研 究

真 直 度 測 定 器 の 試 作*

横 山 豊**

A New Straightness Testing Instrument

Yutaka YOKOYAMA

A new straightness testing instrument of high accuracy has been developed at the National Research Laboratory of Metrology.

Test pieces up to 500 mm in length and up to 300 mm in diameter can be tested by the instrument, when they are cylindrical. A carriage with sensitive electronic micrometers on both its sides is mounted on a bed with flat and vee guides and is driven by an electric motor.

The bed has two tables for supporting a test specimen on both its sides with dimensions 600×200 mm.

A test specimen is set at first on one of the tables with its test surface approximately parallel to the direction of the guide rails, and the relative deviation of the surface to the moving trace of the carriage is detected and recorded.

And then the surface is measured on the other side, and the deviation is recorded again. If the carriage is driven along the same trace in the repeated recordings, the error of the straightness of the movement of the carriage can be easily separated by examining the two records and only the error of the straightness of test specimen is obtained.

After experimental examination of the instrument about the repeatability of the traces of the carriage, temperature fluctuation, stability of the electronic micrometer, recorder and so on, it is concluded that the instrument has an accuracy within $0.3 \mu\text{m}$.

1. 緒 言

機械技術の高度化にともない、高い性能の機械部品が要求され、従来のように寸法精度のみで機械部品の精度を評価することは不十分で、形状精度を含めて考える必要性が生じてきている。形状精度のうち、表面あらさ測定器や真円度測定器が開発され、精密工作の分野においてはかなり普及し、機械部品の形状がはっきり測定され評価されている。真直度は基準直線や基準平面を真直の基準として、測微器によって真直度を求める方法が一般的であるが、表面あらさ測定器や真円度測定器のような記録式の真直度測定器が要望されている。現在、真直度測定器として製作されているものは、光線を真直の基準として光学的に拡大するもの、基準平面、基準円筒を用い電気式検出器によるものがある。光学的のものは測定範囲は長い、顕微鏡をのぞくわずらわしさがあり、記録することが困難である。機械的のものは高精度に基準を作ることの困難さから測定範囲の長いものでも $100 \sim 200$ mm 程度である。

そこで、つぎのことを考慮して真直度測定器を試作し

た。

- i) 測定範囲は $500 \sim 1000$ mm の円筒または細長い平面部品。
- ii) 連続測定と自動記録が可能であること。
- iii) 製作が容易でしかも高精度の真直度が求められること。
- iv) 真直度の比較測定、円筒度（直径差）、平行度も測定できる構造であること。
- v) 測定精度は $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ を目標とする。

2. 測定原理

測定原理を図1で説明する。基準線（P）は測定器のキャリッジが測定方向に移動する軌跡に相当するもので

図 1 測定原理

*原稿受付 昭和44年11月7日。昭和43年度精機学会春季大会学術講演会（昭和43年4月7日）にて発表。

**正 会 員 計量研究所（東京都板橋区加賀 1-10-4）

ある。また曲線(Q)は被測定物の測定面に相当するものである。いま、基準線(P)に接近した位置に直線Xを考え、曲線(Q)をXに対して対称の位置におきかえる。これを(Q')とする。したがって曲線(Q)と(Q')は同一形状の曲線である。直線XをX軸にとり、これと直角な方向にY軸をとる。

X軸上に $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ をとり、この点を通りX軸に直角な直線が基準線(P)と交わる点を $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ とし、曲線(Q)および(Q')と交わる点をそれぞれ $p'_1, p'_2, p'_3, \dots, p'_n$ および $(p''_1, p''_2, p''_3, \dots, p''_n)$ とする。また基準線(P)と曲線(Q)および(Q')との各点との距離を $m'_1, m'_2, m'_3, \dots, m'_n$ および $m''_1, m''_2, m''_3, \dots, m''_n$ とする。

いま、X軸上の任意の点 x_i に対応する p_i, p'_i および p''_i を座標 $(x_i, y_i), (x_i, y'_i)$ および $(x_i, -y'_i)$ で表わせば、 p_i と p'_i および p_i と p''_i との距離 m'_i および m''_i はY座標の差で表わすことができる。

$$y'_i - y_i = m'_i \quad (1)$$

$$y_i - (-y'_i) = m''_i \quad (2)$$

(1)および(2)式より

$$y'_i = (m'_i + m''_i) / 2 \quad (3)$$

$$y_i = (m''_i - m'_i) / 2 \quad (4)$$

がえられる。

(3)式は、 p_i と p'_i および p_i と p''_i との各点の距離 m'_i および m''_i を測定し、それらの和の1/2を求めれば、X軸に対する p'_i および p''_i の位置が定められることを表わしている。したがって、Xの各点について m' および m'' を測定すれば、X軸に対する曲線(Q)を決定するこ

とができる。

X軸に対して曲線の形状が決定すれば、JISの真直度の定義「理想直線からの狂いの大きさ」から、X軸を理想直線とし、曲線(Q)の両端の点 p'_1 および p'_n がX軸に重なるように座標変換すれば、真直度が求められる。

(4)式から同様に基準線(P)の形状も決定することができる。

このように、測定器のキャリッジの移動真直度が不明であっても、これを測定の基準線として、被測定物を基準線にほぼ平行においたときの基準線と測定面上との距離を測定する。つぎに被測定物を基準線にほぼ対称の位置におきかえたときの基準線と測定面上との距離を測定すれば、この2回の測定結果から、被測定物およびキャリッジの移動真直度を求めることができる。

3. 構造と測定方法

3.1 構造

この原理による真直度測定の基準線と被測定物の配置の方法はいくつか考えられるが、製作上および測定上の

図2 試作した真直度測定器

図3 測定器の概略図

図4 キャリッジと検出器

利点を考慮して、図2および図3に示す構造にした。図2は測定器の外観、図3は構造の概要である。測定器は本体と電気マイクロメータおよび記録計で構成されている。

本体はベット、測定台およびキャリッジから構成されている。前節の m' および m'' を測定するためにベットの両側に測定台がある。測定台はその中心を回転軸として水平面内で $\pm 2^\circ$ 回転し、キャリッジの移動方向と被測定物とを平行にするよう微動調整を行なうことができる。ベットの中央部の上面には移動案内すべり面がある。案内面的一方は平面で、他方は 90° のV山形である。またキャリッジを移動するための送りねじが中央にとりつけられ、その一端は自動送り用クラッチ付きシンクロモータが、他端には手動送り用ハンドルがとりつけられている。キャリッジの移動範囲は 520 mm で、自動送り速度は 60 mm/min である。

キャリッジは図4に示す構造で、X側およびY側に検出器がとりつけられている。検出器は上下、前後に 50 mm 移動し、前後方向は板ばねをかいして約 3 mm 微動できる。キャリッジと送りねじとの連結は、送りねじの曲りによる回転振れがキャリッジに伝わらない構造になっている。また連結器をはずせば簡単に手動送りに切りかえることができる。

電気マイクロメータはレバー型検出器で、X側およびY側の検出器がそれぞれ単独に作動する。比較測定あるいは円筒度の測定の場合は $(X+Y)$ の演算回路に切りかえられる。最高目量は $0.5 \mu\text{m}$ 、測定力は 30 g、測定子の先端直径は 2 mm である。

記録計は電位差計式自動平衡型を用い、電気マイクロメータの目量を $0.5 \mu\text{m}$ にし、記録計の電圧レンジを 25 mV にして使用した場合、記録紙上で $1 \mu\text{m}$ が 6 mm である。記録計の記録速度を 60 mm/min とした場合、

キャリッジの送り速度と等しくなる。

その他、被測定物の形状、大きさによって測定台上に被測定物を支持するためのセンタ支持台およびV支持台がある。

3.2 測定方法

まず、X側の測定台上に被測定物をセンタ支持台あるいはV支持台にとりつけ、検出器の上下移動レンドルによって水平横断面の最大位置を求める。水平横断面の位置でキャリッジの移動と円筒の母線との水平面内における平行度調整を手動で行なう。つぎに検出器のレバーを約 90° 曲げ、上下方向の測定ができるようにして、前後移動つまみによって円筒の垂直断面の上面における最大位置を求める。この位置でキャリッジの移動と円筒の母線との垂直面内における平行度調整を支持台の上下移動つまみによって行なう。この操作を 2~3 回くりかえし平行度を被測定物の両端において $1 \mu\text{m}$ 程度に調整する。同時に測定の基点を測定子の位置とキャリッジの指標で決める。これらの調整後、電気マイクロメータまたは記録計の零調整つまみによって、記録計のペンの位置を記録紙の適当な位置にする。自動測定スイッチを入れ、図1の m' 値を自動的に測定し記録する。

つぎに被測定物をY側測定台に移し、X側で測定した円筒の母線をふたたび測定できるように、測定位置および平行度調整を行ない m'' を測定する。X側の m' とY側の m'' の値の記録図の基点と終点とを基準直線で結び、その間を n 等分して基準直線と記録図との距離を測定する(図11参照)。X側とY側の対応する各点の測定値の和の $1/2$ を求めれば、被測定物の真直度曲線が求められる。また測定値の差の $1/2$ を求めれば、キャリッジの移動真直度曲線が求められる。

4. 誤差の原因の検討

4.1 キャリッジの移動真直度による誤差

図1の測定原理の説明においては、測定距離 m' および m'' はX軸に対して直角な方向の距離すなわちY軸方向に測定することになるが、キャリッジに検出器があるため、基準線(P)が曲っている場合には、基準線の接線と直角な方向の距離として測定される。したがって、基準線の水平面内の真直度によって誤差が生じる。

図5のように測定面(Q)が真直でX軸と平行かつ対称におかれ、キャリッジの移動真直度(P)によってキャリッジが角度 θ だけ傾いた場合を考える。測定距離 m'_i および m''_i はキャリッジが θ だけ傾いたために、 $m'_i \sec \theta$ および $m''_i \sec \theta$ になる。したがって、(3)式および(4)式に対応する式は、 $y'_i \epsilon_i = (m'_i + m''_i) \sec \theta / 2$ および $y \epsilon_i$

図 5 水平面内の移動真直度による誤差

$= (m'_i - m''_i) \sec \theta / 2$ となり、誤差はそれぞれつぎのようになる。

$$\Delta y_{1'i} = (m'_i + m''_i)(1 - \sec \theta) / 2 \quad (5)$$

$$\Delta y_{1i} = (m''_i - m'_i)(1 - \sec \theta) / 2 \quad (6)$$

いま、 $m'_i = 100 \text{ mm}$ 、 $m''_i = 250 \text{ mm}$ とし、キャリッジの傾き角度を 1 分とすれば、被測定物の真直度測定誤差 $\Delta y_{1'i} \approx 0.02 \mu\text{m}$ となる。キャリッジの移動真直度を 1 分程度に仕上げることは容易である。

また、キャリッジが θ だけ傾くことによって p_i および p'_i はそれぞれ X 軸方向に $x_i + \Delta x'_i$ および $x_i - \Delta x''_i$ ずれることになる。 θ を 1 分とし、 $m'_i = 100 \text{ mm}$ 、 $m''_i = 250 \text{ mm}$ とした場合、このずれの量は 0.1 mm 以下である。被測定物を他方の測定台に移しかえる場合の位置決め精度、記録紙の送りむら、および被測定物がなめらかな曲線をしているものとすれば、このために生じる誤差は小さい。また、キャリッジの移動真直度の測定誤差は測定距離の $(m''_i - m'_i) / 2$ であるからさらに小さい。

キャリッジの垂直面内の傾きによる誤差は、図 6 のように傾き角を θ' とすると、 p'_i は a' 点へ、 p''_i は a'' 点に移動し、測定距離 m'_i および m''_i が変化する。測定位置 a' および a'' から Y 軸に垂線を下し、その交点を b' および b'' とし、 $b'p'_i$ および $b''p''_i$ を h' および h'' とすれば、 m'_i および m''_i は $(m'_i + h') \sec \theta'$ 、 $(m''_i + h'') \sec \theta'$ となる。したがって Y 座標に対する誤差はつ

図 6 垂直面内の移動真直度による誤差

図 7 平行度の調整による誤差

ぎのようになる。

$$\Delta y_{2'i} = (m'_i + m''_i)(1 - \sec \theta') / 2 - (h' + h'') \sec \theta' / 2 \quad (7)$$

$$\Delta y_{2i} = (m''_i - m'_i)(1 - \sec \theta') / 2 - (h' + h'') \sec \theta' / 2 \quad (8)$$

h' および h'' は傾き角 θ' と m'_i および m''_i と被測定物の直径によって決まるものである。 θ' と m'_i および m''_i は測定器によって決まるもので、誤差は直径が小さくなるほど大きくなる。 θ' が 1 分程度であれば無視できるほど小さい。

4.2 被測定物の軸心とキャリッジの移動方向との平行度による誤差

図 7 のように被測定物の軸心とキャリッジの移動方向との平行度調整誤差あるいは被測定物の曲がり、自重によるたわみなどのために、軸断面上を測定子がトレースしないために、つぎのような誤差が生じる。

被測定物の半径を r 、測定子が軸断面より t だけ上下に変化した場合、誤差 Δh は

$$\Delta h \approx t^2 / 2r \quad (9)$$

である。

いま、直径を 20 mm とし、誤差を $0.1 \mu\text{m}$ におさえようとすると平行度調整は約 $45 \mu\text{m}$ 以下にすればよい。この程度の調整は容易である。また、被測定物の長さを 500 mm 、直径を 200 、 100 、 40 mm の円筒が両端支持の場合、自重によるたわみは、 0.1 、 0.5 、 $3.0 \mu\text{m}$ であるから、たわみによる真直度測定誤差は無視できる。

4.3 キャリッジの移動の安定性

キャリッジの移動真直度による誤差は前にのべたように小さいが、移動時の真直度の変動すなわち安定性が測定精度に影響する。これに関係するものは、送りねじの回転振れが連結器を通してキャリッジに与える影響、案内面の油膜の影響、温度変化によるベットの变形、および被測定物の重量によるベットの变形などが考えられる。これらについては、実験によって調べたので、つぎ

図 8 キャリッジの移動真直度

の精度の項についてのべる。

5. 精 度

5.1 キャリッジの移動精度

キャリッジの移動精度は、移動案内面に潤滑油を十分塗布し、キャリッジを全移動範囲にわたって手で数回移動したのち、キャリッジ上に反射鏡をのせ、20 mm 移動したときのオートコリメータの読みの変化を、水平面内と垂直面内について測定した。水平面内では約 2 秒、垂直面内では約 15 秒であった。

また、水平面内の移動真直度は、測定原理でのべた(4)式によって求めることができる。直径 70φ、長さ 550mm のテストバーの母線真直度を測定したときのデータから、キャリッジの移動真直度曲線を求めた結果を図 8 の(a)に示す。真直度は 1 μm であった。また、この測定結果をさらに確かめるため、直径 200 φ のオプティカルフラット (平面度 1/4 λ) を基準として 200 mm ごとに、キャリッジの移動真直度を測定した結果と、図 8 の(a)の真直度と比較した結果 0.2 μm 以内で一致していた。

図 8 の(b)はテストバーを用い、キャリッジの X 側および Y 側の垂直面内の移動真直度を示す。X 側および Y 側の真直度が異なっているのは、水平面内の真直度は主としてベットの V 山形案内面によって規制されるが、垂直面内の真直度は V 山形および平面案内面の両者によって規制されるためである。

5.2 送りねじの回転振れなどの影響

送りねじの回転振れ、案内面の仕上げ面および油膜の影響などが、キャリッジの移動精度にどの程度影響するかを調べた。その方法は、直径 200 mm のオプティカルフラットを円筒の母線真直度を測定するときと同様に測定記録した。その結果を図 9 に示す。(a)は潤滑油を案内面に塗布し、全移動範囲にわたって数回作動したのち、測定記録したものである。(b)は潤滑油を拭きとり、わずかに油が残っている状態のときの記録である。また、(c)はベンジンで油を完全に拭きとったときの記録であ

図 9 キャリッジの移動精度

る。(a)では送りねじの回転振れ、仕上げ面などの影響はまったく見られない。(b)では回転振れの影響が仕上げ面の影響からは区別できないが 0.1 μm 以下の変動がみられる。(c)は回転振れの影響よりも、キャリッジのスティックスリップ現象が検出器に伝わり記録されたものと考えられる。振幅は 1~1.5 μm である。したがって、(a)の状件のもとで測定すれば回転振れ、仕上げ面の影響は無視できる。

5.3 ベットの変形による誤差

被測定物の重量により、被測定物を X 側測定台においた場合と Y 側測定台においた場合とでベットの変形が異なり、キャリッジの移動真直度が変化する。この変化は真直測定に誤差を与える。

この変形による誤差を調べるためにつぎのような測定を行なって被測定物の重量によるベットの変形のための測定誤差を求めた。

重量 10 kg、70 φ×550 mm の中空のテストバーを測定して求めた真直度曲線と、重量 75 kg、200 φ×800 mm の中空リブ付円筒スコヤをテストバーと反対側の測定台上に 2 点支持で置き、測定して求めたテストバーの真直度曲線との変化およびキャリッジの移動真直度曲線の変化を求めた。テストバーの真直度曲線の変化している点は最大 0.2 μm、キャリッジの移動真直度曲線では最大 0.1 μm であった。このように、重量が 100 kg 以上の被測定物の場合には、ベットの変形の影響が測定精度におよぼすことがわかった。

5.4 温度変化による移動真直度の変化

温度変化の原因は室温の変化、測定者の体温の影響、モータの発熱などが考えられる。室温および体温の影響による測定中の測定器の温度変化は 0.2°C 以下で測定精度にほとんど影響しない。モータの発熱は、モータの容量が小さかったため、連続運転した場合、ベットのモータ取付部の温度上昇が大きかった。モータの取付部に近いベットの平面案内面と V 山形案内面の側壁にサーミスタ温度計をとりつけ、キャリッジを約 1 時間 30 分往復自動送りさせたときの温度変化は平面案内面で、1.5°C、V 山形案内面で 2.3°C 上昇した。温度変化中、テストバ

図 10 モータの発熱による移動真直度の変化

一によりベットの變形すなわちキャリッジの移動真直度の変化を求めたものを図 10 に示す。平面側より V 側の温度上昇が大きいのは、モータの電磁クラッチが V 側壁にとりつけられているためである。図 10 でモータ側すなわち熱源を原点にしているため、原点から 100 mm まで変化率が大きくなっている。モータの容量を大きくすれば、温度上昇はかなり減少させることができる。

5.5 測定精度

前述のようにキャリッジの移動真直度、平行度調整誤差および移動真直度の安定性による誤差は $0.1 \mu\text{m}$ である。測定中の温度変化による誤差は、一つの母線真直度を測定するに要する時間は約 15 分で、モータによる自動送りは測定時のみであることから考えれば図 10 の移動真直度の変化曲線の最低線以下であるから、測定誤差としては $0.1 \mu\text{m}$ 程度と考えられる。電気マイクロメータおよび記録計を含めた誤差は $0.2 \mu\text{m}$ である。被測定物の重量が 100 kg 程度ではキャリッジの移動真直度の変化は $0.1 \mu\text{m}$ である。また二つの測定記録図から真直度曲線を求める場合の操作による誤差は、被測定物の形状精度および被測定物を移動させるときの X 軸方向のずれの量などによって異なるが、図 11 に示す程度の真直度であれば $0.2 \mu\text{m}$ とすることは十分可能である。

以上の各項目の誤差から測定精度を求めると約 $0.3 \mu\text{m}$ である。

実際に、 $70 \phi \times 550 \text{ mm}$ のテストバーの 3 個所の軸断面の 6 母線の真直度測定の結果から、キャリッジの移動真直度 (図 8 参照) のばらつきは最大 $0.3 \mu\text{m}$ 、各点のばらつきの平均値は $0.15 \mu\text{m}$ であった。

以上の結果からも、この測定器で $0.3 \mu\text{m}$ の測定精度で測定することが十分可能である。

6. 測定例

図 11 は $70 \phi \times 550 \text{ mm}$ のラップ仕上げのテストバーの両端 25 mm を除いた母線の真直度を測定した例である。支持方法は V 形支持台でたわみが最小となる点で支持した。図の (a) で X 側および Y 側における測定記録図で、

図 11 テストバーの線真直度

(b) は X 側および Y 側の記録図より 20 mm ごとに求めた真直度曲線である。両端に近い個所で高く、中央部がへこんでいるのは、このテストバーが中空で、両端が圧入によるめくらふたされた構造のものであるから、加工ひずみあるいは経年変化 (製作時より数年経ている) によるものと考えられる。

7. 結 言

真直測定器を試作し、その構造および性能について検討した結果、つぎのことがわかった。

1) この測定器のような測定原理および構造を用いれば、工作精度による測定誤差はきわめて小さく、しかも真直の基準をもつことなく高精度で、測定範囲の長い真直度測定が可能である。

2) キャリッジの移動真直度が、被測定物の真直度を測定すると同時に求められるので、測定精度のチェックができる。またキャリッジの移動真直度を正確に求めておけば、キャリッジの移動真直度を補正することにより、1 回の測定で真直度を求めることができる。

3) 円筒の母線、軸心の真直度測定のほか、簡単な装置を用いれば、内面の母線真直度測定が可能である。

終わりに、この測定器の試作にあたり、種々ご指導をいただいた株式会社東京精密の遠藤大海氏に深く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 海老原, 山本: 緊張せる鋼線を基準とするベット滑り面の真直度測定について, 日本機械学会誌, 7, 27 (1941) 1-33.
- 2) 海老原, 山本, 和田: 直定規または線定規を基準とするベット滑り面の真直度測定について, 日本機械学会誌, 8, 31 (1942) IV-159.