

非接触変位計による工作機械の運動精度測定方法の開発

Development of Measuring Instrument for Motion Accuracy of Machine tools Using Noncontact Displacement Sensor

○齋藤明德*, 今野翔平*

○Akinori Saito*, Syouhei Konno*

*日本大学

*Nihon University

キーワード: 5軸制御(five-axis control), マシニングセンタ(machining center),

非接触測定(non-contact measuring), ボールバー(ball-bar), 円運動軌跡(circular trajectory)

連絡先: 〒000 郡山市田村町徳定字中河原1 日本大学工学部機械工学科

齋藤明德, Tel.: (024)956-8767, Fax.: (024)956-8767, E-mail:asaito@mech.ce.nihon-u.ac.jp

1. はじめに

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)~6)}.

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るれば, 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, 本報告では, 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, 測定精度を検討した.

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, 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つ

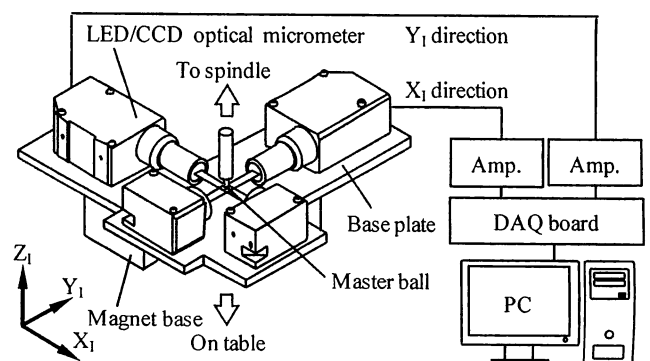


Fig.1 Proposed measuring instrument

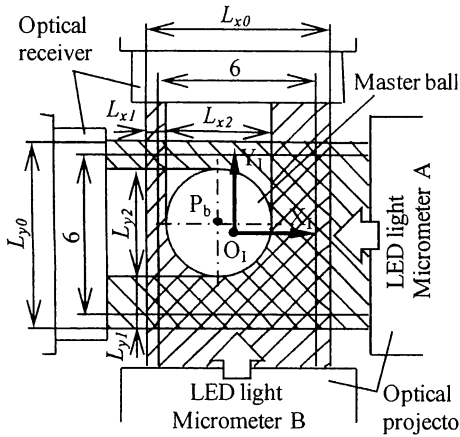


Fig. 2 Relative position between master ball and LED/CCD optical micrometer

た部分の長さ、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。その測定範囲は6mm、測定精度は $\pm 0.5\mu\text{m}$ となっている。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、DAQボードによって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、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 4.0002mm 、真球度 $0.04\mu\text{m}$ の鋼球とした。

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_1 、 Y_1 、 Z_1 方向にそれぞれ1mmの測定範囲が確保できるように設計している。

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2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6mmより大きいため、測定結果には、この6mmの範

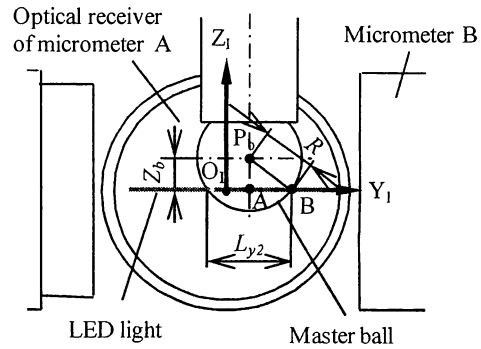


Fig. 3 Measuring displacement in Z direction

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_1 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3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。

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

この式(3)から Z_1 方向のマスタ球の中心位置は、0mmからマスタ球の半径の R_{mm} まで測定できることになる。同様に、 Z_1 方向のマスタ球の中心位置は、もう一方の光学変位計Bからも算出することができるが、ここでは Y_1 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。

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_1 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_1 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4に実験装置の概略を示す。実験装置では、 Z_1 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_1 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_1 方向の位置を測定する。

実験は、図5に示すように、 Z_1 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、0.1mm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6(a)に、光学変位計Bで測定した Z_1 方向のマスタ球の中心位置 Z_b と光学変位計Aで測定したマスタ球の断面直径 L_{y2} との関係を示す。

光学変位計Aで測定されたマスタ球の断面直径は、 Z_1 方向のマスタ球の中心位置の変化に応じて、円弧に沿って変化しており、測定が有効に行われていることがわかる。

図6(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_1 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2.0mmでは、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

Micrometer B for measuring position of master ball in Z direction

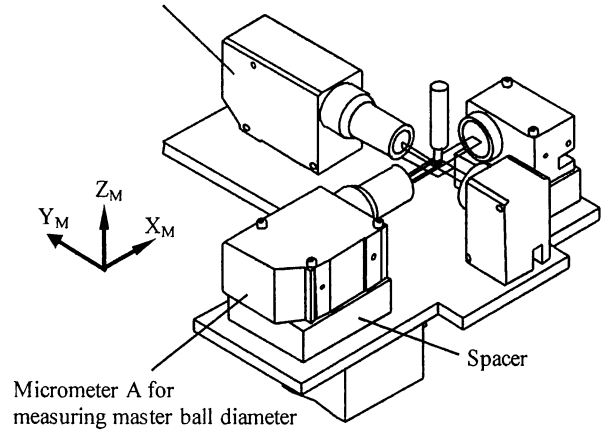


Fig. 4 Experimental setup

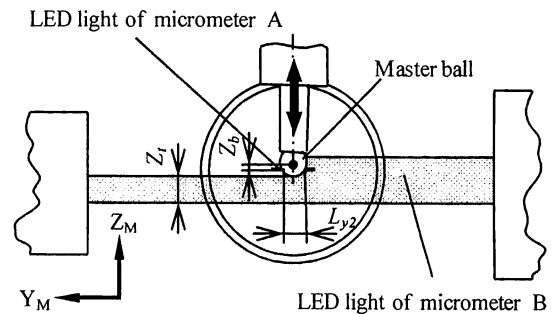
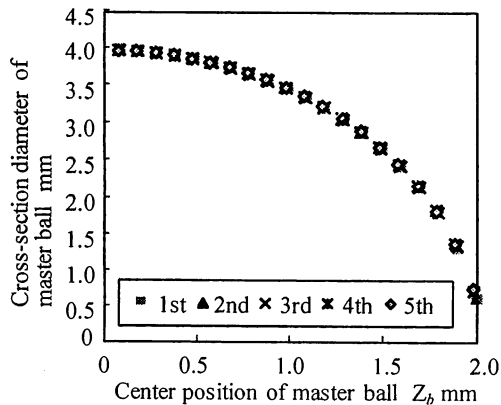
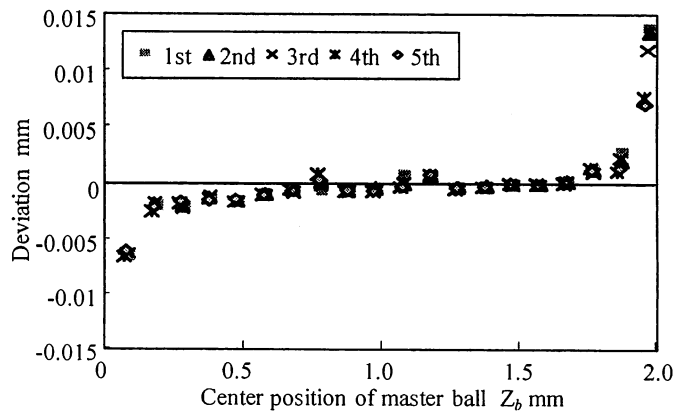


Fig. 5 Relative position between master ball and LED light



(a) Relationship between center position and cross-section diameter of master ball



(b) Relationship between center position of master ball and deviation

Fig. 6 Measurement accuracy in Z direction

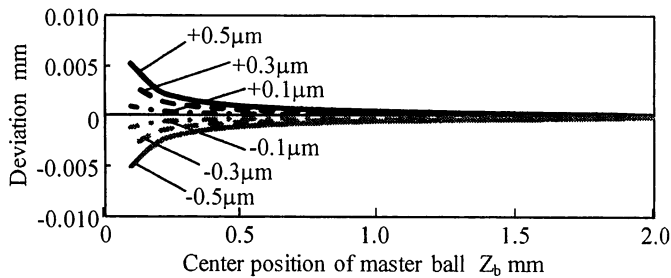


Fig. 7 Effect of measurement accuracy of micrometer A

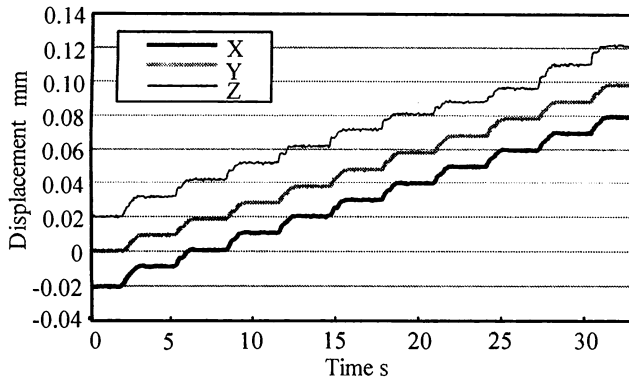


Fig. 8 Measurement results of simultaneous 3-axis positioning

先端ほど大きい。マスタ球の中心位置 Z_b が0.6から1.7mm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、これに比べて十分小さい。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、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 $+0.5\mu\text{m}$ 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7に示す。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6(b)と比較すると、光学変位計Aはマスタ球の断面直径を $0.5\mu\text{m}$ 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. 運動精度の測定例

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、同時3軸位置決め、円運動を測定した。その測定条件を表2に示す。送り速度は、 10mm/min とし、X, Y, Z方向にそれぞれ1方向に 0.01mm ずつ同時に位置決めを行った。

Table 2 Measurement conditions

Axis	Displacement mm	Feed speed mm/min
X, Y, Z	0.01 (each axis)	10

同時3軸位置決めの測定結果を図8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 $4\mu\text{m}$ 程度くれ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、こちらも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。

5. おわりに

- (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。

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), 262-267.
- 4) 齋藤明德, 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), 268-273.
- 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), 703-709.
- 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), 333-337