

縞走査シェアリング干渉法による非球面の干渉測定*

加納 敏夫**・谷田貝豊彦***,†・斎藤 弘義***

** (株)リコー 〒143 東京都大田区中馬込 1-3-6

***理化学研究所 〒351 和光市広沢 2-1

(1983年8月17日受理)

Aspherical Surface Testing with Shearing Interferometer
Using Fringe Scanning Detection Method

Toshio KANOU,** Toyohiko YATAGAI***,† and Hiroyoshi SAITO***

** Ricoh Co., Ltd., 1-3-6, Nakamagome, Ohta-ku, Tokyo 143

*** Institute of Physical and Chemical Research, 2-1, Hirosawa, Wako 351

Described is a technique for accurately measuring the wavefront aberration of aspherical optical surfaces with a lateral shearing interferometer. A computer controlled phase measuring interference technique is employed, which provides greater accuracy and real time data analysis. Key elements of the present system are a lateral shearing interferometer with a parallel plate, a piezoelectric-driven mirror, a 2-dimensional image sensor, and a microcomputer system with a graphic display. The shearing interferometer gives a fringe pattern corresponding to the derivative of the wavefront, which is analyzed by the fringe scanning method. By integrating the derivative of the analyzed data, we have the wavefront aberration of the test optics over an aperture containing 32×32 element array. A rms accuracy of measurement is $1/32$ wavelength is achieved on the evaluation of a $f/4$ aspherical mirror.

1. ま え が き

精密加工技術の発達にともない、加工部品の形状計測技術も高精度化が要求されている。とくに最近では非球面の使用が各方面で検討されており、非球面の面精度測定に関するニーズが高い¹⁾。

非球面測定法は、触針式と光学式に大別される。触針式は、直接触針子を非球面に接触させて計測するもので、非球面の絶対形状が測定可能である^{2,3)}。しかし、点計測なので測定に時間がかかり、面を破壊するおそれがある。これに対して光学的干渉計測法は、非接触であり、高感度で面全体の形状が測定できることが特徴である。

非球面の干渉測定法としては、計算機ホログラムによる方法がよく知られている^{4,5)}。この方法は、製作が困難な非球面干渉原器を計算機合成によるホログラムで実現しようとするものである。非球面干渉計測法の可能性

として重要なものにシェアリング干渉がある^{6,7)}。被検非球面波を互いに横ずらしして干渉させるので干渉原器は不要である。横ずらし量を変化させることにより、測定感度が可変になることも特徴である。

本論文では、横ずらし干渉法による非球面測定システムについて述べる。本システムでは、干渉計の一方の光路長を変化させて、得られる干渉縞の変化を解析する縞走査検出法⁸⁾によって干渉縞の解析を自動化している。

2. シェアリング干渉計と位相検出

Fig. 1 に位相変調機構を備えたシェアリング干渉計の配置を示す。レーザー光はコリメーターレンズで平行にされ、レンズ L_3 を経て被検非球面ミラーで反射されて、ふたたびレンズ L_3 を通ってビームスプリッター BS_2 で2分される。一方は BS_1 , BS_3 を通って2次元イメージセンサー上にいたる。他方はピエゾ素子駆動のミラー M_1 で反射され、平行平面板を通過することにより横ずらしを受ける。シェアされた波面は BS_3 でもう一方の波面と重ね合わせられて干渉縞を生じる。波面のシェア量 s は平行平面板を傾けることにより調節できる。被検ミラーの射出瞳面を、レンズ L_3 と L_4 で観測面

* 第8回光学シンポジウム (1983年6月20日、東京) において講演

† 現在: 筑波大学理工学系 〒305 茨城県新治郡桜村
Present address: Institute of Applied Physics,
Tsukuba University, Sakura-mura, Niihari-gun,
Ibaraki 305

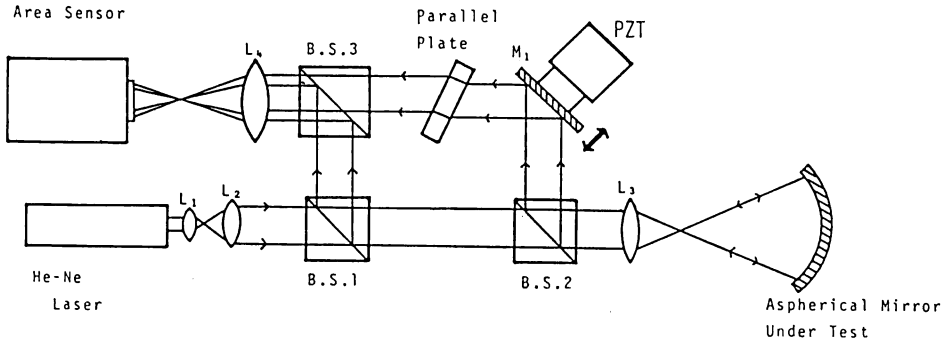


Fig. 1 Lateral shearing interferometer with a phase modulation mirror.

(2次元イメージセンサー面)に結像すると、BS₁とBS₃を通過した波面は、

$$w_1(x, y) = a(x, y) \exp\{-ikw(x, y)\} \quad (1)$$

と書ける。ただし、被検ミラーの波面収差を $w(x, y)$ 、 $a(x, y)$ は波面の振幅で、 λ を使用波長として $k=2\pi/\lambda$ である。

他方、変調ミラー M₁ で、相対的に光路長を l だけ変化させ、さらに平行平板で x 方向に対して s のシエラ量を与えられた波面は、 $b(x, y)$ を振幅として、

$$w_2(x, y) = b(x, y) \exp\{-ik[w(x+s, y)+l]\} \quad (2)$$

とあらわせる。

したがって、干渉縞は(1)、(2)式より

$$\begin{aligned} I(x, y, l) &= |w_1(x, y) + w_2(x, y)|^2 \\ &= \alpha + \beta \cos\{k[\Delta w_x(x, y) - l]\} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、

$$\alpha = a^2(x, y) + b^2(x, y) \quad (4)$$

$$\beta = 2a(x, y) \cdot b(x, y) \quad (5)$$

$$\Delta w_x(x, y) = w(x+s, y) - w(x, y) \quad (6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Delta w_x(x, y) &= w(x, y) + \frac{\partial w}{\partial x} s + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{s^2}{2} + \dots - w(x, y) \\ &\doteq \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} \cdot s \end{aligned} \quad (6')$$

すなわち、高次項が無視できる程度微小な s に対しては、被検波面収差の微分、すなわち横収差が、得られる干渉縞から求まる。

一方、位相変調量を1周期にわたり N ステップ変化させると、

$$l_i = \frac{\lambda}{N} i \quad (i=0, 1, \dots, N-1) \quad (7)$$

ここで、(3)式は次式のように変形できる。

$$\begin{aligned} I(x, y, l_i) &= \alpha + \beta \cos k\Delta w_x(x, y) \cos \frac{2\pi}{N} i \\ &\quad + \beta \sin k\Delta w_x(x, y) \sin \frac{2\pi}{N} i \end{aligned} \quad (8)$$

また、 $I(x, y, l_i)$ は l_i に対して周期関数であるのでフーリエ展開でき、

$$\begin{aligned} I(x, y, l_i) &= C_0 + \sum_{i=0}^{N-1} C_i \cos \frac{2\pi}{N} i \\ &\quad + \sum_{i=0}^{N-1} S_i \sin \frac{2\pi}{N} i \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、

$$C_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I(x, y, l_i) \cos \frac{2\pi}{N} i \quad (10)$$

$$S_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I(x, y, l_i) \sin \frac{2\pi}{N} i \quad (11)$$

(8)式と(9)式を比較すると、(10)式と(11)式は次のように書ける。

$$C_1 = \beta \cos k\Delta w_x(x, y) \quad (10)'$$

$$S_1 = \beta \sin k\Delta w_x(x, y) \quad (11)'$$

したがって、(10)'、(11)' 式より

$$\Delta w_x(x, y) = \frac{1}{k} \tan^{-1} \frac{S_1}{C_1} : \text{mod}(2\pi) \quad (12)$$

すなわち、位相 $\Delta w_x(x, y)$ を求めるには、参照光の位相を λ/N きざみで N 段階変化させ、干渉縞の強度 $I(x, y, l_i)$ を N 回測定し、(10)、(11)式にしたがって、 $\cos(2\pi/N)i$ と $\sin(2\pi/N)i$ の重みをかけて加算したものの比をとり、これの \tan^{-1} を計算すればよい。

ここで、(12)式には、干渉縞のバイアス成分 α や、コントラストの項 β が含まれていない。干渉縞解析の精度を低下させるバイアス成分やコントラストの変化の影響が自動的に補正されていることが、この縞走査検出法の特徴である⁹⁾。

$\Delta w_x(x, y)$ は x 方向に対する微分なので、これを積分すれば、 x 方向に平行な断面形状が求まる。

*1 厳密には、 $\partial w/\partial x \gg s \partial^2 w/\partial x^2$ であり、光学面のようなめらかな面に対しては、 s に対する条件はゆるい。

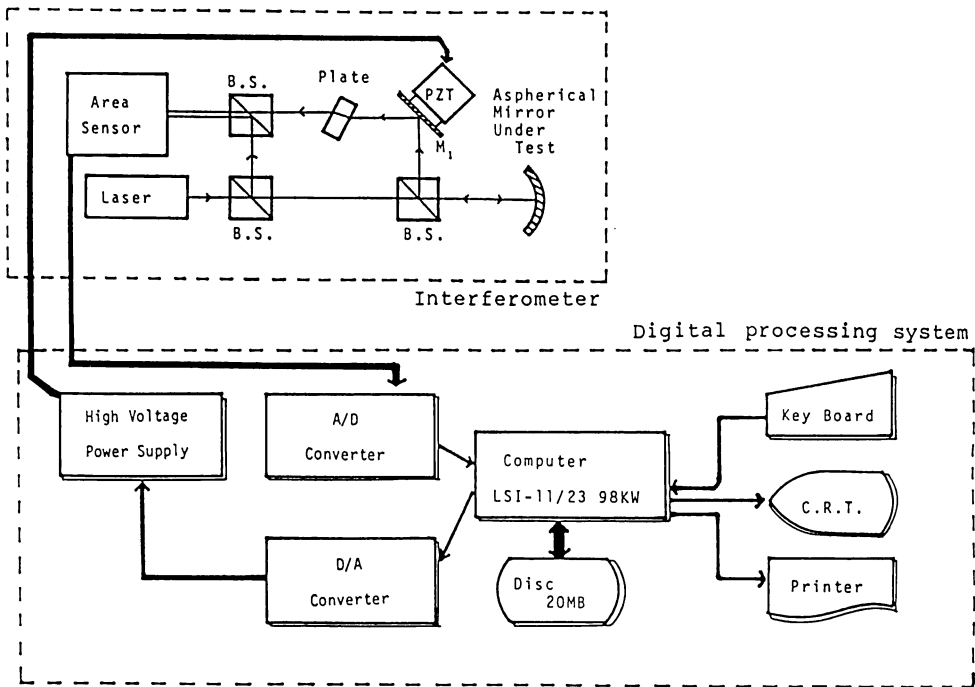


Fig. 2 Block diagram of the experimental setup.

$$w_x(x, y) = \frac{1}{s} \int \Delta w_x(x, y) dx \quad (13)$$

正しい波面形状 $w(x, y)$ を求めるには、 y 方向に対する断面形状 $w_y(x, y)$ を、 x 方向と同様の手続によって求め、両者から算出する必要がある。

x, y 両方向に対する偏微分 $\partial w/\partial x$ と $\partial w/\partial y$ から $w(x, y)$ を算出するアルゴリズムが知られている^{10,11)}。これらはいずれも最小2乗法によるものである。ここでは最も簡単な方法を採用した。すなわち、 x 方向に対しては、測定に必要な数だけの断面形状を求めておき、これらの断面形状間の高さを、別途計測しておいた y 方向の一断面形状を基準に補正するという方法である¹²⁾。

3. 測定系と処理プロセス

3.1 デジタル干渉計

装置のブロック図を Fig. 2 に示す。光源は 2 mW の He-Ne レーザー (Melles Griot, LHP-121)。参照光の位相を変調する piezoelectric 素子は Burleigh 社 PZ-91 型で、12 ビットの D/A コンバーター (Datel 社 HK 12 BGC) の出力を基準電圧とする高圧電源によって駆動される。干渉縞は、 32×32 素子の 2 次元イメージセンサー (Reticon RA 32×32 A) によって検出され、12 ビットの A/D 変換器 (Datel HZ 12 BGC) でデジタル信

号に変換される。全体のシステムはマイクロコンピュータ (DEC LSI-11/23) によって制御される。測定結果は、グラフィックターミナル (Retro-Graphics 社製) によって表示される。

3.2 処理手順

測定に入る前に、piezoelectric 素子の較正を行ない、その後以下に述べる 5 段階のステップで処理を進める。

- 1) 測定パラメータの設定の段階では、piezoelectric 素子の初期位置と終了位置、piezoelectric 素子の移動きざみ量、データ収集時の平均回数、データファイル名などを指定する。
- 2) データ収集の段階では、上記パラメータ設定の段階で指定された回数データを入力し平均値を求めイメージセンサーの各素子間にわたる移動平均をとる。
- 3) 位相計算の段階では、(12) 式にしたがって位相項を求める。結果は、 $\text{mod}(2\pi)$ になっているから、各所に 2π だけ位相が飛躍した場所があらわれる。位相飛びの方向 ($-\pi$ から π か、 π から $-\pi$ か) を判別して、これを補正して正しい位相分布を求める。
- 4) 3) と直交する方向に対しても同様な測定を行ないこの方向の位相分布を基準にして、全体の位相分

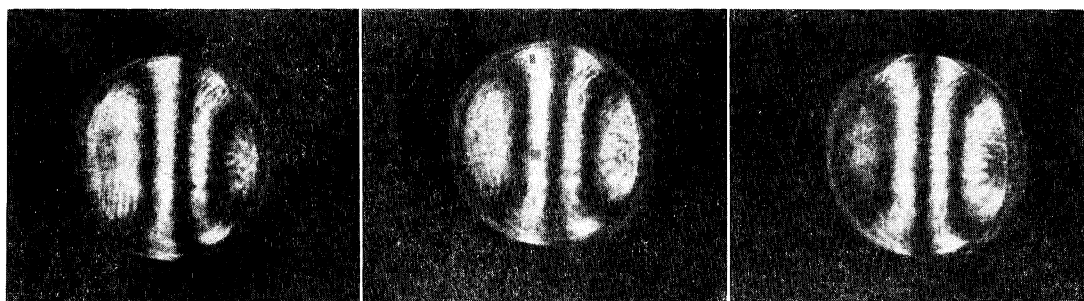


Fig. 3 Lateral shearing interferograms with different reference phases.

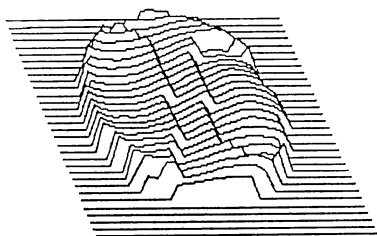


Fig. 4 Phase distribution calculated by the fringe scanning method.

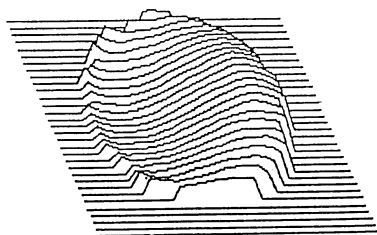


Fig. 5 Lateral aberration obtained by correcting 2π phase gaps in Fig. 4.

布を計算する。

- 5) 最後に、結果をグラフィックターミナル上に表示する。

4. 測定例

以下に、直径 100 mm, 焦点距離 400 mm の非球面鏡の測定例を示す。Fig. 3 は、シェアリング干渉による干渉縞である。x 方向に横ずらしを与え、位相を 3 段階に変化させている。

Fig. 4 に、位相を 16 段階変化させて位相解析をした結果を示す。位相の 2π の飛びを補正した結果を Fig. 5 に示す。Fig. 6 に、Fig. 5 の位相分布を積分して得られる x 方向の断面形状分布を示す。y 方向の測定を行ない、全体の位相分布の補正を行なった結果を Fig. 7 に示す。

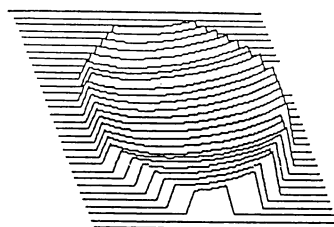


Fig. 6 Sectional shapes of the test wavefront obtained by integrating the lateral aberration in Fig. 5 to the x-direction.

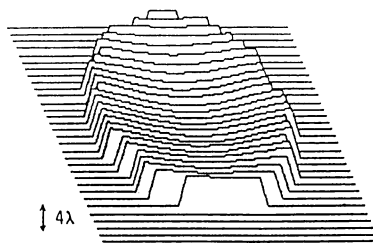


Fig. 7 Isometric plot of the wavefront shape after height matching.

測定の繰返し誤差は、rms 値で $1/32$ 波長であった。

5. まとめ

縞走査位相検出法を用いたシェアリング干渉縞の自動解析法について述べた。縞走査位相検出法は、位相測定精度の非常に高い縞解析法であるが、測定レンジが狭い欠点があった。一方、シェアリング干渉法は、測定レンジが可変で広く、しかも参照用の基準面を必要としないので比較的収差量の大きな非球面の測定に適した方法である。本論文で述べた方法は、両者を組み合わせたもので、非球面を高精度で測定しうるものである。実験的に $1/32$ 波長の繰返し精度 (rms 値) が得られた。

文献

- 1) 田島 晃, 横田秀夫: 写真工業, No. 10 (1982) 22.

- 2) 春本 功, 渡部国男: 機械の研究, **28** (1976) 1071.
- 3) J. Dil, W. Mesman and J. C. Driessen: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **235** (1980) 85.
- 4) A. J. MacGovern and J. C. Wyant: Appl. Opt., **10** (1971) 619.
- 5) T. Yatagai and H. Saito: Appl. Opt., **17** (1978) 558.
- 6) J. C. Wyant: Appl. Opt., **12** (1973) 2057.
- 7) M. V. R. K. Murty: *Optical Shop Testing*, ed. D. Malacara (John Wiley and Sons, New York, 1978) p. 81.
- 8) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: Appl. Opt., **13** (1974) 2693.
- 9) 谷田貝豊彦, 栗田裕之, 斎藤弘義: レーザー科学研究(理化学研究所), **3** (1981) 182.
- 10) M. P. Rimmer: Appl. Opt., **13** (1974) 623.
- 11) J. Hardy, J. Lefebvre and C. Koliopoulous: J. Opt. Soc. Am., **67** (1977) 360.
- 12) T. Yatagai, M. Idesawa, Y. Yamaashi and M. Suzuki: Opt. Eng., **21** (1982) 901.