

ボールバー測定を用いた5軸制御加工機の 運動誤差原因の診断*

誤差成分の分類と改良型ボールバー装置 (DBB5) の開発

茨木創一** 垣野義昭*** 赤井孝行† 高山直士† 山路伊和夫** 小川圭二††

Identification of Motion Error Sources on Five-axis Machine Tools by Ball-bar Measurements (1st Report)
– Classification of Motion Error Components and Development of the Modified Ball Bar Device (DBB5) –

Soichi IBARAKI, Yoshiaki KAKINO, Takayuki AKAI, Naoshi TAKAYAMA, Iwao YAMAJI and Keiji OGAWA

The inclusion of the application of the double ball bar (DBB) measurement to the accuracy calibration of five-axis machine tools into the revision of ISO standards is currently under the discussion. This paper presents the modified DBB measurement device, referred to as “DBB5” in our study, where master balls are supported from the 45° direction to the spindle axis. It can perform all the circular tests on XY, YZ, and ZX planes without changing the setup. This paper first presents the classification of motion error components of a five-axis machine tool into location and component errors. Experimental application examples of the DBB5 to the calibration of location and component errors associated with rotary axes on a five-axis machine tool are then presented.

Key words: five-axis machine tool, measurement, ball bar, component error, location error

1. 緒 言

直進3軸に加え、ワークや工具の姿勢制御を行う回転2軸を持つ5軸加工機や、一般に複合加工機と呼ばれる旋盤型の多軸加工機は、日本の多くの工作機械メーカーにとって主力機種のひとつと呼んでよいほどまでに成長した。5軸加工機や複合加工機では通常、直進軸の上に回転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。その結果、これらの機械の総合的な運動精度は従来の3軸加工機と比較して劣っている、というのは製造現場の一般的な認識と言っている。しかし、5軸加工機の普及に伴い、金型加工など高い加工精度が要求される加工に用いられる場合も増加しつつある。5軸加工機の総合的な運動精度の向上に対する要求は高まっている。

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。この観点から、5軸加工機の精度測定法をISO規格化する取り組みが最近進められている¹⁾。現行のISO 10791-1~3²⁾には、主軸回転型の5軸加工機を対象として、直定規などの基準と変位センサを用いて、回転軸の幾何誤差を診断する測定法が規定されている。幾何誤差(第2節参照)は5軸加工機の最も基本的な誤差要因で、その評価法に関してこれまでの多くの研究が報告されてきた。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(Double Ball Bar (DBB)測定)^{3,4)}を適用するアプローチである^{5,6,7,8)}。この方法は、ISO TC39/SC2 専門委員会において、ISO 10791-6規格の附属書として追加することが議論されている⁹⁾。テーブル回転型の5軸加工機だけ

でなく、主軸回転型への適用¹⁰⁾、複合加工機への適用¹¹⁾も容易である。また、幾何誤差だけでなく、回転軸の回転に伴う半径方向・接線方向の運動誤差の測定¹²⁾、直進軸と回転軸の同期誤差の測定¹³⁾、円錐台加工試験に対応した測定¹⁴⁾など、様々な動的(準静的)誤差の評価に適用した例も多い。ボールバー測定だけでなく、R-test、タッチプローブ、加工試験を用いる方法など、5軸加工機の精度キャリブレーション法に関しては、近年多くの研究が報告されている¹⁵⁾。

ISO 10791-6の改定案⁹⁾に記載されているボールバー測定法をはじめとして、5軸加工機の運動精度の評価に関するこれまでの研究の多くは、幾何誤差の診断を主な目的としていた。しかし、回転軸の性能向上、組み立て技術の向上や測定法の普及によって、最近の5軸加工機では幾何誤差が十分小さく調整され、その他のより複雑な誤差成分の影響が相対的に大きい場合が多い。例えば5軸加工機の加工精度の評価に広く普及している、NAS979規格¹⁶⁾に規定された円錐盤の加工試験でも、幾何誤差が加工物の形状精度に及ぼす影響よりも、より複雑な誤差要因が支配的な影響を及ぼす場合が多い¹⁸⁾。

本研究の最終的な目的は、ボールバー測定を用いてそのような複雑な誤差成分を個別に測定し、誤差原因を診断する方法を提案することである。その最初の段階として、本論文では最初に5軸加工機の誤差成分の分類とモデル化を行う。次に、5軸制御加工機を対象としたボールバー測定において、球座のセットアップの変更を最小限にすることを目的として、バーと球座の干渉が生じにくい、改良型のボールバー装置を開発した(DBB5と呼ぶ)。このDBB5を用いた5軸加工機の回転軸の誤差成分の測定例を示す。

2. 5軸加工機の誤差成分の分類

5軸加工機の運動誤差は、1)直進軸固有の運動誤差、2)回転軸固有の運動誤差、3)直進軸・回転軸のアライメント誤差、

** 京都大学工学研究科(京都市左京区吉田本町)

*** 垣野技術研究所(京都市下京区玉津嶋町 316-2)

† (株)森精機製作所(名古屋市千代田区名駅 2-35-16)

†† 滋賀県立大学(彦根市八坂町 2500)

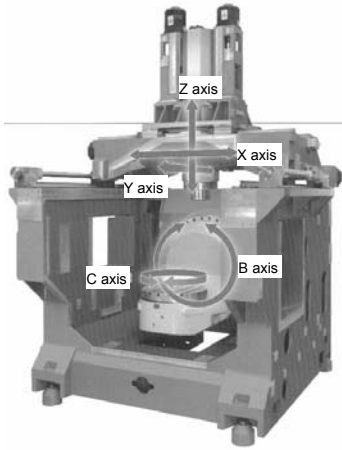


Fig. 1 Configuration of the experimental five-axis machining center ²¹⁾

4) 直進軸・旋回軸の動きの同期誤差, に分類できる. 前章で述べたように, これまで多くの研究が診断対象としていた幾何誤差は, 3) に分類される. 最初に, 本章では 1)2) の誤差成分の幾何学的表記について述べる.

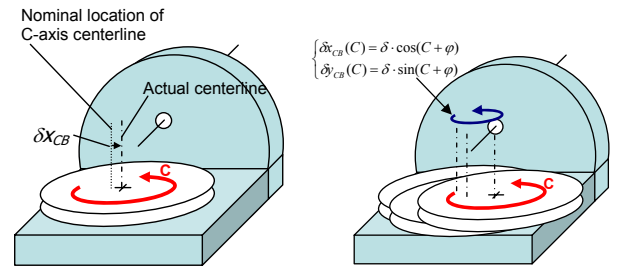
例えば, 図 1 に示す軸構成を持つテーブル旋回型 5 軸加工機に対して, 表 1 に示す 11 個の幾何誤差が定義される ²⁰⁾. 例えば図 2(a) に示すように, C 軸の回転中心の B 軸に対する位置誤差を表す幾何誤差 δx_{CB} は, C 軸の角度に依らず一定と定義される (C 軸を 1 回転したときの回転中心の平均位置の誤差を表す). 図 2(b) に示す C 軸の回転振れは, 幾何誤差で表現することはできない. しかし, δx_{CB} , δy_{CB} が C 軸の角度に依存して変動するとすれば, C 軸の回転振れをモデル化することができる. 同様に, 例えば B 軸の旋回に伴い, 旋回部の重量アンバランスのため重力による Z 方向への変形が生じる場合, δz_{BY} が B 軸の角度に依存して変動する ($\delta z_{BY}(B)$) とモデル化できる. また, C 軸の旋回に伴い回転軸の姿勢が円錐状に振れる誤差 (傾斜誤差運動 ²²⁾) も, $\alpha_{CB}(C)$, $\beta_{CB}(C)$ によってモデル化できる.

このように, 幾何誤差が旋回軸の角度に依存して変化するとモデル化することで, 5 軸加工機が持つ運動誤差成分の大部分は表現できる. 表 2 に誤差成分と, 一般的な誤差原因の対応を示す. この表では, 簡単のため B 軸機構に関する誤差原因のみを挙げた. なお, このような旋回軸の角度に依存する誤差は ISO 230-7 規格 ²²⁾ に定義された旋回軸の component errors に対応する. 幾何誤差は同規格の location errors に対応する. なお, 本報では速度に依存しない静的 (準静的) 誤差成分を評価の対象とし, 動的誤差は対象としない.

工作機械メーカーにとっては, 運動誤差の大きさを知ることとともに, それを低減することが重要である. 本報では誤差成分を個別に評価することに重点を置くが, 表 2 に示したように, 個々の誤差成分は機械要素の誤差原因と密接に関連しており, 誤差成分の計測は誤差原因の診断の基礎となる.

3. 改良型ボールバー装置 (DBB5)

図 3 に従来のボールバー装置の概要を示す ³⁾. 一般に, 2 つの基準球が主軸軸線に平行な方向から支持されるため, 図 3 に示すセットアップでは XY 平面のみ 360° 回転が可能で, YZ, ZX 平面上は球座とバーの干渉により 180° 程度しか回転できない. YZ, ZX 平面上で 360° 円弧運動試験を行うためには, 球座のセットアップを変更しなくてはならない ⁴⁾.



(a) Shift of C-axis center to X direction, δx_{CB} . (b) Run-out of C-axis, $\delta x_{CY}(C)$ and $\delta y_{CY}(C)$ (δ, ϕ : constant)

Fig. 2 Example of a location error and a component error

Table 1 Location errors for the machine configuration shown in Fig. 1.

Symbol ²⁰⁾	Symbol ¹⁹⁾	Description
Location errors associated with rotary axes		
α_{BY}	E_{A0B}	Squareness error of B- to Z-axis
β_{BY}	E_{B0B}	Orientation of B-axis around Y-axis
γ_{BY}	E_{C0B}	Squareness error of B- to X-axis
α_{CB}	$E_{A0C} - E_{A0B}$	Squareness error of C- to B-axis
δx_{BY}	E_{X0B}	Linear shift of B-axis in x direction
δy_{BY}	E_{Y0B}	Linear shift of B-axis in y direction
δz_{BY}	E_{Z0B}	Linear shift of B-axis in z direction
δx_{CB}	$E_{Y0C} - E_{Y0B}$	Linear shift of C-axis from B-axis in X
Location errors associated with linear axes		
γ_{YX}	E_{C0Y}	Squareness error of Y- to X-axis
α_{ZY}	E_{A0Z}	Squareness error of Z- to Y-axis
β_{ZX}	E_{B0Z}	Squareness error of Z- to X-axis

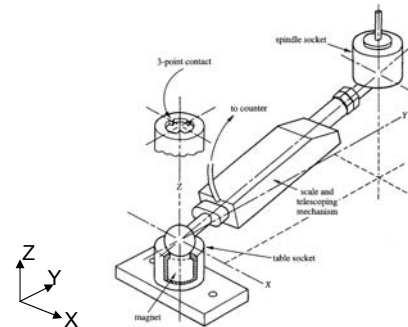


Fig. 3 Configuration of the conventional DBB device ³⁾

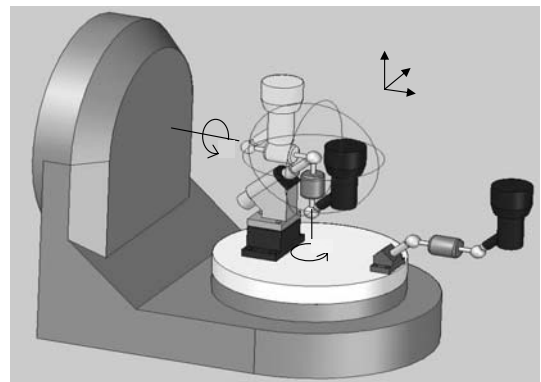


Fig. 4 Configuration of the modified DBB device, DBB5

図 4 に本研究で開発した改良型のボールバー装置 (DBB5) の概要を示す. 基準球が主軸軸線から 45° 方向から支持されているため, 球座のセットアップを変更することなく XY 平面, YZ 平面, ZX 平面の円弧運動試験が可能である.

以降の章では, DBB5 装置を用いた 5 軸加工機の誤差成分の測定例を示す. 本論文では, 幾何誤差を主な測定対象とするが, 旋回軸の component errors の一部も診断の対象とする.

Table 2 Component errors and their possible causes (those associated with B-axis) for the machine configuration in Fig. 1

Symbol	Symbol ⁽¹⁷⁾	Description
Component errors of rotary axis		
$\alpha_{Bj}(B)$	E_{AB}	Orientation changes of B-axis with B rotation
$\beta_{Bj}(B)$	E_{BB}	Angular error of B-axis rotation
$\gamma_{Bj}(B)$	E_{CB}	Orientation changes of B-axis with B rotation
$\alpha_{Cj}(C, B)$	$E_{AC}-E_{AB}$	Orientation changes of C-axis with C, B rotation
$\beta_{Cj}(C, B)$	$E_{BC}-E_{BB}$	Orientation changes of C-axis with C, B rotation
$\gamma_{Cj}(C, B)$	$E_{CC}-E_{CB}$	Angular error of C-axis rotation
$\delta_{xj}(B)$	E_{XB}	Location changes of B-axis center with B rotation
$\delta_{yj}(B)$	E_{YB}	Location changes of B-axis center with B rotation
$\delta_{zj}(B)$	E_{ZB}	Location changes of B-axis center with B rotation
$\delta_{xj}(C, B)$	$E_{XC}-E_{XB}$	Location changes of C-axis center with C, B rotation
$\delta_{yj}(C, B)$	$E_{YC}-E_{YB}$	Location changes of C-axis center with C, B rotation
$\delta_{zj}(C, B)$	$E_{ZC}-E_{ZB}$	Location changes of C-axis center with C, B rotation
Component errors of linear axis		
$\gamma_{Yj}(Y)$	E_{CY}	Yaw changes of Y-axis with Y motion
$\alpha_{Yj}(Y)$	E_{AY}	Pitch changes of Y-axis with Y motion
$\beta_{Yj}(Y)$	E_{BY}	Roll changes of Y-axis with Y motion
$\alpha_{XY}(Y)$	E_{XY}	Straightness of Y-axis
$\delta_{Yj}(Y)$	E_{YV}	Linear positioning error of Y-axis
$\delta_{Yj}(Y)$	E_{ZY}	Straightness of Y-axis
.....		

Possible major error causes

- Errors in positioning mechanism
- Errors in rotary encoder
- Pitch error in transmission mechanism (e.g. worm gear)
- Inaccurate pitch error compensation
- Errors associated with bearings
- Run-out
- “Angular motion” of rotation centerline
- Profile error caused by geometric error of rings
- Profile error caused by variation in roller size
- Gravity influence
- Deformation of rotating unit
- Angular positioning error caused by gravity influence

4. DBB5 を用いた測定例

前章で示した改良型ボールバー装置 (DBB5) を用いて、立式 5 軸加工機の誤差診断を行った。測定対象機 ((株) 森精機製作所製 NMV5000DCG²¹⁾) は図 1 に示した構造を持つ。回転テーブルの旋回軸 C 軸と、片持ち支持の B 軸共に、ダイレクトドライブモータ (DD モータ) により駆動される。Y 及び Z 軸は 2 本のボールねじ、X 軸は 1 本のボールねじにより駆動される。実験に用いた DBB5 装置は、市販のボールバー装置 (ハイデンハイン社製 DBB110) を改造して用いる。バーの基準長さは 168 mm とする。

4.1 XY, YZ, ZX 平面上での円弧運動試験

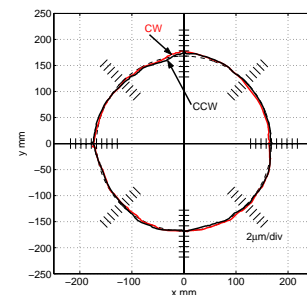
最初に、XY, YZ, ZX 平面上での 360° 円弧運動試験を行った結果を図 5 に示す (送り速度: 600 mm/min)。Z-Y 軸間、Z-X 軸間の直角度はそれぞれ $\alpha_{ZY} = 10.2\mu\text{m}/168\text{mm}$, $\beta_{ZX} = -3.0\mu\text{m}/168\text{mm}$ 程度であることなどが観察できる。直進軸間の円弧運動試験の診断法は既に確立されており³⁾、これ以上は述べない。

4.2 C 軸の誤差運動の評価

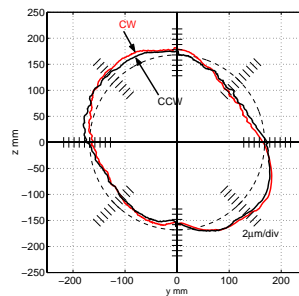
4.2.1 Location Errors の評価

C 軸が 360° 回転する際の、C 軸の回転中心の変位を評価することを主な目的として、図 6(a)~(d) に示す測定を行う。例えば図 6(a-1)(測定 C-X (-Z) と呼ぶ) では、テーブル側球をほぼ C 軸中心軸上に配置し、C 軸のみを 360° 回転させる。直進軸は駆動せず、バーの向きは X 方向に固定する。同様に、図 6(b-1)(測定 C-Y (-Z)) ではバーの向きは Y 方向に固定される。図 6(c-1)(d-1)(測定 C-X (+Z), C-Y (+Z)) では、同様の測定をテーブル側球を +Z 方向に移動させて行う。本実験では、両測定間の Z 方向距離は $d_z = 100\text{mm}$ とした。全ての測定で C 軸の角速度は $720^\circ/\text{min}$ とした。なお、誤差軌跡の中心位置はテーブル側球の設置位置によって決まるため、図 6 の誤差軌跡は、中心が常に原点と一致するように補正して表示する (中心補正と呼ぶ)。

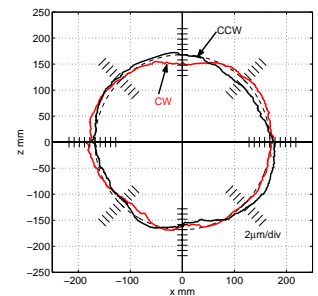
4 測定の真円度、誤差の平均値を表 3 にまとめる。測定 C-X (-Z), C-Y (-Z), C-X (+Z), C-Y (+Z) の誤差の平均値をそれぞれ $r_{x1}, r_{y1}, r_{x2}, r_{y2}$ とすると、C 軸中心軸の Z 軸を基準とした Y 軸、X 軸周りの静的な傾きを表す幾何誤差 β_{CZ}, α_{CZ} は以下



(a) XY plane.



(b) YZ plane.



(c) XZ plane.

Fig. 5 Error profiles of circular test on XY, YZ, and XZ planes.

下により求められる。

$$\beta_{CZ} = -(r_{x2} - r_{x1})/d_z = -4.2\mu\text{m}/100\text{mm} \quad (1)$$

$$\alpha_{CZ} = -(r_{y2} - r_{y1})/d_z = +5.5\mu\text{m}/100\text{mm} \quad (2)$$

また、C 軸中心位置の XY 原点からの X, Y 方向誤差を表す幾何誤差 $\delta_{x,CY}, \delta_{y,CY}$ は以下により求められる。

$$\delta_{x,CY} = r_{x1} - \beta_{CZ} \cdot Z_1, \delta_{y,CY} = r_{y1} + \alpha_{CZ} \cdot Z_1 \quad (3)$$

ただし、 Z_1 は測定 C-X (-Z) におけるテーブル側球の Z 位置を表す (B 軸中心を $Z = 0$ と定義する)。

4.2.2 Component Errors の評価

測定 C-X, C-Y から、C 軸の 360° 回転に伴って、C 軸回転中心がそれぞれ X, Y 方向へどのように変位するか (半径方向誤差運動²²⁾、すなわち、 $\delta_{x_{CA}}(C)$ 及び $\delta_{y_{CA}}(C)$) を評価することができる。さらに、図 7 に示す測定 C-Z により、C 軸の軸方向誤差運動²²⁾($\delta_{z_{CA}}(C)$) を評価できる。

Table 3 Circularity error and mean radial error of Measurements C-X (Low), C-Y (High), C-X (Low), and C-Y (High).

	C-X (-Z)	C-Y (-Z)	C-X (+Z)	C-Y (+Z)
Circularity error μm	3.0	2.2	7.3	6.8
Mean radial error μm	$r_{x1} = +3.2$	$r_{y1} = -0.6$	$r_{x2} = -1.0$	$r_{y2} = +4.9$

また、図 6(c-2)(d-2) に示した測定 C-*(+Z) の誤差軌跡は、図 6(a-2)(b-2) に示した測定 C-*(-Z) と比較して明らかに大きい。これは C 軸の回転に伴い、回転中心軸の傾きが変化する、傾斜誤差運動²²⁾ (アンギュラ・モーションなどとも呼ばれる) が C 軸に存在することを示している ($\alpha_{CZ}(C)$, $\beta_{CZ}(C)$)。

4.2.3 ISO 10791-6 の測定法との比較

現在改定作業が進められている、ISO 10791-6 原案⁹⁾ では、C 軸の静的な傾き α_{CZ} , β_{CZ} の測定法として、図 8(f-1) に示す測定法が記述されている (Annex B, BK2)。これは、C 軸の旋回と、XY 軸の円弧補間運動を同期させて、C 軸の軸方向の変位を測定するものである。測定結果を図 8(f-2) に示す。CW, CCW 軌跡の中心位置の平均は、(C_x, C_y) = (-0.4, +0.7) μm である。それから、C 軸中心軸の傾き (この場合は、C 軸平均線と X 軸, Y 軸との直角度) は、以下のように同定される^{5, 8)}：

$$\beta_{CY} = C_x/R = -0.3\mu\text{m}/100\text{mm} \quad (4)$$

$$\alpha_{CY} = -C_y/R = -0.5\mu\text{m}/100\text{mm} \quad (5)$$

ただし、 $R = 135 \text{ mm}$ はテーブル側球の C 軸中心からの距離である。測定 C-X, C-Y で同定した結果 (式 (1)(2)) と比べると、100 mm 当たり数 μm の差が観察できる。この原因は、X 軸または Y 軸と、Z 軸の直角度、測定 C-XY (図 8) における、XY 円弧補間運動時の Z 方向真直度、測定 C-XY における、C 軸の傾斜誤差運動、などが考えられる。図 6 で示した測定は、XY 軸を駆動せず、C 軸のみが駆動するため、location errors 以外の誤差運動の影響を受けにくいことが長所である。一方、4 回の測定が必要であることと、テーブル側球を回転中心に設置できない場合には実施できないことが不利な点である。

図 8(f-2) と図 7(c-2) を比べても、両者は完全には一致しないことが分かる。これは、測定 C-Z (図 7) は C 軸の軸方向誤差運動のみを測定するのに対し、測定 C-XY (図 8) は C 軸の傾斜誤差運動や、XY 軸の誤差運動の影響も含まれるためである。

なお、ISO 10791-6 原案⁹⁾ では、ボールバーを旋回軸の軸方向とする測定 (図 8(f-1)) に加えて、半径方向、接線方向とする測定も規定されている。

4.3 B 軸に関する誤差成分の評価

前節と同様の測定を B 軸に対して行う。図 9(g)~(j) に示すように、テーブル側球を B 軸の回転中心に設置し、バーを X 方向または Z 方向に固定したまま、B 軸を回転させる。4 測定の真円度、半径誤差の平均値を表 4 にまとめる。前節と同様に、測定 B-X (-Y), B-Z (-Y), B-X (+Y), B-Z (+Y) の誤差の平均値をそれぞれ r_{x1} , r_{z1} , r_{x2} , r_{z2} とすると、B 軸中心軸の X 軸, Z 軸周りの静的な傾きを表す幾何誤差 α_{BY} , γ_{BY} は：

$$\gamma_{BY} = (r_{x2} - r_{x1})/d_y = +2.7\mu\text{m}/271\text{mm} \quad (6)$$

$$\alpha_{BY} = -(r_{z2} - r_{z1})/d_y = +1.4\mu\text{m}/271\text{mm} \quad (7)$$

Table 4 Circularity error and mean radial error of Measurements B-X (-Y), B-Z (-Y), B-X (+Y), and B-Z (+Y).

	B-X (-Y)	B-Z (-Y)	B-X (+Y)	B-Z (+Y)
Circularity error μm	1.9	2.7	1.3	2.2
Mean radial error μm	$r_{x1} = -7.3$	$r_{z1} = +18.6$	$r_{x2} = -4.6$	$r_{z2} = +17.2$

幾何誤差は C 軸と比較するとかなり小さい。また、各測定の真円度も最大 $3\mu\text{m}$ 程度で、-Y 側と +Y 側の誤差軌跡の差も C 軸と比べて小さいことから、B 軸の径方向誤差成分や、傾斜誤差運動も十分小さいことが分かる。ただし、主軸とテーブル等の干渉を回避するため、B 軸の旋回範囲は測定 (g)(i) で 145° 、測定 (h)(j) で 190° であり、C 軸が 360° 旋回する測定 (a)~(f) よりも小さいことに注意が必要である。

B 軸の軸方向誤差運動を測定するため、図 10 に示す測定 B-Y を行った。B 軸の回転方向の変化により、 $2\mu\text{m}$ 程度の軸方向変位が生じることが分かる。それ以外の顕著な軸方向誤差運動は観察できない。

4.4 円錐台加工試験に対応したボールバー測定

NAS979 規格¹⁶⁾ に規定され、5 軸加工機の加工精度試験として広く普及している円錐台加工試験は、ISO/DIS 10791-7:2012¹⁷⁾ に規定することが議論されている。また、円錐台加工試験と同じ指令軌跡を用いて行うボールバー測定¹⁴⁾ は、ISO/DIS 10791-6:2012⁹⁾ に含まれている。本論文では、図 11(l-1) に示すセットアップにより、この測定を行った。

誤差軌跡を図 11(l-2) に示す。+X 付近に振幅最大 $10\mu\text{m}$ 程度の振動成分が観察できるが、工具パスの微小線分長を変えると変化することが確認されており、指令速度の変化が大き過ぎることに起因する誤差であると推測される。

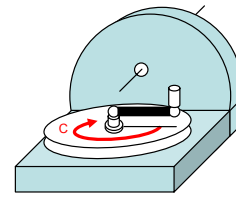
5. 結 言

- (1) 旋回軸の角度に依らず一定の幾何誤差に対し、それが旋回軸の角度に依存して変化するとモデル化することで、5 軸加工機が持つ運動誤差成分の大部分はモデル化できる。
- (2) 基準球が 45° 方向から支持されている、改良型の DBB 測定器 (DBB5) を開発した。球座のセットアップを変更することなく 3 平面上の 360° 円弧運動試験が可能である。
- (3) テーブル旋回型 5 軸機を対象として、DBB5 を用いた測定例を示した。旋回軸の中心軸上にテーブル側球を配置し、旋回軸のみを回転させる測定を行うことによって、直進軸を駆動することなく旋回軸の静的な傾き、中心の位置誤差、アンギュラ・モーション等が評価できることを示した。
- (4) 第 4 章で示した測定は、従来の DBB 装置を用いても行うことができるが、DBB5 を用いることによって、一連の測定におけるセットアップの変更回数を大幅に低減できる。本論文で示した測定を全て行うために必要なテーブル側球座の付け替え回数は、3 回である。

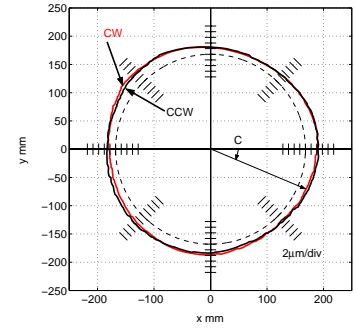
参 考 文 献

- 1) 堤 正臣：工作機械検査規格の標準化研究 (特集記事), 精密工学会誌, 78, 7 (2012) 563.
- 2) ISO 10791-1:1998, Test conditions for machining centres - Part 1: Geometric tests for machines with horizontal spindle and with accessory heads (horizontal Z-axis).
- 3) 垣野 義昭, 井原 之敏, 篠原 章翁：DBB 法による NC 工作機械の精度評価法, リアライズ社, 1990.

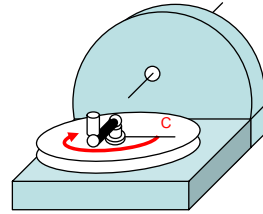
- 4) ISO 230-4: Test code for machine tools – Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools, (2005).
- 5) Kakino, Y., Ihara, T., Sato, H., Otsubo, H., A Study on the motion accuracy of NC machine tools (7th report) –Measurement of motion accuracy of 5-axis machine by DBB tests–, *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, **60**, 5(1994), 718 (in Japanese).
- 6) 坂本 重彦, 稲崎 一郎, 塚本 穎彦, 市来崎 哲雄: ボールバーによる5軸マシニングセンタの組立誤差同定法, 日本機械学会論文集 (C 編), **63**, 605 (1997) 262.
- 7) Abbaszadeh-Mir, Y., Mayer, J. R. R., Clotier, G., Fortin, C., Theory and simulation for the identification of the link geometric errors for a five-axis machine tool using a telescoping magnetic ball-bar, *Int'l J. of Production Research*, **40**, 18 (2002), 4781.
- 8) 齋藤 明德, 堤 正臣, 牛久 健太郎: 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) 同時3軸制御運動を用いた位置偏差および角度偏差の推定, 精密工学会誌, **69**, 2 (2003) 268.
- 9) ISO/DIS 10791-6:2012, Test conditions for machining centres – Part 6: Accuracy of speeds and interpolations.
- 10) K. M. Muditha Dassanayake, Masaomi Tsutsumi, Akinori Saito: A strategy for identifying static deviations in universal spindle head type multi-axis machining centers, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46**, 10 (2005), 1097.
- 11) 崔 成日, 東山 憲司, 堤 正臣, K. M. Muditha Dassanayake: 旋盤形複合加工機に存在する幾何偏差同定方法, 日本機械学会論文集 C 編, **75**, 750 (2009), 476.
- 12) 茨木 創一, 澤田 昌広, 松原 厚, 森 雅彦, 櫻原 圭蔵, 垣野 義昭: ボールバー法を用いた複合加工機のミリング主軸旋回軸の動的運動精度測定法, 精密工学会誌, **73**, 5 (2007), 583.
- 13) 佐藤 隆太, 横堀 祐也, 堤 正臣: 5軸制御マシニングセンタにおける直進軸と旋回軸の動的同期精度, 精密工学会誌, **72**, 1 (2006) 73.
- 14) 井原 之敏, 田中 和也: 多軸工作機械での円錐台加工試験に対応したボールバー測定法(第1報) 主軸旋回形5軸MCでのボールバー測定と実加工との比較, 精密工学会誌, **71**, 12 (2005) 1553.
- 15) S. Ibaraki, W. Knapp, Indirect Measurement of Volumetric Accuracy for Three-Axis and Five-Axis Machine Tools: A Review, *Int'l J. of Automation Technology*, **6**, 2 (2012) 110.
- 16) NAS 979: Uniform cutting test – metal cutting equipments, 1969.
- 17) ISO/DIS 10701-7:2012, Test conditions for machining centres – Part 7: Accuracy of a finished test piece.
- 18) C. Hong, S. Ibaraki, and A. Matsubara, "Influence of position-dependent geometric errors of rotary axes on a machining test of cone frustum by five-axis machine tools," *Precision Engineering*, **35**-1, pp. 1-11, 2011.
- 19) ISO 230-1:2012, Test code for machine tools – Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions.
- 20) 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).
- 21) 株式会社 森精機製作所: NMV 5000 DCG カタログ, (2008).
- 22) ISO 230-7:2006, Test code for machine tools – Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation.



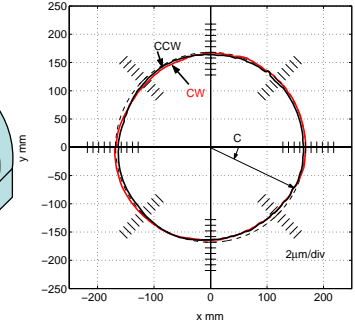
(a-1) Meas. C-X (-Z).



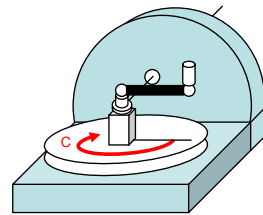
(a-2) Error profiles (C-X (-Z)).



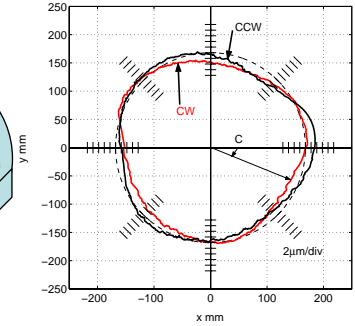
(b-1) Meas. C-Y (-Z).



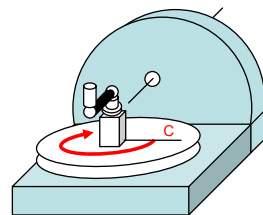
(b-2) Error profiles (C-Y (-Z)).



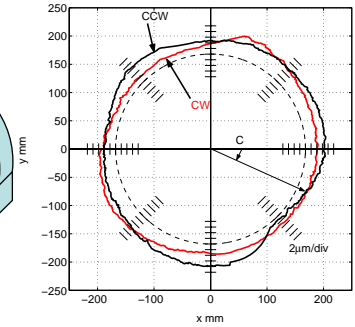
(c-1) Meas. C-X (+Z).



(c-2) Error profiles (C-X (+Z)).

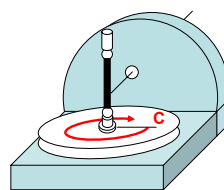


(d-1) Meas. C-Y (+Z).

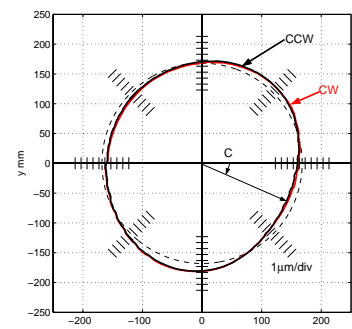


(d-2) Error profiles (C-Y (+Z)).

Fig. 6 Measurement C-X and C-Y.

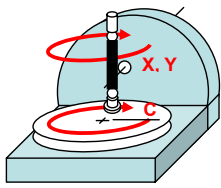


(e-1) Meas. C-Z

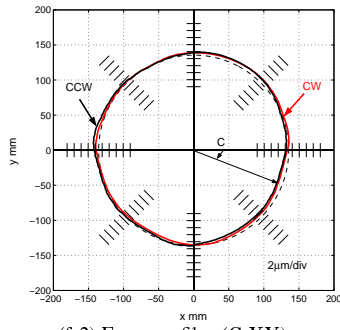


(e-2) Error profiles (C-Z).

Fig. 7 Measurement C-Z.

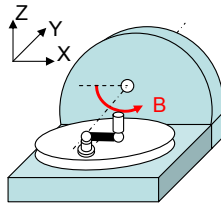


(f-1) Meas. C-X-Y

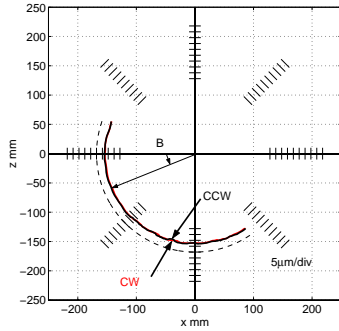


(f-2) Error profiles (C-X-Y).

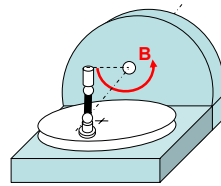
Fig. 8 Measurement C-X-Y.



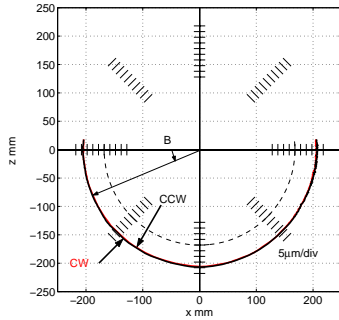
(g-1) Meas. B-X (-Y).



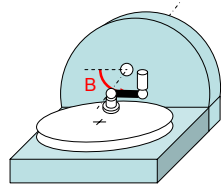
(g-2) Error profiles (B-X (-Y)).



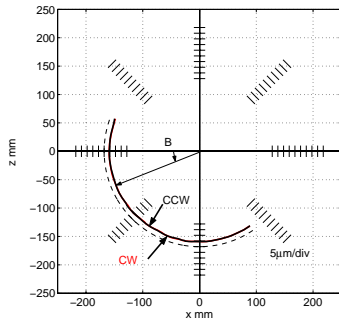
(h-1) Meas. B-Z (-Y).



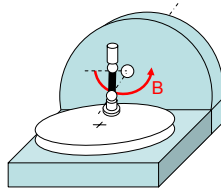
(h-2) Error profiles (B-Z (-Y)).



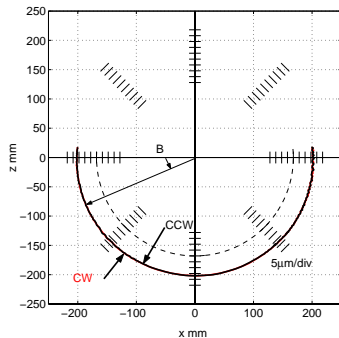
(i-1) Meas. B-X (+Y).



(i-2) Error profiles (B-X (+Y)).

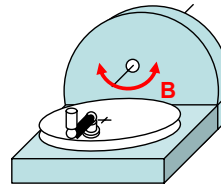


(j-1) Meas. B-Z (+Y).

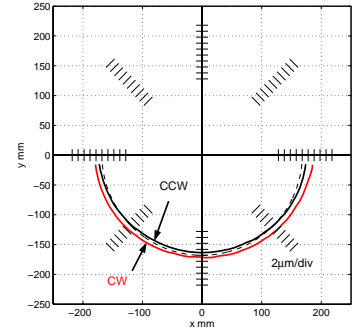


(j-2) Error profiles (B-Z (+Y)).

Fig. 9 Measurement B-X and B-Z.

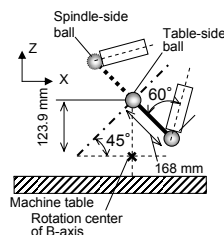


(k-1) Meas. B-Y

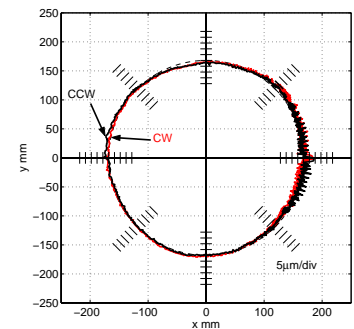


(k-2) Error profiles (B-Y).

Fig. 10 Measurement B-Y.



(l-1) Measurement schematics in the workpiece coordinates.



(l-2) Error profiles.

Fig. 11 Measurement corresponding to cone frustum machining test.