

R-test を用いた 5 軸制御加工機の運動誤差の測定と補正

京都大学 ○大山智瑛, 茨木創一

要 旨

直進 3 軸に加え旋回 2 軸をもつ 5 軸制御加工機では、各軸の運動誤差が積み重なるため、従来の 3 軸の加工機に比べて運動精度が劣る場合が多い。そこで、本論文では R-test と呼ばれる測定器を用いて 5 軸制御加工機の運動精度を評価する方法を提案する。旋回軸の誤差要因となる誤差パラメータを、旋回軸の回転角度に依存するものとして、より複雑な誤差のモデル化が可能となる。

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。加工機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、特に最も基本的な誤差要因と言える幾何誤差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]。

本研究では、幾何誤差からさらに一般化した、旋回軸の位置決め角度に依存して変化する、角度依存の誤差パラメータを評価の対象とする。本研究では、R-test[3]と呼ばれる測定法に注目した。この測定法は、基本的な原理はボールバー測定と共通であるが、一度の測定でより多くの情報を得ることができ、高効率かつ自動的に加工機の運動誤差を測定することができる。本研究では、この R-test 測定を用いて、加工機の運動誤差要因の診断法を構築することを目的とする。

2. 5 軸制御加工機の軸構成と内在する誤差パラメータ

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。本研究では、これら 12 個の誤差パラメータについて、旋回軸の回転角度に依存して変化する関数として同定する。B 軸の誤差は B 軸の回転角度、C 軸の誤差は B 軸と C 軸の回転角度に依存して変化するものとする(例: $\delta_{XB}(B_i)$, $\delta_{XC}(B_i, C_j)$)。なお、直進軸の運動誤差は旋回軸のそれと比べて十分小さいと仮定する。

3. R-test を用いた測定

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 つの接触式変位センサから構成される。3 つの変位センサは、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 変位センサの方向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、現実にはずれがあり、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

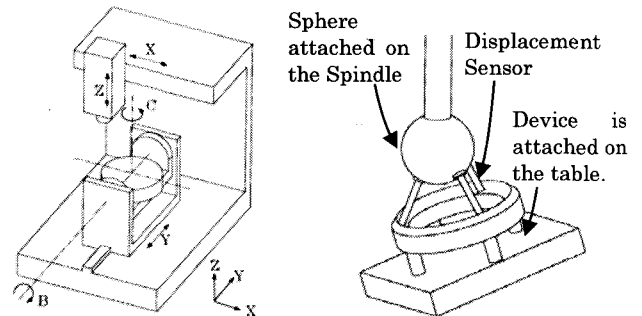


Fig.1: Configuration of 5-axis machine tool

Fig.2: Overview of R-test device

Table 1: Definition of error parameters of rotary axes

$\delta_{XB}(B_i)$	Linear shift of B-axis from Y-axis in X direction
$\delta_{YB}(B_i)$	Linear shift of B-axis from Y-axis in Y direction
$\delta_{ZB}(B_i)$	Linear shift of B-axis from Y-axis in Z direction
$\alpha_{BZ}(B_i)$	Squareness error of B-axis to Z-axis
$\beta_{BY}(B_i)$	Orientation error of B-axis around Y-axis
$\gamma_{BX}(B_i)$	Squareness error of B-axis to X-axis
$\delta_{XC}(B_i, C_j)$	Linear shift of C-axis from B-axis in X direction
$\delta_{YC}(B_i, C_j)$	Linear shift of C-axis from B-axis in Y direction
$\delta_{ZC}(B_i, C_j)$	Linear shift of C-axis from B-axis in Z direction
$\alpha_{CB}(B_i, C_j)$	Squareness error of C-axis to B-axis
$\beta_{CB}(B_i, C_j)$	Orientation error of C-axis around B-axis
$\gamma_{CB}(B_i, C_j)$	Angular error of C-axis

し、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。この時、球の位置誤差は指令値と比べて十分小さいと仮定する。

次に、主軸の割出し機能を用いて球を回転させ、各回転角度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機械座標系と呼ぶ。R-test 測定器の変位センサはテーブル上に設置されているため、得られる球変位は、ワーク座標系上で定義される。

3.3 R-test 測定

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算出する。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。

4. 誤差パラメータの同定

4.1 B 軸の誤差の同定

最初に, R-test で測定されたワーク座標系での球位置から, 表 1 に示した誤差パラメータのうち, B 軸の誤差を同定するアルゴリズムを示す。

まず, C 軸の誤差は全て 0 と仮定し, $B=B_i (i=1 \sim 7)$ における B 軸の誤差パラメータを次のようにベクトル表示する。

$$w(B_i) = [\alpha_{BY}(B_i), \dots, \gamma_{BY}(B_i)]^T \quad (1)$$

また, R-test 測定の $B=B_i, C=C_j$ の位置におけるワーク座標系での球の位置を

$${}^w p(B_i, C_j) = [{}^w p_x(B_i, C_j), {}^w p_y(B_i, C_j), {}^w p_z(B_i, C_j)]^T \quad (2)$$

とし, Jacobian 行列を

$$\frac{\partial {}^w p(B_i, C_j)}{\partial w(B_i)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial {}^w p_x(B_i, C_j)}{\partial \alpha_{BY}(B_i)} & \dots \\ \frac{\partial {}^w p_y(B_i, C_j)}{\partial \alpha_{BY}(B_i)} & \dots \\ \frac{\partial {}^w p_z(B_i, C_j)}{\partial \alpha_{BY}(B_i)} & \dots \end{bmatrix} \quad (3)$$

と表す。誤差パラメータ $w(B_i)$ が微小の時, 以下の線形近似が成立する。

$${}^w p(B_i, C_j) = \frac{\partial {}^w p(B_i, C_j)}{\partial w(B_i)} \cdot w(B_i) \quad (4)$$

これを, 最小二乗法により解くことで, $B=B_i$ における誤差パラメータ $w(B_i)$ を得ることができる。

4.2 C 軸の誤差の同定

B 軸に固定された座標系を B 軸座標系と定義する。B 軸座標系上で, 球の指令位置を ${}^B p^*(B_i, C_j)$, 球の実測定位置を ${}^B p(B_i, C_j)$, また, 前節で同定した B 軸の誤差が及ぼす影響をシミュレーションし, その位置を ${}^B \hat{p}(B_i, C_j)$ とする。以下の計算により, 球の実測定位置 ${}^B p(B_i, C_j)$ から B 軸の誤差の影響を除去して C 軸の誤差の影響のみをもった球位置 ${}^B q(B_i, C_j)$ を算出できる。

$${}^B q(B_i, C_j) = {}^B p^*(B_i, C_j) + {}^B p(B_i, C_j) - {}^B \hat{p}(B_i, C_j) \quad (5)$$

1 回の測定では C 軸の回転誤差と並進誤差を分離することができないため, この操作を, 2 つの異なる位置に変位センサを置いた場合について行う。C 軸に回転誤差があると, 2 つの測定の指令位置を結んだ直線および B 軸の誤差を除去した位置同士を結んだ直線の間にはある角度が生じる。これを Y-Z 平面に投影することで $\alpha_{CB}(B_i, C_j)$ を, X-Z 平面に投影することで $\beta_{CB}(B_i, C_j)$ を得ることができる。なお, 本論文では, C 軸の位置決め誤差は十分小さいと仮定し, $\gamma_{CB}(B_i, C_j) = 0$ とした。

次に, C 軸の並進誤差を求める。上で求めた $\alpha_{CB}(B_i, C_j)$, $\beta_{CB}(B_i, C_j)$ が球位置 (B 軸座標系) に及ぼす影響をシミュレーションし, その位置を ${}^B q^*(B_i, C_j)$ とする。これより, 以下のように C 軸の並進誤差を求める。

$$\begin{bmatrix} \delta x_{CB}(B_i, C_j) \\ \delta y_{CB}(B_i, C_j) \\ \delta z_{CB}(B_i, C_j) \end{bmatrix} = {}^B q(B_i, C_j) - {}^B q^*(B_i, C_j) \quad (6)$$

5. ケーススタディ

5.1 R-test 測定

3.3 節で述べたように各軸に指令値を与え, 各点における変位センサの変位量を取得し, 球の位置を算出する。

5.2 誤差パラメータの同定

測定結果から, 4 章で述べた手順により角度依存の誤差パラメータを同定し, B 軸の誤差を図 3 に, $B=0^\circ$ および $B=90^\circ$ における C 軸の誤差を図 4 に示す。

5.3 実験結果

今回の実験より, 以下が観察される。

- $\alpha_{BY}(B_i)$, $\delta y_{BY}(B_i)$ の平均値はそれぞれ $4 \mu\text{m}$, $6 \mu\text{m}$ であり,

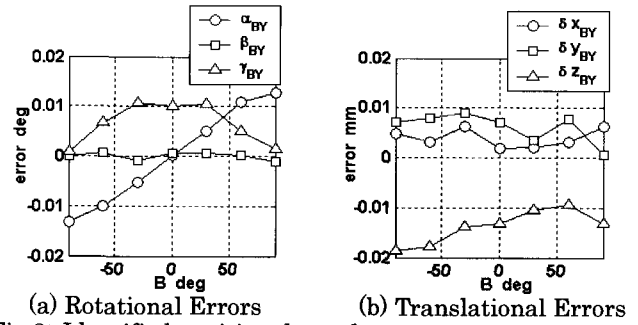


Fig.3: Identified position-dependent geometric errors on B-axis

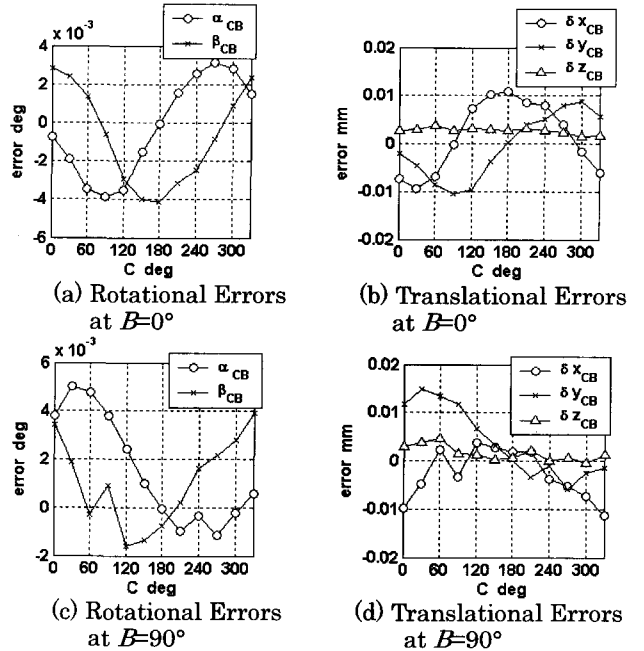


Fig.4: Identified position-dependent geometric errors on C-axis

これは C 軸の旋回中心のずれであると考えられる。

- $\alpha_{BY}(B_i)$, $\gamma_{BY}(B_i)$ より, B 軸の旋回中心にアンギュラモーションが見られる。
- $\alpha_{CB}(B_i, C_j)$, $\gamma_{CB}(B_i, C_j)$ が正弦関数状に変化していることから, C 軸にもアンギュラモーションがあると考えられる。
- ただし, 本測定の不確かさについての評価は現状では十分行っていない。

6. 結言

本研究では, 幾何誤差からさらに発展させた, 旋回軸の回転角度に依存して変化する幾何誤差を対象とし, 5 軸制御加工機の運動誤差を R-test を用いて効率的かつ自動的に測定する方法を構築した。この方法により加工機の旋回軸の運動に伴う誤差のマップを作成し, 各位置決め角度における誤差を補正することで運動精度を向上できると考えられる。

参考文献

- [1] 斎藤 明徳他: 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.