

# アーティファクトの機上計測に基づく5軸制御工作機械の精度キャリブレーション法

京都大学 ○入谷 健元, 茨木 創一, オークマ株式会社 松下 哲也

Error calibration for 5-axis controlled machine tools based on on-machine geometric measurement of artifact  
 Kyoto University Takeyuki Iritani, Soichi Ibaraki, Okuma Corporation Tetsuya Matsushita  
 Static position and orientation errors of the axis average line of a rotary axis, collectively called geometric errors, represent the most fundamental error motions in five-axis kinematics. This paper proposes a scheme to calibrate geometric errors of rotary axes by on-the-machine measurement of artifacts by using a contact-type touch-trigger probe installed on the machine's spindle. A touch probe is generally used for on-the-machine measurement of the accuracy of workpieces. This paper uses it to calibrate error motions of the machine tool by measuring an artifact of the known geometric accuracy.

## 1. 緒言

5軸制御工作機械（以下、5軸機と呼ぶ）の高精度化を図るための基礎として、その運動精度を正確かつ高能率に測定・評価する手法を確立することが重要である。回転軸の静的なオフセット、傾き（倒れ）の誤差は一般に幾何誤差と総称され、5軸機の最も基本的な誤差要因のひとつと言える。現在、ISO規格では、主に主軸旋回型の5軸機を対象とした幾何誤差の静的測定法が定められている(ISO 10791-1~3)。また、ボールバー測定を利用した幾何誤差の測定法も規格化の努力が進んでいる。しかし、このボールバー測定は異なる測定のために装置のセットアップをオペレーターが変更しなくてはならず、またセットアップや測定はある程度の技術が必要であるため、測定に習熟したオペレーターが常に立ち会って測定を行わなくてはならない。本研究では、5軸機の幾何誤差を、より短時間に、特に一旦機械をスタートさせれば自動的に測定が終了するような形で評価するための測定法を提案し、5軸機の誤差要因を診断するシステムを構築することを目的とする。近年、マシニングセンタの主軸に装着可能で、繰り返し精度1μm以下の高精度なタッチプローブ（接触式プローブ）が発売されている。このタッチプローブは本来、加工物の形状精度をマシニングセンタ上で機上計測するために用いられるが、形状精度が既知であるアーティファクトを機上計測することで、逆に工作機械の幾何誤差をキャリブレーションできると考える。この高精度タッチプローブを活用し、自動的な機上計測による幾何誤差の定量的なキャリブレーションを行う実験を行った。

## 2. 5軸制御工作機械の構造と幾何誤差

### 2.1 5軸制御工作機械の構造

本研究の対象とする5軸機は、図1に示すようなX,Y,Z軸の3つの直進軸とA,C軸の2つの回転軸からなるテーブル旋回型5軸制御工作機械とする。

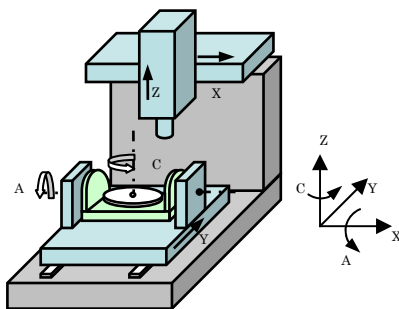


Fig.1 The configuration of a five-axis machine tool considered in this paper

### 2.2 同定の対象とする幾何誤差

直進・回転軸それぞれの位置及び姿勢の誤差は、3つの並進誤差と各軸周りの3つの回転誤差を表す計6個の幾何誤差によって定義される。冗長なパラメータを排除し、本研究では表1に示す8つの幾何誤差を同定の対象とする。

Table 1 Geometric errors to be identified

$\alpha_{AY}$	Angular error of A-axis about X-axis with respect to Y-axis.
$\beta_{AY}$	Tilt error of A-axis about Y-axis with respect to Y-axis.
$\gamma_{AY}$	Tilt error of A-axis about Z-axis with respect to Y-axis.
$\beta_{CA}$	Squareness error of C-axis to A-axis.
$\delta x_{AY}$	Linear shift of A-axis in X-direction with respect to Y-axis.
$\delta y_{AY}$	Linear shift of A-axis in Y-direction with respect to Y-axis.
$\delta z_{AY}$	Linear shift of A-axis in Z-direction with respect to Y-axis.
$\delta y_{CA}$	Linear shift of C-axis in Y-direction with respect to A-axis.

### 3. 幾何誤差同定のアルゴリズム

測定対象の5軸機の幾何誤差を同定することを目的とした、アーティファクトの機上測定パターンの模式図を図2に示す。アーティファクトは直方体形状のものを使用する。アーティファクトの寸法・形状は最初に機上計測するため、寸法・形状精度は特別に高い必要はない。

一例として、図2(b)の測定パターン2-aについて説明する。まず、図の①の位置にアーティファクトがある状態の時に、X軸正の方向からプローブをアーティファクト側面にアプローチし、側面上の測定点のテーブル回転中心を基準としたX位置( $x_1$ とする)を測定する。ただし実際には、アーティファクト側面上の複数の測定点に対してX位置を測定し、その平均値を $x_1$ とする。次に、C軸を180度回転させ、図中の②の位置に移動させ、今度はX軸負の方向から同じ測定点にプローブをアプローチし、同様にX位置( $x_2$ とする)を測定する。 $x_1$ と $x_2$ の和には、アーティファクトの取り付け位置の誤差や、その寸法や形状誤差の影響は現れず、5軸機の幾何誤差のみが影響する。全ての測定パターンについて、同様の考え方で幾何誤差との関係式を導くことができる。測定点の座標位置と、幾何誤差の関係式を以下に示す。

- ・測定パターン 1  $z_2 - z_1 = 2C_0 \alpha_{AY}$
- ・測定パターン 2-b  $y_2 + y_1 = 2(\delta y_{AY} + \delta y_{CA}) - 2H \alpha_{AY}$
- ・測定パターン 3-a  $x_2 - x_1 = Z_0 \beta_{AY} + Y_0 \gamma_{AY}$
- ・測定パターン 3-c  $y_2 + z_1 = \delta z_{AY} + \delta y_{AY}$
- ・測定パターン 2-a  $x_2 + x_1 = 2\delta x_{AY} + 2H(\beta_{AY} + \beta_{CA})$
- ・測定パターン 2-c  $z_2 - z_1 = 2C_0(\beta_{AY} + \beta_{CA})$
- ・測定パターン 3-b  $z_2 - y_1 = \delta z_{AY} - \delta y_{AY}$
- ・測定パターン 4  $\text{angle}(y_2) + \text{angle}(y_1) = 2(\gamma_{AY} + \beta_{CA})$

ただし、各測定パターンにおいて、回転前(①)の測定方向が例えば X 方向であれば、テーブル回転中心を基準とした X 位置を  $x_1$  とする。同様に回転後(②)の測定方向が例えば X 方向であれば、測定点の X 位置を  $x_2$  とする。angle はアーティファクト側面上の複数の測定点の座標から、X 軸方向に対する Z 軸まわりの角度を表す関数とする。 $C_0$  は図 2 (a) の①の状態において、テーブル回転中心からアーティファクトの重心までの距離を、 $H$  は A 軸の回転中心からプローブを接触させた位置までの Z 軸方向の距離を、 $Z_0$  と  $Y_0$  は図 2 (e) における①の測定位置と②の測定位置との間の Z, Y 方向それぞれへの移動距離を表す。これらの 8 つの式により、未知である 8 つの幾何誤差を全て同定することができる。

4. ケーススタディ

タッチプローブを利用した幾何誤差同定のための測定実験を行った。本実験では、測定対象のアーティファクトの寸法は約 100 mm×100 mm×150 mm、材質はアルミ合金 A5052 とした。タッチプローブとして、レニショー社 RMP60 (スタイラス先端での単一方向の繰り返し精度 (2σ 値): 約 1.0 μm) を用いた。

図 2 に示した全ての測定パターンを、計 4 回繰り返した。前述の式から同定した幾何誤差 (4 回の測定の平均値、及びばらつき) を表 2 に示す。

幾何誤差のうち、C 軸の回転中心の位置誤差を表す  $\delta x_{AY}, \delta y_{AY}, \delta z_{AY}$  及び A 軸の初期角度の誤差を表す  $\alpha_{AY}$  は、CNC の設定で容易に補正することができる。そこで、表 2 に示した幾何誤差の同定値の検証を行うため、この 4 つの幾何誤差を CNC 上で補正し、再度同様の測定実験を行った。補正後の幾何誤差の同定値を表 2 に合わせて示す。4 つの幾何誤差とも大きく低減しており、同定精度の検証がある程度行えたと言える。ただし、 $\delta x_{AY}, \delta y_{AY}$  には約 3 μm 程度の誤差があり、これはプローブの測定誤差、加工機の位置決め誤差、非再現性誤差の影響等が原因と考えられる。

5. 結 言

高精度タッチプローブを使用してアーティファクトを机上計測することにより、5 軸制御工作機械に内在する幾何誤差を同定する方法を示した。

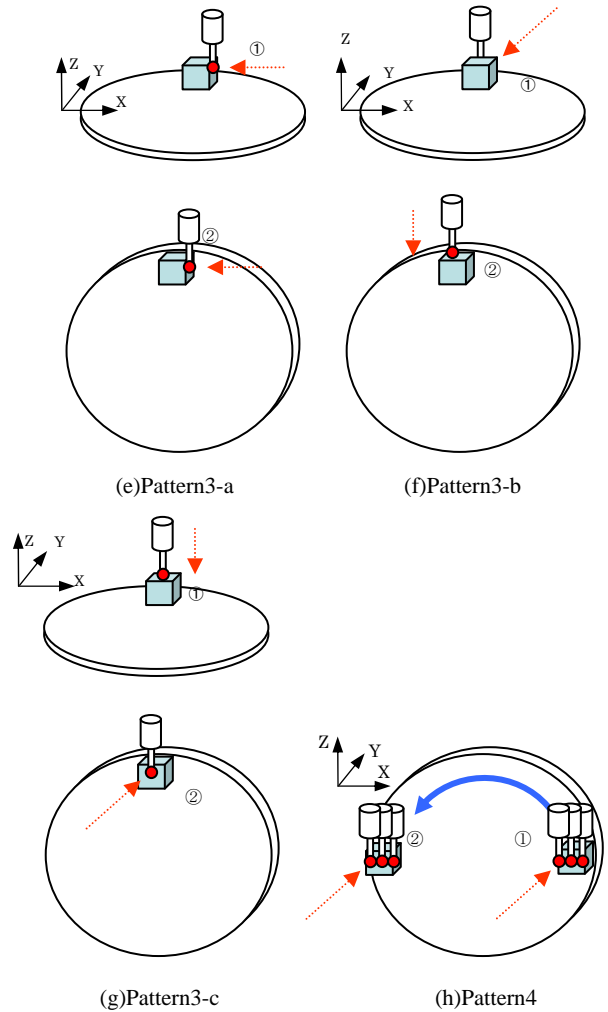
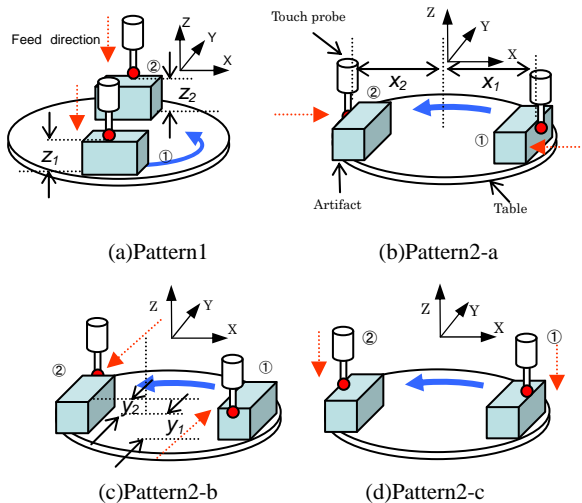


Fig.2 Measurement patterns for identification of geometric errors

Table 2 Identified geometric errors

Geometric error	Identified value (mean)	Deviation	Identified value after compensation of $\delta x_{AY}, \delta y_{AY}, \delta z_{AY}, \alpha_{AY}$
$\delta x_{AY} [\mu m]$	14.6	±2.1	3.0
$\delta y_{AY} [\mu m]$	23.2	±1.0	-2.4
$\delta z_{AY} [\mu m]$	27.7	±9.4	-0.2
$\delta y_{CA} [\mu m]$	3.9	±1.2	4.4
$\alpha_{AY} [10^{-3} \text{deg}]$	-0.5	±0.3	0.0
$\beta_{AY} [10^{-3} \text{deg}]$	-0.1	±0.3	-0.1
$\gamma_{AY} [10^{-3} \text{deg}]$	-0.5	±0.4	-0.5
$\beta_{CA} [10^{-3} \text{deg}]$	0.2	±0.5	0.3

参 考 文 献

- 1) 堤 正臣他: 5 軸制御マシニングセンタの運動精度試験方法標準化 —提案した ISO 規格—, 第 7 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2008), 95-96.
- 2) 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).