赤外合成波長による長尺ゲージの測定*

松 本 弘 一**

Measurements of Long Gauges by Infrared
Synthetic Wavelength

Hirokazu MATSUMOTO

Synthetic wavelength method is described for determining long lengths with a high accuracy and efficiency. The synthetic wavelengths, 84.2 μm and 464 μm , are produced by squaring and filtering the interference fringes derived from a two-wavelength simultaneous interferometer whose light sources are a 3.51- and 3.37- μm He-Xe laser and a 3.39- μm He-Ne laser. As concerns accuracies required in measuring long lengths, this method is discussed to be more useful than the method of excess frac-

tions well known in length measurement. Several techniques also are given for measuring lengths accurately. Using the two-beam infrared interferometer, gauges of 0.8- and 3-m long were measured over several months. The standard deviation of the measured phase of the 84.2- μm signal was less than $2\pi/100$ and that of the 464- μm signal less than $2\pi/50$. These results are enough to uniquely determine lengths up to 5 m with an accuracy of 1×10^{-7} .

Key words: synthetic wavelength, two-wavelength interferometry, interferometric measurement, infrared interferometer, long-wavelength interferometry, long-length measurement.

1. 緒 言

現在、数十 m 程度までの大寸法を高精度・高能率に測定することが、大型構造物の測定やロボットの位置決めなどの分野において要望されている。このような大寸法を光波干渉によって測定する場合、大気ゆらぎや機械的振動などの影響が大きくなるので、光源として波長の長いスペクトルを用いることが有利である¹⁾。被測定寸法が長くなればなるほど、長い波長の光源の方が好ましく、赤外レーザは可干渉性が良いこともあって、このような光源として用いられて来た²⁾³⁾。しかしながら、古くから寸法測定に用いられている合致法は、干渉測定において厳しすぎる精度を要求するし、また、経費などの点から複数の波長について同時測定を行うことが難しい。このため、2波長のスペクトルを同時に干渉計に入射させ、2波長による干渉じまを同一の検出器で検出し、自乗・フィルタリングなどの処理を行ってサブミリ波領域の長い波長（ここでは合成波長と呼ぶ）の信号を人工的に発生させ、この合成波長を用いて大寸法を測定することが提案された⁴⁾。この方法は、合致を得る必要がないので、必要な精度で測定を行えばよく、大寸法の測定に有効である⁵⁾。今回、この方法を用いて長尺ゲージを実際に測定したので、その概要と測定結果などについて報告する。

2. 理論解析

2.1 合成波長の発生法

あまり変わらない波長 λ_1 と λ_2 ($\lambda_1 > \lambda_2$) のスペクトルを光源として用いた 2 光束干渉計において、その出力強度からハイパスフィルタによって直流成分を除去した後、乗算器によって自乗し、次に、ローパスフィルタに通せば、

$$I^2 = I_1 I_2 \{ \cos(4\pi l / \lambda_s) + c_0 \} \quad (1)$$

ただし、

$$\lambda_s = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2)$$

$$c_0 = (I_1^2 + I_2^2) / 2I_1 I_2$$

が得られる⁶⁾。ここで I_1 と I_2 はそれぞれ λ_1 と λ_2 の光強度、 l は干渉計の腕の長さの差である。式 (1) は、 λ_1 や λ_2 の波長よりはるかに大きな波長 λ_s を光源とする干渉を表していると考えられる。従って、この合成波長 λ_s を利用して位相測定すれば、サブミリ波程度のあらい測定が可能である。図 1 は合成波長の作成過程における信号を模式的に描いたものである。(a)、(b)、そして (c) は、それぞれ処理前、自乗後、そしてフィルタリング後の信号例である。このようにして長い波長による干渉じまに対応する信号が作成される。

2.2 寸法測定法

今、 λ_1, λ_2 と λ_3 ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$) の 3 波長を光源として用いれば $\lambda_{s1} = \lambda_1 \lambda_3 / (\lambda_1 - \lambda_3)$ と $\lambda_{s2} = \lambda_2 \lambda_3 / (\lambda_2 - \lambda_3)$ の 2 種類の合成波長を発生されることができる。これらの波長による信号の位相（干渉じま端数）のみを測定すること

* 原稿受付 昭和 58 年 4 月 16 日。昭和 57 年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和 57 年 10 月 18 日）にて発表。

** 正会員 計量研究所（茨城県新治郡坂村梅園 1-1-4）

Fig. 1 Illustration of a generation process of synthetic wavelength; (a) Signal from a two-wavelength simultaneous interferometer, (b) signal after squaring, and (c) signal after filtering

によって 10 m 程度までの寸法を決定する場合について考えると、 $\lambda_{s1} < \lambda_{s3}$ であるので、 $\lambda_{s3}, \lambda_{s1}$ 及び λ_1 を用いて被測定寸法 l を次の順序で測定すればよい⁴⁾。

第 1 段階; λ_{s3} によって l を $\lambda_{s1}/4$ の精度まで求める。

第 2 段階; λ_{s1} によって l を $\lambda_1/4$ の精度まで求める。

第 3 段階; λ_1 によって l を可能な精度まで求める。

このようにして、被測定寸法 l があらかじめ $\pm \lambda_{s3}/4$ (この場合 $\pm 116 \mu\text{m}$) まで知られていれば、 l を高精度、高効率に決定できる。

次に、 $\lambda_1 = 3.51 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 3.39 \mu\text{m}$ と $\lambda_3 = 3.37 \mu\text{m}$ の波長を光源として 10 m までの寸法を 1×10^{-7} の精度で測定する場合を考えると、合成波長法と合致法において要求される測定精度は表 1 のようになる。この表から分かるように、合致法においては一義的に寸法を決定するために厳しい精度の測定が常に要求される。しかし、本方法は、合致法と比較してかなり低い測定精度で十分であるので簡単である。このことは、求める精度が 1×10^{-7} より低い場合、さらに顕著になる。従って、被測定寸法が長くなるかあるいは測定を行う場合、本方法は特に有効である。実際の干渉計の位相測定においては、表 2 に示す精度が要求され、また、光源の波長に関しても表 3 に示す精度が要求される。これらの表から、本方法は、表 2 の第 2 段階の波長精度において合致法と同じであるが、ほかにおいては本方法の方が合致法よりすぐれていることが分かる。要求される測定精度が 1×10^{-7} より低くなると、本方法の方が合致法より常に有利である。

2.3 合成波長の精度

Table 1 Measuring accuracies required for determining a length with an accuracy of 1×10^{-7}

Lengths m	Synthetic wavelength method			The method of excess fractions	
	1st stage λ_{s3}	2nd stage λ_{s1}	3rd stage λ_1	λ_2, λ_3	λ_1, λ_3
1	2.1×10^{-5}	8.8×10^{-7}	1.0×10^{-7}	7×10^{-9}	3.6×10^{-8}
2	1.1×10^{-5}	4.4×10^{-7}	1.0×10^{-7}	3×10^{-9}	1.8×10^{-8}
3	7.0×10^{-6}	2.9×10^{-7}	1.0×10^{-7}	2×10^{-9}	1.2×10^{-8}
5	4.0×10^{-6}	1.8×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1×10^{-9}	7×10^{-9}
10	2.1×10^{-6}	1.0×10^{-7}	—	7×10^{-10}	4×10^{-9}

Table 2 Required phase-reading accuracies

Lengths m	Synthetic wavelength method			The method of excess fractions	
	1st stage λ_{s3} %	2nd stage λ_{s1} %	3rd stage λ_1 %	λ_2, λ_3 %	λ_1, λ_3 %
1	9.1	2.1	5.7	0.2	1.1
2	9.1	2.1	11.4	0.2	1.1
3	9.1	2.1	17.1	0.2	1.1
5	9.1	2.1	28.5	0.2	1.1
10	9.1	2.4	—	0.2	1.1

Table 3 Required wavelength accuracies

Lengths m	Synthetic wavelength method			The method of excess fractions	
	1st stage λ_2, λ_3	2nd stage λ_1, λ_3	3rd stage λ_1	λ_2, λ_3	λ_1, λ_3
1	1.1×10^{-7}	2.5×10^{-8}	1.0×10^{-7}	5.0×10^{-9}	2.5×10^{-8}
2	5.5×10^{-8}	1.3×10^{-8}	1.0×10^{-7}	2.5×10^{-9}	1.3×10^{-8}
3	3.6×10^{-8}	8.3×10^{-9}	1.0×10^{-7}	1.7×10^{-9}	8.3×10^{-9}
5	2.2×10^{-8}	5.0×10^{-9}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-9}	5.0×10^{-9}
10	1.1×10^{-8}	2.5×10^{-9}	—	5×10^{-10}	2.5×10^{-9}

レーザの発振波長 λ_1 と λ_2 によって得られる合成波長 $\lambda_s = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2)$ の場合について考えると、その波長精度は、

$$\frac{\delta \lambda_s}{\lambda_s} = \lambda_s \left(\frac{\delta \lambda_2}{\lambda_2^2} - \frac{\delta \lambda_1}{\lambda_1^2} \right) \quad (2)$$

によって与えられる。ここで、 λ_1 と λ_2 が別尺のレーザ共振器より得られるとすると、一般に $\delta \lambda_1 / \lambda_1 = \delta \lambda_2 / \lambda_2 = \delta \lambda / \lambda$ であるので、式 (2) は次のように近似される。

$$\frac{\delta \lambda_s}{\lambda_s} = \frac{\sqrt{2} \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \frac{\delta \lambda}{\lambda} \quad (3)$$

レーザの利得曲線を利用して波長安定化を行う場合、一般に、 $\delta \lambda / \lambda < 2 \times 10^{-8}$ と考えられるので、 $\lambda_1 = 3.51 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 3.37 \mu\text{m}$ のとき、 $\delta \lambda_s / \lambda_s \approx 7 \times 10^{-7}$ となり、また、 $\lambda_1 = 3.39 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 3.37 \mu\text{m}$ のとき、 $\delta \lambda_s / \lambda_s \approx 4 \times 10^{-6}$ となる。従って、本方法における第 2 段階の測定を行うことが不可能になる。しかしながら、同時発振レーザを光源として使用する場合には、合成波長の精度がかなり良くなる。波長 λ_1 と λ_2 が D の長さの共振器で発振しているとき、

Fig. 2 Schematic diagram of synthetic wavelength distance-measuring system

$$2D = M_1 \lambda_1 = M_2 \lambda_2 \quad (4)$$

が成り立つ。ここで、 M_1 と M_2 はレーザの発振モード次数である。共振器長が ΔD だけ変化すると発振線の波長も次の量だけ変化する。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \lambda_1 &= \frac{m \lambda_1}{M_1 + m} - \frac{2 \Delta D}{M_1 + m} \\ \Delta \lambda_2 &= \frac{m \lambda_2}{M_2 + m} - \frac{2 \Delta D}{M_2 + m} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 m はモード次数の変化量である。式(5)を式(2)に代入し、 $|m| \ll M$ を考慮すると、

$$\frac{\delta \lambda_s}{\lambda_s} = \frac{m^2}{4D^2} (\lambda_1 - \lambda_2) - \frac{\Delta D}{D} \quad (6)$$

が導かれる。ここで、 m は小さな整数であり、共振器長は約56 cmであるので、 $\lambda_1 = 3.51 \mu\text{m}$ と $\lambda_2 = 3.37 \mu\text{m}$ の場合、式(6)の第1項は 10^{-12} のオーダーとなり、無視される。従って、合成波長の精度は共振器長の精度と等しくなる。つまり、共振器のモード次数が変わらなければ、元の波長の精度(約 2×10^{-8})と等しくなる。

3. 実験

3.1 干渉計

使用した光源は $3.51 \mu\text{m}$ (λ_1)と $3.37 \mu\text{m}$ (λ_2)で同時発振するHe-Xeレーザと $3.39 \mu\text{m}$ (λ_3)で発振するHe-Neレーザである(図2)。これらのレーザは単一モードで発振しており、その出力強度は前者が0.5 mW、後者が1 mWである⁷⁾。 λ_2 と λ_3 によって合成波長を作成する場合、 λ_1 が干渉フィルタによって除去され、 λ_2 と λ_3 は利得曲線のピークに共振器変調型の位相検波法によ

って安定化される。 λ_1 と λ_3 による合成波長の場合、 λ_2 がマスクでカットされ、干渉フィルタを利用してレーザは λ_1 の利得曲線のピークに安定化される。検出器D1とD2は可視光でも感度があるPbSeである。B1は可視光と赤外線を混合するための光学ガラス板に金属をコートしたビームスプリッタである。またB2は可視光と赤外線を透過するZnSe板(屈折率2.4)である。干渉計はマイケルソン型であり、可視域でも使用できるようにコリメータには軸外れ放物面鏡(焦点距離約77 cm)、ビームスプリッタB3に溶融石英板にインコネルコートしたもの(吸収30%、透過35%)を用いた。面P1とP2の間の距離が被測定量であり、P1とP2からの反射光による干渉じまは、それぞれInAs検出器によって検出される。

InAsはPbSeに比較して感度が幾分劣るが、ドリフトが少ないので低い周波数領域の測定にも都合が良い。これらの干渉じまは平行ばね式装置で数mmにわたって約0.025 フリンジ/sの速度で掃引される。このとき生じる信号が増幅された後、ローパスフィルタによって直流成分が除去される。次に、自乗器に通され、最後にローパスフィルタを経た後、チャートレコーダに記録される⁴⁾。自乗器の精度は0.5%であり、ローパスフィルタの遮断周波数は0.1 Hz(−40 dB/dec)である。開口の大きさは、ゲージ面(P1)が $7 \times 15 \text{ mm}$ 、ベースプレート面(P2)がゲージの両側で $7 \times 15 \text{ mm}$ である。記録されたチャート図から、ゲージとベースプレートに関する信号の位相 ϕ がアークサイン法 $\sin^{-1}\{(2I - I_M - I_m)/(I_M - I_m)\}$ によって求められ、これらの差が決定される。ここで、 I_M と I_m は信号の最大と最小であり、 I は測定しようとする

Table 4 The experimental results

Synthetic wavelengths μm	Standard deviations of measured values	
	$L=0.8\text{ m}$	$L=3.0\text{ m}$
$\lambda_{83}=464$	6.5×10^{-6} ($N=64$)	1.4×10^{-6} ($N=11$)
$\lambda_{81}=84.2$	2.9×10^{-7} ($N=32$)	1.8×10^{-7} ($N=23$)

N : Number of observations

L : Measured length

ところ（時刻）での信号の大きさである。ゲージとベースプレートに関する信号の大きさがそれぞれの平均値に近いところの I をチャート図から求めることによって、精度良く位相差が決定される。

3.2 測定結果

0.8 m のブロックゲージと 3 m ゲージの寸法が 6 か月にわたって合成波長法によって測定された。3 m ゲージは、直径が約 60 mm、長さ 3 m のガラス管の端面の一方にアルミニウム蒸着反射鏡を、他方に短いブロックゲージを接着材で貼ったものである。これらの測定結果を表 4 に示す。測定は、空調された実験室において 19～21°C の範囲内で行い、ゲージの温度を測定し熱膨張係数の補正を行った。また、空気の屈折率の補正は、気温、気圧及び水蒸気圧を利用する分散式による方法によって行った。合成波長信号の位相は、 $\lambda_{81}=84.2\text{ }\mu\text{m}$ の場合に 1%， $\lambda_{83}=464\text{ }\mu\text{m}$ の場合に 2% より良い精度で測定された。3 m の寸法を 1×10^{-7} の精度で一義的に決定するためには、 λ_{83} によっては 2.9×10^{-7} の精度で測定することが必要であるが、これらの条件は十分満たされていることが表 4 から分かる。最後に、 $\lambda_1=3.51\text{ }\mu\text{m}$ の単一波長で 1×10^{-7} の精度まで測定すれば、高精度に寸法が決定される。測定値の平均値は、0.8 m の場合、可視光で求められた値と標準偏差内で一致した。これらの結果は 5 m の寸法の測定に要求される精度も満たしているため、レーザの波長精度を考慮しても 5 m までの寸法を十分決定できる。レーザの波長精度が向上されれば、さらに長い寸法の測定への応用も可能であろう。

4. 測定誤差の評価

4.1 ゲージのたわみ

ゲージが長くなるとたわみなどによる端面のゆがみの影響が寸法の決定を困難にする。今、 $3.51\text{ }\mu\text{m}$ と $3.37\text{ }\mu\text{m}$ による測定について考えると、合致法の場合、常に位相を 1% の精度で測定をしなければならないので、ゲージの端面の精度は少なくとも $0.02\text{ }\mu\text{m}$ より良くなければならない。他方、合成波長法の場合は、決定したい寸法精度に見合うだけの精度があればよい。従って、要求される端面精度は、ゲージの長さに応じて悪くてもよ

いので、本方法は長いゲージの測定に有利である。

一方、ゲージのたわみによるコサインエラーは十分小さいので無視される。

4.2 レーザビームの調整

二つの波長が別々のレーザ共振器で発振している場合はそれらのビームの光軸の調整が必要である。今、 λ_2 のビームが λ_3 に対して θ だけ傾いているとすると、これは λ_2 の波長が $\lambda_2(1+\theta^2/2)$ に変わったことと等価である。従って、合成波長 λ_{83} は $\lambda_{83}\{1-\theta^2\lambda_2/(\lambda_2-\lambda_3)\}$ と変わるので、 θ が大きいと合成波長の精度はかなり悪くなる。He-Ne レーザ ($\lambda_2=3.39\text{ }\mu\text{m}$) と He-Xe レーザ ($\lambda_3=3.37\text{ }\mu\text{m}$) の場合、合成波長の精度が 4×10^{-6} (被測定寸法が 5 m の場合) 以上であるためには、 θ は $2.4 \times 10^{-4}\text{ rad}$ 以内でなければならない。これはレーザのバックトークの効果を利用して成しとげられる⁸⁾。図 2 において、集光凹面鏡 1 とピンホールの間に微動可能な平面鏡を挿入し、そして、検出器 D1 の出力をオシロスコープに連結する。まず、可視レーザのみを入射させ、バックトーク効果によってその出力強度の変動が最大になるように、つまり、平面鏡からの反射ビームが全く元の光路を通るように、平面鏡が調整される。次に、He-Xe レーザのみを入射させ、その出力強度の変動が最大になるように、ビームスプリッタ B1 が調整される。最後に、赤外 He-Ne レーザのみを入射させ、同様にビームスプリッタ B2 が調整される。

4.3 空気の屈折率の補正

合成波長に対する空気の屈折率は群屈折率となる。あらかじめ、真空セルを用いた合成波長による干渉測定によって、標準状態における空気の屈折率を求めておき、これと気温、気圧および水蒸気圧の測定値を用いて、空気の屈折率の補正を行った。この補正精度は 2×10^{-7} より良い⁹⁾。

4.4 レーザの波長安定化

位相検波法によって利得曲線のピークに安定化したレーザの波長精度は 2×10^{-8} 程度となるので、2 波長のスペクトルが別々のレーザから得られる場合、合成波長の精度は良くも悪くもなく、一定である。しかしながら、2 波長のスペクトルが同時発振レーザの場合は様子が違ってくる。この場合、一方の波長の利得曲線のピークに安定化することによって、もう一方の波長も付随的に安定化される。このようなスペクトルによる合成波長の精度はすこぶる良くなるが、すでに述べたように共振器のモード次数が 1 だけでも変わると合成波長も約 3×10^{-6} だけ変化する。従って、モード次数を常に一定にする必要がある。このため、レーザ共振器の総合的な熱膨張係数を $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 以下に設計し、そして、次のことを行

Fig. 3

(a) Laser power variation as a function of cavity length
(b) Interference fringe signal after squaring for three different cavity mode numbers

った。モード次数 M が変化すると、2 波長のレーザ出力の強度比が変わり、式 (1) から分かるように干渉じま信号のコントラストも変化する。従って、コントラストが一定になるように共振器長を電歪素子 (PZT) で制御した。このコントラスト C_0 は $(I_M - I_m)/(I_M + I_m)$ によって与えられる。ここで、 I_M と I_m は信号の最大と最小である。そして、 C_0 は図 3 に示すような自乗した後の干渉じま信号から求められる。図 4 は、モード次数を変えたときの C_0 の測定例を示したものである。実際の寸法測定において、モード次数は 1 程度しか変わらないので、モード次数を固定できることが分かる。この実験では、図 4 に示す M の次数でレーザを安定化した。

5. 結 論

以上の結果より、合成波長による方式は 5 m 程度までの端面基準器などの寸法を 1×10^{-7} の精度で測定できることがわかる。また、本方法は、被測定寸法があらかじめ $\pm 116 \mu\text{m}$ の精度まで知られておれば、非接触・高エネルギーでその絶対寸法を決定できるので、高精度が要求される測定に有効である。さらに、測定環境の悪い所や被測定物の面精度が悪い場合における寸法測定にも適してい

Fig. 4 Measured contrast of interference fringe signal as a function of cavity mode number

る。

最後に、御助言・御指導いただいた計量研究所第 1 部長清野昭一博士に感謝する。

参 考 文 献

- 1) K. M. Baird: The Role of Interferometry in Long Distance Measurement, *Metrologia*, **4**, 3, (1968) 135.
- 2) C. W. Gillard, N. E. Buholz and D. W. Ridder: Absolute Distance Interferometry, *Opt. Engg.*, **20**, 1, (1981) 129.
- 3) H. Matsumoto: Length Measurement Using Infrared Two-wavelength He-Xe Laser Interferometer, *Rev. Sci. Instrum.*, **53**, 5, (1982) 641.
- 4) H. Matsumoto and S. Seino: Infrared Two-wavelength Interferometry for Measuring Long Length, *Ann. CIRP*, **31**, 1, (1982) 401.
- 5) 松本弘一: 2 波長干渉測長法, *O plus E*, **37** (1982) 71.
- 6) C. Polhemus: Two-wavelength Interferometry, *Appl. Opt.*, **12**, 9, (1973) 2071.
- 7) H. Matsumoto: Infrared He-Xe Laser Interferometry for Measuring Long Length, *Appl. Opt.*, **20**, 2, (1981) 231.
- 8) H. Matsumoto: Alignment of Length-measuring IR Laser Interferometer Using Laser Feedback, *Appl. Opt.*, **19**, 1, (1980) 1.
- 9) H. Matsumoto: Measurement of the Group Refractive Index of Air by Two-wavelength Interferometry, *Opt. Commun.*, **44**, 1, (1982) 5.