta_3$ deg. | −       | 60   | 60   |
|                      | $\phi_3$ deg.   | −       | −30  | 45   |
| Condition 4          | $D_4$ mm        | −       | −    | 175  |
|                      | $\theta_4$ deg. | −       | −    | 0    |
|                      | $\phi_4$ deg.   | −       | −    | −30  |



誤差として与え、生成した運動誤差軌跡を用いて幾何誤差の同定を行う。ここで、比較のために、感度行列の条件数が比較的大きい 3 条件の条件セット S3 ( $D_1=160$ ,  $\theta_1=0$ ,  $\phi_1=0$ ,  $D_2=173$ ,  $\theta_2=30$ ,  $\phi_2=75$ ,  $D_3=173$ ,  $\theta_3=30$ ,  $\phi_3=-15$ ) についても同様に同定を行う。

シミュレーション結果を表 5 に示す。表から、条件セットによって同定誤差は大きく変化し、条件セット O4 の同定誤差が最も小さいことがわかる。

### 5.3 幾何誤差の同定と補正の検証実験

実機において、提案する幾何誤差同定法を行い、同定した幾何誤差を補正值として補正することで、運動精度が向上するかを検証する。このため、5.1 節で選定した最適測定条件セット O4 においてテーパコーン DBB 測定を行い、測定結果を用いて幾何誤差の同定を行う。得られた同定値を補正值として 4.1 節の幾何誤差補正システムに入力し、機械に補正を適用してテーパコーン DBB 測定を行う。そして、補正有無での測定軌跡を比較する。

補正有無でのテーパコーン測定軌跡と幾何誤差同定値によるシ

ミュレーション軌跡の真円度を図 6 に示す。ここで、同定計算に用いていない条件セット O3 の条件 O3-1, O3-2 の測定結果についても図 6 に示している。図から、補正によって、テーパコーン測定軌跡の真円度が 6~19 $\mu\text{m}$  から 3~14 $\mu\text{m}$  に向上していることがわかる。

## 6. 結 言

テーブル旋回形 5 軸制御工作機械において、テーパコーン DBB 測定結果を用いて、直進軸と回転軸に関する幾何誤差を同時に同定し、同定した幾何誤差をもとに補正制御することで、運動精度が向上することを示した。本論文の主な結論は以下の通りである。

- (1) テーパコーン DBB 測定により取得した運動誤差軌跡を用いた幾何誤差の同定法を提案した。
- (2) 測定器の干渉などの測定の制約を考慮した測定可能条件の中から、幾何誤差の感度行列の条件数を指標として最適な測定条件セットを選定する方法を提案した。
- (3) 幾何誤差による工具先端点の位置誤差を補正できる幾何誤差補正システムを開発した。
- (4) 提案した最適測定条件セットの選定法により、4 条件の測定条件を選定し、この測定条件セットの有効性をシミュレーションにより示した。
- (5) 実機において、選定した最適測定条件セットでテーパコーン DBB 測定を行い、提案した同定法を用いて、直進軸と回転軸に関する 11 個の幾何誤差を同定した。さらに、開発した幾何誤差補正システムによりこれら幾何誤差を補正することで、テーパコーン運動精度を向上できた。

## 参 考 文 献

- 1) Aerospace Industries Association of America inc.: NAS 979 Uniform Cutting Tests – NAS Series Metal Cutting Equipment Specifications, (1969) 34.
- 2) T. Matsushita, T. Oki, A. Matsubara: The Accuracy of Cone Frustum Machining by Five-axis Machine Tool with Tilting Table, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., **71**, 6, (2008) 632 (in Japanese).
- 3) A. Saito, M. Miyakawa, M. Tsutsumi: Evaluation Method of Positional and Geometric Deviation Using Simultaneous 4-axis Control Technique in 5-axis Machining Center, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., **67**, 2, (2001) 306 (in Japanese).
- 4) A. Saito, M. Tsutsumi, K. Ushiku: Development of Calibration Methods of 5-axis Controlled Machining Center (2nd Report) – Estimation of Positional and Angular Deviation by Means of Simultaneous 3-axis Motion, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., **69**, 2, (2003) 268 (in Japanese).
- 5) B. Briggmann, W. Knapp: Model-based 'Chase-the-Ball' Calibration of a 5-Axes Machining Center, CIRP Annals – Manufacturing Technology, **55**, 1, (2006) 531.
- 6) K. Utsumi, T. Kosugi, A. Saito, M. Tsutsumi: Measurement Method of Geometric Accuracy of Five-axis Controlled Machining Centers (Measurement by a Master Ball and a Displacement Sensor), J. Jpn. Soc. Mech. Eng., C, **72**, 719, (2006) 2293 (in Japanese).
- 7) S. Ibaraki, M. Sawada, A. Matsubara, T. Matsushita: Machining Tests to Identify Kinematic Errors on Five-axis Machine Tools, Precision Engineering, **34**, 3, (2010) 387.
- 8) S. Ibaraki, T. Iritani, T. Matsushita: Error Calibration on Five-axis Machine Tools by on-the-machine Measurement of Artifacts using a Touch-trigger Probe, Proc. 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, **2**, (2010) 249.
- 9) Y. Ihara, S. Nakamura, J. Okuyama, R. Moriguchi: Ball Bar Measurement Equivalent to Cone Frustum Cutting on Multi-axis Machine (2nd Report: Measurement for the Machine Which Has Rotary Axes in the Table), 2005 JSPE Spring Meeting, (2005), 951 (in Japanese).
- 10) 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 –, 養賢堂, (1997) 70 (in Japanese).
- 11) Y. Takeda, G. Shen, H. Funabashi: Kinematic Calibration of In-Parallel Actuated Mechanisms Using Fourier Series (1st Report, Calibration Method and Selection Method of the Set of Measurement Paths), J. Jpn. Soc. Mech. Eng., C, **68**, 673, (2002) 246 (in Japanese).

| Geometric error  | Given value <sup>*1</sup> | Identification error <sup>*1*2</sup> |          |                        |
|------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------|------------------------|
|                  |                           | C-set O4                             | C-set O3 | C-set S3 <sup>*3</sup> |
| $\delta x_{CA}$  | 10.0                      | 0.9                                  | -2.5     | 11.0                   |
| $\delta y_{CA}$  | 30.0                      | 0.7                                  | -0.2     | 0.8                    |
| $\delta y_{AY}$  | -20.0                     | -0.8                                 | -1.6     | -0.8                   |
| $\delta z_{AY}$  | -15.0                     | -0.3                                 | 1.1      | -4.1                   |
| $\alpha_{CA}$    | 5.2                       | 0.1                                  | 0.9      | -3.3                   |
| $\beta_{CA}$     | 3.5                       | -0.7                                 | 3.7      | 6.4                    |
| $\beta_{AY}$     | -1.7                      | 0.2                                  | -0.8     | -7.4                   |
| $\gamma_{AY}$    | 7.0                       | 0.3                                  | -2.6     | -8.6                   |
| $\gamma_{YX}$    | -5.2                      | 0.6                                  | -0.5     | 0.2                    |
| $\alpha_{XZ}$    | 5.2                       | -0.1                                 | -1.1     | 2.5                    |
| $\beta_{XZ}$     | 1.7                       | -0.5                                 | 0.7      | -1.8                   |
| $\delta x_{WC}$  | -30.0                     | 0.1                                  | 1.2      | 1.7                    |
| $\delta y_{WC}$  | 20.0                      | 0.0                                  | 0.2      | 0.3                    |
| $\delta z_{WC}$  | 50.0                      | -0.4                                 | -1.3     | 0.4                    |
| Condition Number |                           | 22.7                                 | 63.5     | 203.5                  |

\*1  $\mu\text{m}$  or  $10^{-5}$  rad

\*2 Identification error = Identified value – Given value

\*3  $D_1=160$ ,  $\theta_1=0$ ,  $\phi_1=0$ ,  $D_2=173$ ,  $\theta_2=30$ ,  $\phi_2=75$ ,  $D_3=173$ ,  $\theta_3=30$ ,  $\phi_3=-15$

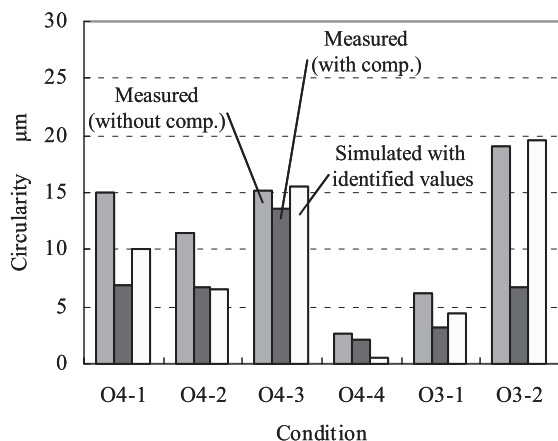


Fig. 6 Circularity of conic trajectory with/without compensation