



## ゲージブロック測定のための干渉縞解析

尾坂 一\*・松本 弘一\*\*

\* 長野県精密工業試験場 〒394 岡谷市 9959

\*\* 計量研究所 〒305 つくば市梅園 1-1-4

(1990年4月19日受付, 1990年7月5日受理)

### Analysis of Interference-Fringe Patterns for Length Measurement of Gauge-Blocks

Hajime OSAKA\* and Hirokazu MATSUMOTO\*\*

\* Nagano Precision Industry Research Institute, 9959, Okaya 394

\*\* National Research Laboratory of Metrology,  
1-1-4, Umezono, Tukuba 305

(Received April 19, 1990; Accepted July 5, 1990)

A fringe analysis system for measuring the length of a gauge-block is described, which is composed of a high sensitive TV-camera, an image processor and a personal computer. The phase difference between equidistant and straight fringes formed on a gauge-block and base-plate is obtained by calculating the correlation coefficients between two fringe profiles. The experimental results show that this automatic method can give the accurate length of the gauge-block as well as usual operator's observation method.

#### 1. はじめに

長さの基準として用いられるゲージブロックを高精度に測定する方法として、多波長の光波干渉計を使用し干渉縞の合致により長さを決定する合致法がある。この場合、 $\pm 0.02 \sim 0.04 \mu\text{m}$  程度の高精度な測定が可能である<sup>1)</sup>。しかし、干渉縞の読取りには高度な技術と長い時間を要する。一方、測定値の補正を行うための気温、気圧、水蒸気圧等のセンサーではパソコンと容易に接続が可能である。したがって、干渉縞の読取りがゲージブロックの絶対測定を自動化する上でのネックとなっている。最近、光源にレーザーを用いて干渉縞の画像処理を行うことによりゲージブロックの長さを算出する干渉計<sup>2)</sup>も現れたが、非常に高価である。

そこで、従来の水銀ランプ等において画像記録処理装置を使い干渉縞の読取りおよび解析の部分について自動測定(パソコン処理)のシステムを組み上げた。また、この装置を使用して得た測定値と実際に目視観測した値との比較を行ったが、ほぼ一致する結果を得られた。

#### 2. 合致法原理

実験に用いた干渉計(NRLM-ツガミゲージ干渉計、(株)ツガミ)の光学系の概略図<sup>3)</sup>を Fig. 1 に示す。ゲージブロックをベースプレート上に密着し、この二つの面から反射した光と参照鏡からの光を干渉させる。両光線をわずかに傾けることにより、両表面上に干渉縞が現れ、その間の距離により縞の位置がずれる(Fig. 2 参照)。この干渉縞の位置差( $\epsilon$ )を測定することにより、ゲージブロックの長さ  $L$  は次のように定義される。

$$L = (n + \epsilon) \times \lambda / 2 \quad \text{ただし } \epsilon = D/d \quad (1)$$

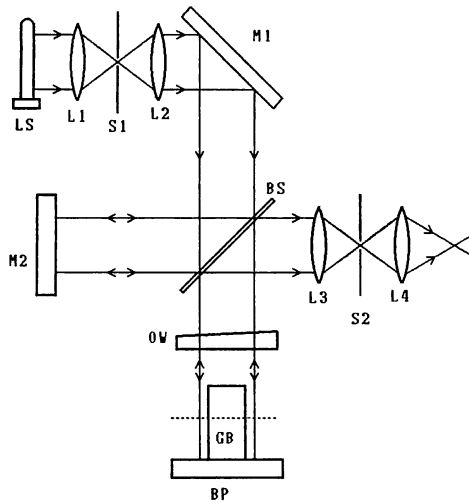
ここで、 $n$  は大きな整数、 $\lambda$  は光源の波長である。上式のままでは  $L$  は  $1/2$  波長ごとの値を得ることになるが、波長が相違している他の単色光を用いて同様に位相差を測定し、 $n$  を変化させていけばほぼ一致した  $L$  の値が求まる。今回の実験では光源に水銀ランプ(198 Hg)を用い、波長がそれぞれ 579, 577, 546, 436 nm の四つの光を使用した。

### 3. 実験装置

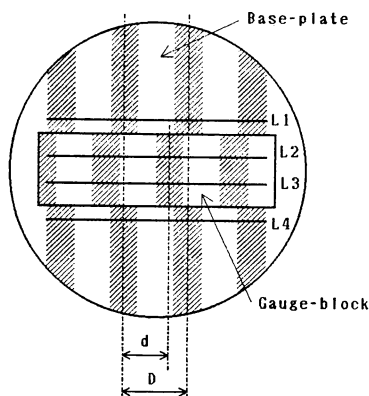
#### 3.1 TV カメラ

干渉計の接眼部より観察される干渉縞は非常に暗いため、一般に使用されるカメラでは撮影が困難であり、超低照度用のカメラ (WV 1900 松下電器(株)) を用いた。これは、水平解像度 600 本以上また最低照度が  $3 \times 10^{-3}$  ルックスという性能をもつ。

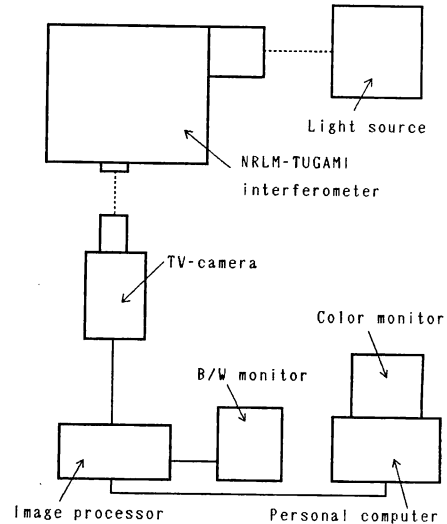
画像の分解能は TV カメラのレンズ等 (焦点距離) に依存し、この分解能を上げるためには、カメラの撮像



**Fig. 1** Schematic diagram of optical system of Gauge-Block interferometer. LS: Light source, L1, L2, L3, L4: Condensers, S1, S2: Slits, M1: Reflector, M2: Reference mirror, BS: Beam splitter, OW: Optical wedge, GB: Gauge-block BP: Base-plate.



**Fig. 2** Interference pattern. The phase difference ( $\epsilon$ ) is determined by  $d/D$ . L1, L2, L3 and L4 show the positions of sampling data line.



**Fig. 3** Schematic diagram of the experimental setup.

管にできるだけ大きく撮影できるようにカメラ、レンズを設定する。今回は画像が小さいため望遠系のレンズ (最大口径比 1.14, 焦点距離 50 mm) を使用した。実験装置の構成図を **Fig. 3** に示す。

#### 3.2 画像処理装置

画像処理装置として(株)フォトン製の FDM 98-4 を利用した。画像メモリは  $256 \times 256$  の画素数と 64 の諧調数をもつ画面を 4 画面処理できる容量をもつ。また、標準的な画像処理ソフトが添付されており、画像処理およびデータの転送等に利用した。

### 4. 画像処理

#### 4.1 画像入力

干渉縞像のコントラストは使用波長、強度に依存し、黄色、紫、緑の順にコントラストがよい。とくに黄色系の光は強度が弱く 64 諧調の内 5 諧調しか得られなかった。**Fig. 4** に 576 nm, 546 nm の光を使用したときの入力データの強度分布を示す。そこで、入力画像信号をデジタル化する A/D コンバータの基準電圧の幅を狭くし、結果的に取り込まれたときの画像データの強度差を広げた。このとき明暗のレベルにオフセットが生ずるが、その変化は振幅の変化に現れるが位相には影響を与えない。また、画像メモリ上のゲージブロックに相当する画素数は 256 個の容量に対して半分以下しかないため、メモリ上で拡大 (面積比 4 倍) を行い分解能を上げた。

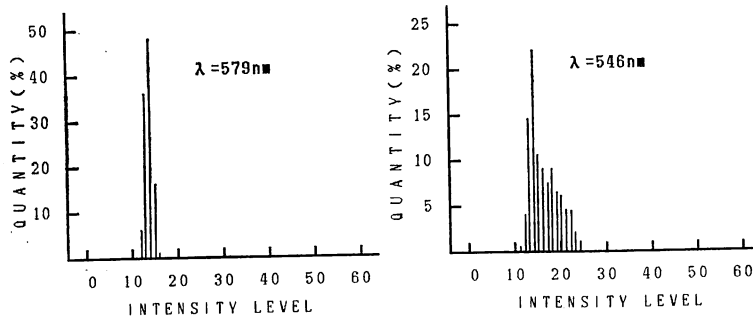


Fig. 4 Histogram of intensities of data lines before filter-processing; (a) for the wavelength of 579 nm and (b) for 546 nm.

#### 4.2 サンプリグ

断面寸法  $30 \times 9$  mm のゲージブロックは  $184 \times 54$  画素またベースプレートは  $256 \times 256$  画素で構成されている。ゲージブロックの面の両端はダレが生じることがあるため、その部分を除き1ラインのサンプリングデータを164個とした。また処理装置の容量から画像データとして256本のラインが得られる。干渉縞が垂直かつ直線であればそれぞれ1ラインのデータで代表することができるが、通常密着状態、形状誤差の影響等でわずかではあるが縞が曲がることが多い。これら誤差を小さくするため Fig. 2 に示すようにゲージブロックは  $L_2, L_3$ , ベースプレートについては  $L_1, L_4$  の位置でデータをサンプリングした。

#### 4.3 位相差の検出および算出法

ゲージブロックの干渉縞の位相差をFFT(フーリエ変換法)により算出する方法が報告されている<sup>9)</sup>。しかしこの方法ではデータ数が制限され、連続したデータでなければ正確に解析できないという欠点があり、そのためフィルタリング処理をしている。また、一つのデータ群のスペクトル解析には有効であるが、二つの信号の位相差を得るためにはさらにデータ処理をつけ加えなければならない。また他の方法として2値化した干渉縞の位置を求めて位相差を算出する方法があるが、前記したように使用波長に依存して信号の強度分布が変わってしまうため、各波長ごとに適切な処理を行う必要があり複雑であることが予想される。

ここでは、二つの信号の関係を調べるために使われる相関係数を応用して位相差を算出した。前節で得られたゲージブロックおよびベースプレートの干渉縞各2本のデータをそれぞれ積分し、 $f_g(i), f_p(i)$  ( $i$  は1ライン中のデータ番号  $i=1, 2, 3, \dots, N$ ) とする。なお積分処理することにより画像上のノイズ低減の効果も期待できる。

Fig. 5 に干渉縞とそこから得られたデータの概略図を

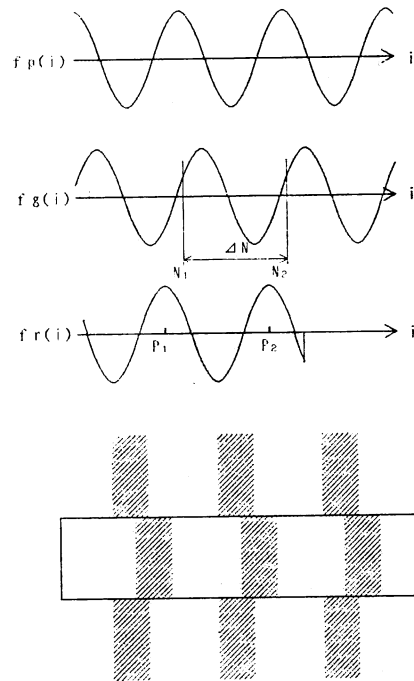


Fig. 5 Calculation of a phase difference by using correlation coefficients.  $f_g(x)$ : sampled fringe data formed on gauge-block,  $f_p(x)$ : sampled fringe data formed on base-plate,  $f_r(x)$ : correlation coefficients between  $f_g(x)$  and  $f_p(x)$ .

示す。両者の相関係数  $r$  は次式で得られる。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N \{f_g(i) \cdot f_p(i)\}}{\left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^N f_g^2(i)} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N f_p^2(i)} \right\}} \quad (2)$$

しかし、上式では位相差は算出できないため、 $f_g(i)$  のほぼ中心部分の連続したデータを  $\Delta N$  個 ( $N_1 \sim N_2$ ) 取り出しこれを参照データとし、 $i=1$  から同数の  $\Delta N$  個までの  $f_p(i)$  のデータとの相関係数  $r(1)$  を求める。次に参照データはそのまま一つデータをずらした  $f_p(i)$  ( $i=2 \sim (\Delta N + 1)$ ) との相関係数  $r(2)$  を求める。以下同

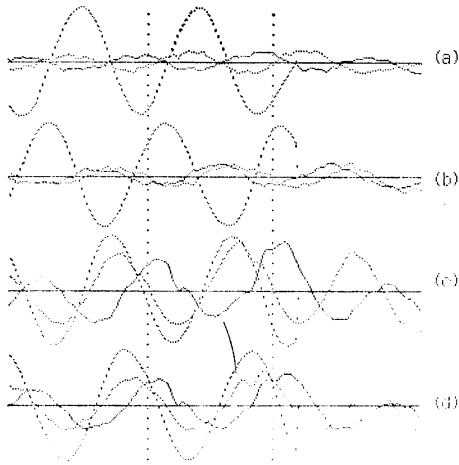


Fig. 6 Experimental results. Wavelengths are 579 nm (a), 577 nm (b), 546 nm (c) and 436 nm (d), — : Gauge-block data, ····· : Base-plate data, - - - : coefficient curves.

様にして計算を行うと次式に示すような相関係数の関数  $f_i(j)$  ( $j=1, 2, 3, \dots, (N-\Delta N)$ ) を求めることができる。

$$f_i(j) = \frac{\sum_{l=1}^{\Delta N} \{f_g(k) \cdot f_p(l)\}}{\left\{ \sqrt{\sum_{k=1}^{\Delta N} f_g^2(k)} \cdot \sqrt{\sum_{l=1}^{\Delta N} f_p^2(l)} \right\}} \quad (3)$$

ただし  $k=i+N_1-1$   $l=i+j-1$

$f_i(j)$  を計算し結果を表示すると Fig. 5 に示すようにピーク値 ( $P_1, P_2$ ) が現れる。ここで Fig. 2 および (1) 式により示された縞間隔 ( $D$ ) および位相ずれ ( $d$ ) は

$$D = P_2 - P_1, \quad d = N_1 - P_1 \quad (4)$$

となり位相差  $\varepsilon$  は次式により計算できる。

$$\varepsilon = d/D = (N_1 - P_1)/(P_2 - P_1) \quad (5)$$

ここで、すべてのデータ ( $N$  個) で相関係数を計算すると  $N$  番目の次に 1 番目のデータを配列することになり、 $f_i(j)$  の連続性が失われてしまう。また、任意に決めたゲージブロックの基準となるデータ数 ( $\Delta N$  個) が少ないと相関係数のピーク値の検出が不安定となり、多いとピーク値の数が減り位相差が算出できない。今回は  $\Delta N = N/3$  程度としたが、原画像における干渉縞の数も考慮し決めなければならない。

以上の方法により算出された相関係数の曲線  $f_i(j)$  および使用したゲージブロック、ベースプレートのデータ  $f_g(i), f_p(i)$  を Fig. 6 に示す。使用波長が短くなるに従って干渉縞のコントラストが増す様子がわかる。

### 5. 測 長 実 験

#### 5.1 実験方法

観測者 2 名により従来の方法 (目視検査) でゲージブロックを測定する。同時に今回試作したシステムを用い干渉縞データを取込み位相差を決定した。実際にゲージブロックの寸法を求めるためには、環境状態の測定が必要であるが、今回の実験では両者による位相差の算出の相違の検討が中心であるため、環境状態の測定は行わなかった。したがって、測定はできる限り短時間で行った (1 回の測定時間約 3 分) ほか、温度の影響を受けにくい比較的短い 2 本のゲージブロック (10, 25 mm) を測定した。断面寸法はそれぞれ 30×9 mm, 35×9 mm であり、金属製のベースプレート上に密着した。

#### 5.2 測定結果および考察

実験では環境状態の補正を行わないため、位相差のばらつきは大きい。そこで、一連の測定 (肉眼, 自動処理それぞれ 2 回) の平均値を取り誤差を算出した。また比

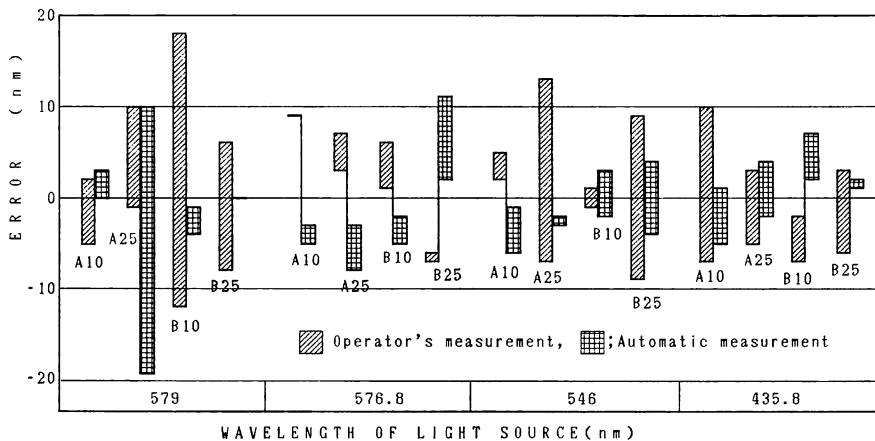


Fig. 7 Comparison of measured values between usual operator method and this automatic method. 10, 25; Length of gauge-blocks (mm), A, B; two operators.

較しやすいよう長さに換算した (Fig. 7).

それぞれの最大誤差は観察者2名ともに  $0.013 \mu\text{m}$  (4.5%) であり, そのときの波長は同一 ( $\lambda=576 \text{ nm}$ ) であった. 他の波長での誤差は  $\pm 0.01 \mu\text{m}$  の範囲に入っている. これは  $\lambda=579, 576 \text{ nm}$  での干涉縞像のコントラストが他の波長に比べて悪いことによる. これらの結果をもとに統計手法により平均値の差の検定<sup>5)</sup>を行ったところ, 測定方法の違いによる差があると認められなかった.

当研究で用いた画像処理ボードのメモリは  $256 \times 256 \times 64$  階調であるので, 1ラインを構成するデータは164個とした. このため相関係数のピーク位置の1ポイントの誤差が, 位相差において0.6%の誤差に相当する. この誤差を小さくするには少なくとも  $512 \times 512 \times 256$  階調の画像メモリが必要である. また, 同様の理由およびTVカメラの分解能の問題から, 原画像はできるだけ大きく取り込む必要がある.

## 6. ま と め

本研究では, 高度な技術と長い時間を要するゲージブ

ロックの光波干涉測定を, 相関係数算出という比較的容易な自動測定法により行った. 肉眼での測定と本方法での測定において,  $0.01 \mu\text{m}$  以内で差が生じなかった. この結果, 温度等の環境データをパソコンに直接入力すれば, 測定者はゲージブロックのセッティングのみで測定を終了することができる.

最後に実験装置の準備をいただいた計量研究所の瀬田勝男氏に感謝いたします.

## 文 察

- 1) 青木保雄: 改訂精密測定(1) (コロナ社, 東京, 1986) pp. 68-72.
- 2) Tesa Metrology Ltd.: NPL-Automatic Gauge Block Interferometer Catalog (1989).
- 3) (株)ツガミ: NRLM-ツガミゲージ干涉計カタログ (1989).
- 4) A. Michel: "Automation of length measurements which involve analysis of interference patterns," *Rev. Sci. Instrum.*, **6** (1984) 860-865.
- 5) Paul G. Hoel (浅井 晃, 村上正康共訳): 初等統計学 (培風館, 東京, 1976) pp. 152-168.