2つの非接触変位計を用いた工作機械の 運動精度測定装置の開発*

齋 藤 明 徳** 山 川 龍 矢*** 助 川 和 裕***

Development of Measuring Instrument for Motion Accuracy of Machine Tools Using Two Noncontact Displacement Sensors

Akinori SAITO, Tatsuya YAMAKAWA and Kazuhiro SUKEGAWA

Recently, some evaluation techniques have been proposed for five-axis machining centers. In those techniques, the simultaneous three-axis control motions in which the one rotary axis and two linear axes are controlled can detect the positional and angular deviations, and the simultaneous five-axis control motions for cutting the cone frustum of NAS 979 can evaluate various errors. Generally, ball bar instruments are used for the measurement of the displacement between the spindle and the table in those simultaneous multi-axis control motions. Also in the method using a master ball and a linear variable differential transformer, R-test instruments are a possible substitute for ball bar instruments. However, the displacement sensors of those instruments are the contact types. In this study, the measuring instrument for measuring the simultaneous multi-axis control motions is developed in order to avoid collision between the instrument and the five-axis machining center. The proposed measuring instrument consists of a master ball and two noncontact LED/CCD optical micrometers. One micrometer is mounted perpendicular to the other on the base plate. The base plate is fixed on the table and the master ball attached to the spindle is set in the intersection area of the LED light. The measurements of the simultaneous three-axis positioning and the circular motion were carried out on a three-axis machining center. The proposed measuring instrument can precisely measure the motion trajectory in three dimensions.

Key words; five-axis, machining center, noncontact measuring, ball bar, circular trajectory

1. 緒 言

現在、5軸制御マシニングセンタ（以下MC）は、各工作機械メーカーの主力機種の一つとなり、多くの生産現場に導入されている。こうした現状に合せて、ISOでは、5軸制御MCの検査規格が規定されようとしている¹⁾。

5軸制御MCの精度検査では、5つの軸間に存在する幾何偏差の同定と旋回軸を含んだ複数の軸の運動の評価とが重要になるが、どちらも主軸とテーブルとの相対変位を測定する必要がある。この相対変位の測定は、主にボールバー²⁾を用いて行われている^{3)~7)}。また、ボールバーと同等の測定が可能な球と1次元変位計とを用いた装置⁸⁾も提案されており、最近では、球と3つの1次元変位計を用いたR-test⁹⁾と呼ばれる装置も市販されている。これらの装置は、いずれも何らかの形で主軸側とテーブル側とが接触することによって、相対変位を測定するものである。

ところが、例えば旋回1軸と直進2軸とによる同時3軸制御運動⁴⁾をボールバーで測定すると、運動中の主軸とテーブルとの位置関係によって、ボールバーと5軸制御MCとの干渉を目視で観察することは難しい場合がある。さらに、NCプログラムやワーク座標系の設定の誤りなどがあれば、ボールバーの脱落や、場合によっては破損することもありうる。そのため、測定者の負担を考えると、主軸とテーブルとの相対変位を非接触で測定できることが望ましい。

そこで、本論文では、2つの非接触変位計によって、主軸とテーブルとの相対変位を3次元で測定できる装置を提案し、測定精度を調べた。さらに、3軸制御MCにおいて、提案した装置の測定範囲内で、微小円運動、同時3軸位置決めなど

を測定することによって、測定装置の有効性を明らかにした。

2. 運動精度測定装置

2.1 装置の構成

図1に運動精度測定装置の概略を示す。測定装置には、同機種の2台のLED/CCD光学変位計が直交するように配置されている。この光学変位計は、投光部と受光部から成り、測定範囲内に入った被測定物が投光部から受光部への帯状の光を遮った部分の長さと、遮った部分の端から光の帯の端までの距離を測定することができる。2台の光学変位計は、測定装置座標系の Z_1 方向に0.1mm高さを変えて設置されており、2台の光の帯は衝突しない。光学変位計の仕様を表1に示す。測定範囲は6mm、測定精度は $\pm 0.5\mu\text{m}$ となっている。測定データは、0.417ms間隔で取得することが可能である。2台の光学変位計からの測定データは、それぞれアンプを介して、取込ボードからPCへと取り込まれる。主軸とテーブルとの相対変位の測定は、測定装置をテーブル上に設置し、帯状のLED光が交差している部分に、主軸側に取り付けたマスタ球を配置して行う。そこから、工作機械に特定の運動を行わせて、2台の光学変位計を用いて、測定装置座標系におけるマスタ球の中心位置を測定する。マスタ球は、光学変位計の帯状のLED

Fig.1 Proposed measuring instrument

* 原稿受付 平成23年7月4日

** 正会員 日本大学（福島県郡山市田村町徳定字中河原1）

*** 日本大学

Fig.2 Setup for simultaneous 3-axis control motion

光の交差部である $6 \times 6 \text{ mm}$ の測定範囲に収まるように、直径 4.0002 mm 、真球度 $0.04 \mu\text{m}$ の鋼球とした。光学変位計の投光部と受光部とは 60 mm 離れており、その空間内でマスタ球は測定装置と干渉することはない。なお、この測定装置では、ボールバーや R-test と同等な測定精度を目標としている。

測定する運動は、現在、ISO/CD10791-6.2¹⁾として、規格化が進められている旋回 1 軸と直進 2 軸の同時 3 軸制御運動や旋回 2 軸と直進 3 軸とによる同時 5 軸制御運動を想定している。これらの運動では、主軸とテーブルとの距離が一定に保たれるように運動が行われるため、広い測定範囲は必要ない。そこで、この測定装置では、 X_i, Y_i, Z_i 方向にそれぞれ 1 mm の測定範囲が確保できるように設計している。この測定装置を用いても、運動によっては測定装置との干渉を避けるために取り付け具が必要となる。例えば、テーブル旋回形 5 軸制御 MC における A 軸と YZ 軸との同時 3 軸制御運動⁴⁾の測定では、図 2 に示すような取り付け具を主軸側に用いることで、主軸側と測定装置との干渉を回避することができる。ここでは、テーブル旋回形 5 軸制御 MC を例に挙げたが、測定装置の設置方法を工夫することによって、主軸頭旋回形や主軸頭・テーブル旋回形の 5 軸制御 MC にも適用できる。

2.2 測定原理

測定中のマスタ球と 2 台の LED/CCD 光学変位計との位置関係を図 3 に示す。実際の LED 光の帯の幅 L_{x0} および L_{y0} は測定精度が保証される 6 mm より大きいので、測定結果には、この 6 mm の範囲に含まれるデータだけを用いる。図に示すように、光学変位計 B によって、投光部からの帯状の光を遮断した部分のマスタ球の直径 L_{x2} と帯状の光の端から直径の端までの距離 L_{x1} とを測定することができる。同様に、もう一方の光学変位計 A によって、マスタ球の断面の直径 L_{y2} と距離 L_{y1} とが測定できる。測定範囲の中心 O_1 を測定装置の座標系の原点とすると、これらの測定データを用いて、マスタ球の中心位置 $P_b(X_b, Y_b)$ は、式(1)、(2)とで表される。

$$X_b = L_{x1} + L_{x2}/2 - L_{x0}/2 \quad (1)$$

$$Y_b = L_{y1} + L_{y2}/2 - L_{y0}/2 \quad (2)$$

一方、 Z_i 方向のマスタ球の中心位置を考えると、マスタ球と LED 光との関係は図 4 のように表される。ここで、 $\angle P_bAB$ を見ると、マスタ球の半径 R が既知であれば、光学変位計 A によるマスタ球の断面直径 L_{y2} は測定できるため、LED 光からのマスタ球の中心位置 Z_b は、三平方の定理によって、式(3)で表すことができる。

$$Z_b = \sqrt{R^2 - (L_{y2}/2)^2} \quad (3)$$

Fig.3 Relative position between master ball and LED/CCD optical micrometer

Fig.4 Measuring displacement in Z direction

Table 1 Specification of LED/CCD optical micrometer

Model	Keyence LS-7010
Light source	GaN green LED
Measurement range	6mm
Measurement accuracy	$\pm 0.5 \mu\text{m}$
Sampling time	0.417ms

この式(3)から Z_i 方向のマスタ球の中心位置は、 0 mm からマスタ球の半径の $R \text{ mm}$ まで測定できることになる。同様に、 Z_i 方向のマスタ球の中心位置は、もう一方の光学変位計 B から算出することができるが、ここでは Y_i 方向の変位を測定する光学変位計 A の測定データを用いる。

以上の式(1)から(3)を用いて、提案した測定装置では、Labview でデータ処理プログラムを作成し、PC に取り込んだ光学変位計の測定データを 3 次元座標に変換する。なお、2 台の光学変位計を用いて工具やスピンドルの回転精度を測定した報告¹⁰⁾もあるが、いずれも 2 次元で変位を測定している。

2.3 光学変位計のアライメント

提案した測定装置には、同機種の LED/CCD 光学変位計が 2 台取り付けられている。そこで、2 台の光学変位計に求められる取付け精度について検討した。図 5 に示すように、光学変位計 A の LED 光の帯の中心線と平行に X_i 軸、それに垂直で LED 光の帯に含まれるように Y_i 軸ととり、どちらにも直交するように Z_i 軸をとった直交座標系を測定装置座標系として定義する。もう一方の光学変位計 B については、LED 光の帯の中心線に平行に Y_B 軸、それに垂直に LED 光の帯に含まれるように X_B 軸ととり、どちらにも直交するように Z_B 軸をとった光学変位計 B 座標系を定義する。ここで、測定装置座標系は、光学変位計 A を基準に Y_i 軸と Z_i 軸とを設定しているため、この 2 方向については取付け精度を考慮しなくてもよい。一方、 X_i 方向の変位の測定は、光学変位計 B を基準にした X_B 軸

Fig.5 Effect of alignment of measuring instrument

に沿って行われる。そのため、図 5(a)に示すように、光学変位計 B 座標系の X_B 軸と測定装置座標系の Y_I 軸との直角度 γ_{XY} が測定に影響を及ぼす。また、図 5(b)に示すように、 Z_I 軸との直角度 β_{ZX} も影響を及ぼす。そのため、 X_I 方向の測定データは、角度偏差 γ_{XY} が存在すると $\cos \gamma_{XY}$ 倍され、 β_{ZX} が存在すると $\cos \beta_{ZX}$ 倍される。 $X_I Y_I$ 平面内での測定範囲 $6 \times 6 \text{ mm}$ において、この $\cos$ 誤差の影響を光学変位計の測定精度の $0.5 \mu\text{m}$ 以内とすることを考えると、 γ_{XY} と β_{ZX} が同じ値と仮定すれば、それぞれ 0.523° まで許される。そこで、 γ_{XY} と β_{ZX} がそれぞれ 0.2° 以内になるように、2 台の光学変位計を定盤上で直角定規とダイヤルゲージを用いて調整して取り付けた。

3. Z 方向の測定精度

3.1 実験方法

測定装置座標系における Z_I 方向の測定精度は、光学変位計の取付け精度に加えて、マスタ球の LED 光があたる断面の直径の測定精度で決定される。そこで、 Z_I 方向のマスタ球の中心位置と光学変位計に測定されるマスタ球の断面直径との関係を調べた。

図 6 に実験装置の概略を示す。実験装置では、 Z_I 方向のマスタ球の中心位置を測定する光学変位計 A を取り付け、図に示すように光学変位計 B を立てて取り付けた。この実験装置を立て形 3 軸制御 MC のテーブル上に設置し、主軸に取り付けたマスタ球を Z_I 方向の任意の位置に移動させて、光学変位計 A でマスタ球の断面直径を測定し、同時に光学変位計 B でマスタ球の Z_I 方向の位置を測定する。

実験は、次の手順で行った。

- ①図 7 に示すように、マスタ球を光学変位計 A の測定範囲内に入れ、マスタ球の中心が光学変位計 B の帯状の LED 光を含む平面内にあるように、マスタ球を X_M 方向に移動させて、 Z_I が最小となる位置に調整する。
- ②マスタ球を Z_I 方向の任意に位置に移動させる。
- ③光学変位計 A によって、投光部からの帯状の LED 光を遮断した部分のマスタ球の直径 L_{y2} を測定して、式(2)、(3)を用いて

Fig.6 Experimental setup

Fig.7 Relative position between master ball and LED light

LED 光からのマスタ球の Z_I 方向の中心位置 Z_b を算出する。

- ④光学変位計 B によって、帯状の LED 光の端からマスタ球先端までの距離 Z_I を測定し、光学変位計 A にマスタ球の先端から 0.5 mm の断面直径が測定された位置を基準に Z_b へ換算する。

実験は、 Z_I 方向においてマスタ球が光学変位計 A に感知されてからマスタ球の直径が測定されるまでの範囲で、 0.1 mm 間隔のそれぞれの位置に 5 回位置決めを行った。

3.2 実験結果

図 8(a)に、光学変位計 B で測定した Z_I 方向のマスタ球の中心位置 Z_b から算出される理論上のマスタ球の断面直径と光学変位計 A で測定したマスタ球の断面直径 L_{y2} との差を示す。マスタ球の中心位置 Z_b が 1.8 から 2.0 mm 、すなわちマスタ球の先端近くの断面直径が測定されているところで、大きく誤差が現れている。ここで、光学変位計 B で測定した Z_b には、光学変位計 A がマスタ球先端から 0.5 mm の断面直径を測定する精度 $0.5 \mu\text{m}$ が影響し、 Z_I 方向に直すと $0.22 \mu\text{m}$ の誤差となる。また、光学変位計 B の測定精度 $0.5 \mu\text{m}$ を考慮する必要もあるが、これらの影響は小さいことを確認している。その他の部分は拡大すると、 $-1.4 \mu\text{m}$ から $+0.6 \mu\text{m}$ の誤差が現れているものの、有効な測定が行われている。

図 8(b)に、光学変位計 A で測定したマスタ球の断面直径から算出した Z_I 方向のマスタ球の中心位置と光学変位計 B で測定したマスタ球の中心位置との差を示す。マスタ球の中心位置 Z_b が 1.8 から 2.0 mm では、図 8(a)に示したように測定した断面直径の誤差が大きいため、測定誤差が大きく現れている。その誤差は断面直径の誤差に応じてマスタ球の先端ほど大きい。マスタ球の中心位置 Z_b が 0.6 から 1.7 mm までの範囲では、 $-0.9 \mu\text{m}$ から $+1.0 \mu\text{m}$ の誤差で測定が行われており、ばらつきも小さいことがわかる。この精度は、ボールバーシステムの測定精度²⁾の $\pm 1.25 \mu\text{m}$ などと同等で、5 軸制御 MC における同時 3 軸制御運動や同時 5 軸制御運動などの測定に使用でき

Fig.8 Measurement accuracy in Z direction

ると考えられる。一方、マスタ球の中心位置が 0 から 0.5mm では、0mm すなわち光学変位計の LED 光がマスタ球の中心に近づくほど、断面直径から算出した Z_1 方向の位置の誤差が大きくなっている。また、誤差はすべて負で、ばらつきは小さい。先に述べた光学変位計 B で測定した Z_b に含まれる測定誤差の影響も考えられるが、これに比べると十分小さい。その他に、 Z_1 方向のマスタ球の中心位置の算出に影響を及ぼす因子として、式(3)に用いたマスタ球の直径 4.0002mm は、検査成績表上マイクロメータで直径不同 0.04 μ m が確認されていることから、光学変位計 A でマスタ球の断面直径 L_{y2} が理想的に測定されていないことが考えられる。そこで、式(3)に用いるマスタ球の直径は 4.0002mm とし、理想的なマスタ球の断面直径 L_{y2} に誤差を -0.5 から +0.5 μ m まで与えて、測定結果に及ぼす影響を調べた。その結果を図 9 に示す。横軸は、図 8 と同様にマスタ球の中心位置を表しており、0mm において、実験では光学変位計の LED 光がマスタ球の中心に一致することになる。LED 光がマスタ球の中心付近にある場合に誤差は最大となり、そこから離れてマスタ球の先端に近づくほど誤差は小さくなっている。これは光学変位計の LED 光に対して、マスタ球が移動しても、マスタ球の中心が LED 光に近づくほど、光学変位計に測定されるマスタ球の断面直径の変化が小さくなるためである。図 8(b)と比較すると、光学変位計 A はマスタ球の断面直径を 0.5 μ m 程度小さく測定していた可能性がある。

この光学変位計で測定される断面直径は補正することもできるが、ここではマスタ球の先端近くの測定誤差と合わせて、これらの誤差を考慮しなくてよい Z_b が 0.6mm から 1.6mm の範囲で以下の測定を行った。

4. 3 軸制御 MC の運動精度の測定

4.1 測定項目

5 軸制御 MC を所有していないため、提案した運動精度測定装置を評価するために、立て形 3 軸制御 MC において、直進軸の 1 軸の位置決め、同時 3 軸位置決め、円運動を測定した。1 軸の位置決めと同時 3 軸位置決めの測定条件を表 2 に、円運動の測定条件を表 3 に示す。既に Z 方向の測定精度を評価しているため、1 軸の位置決めの測定は、X, Y 方向だけとした。1 軸の位置決めでは、0.1mm ずつ 10 回の一方向位置決めを行い、送り速度は、すべての運動で 10mm/min とした。同時 3 軸位置決めは、X, Y, Z 方向にそれぞれ 1 方向に 0.01mm ずつ同時に移動させた。円運動は、測定装置の測定範囲を考慮して、円弧半径を 0.25mm とし、Z 方向の運動を評価するために、

Fig.9 Effect of measurement accuracy of micrometer A

(a) X direction

(b) Y direction

Fig.10 Measurement results of X and Y axis positioning

Table 2 Measurement conditions of accuracy of positioning

Motion	Axis	Displacement mm	Feed speed mm/min
1-axis positioning	X, Y	0.1	10
Simultaneous 3-axis positioning	X, Y, Z	0.01 (each axis)	10

Table 3 Measurement conditions of circular motion

Radius mm	Plane	Feed speed mm/min
0.25	ZX	10

測定平面は ZX 平面とした。

Fig.11 Measurement results of simultaneous 3-axis positioning

4.2 測定結果

(1) X, Y 方向の1軸位置決め

X, Y 方向のそれぞれの1軸位置決めの測定結果を図10に示す。どちらの測定結果にも、位置決めを行った方向で0.1mmの階段状の軌跡が、測定されていることがわかる。運動が行われていない方向を見ると、Z方向はほぼ一定であるのに対して、X方向の位置決めでは、Y方向がわずかに増加している。また、Y方向の位置決めでは、X方向が減少しており、この変化量は20 μ m程度ではほぼ等しい。全体で1mmの直進軸の移動を考えた場合、3軸制御MCの直進軸間の直角の影響はほとんど無視できるため、これは運動精度測定装置のX_I, Y_I方向と3軸制御MCのX, Y軸が一致していないことによるものである。

(2) 同時3軸位置決め

同時3軸位置決めの測定結果を図11に示す。X, Y, Zそれぞれの方向に階段状の軌跡が測定されている。X方向については、0.01mm、Y方向については、0.0095mm程度の一定の高さの階段が確認できる。一方、Z方向の測定結果では、階段の高さが、一定ではない。特に8回目の位置決めが4 μ m程度くっていることがわかる。運動精度測定装置では、もう一方の光学変位計BからもZ方向の球の位置を測定できるが、こちらと同様な誤差が同じ位置で現れているため、実際に3軸制御MCがこのような位置決めを行ったものと考えられる。

(3) 微小円運動

ZX平面における円弧軌跡を図12(a)に、そのときのY方向の運動軌跡を図12(b)に示す。円弧軌跡は、真円度がCWで7.0 μ m、CCWで5.9 μ mとなっている。すべての象限切り替え時に4 μ m程度の突起が現れており、詳細に円運動が測定できていることがわかる。一方、円運動に垂直なY方向の測定結果を見ると、CW、CCWともに30°と135°付近ではほぼ同じ大きさの8 μ mの谷が測定されている。この測定結果だけからでは、どの軸に起因する誤差であるかは判別できないが、XY平面での円運動を測定すると、こうした軌跡は得られないため、Z軸の送り駆動機構の影響であると考えられる。

以上のように、提案した測定装置で主軸とテーブルとの相対変位を3次元的に測定できる。また、3次元で工作機械の運動精度が測定できれば、機械の挙動をより多面的に評価することができる。

5. 結 言

2つの非接触変位計を用いた運動精度測定装置を考案し、測定精度に影響を及ぼす因子を明らかにした。さらに、3軸制御MCを用いて、微小円運動、同時3軸位置決めなどを測定し、提案した測定装置の有効性を検討した。その結果をまとめる

(a) Circular trajectory in ZX plane
(b) Motion trajectory of Y direction
Fig.12 Measurement results of circular motion

と次のようになる。

- (1) 主軸側にマスタ球を取り付け、テーブル側から2つの非接触変位計を用いて、2次元平面内でマスタ球の直径と位置とを測定することで、主軸とテーブルとの相対変位であるマスタ球の中心位置を3次元で算出する方法を提案した。
- (2) マスタ球の断面直径からマスタ球の中心位置を算出する場合、マスタ球の中心付近では、断面直径の測定精度が中心位置の算出結果に大きく影響を及ぼす。
- (3) 提案した測定装置によって、工作機械の運動を非接触に3次元で測定することができる。

参 考 文 献

- 1) ISO/TC39/SC2 N1832, ISO/CD 10791-6.2, Machine Tools-Test conditions for machining centers-Part 6: Accuracy of speeds and interpolations, (2010).
- 2) レニショー株式会社: QC20-W ワイヤレスボールバーシステムの詳細と仕様 (カタログ), (2010).
- 3) 坂本重彦, 稲崎一郎: ボールバーによる五軸マシニングセンタの組立誤差同定方法, 日本機械学会論文集 (C編), **63**-605 (1997), 262.
- 4) 齋藤明徳, 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方法に関する研究(第2報), 精密工学会誌, **69**-2(2003), 268.
- 5) 黎子椰, 垣野義昭, 川島章弘, 井原之敏, 山路伊和夫, 脇坂宗生: 5軸加工機における回転軸系の運動誤差原因の診断に関する研究(第1報), 精密工学会誌, **69**-5(2003), 703.
- 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), 精密工学会誌, **76**-3(2010), 333.
- 7) 松下哲也, 松原厚: テーパーコーン DBB 測定によるテーブル旋回形5軸制御工作機械の幾何偏差の同定と補正, 精密工学会誌, **77**-6(2011), 594.
- 8) 内海敏三, 小杉達寛, 齋藤明徳, 堤正臣: 5軸制御マシニングセンタの静的精度測定方法, 日本機械学会論文集 (C編), **72**-719 (2006), 2293.
- 9) Jim benes, Five-axis accuracy, American machinist, **2**(2009), 42.
- 10) 例え、山田隆一, 柳和久, リチウイ: 高精度小径スピンドルの回転振れベクトルとチャッキング誤差成分の光学式分離評価, 精密工学会誌, **64**-12(1998), 1785.