

R-test を用いた 5 軸制御加工機の運動誤差の測定と補正 (第 1 報)

- R-test 測定の手順と 5 軸制御加工機の幾何誤差の同定 -

京都大学 ○茨木創一, 京都大学 大山智瑛, 大坪技術研究所 大坪寿

Measurement and compensation of motion errors on 5-axis machine tool by R-test (First report)
-Procedure of R-test measurement and identification of geometric errors on 5-axis machine tool-

Kyoto University Soichi IBARAKI, Kyoto University Chiaki OYAMA, Otsubo Engineering Research Center Hisashi OTSUBO

The inclusion of the application of the ball bar measurement to the accuracy calibration of five-axis machine tools into the revision of ISO standards is currently under the discussion. This paper presents more efficient methodology to calibrate motion error sources on 5-axis machine tool by using the R-test. In the first report, we show the measurement principle of R-test and a method for evaluating geometric errors of 5-axis machine tools. An experimental application of R-test measurement is demonstrated on a commercial trunnion-type vertical 5-axis machining center. The identification of its kinematic errors is presented.

1. 緒言

5 軸制御加工機や複合加工機では通常、直進軸の上に旋回軸が積み重なる構成となるため、各軸の運動誤差、及びそれらの組み立ての際に誤差が累積し、最終的な工具・ワーク間の相対位置の誤差として現れる。工作機械の運動精度を高めるためには、まずそれを正確に計測することが必要である。5 軸制御加工機の運動誤差原因、特に 5 軸制御加工機の最も基本的な誤差要因と言える幾何誤差 (2 章参照) の診断法については、これまでの多くの研究が報告されてきている。その代表的なものは、直進 3 軸の運動精度の評価に広く普及しているボールバー測定を適用するアプローチである (例えば[1])。この方法は、ISO TC39/SC2 専門委員会において規格化が現在議論されている[2]。

ボールバー測定は、異なる測定のたびに装置のセットアップをオペレータ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、習熟したオペレータが立ち会い測定を行わなくてはならない。5 軸制御加工機の精度評価の効率化、自動化は重要な課題であると言える。また、旋回軸の位置決め誤差、振れ、重力による変形など、幾何誤差より複雑な誤差原因をボールバー測定を用いて測定することは難しい。

本研究では、5 軸制御加工機の誤差要因を自動的に、高能率に測定できる方法として、R-test[3]と呼ばれる測定法に注目し、誤差要因の診断法を構築することを目的とする。R-test 測定器は現在 IBS 社、Fidia 社等から市販され、ISO 10791-6 改定案[2]でもボールバー測定と並んで、これを用いた測定の規格化が議論されている。基本的な原理はボールバー測定と R-test で共通であるが、R-test は 3 次元変位を測定することができるため、一度の測定でより多くの情報を得ることができる。

第 1 報では、R-test 測定の基本的な測定手順と、それを用いた幾何誤差の同定について述べる。

2. 5 軸制御加工機の構成と内在する幾何誤差

本研究で対象とする 5 軸制御加工機の軸構成を図 1 に示す。加工機は、テーブル側に旋回 2 軸を有し、図のテーブルの位置が B 軸、C 軸が共に 0°の位置である。

表 1 に示すように、それぞれの旋回中心軸の位置・姿勢について、6 個の誤差パラメータが定義される。これらが一定値であるとすると、4 個のパラメータ δy_{CB} , δz_{CB} , β_{CB} , γ_{CB} は冗長となり、残る 8 個のパラメータは一般に幾何誤差と呼ばれる[4]。また本研究では、直進軸の運動誤差は回転軸のそれと比べて十分小さいと仮定する。

3. R-test 測定器を用いた 3 次元位置測定

3.1 R-test 測定器の概要

図 2 に R-test 測定器の概観図を示す。この測定器は、加工機の主軸端に取り付けられた基準球と、テーブル側に設置された 3 本の接触式変位センサから構成される。変位センサは、概ね球の中心を向くように設置されている。変位センサの変位を幾何

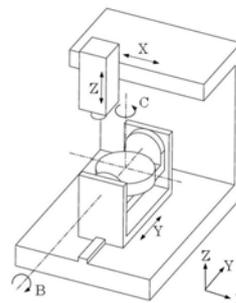


Fig.1: Configuration of 5-axis machine tool

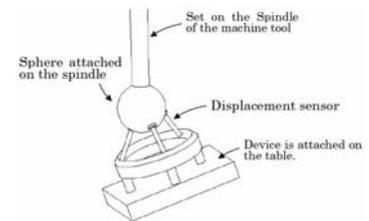


Fig.2: Overview of R-test device

Table 1: Definition of error parameters of rotary tables

δx_{BY}	Linear shift of B-axis from Y-axis in x direction
δy_{BY}	Linear shift of B-axis from Y-axis in y direction
δz_{BY}	Linear shift of B-axis from Y-axis in z direction
α_{BY}	Squareness error of B-axis to Z-axis
β_{BY}	Orientation error of B-axis around Y-axis
γ_{BY}	Squareness error of B-axis to X-axis
δx_{CB}	Linear shift of C-axis from B-axis in x direction
δy_{CB}	Linear shift of C-axis from B-axis in y direction
δz_{CB}	Linear shift of C-axis from B-axis in z direction
α_{CB}	Squareness error of C-axis to B-axis
β_{CB}	Orientation error of C-axis around B-axis
γ_{CB}	Angular error of C-axis

的に組み合わせ、基準球の 3 次元空間内の変位に換算する。

3.2 変位センサ方向のキャリブレーションと球位置の算出

変位センサの変位量から球の 3 次元位置を算出するためには、予め変位センサの方向を知る必要がある。また、主軸先端に取り付けた球の中心は主軸の回転中心軸上にあることが望ましいが、実際にはずれがあり、これが測定結果に影響を及ぼす。そのため、主軸の回転中心軸と球中心の距離 (以下、「球中心のずれ」と呼ぶ) を知る必要がある。

まず、加工機に数 mm 程度の直線指令を与えて球を動かし、この時の球の位置誤差は指令値と比べて十分小さいと仮定して、得られた変位センサの変位量から変位センサの方向を同定する。

次に、球を取りつけた主軸を割り出し機能を用いて回転させ、各回転角での変位センサの変位量を取得し、球中心のずれを同定する。

なお、本論文では回転テーブルに固定された座標系をワーク座標系、地面に固定された座標系をグローバル座標系と呼ぶ。R-test 測定器のセンサはテーブル上に設置されているため、変位センサの変位を換算して得られる球変位は、ワーク座標系上で定義されることに注意が必要である。

4. 幾何誤差の同定

本章では、2.1 節で述べた 8 つの幾何誤差を同定するための手順を示す。
まず、

$$x = (\delta x_{BY}, \delta y_{BY}, \alpha_{BY}, \alpha_{BY}, \beta_{BY}, \gamma_{BY}, \delta x_{CB}, \alpha_{CB})^T = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8)^T \quad (4.1)$$

と同定対象を定義する。k 番目の指令位置に対する、ワーク座標系上での球の変位ベクトルを

$$P(k) = (P_x(k), P_y(k), P_z(k))^T \quad (4.2)$$

とする。ただし、 $P_x(k)$ 等は形状創成理論[4]に基づき、図1に示す幾何的構造から得られる関数であり、指令位置と x に依存する。その Jacobian 行列：

$$A(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_x(k)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial P_x(k)}{\partial x_8} \\ \frac{\partial P_y(k)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial P_y(k)}{\partial x_8} \\ \frac{\partial P_z(k)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial P_z(k)}{\partial x_8} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

k 番目の指令位置に対して、球のベクトル変位 $P(k)$ が R-test 測定によって測定される。これを用いて、 x の成分が微小のとき以下の線形近似が成立する。

$$P(k) = A(k) \cdot x \quad (4.4)$$

これを用いて、最小二乗法により幾何誤差の同定を行う。

5. ケーススタディ

5.1 R-test 測定の手順

本実験では、以下に示す指令位置に対して、R-test 測定により球変位を測定する。B 軸は、90°から-90°まで 30°ずつ回転させる。C 軸は、B 軸の各位置において 30°ずつ回転角度の合計が 330°になるように位置決めし、これらを回転軸の指令値とする。また直進軸には、テーブル上に取り付けた R-test 測定器の変位センサの位置に対して、球が追従するような X, Y, Z 座標値を指令値として与える。

図1に示す構造を持つ5軸制御加工機において R-test 測定実験を行った。上記の計 84 個の各指令位置での変位センサの変位量から、球の3次元位置を算出し、そこから球中心のずれの影響を除去した結果を図3に示す。横軸はデータ番号を表している。

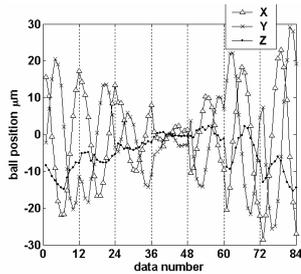


Fig.3: Ball position measured by R-test after removing the effect of the ball deviation

5.2 幾何誤差の同定

4 章で述べた方法により幾何誤差の同定を行い、得られた結果を表4に示す。

Table 4: Identified geometric errors

Translational errors [μm]		Rotational errors [mdeg]	
δx_{BY}	1.5	α_{BY}	0.5
δy_{BY}	-0.1	β_{BY}	0.4
δz_{BY}	-19.6	γ_{BY}	0.0
δx_{CB}	-4.9	α_{CB}	-0.4

5.3 R-test 測定器の位置のグローバル座標系での表示

本論文では、直線軸の運動誤差は回転軸と比べて十分小さい

と仮定する。そのため、グローバル座標系上から見た球は指令位置どおりにあるものとする。すると、R-test 測定で得られた球位置は、球位置を基準としたテーブル上に取り付けた R-test 測定器の位置の誤差であると考えられることができる。

主軸に取り付けられた球位置を基準として、R-test 測定により得られた測定器の位置および前節で同定した幾何誤差を用いてシミュレーションした測定器の位置をグローバル座標系に変換して表示する。なお、ここでは $B=30^\circ$ および 90° の場合において YZ 平面, XZ 平面に投影したものを図4に示し、誤差は 10,000 倍に拡大して表示している。また、図中の実線はテーブルのおおまかな位置と向きを表している。

これらから、以下が観察できる。指令位置 (●) に対して、実測の位置 (×) は例えば図4(c)では最大 25 μm 程度の誤差があるが、誤差は幾何誤差が大きく影響していることがわかる。しかし、幾何誤差の影響のシミュレーション結果 (△) と実測の位置 (×) の間にも小さくない誤差がある。例えば、図4(d)では、指令位置が垂直に配列されているのに対し、実測位置は Y 軸まわりの傾きが見られる。これは B 軸の回転位置決め誤差が原因であると考えられる。この誤差は幾何誤差には含まれないので、幾何誤差の影響のシミュレーション結果にはこの傾きは現れない。図(b)ではこの傾きの誤差は比較的小さく、B 軸の角度に依存することがわかる。

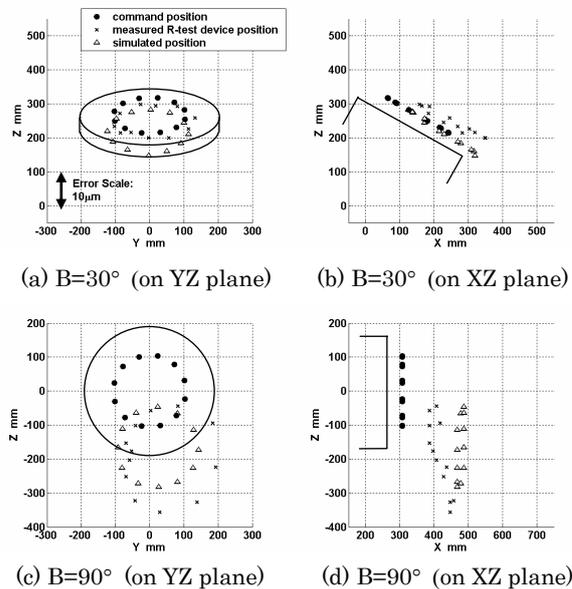


Fig.4: Ball position in the global coordinate system (Errors are magnified by a factor of 10,000)

6. 結言

本論文では、R-test 測定器を用いて、5 軸制御加工機の運動誤差の要因となる幾何誤差の診断を目的とし、その同定および影響のシミュレーションを行った。R-test 測定器を用いた測定は、セットアップの手間を大幅に省略でき、ボールバー測定に代わる測定方法として有効である。

実験値とシミュレーション結果の間の誤差は、幾何誤差以外の誤差要因が存在することを示している。

参考文献

[1] 斎藤 明德他：5 軸制御マシニングセンタのキャリブレーション法に関する研究 (第 2 報), 精密工学会誌, 69, 2 (2003) 268.
 [2] 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.
 [3] W.Knapp, B.Bringmann: Model-based 'Chase-the-Ball' Calibration of a 5-Axes Machining Center, Annals of the CIRP, 55/1, 2006.
 [4] 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.