

## 5 軸制御マシニングセンタの精度向上に関する研究

高山直士\*<sup>1</sup>、赤井孝行\*<sup>2</sup>、竹内芳美\*<sup>2</sup>、廣垣俊樹\*<sup>3</sup>Study on the Improvement of Motion Accuracy of 5 Axis Control Machining Center  
(Influence of the rotating axis travelling range on the alignment error)Naoshi TAKAYAMA\*<sup>4</sup>, Akai TAKAYUKI, Yoshimi TAKEUCHI and Toshiki HIROGAKI\*<sup>4</sup> MORI SEIKI CO., LTD.

362, Idono, Yamatokoriyama, Nara 639-1183 Japan

The demand for five-axis machining centers is rapidly increasing to achieve process integration and high machining accuracy. This paper proposes the development of a five-axis machining center with Table-on-Table structure due to the ease of achieving high accuracy with a large rotary axis travelling range. Table-on-Table type structure can easily achieve a wide travelling range, especially for the first rotating axis. The ease of achieving high accuracy with a large travelling range has been verified by simulating the supposition of double ball bar (DBB) measurement. When the magnitude of alignment error is estimated by using DBB measured data including motion errors of the rotating axis with the same order, it is shown by the simulation analysis that the magnitude of the estimated alignment error depends on the travelling range.

**Key Words** : Accuracy, Generation Motion, Machine Tool, 5 Axis Control Machining Center, Alignment Error of Rotating Axis, Motion Error, DBB

## 1. 緒言

近年、「工程集約」や「加工精度向上」を目的として5軸制御マシニングセンタのニーズが急速に高まっている。ところが、5軸制御マシニングセンタは3軸制御マシニングセンタに対してさらに2つの旋回軸が加わるため、3軸制御マシニングセンタと同等以上の機械精度にすることは一般的に難しい。これまでに様々な構造の5軸マシニングセンタが開発されているが、その中でも比較的作り易く、精度的にも安定しているという理由から、後述する図1(b)に示す構造をしたいわゆるトラニオン型のもが多く作られている。しかし、このトラニオン型の5軸制御マシニングセンタが他の構造のものに比べて精度的に優れていることの検証はされていない。

5軸マシニングセンタの構造としては、トラニオン型以外にも主なものだけでも図1に示すようなテーブル・オン・テーブル型、主軸1軸首振り型、主軸2軸首振り型、ワーク完全固定型など様々なものが作られている。

本研究では、運動精度と言う観点から見て、どのような構造のものが精度を出しやすいかを検討する。図1に示した構造の5軸マシニングセンタでは、その第1旋回軸の旋回角度範囲が非常に異なる。すなわち、

テーブル・オン・テーブル型の場合には第1旋回軸の旋回角度範囲を360度近く取ることができるのに対し、トラニオン型の場合には第1旋回軸の旋回角度範囲を180度近くにしとることができない。また、主軸1軸首振り型、主軸2軸首振り型、ワーク完全固定型の場合には第1旋回軸の旋回角度範囲を90度程度にしと取れないものが多い。

このような第1旋回軸の旋回角度範囲が機械の精度にどのように影響するかをシミュレーションによって検討する。すなわち、第1旋回軸の旋回角度範囲を360°近くまで大きくとることができると、旋回軸中心が定めやすいと考えたからである。中心軸の位置が定義できれば、運動精度の測定や組立ての際の基準が明確にしやすくなると思われる。

旋回軸中心が明確に定義できないと、後述するように図2に示すオフセット誤差や角度誤差からなるアライメント誤差が大きくなりやすい。テーブル・オン・テーブル型5軸マシニングセンタが従来のトラニオン型と比べて良好な運動精度をもっていることは実測によって確認されている<sup>(2)</sup>。

本研究においては、旋回角度範囲が大きく取れると旋回軸の回転中心がより正確に求められ、アライメント誤差が小さくなることについて、DBB測定<sup>(3)</sup>を模し

\*1 (株)森精機製作所 (〒639-1183 奈良県大和郡山市井戸野町362番地)

\*2 中部大学 工学部 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

\*3 同志社大学 理工学部 (〒610-0321 京都府京田辺市多々羅部谷1-3)

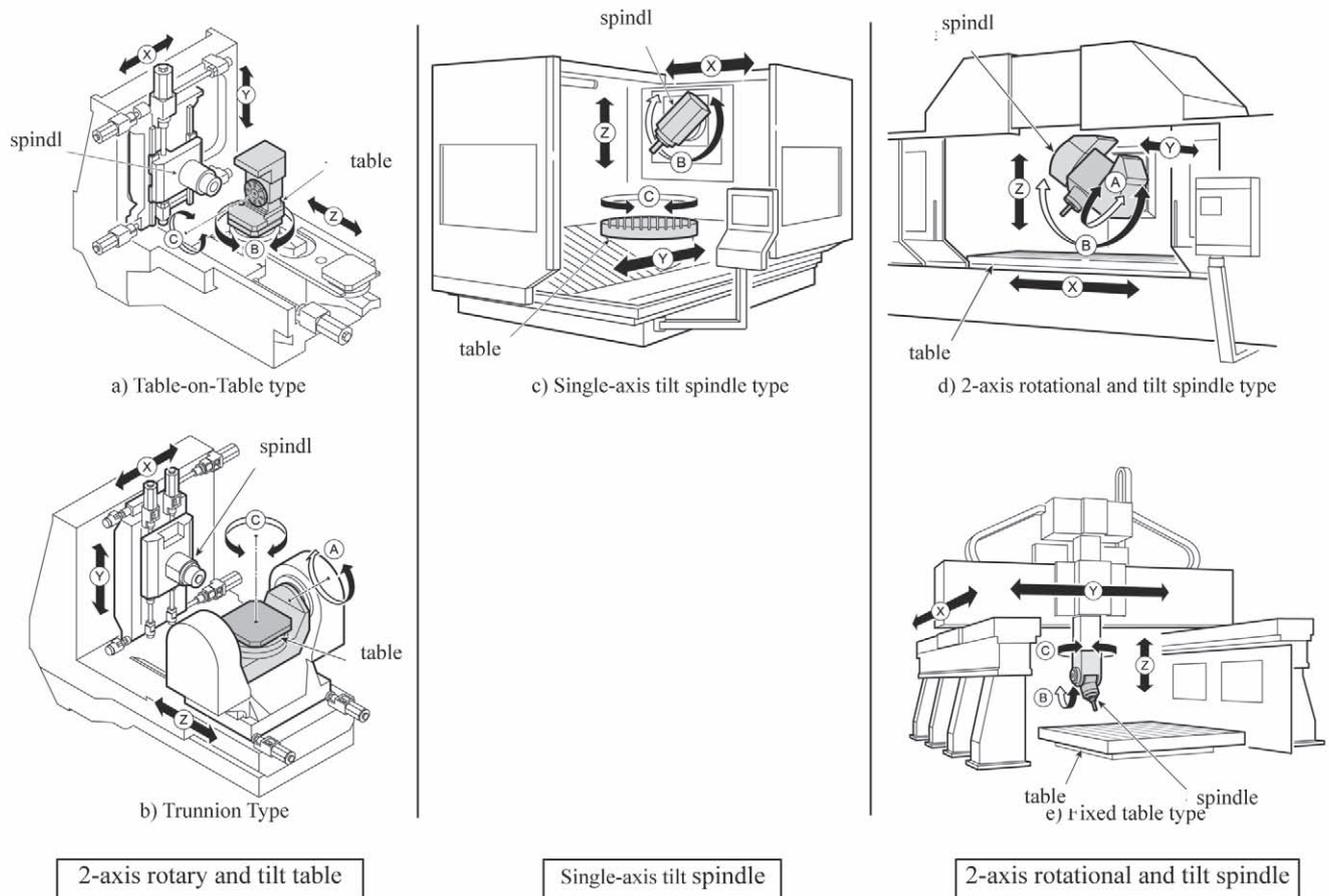
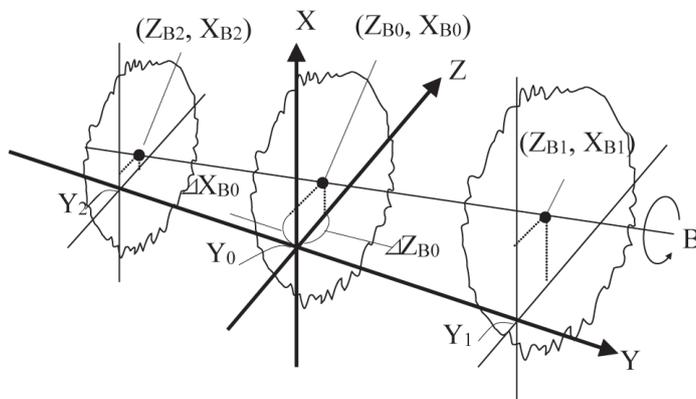


Fig. 1 The types in each pattern of five-axis machining centers



Center position of offset error :  $(Z_{B0}, X_{B0})$   
 Offset error :  $\Delta Z_{B0} = Z_{B0}, \Delta X_{B0} = X_{B0}$   
 Angular error :  $\Delta B_z = (Z_{B1} - Z_{B2}) / (Y_1 - Y_2)$   
 $\Delta B_x = (X_{B1} - X_{B2}) / (Y_1 - Y_2)$

Fig. 2 Definition of offset error and angular error in rotational axis B

たシミュレーション解析によって裏付けることを目的としている。さらにDBB法を用いて実測された運動誤差軌跡を用いて同様のシミュレーション解析も行う。

## 2. シミュレーション解析の方法

### 2.1 オフセット誤差だけが存在する場合

本シミュレーションにおいては、図2に示すように旋回軸のアライメント誤差はオフセット誤差と角度誤差から成り立っているものとする。すなわち、旋回回転中心の2次以上の曲がりの成分はないものと仮定する。まずアライメント誤差のうちオフセット誤差だけ

が存在する場合を考える。10次山以下の低次山成分の運動誤差だけが存在する場合、旋回角度範囲の違いが、DBB法によって測定されたデータから推定される中心位置の推定誤差に与える影響をシミュレーション解析する。10次山以上の運動誤差成分についてはその影響は小さいと思われるので、無視することとした。なお、1回転中(360°)にn周期成分をもつ運動誤差成分をn次山と呼ぶ。シミュレーションに用いるプログラムの概要を図3に示す。その主な手順は次の通りである。

- (1) オフセット誤差を含んだ旋回軸の $Y_0$ 断面での中心座標  $(Z_{B0}, X_{B0})$  と、後述する図5において

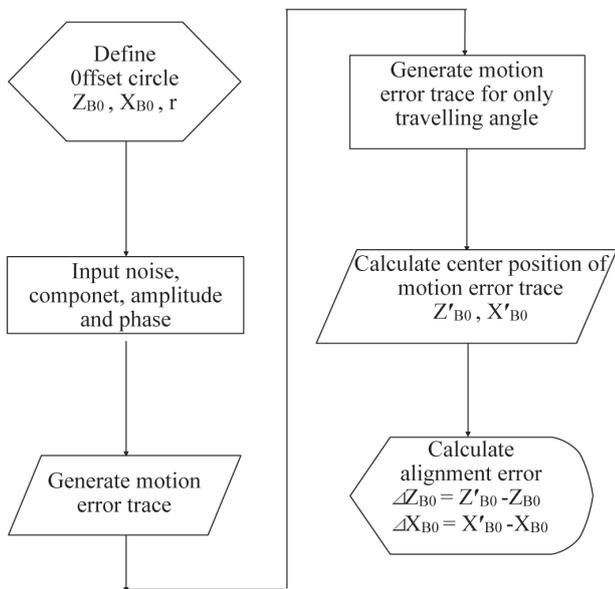


Fig. 3 Flowchart for simulation

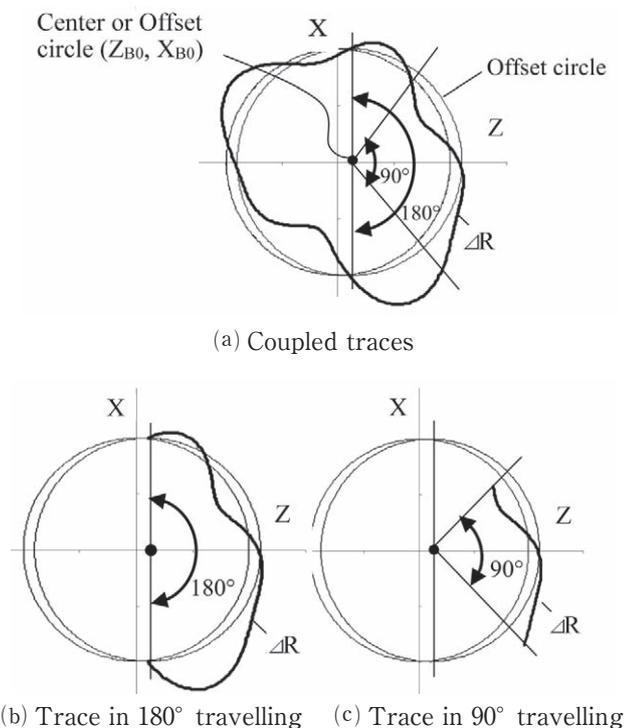


Fig. 4 Examples of measured motion error traces depending on rotational angle

テーブル上に設置されている球面座の回転中心からの距離  $r$  を定める。

- (2) 対象とする旋回軸回転に伴う運動誤差として、各山成分の次数に軸中心のオフセット量より少し小さい程度の振幅と位相を与える。
- (3) (1)と(2)によって生成される運動誤差軌跡を360°分について計算する。図4(a)に運動誤差軌跡の計算結果の一例を示す。
- (4) (3)で作られた運動誤差軌跡から想定する旋回角度分だけを切り取った運動誤差軌跡を作る。図4(b)に旋回角度範囲が180°分 ( $-90^\circ \sim 90^\circ$ )、同図

(c)に旋回角度範囲が90°分 ( $-45^\circ \sim 45^\circ$ ) の場合の運動誤差軌跡を示す。

- (5) (4)で定めた運動誤差軌跡から最小2乗法を用いて推定される旋回軸の回転中心の座標 ( $Z'_{B0}$ ,  $X'_{B0}$ ) を求める。
- (6) (5)で求めた推定中心座標と(1)で仮定した中心座標を比較して、オフセット誤差の推定誤差  $\Delta Z'_{B0} = Z'_{B0} - Z_{B0}$ ,  $\Delta X'_{B0} = X'_{B0} - X_{B0}$  を算出する。

## 2.2 角度誤差も存在する場合

本節では旋回軸のアライメント誤差のオフセット誤差に加え、角度誤差も存在する場合を想定し、旋回角度範囲の違いが角度誤差の推定誤差に与える影響をシミュレーション解析する。シミュレーション解析の手順は次のとおりである。

- (1)  $Y_0$ ,  $Y_1$ ,  $Y_2$  の3位置について所定のオフセットを与えて、各平面の旋回軸の中心座標 ( $Z_{B0}$ ,  $X_{B0}$ )、( $Z_{B1}$ ,  $X_{B1}$ )、( $Z_{B2}$ ,  $X_{B2}$ ) を定める。
- (2) 各位置について旋回角度範囲毎に推定される中心座標 ( $Z'_{B0}$ ,  $X'_{B0}$ ) を求める。シミュレーションは2.1節で述べた方法で行う。
- (3) (2)のシミュレーション結果を用いてZ、X軸方向の角度誤差を計算する。角度誤差の推定誤差  $\Delta B_{Z12}$  と  $\Delta B_{X12}$  は2つの位置で求められた推定されるオフセット誤差を用いて、 $\Delta B_z = (Z_{B1} - Z_{B2}) / (Y_1 - Y_2)$ 、 $\Delta B_x = (X_{B1} - X_{B2}) / (Y_1 - Y_2)$  に従って算出する。
- (4) (3)で得られた結果を設定条件と比較し、アライメントの推定角度誤差  $\Delta B'_z$ 、 $\Delta B'_x$  を算出する。

## 3. シミュレーション解析の内容と設定条件

### 3.1 オフセット誤差だけが存在する場合

#### 3.1.1 山次数、旋回角度範囲、オフセット誤差の設定

2から10次山および15次山と20次山の各山について旋回角度が180°の場合の中心位置の推定誤差をシミュレーション解析する。オフセット誤差の中心座標 ( $Z_{B0}$ ,  $X_{B0}$ ) は ( $0\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ )、各山成分の振幅は  $5\mu\text{m}$  に設定した。

$90^\circ$  から  $360^\circ$  の範囲で  $30^\circ$  毎の旋回角度について、中心位置の推定誤差をシミュレーション解析する。オフセット誤差の中心座標 ( $Z_{B0}$ ,  $X_{B0}$ ) は ( $0\mu\text{m}$ ,  $0\mu\text{m}$ ) の場合と ( $0\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ ) の場合の2通りを設定する。また、運動誤差成分として振幅が  $5\mu\text{m}$  の2次山、振幅が  $3\mu\text{m}$  の3次山、振幅が  $2.5\mu\text{m}$  の5次山を与えた。

オフセット誤差の中心座標 ( $Z_{B0}$ ,  $X_{B0}$ ) が ( $0\mu\text{m}$ ,  $0\mu\text{m}$ )、( $0\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ )、( $10\mu\text{m}$ ,  $0\mu\text{m}$ )、( $10\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ ) の場合について中心位置の推定誤差をシミュレーション解析する。運動誤差成分として振幅が  $5\mu\text{m}$  の2次山、振幅が  $3\mu\text{m}$  の3次山、振幅が  $2.5\mu\text{m}$  の5次山を与えた。

### 3.1.2 実測された運動誤差軌跡を用いたシミュレーション

開発したテーブル・オン・テーブル型の5軸制御マシンニングセンタの第1旋回軸であるB軸について、DBB 5法<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>を適用して測定された旋回軸の運動誤差軌跡を使い、前述のシミュレーション解析を行う。DBB 5法による旋回軸の運動軌跡は次のようにして求める<sup>(6)</sup>。

- (1) 図5に示すように、DBB装置の1つの球をB軸中心軸上に配置し、DBB装置のバーをX方向に設置する。
- (2) 直線軸を静止させたままで旋回軸であるB軸のみを $-100^{\circ} \sim 180^{\circ}$  旋回させた時の誤差 $\Delta X_B$ を測定する。
- (3) 同様にDBB装置のバーをZ方向に設置して $\Delta Z_B$ を測定する。
- (4) 前項で求めた $\Delta R_{ZB}$ 、 $\Delta R_{XB}$ をベクトル合成して、B軸回転中心位置の運動誤差 $\Delta R$ をもとめる。  
シミュレーション解析においては $360^{\circ}$ を1000分割して計算する。

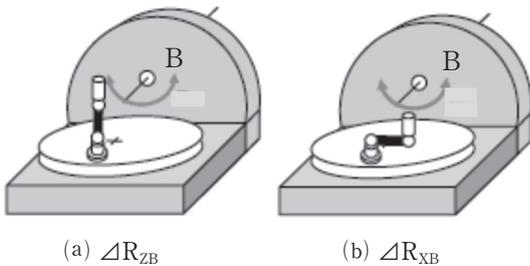


Fig. 5 Measurement of radial motion for rotational axis B

Table 1 Alignment error given at Y0, Y1, Y2

Y Position mm	Offset error		Angular error	
	$\Delta Z_B$ $\mu\text{m}$	$\Delta X_B$ $\mu\text{m}$	$\Delta B_Z$ $\mu\text{m}/350\text{mm}$	$\Delta B_X$ $\mu\text{m}/350\text{mm}$
$Y_1 : 350$	10	10	10	0
$Y_0 : 0$	0	10		
$Y_2 : -350$	-10	10		

### 3.2 角度誤差も存在する場合

$Y_0$ 、 $Y_1$ 、 $Y_2$ 位置に設定したオフセット誤差と角度誤差を表1に示す。Z軸方向のオフセット誤差 $10\mu\text{m}$ に加えて、Z軸方向の角度誤差 $10\mu\text{m} / 350\text{mm}$ が存在する場合を想定する。X軸方向のオフセット誤差とX軸方向の角度誤差は非常に小さいものとする。

### 4. シミュレーション解析の結果と考察

#### 4.1 オフセット誤差だけが存在する場合

##### 4.1.1 山次数の影響

B軸の中心座標 ( $Z_{B0}$ 、 $X_{B0}$ ) を  $(0\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m})$  に置いたケースについて、振幅 $5\mu\text{m}$ をもつ2~10次山および

15次山と20次山成分が単独で存在した場合について計算された中心位置の推定誤差を図6に示す。

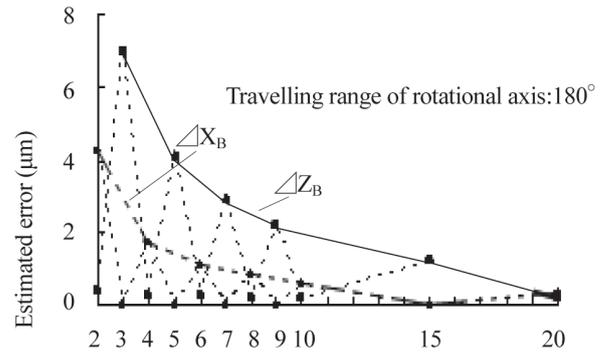


Fig. 6 Influence of noise component Component

山次数が大きくなるに従い、中心位置の推定誤差に及ぼす影響の割合は小さくなり、10次山成分は2次山成分の4分の1の影響しかもたないことがわかる。誤差量が偶数山成分で小さく現れているのは位相をすべて $0^{\circ}$ として計算しているためである。

#### 4.1.2 旋回角度範囲の影響

B軸の中心座標、( $Z_{B0}$ 、 $X_{B0}$ ) が  $(0\mu\text{m}$ 、 $0\mu\text{m})$ 、 $(0\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m})$  にあるケースについて (=オフセット誤差が存在しない場合とX軸方向に $10\mu\text{m}$ 存在するケース) について、旋回角度範囲を $30^{\circ}$ ごとに変化させた。そのときに計算された中心位置の推定誤差の関係を図7に示す。

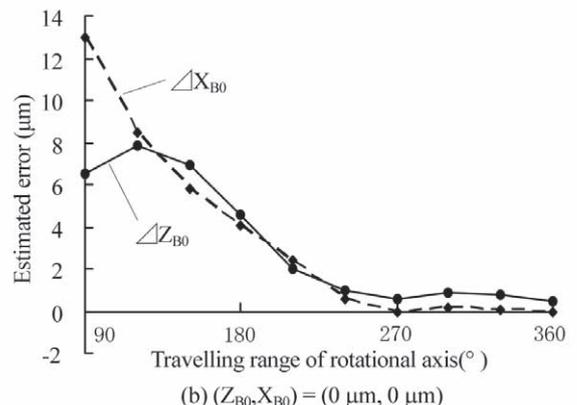
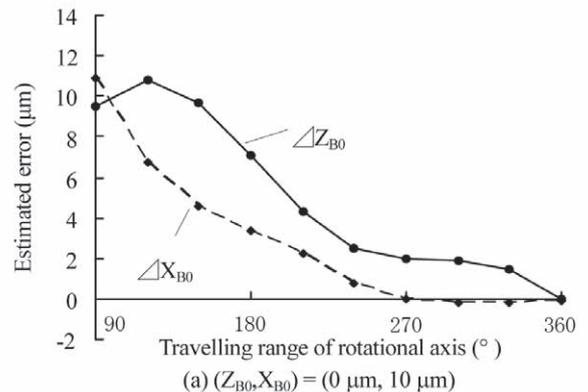


Fig. 7 Influence of the travelling range of rotational axis on the offset error

当然のことであるが、旋回角度範囲が $360^\circ$ の場合には推定された中心位置の誤差はいずれの場合も $1\mu\text{m}$ 以下と非常に小さい。それに対しB軸中心座標 $(Z_{B0}, X_{B0})$ が $(0\mu\text{m}, 10\mu\text{m})$ にある場合には、 $180^\circ$ 旋回角度範囲をとるとX軸方向に $3.5\mu\text{m}$ の推定誤差が生じ、Z軸方向には $7.2\mu\text{m}$ の推定誤差が生じている。 $90^\circ$ の旋回角度範囲の場合にはそれぞれX軸方向 $10.9\mu\text{m}$ 、Z軸方向 $9.5\mu\text{m}$ とかなり大きな推定誤差が生じている。一方、旋回角度範囲が $270^\circ$ くらいあると推定誤差はいずれの場合も $2\mu\text{m}$ 以下となり、非常に小さくなることが分かった。

以上の結果より、旋回角度範囲が $180^\circ$ より小さくしか設定が困難なトラニオン型よりも、旋回角度を $360^\circ$ 近く取れるテーブル・オン・テーブル型の方がオフセット誤差を容易に小さくできることがわかる。

#### 4.1.3 オフセット誤差の位置の影響

B軸の中心位置 $(Z_{B0}, X_{B0})$ が $(0\mu\text{m}, 0\mu\text{m})$ 、 $(0\mu\text{m}, 10\mu\text{m})$ 、 $(10\mu\text{m}, 0\mu\text{m})$ 、 $(10\mu\text{m}, 10\mu\text{m})$ にある場合、それぞれについてシミュレーション解析により推定誤差 $\Delta Z'_{B0}$ 、 $\Delta X'_{B0}$ を求めた。さらに、求めた $\Delta Z'_{B0}$ 、 $\Delta X'_{B0}$ をベクトル合成して推定半径誤差 $\Delta r'_{B0}$ を算出し、オフセット誤差の位置の影響について調べた。各オフセット誤差の位置毎に旋回角度範囲を $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $360^\circ$ と変えた場合の推定半径誤差 $\Delta r'_{B0}$ との関係を図8に示す。

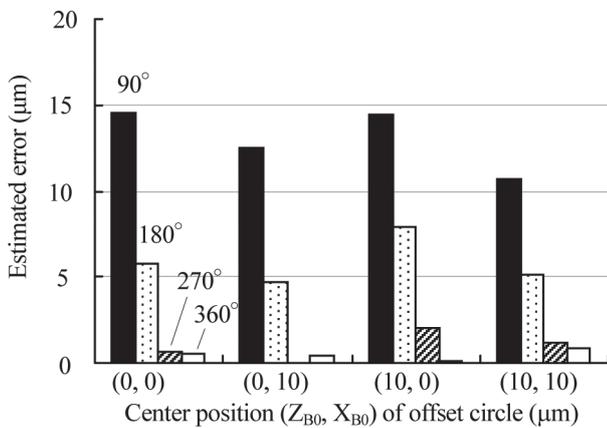


Fig. 8 Influence of the offset circle position on the offset error

オフセット誤差の位置を変え場合でも、推定半径誤差 $\Delta r'_{B0}$ は旋回角度範囲毎でほぼ同様の大きさとなった。また、4.1.2節の旋回角度範囲の影響と同様に、いずれのオフセット誤差の位置が変わっても旋回角度範囲が $270^\circ$ 以上で推定誤差は $2\mu\text{m}$ と非常に小さくなっている。

#### 4.1.4 実測値を用いたシミュレーション解析

開発したテーブル・オン・テーブル型の5軸制御マシ

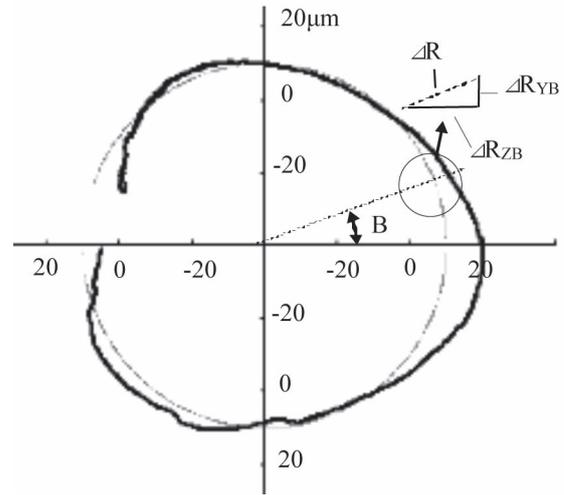


Fig. 9 Motion error traces of B axis of newly developed machining center measured by DBB5 method

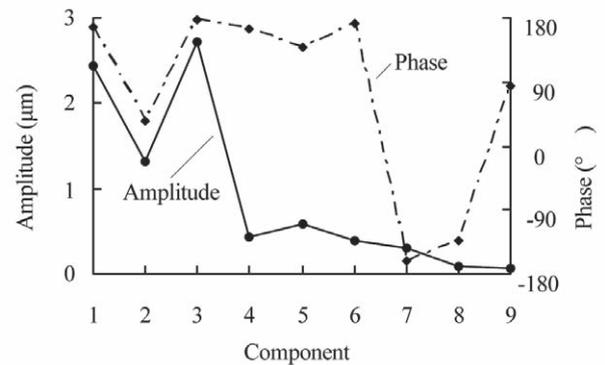


Fig. 10 Fourier analysis of motion error traces shown in Fig. 10

ニングセンタの第1旋回軸であるB軸のみを動かした場合にDBB5法を用いて測定された $Y=0$ でのB軸の運動誤差軌跡を図9に示す。

この場合の運動誤差は最大領域円半径で評価して $10\mu\text{m}$ であった。この運動誤差軌跡をフーリエ解析して得られた各次山成分の振幅と位相を図10に示す。この図からわかるように、2次山成分の振幅は $1.3\mu\text{m}$ だが、3次山成分の振幅は $2.7\mu\text{m}$ と大きい。

これらの10次山以下の成分の実測された振幅と位相を用いて、オフセット誤差が推定誤差に及ぼす旋回角度範囲の影響をシミュレーション解析した。11次山以上の成分は、大きな振幅をもつ山成分が存在しないことと、先の図6の解析結果よりシミュレーション結果に大きな影響を及ぼさないことから無視している。

その結果を図11に示す。図8に示した結果とほぼ同様な結果が得られた。すなわち、旋回角度範囲が $180^\circ$ の場合にはオフセット誤差の推定誤差は $11\mu\text{m}$ 程度となり、旋回角度範囲が $90^\circ$ の場合にはそれらが $20\mu\text{m}$ 程度となり、非常に大きくなった。

実際にはトラニオン型の5軸制御マシニングセンタでは第1旋回軸であるB軸の旋回角度範囲は $150^\circ$ 程度

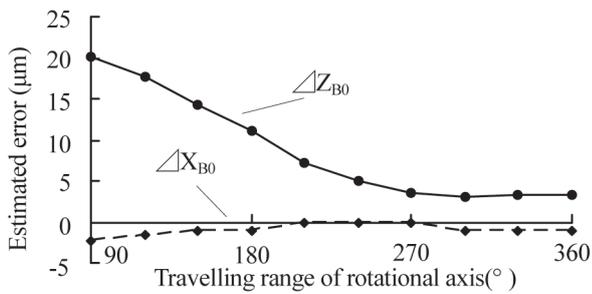


Fig. 11 Influence of travelling range of rotational axis on the estimated offset error based on motion error trace by DBB5 on newly developed machining center

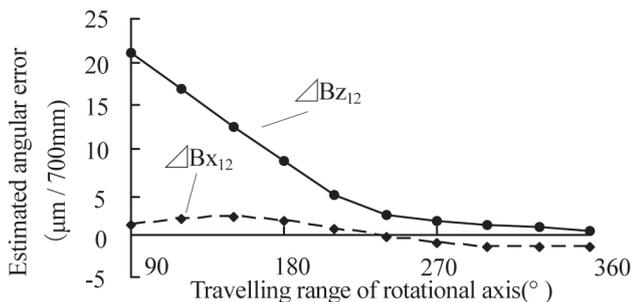


Fig. 12 Influence of the travelling range of rotational axis on the estimated angular error

しか取れないことが多いが、その場合には15 μm程度の推定誤差が生じるものと推定される。

#### 4.2 角度誤差も存在する場合

表1で設定された角度誤差に加え、図4に示した運動誤差がB軸に存在するとした場合について計算された角度誤差の推定誤差とB軸の旋回角度範囲の関係を図12に示す。このような条件下では角度誤差が存在しないX軸方向の推定誤差は旋回角度範囲に関係なく、2 μm / 700mmと極めて推定誤差は小さい。しかし、角度誤差を与えているZ軸方向の旋回角度範囲が90°の場合には21 μm / 700mmとかなり大きい。この推定誤差は旋回角度範囲が大きくなると徐々に小さくなり、旋回角度範囲が210°の場合は4.5 μm / 700mm、270°の場合は1.8 μm / 700mmとなった。それ以後も旋回角度範囲の増大とともに推定誤差は漸次減少し、360°で0.2 μm / 700mmとなっている。

#### 5. 結 語

5軸制御マシニングセンタにおいて、全体構造が運動精度に及ぼす影響を調べる一環として、運動誤差を有する旋回軸の旋回角度範囲が測定される旋回軸中心のアライメント誤差の推定値にどの程度影響するかを

シミュレーション解析した。得られた主な結論は次の通りである。

- (1) 第1旋回軸の旋回角度範囲が360°近く取れるテーブル・オン・テーブル型の場合にはアライメント誤差の推定誤差は非常に小さくなった。
- (2) 第1旋回軸の旋回角度範囲が180°のトラニオン型の場合には運動誤差成分の振幅とほぼ同程度のアライメント誤差の推定誤差が生じた。
- (3) 第1旋回軸の旋回角度範囲が90°の主軸首振り型の場合には運動誤差の振幅の3～5倍程度のアライメント誤差の推定誤差が生じた。
- (4) 旋回角度範囲が270°程度とれると、アライメント誤差の推定誤差は2 μm以下となり、アライメントをほぼ正確に推定できる。
- (5) 項目(1)～(3)について実際のDBB法を用いて測定された運動誤差軌跡を用いたシミュレーション解析においても同様の結果が得られた。

以上より、旋回軸の角度誤差の推定誤差を小さくするためには、旋回角度範囲が270°程度以上あることが望ましい。旋回角度範囲を360°近くとれるテーブル・オン・テーブル型の方が180°近くしかとれないトラニオン型よりもアライメント誤差の推定誤差を小さくできる可能性が高いことが確かめられた。

#### 文献

- (1) 藤嶋誠、高山直士、“高速、高精度な5軸複合加工機の開発”、精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、(2008)、A09、pp. 5-6.
- (2) 高山直士、太田秀人、植田健介、竹内芳美、“5軸制御マシニングセンタの精度向上に関する研究(トラニオン型とテーブル・オン・テーブル型の運動精度の比較)”、日本機械学会論文集(C編)、掲載予定。
- (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) Kakino, Y., Ibaraki, S., Ogawa, K. and Ota, H., “Measurement of Motion Accuracies of FIVE-AXIS Machine tools by Using the Double Ball Bar Method DBB5”. Proc. of International Symposium on Flexible Automation 2008, (2008), JS006, pp.1-4.
- (5) Akai, T., Ueda, K., Ogawa, K. and Kakino, Y., “The Measurements of Motion Accuracy of 5 Axis Machining Center- Motion Accuracy of Simultaneous 5 Axis Control”. Proc. of International Symposium on Flexible Automation 2010, (2010), JPS- 2479, pp.1-4.
- (6) 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、“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(第1報)、一誤差成分の分類と改良型ボールバー装置(DBB5)の開発”、精密工学会誌、Vol. 76, No. 3 (2009), pp. 333-337.