

光 学 的 長 さ の 測 定

中 村 常 郎*

序

光学とはほとんど完成された、やや古典的な学問と考えられている。特に機械量の計測には、光弾性に用いる偏光とか表面検査に用いる光波干渉のほかは、幾何光学を利用する場合が多く、よく知られた光学をいかに利用するかが問題であった。

たとえば、工作機械に組み込まれたスケールの読み取り、長さの測定に利用される光学でこ、あるいは角度測定用のオートコリメータなどである。

しかし、光学素子の進歩、機械計測の高精度や自動化の要求から、幾何光学の分野を越え従来少なかった物理光学の分野までを、機械計測が利用するようになった。さらに光電管を仲立ちとして、光を電気量に変え、エレクトロニクス技術が広く利用されて来た。

光学素子の進歩としては、イメージパイプ・光学格子・光電顕微鏡・干渉じま計数装置・高速度写真あるいは赤外線検出器などがあげられる。また、マイクロウェーブの理論が延長されて発見された新光源レーザ、情報理論と電子計算機の能力によって新しい像形成の理論や、レンズ設計法が生れて来つつある。

古典的と考えられた光学も最近とみに活況を呈して来たが、これらすべてがここに利用されるわけではない。最近利用されて来たもの⁽¹⁾を中心として、精密測定で重要な長さの測定とスケール目盛の光学的方法を概説する。

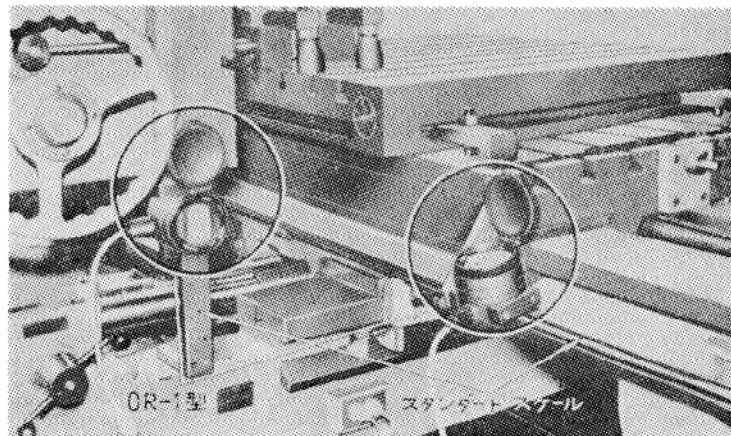


図 1 (a)

1. 長さの測定

1.1 スケールによる測定

われわれが長さを(比較)測定する場合、工業的には長さの標準として、スケールかブロックゲージを用いる。そこで先ず一番用いられるスケール(線度器)標準による測定をのべる。そのためにぜひ必要な目盛の読み取り装置をのべる。

1.1.1 目盛りの読み取り

従来は顕微鏡対物で拡大して測微接眼で測定するか、あるいはスクリーン上に拡大投影して測定するかであったが、最近では光電的に高精度に測定する方法が発展してきた。

顕微鏡の接眼部にねじの拡大機構(マイクロメータ)を付し、これで接眼目盛を動かす測微顕微鏡(Micrometer Microscope)では、その目盛の読み取り精度は、対物レンズの歪曲収差とねじ部の精度によることは勿論、更に対物レンズで拡大され目盛線と接眼目盛との一致精度が重要である。

両目盛線の一致を肉眼で行うために種々の形式があり、これは顕微鏡形式だけでなく投影式のものもある。実際には対物レンズの倍率は $\times 10$ 以下を普通とし、従って眼による目盛の読み取りに 1μ より高い精度をのぞむことは、どの形式をとっても困難である。

1.1.2 位置定め投影装置

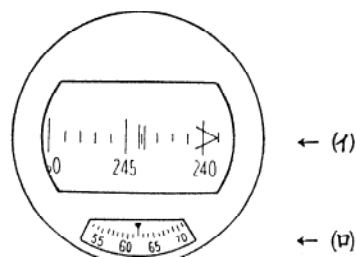


図 1 (b)

* 職業訓練大学校

ここでは主に工作機械等の位置決め使用する投影式のものをのべる。

光学的な位置決めは、摩耗により精度さを欠くネジ式や、高精度であるが手間のかかるバーゲージ、スリップゲージ式に比してすぐれている。さらに投影光学式は、測微接眼法に比して疲れも少なく、また測定に際し特定の場所に眼を移す必要がない。

(a) Optical Scale Reader

工作機械のスケールの読取り精度を上げるため、後から取付けられるスケールリーダが良く用いられている。

横中ぐり盤への取付例を図1(a)に、読取りスクリーンの状態を図(b)に示す。ロレット環の内側溝がカムになっており、環の上面についている透明硝子には副尺の円周目盛(1) (1目盛=0.01 mm) がしるされ、環の1回転弱が100目盛すなわち1 mmに当る。中央の二重標線を印したピントガラス(4)の一端(ローラー)はバネで常に、図(b)でいえば左方向にカム溝に押しつけられている。いま図(b)でロレット環を回してカム溝により、スクリーン(4)上の二重標線を左右に移動しこれに投影されたスケール

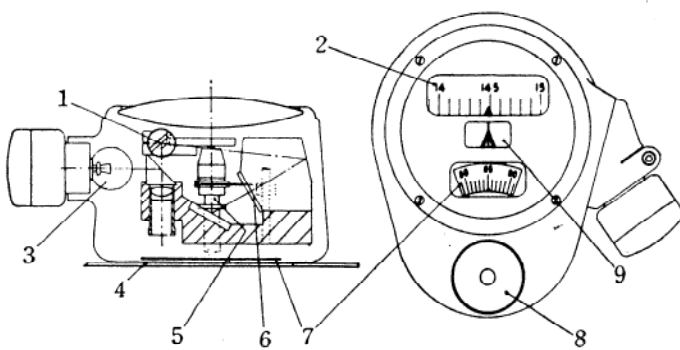
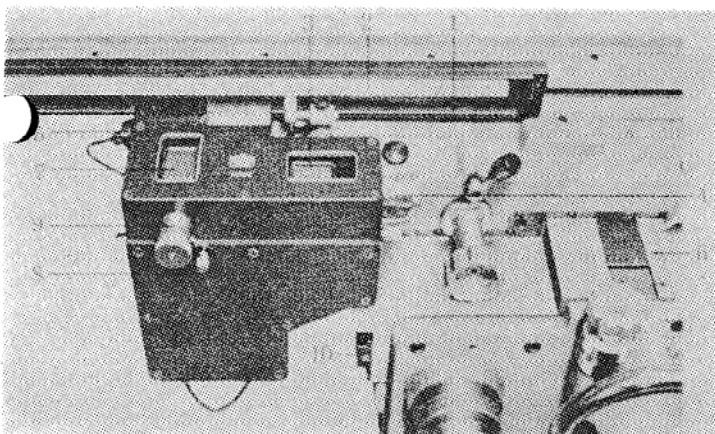


図 2



- | | |
|------------------------|-----------------------|
| 1: テーブル左右動き用標準尺 | 2: テーブル左右動き用参照尺 |
| 3: 投影面拡大鏡 | 4: マイクロメータヘッド (左右動き用) |
| 5: 光源ランプ | 6: テーブル前後動き用参照尺 |
| 7: 投影面拡大鏡 (前後動き用) | 8: 零点調整用ノブ |
| 9: マイクロメータ・ヘッド (前後動き用) | 10: テーブル前後動き用標準尺 |

図 3

の目盛の1本を正しく二重標線の中央にはさむ。このとき副尺(1)の回転量は目分量で2~5μを読むことができ、結局1 mm単位は投影スケールで1/100 mmは副尺でそれ以下を目分量で読みとる。光源でスケールは5倍に拡大投影され、スクリーンの大きさ80 mmφである。

これに似た Hilger 社の Scale Reader は Microptic と呼ばれ、その内部構造と目盛を図2に示す。図の右で目盛の一番上(2)にはスケールの2倍の拡大像、中間(9)にスケール目盛線の1本の拡大像、下方(7)に精密にセットしたオプティカルマイクロメータのスケールが見られる。このスケールは精密なネジで動かされるオプティカルマイクロメータに直接連絡し、1目は0.001 inである。

(b) 精密スケールと投影装置

工作機械に、スケールと目盛り読取り投影装置とを一体として取付けた二例を示す。

堅フライス盤にとりつけられている投影式精密位置決め装置の概観を図3に、その光学系を図4に示す。テーブルの左右と前後の動きを読取る投影系が一つの装置内にまとめられている。スケールの1目は1 mm、副尺は1目0.1 mmでマイクロメータで0.001 mmまで読

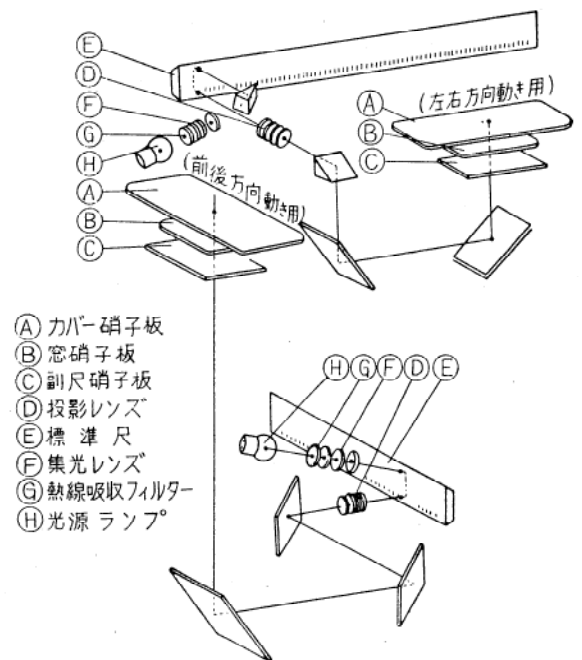


図 4

取り、マイクロメータの1回転は0.1 mmである。スケールは15倍に拡大投影される。これによって堅フライスの位置決め精度が向上し、治具中ぐり盤としても使用されるようになった。

また三井精機製の光学式精密治具中ぐり盤もこれがついている。

作業テーブルの前後左右の動きは、基準尺の光学式寸法投影装置により、作業者の前の投影スクリ

ンに拡大される。スクリーンには mm から μ 単位の数値が同時に示され、寸法の読取りは容易である。

1.1.3 光電顕微鏡

スケールの目盛位置を精確に知るため、最近光電顕微鏡が使用される。これは読取り精度の向上、測定迅速化また遠隔測定が可能となり、測定者の個人差にも影響されない。

一般顕微鏡では、対物レンズで拡大した目盛線みぞの像を肉眼で接眼部の十字線に合わせる。光電顕微鏡では目盛線みぞの像を、スリット（接眼相当部）に合わせ透過光量を光電管で測定する。

スリットから出る光量の最小（あるいは最大）位置を知ればよいはずであるが、一般に線みぞとその周囲のコントラストが悪く静的に測定することは困難である。そこで、この線像をスリットより手前におかれた振動鏡で揺動する。この揺動による光量変化を光電管で検出し、線像の平均位置とスリットの中心とを合わせる。これによる目盛位置の読取り精度は条件が良いと百分の数 μ 、なお肉眼による測微顕微鏡の精度はほぼ 1μ である。

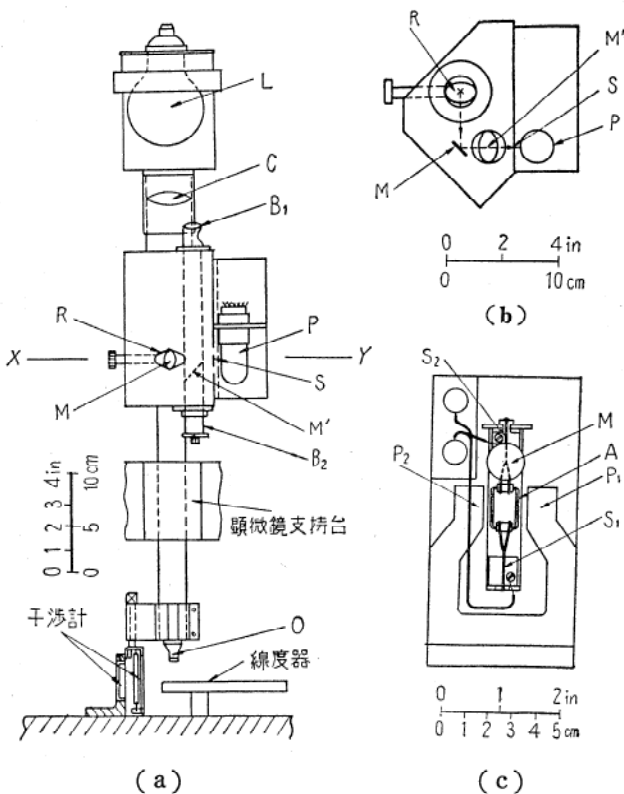


図5 N.P.L. 光電顕微鏡

図5に一例としてN.P.L.式光電顕微鏡を示す。顕微鏡の上端に光源Lを固定する。Cは集光レンズ、Oは対物レンズでスケール（線度器）に光を送る。スケール面からの反射光はOを通り半透明鏡R（図(a), (b)）で曲げられ、振動鏡MをへてスリットS、さらに光電子増倍管Pに達する。線みぞの像とスリットSは平行に調整する。

スケール（研磨面）からの反射光は、対物レンズOをへてスリットに達するが、線みぞで散乱した光はほとんどOにはいらず、したがって線みぞの像は明るい視野に黒く表われる。振動鏡Mは図(c)のガルバの可動コイルS₂に支持され90c/sで振動する。だいたいの目盛位置とピントを見るため、鏡筒B₂に補助の接眼レンズB₁とそう入自在の反射鏡M'がついている。また、特にこの装置の精度をしらべる目的で、測定台と顕微鏡の下にオプチカルフラットをつけ、(Fizeauの)干渉計を構成している。

光学系をへて揺動するスケールの線像の平均位置がスリットに対し対称であれば、光電流は振動鏡Mの2倍の振動数で周期的に変わる。スリットに対し非対称であれば、光電流の周期変動には振動鏡の振動数と異なる成分が表われる。この異常成分がなければ出力のマイ・クロアンメータの読みがゼロ、異常成分があればこの量に比例した出力がメータで読めるようにする。

この装置をじゅうぶん注意して用いると0.05uの精度が保てるという。

1.2 モアレ縞による測定

1.2.1 モアレ縞

モアレ縞とは、図6(a)のような明暗（あるいは透明・

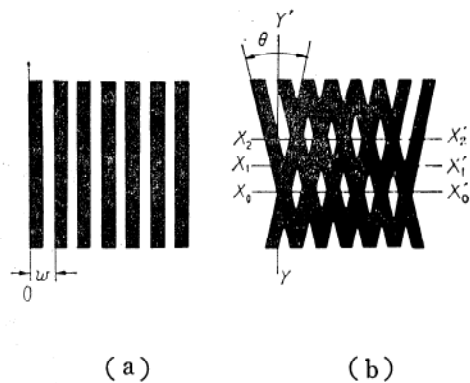


図6 モアレじま

不透明)の等間隔の直線格子(ピッチw)を図(b)のように2枚を小さな角 θ 傾けて重ねると、 θ の二等分線(Y-Y')に直角方向の X_1X_1' 部は光をまったく透過せず、 X_0X_0' と X_2X_2' 部は光を透過する。したがって明暗の等間隔のしま(Y方向)を作り、これをモアレじま(木目しま, moire-fringe)と言い、イギリスのN.P.Lで大いに研究開発され、わが国では機械試験所で治具中ぐり盤の数値制御に関連し基礎的な研究が行なわれた。図(b)でしまの間隔をdとすれば

$$d = w / \theta$$

したがって θ の小さいほど d/w の比は大となり、大きな拡大率をうる。またwが小さいほどdも小となるが、

あまり w の小さいものは、いわゆる回折格子で光の回折現象をおこす。精確な格子の製作は容易でないが、最近光波の干渉じまを利用する方法が示されている。

モアレじまの有利な点は、両格子 X 方向の相対移動に伴い Y 方向に拡大された明暗の（しま）移動が生ずる。すなわち、格子の X 方向 1 ピッチ (w) の移動が Y

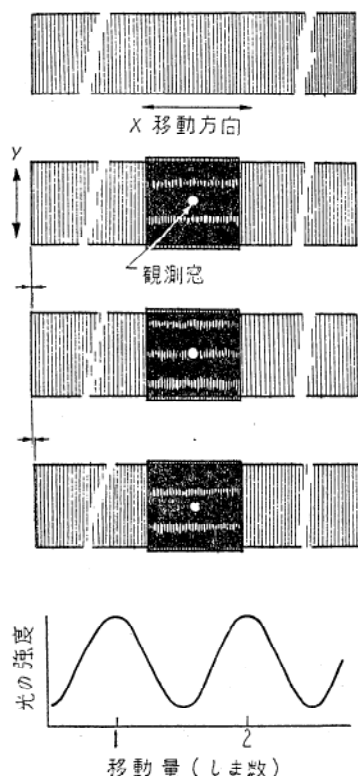


図7 モアレじまの利用

方向 1 しま (w/θ) の移動を生じ、図7のように一点に光電池（観測窓）をおけば、この点を Y 方向に通過する明暗のしま数を精密に測定することができる。 Y 方向のしまは、ほぼ正弦的な光量分布をしている。

この方法は光波干渉に比べて測定光学系が楽であり、振動の影響もなく、工場現場で使うことができ感度も任意に選ぶ。

1.2.2 モアレじまによる変位の測定

モアレじまによって治具中ぐり盤の定位を行なった機械試験所の方法は有名である。ここでは3組の直線格子を用いた変位の測定法をのべる。だいたいの装置を図8に示す。

図の左に一定速度で回転する基準の円筒格子、右に固定格子と変位の測定を必要とする移動格子がある。円筒格子の像は下方から照明され右方に反射し、レンズ系をへて半透明プリズムで二分され、他の2個の格子上に結像する。かくて生じた2個のモアレじまはそれぞれのスリットを通り、フォトトランジスタ F_R , F_M で検出さ

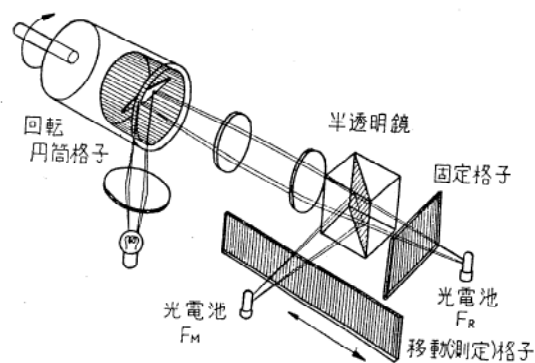


図8 3格子による変位の測定

れる。

回転格子と固定格子による光電流 F_R と、回転格子と移動格子による光電流 F_M は、振幅よりも相対的な位相が問題となる。両パルスの位相差が 2π かわるごとに、方向（正負）を含めて ± 1 に計数され、 2π に達せぬ端数はメータでよみとる。この計数値から移動格子の変位が測定される。

2個のモアレじまの相対変位を利用するため、1個のモアレじまによる方法に比べ、あらい間隔の格子で容易に精密な測定ができる。プリントされた格子は1インチ75本で、その間隔の約 $1/20$ が測定可能である。

1.3 光波長による測定

メートル原器に代わって、長さの標準に $Kr86$ の光波長が使われることからわかるように、精密な長さを測る場合光波干渉は重要である。光波干渉を利用すれば、測定すべき長さは干渉じまのしま数に光波長を乗じて求まる。干渉じまの数を肉眼によって、多数読み取することは容易でない。最近では、これを光電管と電子カウンタによって数える。

光電的な干渉じまの計算法は、端度器の絶対測定を容易にしたばかりでなく、逆に光波長の測定、さらには工業的な長さ（あるいは位置）の制御に重要である。

このさい光源の波長の単色性および輝度が、測長距離に関係する。最近では同位元素光源やレーザ光源が開発され、純粋なスペクトル線が利用できて、長い光路差の干渉（たとえば 1 m 以上）が可能となって来た。最近の光波干渉は入射光を分離する方法にも種々の考案があり、反射鏡も単純な平面鏡でなく三面直角プリズム (corner cube) や直角三面鏡を用い、反射鏡の傾きによる誤差をなくしている。また、分離した光束を迂回させ同じ径路をたどらせ調整を容易にし、2光束より3あるいは4光束を用いて鮮鋭な干渉じまをうる試みもある。

迂回光路を実際に用いた英国 Hilger 社のブロックゲージ測定用干渉計を示そう。

1.3.1 Hilger 社ブロックゲージ測長機

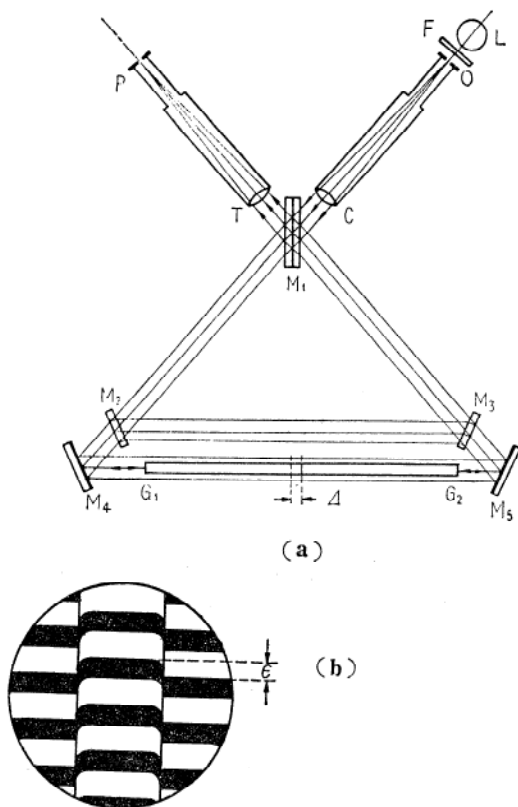


図9 ブロックゲージ測長機

図9(a)で光源L, フィルタF, ピンホールO, コリメータレンズCにより単色平行光が半透明鏡 M_1 に当たり2方向に分割される。 M_2, M_3 は半透明鏡, M_4, M_5 は反射鏡で内側の三角形 $M_1 M_2 M_3$ を左と右に回る光束(標準光路, 長さA)と外側の三角形 $M_1 M_4 M_5$ を左と右に回る光束(測定光路, 長さB)があり, 4光束干渉となる。内外側とも左と右に回る両光束は観測系Tから見てとうぜん平行である。

外側にブロックゲージをおき, 両端面 G_1, G_2 は M_4, M_5 からの光束に直角におく。そこでゲージ端 $G_1 G_2$ で反射する光と, ゲージ側を通る光との光路差はゲージ長Lに等しい。したがって干渉じまは図(b)のように標準光路Aと測定光路B(ゲージの側路)の干渉による両側のしまと, 標準光路Aとゲージ面で反射した光の干渉による中央のしまとなる。

両者のしまのずれ ϵ からLを求める。なお, 最適のコントラストは $B-A=L/2$ となるよう M_2, M_3 を調整する。この方法は, 長いブロックゲージを小型で, 基準面にゲージをリングング(密着)せずに測定でき, 外部の影響を受けることも少なく, 精度も上げうる。

1.3.2 オリンパス社干渉測微機

光波干渉を利用した比較測定機がオリンパス光学KKか

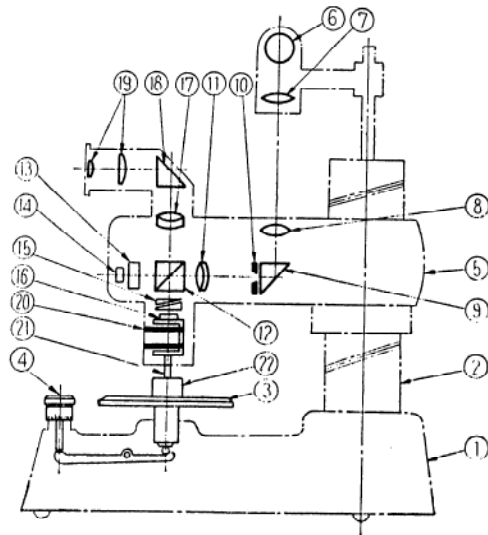


図10 干渉測微機

ら市販されている。光学系を図10に示す。

平行バネ(20)を用いて測定鏡の上下移動を平行にし, 等厚干渉による干渉じまの動きを接眼(19)でよみとる。ステージ(3)の上下は微動ダイヤル(4)によって調節(約 1μ)し, マスターゲージと測定物を交互にのせ, 光波長で, その差 (5μ 以内)を精度 0.02μ で測定する。

2. 標準尺の刻線

精密なスケールを製作する, すなわち目盛を刻む機械 Dividing Machine は全て SIP 社の製品で, 一級目盛機は日本に輸入されないと言われていた。これは精密なねぢ(マイクロメータ)を回転して, 一定間隔を送る機構で, ねぢのピッチ誤差と累積誤差は, 純機械的に巧みに補正されていた。

約5年前計量研究所と機械試験所で, 夫々光学的測定を利用した優秀な精密標準尺刻線法が開発された。前者は光波干渉を利用して, 光の波長により直接, 目盛線の間隔を決定し刻線する。後者は母尺(標準尺)を予め光波干渉で測定し, その誤差を数値制御で補正し, 母尺によってスケールを刻む。

2.1 光波干渉による目盛法⁽²⁾

前章でのべた光電的干渉縞計数法を利用する。光波干渉による一般の測定では, 種々の誤差を測定後に補正し, また干渉縞の端数をよみとることも容易である。然し光波干渉による刻線の場合には, 刻線の時期に次の2項を満足していなければならない。目盛の間隔は……

(a)刻線物体の熱膨脹や空気の屈折率などによる誤差補正が行われていること。

(b)干渉縞の整数倍(端数が無い)となっていること。

さて(a)を満足するには、刻線物体と同じ材料の標準スペーサを作り、この両端に2枚の反射鏡を対向させエタロンとする。エタロン、刻線物体および刻線の目盛間隔を定める光波干渉計とを密閉容器に入れ、温度と気体を同一にする。(b)を満足するには、Kr86 ランプの黄緑色スペクトル線の 1mm に相当する干渉縞の数が、標準状態（気温 20°C 、水蒸気分圧 10mmHg 、 CO_2 0.03% ）で特に気圧が 700mmHg の時、整数の 3540 本となることを利用する。

かくて容器内の温度を 20°C とし、エタロン干渉縞の気圧を 700mmHg に制御すれば、誤差は補正され、目盛間

隔は干渉縞の整数倍となる。

図11は気密容器で、Eはエタロン、 W_2 はその光源、Sは刻線物体。 W_1 は Kr86 ランプ、半透明鏡 M_1 、平面鏡 M_2 、 M_3 、反射用三面直角プリズム P_1 、 P_3 で干渉計を構成し、Sの移動を測定制御する。

2.2 較正尺による目盛法⁽³⁾

この方法は前章の光電顕微鏡、モアレ縞、光電的干渉縞計数法を利用している。母尺の光波干渉による較正と、数値制御による刻線との2段階となる。

2.2.1 光波干渉による標準尺の較正

標準尺（母尺）の目盛は光電顕微鏡で高精度に読みとり、母尺の移動は干渉縞計数法で正確に計数する。 1m の母尺に対し光電顕微鏡を6箇所用い、各光電顕微鏡の直下に目盛が来たとき信号を発し、干渉縞の計数値を電動タイプライタに記録する。 1m の母尺を 20cm 程度移動することにより、各目盛の位置情報は全て記録される。従来は 1m 標準尺の測定に数か月を要したが、ここでは50分の短時間で済み、測定環境を一定に保つことも容易となる。50分の測定時間は主として記録用電動タイプの印刷速度に要する。

図12に較正装置の原理図を示す。

2.2.2 数値制御による標準尺刻線法

電動タイプの記録から、母尺各目盛の誤差を穿

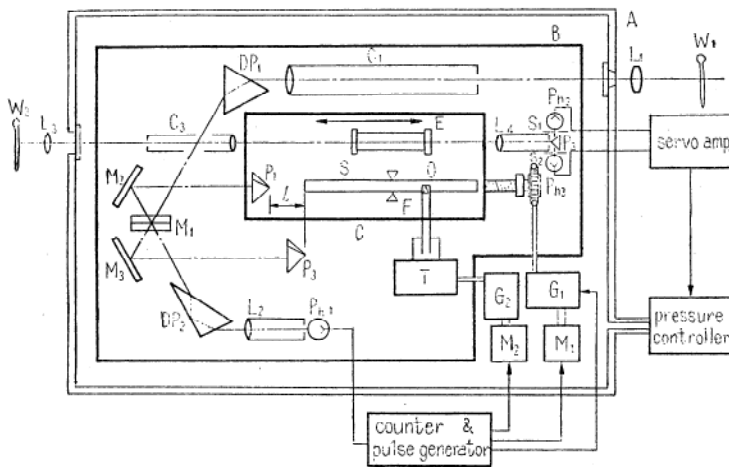


図 11

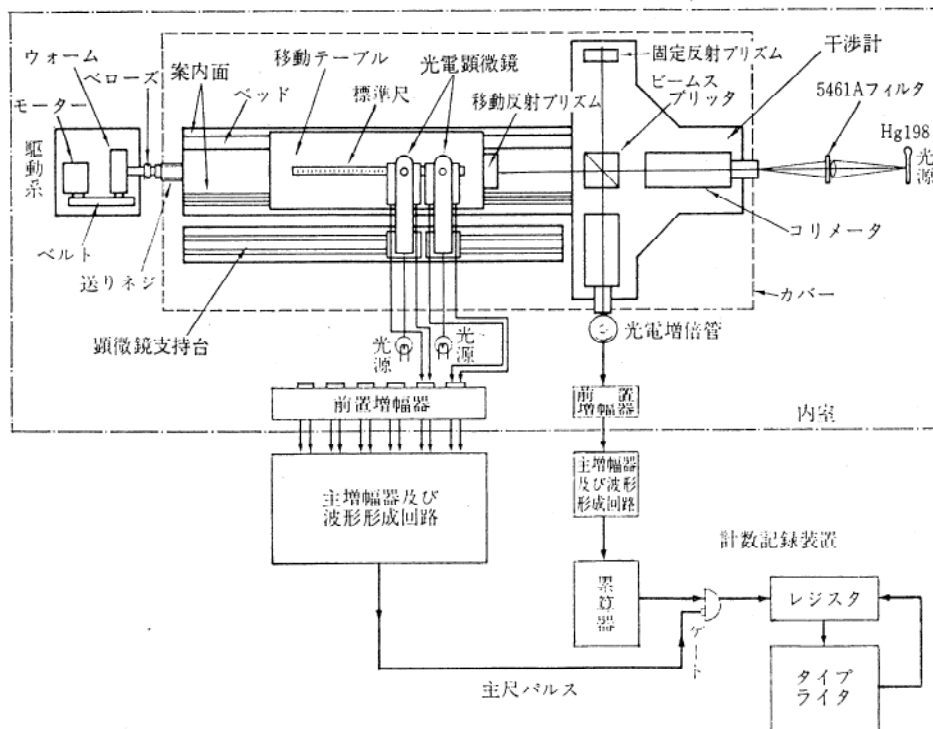


図12 標準尺較正装置の原理図

孔テープにパンチしておく。母尺の目盛位置は、前と同様に 6 本の光電顕微鏡から信号（主尺検出信号）で送り、各目盛の誤差の数値は穿孔テープで送る。

テーブルの移動量(長さ)は直線格子の 0.1μ 単位のモアレ縞(副尺検出器)で知り、これと穿孔テープの誤差の数値とを比較照合する。

かくて主尺信号を受けた後、副尺信号による誤差を数値制御で補正しながら素材尺に新しい目盛線を刻む。刻線はテーブル走行中 ($5\mu/\text{sec}$) 行い、停止による位置決め困難さをさせている。

この方法で原点からの累積誤差 $\pm 1\mu$ 以内、全長の誤

差 0.6μ の国際的にも優れた 1 m 標準尺が刻線される。

図13に刻線装置の原理図を示す.

お わ り に

今から20数年前、筆者が阪大精密の学生として精密測定学受講の折、日本に良い標準尺ができぬと嘆かれた恩師を思い感慨にたえない。精密測定学の進歩の一部を示すことができたであろうか、準備不足をお詫びせざるをえない。

文 献

- (1) 筆者：光学的機械計測の動向，計測と制御誌，vol. 4 No. 7 431, (1965)
- (2) 桜井好正：光波干渉を用いた標準尺刻線法，計測と制御誌，vol. 3 No. 11 884, (1964)
- (3) 土井康弘他：精密標準尺の測定と製作に関する研究，機械試験所報告第59号(1966)

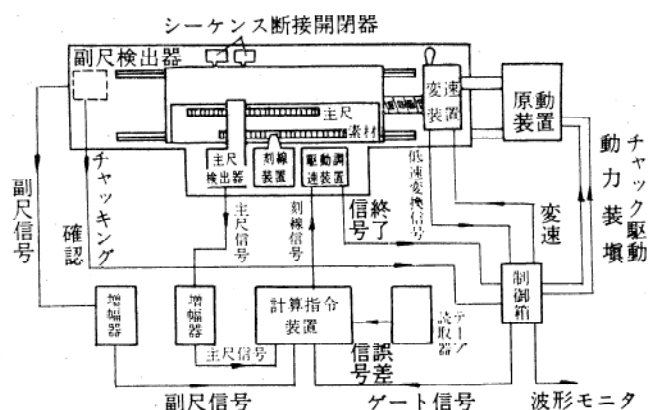


図13 刻線機の作動模型図