



# 5軸制御マシニングセンタの傾斜回転軸位置決め精度 測定方法の開発 : ロータリエンコーダと水準器を 使った傾斜計の開発

崔, 成日  
高橋, 和也  
堤, 正臣  
佐藤, 隆太

---

## (Citation)

精密工学会誌, 73(9):1040-1045

## (Issue Date)

2007-09-05

## (Resource Type)

journal article

## (Version)

Version of Record

## (URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90001949>





## 5軸制御マシニングセンタの傾斜回転軸位置決め 精度測定方法の開発

—ロータリエンコーダと水準器を使った傾斜計の開発—

崔 成日\*\* 高橋和也\*\* 堤 正臣\*\*\* 佐藤隆太\*\*\*

Development of Measuring Method for Positioning Accuracy of Tilting  
Axes in Five-axis Machining Centers

— Development of Clinometer using a Rotary Encoder and a Level —

Chengri CUI, Kazuya TAKAHASHI, Masaomi TSUTSUMI and Ryuta SATO

This paper describes the measuring methods for positioning accuracy of tilting axes in five-axis controlled machining centers with a tilting rotary table. The top surface of the tilting rotary table is generally in higher position than the tilting axis. In this case, there is no measuring method except for a manually operated clinometer. Thus, a clinometer consisting of a precision rotary encoder and a bubble level was firstly developed. In the method, operators have to read visually the scale of the level and the reading accuracy is dependent on their ability. Instead of the bubble level, an electronic level with high resolution was employed for comparison. A ball bar equipment was also applied to measure the angular positioning accuracy of the tilting rotary table, as the ball bar equipment can measure the angular displacement continuously.

**Key words:** five-axis, machining center, positioning accuracy, tilting axis, clinometer, rotary encoder, ball bar

### 1. 結 言

近年、複雑形状部品の加工や加工効率の向上のために、5軸制御マシニングセンタが利用されるようになってきた。5軸制御マシニングセンタは、工作物と工具との間の相対姿勢を任意に変えられる特徴があり、複雑形状部品の加工や加工効率の向上が期待できる機械である。しかし、5軸制御マシニングセンタは従来の3軸制御マシニングセンタに比べて、機構が複雑で、多くの誤差成分があることが指摘されており、精度の補正が重要な課題になっている<sup>1-3)</sup>。

マシニングセンタの精度検査項目の一つである軸の位置決め精度測定方法に着目すると、5軸制御マシニングセンタの直進軸については従来から利用されているレーザ測長器<sup>4-6)</sup>で測定でき、回転軸についても図1に示したレーザ干渉計と割出し盤とを組み合わせた装置で測定することができる<sup>7)</sup>。

しかし図2に示した傾斜回転テーブルのように回転軸(A'軸)がテーブル上面よりも低い場合があるように、割出し盤の中心を傾斜軸の回転中心に合わせられない場合は、この測定装置を用いることはできない。また、このような測定装置で測定するときに、測定間隔は割出し盤の割出し角度に依存するために、より小さな割出し角度で測定を行うことは困難である。

テーブル上面が傾斜軸中心線よりも高い位置にある場合でもテーブル上に載せるだけで傾斜面の角度を測定する装置として、従来から傾斜計(クリノメータ)<sup>8)</sup>が利用されてきたが、その傾斜計は接眼レンズを覗き込んで目盛を合わせて読み取る方式のために、今ではほとんど利用されていないようである。

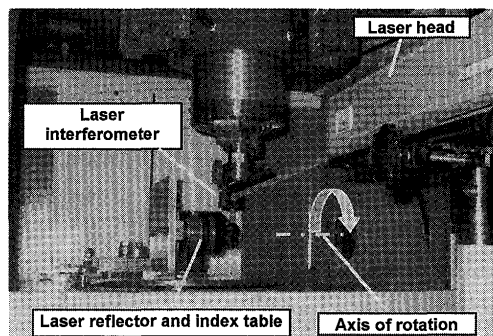


Fig. 1 Conventional measurement method by means of laser interferometer and precision index table.

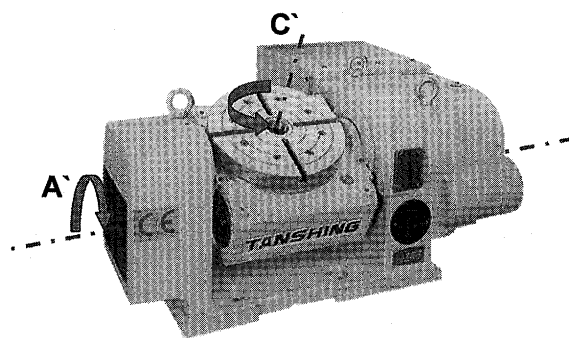


Fig. 2 Tilting rotary table

そこで本研究では、適当な装置のない5軸制御マシニングセンタ傾斜回転軸の位置決め精度測定装置の開発に取り組んだ。具体的には、高精度のロータリエンコーダで回転角度を読み取るために、気泡管式水準器によって重力方向を検出し、その問題点を明らかにする。次いでボールバーによる測定を行い、考案

\* 原稿受付 平成19年2月23日

\*\* 学生会員 東京農工大学大学院(東京都小金井市中町2-24-16)

\*\*\* 正会員 東京農工大学大学院共生科学技術研究院

した方法で高精度に測定できることを明らかにする。その後、測定の自動化のために電子水準器をセンサとする方式について検討し、その問題点を明らかにする。

## 2. 傾斜計の構成と測定原理

試作した傾斜計を傾斜回転テーブルに取り付けた様子を図3に示す。この傾斜計はロータリエンコーダ（仕様は、表1参照）と振り子とから構成されている。この装置の原理は、傾斜軸が回転したときにロータリエンコーダの回転軸に取り付けられた振り子が重力によって回転して、鉛直方向を向いたときの角度をロータリエンコーダで読み取る方式である。

ロータリエンコーダの回転軸には摩擦トルクが作用するために、例えば、振り子を動かす振幅や速度によって、振り子の静止する位置が一定にはならず、鉛直方向に対して傾いたままで止まる。そこで、その位置を常に一定にするために、振り子の上に水準器を取り付けることにした。

気泡管式水準器を取り付けた場合は、各測定位置において振り子を手で微調整して水準器の気泡が常に一定の目盛で一致するようにして読みをとった。一方、電子水準器を取り付けた場合は、振り子が止まって安定したところで、ロータリエンコーダと電子水準器との読みを記録して、電子水準器の読みとの差を算出して傾斜軸（以下A'軸という）の回転角度を求めた。

なお、この傾斜計と同様の測定器がすでに発明されている<sup>9)</sup>。その装置は手動で調整を行ってロータリエンコーダで角度を読む方式である。

## 3. 気泡管水準器を使った実験

### 3.1 実験方法

傾斜軸の位置決め精度測定は、次の手順によって行った。

- ① テーブル上面を水平にした状態で試作した測定装置をテーブル上に取り付け、気泡管式水準器の目盛が読みやすくなるように振り子を適当に微動させ、目盛に合わせる。その角度位置を、傾斜軸の0°の位置とし、ロータリエンコーダの原点とする。
- ② 次の目標値に傾斜軸を回転させて位置決めする。
- ③ ①で、読みとった目盛に気泡が合うように振り子の傾き角を微調整する。
- ④ そのときのロータリエンコーダの読みを記録する。
- ⑤ その次からは、②から④の操作を繰り返し、最終の目標位置まで位置決めを行う。

### 3.2 実験結果及び考察

#### 3.2.1 傾斜計の繰り返し性

図3に示すようにしてA'軸を測定対象として目標角度位置を0°と10°とし、それぞれ位置決めを25回行った。このとき、位置決めは0°から10°に位置決めしたときの読みを10°の位置での読みとし、10°から0°に位置決めしたときの読みを0°の位置決め値として、目標位置と実際の位置との差を測定値とした。

位置決め回数と偏差との関係を図4(a)に示す。図によると測定回数が増えるにつれて偏差が大きくなっていき、18回を超えた辺りからほぼ一定値になっている。これには、様々な要因が考えられる。水準器の目盛を常に一定の位置で読むことに徐々に慣れが現れていること、位置決めを繰り返して行っているために発熱によって傾斜軸の傾き角が徐々に大きくなり、18回を超えたところで熱的に平衡状態になったことなどが理由

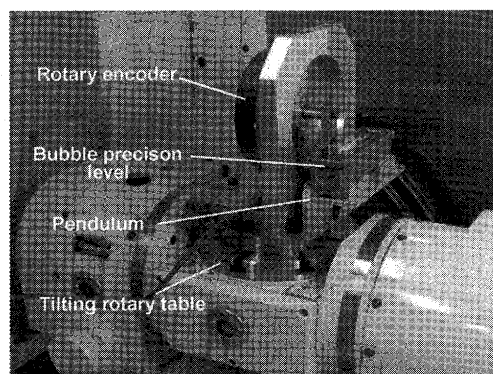


Fig. 3 Clinometer mounted on the tilting rotary table of five-axis machining center

Table 1 Specifications of rotary encoder

Type	Incremental
Resolution	0.36 arcsec
System accuracy	±2 arcsec
Repeatability	±0.18 arcsec

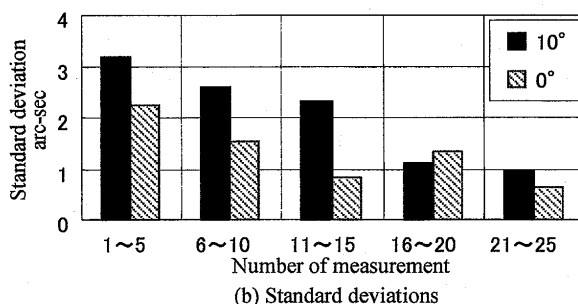
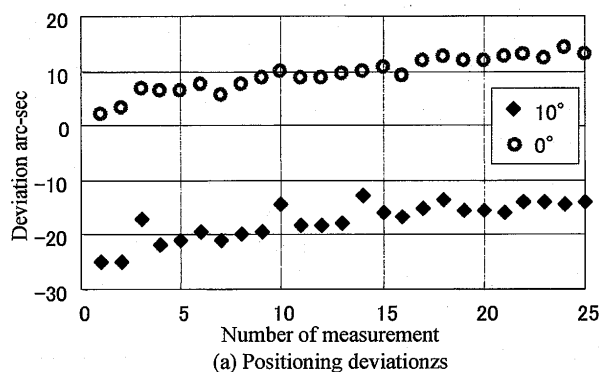


Fig. 4 Relationship between the number of measurements and the standard deviations

として考えられる。なお、この測定には約4時間を要している。

測定値のばらつきを5回ごとの標準偏差に計算すると、図4(b)に示すように測定回数が増えるにつれて標準偏差が小さくなっていくことがわかる。測定開始時と終了時の室温の変化も空調していることから小さく、発熱による変化と考えるよりも、目盛を合わせて振り子を微動させる操作に習熟してきた結果、測定値のばらつきが小さくなったと考えたほうが妥当である。

#### 3.2.2 位置決め測定例1

A'軸の測定範囲を0°~90°とし、目標位置の間隔を5°として測定を行ったときの位置と偏差との関係を図5に示す。なお、

## 5 軸制御マシニングセンタの傾斜回転軸位置決め精度測定方法の開発

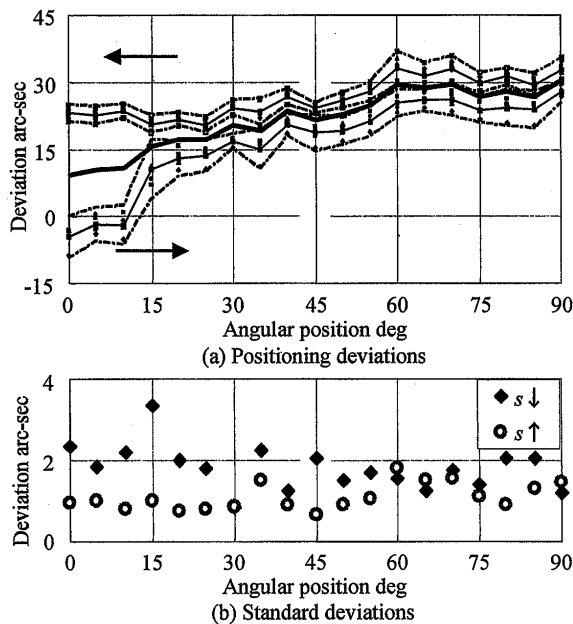


Fig. 5 Angular positioning deviations of the A<sup>2</sup>-axis and the standard deviations

データの整理方法及び記号は、ISO 230-2 に準拠した。図によると、往路と復路とは差があるが、15°までの変化とそれを過ぎた後の変化には大きな違いがある。すなわち、0~15°にかけて往路(→)と復路(←)で差が大きく、20~90°では差が小さくなっていることがわかる。特に往路の10°と15°との間の変化が大きいのことがわかる。

通常、往路と復路との差は、反転値として ISO230-2 では定義されているが、多くの場合この値は、バックラッシュとみなされる。この反転値は、モータの回転角度とテーブルの回転角度との差であり、この間にある機構のバックラッシュ及び弾性変形が原因であると考えられる。

位置決め精度試験を行う場合にはレーザ干渉計を設置する程度で特に測定器の自重やモーメントを考慮する必要がなかった。しかし、本研究で対象とする傾斜テーブルの場合には測定器によるモーメントが測定に及ぼす影響を無視できない可能性がある。とくに使用する測定器の質量が大きく、開発した傾斜計の場合に、傾斜角度が90°のときモーメントが約22.4 Nm にもなることから、その影響があると思われる。

図5に示した10°から15°に回転するときに偏差が急激に大きくなるのは、この角度位置付近で傾斜計の自重によるトルクが傾斜軸系の摩擦トルクを超え、バックラッシュなどの影響によって急激に変化したものと考えられる。図5(b)に示す標準偏差の値も15°の位置で大きくなっており、摩擦に基づく不確かな要因が大きくなっているものと考えられる。

### 3.2.3 位置決め測定例2

次に、スタンドアロンタイプの CNC 円テーブルを測定対象として位置決め偏差の測定を行った。この CNC 円テーブルは、円テーブルの反対側に傾斜計に使われているものと同じ仕様のロータリエンコーダが取り付けられており、円テーブルの回転角度をフィードバックできるようになっている。絶対位置決め精度も高く、仕様書では±2'となっている。

この CNC 円テーブルを用いて測定範囲を-90°~90°、測定間隔を30°にして位置決め偏差の測定を行った。この測定と同時に CNC 円テーブルのロータリエンコーダの値も読み取り、傾斜計で測定した偏差との比較も行った。

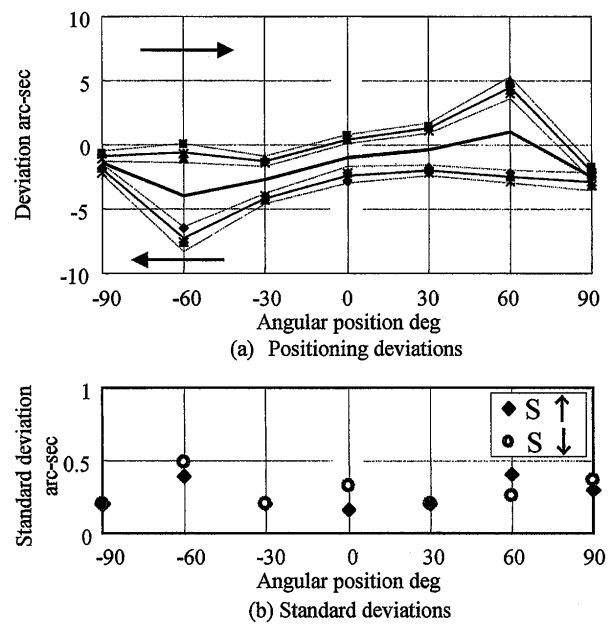


Fig. 6 Angular positioning deviations measured by the developed clinometer

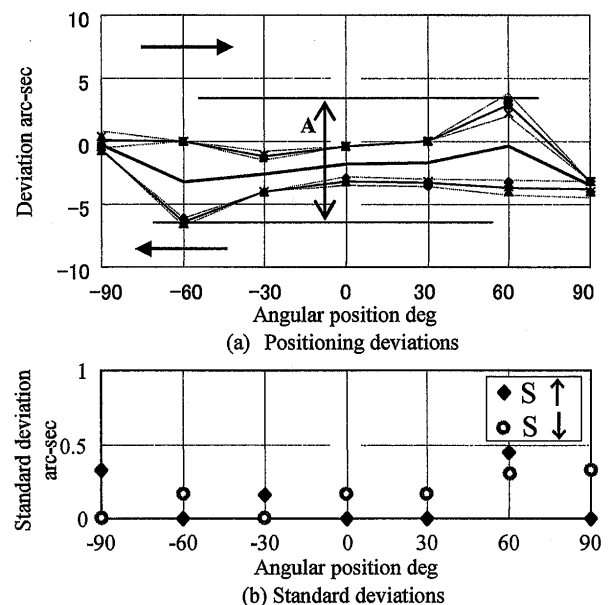


Fig. 7 Angular positioning deviations measured by the rotary encoder for feedback

図6に傾斜計による位置決め偏差曲線を、図7に指令角度と CNC 円テーブルのロータリエンコーダから読み取った角度との差を示す。図6と図7とを比較すると、全体的な傾向は両方とも良く一致している。最も大きく異なるところでもその差が約2°程度であり、仕様書上のロータリエンコーダのシステム精度と同程度である。また、この測定結果から測定対象の CNC 円テーブルの両方向位置決め精度の正確さ A は、10°程度であることがわかる。

図6(b)と図7(b)とから CNC 円テーブルの繰返し性と傾斜計の標準偏差は両方とも0.5"以下であり傾斜計の方が若干大きい。それは傾斜計の方の標準偏差は CNC 円テーブル自体の繰返し性も含んでいるためである。

以上の結果から試作した装置の5回測定分の標準偏差は0.5"よりも小さく測定できているといえる。

測定例1に比べ標準偏差が小さくなったのは測定を複数回

繰り返すことによって振子を調整し気泡を目盛に合わせる技術が向上したこと、測定対象自体の繰り返し精度の差、また、測定例2の場合は測定目標点が少ないために測定に約3時間かかったのに対して、測定例1の場合は目標点の数が多く、約7時間かかったため、測定者の疲れもあり、ばらつきが大きくなったことが原因として考えられる。以上から、傾斜軸の位置決め精度は、気泡管式水準器を用いて、かなり高精度で測定できることがわかった。そこで、この測定方法が他の測定方法と比べて同等かどうかを検討するために、ボールバーによる測定結果と比較することにした。

#### 4. ボールバーによる測定結果との比較

本研究の測定対象である傾斜回転テーブルにおいて傾斜軸(A'軸)のウォームホイールの歯数は72あるので、5°で1周期分のピッチ誤差が出ると考えられる。そこで、試作した装置でそのピッチ誤差が測定できるかを確かめるために傾斜回転テーブルのA'軸において測定範囲を0~10°、目標位置の間隔を0.5°として測定を行い、ボールバーで測定した結果と比較した。

ここでボールバーとは伸縮機構をもつバーの両端に鋼球を取り付け、永久磁石が内蔵されたソケットが鋼球を支える機構であり、両端鋼球間の相対距離を内蔵した変位計によって検出する測定器である。

##### 4.1 ボールバーによる測定方法

図8に示したように、ボールバーをテーブル上面に平行になるように取り付け、この平行な状態を常に保つようにY、Z、A'軸を同期させ、ボールバーの伸縮量からA'軸の回転角度の誤差を求めた。この測定方法では、ウォームギアのかみ合い誤差が測定されることはすでに分かっている<sup>10)</sup>。しかし、この場合には直進軸の真直度、直角度などの幾何学的な偏差や機械座標系に対するA'軸の位置偏差の影響が測定結果に含まれるが、ここではそれら誤差を無視して傾斜計で測定した位置決め偏差とボールバーで測定した値とを比べることにした。

ここで、実験条件を同じにするためにボールバーで測定を行うときには、A'軸に傾斜計と同程度のモーメントがかかるように錘を付けて測定を行った。

##### 4.2 実験結果の比較

図9に測定結果を示す。図示した結果の実線はボールバーによる測定結果、記号(■, ▲)で示す点は、傾斜計による測定結果を示す。また、ボールバーで測定したデータの往路のデータと傾斜計で測定した往路のデータのそれぞれ0°の位置における偏差、つまり測定開始点の偏差を0°として表示した。

図からボールバーによる測定曲線は、傾斜計で測定の結果と往路・復路ともによく一致していることがわかる。

さらに、ウォームギアの歯数の影響(5°周期)だけでなく、それよりも小さな周期の偏差までも測定できているのがわかる。傾斜計による測定では、0.5°刻みに測定しているので、細かい周期までは判別できないが、それ以外のところは、ボールバーの結果とよく一致している。したがって、開発した方法は、ボールバーと同程度に測定できているといえる。

そこで、測定範囲を90°、測定間隔を5°として傾斜計による測定結果とボールバーによる測定結果との比較を図10に示す。図にはA'軸が90°に回転したときのモーメント、つまり、A'軸にかかる最大モーメントが傾斜計を付けた場合と同程度の約22.4Nmになるように錘をつけて実験を行ったボールバー

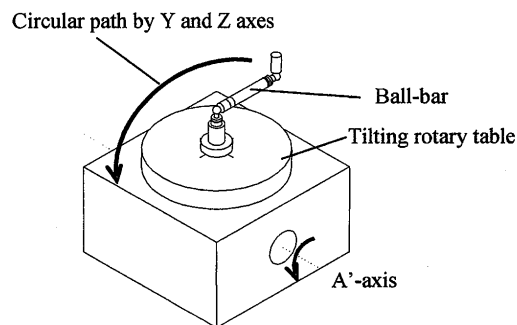


Fig. 8 Measurement of simultaneous three axis control movement with ball bar

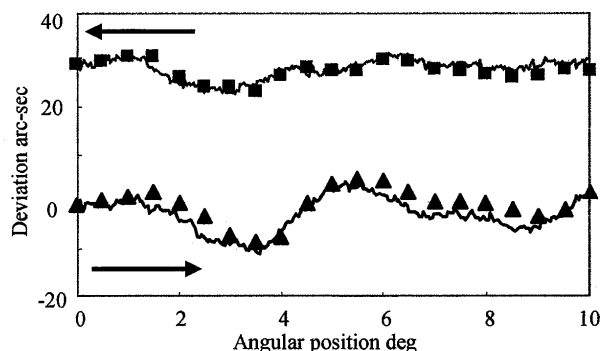


Fig. 9 Comparison between the ball bar and the developed clinometer

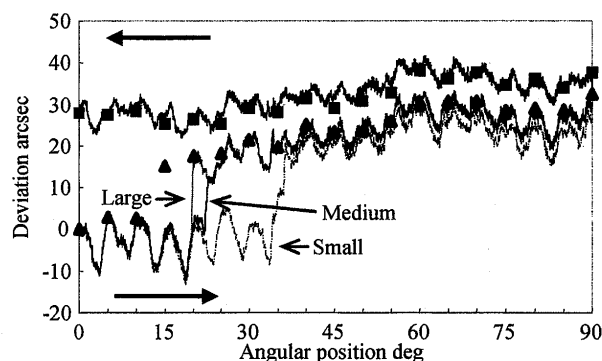


Fig. 10 Comparison between ball bar and clinometer

の往路と復路(Medium)の測定結果、さらに約24.2Nm(Large)と約16.3Nm(Small)のモーメントがかかるように錘を変えて実験を行った往路の測定結果を示す。傾斜計とボールバーの結果を比較すると測定の復路については結果が良く一致するが、往路については測定結果に3.3.1で述べたバックラッシの影響による位置決め誤差の急激な変化が現れる位置が異なっており、傾斜計の方が早く現れている。その原因としてボールバーで測定を行う場合には傾斜軸連続的に回転させているのに対して傾斜計で測定を行う場合は5°ごとに傾斜軸を停止させているためにトルクの影響が現れたと考えられる。これを確認するために3種類の錘を付けて行ったボールバーの測定結果からも回転軸にかかるモーメントが小さいほど位置決め偏差が急激に変化する角度位置が大きくなっていることがわかる。

#### 5. 電子水準器を使った実験

ロータリエンコーダと気泡管式水準器を用いた傾斜計では、1"以下の精度で測定できることがわかったが、測定に熟練度が必要なこと、及び測定者の疲れによって測定結果にばらつきが

**Table 2** Specifications of electronic inclinometer used

Full output	±5.7 deg
Resolution	0.1 arcsec
Maximum Linearity	0.05 %FS(±20.7 arcsec)
Repeatability	0.001 %FS(±0.414 arcsec)
Frequency response (-3db)	5.0 Hz

生じてしまうことなどの問題点がある。また、ロータリエンコーダの値はパソコンに取り込めるが、各測定位置において手作業で気泡が一定の目盛に合うように振り子を調整する必要があるために、また傾斜するテーブルの上に載せるだけで測定できるものではなく、測定時間も長いなどの問題点もある。

これらの問題点を解決するために気泡管式水準器の代わりに電子水準器を使うことにした。電子水準器は傾き角度をパソコンに記録できるために振り子を調整する必要なく、振り子が鉛直方向に対して傾いた角度を記録して、ロータリエンコーダの回転角度と引算することで傾斜軸の位置決め精度を測定することができる。

**表 2** に本研究で使用した電子水準器の仕様を示す。本研究で用いた電子水準器は高分解能、高繰り返し性をもっているが直線性が悪く 0.05%FS (±20.7") となっている。そのために引算により回転軸の回転角度を求めるとき、電子水準器の直線性を調べ、場合によってはその非線形成分を補正する必要がある。

### 5.1 電子水準器の直線性

#### 5.1.1 実験方法

傾斜テーブルに傾斜計を取り付け、傾斜テーブルを回転させず振り子を-5°~+5°の範囲で 0.5°ごと回転させる。このときロータリエンコーダの精度が比較的に高いのでその読みを正しいものとして電子水準器の傾き角度  $\theta$  とロータリエンコーダの回転角度を比較することで電子水準器の直線性を調べることができる。一方で、電子水準器は電氣的ノイズが大きいので電子水準器の出力をローパスフィルタに通すことにし、さらに各測定位置において 1000 個のデータをサンプリングし、平均値を求めた。

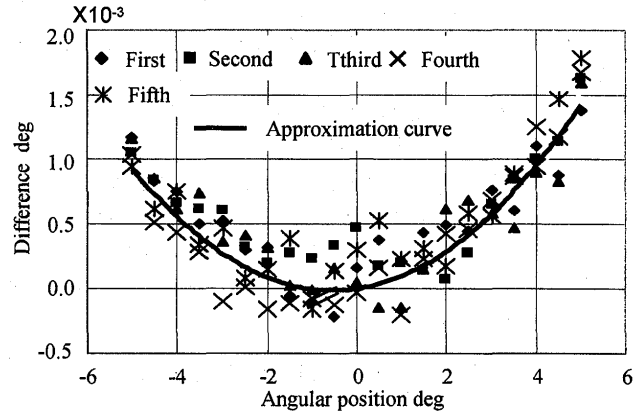
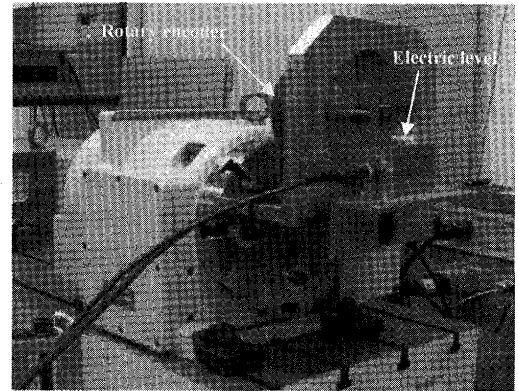
#### 5.1.2 実験結果

**図 11** に 5 回測定分の結果を示す。グラフは横軸にロータリエンコーダの回転角度、つまり電子水準器が傾いた実際の角度、縦軸に電子水準器の角度センサーが検出した傾き角度からロータリエンコーダの回転角度を引いた値、つまり、電子水準器が検出した傾き角度と実際の傾き角度との差を示す。図によると電子水準器が正又は負の方向に傾いて行くと実際の傾き角度と電子水準器が検出した傾斜角度との差が 2 次曲線に従う傾向がある。各測定位置での 5 回測定分の標準偏差は 1" 以下であった。そこで各測定位置において 5 回分の測定データを平均して得られたグラフから近似曲線を求めた結果、式(1)のように近似曲線として表すことができた。

$$f(\theta) = 0.00005 (\theta^2 + \theta + 0.4) \quad (1)$$

ここで  $\theta$  は電子水準器の傾き角度である。

式(1)から使用した電子水準器の傾き角度が-2°~1°間であれば測定結果に非線形性の影響はあまり含まれないが、-2°~1°の範囲以外にあった場合は式(1)を用いて非線形成分を補正す


**Fig. 11** Nonlinearity of electronic a level

**Fig. 12** Measurement by means of in electric level on a standalone CNC rotary table

る必要がある。

### 5.2 電子水準器による位置決め偏差

#### 5.2.1 測定対象及び測定方法

**図 12** に示したように CNC 円テーブルに傾斜計を取り付け、測定範囲を-90°~+90°、間隔を 30°として位置決め精度測定を行った。

測定手順を以下に示す。

- ① 円テーブルを 0°に設定し、電子水準器の値が 0V に近い値になるように人手で振り子を調整し、ロータリエンコーダの値を 0 に設定する。次に電子水準器の値 (初期値) を記録しておく。
- ② 円テーブルを測定開始点に位置決めする。
- ③ 振り子が安定して止まっているところの電子水準器及びエンコーダの出力をパソコンに記録する。このとき振り子が鉛直方向に対して大きく傾いていれば振り子を-2°~1°範囲内に入るように振り子を調整する。
- ④ 次の目標値に円テーブルを位置決めし、③の操作を行う。
- ⑤ 次からは②③の操作を繰り返し、最終の目標位置まで位置決めを行い、データを記録する。
- ⑥ 各測定位置で記録した電子水準器の値から①で記録した初期値を引く。

#### 5.2.2 実験結果及び考察

**図 13(a), (b)** に電子水準器による位置決め偏差の測定曲線と標準偏差、**図 14(a), (b)** に CNC 円テーブルのロータリエンコーダから読み取った値から求めた偏差と標準偏差を示す。実験を行う前に振り子に重りを付けて、振り子が-2°~1°の範囲内になるように重りの位置を調整した。

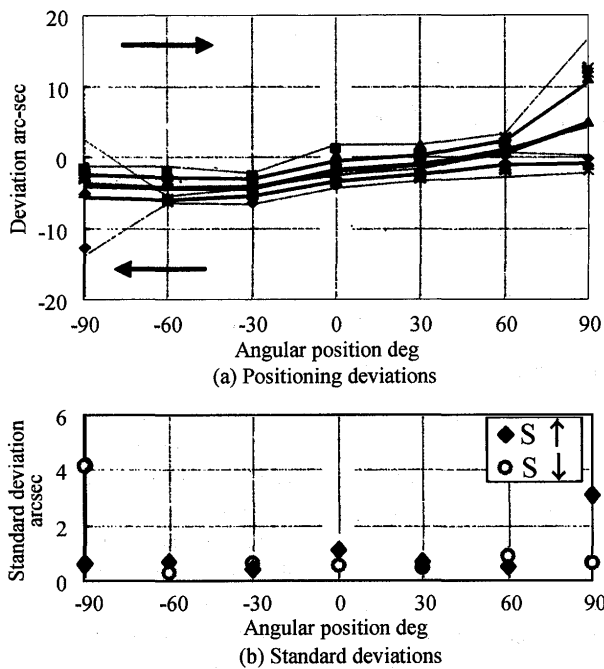


Fig. 13 Angular positioning deviations measured by the developed clinometer

図 13(a)と図 14(a)とを比較すると位置決め偏差曲線は全体的に CNC 円テーブル側のロータリエンコーダの結果は $-60^{\circ}$ ～ $+60^{\circ}$ までにはほぼ水平な直線状になっているのに対して傾斜計の結果では±方向で誤差が大きくなっている。しかし、その差はわずか $2\sim3''$ 程度でありロータリエンコーダのシステム精度と同程度である。

以上の結果からロータリエンコーダと電子水準器を併用することによって振り子を調整する必要なく、5回測定分の標準偏差が $1''$ 以下で位置決め精度を測定することができたとと言える。しかし、回転軸に $1''$ の角度誤差があった場合、回転中心から $200\text{mm}$ 離れた点について約 $1\mu\text{m}$ の位置誤差を起すことから傾斜回転軸の位置決め精度を評価、補正し、直進軸と同程度の精度に向上させるためには傾斜計の精度を $1''$ よりも高い精度にする必要があると言える。そのためには本研究で用いた電子水準器よりも高性能な重力方向を検出するためのセンサが必要となる。なお、測定にかかる時間については気泡管式水準器を使った場合に比べ約1時間と2時間も短くなった。

## 6. 結 言

傾斜回転軸の位置決め精度測定方法としてロータリエンコーダと水準器とを使った傾斜計を試作して測定実験を行い、以下のような結果がえられた。

- 1) ロータリエンコーダと気泡管式水準器とを使った傾斜計の場合には、5回測定分の標準偏差が $0.5''$ 以下の高い精度で測定でき、ウォームギアの噛み合い誤差の変化もボールバーと同程度に検出することができる。しかし、この測定方法は、手作業で振り子を調整するため、測定時間が長く、測定の熟練度や疲労によって結果にばらつきが生じる。
- 2) ロータリエンコーダと電子水準器とを使った傾斜計の場合には、ほとんど振り子を調整する必要なく、5回測定分の

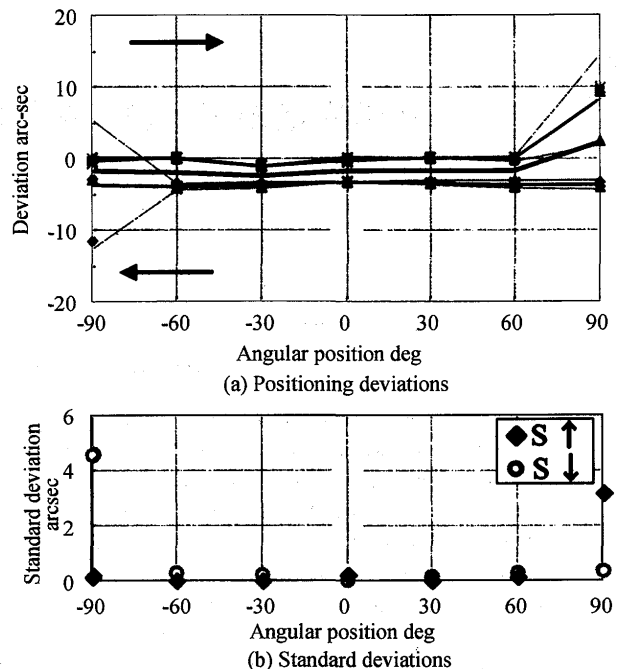


Fig. 14 Angular positioning deviations measured by the rotary encoder for feedback

標準偏差が $1''$ 以下の精度で測定できる。測定時間は気泡管式水準器を使った場合に比べて短い。

以上の結果をもとに、振り子を自動的に調整し、かつ、測定時間を短縮するためにアクチュエータを利用した傾斜計を開発する予定である。

## 謝 辞

本研究は、マザック財団の研究助成金を受けて行ったものの一部である。関係各位に感謝の意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 斉藤 明徳, 宮川 元成, 堤 正臣, 同時4軸制御による5軸制御マシニングセンタの位置偏差及び幾何偏差推定方法, 精密工学会誌, **67**, 2 (2001) 306.
- 2) 坂本 重彦, 稲崎 一郎, ボールバーによる5軸制御マシニングセンタの組立誤差同定・評価法, 日本機械学会第3回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2001) 157.
- 3) 垣野 義昭, 井原 之敏, 佐藤 浩毅, 大坪 寿, NC工作機械の運動制度に関する研究(第7報)-DBB法による5軸制御工作機械の運動精度の測定-, 精密工学会誌, **60**, 5 (1994) 718.
- 4) JIS B 6192: 工作機械-数値制御による位置決め精度試験方法通則, 日本規格協会, (1999).
- 5) 松丸 誠一, 工作機械の位置決め精度の現状・上 機械と工具 (2003) 76.
- 6) 松丸 誠一, 工作機械の位置決め精度の現状・下 機械と工具 (2003) 98.
- 7) アジレントテクノロジー(株)ホームページ  
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-0111J.pdf>
- 8) テーラーボブソン光学機器総合カタログ, テーラーボブソン株式会社, (2005).
- 9) 吳 淵宅, 回転体の回転角度測定装置及び測定方法, 公開特許公報, 特願 2000-222959.
- 10) 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.