標準尺自動測定装置の試作*

—2 m 標準尺測定用レーザ干渉計(第1報)—

清 野 昭 一** 桜 井 好 正** 阿 部 佳 夫***

A New Automatic Interferometer for the Calibration of Standard Scales

—A Laser Interferometer for the Measurement of Line Standards
up to 2m (1st Report)—

Shoichi SEINO, Yoshimasa SAKURAI, Yoshio ABE

The paper describes an automatic laser interferometer for the calibration of line standards up to 2 m which is developed in National Research Laboratory of Metrology. The principles of construction, the performance of the apparatus and the errors arised from the apparatus are given. The errors caused by the misalignments of the optical systems, by the mechanical deformation of the base member and by fluctuation of translation speed of the carriage are estimated. Experiments have shown the errors are less than $0.2 \mu\text{m}$.

1. は じ め に

標準尺はただ1本のものさしで数多くの寸法を精度高く現示することのできる長さの標準器として古くから用いられてきた。近時その製作方法の進歩により精度の高いものが多量に供給されるようになってきたので、目盛寸法の校正に用いられる測定器も単に精度が高いだけでなく、能率よく測定しうる能力が要求されるようになってきた。

標準尺の目盛寸法を光波干渉を応用して干渉じま計数方式と光電顕微鏡を用いて測定する方法はすでにいくつか開発されているが^{1)~5)}、スペクトル光源に波長安定化レーザを用いると干渉距離の制限がなくなり、干渉じま信号の S/N 比が従来の同位元素光源に比較するとはるかによくなるので測定能率が飛躍的に向上することが期待される。ここに述べられているものは新たに試作された2 mまでの標準尺を自動的に測定することのできるレーザ干渉計で、その測定原理、構造機能、装置の精度などについて述べられている。

2. 測 定 原 理

2.1 装置の光学系

主要光学系は図1に示すとおり干渉じま計数

* 原稿受付 昭和49年4月22日。昭和44年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和44年10月11日)および昭和47年度精機学会春季大会学術講演会(昭和47年4月6日)にて発表。

** 正 会 員 計量研究所(東京都板橋区加賀1-10-4)

*** 市川電機(株)(小平市小川東町1877)

方式の2光束コーナキューブ干渉計である。He-Ne波長安定化レーザ A からの光は偏光板 P_0 、反射鏡を経て集光レンズ B によりピンホール C に集光され、その後コリメータレンズ D を通って平行光束となる。この平行光束は反射鏡 F からビームスプリッタ G に入り、ここで光は2分され、1つの光は標準尺 S の保持台上に固定されたコーナキューブプリズム K に、他の光は移動台 L 上のコーナキューブプリズム J に入射する。通常の干渉計では2つのコーナキューブプリズムのそれぞれの稜が光路差ゼロにおいて光学的に重なり合うように調整するが、ここでは1つのコーナキューブプリズムをこの位置から光軸に関して 60° 回転して固定してある。コーナキューブプリズムの下方の稜または稜の像に対し光束が対称に2分されるように入射させると、反射光は図2に示すようにコーナポイントに対して点对称に反射される。J および K で反射した光は入射光と平行にビームスプリッタにもどり、再び1つに合わされて干渉する。この際コーナキューブの内面における全反射に基づく偏光特性などの影響⁶⁾を受けて干渉光束の右半分と左半分とは干

図1 装置の光学系

図2 コーナキューブプリズムの配置

図3 データ処理装置

渉光の周期変化に位相差を生じているが、 P_0 を回して入射光束の偏光面をある角度に設定してこの位相差が $\pi/2$ になるようにしておく。それぞれの干渉光は光電子増倍管 O_1 および O_2 に入射する。

目盛面が垂直になるように台上の2点で支持されている標準尺Sは照明光源U、オプティカルファイバT、照明光学系Rなどによって目盛線が照明され、その像はリレーレンズ Q_1 および Q_2 ならびに対物レンズObなどにより約10倍に拡大されてSIの位置に結ばれる。SIは目盛線の像に合わせて幅を変えることのできるスリットで、その背後には光電子増倍管 O_3 があるので移動台Lの移動により目盛像が次々とスリット上を通過するたびに O_3 から三角波状の出力を生ずる。これらの光学系のうちR、Pおよび Q_1 は移動台上に固定され、 Q_2 、Ob、SIおよび O_3 は干渉計のベッド上に固定されている。目盛線の照明はケーラー方式が用いられている。

また目盛線の検出部（反射鏡Pおよびレンズ Q_1 ）と移動鏡Jのコーナポイントとは、Abbeの条件と同様な効果をもつEppensteinの条件を満足するように配置されている。

O_1 および O_2 からの干渉じま信号と O_3 からの目盛線信号はデータ処理装置に導かれ、必要なデータがせん孔紙テープに記録され電子計算機にかけられて最終的に目盛誤差と誤差曲線が表示される。

Vは空気屈折率の変化による補正を行うためのフィゾータイプの真空干渉計である。

2.2 データ処理装置

移動台を連続的に走行させる間に標準尺の各目盛誤差（ゼロ目盛からの累積誤差）を干渉じまのパルス数で表示記録させるデータ処理の方法は従来の方法⁷⁾を発展させたものである。装置のブロックダイアグラムを図3に示す。図1の O_3 からの目盛線信号はフィルタによって高い周波数成分を含むノイズを取除きパルス発生回路に加えられる。この回路では目盛線信号のピークにおいて

表1 波長と単位パルス数

標準状態の波長	0.632 819 73 μm
標準状態におけるフリンジパルス数	25 283.662/mm
上の数をまるめた数	25 284/mm
まるめによる補正率	$+13.37 \times 10^{-6}$

パルスを発生するようになっている。

図1の O_1 および O_2 からの2つの干渉じま信号は 90° の位相差をもち同一振幅のものが得られるように調整しておく。2つの信号の極性を反転したものを作ると 90° の位相差をもつ4つの信号が得られ、さらにそれらを合成することによって 45° の位相差をもつ8つの信号が得られる。これらを波形成形回路によりパルス成形すると、移動鏡の半波長に相当する定速度の移動に対して8個のパルスが等間隔に発生することになる。すなわちこの干渉計の分解能は $\lambda/16$ (約0.039 6 μm)である。

ゲートIは標準尺の最初の日盛信号のパルスで開かれ手動でリセットしない限り、次からの目盛線信号はゲートIを通過する。最初の日盛パルスでゲートIIも開くようになっており、干渉じまパルスは25284進カウンタに導入される。25284という数は表1に示すようにほぼ1mmに相当する干渉じまパルス数であるから、移動鏡の走行に伴いほぼ1mm間隔ごとにパルス（仮に基準パルスと名付ける）を発生する。そこで基準パルスと目盛パルスとの時間的な前後関係から目盛誤差の正負を、また両パルスの間に数えた干渉じまパルスの数から目盛誤差の絶対値に相当するカウント数を表示記録させるのである。

1mmのパルス数をまるめて整数にしたための誤差 13.37×10^{-6} (表1)は測定終了後、他の誤差（標準尺の温度、干渉計内の空気屈折率などが標準状態と異なるための誤差）とともに補正される。

ゲートIIIは先行パルスで開き次のパルスで閉じ、その間だけ干渉じまパルスを通過する動作をするが、基準パルスが出る位置の前後1000パルス ($\pm 39.6 \mu\text{m}$)の間だけ動作する予備ゲートがあり、これが閉じている間はた

図4 試作された装置

とえパルスが加えられてもゲートⅢが開かないようになっている。これは目盛面の傷やゴミなどの偽の目盛信号によってゲートⅢが誤動作しないためのものである。*目盛誤差に相当するカウント数は計数管によって表示されると同時に紙テープにせん孔記録される。測定速度は紙テープせん孔機の能力で制限されるが、現在のところ最高 200 mm/min である。

3. 装置の構造

図4は試作された装置を示す。3つの脚で支えられたベッドは全長 2.9 m, 高さ 550 mm, 幅 320 mm の铸铁製重量約 1000 kg のものである。鎖線の部分は厚さ約 100 mm の断熱槽で調整の際は上半分の部分を去除することができる。レーザ光源、照明光源、および駆動変速装置は断熱槽の外部に取付けられており、それぞれ断熱槽にけられた穴を通して内部に導入される。

移動台には8個のローラがとりつけられていて案内面上を滑動するが、その駆動はステンレススチールのエンドレステープで引張る方式を採用した。テープを張ったブリーは外部の多段変速駆動装置からの駆動軸を介して駆動される。移動台の速度は、10, 15, 20, 30, 100, 150, 200, 300 mm/min のいずれかを選択できるようになっている。

被測定標準尺の支持台は上下および前後方向にマイク

ロモータ駆動により微動できる構造となっており、光電顕微鏡の接眼鏡で目盛線を観測しながら標準尺の姿勢を調整することができる。

目盛照明用光源と多段変速駆動装置とを除き装置全体は簡単な構造の防振台の上に置かれている。

4. 測定装置における問題点

本装置による標準尺測定の際の誤差は、光源、装置、測定環境および被測定物などに起因するものに大別することができる。本報では主として装置自体における問題点と精度について検討し、他の問題については次報にゆずることとする。

4.1 入射光線方向の調整

移動鏡の移動方向と移動鏡への光の入射方向が平行でないと誤差を生ずる。測定する長さを L , 移動方向と入射方向とのなす角を θ とすると誤差は $L\theta^2/2$ となる。この調整は図1のIとJの間に細線で張った十字線を固定し、それに入射するレーザ光束による回折パターンをLの台上においたスクリーンに投影して行った。すなわちLをIに近いところで固定して十字状の回折パタンの中心線とスクリーンの十字線を合わせ、そのままLをIに対して最も遠い位置に固定したときのスクリーンの十字線と回折パタンの中心線とのズレの量が、ある限界値以下になるように入射光の方向を調整するのである。誤差を 1 m で $0.01 \mu\text{m}$ より小さくするためには θ を 28 秒より小さくする必要があるから 2 m の場合のズレの量は 0.28 mm 以下となり上の方法で十分に調整が可能である。

4.2 Eppenstein 条件の調整

すでに述べたようにこの装置においては測ろうとする目盛間隔とコーナキューブリズムの移動距離を正確に関連させるために Eppenstein の原理を用いている。図1において目盛線位置 s' はレンズ Q_1 , 反射鏡 R を通して O_s の方向から無限遠に調整された望遠鏡で観測される。したがって s' はレンズ Q_1 の焦点距離の位置にある。この光軸を延長した線上に $s'J$ の長さが Q_1 の焦点距離に等しくなるように J を定め、コーナキューブリズムのコーナポイントと J が一致するように配置し、 Q_1 , R およびコーナキューブリズムを移動台上に一体

図5 変形を生じた移動台

図6 改良した移動台

に固定すれば移動台が多少回転運動しながら送られても誤差を生ずることはない。

調整の原理と方法についてはすでに報告されている²⁾ので詳述しないが、移動台を既知角度だけ傾けた状態で標準尺の特定の目盛の位置を干渉測定し、移動台の傾きを解いた状態で同様の測定を繰返し、両方の位置の読取値の差が限界値以下になるように、 Q_1 , S および J の位置を調整すればよい。最初に設計された移動台(図5)は機械的剛性が十分でなく、不規則に変形して調整の際の測定値の再現性がきわめて悪く、したがって実際に標準尺を測るときもEppensteinの条件を保持することが困難であると思われた。そこで移動するときに起こる移動台の変形がEppenstein条件に関係する光学系の相対変位に影響しないよう移動台の上部に丈夫なブラケットを設け、それに Q_1 , R などの目盛検出部と移動鏡をつり下げて固定する図6のような構造に改造した。その結果調整の再現性は著しく向上し、最初の移動台では調整のさいの測定値のばらつきが $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以上もあったのに対し、改良された移動台では $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 程度に減少した。

全送り範囲での移動台の回転変位は15秒程度であるが、これによる誤差が $0.02 \mu\text{m}$ 以下になるようにEppenstein条件の調整が行われた。

4.3 ベッドの変形による誤差

約10 kgの移動台が移動するとベッドの変形に伴い光学系も相対変位をして測定誤差を生ずるおそれがある。特に固定鏡の測定方向の変位はそのまま誤差となる。本装置の場合は固定コーナキューブと標準尺支持台とを同一ブロック上に配置し両者が同じ変位をする限り、測定方向の変位が誤差とならないような構造とした。しか

図7 標準尺の置き場所による差

し装置全体が複雑な変形を起こすと、測られる場所によって測定値が異なるおそれがあるので、同一の標準尺を場所を変えて測定しその影響をしらべてみた。すなわち500 mmの金属製標準尺を支持台の右端(ビームスプリッタに近い方)、中央および左端に固定し、それぞれの場合について5本の目盛線を測定した。図7はそれらの測定結果を示す。反復(標準尺のセッティング、光学系の調整などを日を変えてやり直す)2回の各測定値はそれぞれ繰返し4回の平均値で示してある。要因を反復(R: 2水準)、場所(A: 3水準)、目盛(B: 5水準)にとり分散分析を行ったところ反復、場所とも有意差を検出することができなかった。

4.4 移動台の速度変動の影響

4.4.1 速度変動に基づく誤差

本装置のように連続的に移動台を走行させながら目盛線を検出し目盛間隔を測定する場合、送り速度の変動が大きいと誤差を生ずることがある。目盛線信号は図4に示したように三角孤立波のかどを丸めたような形を示すが、受光器からの出力はノイズを含んでいるのでそのまま波形処理をして出力波形のピークを示すパルスを得ようとする、パルス位置が不安定となり誤差を生ずる。そこで高周波成分のノイズを除去するため簡単なCRフィルタを挿入するが、フィルタを通ったあとの波形のピーク位置は図8のように t_0 のおくれを生ずる。もし2つの目盛線を検出してその波形のピーク位置を目盛線の中心として目盛線間隔を求める場合、両者の目盛を通過するときの速度が等しければ問題はないが、 ΔV の速度の変動があれば $\Delta l = \Delta V t_0$ だけの誤差を生ずる。 Δl は次式によっても示すことができる⁷⁾。

$$\Delta l = k \cdot CRV \left(\frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta k}{k} \right) \quad (1)$$

ここで V は目盛線を通過する際の送り速度、 k は目盛線の性質によって定まる定数で入力信号がガウス曲線か正

図8 フィルタ前後の目盛線信号

弦曲線の1周期で近似させることができる場合は 0.95 ± 0.05 程度の値となる。 Δl を小さくするために CR の値を小さくするとフィルタとしての機能を満足しなくなるので、実験により最適の値を選択する必要がある。この装置の場合、送り速度とその変動に応じて Δl が $0.1 \mu\text{m}$ 以内になるような CR の値をいくつか決め、必要に応じて異なる値を選択できるようにした。

4.4.2 速度変動の実測と検討

移動台を移動させると干渉計受光器から正弦波状の信号が得られる。送り速度の変動と出力信号の周波数とが比例することに着目して図9の回路を用いて速度変動を実測した。図9の波形は速度変動の実測結果の一例である。このほかに干渉計の測定方向の水平振動が送り速度の変動に及ぼす影響をしらべるために、干渉計のベッドのほぼ中立面上に速度検出型の振動ピックアップを据え付けて振動を測定した。

送り速度が 30, 100, 150, 200 mm/min の場合の $f-v$ 変

換器と振動計の出力をデータレコーダに記録し、それらのデータから速度変動のパワースペクトル、振動速度のパワースペクトルおよび両者間のクロススペクトルを求めた。図10はその一例で(a)は100 mm/min の速度で移動台がほぼ中央を走行している場合の結果である。干渉

波形は 100 mm/min における移動速度変動

図9 速度変動と振動の記録

(a) 移動速度 100mm/min

(b) 移動速度 30mm/min

図10 振動と速度変動のパワースペクトルとクロススペクトル密度

計の振動速度のパワースペクトルは 4 Hz にピークがある。これは防振台の固有振動数に相当する。送り速度変動のパワースペクトルのいくつかのピークのうち 10 Hz 以下のものは移動台の位置いかんにかかわらずあまり変化は見られないが、11 Hz 以上の 3 つのピーク (L, M, R)

図 11 移動台の速度変動

は移動台の位置によって高さが変わる。移動台がベッドの右端（ビームスプリッタに近い方）近くを走行している場合は L のピークが、中央付近においては M のピークが、また左端近くでは R のピークが突出して他の 2 つのピークが低くなる。振動速度と速度変動のパワースペクトルを見くらべると 2 者は無関係のようであるが、実は強い相関があることがクロススペクトルから明らかである。以上の傾向は送り速度が 150, 200 mm/min の場合もほぼ同じであったが、30 mm/min の場合はかなり異なる傾向を示した。すなわち図 10 の (b) に示すとおり 4 Hz 以下の 3 つの周波数成分のパワーが 10 Hz 以上のものより大きく、移動台が左端に近づくにつれてそれらがますます強くなる傾向を示した。またクロススペクトルは振動速度の周波数成分のピークのみが見られる。

送り速度の変動の大きさは記録された速度変動の波形を A-D 変換しそれらのデータから計算された標準偏差 σ_V の値で評価した。図 11 は $3\sigma_V/V$ で表した速度変動率を移動台の位置ごとにプロットした結果を示す。30 mm/min の場合、変動率は移動台が右端から左端に動くことによって 23→15% と大きく変化するが、100 mm/min 以上の場合は 5→3% となりあまり変化しない。

移動台の速度変動の原因としては、i) 駆動系から伝達されるもの、ii) 外部振動に誘起されるもの、iii) 移動台とスチールテープが一つの振動系を構成するためのものなどが考えられる。i) については駆動系の最終段階の回転軸の回転変動と移動台の速度変動との間の相関をしらべれば明らかとなるわけであるが、1~10 rpm 程度の低い回転数における回転変動を検出する有効な手段を見いだせなかったため定量的な評価はできなかった。しかしながら中間段階の回転軸の回転ムラをロータリエンコーダを用いてオシロスコープで観測した限りでは図 11

表 2 速度変動による誤差

$V(\text{mm/min})$	$\Delta l(\mu\text{m})$	備 考
100	0.17	$\Delta V/V=0.05$
150	0.25	$CR=2 \text{ ms}$
200	0.33	$k \approx 1$
30	0.30	$\Delta V/V=0.2$ $CR=3 \text{ ms}$

に示したような大きな変動は見られなかった。したがって送り速度の変動は ii) と iii) に起因するもの大きいと思われる。

式 (1) に実測値を代入して移動台の速度変動による誤差を推測することができる。典型的な金属スケールの目盛線の場合について、効果的な CR の値、速度変動率などに実験値を代入し $k \approx 1$ として誤差を計算してみると表 2 のようになり、最大 0.3 μm 程度の誤差を生ずるおそれのあることがわかる。しかしこの表で用いた $\Delta V/V$ の値はすでに述べた $3\sigma_V/V$ の値であり、速度変動の大部分(約 95%)は $2\sigma_V/V$ 以下であるから誤差の約 95%は 0.2 μm 以下となる。また数回の測定値の平均値をとれば誤差はさらに少なくなることは明らかである。

5. 結 び

2 m までの標準尺の校正が可能なレーザ干渉計について、測定原理、構造・機能等を述べた。また装置自身の精度について検討した結果

- (1) 装置の光学的調整を綿密に行うことにより、入射光線方向の偏りや Eppenstein 条件からの外れなどによる誤差は 0.02 μm 以下とすることができた。
- (2) 移動台の移動や標準尺の置き場所などベッドの変形に基づく測定値のちがいについては有意差がなかった。
- (3) 移動台の速度変動に基づく誤差は目盛線の良否にもよるが、良い条件を選べば 0.1~0.2 μm の精度が得られる。

などのことが明らかになった。

おわりに本装置の設計製作を担当された日本光学工業株式会社の担当のかたがたに深く感謝する。また移動台の速度変動と装置の振動の波形記録と解析については計量研究所第 1 部白石堅司氏の手をわずらわせた。深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) K. M. Baird: Interference Comparator for the Calibration of Line Standards Directly in Terms of Standard Wavelengths, Rev. Sci. Instr., **32**, 549 (1961).

- 2) 桜井好正: 1 m までの標準尺を光の波長で測定する装置について, 精密機械, 25 (1959) 475 および 538.
- 3) P. E. Ciddor & C. F. Bruce: Design and Performance of the 1-metre Line-standard Interferometer at the National Standards Laboratory, Sydney, Metrologia, 3 (1967) 109.
- 4) 土井, 清水, 坪井, 河野: 標準尺の干渉校正装置, 計測と制御, 3 (1964) 875.
- 5) P. Carré: Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures, Metrologia, 2 (1966) 13.
- 6) E. R. Peck: Polarization Properties of Corner Reflectors and Cavities, J.O.S.A., 52 (1962) 253.
- 7) Y. Sakurai: An Automatic Recording Interferometer for the Calibration of Standard Scales, Ann. C.I.R.P., 16 (1968) 145.
- 8) 清野昭一: 標準尺測定の際の傾斜照明の影響, 精密機械, 35 (1969) 314.

表紙写真説明

レーザ線径測定機

アンリツのレーザ線径測定機は, 金属線, ガラス繊維, 高分子繊維などの極細な線径を製造工程中に測定, 管理するものです。

低出力 He-Ne ガスレーザを用いて, 走行中の被測定線をレーザスポットで走査しながら, 線の両縁を検出すると同時に, 従来になく新しい方式で信号処理を行いますので, 線径を精密に測定できます。

測定値は4桁のデジタルパネルメータに数字表示します。また, アナログの偏差出力およびデジタル出力が取出せますので, 線引き装置などの制御や, 記録計を併用して連続的に記録, 観測することができます。

主な用途例

- ガラスファイバ, 電線などの線径測定
- パネ用丸線の真円度測定
- 微小変位および 100 Hz 以下の振動測定

特 長

- アンリツ独自の特殊原理で線径を測定しますので, 金属線, ガラス繊維, 高分子繊維など, 材質に関係なく測定できます。また, 線の透明度にも影響されません。
- 非接触測定ですので, 走行線に測定圧を加えることなく連続測定ができます。しかも測定精度は $\pm 0.5\%$ 以下です。
- 光学系の交換により, 測定範囲を 10~50 μm , 50~500 μm , 500~5000 μm と広範囲に選ぶことができます。
- 走行線の振動による影響がほとんどありません。また, レーザ光線の走査振幅, および光量の変化量を常に監視, 制御していますので, 長時間使用しても安定した測定ができます。
- 走行線の横移動が測定範囲を超える場合には, 線の材質, 強度に応じたガイドを設けることができます。

仕 様

測 定 範 囲	10~50 μm (ただし光学系交換により 5000 μm まで可能)
測 定 感 度	0.1% 以下
測 定 確 度	総合安定度 0.5%/day 以下
測 定 周 期	2 ms
測 定 方 向	互いに垂直な X・Y 二方向, 同時測定 (ただし一方方向測定も可)
レーザ光源	He-Ne ガスレーザ約 1 mW
測 定 出 力	X・Y・X/Y アナログ偏差出力およびデジタル出力
使用温度範囲	0~40°C
電 源	AC 100 V ± 10 V, 50/60 Hz
消費電力	100 W 以下

本 社 電話(03) 446-1111
 札幌支店 電話(011) 231-6228
 仙台支店 電話(0222) 22-5427
 名古屋支店 電話(052) 582-7281
 大阪支店 電話(06) 372-0521
 福岡支店 電話(092) 761-5347
 厚木事業所 電話(0462) 23-1111

〒106 東京都港区南麻布 4-12-20
 〒060 札幌市中央区南大通り西 5 (昭和ビル)
 〒980 仙台市一番町 2-3-20 (第3日本オフィスビル)
 〒450 名古屋市中村区広小路西通3-19 (新名古屋ビル南館)
 〒531 大阪市大淀区中津本通 1-2 (ホーコビル)
 〒810 福岡市中央区天神 1-12-14 (渡辺ビル)
 〒243 神奈川県厚木市恩名 1800