Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

ロータリエンコーダと電子水準器を用いたサーボ傾斜角度計の開発

崔，成日
高橋，和也
堤，正臣
佐藤，隆太

(Citation)
精密工学会誌,75(3):412-417

(Issue Date)
2009-03-05

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90001947

The Japan Society for Precision Engineering

論文

ロータリエンコーダと電子水準器を用いたサーボ傾斜角度計の開発

崔　成日** 高橋和也**　　堤　正臣***　佐藤隆太***

Development of Servo-clinometer with Rotary Encoder and Electronic Level

Kazuya TAKAHASHI ,Chengri CUI, Masaomi TSUTSUMI and Ryuta SATO

In this study, a clinometer which automatically measures the angular positioning deviations of a tilting axis is developed. Multi-axis machine tools consist of translational axes and rotary axes. The positioning accuracy of translational axes is checked by the laser interferometer. Although, there is no proper measuring instrument to measure the angular deviations of the tilting axis whose center line is lower than the top surface of table. Thus, a clinometer consisting of rotary encoder, pendulum with electronic level and servo motor was developed. The developed servo-clinometer mounted on the tilting rotary table moves around the tilting axis, and the pendulum moves by the servo motor so that the output of electronic level becomes 0 degrees. Through the experiment, it is confirmed that the developed method is enough to measure the angular deviations. The developed devise could be applied to the horizontal plane, however it was not able to measure inclined plane such as multi tasking lathes with a milling spindle.

Key words: multi-axis machine tool, positioning accuracy, tilting axis, clinometer, rotary encoder, ball-bar

1. 緒　　言

近年，普及が進んでいる5軸制御マシニングセンタ(以下5軸MC)や複合加工旋盤などの多軸工作機械は，直進軸と旋回軸から構成され，工具を工作物に対して様々な角度から近づけることができることから，複雑な形状をもつ部品の加工が可能である．しかし，組立誤差による幾何偏差，同時多軸制御運動時に生じる同期誤差など旋回軸に起因した誤差が生じ，加工精度の低下を招く．そのため，工作機械の精度を評価し，補正することが重要である．

その精度評価の一つに位置決め精度の評価がある．例えば，直進軸についてはレーザ測長器を用いることによって測定[1)~2)]でき，旋回軸については，レーザ干渉計と精密割出し盤によって測定[3)]できる．しかし，構造によっては割出し盤を回転中心に取り付けられない場合がある．その場合は，傾斜角度計を用いて測定を行うことになる[4)]．しかし，測定範囲が広く，高精度な傾斜角度計は，接眼レンズを覗き込み，目盛りをあわせることによって角度を読み取る方式が存在するだけである．その傾斜角度計を利用して測定を行うと，測定時間を費やすだけでなく，稼働中の工作機械で作業を行うため測定者に危険を及ぼす可能性があることから，ほとんど利用されていない．

そこで，筆者らはロータリエンコーダと水準器を用いた傾斜角度計を開発し，その傾斜角度計を用いることで傾斜軸の位置決め精度を測定できる[5)]．しかし，測定者が水準器を手作業で調整する必要があるために，測定時間を費やしてしまう問題点があった．本研究では，この問題点を解明するために自動的に測定が行えるサーボ傾斜角度計を開発し，テーブル旋回形5軸MCに適用し，その妥当性を検討した．また，複合加工旋盤の傾斜軸のように水平面から傾いた軸への適用についても検討した．

＊ 原稿受付　平成 20 年 6 月 23 日
＊＊ 学生会員　東京農工大学大学院（小金井市中町2-24-16）
＊＊ 東京農工大学大学院
＊＊＊ 正会員　東京農工大学大学院共生科学技術研究院
＊＊＊ 正会員　三菱電機（株）先端技術総合研究所（兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1）

2. サーボ傾斜角度計の構成および測定原理

CNC円テーブルに取り付けたサーボ傾斜角度計を**図1**に示す．開発したサーボ傾斜角度計はロータリエンコーダと電子水準器との間にダイレクトドライブモータが取り付けられた構造である．ロータリエンコーダの回転軸にはシャフトが取り付けられており，そのシャフトとモータがカップリングによって接続されている．さらに，シャフトの一端には電子水準器が取り付けられている．それによって，ロータリエンコーダの軸とダイレクトドライブモータの回転角度および電子水準器の傾き角度が同じになる．

電子水準器の出力が0°になるようにダイレクトドライブモータの回転を制御することでロータリエンコーダの出力と回転軸の回転角度が同じになり，傾斜軸の位置決め精度を測定することができる仕組である．サーボ傾斜計に使用したロータリエンコーダと電子水準器の仕様はそれぞれ**表1**と**表2**に示す．

ここで，図1でサーボ傾斜角度計を載せているCNC円テーブルは本研究の測定対象の一つであり，背面にフィードバック用のロータリエンコーダを備えており，その値を読み取ることでテーブルの実際の回転角度を測定し，サーボ

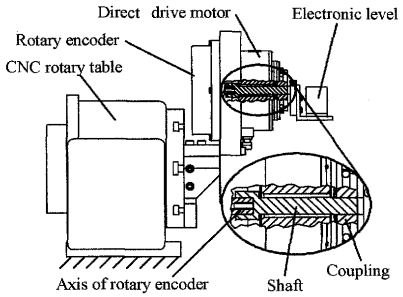


Fig.1 Structure of servo-clinometers

Table 1 Specification of rotary encoder

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

Table 2 Specification of electronic level

Measurement range	±5.75°
Resolution	0.1″
Linearity	±20.7″
Repeatability	±0.414″

NII-Electronic Library Service

The Japan Society for Precision Engineering

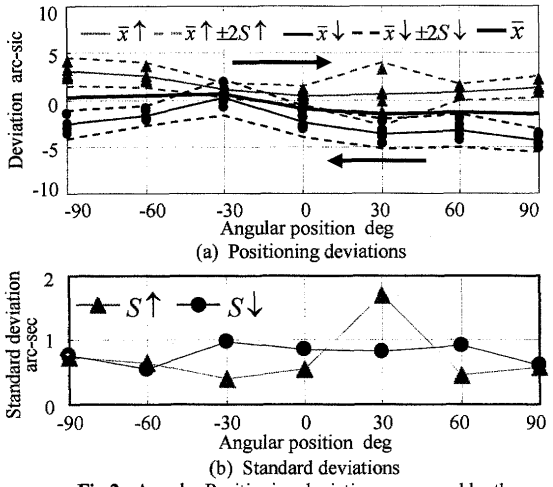


Fig.2 Angular Positioning deviations measured by the servo clinometers on the CNC rotary table

傾斜計で測定した結果と比較することができる．CNC 円テーブルに用いたロータリエンコーダのシステム精度(±0.4″)は，サーボ傾斜計に用いたロータリエンコーダのシステム精度よりも高いものである．

以下に測定手順を示す．

① 傾斜回転テーブルの上面（図 1 の場合は回転軸）にサーボ傾斜角度計を設置し，傾斜軸の回転角度を 0°に設定する．

② モータの回転，電子水準器の傾きを安定させる．そのときの角度をロータリエンコーダの原点として設定し，電子水準器とロータリエンコーダの出力を記録する．

③ 次の目標位置まで，傾斜軸を回転させる．

④ 振り子が静止したときの電子水準器とロータリエンコーダの出力を記録する．

⑤ ③，④を繰返し行う．

⑥ ②で測定した初期位置の結果と，各位置での測定結果から，傾斜軸の回転角度を算出する．

3. CNC 円テーブルの測定

図 1 の CNC 円テーブルにおいて，位置決め精度を測定し，フィードバック用ロータリエンコーダの出力を読み取って測定した結果と比較することにより，サーボ傾斜角度計の精度を評価することにした．

測定は，JIS B 6192[6]に基づき，−90～90°の範囲で 30°刻みに 5 往復分の測定を行った．**図 2** にサーボ傾斜角度計の測定結果と 5 回測定分の標準偏差を，**図 3** にフィードバック用ロータリエンコーダからのテーブル回転角度の測定結果と 5 回の測定分の標準偏差を示す．ここで，図中の記号は JIS B6192 に従い，往路の位置決め偏差(▲)の平均値を$\bar{x}$↑，復路の位置決め偏差(●)の平均値を$\bar{x}$↓，往路と復路の平均値を$\bar{x}$とし，正方向の標準偏差をS↑，負方向標準偏差をS↓で表す．

測定結果を比較すると，図 2(a)と図 3(a)から偏差の変動は良く一致していることが確認できる．

標準偏差については図 2(b)と図 3(b)から両方とも 30°の往路で標準偏差は大きくなっているが，その他の位置では 1″以下である．また，図 2(b)のサーボ傾斜角度計の結果の方が，標準偏差が 1″ 程度と大きいのはサーボ傾斜角度計の測定結果には，電子水準器の繰返し性の影響と測定対象の繰返し性[6]も含まれているためであると考えられる．これらの結果より，サーボ傾斜角度計は標準偏差 1″以下で位置決め精度を測定できると言える．

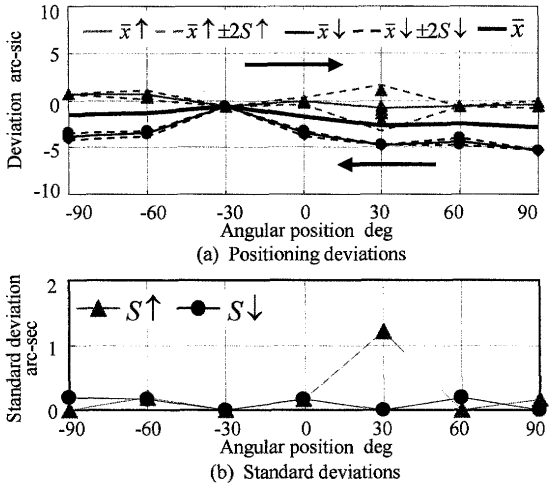


Fig.3 Angular Positioning deviations measured by the rotary encoder for feedback to CNC rotary table

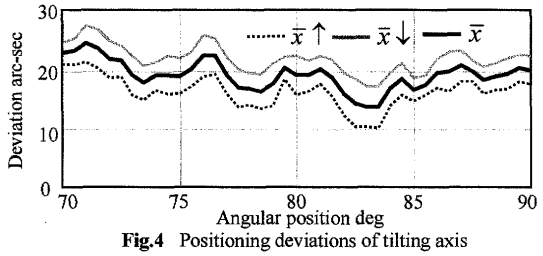


Fig.4 Positioning deviations of tilting axis

4. 軸 MC の測定

CNC 円テーブルの測定結果からサーボ傾斜角度計で標準偏差 1″程度で位置決め精度を測定できることがわかった．次に，5 軸 MC の傾斜軸において，位置決め精度を測定することにした．

4.1 傾斜軸の測定結果

測定は，70～90°の範囲で，0.5°刻みに行った．**図 4** に測定結果を示す．グラフは往路と複路のそれぞれ 5 回測定分の平均値と全体の平均値である．図 4 より往路と復路の結果とも偏差が周期的に変動していることが確認できる．傾斜回転テーブルはウォームホイールの歯数が 72 のウォームギヤ駆動である．図 4 から偏差の変動が約 5°周期に現れていることからこの変動はウォームホイールのピッチ誤差の影響であると考えられる．

4.2 ボールバーとの比較

ウォームギヤのピッチ誤差による影響であることを確認するために，ボールバーを用いた測定を行った．ボールバーとは，両端に鋼球が取り付けられた伸縮機構をもつバーと，永久磁石が内蔵されたソケットで鋼球を支える機構である．ボールバーによる測定方法を**図 5** に示す．ボールバーをテーブル上面に平行に取り付け，傾斜軸が回転するとき常にこの状態を，すなわち，ボールバーの向きが回転軸の接線方向を保つように直進軸を同期運動させ，ボールバーの伸縮量から角度偏差を求めた．このような運動を行うことでピッチ誤差を測定できる[7]．また，測定は傾斜軸にサ

NII-Electronic Library Service

The Japan Society for Precision Engineering

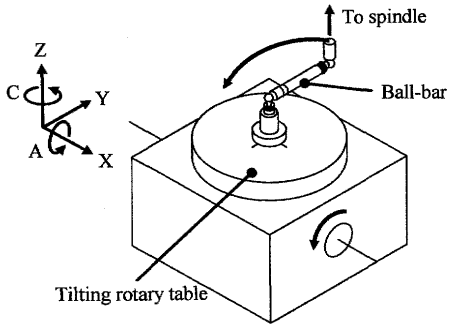


Fig.5 Measurement method by ball-bar system

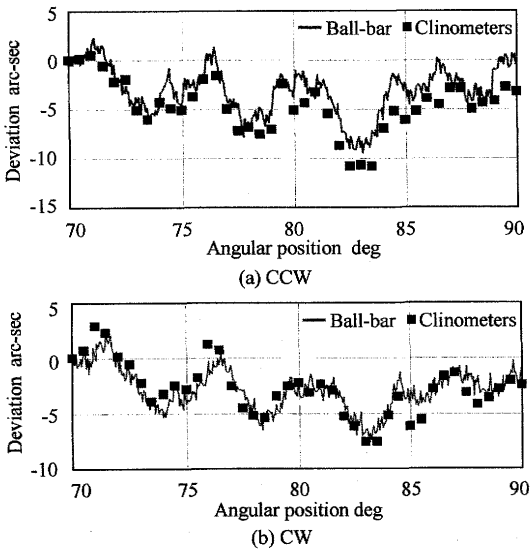


Fig.6 Comparison between servo-clinometers and ball-bar

ーボ傾斜角度計で測定した場合と同等のモーメントが作用するように，サーボ傾斜角度計を傾斜回転テーブルに取り付けて行った．

図 6 に，ボールバーの測定結果とサーボ傾斜角度計の 5 回分の平均値を示す．2 通りの結果を比較しやすくするため，データを往路(CCW)と復路(CW)に分け，それぞれ 70°の偏差を 0″とした．図 6 によると，偏差の変動の様子がほぼ一致している．従って，この変動はウォームギヤのピッチ誤差であり，サーボ傾斜角度計でウォームギヤのピッチ誤差をボールバーと同程度で測定できると言える．

しかし，角度によって傾斜角度計とボールバーの結果に 3″程度の差が生じている．この差は測定対象の位置決めの繰返し性と傾斜角度計自体の不確かさによるものであると考えられる．なお，図 3 に示した結果から傾斜角度計の測定の不確かさが 1″程度であるため，測定対象の位置決めの繰返し性の影響がより大きいと考えられる．

4.3 ボールバーを用いた位置決め精度測定

次に，ボールバーを用いて位置決め精度を測定し，サーボ傾斜角度計の結果と比較した．測定はボールバーとサーボ傾斜角度計で同時に行った．**図 7** (a)にサーボ傾斜角度計の測定結果を，図 7(b)にボールバーの測定結果を示す．図 7(a)と図 7(b)より，0～5°の範囲で往路と復路の差が大きく，10～90°ではその差が小さくなる．また，サーボ傾斜角度計の結果は角度が大きくなるにつれて偏差がプラス方向に増加する傾向がある．一方，ボールバーの結果は，往路の

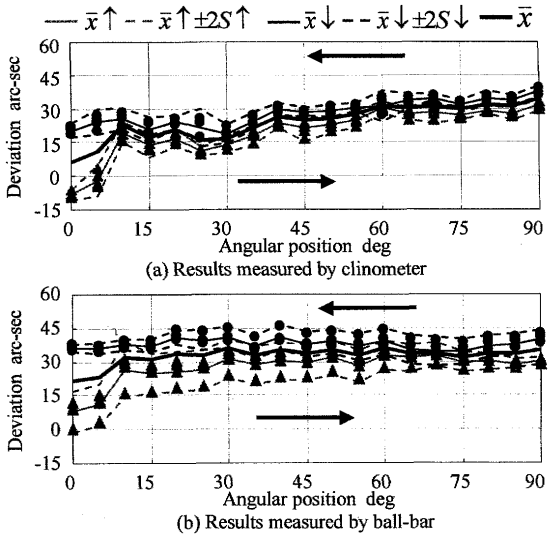


Fig.7 Comparison of positioning accuracy between servo-clinometer and ball-bar

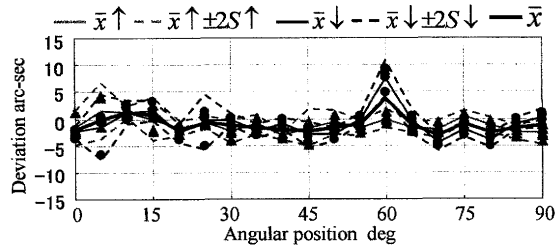


Fig.8 Correcting the positioning accuracy

0～10°以外の範囲でほぼ一定の偏差であり，サーボ傾斜角度計の結果と比較するとおよそ 20″の差がある．

このように，ボールバーを用いた測定結果は，サーボ傾斜角度計の測定結果と一致しない．それはボールバーの測定では，直進軸と傾斜軸を同期運動させているため，直進軸の位置決め精度や真直度などの影響が含まれているためであると考えられる．従って，ボールバーよりもサーボ傾斜角度計の方が傾斜軸の位置決め精度を正確に測定できると言える．

4.4 傾斜軸の位置決め精度補正

ここで，サーボ傾斜角度計の測定結果を基に傾斜軸の位置決め精度の補正を試みた．その方法は，補正値を NC プログラムに組込むことによって行った．補正値は図 7(a)の往路と復路の平均値と位置決めの目標値から求め，その NC プログラムで位置決め精度を測定した．

補正後の測定結果を**図 8** に示す．測定結果から，60°の位置で復路測定結果が若干大きいが全体的にほぼ一直線となっており，よく補正できていることが分かる．また，反転による往路と復路の差もほとんど消えていることが分かる．なお，偏差の最大値と最小値の差が約 20″となり，図 7(a)より補正する前は約 50″であったことから，位置決め偏差をおよそ 60%低減することができた．従って，傾斜軸の位置決め偏差は補正可能であると言える．

5. 複合加工旋盤を模擬した測定

開発したサーボ傾斜角度計を用いて 5 軸 MC の傾斜軸の位置決め精度を高精度で測定し，補正することができることを確認した．次に，複合加工旋盤の B 軸で表現される傾

NII-Electronic Library Service

The Japan Society for Precision Engineering

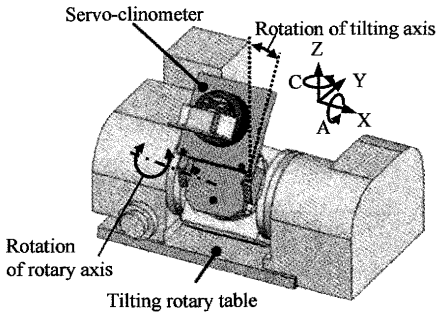


Fig.9 Measuring method for B-axis rotation of a multi tasking lathe with a milling spindle head

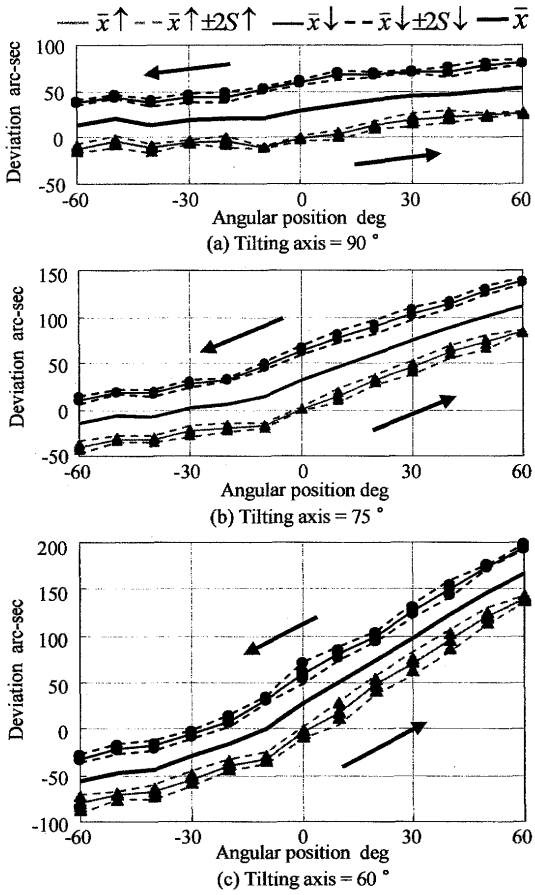


Fig. 10 Measured positioning deviations of rotary B-axis at different tilting angle

斜軸のように水平面から傾いた軸の位置決め精度をサーボ傾斜角度計で測定することを試みた.

複合加工旋盤にサーボ傾斜角度計を取り付けるためには特殊なジグを製作する必要があるために本研究では**図 9** に示したようにサーボ傾斜角度計を傾斜回転テーブルに取り付け，旋回軸(C 軸)が複合加工旋盤の B 軸を表し，傾斜軸(A 軸)の回転角度が B 軸の水平面からの傾きを表すことにして，傾斜軸の回転角度を変えて旋回軸の位置決め精度を測定することで，軸の傾斜が測定結果に及ぼす影響について測定した.

5.1 軸の傾斜による影響

傾斜軸の回転角度を 90°，75°，60°に設定し，±60°の範囲で 30° ごとに旋回軸の位置決め精度を測定した. **図 10** に偏差の結果を示す. 図 10 から傾斜軸の回転角度が 90°，75°，60°と大きくなるにつれて，偏差の最大値と最小値との差が約 100″, 約 200″, 約 300″と増加することがわかった. また，電子水準器を傾けて使用した場合の影響を調べるために，傾斜軸の回転角度が 60°の場合について，電子水準器を水平に設置して同様な測定を行ったが，測定結果にあまり変化がないことを確認している.

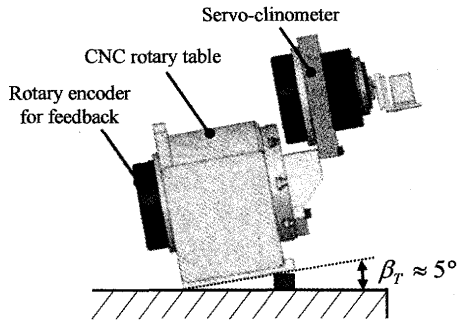


Fig.11 Measurement on tilted CNC rotary table

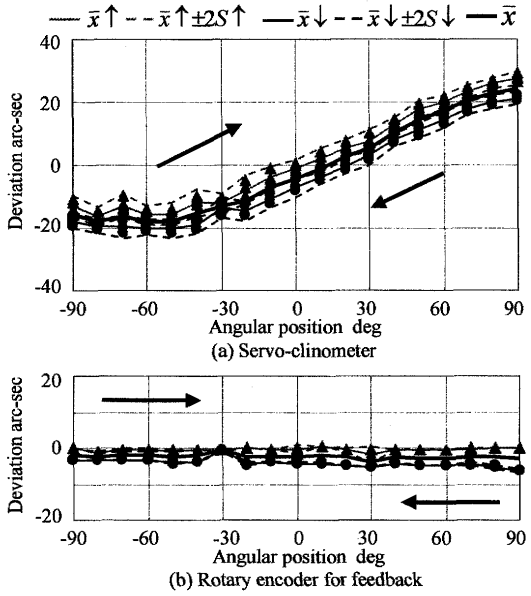


Fig.12 Positioning accuracy of tilted CNC rotary table

従って，上述したように，傾斜軸の回転に伴って旋回軸の偏差が変化する原因として，傾斜軸の回転によって旋回軸の位置決め精度が変化したこと，サーボ傾斜角度計の結果に測定誤差が含まれたことの二つが考えられる.

5.2 CNC 円テーブルを傾けた場合の測定

図 10 の偏差の変動の原因を特定するため，**図 11** に示すように CNC 円テーブルを水平面から 5°傾けた状態で位置決め精度の測定を行い，フィードバック用ロータリエンコーダの結果と比較した. 測定は−90～90°の範囲で，位置決めの間隔を 10°として行った. **図 12**(a)にサーボ傾斜角度計の測定結果を，図 12(b)にフィードバック用ロータリエンコーダの測定結果を示す. 図 12(a)よりサーボ傾斜角度計の測定結果は，−90～−50°の範囲では一定の偏差であり，−50～90°で偏差がプラス方向に増加することがわかる. 一方，図 12(b)よりフィードバック用ロータリエンコーダの結果は往路の 30°と復路の−30°で偏差の変動があるが，ほぼ一定の

NII-Electronic Library Service

The Japan Society for Precision Engineering

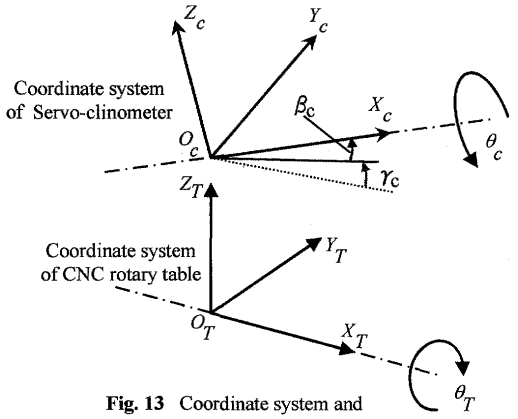
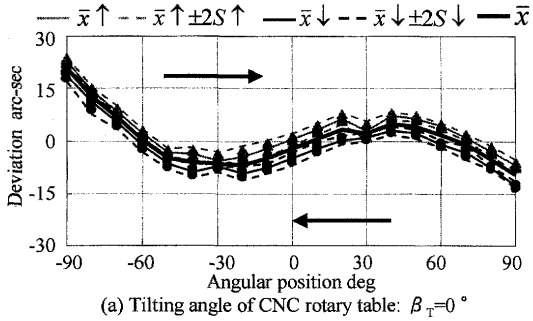
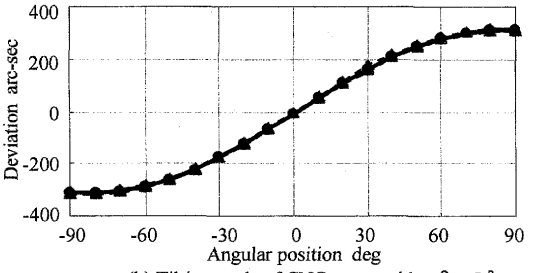


Fig. 13 Coordinate system and definition of system error



(a) Tilting angle of CNC rotary table: β_T=0°



(b) Tilting angle of CNC rotary table: β_T=5°

Fig.14 Influence of setting error

偏差である．

偏差の結果を比較すると，サーボ傾斜角度計とフィードバック用ロータリエンコーダの測定結果とは一致していないことから，水平面から傾いた軸を持つ回転軸の位置決め精度を測定する場合には，サーボ傾斜角度計の測定結果に誤差が含まれると考えられる．

5.3 サーボ傾斜角度計の取付け誤差

測定誤差の原因を特定するために，サーボ傾斜角度計の取付け誤差に着目した．ここでサーボ傾斜計の取り付け誤差とはサーボ傾斜計を測定対象に取付けた後，**図 13** に示すように測定対象の回転軸とサーボ傾斜角度計の回転軸との間に存在する平行度の誤差 β_C と γ_C のことである．これは，サーボ傾斜計自体の寸法やサーボ傾斜角度計を取り付けるためのジグの形状誤差により生じるものである．

そこで，サーボ傾斜角度計の取付け誤差を正確に測定することは現実的に困難であることから，サーボ傾斜角度計を取付けているジグと CNC 円テーブルの間に座金を挟むことにより，β_C に約 1°と大きな誤差を与えて，テーブルが水平な状態と傾いた状態において位置決め精度測定を行い，二つの場合の取付け誤差の影響を調べた．**図 14** に測定結果

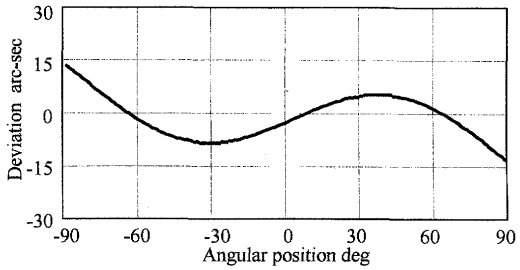


Fig.15 Simulation result of CNC rotary table with setting errors

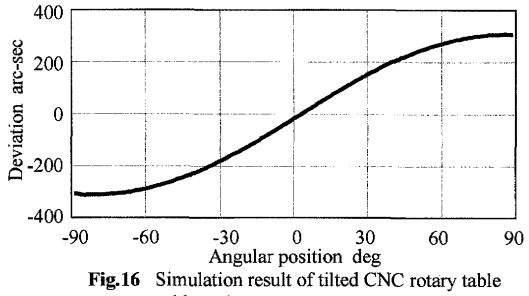


Fig.16 Simulation result of tilted CNC rotary table with setting errors

を示す．図 14(a)より偏差の平均値は−90°でおよそ 20″，90°でおよそ−10″となり，その変動の様子は周期的であることがわかる．図 12(a)より，取付け誤差を大きく与えなかった場合にはこのような周期的な偏差の変動がなかった．また，図 14(b)より CNC 円テーブルが 5°傾くことによって，図 12(a)よりも偏差は一桁大きくなり，振幅を 300″とした正弦波状に変動することを確認できる．従って，測定対象の回転軸が水平から傾いた場合，傾斜角度計の取付け誤差が測定結果に及ぼす影響が大きく拡大されると考えられる．

5.4 取付け誤差を考慮したシミュレーション

サーボ傾斜角度計の取付け誤差が測定結果に及ぼす影響を，シミュレーションによって確認することにした．CNC 円テーブルの回転軸の水平面に対する傾き角度を β_T（図 11 を参考）としたとき，図 13 の β_C と γ_C が存在する場合，CNC 円テーブルの回転角度 θ_T（図 13）と電子水準器の値が 0 になるときのサーボ傾斜角度計の測定値 θ_C（図 13）との差を求めた．

まず，上述した三つのパラメータ β_T, β_C, γ_C のうち，β_C は図 14(a)の実験と同様に 1°としてシミュレーション結果が図 14(a)の偏差の変動と一致するように試行錯誤的に β_T と γ_C を調整した．なお，β_T=−0.22°，γ_C=−0.05°のとき，**図 15** に示したように図 14(a)と偏差の変動の様子がよく一致していることが確認できた．ここで図 14(a)の実験ではテーブルを水平な状態にしたにも関わらず，β_T=−0.22°となったのは，シミュレーションで用いた β_C の値が実際には正確に 1°ではないことと CNC 円テーブルを載せている定盤が水平面に対して傾いているためであると考えられる．

次に，CNC 円テーブルを傾けた場合についてシミュレーションを行った．シミュレーションは図 14(b)の結果と比較するために β_C は 1°, γ_C は−0.05°と図 15 で求めた値を使い，β_T はテーブルの傾き角度 5°と図 15 で求めた値 (5°−0.22°) から 4.78°と設定した．

図 16 にシミュレーション結果を示す．図 14(b)の測定結果と比較すると，偏差の最大値と最小値との差は約 600″であり，偏差の変動がシミュレーション結果と良く一致して

NII-Electronic Library Service

The Japan Society for Precision Engineering

いることが確認できる．従って測定対象の回転軸が水平から傾いた場合，傾斜計の取付け誤差が測定結果に及ぼす影響が大きく拡大されることがシミュレーションにより確認できた．

次に β_C に 1°の取付け誤差を与えずに傾斜角度計を CNC テーブルに取り付けた場合についてシミュレーションを行った．

まず，β_Tは 4.78°とし，シミュレーション結果が図 12(a)と一致するように試行錯誤的に β_C と γ_C を求めると β_C=0.06°，γ_C=−0.03°のとき**図 17**（破線）に示したように図 12(a)とほぼ一致する結果が得られた．求めたパラメータ用いて，テーブルを水平にした場合についてシミュレーションを行った．図 17（実線）に示したように，CNC 円テーブルを水平にした場合は，CNC 円テーブルの回転角度によらず偏差はほぼ 0″であることが確認できる．

従って，傾斜計を取り付ける際に多少誤差があっても測定対象が水平の場合には測定結果にあまり影響をしないことがシミュレーションにより確認できた．

5.5 シミュレーション結果を用いた補正

理論的にサーボ傾斜角度計の取付け誤差が十分小さければ，水平面より傾いた軸を持つ回転軸の位置決め精度を測定することが可能である．しかし，図 17 のシミュレーション結果からテーブルが約 5°傾いても β_C=0.06°，γ_C=−0.03°の取付け誤差により，およそ 40″の測定誤差が生じてしまい，複合加工機のように回転軸が水平面に対して大きく傾いた場合はその取付け誤差を無視できるレベルまで小さくするのは困難である．

そこで，図 12(a)に示した測定結果から図 17 のシミュレーション結果を差し引きすることによって，取付け誤差による影響の補正を試みた．図 17 より 0°の偏差が約−10″であるが，実際の測定では往路の 0°をロータリエンコーダの原点に設定しているため，0°の偏差が 0″となるように調整してから補正を行った．

図 18 に偏差を補正した結果を示す．図 18 から偏差の変動はほとんどなく，取付け誤差の影響を補正できていることが確認できる．しかし，図 18 とフィードバック用ロータリエンコーダの測定結果である図 12(b)と比較すると，補正した結果とフィードバック用ロータリエンコーダの差が -90°では約 5″であり，角度が大きくなるにつれて小さくなる．その原因としてシミュレーションでは測定結果と偏差の変動が一致するように取付け誤差のパラメータを試行錯誤的に調整した．そのため，十分正確なシミュレーションが行われてなく，補正結果が狂っていると考えられる．今後，回転軸が傾いた場合の測定結果から取付け誤差の成分を正確に補正する方法を開発するのが重要な課題となる．

6. 結　　言

本研究では，多軸工作機械の傾斜軸の位置決め精度を測定するために，サーボ傾斜角度計を開発した．以下に得られた知見を示す．

(1) サーボ傾斜角度計の精度評価を行うため，フィードバック用ロータリエンコーダが取付けられた CNC 円テーブルの位置決め精度を測定した．結果，サーボ傾斜角度計は標準偏差 1″程度で位置決め精度を測定できることが確認できた．

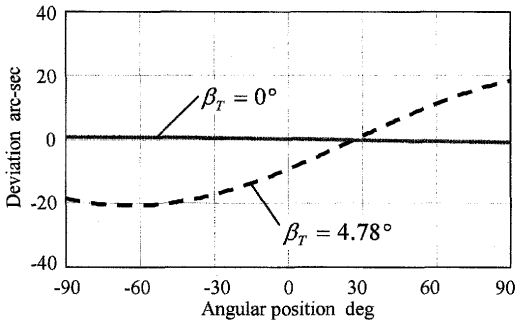


Fig.17 Simulation result of tilted CNC rotary table

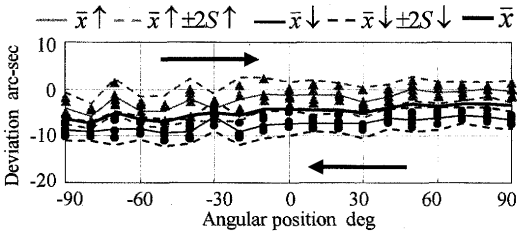


Fig.18 Measurement result of correcting setting error

(2) 5 軸 MC の傾斜軸の位置決め精度を測定し，ボールバーによる測定結果と比較した．その結果，サーボ傾斜角度計でウォームのピッチ誤差の影響を測定できることを確認した．

(3) サーボ傾斜角度計の測定結果を基に，傾斜軸の位置決め精度を補正した結果，補正前と比べて位置決めの偏差をおよそ 60%低減できた．

(4) 複合加工旋盤の傾斜軸のように水平面から傾いた軸への適用を検討するため，傾いた軸を模擬した測定を行った．結果，サーボ傾斜角度計の測定結果に取付け誤差の影響が大きく影響することが分かった．

(5) シミュレーション結果を用いることで，取付け誤差の影響を補正することができる可能性を示した．

今後は，傾いた軸の位置決め精度をサーボ傾斜角度計で測定できるように取付け誤差の影響を補正する方法を検討する．

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) 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.
2) 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.
3) アジレントテクノロジー株式会社ホームページ http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-011J.pdf
4) 内藤邦夫，角度割出装置とその検査法，精密機械，) **44**，5，(1978557.
5) 崔成日，高橋和也，堤正臣，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，精密工学会誌，**73**，9，(2007)，1040.
6) 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)
7) 佐藤隆太，横堀裕也，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.

NII-Electronic Library Service