

R-test 装置を用いた工作機械の精度検査に関する研究

学生 J 指導教員：井原之敏

Study on the Accuracy Test of Machine Tool Using the R-test Device

Student J

The standard of accuracy test method for five-axis machining center is now under discussion by ISO. In its draft standard, the use of a measurement device with three displacement sensor is described in addition to the ball bar device that is well-known as the motion measurement device for machine tools. In this study, a device that was able to take the setting method freely was designed and prototyped. Using the newly-designed device, three setting method installed on the machine were compared. One is of the conventional setting method developed in Europe, another is the method that sensors axes are parallel to the machine axes, the other is that the device is attached on the machine spindle. Since the compared results show little difference, the setting method can be decided by convenience of the easiness of installation on the machine such as centering of the master ball, collision prevention and sensor's cable treatment. The measured results on two five-axis machining centers were also considered. The typical error was that the straightness error motion of linear axes, which is difficult to detect by the ball bar test. Both bidirectional repeatability error and cyclic errors are detected as the straightness error.

Key words: Five-axis machining center, Motion accuracy, Test standard, R-test, Setting method

1 緒 言

近年の工作機械は技術の発展とともに高速かつ高精度な加工を必要とされ、従来のX, Y, Z軸の3軸制御を基本として、それぞれの軸に対応する回転軸A, B, Cから2つの回転軸を加えた5軸制御機の需要が増加している。その機械に対応した補間運動精度検査規格が2003年から日本で議論され、ISOによって2014年に改正された¹⁾²⁾。この規格³⁾では5軸マシニングセンタを3つのグループに分類することでさまざまな構造形態の5軸マシニングセンタに適用可能になった。その規格内に直進2軸と旋回1軸の同時3軸制御測定が記され、測定装置としてボールバーと、3つの変位計と1つの基準球で構成されたR-testがある。R-testはボールバーと比較して一度に多くの情報を取得できるが、この装置には2004年にイタリアのFIDIA社が取得した特許に抵触する可能性があること、また現在商品化されているIBS社のR-test装置が高価であることから広く普及していない。IBS社の装置は非旋回軸側に測定ヘッドを取り付けることが推奨されているが、今回改正された規格では旋回軸の位置に関係なく工作物側に測定ヘッドを取り付けるため、IBS社の装置を使用する上で問題がある。そこで本研究ではR-test装置の測定ヘッドを主軸側またはテーブル側に取り付けられるように試作し、設置姿勢の比較を行った。また測定時間の短縮のため測定用ソフトウェアも試作し、複数台の機械で測定を行うことでR-test装置の問題点や有用性についても検討する。

2 R-test

2.1 R-test の概要⁴⁾⁻⁷⁾

この測定装置はマシニングセンタの熱変形試験の測定装置を参考にスイスのETH Zurichのグループによって考案された、3つの変位計と1つの基準球を用いて精度を

測定する方法である。各変位計が基準球のおおむね中心を向くように設置されており、変位計の出力値から基準球の3次元位置を測定する。また、イタリアFIDIA社がほぼ同時期に装置⁸⁾を発表し、オランダIBS社によって現在唯一商品化され、現在では無線式で非接触測定が可能なものもある⁹⁾。

2.2 設置姿勢

今回試作した装置は、1つの装置でE-setting, J-setting, Es-settingの3通りの設置姿勢を取ることができる。図1に示すE-settingはFIDIA社やETH Zurichの装置と同様の姿勢である。3つのセンサ軸と工作機械のXYZ軸が一致しないため、各センサの変位を幾何学的に演算し、工作機械のXYZ方向に変換を行う必要がある。また、3つのセンサの接触点が基準球に棒がついている方を上として、球中心より下にあるため、主軸との干渉が少なく、測定範囲が広い。J-settingは各変位計を機械のXYZ軸に平行に取り付けることにより¹⁰⁾、1つのセンサ軸と機械軸とがほぼ1対1になるため、XYZ方向の変位を各センサで取得することができるようになる。ISO10791-6 BK1ではA軸測定範囲は180°以上が望ましいと明記されているが、この姿勢ではセンサが主軸と干渉してしまうため90°程度までという制限が発生する。

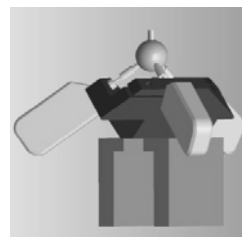


Fig. 1 E-setting

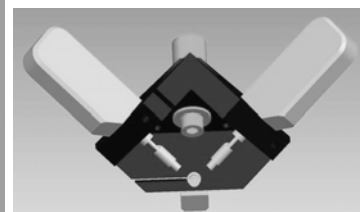


Fig. 2 Es-setting

図2に示す Es-setting は現在唯一商品化されている IBS 社の装置と同様に E-setting を主軸に取り付けたような姿勢である。そのため E-setting 同様の座標変換が必要になる。また、テーブル側に回転軸を有している機械の測定では、センサの座標系をワーク座標系に変換する必要があるため幾何学的な演算を2回行なう必要がある。

試作装置には接触式変位計にシステム精度 $\pm 0.2\text{mm}$ でストロークが 12mm の HEIDENHAIN 製 MT1281 を3本、測定子には平面タイプのもを用いた。基準球には JIS B 1501:2009 の転がり軸受鋼球の規格に定められている等級 G5 (真球度 $0.13\mu\text{m}$ 以下) のものを用いた。センサの読みをパソコンに転送するためのインターフェイスとして HEIDENHAIN 製 EIB741 を用いた。

2.3 データの処理方法

E-setting, Es-setting において、3つの変位計の出力は、座標変換によって工作機械の直進軸方向の変位と一致させるべきである。図3に示すように、X, Y, Z は工作機械の座標系、 (x, y, z) はそれぞれの変位量であり、U, V, W はセンサ座標系、 (u, v, w) は変位センサの出力値、また、 $(\omega, \varphi, \theta)$ はセンサ軸まわりの回転角度とすると式(1)が得られる。

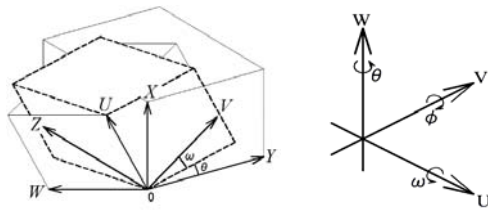


Fig. 3 各軸の回転方向

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \dots (1)$$

E-setting と J-setting の基本的な方向では、一つのセンサは、工作機械の +Z 軸方向から見て、+X 軸方向と重なり合うように取り付けられている。Es-setting では、E-setting と同様の変位を得るため、1つのセンサは工作機械の +Z 軸方向から見て -X 軸方向と重なり合うように取り付けられている。そして、センサの設計角度に基づけば、工作機械の座標系と一致するセンサの座標系の回転角度は誤差がないものとする $\omega = 135^\circ$, $\varphi = -35.264^\circ$, $\theta = 0^\circ$ となる。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos C & \sin C & 0 \\ -\sin C & \cos C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \dots (2)$$

Es-setting で取得したデータは、ほかの設置方法と比較するためワーク座標系に変換している。例えば、XYC 同

時 3 軸制御測定では、式(2)に示す Z 軸まわりの座標変換を行うことで、ほかの設置方法と一致する。

2.4 試作装置の検証

ここでは試作装置の測定装置としての信頼性を確認するため各直進軸にリニアスケールを装備した NC フライスをを用いて検証実験を行った。R-test の出力値を工作機械の直交座標系に座標変換を用いて一致させる。その後、各直進軸を $\pm 1.0\text{mm}$ の範囲で 0.1mm 刻みに3往復させたときの3方向の誤差で評価を行う。E-setting で検証を行った結果を図4に示す。

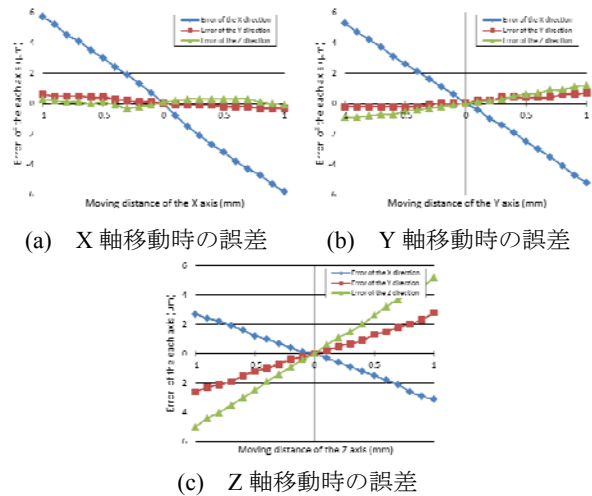


Fig. 4 検証結果

同時3軸制御測定を行う場合、R-test 装置は工作物から見て工具先端点が変わらないように各軸を制御して運動精度を測定する測定装置である。そのため旋回軸の中心座標を求め、その値を元に同時3軸制御測定を行うと、心ずれを考慮しても $\pm 50\mu\text{m}$ 以上も変位しないと考えられる。図4の値から $\pm 50\mu\text{m}$ 変位時の誤差を表1に示す。

Table 1 各直進軸を $\pm 50\mu\text{m}$ 移動させた時の誤差

	$\delta X [\mu\text{m}]$	$\delta Y [\mu\text{m}]$	$\delta Z [\mu\text{m}]$
X	± 0.4	± 0.0	± 0.2
Y	± 0.5	± 0.1	± 0.1
Z	± 0.2	± 0.2	± 0.5

Table 2 各直進軸を移動させた時の直角誤差

X 軸送り		Y 軸送り		Z 軸送り	
XY [°]	ZX [°]	XY [°]	YZ [°]	ZX [°]	YZ [°]
-0.0373	0.1205	0.2120	-0.1061	0.4727	0.0516

表1からこの測定装置を工作機械の精度検査に使用しても測定範囲内では $1\mu\text{m}$ 以下の誤差しか発生しないことがわかる。このことから今回試作した測定装置は工作機械を評価できるものであることが証明できた。しかし X 軸に $\pm 1.0\text{mm}$ 移動させた時の X 軸方向の誤差は移動量

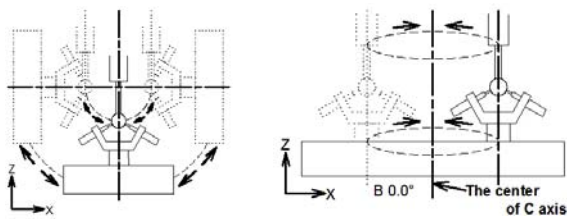
の0.6%の誤差が発生している。この原因として R-test 装置の各センサ軸同士の直角誤差が原因であると考え、J-setting を用いて先ほどと同様の実験を行い、各センサの直角度を測定した結果を表2に示す。

この結果から X 軸送りの時と Y 軸送りの時での XY の直角誤差が異なっており、その他でも各送り軸によって直角誤差が異なる。これは変位計の軸と測定子の面が垂直でないことがあり、各変位計でその傾きが違うことが原因であると考えられる。しかし直角誤差は $\pm 0.5^\circ$ 以内と小さいことから測定結果に影響がないと考えられる。

3 補間運動精度検査実験

3.1 同時3軸制御測定実験

R-test 装置を用いて ISO10791-6:2014 BK1, BK2 を参考に同時3軸制御測定を行う。この測定では直進2軸と旋回1軸を工作物から見て工具先端点に変化しないように円弧補間制御を行い、機械の運動精度を評価する。BK1・BK2 は主に直進軸と旋回軸を同期運転したときの直進軸と旋回軸の運動精度の確認を行うことを目的とする。図5には ZXB 同時3軸制御測定 (BK1), XYZ 同時3軸制御測定 (BK2) を R-test 装置で行う概略図を示す。



(a) ZXB 同時3軸制御測定 (b) XYZ 同時3軸制御測定
Fig. 5 測定概略図

3.2 対象機械と測定装置

対象機械にはテーブルに旋回2軸を持つ同型の5軸マシニングセンタを複数台用いた。図6には対象機械の軸構成を示している。この機械を ISO10791-6 に準拠した構造表記法で表すと $V [w C' B' b X Y Z (C) t]$ となる。

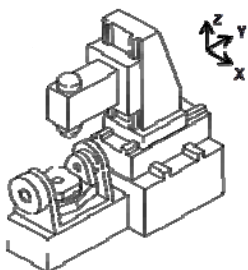


Fig. 6 軸構成図
 $V [w C' B' b X Y Z (C) t]$



Fig. 7 ボールバー

測定装置には3章で記した R-test 装置と図7に示すボールバーを用いた。ボールバーとは2つの球とそれらを繋ぐ、変位計を内蔵した棒からなる装置である。それぞれ

の球を主軸側とテーブル側に設置し、この2つの球の距離を一定に保つように円運動させる NC プログラムを組むことで工作機械の運動精度を測定することができる。

3.3 測定方向

測定方向は ISO10791-6 に従った。各試験では旋回軸から見て半径方向、軸方向、接線方向の変位を取得することで機械の運動精度を評価する。一般的に半径方向の誤差は主軸の円弧補間と旋回軸の回転精度の正確さ、軸方向の誤差は直進軸と旋回軸の直角度または平行度、接線方向は主軸とテーブルとの同期速度の不一致がそれぞれ現れると考えられる。

4 実験結果

4.1 設置姿勢の比較

(1) E-setting と J-setting の比較

図8は BK1 (ZXB) での E-setting と J-setting の測定結果を示している。この測定の場合 J-setting には装置と基準球を支える棒に干渉の問題があるため、測定範囲は 90° で行った。図9は BK2 (XYZ) で E-setting と J-setting の測定結果を示している。

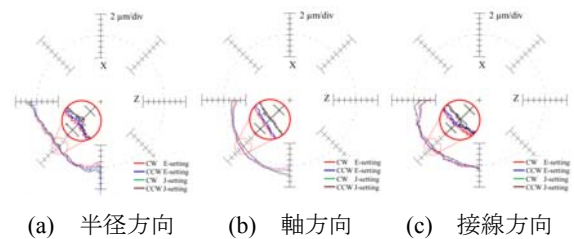


Fig. 8 E-, J-setting を用いた ZXB の測定結果

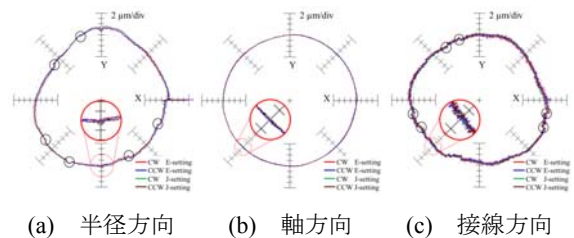


Fig. 9 E-, J-setting を用いた XYZ の測定結果

(2) E-setting と Es-setting の比較

図10は BK1 (ZXB) での E-setting と Es-setting の測定結果を示している。図11は BK2 (XYZ) での E-setting と Es-setting の測定結果を示している。

図8と図10では設置姿勢の違いにより測定データに $2\mu\text{m}$ 程度の違いがみられる。これは測定高さの違いによる直進軸の円弧半径の違いと測定日の違いによって発生したと考えられる。図9はすべての結果で軌跡がほぼ一致しているが、図11では測定日の違いによって設置姿勢による軌跡の違いが見られる。

3つの設置姿勢では測定結果に少しの違いしかなく、座標変換を用いて演算を行うことで同じ結果が取得でき

ることが確認できた。E-setting と J-setting は測定装置をテーブル側に設置し、センサの向きが異なるだけであるので必ず一致するが、Es-setting は測定装置を主軸側に設置し、データ数から求めた仮想的な角度を座標変換での演算に用いているため、その他の設置方法と違いが発生する可能性がある。しかし機械の誤差原因を診断するには軌跡の形状を元に評価するため大きな問題ではない。

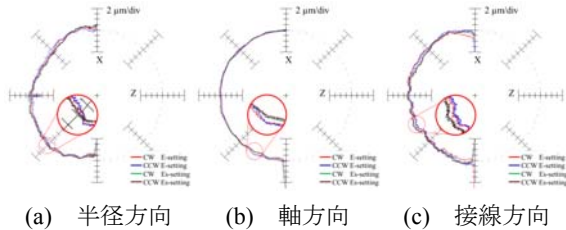


Fig. 10 E-, Es-setting を用いた ZXB の測定結果

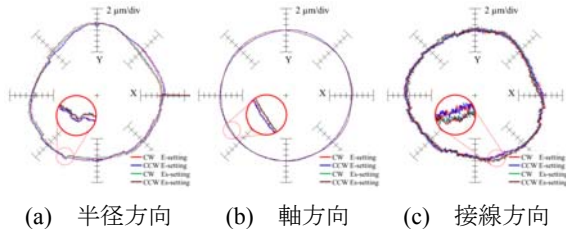


Fig. 11 E-, Es-setting を用いた XYZ の測定結果

4.2 R-test を用いた旋回精度以外の精度検査

図9(a)と図11(a)のXYZ同時3軸制御測定において、いくつかの半径方向の段差、突起が確認できる。その原因が直進軸にあるのか、または旋回軸にあるのかを調べるためボールバーを用いて、図12に示す直進2軸(X軸, Y軸)の円弧補間の精度測定と図13に示す旋回1軸(C軸)回転の精度測定を行った。結果をそれぞれ図14, 15に示す。

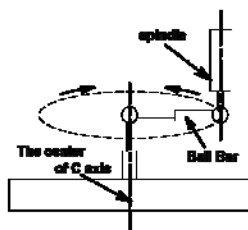


Fig. 12 XY軸の円弧補間

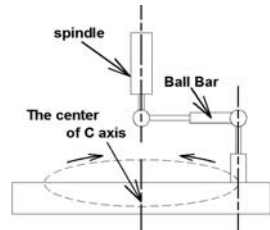


Fig. 13 C軸の回転

図9(a), 図11(a)の結果と図14の結果で見られる段差、突起などの変形の発生位置、大きさがほぼ一致していることが分かる。したがってこの対象機械には直進軸の運動に問題があり、C軸の旋回精度は良いことがわかった。半径方向と接線方向の測定では、測定時の旋回軸の角度によって直進軸の感度方向が変化するため、常に直進軸方向の誤差感度になるようにデータ変換を行うことができる。そこでE-SettingのデータをX軸方向に誤差感度の良いデータに変換を行った結果を図16に示す、またY

軸方向に誤差感度の良いデータに変換を行った結果を図17に示す。

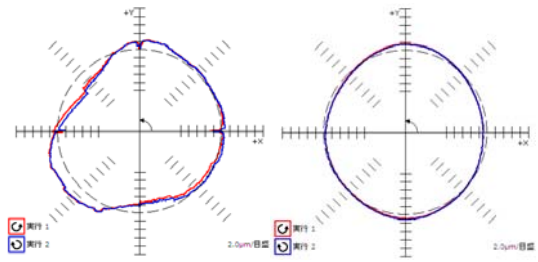


Fig. 14 円弧補間結果 Fig. 15 C軸回転結果

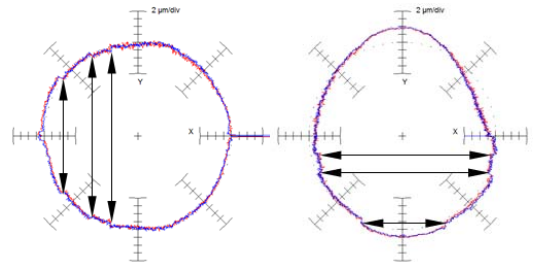


Fig. 16 X軸方向 Fig. 17 Y軸方向

図16では、X軸対称に同様の段差が見られ、図17では、Y軸対称に同様の段差が見られた。対象機にはX軸とY軸にピッチ誤差補正があることが分かった。

ボールバーを用いて同時3軸制御測定を行う場合、各測定方向で段取り作業が必要となるため、測定半径も異なる。そのためR-testのように各測定方向のデータを演算することができない。このことからボールバー測定によって現れた誤差原因以上のことをR-test測定は一度の測定で見える。

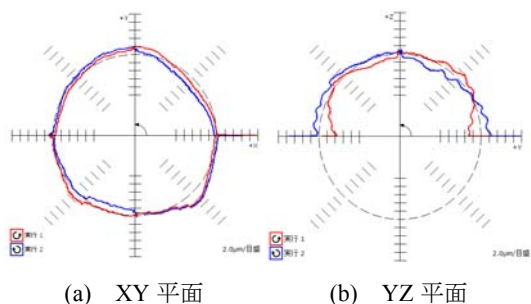
5軸マシニングセンタの旋回軸駆動機構は、モータからウォームギアなどの歯車変速装置を用いて旋回をしている構造のものが多い。しかし近年ではダイレクトドライブモータやビルトインモータの採用が進んでおり、歯車特有の誤差の影響も無く、高精度、高速回転が可能になった。

旋回精度の良い旋回軸でR-test測定を行えば、ピッチ誤差補正や真直度誤差、直角度誤差などの直進軸の運動誤差を発見することができる。直進軸の精度検査を行う2次元スケール(KGM)では測定プレートの大きさで測定範囲が制限されるが、旋回精度の良い旋回テーブルを用いればR-testはKGMより広範囲の測定が行え、また2次元スケール以上の測定方向があるため、工作機械が持つ誤差についてより多く検討できる。

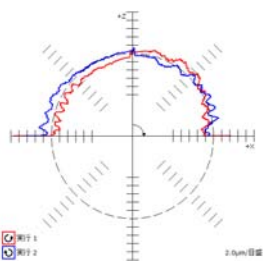
4.3 学外実験

(1) 工作機械 A

この機械は前章で用いた機械と同機種であるが製造年が古い。ボールバーを用いて2つの直進軸で円弧補間測定を行った結果を図18に示す。



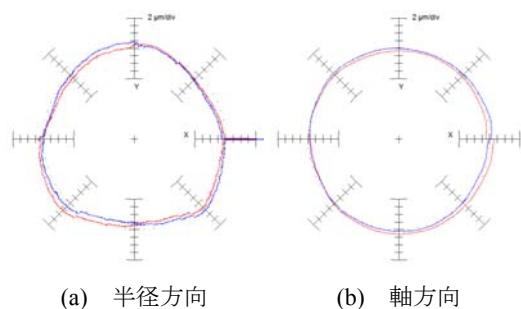
(a) XY 平面 (b) YZ 平面



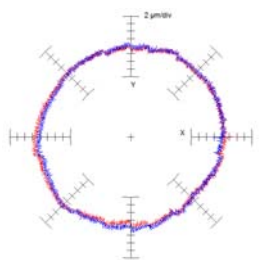
(c) ZX 平面

Fig. 18 直進 2 軸の円弧補間結果

今回の実験では異なる 2 つの送り速度 500・1000mm/min で測定を行った。ここで 500mm/min の結果を主に取り扱う。XYC 同時 3 軸制御測定は測定半径 100mm で行った測定結果を図 19 に示す。



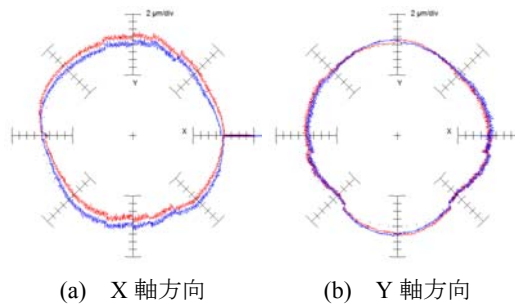
(a) 半径方向 (b) 軸方向



(c) 接線方向

Fig. 19 XYC 同時 3 軸制御測定結果

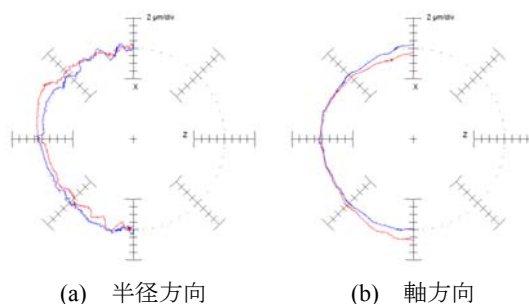
図 18 (a) と図 19 (a) の XYC 同時 3 軸制御測定の半径方向の結果はよく似た軌跡形状であることから、この誤差は主に直進軸に原因があると考えられる。したがって C 軸の旋回精度が良いことが確認された。旋回軸の旋回精度が良い場合、R-test を用いた測定は直進軸の運動誤差を評価することができるため、図 19 の各測定方向を Z 軸回転の座標変換を用いて、センサの感度が工作機械の X、Y 軸方向になるような演算を行った結果を図 20 に示す。



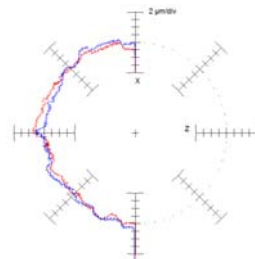
(a) X 軸方向 (b) Y 軸方向

Fig. 20 XYC 測定の演算結果

ZXB 同時 3 軸制御測定は測定半径 60.935mm で行った。その測定結果を図 21 に示す。



(a) 半径方向 (b) 軸方向



(c) 接線方向

Fig. 21 ZXB 同時 3 軸制御測定結果

この ZXB 同時 3 軸制御測定の結果 (図 21 (a)) と Z 軸を用いた直進 2 軸の円弧補間測定の結果 (図 18 (b) (c)) から Z 軸の移動に伴う周期的な振動や双方向位置決め誤差があることが分かった。そこで Z 軸についてより検査するため、規格に存在しない YZC 同時 3 軸制御測定を B 軸を 90° に固定して行った。YZC 同時 3 軸制御測定を測定半径 100mm で行った測定結果を図 22 に示す。図 22 の各測定方向を X 軸回転の座標変換を用いて、センサの感度が工作機械の Y 軸方向、Z 軸方向になるような演算を行った結果を図 23 に示す。

図 20 と図 23 の Y 軸方向の軌跡から Z 軸が一定の時 Y 軸の移動に問題はなく、Z 軸と同期運転させた時の Y 軸の誤差が大きくなっていることが分かる。図 22 (b) では、Z 軸の移動に伴い、X 軸方向に周期的な振動がみられることを示している。

図 21 (a) から CW では 90°、CCW では 270° 付近に特徴的な波形がある。これは、Z 軸の移動に伴う X 軸方向の振動が現れている。ZXB 同時 3 軸制御の半径方向で

は、直進軸方向の感度方向が 90° から 270° にかけて X 軸, Z 軸, X 軸方向と変化するため感度方向が X 軸方向となる 90° , 270° 付近にのみ現れたと考えられる。また, Z 軸をプラス方向に移動させた時に大きな誤差が発生している。

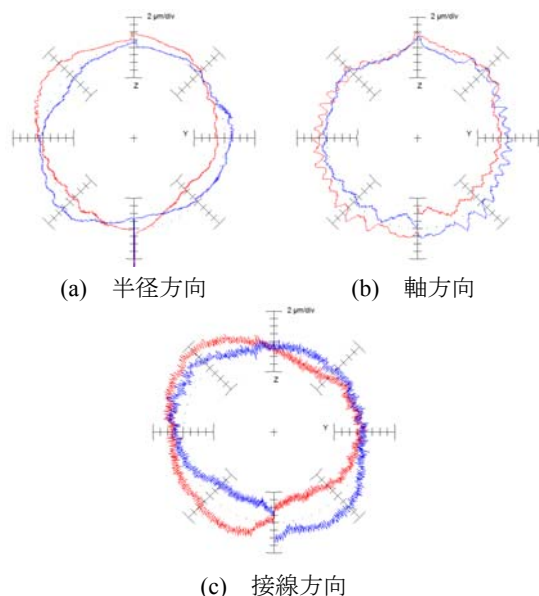


Fig. 22 YZC 同時 3 軸制御測定結果

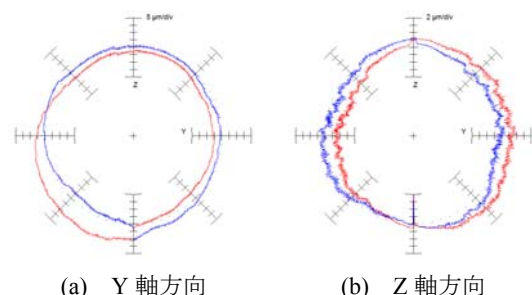


Fig. 23 YZC 測定演算結果

異なる送り速度での測定を行った結果, 制御軸によって誤差軌跡に違いが見られた。直進軸の X 軸と Y 軸が同期する場合, 送り速度によって軌跡の違いは見られなかった。しかし, Y 軸と Z 軸が同期する場合では, 送り速度の違いにより, 誤差の現れ方が異なっており, 運動精度に速度依存性がある。Z 軸をプラス方向に移動させるときに X 軸方向に振動し, Z 軸と Y 軸を同期運転させたときの Y 軸の移動に問題がある。送り速度が遅い場合は Z 軸の運動精度が悪くなり, Z 軸の移動に伴う X 軸方向の振動が大きく現れる結果となった。

5. 結 言

本研究では R-test 装置を用いて工作機械の精度検査を行った結果, 以下の成果を得た。

- 1) 2014年に制定された5軸マシニングセンタ補間運動精度検査規格を参考に行ったが作業上の問題点がないことを確認した。

- 2) R-test 装置の製作には変位計を固定する治具の加工精度を要求しなくても測定装置として使用できることを確認した。
- 3) 装置の設置姿勢を変化させてもほぼ同様の結果が取得できることを確認した。
- 4) R-test 装置は旋回軸の旋回精度を測定する目的で開発されたが, 直進軸の運動誤差など工作機械の多くの運動誤差を取得できることを確認した。
- 5) R-test 装置は3つのセンサでデータを取得し, そのデータを座標変換することでさまざまな方向に誤差を表現することが出来ることを確認した。
- 6) 5軸マシニングセンタ以外でも旋回軸を有している機械であれば R-test 装置は他の測定装置以上の運動誤差を取得できることを確認した。
- 7) ボールバーや KGM などの運動精度測定装置は測定範囲には制限が発生するが, R-test 装置は旋回軸を有している機械であればその機械に合った測定範囲で運動精度を測定することが出来ることが分かった。

参考文献

- 1) 堤正臣, 多軸工作機械の運動精度試験方法に関する調査研究, 社団法人日本工作機械工業会, 2005
- 2) 堤正臣, 5軸制御マシニングセンタ精度検査規格標準化説明会資料, 社団法人日本工作機械工業会, 2008
- 3) ISO10791-6:2014, Machine Tools -Test conditions for machining centres- Part 6:Accuracy of speeds and interpolations.
- 4) Weikert, S., Knapp, W., 2004, R-test: A New device for accuracy measurement on five axis machine tools, Annals of CIRP, Vol. 53, No. 1, pp. 429-432.
- 5) Bringmann, B., Küng, A., 2005, A New Measuring Artifact for True 3D Machine Tool Testing and Calibration, Annals of the CIRP, Vol. 54, No. 1, pp. 471-474.
- 6) Bringmann, B., Knapp, W., 2006, Model-based Chase-the-Ball Calibration of 5-Axes Machining Center, Annals of the CIRP, Vol. 55, No. 1, pp. 531-534.
- 7) Florussen, G. H. J., Spaan, H. A. M., 2007, Static R-test: allocating the centerline of rotary axes of machine tools, Laser Metrology and Machine Performance VIII, pp. 196-202, Bedford.
- 8) FIDIA HMS, [http://www.fidia.it/download/brochure/HMS09_09eng\(A4-SF\).pdf](http://www.fidia.it/download/brochure/HMS09_09eng(A4-SF).pdf), 2015/1/10
- 9) IBS Precision Engineering, <http://www.ibspe.com/public/ploads/content/files/Machine-Tool-Inspection-Solutions-web.pdf>, 2015/1/10
- 10) 堤正臣, 田島和也, 崔成日, ムディタ ダサナヤカ, 3D プローブによる回転テーブルの振れ精度測定システムの開発, 日本機械学会[No.10-11]第8回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 287・288, 2010.