

5軸制御工作機械の幾何誤差同定を目的とした加工試験

Machining Tests to Identify Kinematic Errors on Five-axis Machine Tools

○学 入谷 健元 (京大) 正 茨木 創一 (京大)
澤田 昌広 (コマツ) 松下 哲也 (オークマ)

Takeyuki Iritani, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto
Soichi Ibaraki, Kyoto University
Masahiro Sawada, Komatsu Ltd.
Tetsuya Matsushita, Okuma Corporation

This paper proposes a set of machining tests for a five-axis machine tool to identify its kinematic errors, one of its most fundamental error sources. In each machining pattern, a simple side-cutting along a straight path using a straight end mill is performed. The relationship between geometric errors of the finished workpiece and the machine's kinematic errors is formulated based on the kinematic model of a five-axis machine. The identification of kinematic errors from geometric errors of finished workpiece is experimentally demonstrated on a commercial five-axis machining center, and the estimates are compared to those estimated based on ball bar measurements.

Key Words: Five-axis machine tools, machining test, kinematic errors, measurement

1 緒言

5軸制御工作機械(5軸加工機)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簡便に測定・評価する手法を確立することが重要である。現在、ISO規格では、主に主軸旋回型の5軸加工機を対象とした幾何誤差(2.2節参照)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¹⁾。一方で、5軸加工機の工作精度の評価を行うための加工試験法の規格は、ISO規格には存在しない。ただし、NAS979規格²⁾には円錐台の加工試験が規定されており、工作機械のメーカでは最終的な精度検査に広く普及している。円錐台加工試験の重要な問題点の一つとして、機械に内在する誤差要因と、加工物の形状誤差との関係が複雑で、加工物の形状誤差から機械の誤差要因を診断することが非常に難しいことが挙げられる。そこで本研究では、加工結果から機械に内在する誤差診断が可能な新しい加工試験法を提案する。診断対象とする誤差は5軸加工機の最も基本的な誤差要因である幾何誤差とする。本研究の最終的な目的は、提案した加工試験を実機に適用し機械に内在する幾何誤差の診断を行うことである。

2 5軸加工機の構造と幾何誤差

2.1 5軸加工機の構造

本研究では、図1に示す構造を持ったテーブル旋回型5軸加工機を対象とする。本研究では、テーブルが水平であるときを $A=0^\circ$ とする。

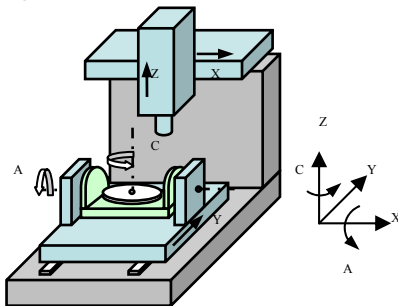


Fig.1 The configuration of a five-axis machine tool considered in this paper.

2.2 同定の対象とする幾何誤差

直進・旋回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³⁾を同定の対象とする。

Table 1 Kinematic errors to be identified.

α_{AY}	angular error of A-axis about X-axis with respect to Y-axis.
β_{AY}	angular error of A-axis about Y-axis with respect to Y-axis.
γ_{AY}	angular error of A-axis about Z-axis with respect to Y-axis.
β_{CA}	angular error of the center line of C-axis about Y-axis with respect to that of A-axis.
δx_{AY}	linear shift of A-axis in X-direction with respect to Y-axis.
δy_{AY}	linear shift of A-axis in Y-direction with respect to Y-axis.
δz_{AY}	linear shift of A-axis in Z-direction with respect to Y-axis.
δy_{CA}	linear shift of C-axis in Y-direction with respect to A-axis.

3 幾何誤差同定を目的とした加工試験

C軸に関する幾何誤差を同定するための加工パターンは、パターン1-a,1-b,2-a,2-bの計4パターンから成る。それぞれの模式図を図2(a)~(d)に示す。一例として、パターン1-aについて説明する。まず、 $C=0^\circ, A=0^\circ$ の状態でのX方向に加工①②③を行う。その後C軸を 180° 回転させ、加工④を行う。加工①②は基準面を作成し、加工③④によりC軸の回転が加工形状誤差に及ぼす影響を調べる。全てのパターンで、加工はストレートエンドミルを用いた側面加工(ダウンカット)とする。これらの加工物の形状誤差は、機械の幾何誤差と以下に示す関係を持つ。なお本研究では、直進軸の運動誤差を旋回軸のそれと比べて十分小さいと仮定する。

- 基準面の誤差(加工①②によって形成される段の側面間の距離のノミナル値からの誤差)

$$\Delta L_1^{1a} = -2d, \quad (1)$$

- 側面の幅の誤差(加工③④によって形成される段の側面間の距離のノミナル値からの誤差)

$$\Delta L_2^{1a} = 2(\delta y_{CA} + 2\delta y_{AY}) - 2(\alpha_{AY} + \alpha_{YZ})h_2^{1a} - 2d, \quad (2)$$

- 底面の高さの誤差(加工③④によって形成される段の底面のZ方向位置の差)

$$\Delta H^{1a} = \alpha_{AY}(2C_y + L_1^{1a}) \quad (3)$$

- 底面の角度の誤差 (加工③④)によって形成される段の底面の Y 軸周りの角度の差

$$\theta^{1a} = 2(\beta_{CA} + \beta_{AY}) \quad (4)$$

ただし, d_r は工具径のノミナル値からの誤差, h_2^{1a} は加工③④によって形成される段の底面の Z 方向位置 (A 軸中心からの距離) のノミナル値, L_1^{1a} は加工①②によって形成される段の側面間の距離のノミナル値, (C_x, C_y) はそれぞれワーク中心の (X, Y) 座標 ($(C_x, C_y) = (0, 0)$ が C 軸中心と定義する) を表す. なお, α_{YZ} は直交 3 軸間における Y 軸と Z 軸の直角度を表す. 他のパターンについても, 同様に加工物の形状誤差と, 機械の幾何誤差の関係が定式化できる. また, A 軸に関する幾何誤差を同定するための加工パターンを計 6 パターン提案した. そのうちのパターン 3-a, 3-b, 4-a, 4-b を図 3 (a)~(d) に示す.

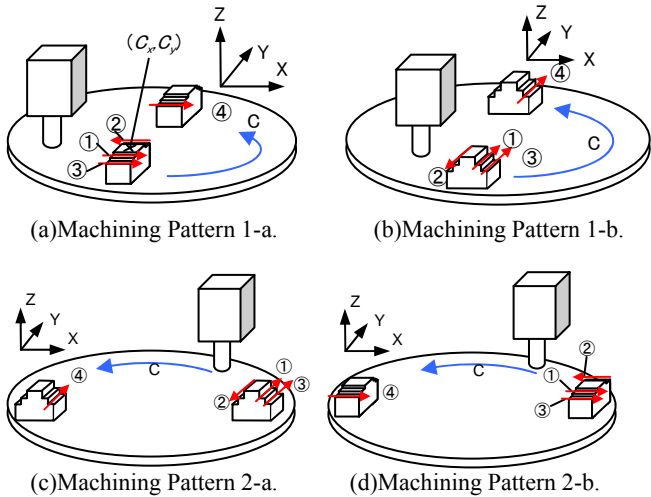


Fig.2 Machining Patterns for identification of kinematic errors associated with C-axis.

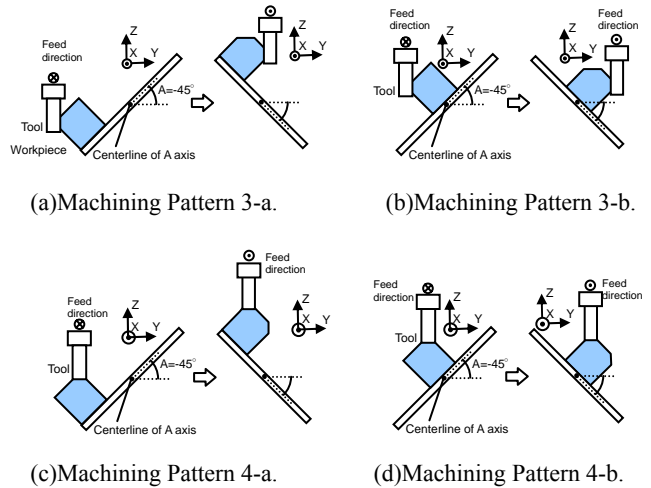


Fig.3 A part of Machining Patterns for identification of kinematic errors associated with A-axis.

4 ケーススタディ

図 1 に示す構造を持つ 5 軸加工機を用いて, 提案した加工試験を行った. 実験条件を表 2 に示す. 実験では, 複数のパターンを同じワークに加工するため, 図 4 に示すようにピラミッド上の加工を行った. ワーク 1 はパターン 1-a~2-b, ワーク 2 はパターン 3-a~6 を加工する. 3 次元測定器を用いて加工物の形状誤差を測定した結果から得られた幾何誤差と, ダブルボールバー (DBB) 測定¹⁾を用いた運動誤差測定から得られた幾何誤差の比較を表 3 に示す. ただし, 並進誤差 $\delta x_{AY}, \delta y_{AY}, \delta z_{AY}$ は加工試験時に再調整するため, 比較すること

はできない.

Table 2 Major machining conditions.

Tool	a sintered carbide straight end mill, $\phi 20$ mm, two flutes
Workpiece	Aluminum alloy, JIS A5052
Spindle speed	$5,000 \text{ mm}^{-1}$
Feedrate	1,000 mm/min
Coolant	Water-solvent emersion
Radial depth of cut	0.1 mm for semi-finishing, and then finishing at the same path.

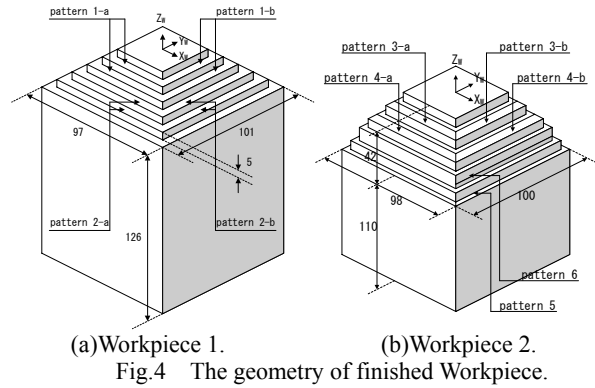


Table 3 Kinematic errors estimated from geometric errors of finished workpiece, in comparison with the estimates by ball bar measurements.

Kinematic error	Estimates by machining tests	Estimates by ball bar measurements
α_{AY}	0.0007°	0.0001°
β_{AY}	-0.0030°	-0.0071°
γ_{AY}	-0.0040°	-0.0081°
β_{CA}	0.0020°	0.0060°
δx_{AY}	11.9 μm	—
δy_{AY}	-4.8 μm	—
δz_{AY}	-231.1 μm	—
δy_{CA}	-6.0 μm	3.4 μm

5 結言

本研究により得られた主な結論は以下のとおりである.

- 5 軸制御工作機械の性能評価試験として, 機械に内在する幾何誤差の同定が可能な加工試験を提案した.
- 提案する加工試験の加工形状と幾何誤差との関係式を構築し, 加工結果から幾何誤差を同定する方法を提案した.
- 提案した加工試験を実機に適用し幾何誤差の同定を行った.
- 提案する加工試験による同定値と DBB 測定装置を用いた同定方法による同定値とを比較した. 回転誤差に関して, 加工試験による同定値と DBB 測定装置による同定値は回転の向きは一致しているが, 最大 0.0041° の差が見られる.

6 参考文献

- 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.
- NAS979, 1969, Uniform Cutting Test —NAS Series, Metal Cutting Equipments
- 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).