レーザを用いた精密測長器に関する 2, 3 の考察

井内 徹*・佐藤 拓宋**・岩元 憲生***・本房 文雄****

* 東京工業大学大学院 東京都目黒区大岡山 2-12-1

** 東京工業大学精密工学研究所 東京都目黒区大岡山 2-12-2

, * 東京工業大学 東京都目黒区大岡山 2-12-1

(昭和 43 年 3 月 29 日受付)

Some Notes on the Precise Length Measuring Device by Using Laser Beam

Toru IUCHI, Takuso SATO, Norio IWAMOTO and Fumio HONBO

(Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo)

(Received March 29, 1968)

Many measuring devices may be suggested using laser beam. For instance, many trials of an accurate length measurement counting the number of moving interference fringes through an interferometer have been already made. This method permits a precision of the order of a wave length over several meters.

This paper presents a measuring device based on this principle; many improvements are introduced as to create a new characterized method, by which fundamental studies and experiments are done. Detailed examinations are dedicated especially to detection, and counting and indication processes. On the former, instead of using two slits to detect the fringes, three slits are used. By this recourse the measuring accuracy is improved. In addition, to stabilize the output signal of the photo-electric converter, an amplifier are introduced. On the latter, the electronic circuits are simplified introducing an error correcting counter to eliminate a slight difference between the unit of measuring length and the length corresponding to a single movement of the fringes.

Meanwhile, to get more precise length measurement, "an optical path difference amplifier" is contrived. It is verified experimentally that measurements up to several tenths of a wave length is possible.

1. は し が き

レーザ光はその可干渉性・単色性・指向性などの点において従来の光源の出す光よりもはるかにすぐれている。これらの特色を利用すれば、計測手段として多くの応用が考えられる。その1つとしてマイケルソン形干渉計を用いて干渉じまの移動を計数し、反射鏡の移動距離を数 m にわたって波長単位で知ることによる精密測長の試みは、すでに各所で開発がいそがれている¹⁾。

本研究ではこのような原理に基づく測定器において

すでに開発公表されている方式をさらに発展させ、特長のある方式による測長器を試作し、その基礎的考察および実験を行なった。特に検出部、計数表示部についての検討を行なうと同時に、より精密な測長を目ざして光路差拡大装置と名付けた精密測長用の装置を考案し、波長の数 10 分の 1 の単位での測長が可能であることを示し、それを実験で確かめ、その結果を示した。

2. 測 長 原 理

まずマイケルソン干渉計形測長器の概要を簡単に述べることにする。これは干渉計により干渉じまを生成させ、干渉計の一方の反射鏡の移動で移動する干渉じまを計数するという原理に基づいて波長単位の精度で

* (現)八幡製鉄 K. K.

*** (現)三菱電気 K. K.

**** (現)日本航空 K. K.

測長しようというものであるが、この場合の干渉計はマイケルソン干渉計の変形したものである。

He-Ne レーザから発した波長 $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$ のレーザ光線は、指向性のよい平行光線で生成する干渉じまは等厚干渉じまであり、 M_2 の M についての鏡像 M_2' と M_1 がわずかに傾き、その交線が紙面に垂直であるとすれば、紙面に垂直な干渉じまである。 M_1 と M_2' のなす角を θ ($\ll 1\ \text{rad}$) とすれば、しま間隔 Δx は、

$$\Delta x = \lambda/2\theta \quad (1)$$

で与えられる。実際には、 Δx は小さいのでレンズで拡大する。また、 M_1 が $\lambda/2$ だけ移動することに干渉じまが一つ隣の干渉じまの位置へ移動するから、スリット面を横切るしま数を計数すれば、 M_1 の移動距離が測定できる。すなわち、移動量を S 、計数されたしま数を P (整数) とすれば、干渉じまを計数した瞬間においては、

$$S = (\lambda/2) \cdot P \quad (2)$$

となり、ここで λ は波長であり P が計数されるから、 M_1 の移動量がわかる。この場合、計数量 P は整数であるから測長誤差は $\lambda/4$ 以下である。

さて、以上の方法は 1 つのスリットでしま数を計数する場合であるが、本論文においては精度を高めることと干渉じまの移動方向を判別するいわゆる方向判別能力をもたせるために 3 つのスリットを一定の間隔に配置した。したがって、 M_1 が $\lambda/2$ 移動するごとに各スリットで位相が少しずつずれたしまを検出することになる。すなわち M_1 が $\lambda/6$ 移動するごとに 1 つのしまを検出することになる。よって (2) の代わりに、

$$S = (\lambda/6) \cdot P \quad (3)$$

となる。使用したレーザ光線は、 $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$ であるから、

Fig. 1 The block diagram of the device

$$\lambda/6 = 0.10546\ \mu\text{m} \quad (4)$$

となり、 $0.1\ \mu\text{m}$ を測長単位とする精密測長が可能であり、この場合の誤差はほぼ $0.05\ \mu\text{m}$ ということになる。測長器の概要は、Fig. 1 に示すようなブロック図で表わされる。

これは従来の方法にわずかの改良を加えることにより可能な測長器の原理であるが、以下においては本研究で特に特徴を盛り込んだ各部について考察することにする。

3. 移動部

3.1 光路差拡大原理とその装置構成

前述のように移動鏡の移動によって光路差が変化し、干渉じまが移動するのであるが、干渉じまの移動数は光路差変化に比例するのであるから、もし移動鏡のわずかな移動に対して光路差を大きく変化させることができれば、より精密な長さの計測が可能である。これを 2 つの直角プリズムを用いて実験したのがここに述べる“光路差拡大装置”である。Fig. 2 にその構成を示した。2 つの直角プリズム P_1 , P_2 を互いに向い合わせ P_1 に入射した光線の反射光線が P_2 に入射し、その反射光線が再び P_1 に入射する。以下同様の状態を繰り返し、2 つの直角プリズムの間を何度か往復し最後に P_2 の下方から反射光線を取り出し、それを平面鏡で反射させて元の光路を逆にたどるようにしたものである。 P_1 と P_2 が同じ大きさのものであれば、平行入射光線と反射光線が上記の光路をたどる条件は、直角プリズムの斜面の長さを $2a$ として、 P_2 を P_1 に対して、

$$a/n \quad (n=1, 2, \dots) \quad (5)$$

だけ光軸に垂直な方向 (下向) に平行移動すればよいということが証明される (付録参照)。ここで n は 2 つの直角プリズムの間を入射光線が下の平面鏡 M_1 で反

Fig. 2 Principle of the optical path difference magnifier

射されるまでに往復する回数である。(2)式に示すように移動鏡が平面鏡である場合、 $\lambda/2$ の移動で1つの干渉じまの移動が得られるのに対し、この場合直角プリズム P_1 の $\lambda/4n$ の移動に対して1つの干渉じまの移動を得ることができる。これを光路差拡大装置と呼ぶことにする。この干渉じまを位相差が $2\pi/3$ になるような3つのスリットで検出するという本研究の測長原理により測長精度は、

$$\lambda/12n \quad (6)$$

となる。したがって、正の整数 n を適当に選ぶことによって、理論的には任意の精度での測長が可能である。たとえば、 $n=5$ として P_1, P_2 を互いに $a/5$ だけずらせば、ずれたすき間から入射する光軸に平行な光線は P_1, P_2 の間を5回往復したのち P_2 の下方から出て M_1 で反射され、元の光路とまったく同じ光路を通して入射光線と同じ方向に出て行く。この場合(6)式に $n=5, \lambda=0.6328 \mu\text{m}$ を代入すると、

$$\lambda/12n=0.010546 \mu\text{m} \quad (7)$$

となり、 $0.01 \mu\text{m}$ を測長単位とする測長が可能である。

degree of magnification n	degree of preciseness $\lambda/12n [\mu\text{m}]$
(1/2)	0.10546
1	0.05273
2	0.02636
3	0.01757
4	0.01318
5	0.010546

Table 1 Relation between n and degree of preciseness of length measuring

Table 1 に拡大度 n に対する測長精度を示した。**Fig. 3** は光路差拡大装置を用いた干渉計の構成を示したもので、**Fig. 4** は実験にさいし使用した光路差拡大装置を用いた干渉計の写真である。なおプリズムを用いると機械

Fig. 3 The interferometer by means of the optical path difference magnifier

的外乱に対して安定な測定ができることはすでによく知られている。また、直角プリズムの設定にあたっては、その斜面での反射による光を除くために光軸に対してその斜面を直角よりわずかにずらせた角度で行なう必要がある。

Fig. 4 The photograph of the interferometer by means of the optical path difference magnifier

4. 検出部

4.1 検出端機構

干渉じまは3つのスリットで検出され光電変換される。その出力は増幅回路を通してパルス整形回路でパルス化され方向判別回路にはいる。この出力は干渉じまの移動方向に応じて加算パルス、減算パルスとなる。**Fig. 5** は上述の検出端機構のブロック図である。本研究の検出機構としての特徴は、検出スリットと増幅回路および方向判別機構である。これらに関して節をもうけて述べることにする。

Fig. 5 The block diagram of the detector

4.2 干渉じまと検出スリットの関係

3つの検出スリットにはいる干渉じまは同位相であってはならない。なぜなら、同位相のとき方向判別ができないからである。また、相隣のスリットにはいる干渉じまは π 以上の位相差があってはならない。なぜなら、このとき3つのスリットで検出される干渉じまの順序が本来の順序と異なって誤動作を起こすからである。したがって、しま間隔とスリット幅およびスリット間の距離には制約がある。

スリット幅およびスリット間の距離をともに d とし、

Fig. 6 Relation between the slit width and the interference fringe width

しま間隔を $L=2kd$ としたとき、Fig. 6 からわかるように、相隣るスリットにはいる干渉じまの位相差 ϵ rad は、

$$\epsilon = (2d/2kd) \times 2\pi = (2d/L) \times 2\pi \quad (8)$$

となる。上述の説明から、 $0 < \epsilon < \pi$ であるから (8) 式より、

$$k > 2, L > 4d \quad (9)$$

なる関係がある。すなわち、干渉じまは $4d$ 以上のしま間隔をもたなければならない。また、次節に示すように $L=6d$ が最適であることが証明される。

4.3 光電変換出力と増幅回路の関係

スリットを通った移動干渉じまは光電子増倍管（ホトマル）で光電変換される。この光電管の出力は移動速度一定では正弦波電圧波形で、光電管の電源電圧を一定にしておけば3つの光電管の出力の直流レベルは同一であり、各出力の正弦波形は干渉じまに応じて位相が異なるだけである。鏡の移動速度を一定としてスリット a, b, c に対応する光電管の出力をそれぞれ V_a, V_b, V_c であるとするれば、

$$V_a = I(t) (1 + \sin \omega t) + I_d \quad (10)$$

$$V_b = I(t) \{1 + \sin(\omega t - \epsilon)\} + I_d \quad (11)$$

$$V_c = I(t) \{1 + \sin(\omega t - 2\epsilon)\} + I_d \quad (12)$$

とかける。上の3式において、右辺の第1項は移動干渉じまの光電変換出力波形で $I(t)$ は振幅、 ϵ は隣接するスリットにはいる干渉じまの位相差である。また I_d は光電管の電源電圧を一定にしたときの外部からの光もふくめた直流レベルである。上の各式をパルス整形して計数すれば、鏡の移動距離、すなわち長さの計測ができるのであるが、光電管の電源電圧の変動やレーザ光の出力変動などによって各項の大きさの比が変わるため、整形回路のスレッシュホールドレベルにかからなくなったり余分にかかったりするなどして誤動作を起こす。

本研究では、3つのホトマル出力による平均値回路と差動増幅回路を使用して上式の右辺各項による影響を除去して整形回路が安定に動作するようにくふうした。以下これらの回路について述べる。

Fig. 7 は上述の回路構成のブロック図で、これを補償回路と呼ぶことにする。3つのホトマル出力の平均

Fig. 7 The block diagram of the compensation circuit

値回路出力を V_m とすれば、(10)~(12) 式から、

$$\begin{aligned} V_m &= -(V_a + V_b + V_c)/3 \\ &= \{I(t)/3\} \times [2 \cos \epsilon + 1] \sin(\omega t - \epsilon - \pi) - I(t) - I_d \end{aligned} \quad (13)$$

(13) 式において、

$$2 \cos \epsilon + 1 = 0 \quad (14)$$

$$\therefore \epsilon = 2\pi/3 \quad (15)$$

であれば、(13) 式は、

$$V_m = -I(t) - I_d \quad (16)$$

となる。これはしま間隔が $L=6d$ のときに相当することが (8) 式からわかる。

光電管の出力 V_a, V_b, V_c のおのおのと平均値回路出力 V_m の差動増幅回路出力をそれぞれ V_{da}, V_{db}, V_{dc} とすれば、 m を増幅度として、

$$\begin{aligned} V_{da} &= -m(V_a + V_m) \\ &= mI(t)I_d \sin(\omega t - \epsilon_a) \end{aligned} \quad (17)$$

$$I_d = (1/3) \times \sqrt{(1 - \cos \epsilon)^2 + 9 \sin^2 \epsilon} \quad (18)$$

$$\epsilon_a = \pi - \tan^{-1}[(\sin \epsilon + \sin 2\epsilon)/(2 - \cos \epsilon - \cos 2\epsilon)] \quad (19)$$

$$V_{db} = mI(t)I_b \sin(\omega t - \epsilon_b) \quad (20)$$

$$I_b = (2/3) \times (1 - \cos \epsilon) \quad (21)$$

$$\epsilon_b = \pi + \epsilon \quad (22)$$

$$V_{dc} = mI(t)I_c \sin(\omega t - \epsilon_c) \quad (23)$$

$$I_c = I_d$$

$$\epsilon_c = \pi + \epsilon + \tan^{-1}[-3 \cot(\epsilon/2)] \quad (24)$$

となる。(17), (20), (23) 式からわかるように差動増幅出力は、0 V を中心とする正弦波形であり、パルス整形回路は 0 V 付近をスレッシュホールドレベルとすれば、すでに述べた変動、外乱にかかわらず安定に動作することがわかる。とくに $\epsilon=2\pi/3$ のときは、振幅、位相が光電管の出力のそれらと同一状態の関係にあり、もっとも良好な状態であることがわかる。

以上のように、検出機構の調整においては、3つのスリットにはいる干渉じまの位相差を $\epsilon=2\pi/3$ にで

きるだけ近づける必要がある。

4.4 方向判別機構

干渉じまは干渉計の移動鏡の移動方向に応じて左右に移動するので、方向判別機構が必要である。すでに述べたように、研究では3つの検出スリットを用いるが、このことは精度を高めることと方向判別の目的がある。すでに発表されている方式は2つのスリットによって位相判別による方向判別を行なっているようであるが、本研究では数値制御関係に用いる方向判別回路を利用した。Fig. 8 にその方向判別回路のブロック図を示した。

Fig. 8 The interpreting circuit

5. 計数表示部

5.1 補正付可逆計数回路

(3) 式から、平面鏡を干渉計に用いた場合、本研究の測長原理によれば、移動鏡が $\lambda/6$ だけ移動することによって3つのスリットの1つから干渉じまが検出される。この場合、

$$\lambda/6 = 0.10546 \mu\text{m} \quad (25)$$

であるから、もし測長単位として $0.1 \mu\text{m}$ をとり1つのパルスを計数することを平面鏡の移動が $0.1 \mu\text{m}$ であると考えたとすると、1つの干渉じまを計数するごとに $0.00546 \mu\text{m}$ の誤差を生ずることになる。計数表示としてこの誤差をなくす方法の1つは乗算回路を構成することである。すなわち、計数された表示数に 1.0546 を乗じてやれば、 $0.1 \mu\text{m}$ を単位とする表示ができる。しかし、計数回路に乗算回路を組むのは複雑である。しかるに、乗数が一定であるということと、 $0.1 \mu\text{m}$ を測長単位とすることを考え合わせると誤差の値が積み重なって $0.1 \mu\text{m}$ に到達するごとに、1パルスずつ余分のパルスを計数させれば誤差をなくし正確に表示することができる。しかも、このために要する補正計数回路は簡単に構成できる。

つぎにこの補正計数回路について述べる。まず(25)式を $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ としてつぎのように変形して書いてみよう。

$$\lambda/6 = 0.1 [1 + 1/20 + 1/250 + 1/1500] \quad (26)$$

これをみると、補正計数回路として 20 進, 250 進, 1500 進回路を構成すれば、カウント誤差はつねに1カウント以下、すなわち $0.1 \mu\text{m}$ 以下の誤差で計数できることがわかる。

このように、干渉じま計数回路は、補正計数回路を付設することによって乗算器の代わりをなすことができると同時に回路も簡単になり、しかもその誤差をつねに測長単位以下におさえることができる。また乗算などの演算に要する計算時間も必要ではなく、つねに正しい表示を示しているような表示回路を構成できることがわかる。Fig. 9 は、上述した補正計数回路のブロック図である。この図で3つの M. M. はモノマルチ回路で同時に出力パルスが出ないように時間を少しずつ遅らせるためのものである。なお、計数回路は干渉じまが振動などで左右にふれても誤差を生じないために、すべて可逆計数回路になっていなければならない。方向判別回路の出力パルスは直接に、そして補正計数回路を通ったものも一緒に 10 進計数回路で計数され、10 進表示される。上述のとおり、この 10 進表示は、そのまま移動距離をこの場合 $0.1 \mu\text{m}$ 単位で示している。

Fig. 9 The error correcting reversible counter

6. 誤差の検討

6.1 機械的振動による誤差

干渉じま計数形測長器においては、振動は直接干渉じまのランダムな移動をひき起こし、またし間隔が敏感に変化するので測長にさいしてできる限りの振動防止策が必要である。干渉じまのランダムな移動は計数回路を可逆にしているので、それらが一方に累積されるのは防止できる。ここでは干渉じまの変化による影響を述べる。

Fig. 1 において、2つの平面鏡 M_1 , M_2' の間の角

θ_0 を中心として $\theta \sin \omega t$ なる振動をしているとする。ただし $\theta < \theta_0 \ll 1$ であることは、干渉じま生成のために必要条件である。このとき、干渉じまは紙面に垂直であり、しま間隔 Δx_d は、(1) 式から、

$$\Delta x_d = \lambda/2 (\theta_0 + \theta \sin \omega t) \quad (27)$$

である。したがって、拡大レンズで拡大されたしま間隔 L_d は、

$$2kd/(1+\theta/\theta_0) \leq L_d \leq 2kd/(1-\theta/\theta_0) \quad (28)$$

である。ここで d はスリット幅、 k は規格化したしま間隔である。(9) 式から、 $L_d > 4d$ ならば誤差を生じない。したがって、振動 $\theta \sin \omega t$ によって誤差を生じないためには、

$$\theta/\theta_0 < (k-2)/2 \quad (29)$$

$$\text{および} \quad \theta/\theta_0 < 1 \quad (30)$$

なる関係が必要である。実際の観測によればしま間隔 Δx は約 0.3 mm であるから (1) 式より $\theta_0 = 0.001$ rad である。したがって (29), (30) 式はそれぞれ

$$\theta < 0.0005(k-2) \quad (29')$$

$$\theta < 0.001 \quad (30')$$

となる。

Fig. 10 は上述の振動に対する安定動作領域で、実線と点線で囲まれた斜線部の範囲では誤動作しない。つぎに M_1, M_2' が光軸に対して Fig. 11 のように傾いている状態を考える。このとき、干渉じまはスリットに対して傾斜した平行干渉じまとなり、この傾斜角 η は、

$$\tan \eta = \tan \alpha / \tan \beta \quad (31)$$

Fig. 10 The stable region against mechanical vibrations

Fig. 11 Inclination of interference fringes

である。 $\beta=0$ は、上述の振動に一致する。 β が大きくなるにつれ、干渉じまは傾斜しはじめ、ついにはスリットに対し直角方向に生成する。この過程は、(31) 式で説明できる。傾斜したしま間隔 L_z は、

$$L_z = 2kd \sin(\tan^{-1}(\alpha/\beta)) \quad (32)$$

で表わされ、(9) 式の条件から、

$$2/\sin(\tan^{-1}(\alpha/\beta)) < k \quad (33)$$

が誤差を生じない許容振動領域である。Fig. 10 から α の振動に対して、

$$2 < k < 4 \quad (34)$$

なる条件があるから、これと (33) 式とにより Fig. 11 に示されるような振動に対しての安定動作領域が求められ Fig. 12 の斜線部分で示される。これらの検討からわかるようにしま間隔は、 $k=3$ 、すなわち $L=2kd=6d$ あたりがもっとも安定である。光路差拡大装置を用いたときにも、この条件は成り立つが、この場合に問題になるのは直角プリズムの精度、これについてはいくつかの文献で検討されている。

Fig. 12 The stable region against mechanical vibrations over two plane

6.2 温度・気圧・湿度変化による誤差⁴⁾

一般に測長は真空中ではなく空気で行ない、その結果空気中の波長は屈折率の変化によって変わる。空気は標準状態（温度 20°C、気圧 760 mmHg、炭酸ガス含有率 0.03%）にないのが普通であるから、この変移に対する空気屈折率の変化を補正する必要がある。標準状態におけるレーザ光波長を $\lambda_s = 0.6328 \mu\text{m}$ としたとき、空気の諸元に対する屈折率変化による波長の変化はつぎのようになる。

$$(\lambda_s - \lambda_t) \times 10^6 / \lambda_s = \{0.9288 - 0.00317(t - 20)\}$$

$$\times (t - 20) - 0.3578(p - 760)$$

$$+ 0.0570(f - 10) - 0.0143(g - 3) \quad (35)$$

ただし、 λ_t は使用状態の波長、 t は°C であらわした空気温度、 p および f は mmHg 単位の気圧および水蒸気分圧、 g は 0.01% 単位であらわした CO_2 ガス含有率である。(35) 式からわかるように、波長変化は温度および気圧変化による影響が大きく、 f および g の影響は通常無視できる。また、(35) 式の右辺

の数値は、 $\lambda_s = 0.6328 \mu\text{m}$ で測定したとき、そのまま 1 m に対する μm であらわした補正值となる。この補正值は計数表示部で述べた補正計数回路を利用して直接補正することが可能である。

7. 実 験

本装置の全景写真を Fig. 13 に、光電管の出力写真を Fig. 14 に示した。

Fig. 13 The whole view of the device

(a) 2 m sec/div

(b) 5 V/div

the phase of the upper wave V_a gains about $2\pi/3$ more than that of the lower wave V_b

Fig. 14 The photograph of photomultiplier outputs

n	mean count number per rotation	mean count number per three rotations	mean count number per five rotations	mean move- ment value per rotation [μm]
($1/2$)	4 912.8	14 877.1	24 849.8	496.0
1	9 783.2	29 378.5	49 244.0	491.2
2	19 711.4	59 013.4	98 338.4	491.8
3	29 697.2	88 961.8	147 757.2	493.4
4	39 827.2	119 525.8	199 140.8	497.9

Table 2 Precise length measuring experiment data by means of the optical path difference magnifier

被測定物としては、移動鏡に付設されている手動による微動ハンドルをまわすことによって移動させた。

実験は微動ハンドルを1回転、3回転、5回転させたときの移動量を求めるものである。各回転数について10回の実験を行ない、その平均計数値を Table 2 に示した。この表で n は移動部で述べた光路差拡大度であり、表示値1カウントは $0.1 \times 1/2 n \mu\text{m}$ に相当する。なお n は本来正の整数であって $n=1/2$ は光路差拡大原理からいって意味がないが、これは移動鏡が平面鏡の場合に相当する。

微動ハンドル1回転により被測定物は 0.5 mm 動くことになっており精密測定の観点からいって表の数値はかなりランダムであるが、これは1回転による読み取り誤差を $\pm 2^\circ$ とすれば $n=1/2$ の場合 $\pm (5000/360) \times \alpha \approx \pm 30$ のカウント誤差があると考えられ、また回転歯車のバックラッシュなどの影響でかなりの誤差が生じていると考えられる。

これらの誤差は n が増大するにつれ $n=1/2$ のときの $2n$ 倍のカウント誤差を伴う。したがって機械機構の精密さがきわめて強く要求され、この点今後の大きな課題である（バックラッシュの影響のあることは1回転させたのち、逆方向にまた1回転させると表示カウントがゼロのはずであるが、 $n=1/2$ でつねにほぼ50カウントの表示が残るところから推測できる。これを利用すると逆にバックラッシュの程度を計測できる）。

また、表示値は光路差拡大原理の数値的な証明を示している。

8. む す び

干渉じま計数形精密測長器をすでに発表されている方式^{3),4)} と異なる方式で試作実験し、その主な特徴について 2, 3 の考察を述べた。これらの特徴をまとめるとつぎのようになる。

1. 検出スリットの増加 従来の2つのメリットで検出する方式よりも精度を上げることができ、また方向判別が簡単にできる。しかし、スリット面のしき間隔の調整が複雑になる。

2. 補償回路の導入 光量変動 visibility 低下などの外乱にかかわらず安定した干渉じまの計数を行なうことができる。とくに光路差拡大に伴うノイズの拡大に対して、フィルタの役目を果たす。

3. 補正計数回路の導入 乗算回路の代わりをなす補正回路を導入することにより複雑な電子回路を簡単化することができるほか、温度、気圧などの変化によって波長が標準状態からずれるとき、そのずれを補正回路に組んでこれらによる影響を消去することができる。

4. 光路差拡大装置の導入 直角プリズムを2つ用いるだけで、計数回路など他の部分はまったく変えなくても、従来の数倍以上の精度で測長できる。本研究では $\lambda/48$ の測長精度での測長を実現した。拡大度はプリズムの一方をマイクロメータで簡単に移動設置することによって任意に変えることができる。鏡の移動速度は、計数回路の分解能に依存し、 $n = 1/2$ で約 2 cm/sec まで可能で、光路差拡大に伴い、移動速度は $(2/2n) \text{ cm/sec}$ まで可能である。

なお、本論文では移動距離数 cm での結果を得たが、工作機械の精密測長や数値制御などに応用していくにあたって数 m 程度の測長が望まれている。これを実現するためには、本論文で述べた調整条件のほか、種々の問題点があるように思われるが、レーザ光を使用することから測長の終局的な精度はレーザ光の発振周波数の安定度に依存するものであり、より安定したレーザ光を使用することもその1つであろう。

本研究にあたり、終始御協力いただいた東京工業大学精密工学研究所池辺潤教授に感謝いたします。また貴重な助言をいただいた同大学大学院博士課程の上田光宏氏をはじめ、研究室の諸氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) H. A. Elion: 「Laser System & Applications」, 119/124, Pergamon Press (1967)
- 2) 池辺 潤: 「工作機械の数値制御」, 34/35, 共立出版 (1961)
- 3) 諸隈 肇: 「干渉測長機の実用化に関する研究 (II)」, 応用物理, 31-3, 201/207 (1962)
- 4) 桜井ほか: 「干渉縞計数方式による長さの測定について」, 中央計量検定所報告, 3-8, 16/30 (1958)
- 5) 井内 徹: 「レーザ光線を用いた干渉計形測長器の試作と基礎的研究」, 東京工業大学修士論文 (昭和 42 年度)

■ 付 録

(5) 式の証明, 使用する直角プリズムの斜辺の長さを $2a$ とし, Fig. 15 に示すように座標をとる。入射する平行光線の光束は $(a-b)$ 以下の幅であるとして、この光束のすべてが直角プリズム P_1, P_2 の間を n 回往復して y 座標 $-a$ と $-(2a-b)$ の間に出るように、 P_1 と P_2 のずれ b/a の値を求める。この n はもちろん光路差拡大度で正の整数である。入射光線は x 軸に平行であり、次式のように表わす。

$$y_0 = b + (a-b)t \quad (36)$$

$$0 \leq t \leq 1, 0 < b < a \quad (37)$$

プリズムの各辺を座標で表わすと、それぞれつぎのようになる。

$$y_{p11} = x \quad (38)$$

Fig. 15 The disposition of the optical part difference magnifier

$$y_{p12} = -x \quad (39)$$

$$y_{p21} = -x + b + c \quad (40)$$

$$y_{p22} = x - (2a - b + c) \quad (41)$$

(36) 式の光線が両方のプリズムの各辺で反射したのち、再びはじめのプリズム P_1 に入射するまでに、はじめの位置より $2(a-b)$ だけ x 軸に平行に下方に移動することは、上の各式の関係から明らかである。一般に 1 回の往復で $2(a-b)$ の下方への移動があることがわかる。したがって、プリズム間で n 回往復した光線の y 座標は、

$$y_n = b + (a-b)t - 2n(a-b) \quad (42)$$

であって、これが $-a$ と $-(2a-b)$ の間になければならないから、

$$-(2a-b) \leq b + (a-b)t - 2n(a-b) \leq -a \quad (43)$$

(43) 式の左側の不等式から、

$$(1-b/a)(2n-t) \leq 2 \quad (44)$$

(44) 式は、 $0 \leq t \leq 1$ なるすべての t について成り立たなければならないから、

$$(1-b/a) \cdot 2n \leq 2 \quad (45)$$

が成立しなければならない。これをといて、

$$b/a \geq 1 - 1/n \quad (46)$$

いっぽう、(43) 式の右側の不等式から、

$$b/a \leq (2n-1-t)/(2n+1-t) \quad (47)$$

(47) 式が $0 \leq t \leq 1$ なるすべての t について成り立つためには、

$$b/a \leq (2n-1-1)/(2n+1-1) = 1-1/n \quad (48)$$

$$\therefore b/a \leq 1-1/n \quad (49)$$

でなければならない。したがって、(46) 式と (49) 式より、

$$b/a = 1-1/n \quad (50)$$

すなわち、 n 回往復させるためには (50) 式の示す関係にプリズムを配置すればよい。