レーザ干渉測長機を用いた NC 工作機械の 円運動測定装置の開発*

(測定原理, 装置の構成ならびに 2, 3 の実験結果)

馬場 修一^{*1}, 岩澤 光一郎^{*2}, 三井 公之^{*3}

梨木 政行^{*4}, 柴田 英孝^{*4}

Development of a Measuring Method for Circular Movement of NC Machine Tools using Laser Displacement Interferometer

(Measuring Principle and Experimental Results)

Shuichi BABA, Koichiro IWASAWA, Kimiyuki MITSUI^{*5},

Masayuki NASHIKI and Hidetaka SHIBATA

^{*5} Department of Mechanical Engineering, Keio University,

3-14-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

Circularity tests method using laser displacement interferometer has been developed. The new measuring method features a much longer range of motion than ordinal circular tests method such as DBB method, with relative displacements measured by laser interferometer. Therefore minimum and maximum radius of a circular test path is under less restriction than a ball link system. Moreover, the measuring system can also be applied for evaluation of positioning accuracy in X or Y axis, and in XY plane. The proposed device consists of a laser interferometer whose interferometer head and retroreflector holder are connected with stainless steel rod. The stainless steel rod has a synthetic resin linear bearing, thus retroreflector holder is movable against interferometer and both optical components are always facing. The laser interferometer measures distance change between interferometer and retroreflector. At first, the measuring accuracy of the apparatus was measured, and the results were compared with capacitive sensor. Then, the apparatus was applied for circularity tests and positioning error measurements for a vertical machining center. The results obtained show the validity of the apparatus.

Key Words: Metrology, Accuracy, NC Machine Tools, Circularity Tests Method, Circular Interpolation, Laser Interferometer, Positioning Error

1. 緒 論

現在, 機械加工において NC 工作機械は最も重要な生産設備の一つとなっている。そのような中で NC 工作機械は多様な要求に応えるべくその性能の改善が望まれている。特に高精度な加工能力の実現は, 最も重要な課題の一つである。加工精度に影響を与える要因としては, 特に工作機械の運動精度があげられるが, それは工作機械に運動誤差があると, 加工形状にそれが転写されて加工誤差が大きくなるためであり, このことから高精度な加工能力実現のためには, その精度を正しく評価できる測定法の開発が必要であるといえる。従来, 工作機械の精度測定は各運動軸それぞれについて単独で行われていたが, 近年高精度な加工が要求されるようになり, 各軸単独の運動精度だけでな

く複数の軸を同時に動かしたときの運動精度も測定する必要が出てきた。そこで近年, 運動精度を専用の測定装置を用いて測定し, NC 工作機械の誤差を診断する方法が普及し, 円運動精度試験によって NC 工作機械の幾何学的な運動誤差のみならず, これまで不明だった制御系や送り速度に依存する誤差原因まで診断できるようになってきている。

このような状況の中で, 円運動測定法として, これまでに数々の手法^{(1)~(9)}が提案されており, ISO としても規格化されている⁽¹⁰⁾。しかし, それらの多くに共通する難点は, 測定装置に使用している変位計の測定範囲が狭く, 円運動測定の際の測定半径位置に制約があること, また, 円運動測定に特化した測定装置であるという点である。このような観点から, 本研究では変位計測センサとしてレーザ干渉測長機を用いた測定法を提案している。その最大の利点は, 測長範囲が非常に広いことで, 円運動測定に際して回転中心の調整が容易なこと, また, 広い範囲の測定半径に対応できること, さらに従来の円運動測定装置と異なり, 一台の測定装置で円運動測定以外の精度試験項目の評価が可能であることなどである。また, 光の波長を基準として測定が行われることから, 変位測定センサの校正

* 原稿受付 2001 年 6 月 12 日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所(☎244-0817 横浜市戸塚区吉田町292)(元:慶應義塾大学大学院)。

^{*2} 慶應義塾大学大学院。

^{*3} 正員, 慶應義塾大学理工学部(☎223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*4} (株)オークマ(☎480-0144 愛知県丹羽郡大口町下小口5-25-1)。

E-mail: mitsui@mech.keio.ac.jp

が不要な点も利点となっている。

本研究ではレーザ干渉計を組込んだ装置を試作し、その装置の性能評価を行い、さらに実際にその装置を用いて NC 工作機械の位置決め精度測定、円運動測定を行い、本測定法および測定装置の有効性を明らかにした。

2. レーザ干渉測長機を用いた円運動測定装置の測定原理および装置の構成

レーザ干渉測長機を用いた円運動測定装置の構成を図 1 に示す。また、測定装置の構造についての詳細図を図 2 に示す。ただし図 2 においては、図が煩雑になるのを避けるためにレーザ干渉計は省略して描いている。この装置の機構は、レーザ干渉計取付部とレトロリフレクタ取付部とから構成されており、両者をそれぞれ測定対象工作機械のテーブルと主軸に取付ける。レーザ干渉計とレトロリフレクタを常に対向する位置に保ち、干渉状態を維持するために両者をステンレス棒でつなぎ、レトロリフレクタ取付部には樹脂製リニアベアリングを組込んで、ステンレス棒との間の摺動抵抗を低減している。また、レーザ干渉計取付部とレトロリフレクタ取付部には転がり軸受を組込み、 X - Y 平面内において 360° 自由に回転可能な構造になっている。また主軸の Z 方向への移動に対しても、レーザ干渉計取付部とレトロリフレクタ取付部は回転可能であるが、現状の装置では回転可能な範囲は小さく、ステンレス棒の傾きに換算して約 $\pm 5^\circ$ 程度となっている。

現状の装置は構造の関係上、最小回転半径(レーザ干渉計とレトロリフレクタを最も接近させたときの、レーザ干渉計取付部とレトロリフレクタ取付部の回転中心間距離)は約 100 mm となっているが、最大回転

半径はステンレス棒の長さによって決定され、測定範囲設定に関する自由度が大きい。このため、大型の工作機械の円運動測定に対応することも可能である。本装置の測定範囲は、 r (回転半径) = 100~250 mm が可能であるため、移動距離 150 mm の範囲内であれば、 X - Y 平面内のいかなる方向への移動における位置決め精度の評価も行うことができる。

3. 測定装置の性能評価試験

本研究で使用したレーザ干渉測長機は、干渉ヘッドとレーザ光源とを光ファイバーで結ぶ光ファイバー結合型レーザ干渉測長機である。このレーザ干渉測長機は 10 nm の分解能を有するものであるが、各部品を組合せた装置全体としての性能を評価する必要がある。

この性能評価試験として繰返し精度測定を行った。これはマシニングセンタの主軸に対して、 X 軸の正方向に 10 μ m 移動した後に停止し、負方向に 10 μ m 戻るという指令(送り速度 0.1 mm/min.)を 5 回与え、その際の主軸の動きを、本測定装置と静電容量型変位計とで測定し、両測定結果を比較するものである。なお、静電容量型変位計は、マグネットチャックによりマシニングセンタのテーブル上に固定し、主軸端に取付けたコレットチャック側面を測定面として実験を行っている。測定結果を図 3 に示す。この結果を見ると、本装置で測定した値は、静電容量型変位計で測定

Fig. 1 Configuration of measuring apparatus

Fig. 2 Detail view of measuring apparatus

した値と比較して、その差が $0.1 \mu\text{m}$ 以内に収まっており、本測定装置が主軸の移動をほぼ正確にとらえ十分な測定精度を有していることがわかる。また、この測定と同様の測定を Y 軸方向および X - Y 平面内 45° 方向についても行った結果、 X 軸方向の測定結果と同様に主軸の移動をほぼ正確にとらえていることを確認している。なお、レーザ干渉計取付部ならびにレトリフレクタ取付部の回転系を含む装置全体の精度を評価することが今後の課題である。

4. 主軸初期位置の設定

位置決め精度測定等を行う場合、ステンレス棒の中心軸と工作機械の測定方向軸とを平行にする必要がある。これら 2 軸が平行でないと測定誤差を生じることになる。この作業は厳密に行うほうが望ましいが、2 軸を完全に平行にする必要はなく、作業能率を高めるためには、調整の許容範囲を明らかにしておくことが重要である。図 4 に従って、その計算方法を示す。ここで、図 4 の r はレーザ干渉計とレトリフレクタ間の距離、 d は主軸の移動距離である。また θ は主軸位置の初期設定時点におけるステンレス棒中心軸と工作機械測定方向軸との角度、 Δr は主軸の移動距離 d に対応するレーザ干渉計の距離測定値の変化量である。図 4 のようにステンレス棒の中心軸と工作機械の測定方向軸とが平行になっていないと、 d と Δr とは一致しない。 d と Δr との差を e とすると、 e は次式のように表される。

$$e = -d - r + \sqrt{d^2 + r^2 + 2dr \cos \theta} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、工作機械のテーブルに設置したレーザ干渉計の回転中心より 100 mm の位置を主軸の初期位置とし、その位置からこの装置で最大に移動できる 150 mm の距離を移動させた場合に生じる測定誤差 e を式 (1) を用いて求めたものが図 5 である。ただし図 5 の横軸は、初期設定時点におけるステンレス棒の中心軸と工作機械の測定方向軸との間の角度を示してい

る。その結果、主軸を 150 mm 移動させた時の測定誤差を $0.1 \mu\text{m}$ 以内に収めるには、これら 2 軸が約 0.1° 以内の角度になるように主軸初期位置の設定を行う必要があることがわかる。

現段階では本測定装置にロータリエンコーダ等の角度測定センサを組込んでいないため、この設定作業を静電容量型変位計を用いて行っている。まず、目測によりステンレス棒の中心軸と工作機械の測定方向軸とが平行になるように主軸位置を調整する。次に、ステンレス棒の水平方向の変位を静電容量型変位計により測定しながら、主軸を測定軸方向に移動する。主軸を移動する際における静電容量型変位計の出力変化が小さくなるように主軸の位置を修正することにより、これら 2 軸を平行に調整することができる。実際の測定では、主軸の初期位置は本体の回転中心より約 100 mm の位置とし、静電容量型変位計は図 4 に示した位置に設置しているが、この状態から主軸を 10 mm 移

Fig. 4 Adjustment of apparatus direction

Fig. 3 Result from accuracy test (X axis)

Fig. 5 Result of calculation

動した場合に、静電容量型変位計の出力変化がどの程度であれば、2軸が約 0.1° 以内の角度に収まるかを明らかにする必要がある。

まず主軸を10 mm移動した際の本体の回転角である ω を求める必要があるが、図4の三角形ACDに注目すると、上で述べたものと同様、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned}(r+\Delta r)^2 &= (r \cos \theta + d)^2 + (r \sin \theta)^2 \\ &= r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2)\end{aligned}$$

さらに、三角形ABCに注目すると次式を用いて ω の値を求めることができる。

$$\begin{aligned}\omega &= \cos^{-1} \frac{r^2 - d^2 + (r + \Delta r)^2}{2r(r + \Delta r)} \\ &= \cos^{-1} \frac{r + d \cos \theta}{\sqrt{r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta}} \quad \dots\dots\dots (3)\end{aligned}$$

ここで $r=100$ mm, $d=10$ mm, $\theta=0.1^\circ$ を代入すると $\omega=0.0091^\circ$ と求まる。また本体回転中心から静電容量型変位計までの距離 AE は約113 mmであるので、本体が 0.0091° 回転した際に静電容量型変位計に現れる変位量は、 $L\omega$ (ω の単位はrad)で示すことができ、変位量は $18.6 \mu\text{m}$ となる。よって2軸が約 0.1° 以内の角度になるようにすることは、工作機械のテーブルに設置した本体の回転中心より100 mmの位置を主軸の初期位置とし、その位置から主軸を10 mm移動した場合に、静電容量型変位計の出力変化が約 $18.6 \mu\text{m}$ 以内となるように調整することと等価であり、静電容量型変位計の測定精度を考慮するとこの作業はきわめて容易である。

今回の測定では、先に述べたとおり、主軸初期位置を本体回転中心から100 mmの位置とし、この状態から主軸を X 軸方向に10 mm移動させたとき、静電容量型変位計の出力変化が約 $10 \mu\text{m}$ 以内に収まるように軸合せを行った。このとき、マシニングセンタの軸方向と装置のステンレス棒の方向の差を逆に計算してみると、約 0.056° に収まっているといえ、テーブルを150 mm移動した際に生じる誤差は $4.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 程度となり、マシニングセンタの運動誤差を測定する上で問題にならない程度であるといえる。

5. 位置決め精度測定

三軸制御の立形マシニングセンタを用いて、実際に位置決め精度測定を行った。位置決め精度測定の方法は、 X 軸方向、 Y 軸方向及び $X-Y$ 平面において X 軸方向より 45° 方向とし、送り速度は 500 mm/min. 、測定距離は、 X 軸、 Y 軸に関しては10 mm間隔で150 mm、 X 軸方向より 45° 方向に関しては14 mm間隔で70 mmにわたって行った。その結果をそれぞれ

図6～8に示す。

マシニングセンタを相対移動としたことによる誤差の累積の影響を除いた一移動ごとの位置決め誤差の測定結果を示した。各方向とも位置決め誤差の平均を求めたところ、平均値が $1 \mu\text{m}$ 以内となっていることがわかった。また、本測定装置を使用することにより、従来のレーザ干渉測長機による位置決め精度測定が困難な任意の運動方向における測定をも容易に行うことが可能であることが示された。

一方、本測定装置による測定結果、特に図6、7においては、1回めと2回めで傾向の異なるデータとなっている。これが測定装置に起因するものか、あるいは対象工作機械の特性によるものかを判断するために、 X 軸方向についてレーザ干渉測長機を使用した通常的位置決め測定実験を行った。その結果、2回の測定

Fig. 6 Test result from positioning error (along x axis)

Fig. 7 Test result from positioning error (along y axis)

Fig. 8 Test result from positioning error (45° in $x-y$ plane)

における位置決め誤差の差は最大 $0.5\ \mu\text{m}$ 程度となり、図 6 の測定結果に比較して小さい値となった。両測定結果の差異の原因については、対象工作機械の位置決め特性によるもの以外に、本測定装置のレーザ干渉計取付部およびレトリフレクタ取付部の回転部分の特性と、ステンレス棒と樹脂製リニアベアリングの間の摺動抵抗との関係で測定結果に影響が生じている可能性が大きく、今後回転部分と摺動部分の改良をはかることが必要であるものと考えている。

6. 円運動測定

立形マシニングセンタを用いて、円運動測定を行った。測定条件としては、円運動の半径を $120\ \text{mm}$ 、テーブルの送り速度を $1\ \text{m/min.}$ 、 $2\ \text{m/min.}$ 、 $4\ \text{m/min.}$ 、 $8\ \text{m/min.}$ に設定し、それぞれ時計回り (CW) と反時計回り (CCW) について測定を行った。円運動の半径についてはこのほかにもさまざまな大きさが可能であるが、本装置での測定可能最小半径、および実験に用いたマシニングセンタの稼動範囲との兼ね合いにより、今回はこの一種類のみの測定とした。また、測定結果にテーブルの運動開始時と停止時の影響が含まれないように、円運動測定を 2 回連続して行い、最初と最後の 180° 分のデータを除去して、中間の 1 回転分のデータを求めた。測定結果を図 9(a)~(h) に示す。送り速度の増大とともに、象限切替えの際の突起状の誤差が次第に大きくなること、また、特に時計回り方向での円軌道の乱れが増大する傾向にあることが示されている。また今回のすべての測定結果においては、送り速度に関係なく、CW 方向回転では約 135° 方向を長軸とした楕円形状となり、CCW 方向回転では、ほぼ真円形状となっている。

なお、本測定系のデータサンプリング速度は、毎秒約 100 点である。したがって、円運動測定における一周あたりのデータサンプリング点数は送り速度 $1\ \text{m/min.}$ 、 $2\ \text{m/min.}$ 、 $4\ \text{m/min.}$ 、 $8\ \text{m/min.}$ の場合につきそれぞれ約 4 200、2 100、1 050、525 点となっている。

7. 結 論

以上、本研究はレーザ干渉測長機を用いた NC 工作機械の円運動測定装置ならびに、その基本特性評価結果について述べた。また、立形マシニングセンタを測定対象として位置決め精度測定ならびに、円運動測定を行い、その結果についてとりまとめた。これを要約すると以下ようになる。

(1) 静電容量型変位計と比較した実験により、本測定装置の測定分解能を明らかにした。

(a) Result from circular test
(Feed rate: $1\ \text{m/min.}$, CW)

(b) Result from circular test
(Feed rate: $1\ \text{m/min.}$, CCW)

(c) Result from circular test
(Feed rate: $2\ \text{m/min.}$, CW)

(d) Result from circular test
(Feed rate: 2 m/min., CCW)

(g) Result from circular test
(Feed rate: 8 m/min., CW)

(e) Result from circular test
(Feed rate: 4 m/min., CW)

(h) Result from circular test
(Feed rate: 8 m/min., CCW)

Fig. 9

(f) Result from circular test
(Feed rate: 4 m/min., CCW)

(2) 本測定装置は円運動測定のみではなく、位置決め精度測定に利用可能なことを示した。また位置決め精度評価に一般に利用されるレーザ干渉測長機による測定では困難な、 $X-Y$ 平面内での任意の方向における測定をも容易に行うことができることを示した。

(3) マシニングセンタの円運動測定を行い、象限切替え時に伴う突起や運動軌跡が約 135° 方向に長軸をもつ楕円形状になることなど、円運動時の特徴をとらえることができた。また円運動測定に際して、レーザ干渉測長機の測長範囲が大きいために、回転中心の調整を容易に行うことができることをあわせて確認した。

本研究は IMS 国際研究プログラムの一環として行

われたものであることを記し、関係各位に深く感謝する次第である。

文 献

- (1) Bryan, J. B., A Simple Method for Testing measuring Machine and Machine Tools—Part 1. Principle And Applications—, *Precision Eng.*, 4-2 (1982), 61-69.
- (2) 垣野義昭・井原之敏・亀井明敏・伊勢徹, NC 工作機械の運動精度に関する研究(第1報)—DBB 法による運動誤差の測定と評価—, *精密工学会誌*, 52-7 (1986), 1193-1198.
- (3) 堤正臣・酒井浩二・金貞淳, NC 工作機械の円運動の新しい測定方法—標準化のための代替方法の開発—, *機論*, 58-545, C(1992), 271-276.
- (4) Ziegert, J. C. and Mize, C. D., The laser ball bar—a new instrument for machine tool metrology—, *Precision Eng.*, 16-4 (1994), 1756-1760.
- (5) 堤正臣・小山田重徳・全彦榛・高見保雄, 2 次元プローブと基準円板とを用いた円運動測定データの自動補正方法, *精密工学会誌*, 61-9 (1995), 1307-1311.
- (6) 丘華・大岡正典, リンク機構を用いる NC 工作機械の運動精度測定法—第1報, 測定装置及び測定実験—, 62-593, C(1996), 320-325.
- (7) 姜明錫・長谷川聡・三井公之, リンク機構による NC 工作機械の円運動測定方法, *機論*, 62-602, C(1996), 348-353.
- (8) 丘華・高田正昭, リンク機構を用いる NC 工作機械の運動精度測定法—第2報, 測定装置における誤差の同定法—, *機論*, 63-614, C(1997), 3660-3667.
- (9) 丘華・竹下義人・高田正昭, リンク機構を用いる NC 工作機械の運動精度測定法—第3報, 小径円運動とコーナ部を含む直線運動の精度測定—, 64-628, C(1998), 4850-4856.
- (10) ISO 230-4, Test code for machine tools—Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools, (1996).