



縞走査シアリング干渉法による非球面測定

斎藤 圭介*・栗田 裕之**・加藤 正彦**

オリンパス光学工業(株)技術開発本部, * 光学技術部, ** 諸隈研究室
〒192 八王子市久保山町 2-3

(1991年12月3日受付, 1992年2月12日受理)

Aspheric Surface Testing by Using a Phase-Shifting Shearing Interferometer

Keisuke SAITO,* Hiroyuki KURITA** and Masahiko KATO**

* Optical Research Department, ** T. Morokuma Research Laboratory,
Olympus Optical Co., Ltd., 2-3, Kuboyama-cho, Hachioji 192

(Received December 3, 1991; Accepted February 12, 1992)

A phase-shifting shearing interferometer has been built for testing aspheres which have large asphericity. Testing such aspheres whose asphericity is hundreds waves or more requires elaborated techniques. These involve shearing interferometry, phase shifting interferometry, and a special technique called 'Digital Null Testing.' Digital Null Testing is a technique which simulates null testing by computer generated holography. Instead of actually generating a hologram, it calculates a phase distribution over an observation plane where interferogram is formed. Subtraction of the phase from the measured results gives figure errors of the test asphere. By applying these techniques, we constructed an interferometer to test aspheres. We show the measured result together with the result measured from a stylus method.

1. はじめに

1.1 背景

近年精密加工技術の発達により, 数十から数百波長程度の大きな非球面量を有するレンズの作製が可能となってきた。また, AV用ピックアップに見られるように, 高精度な非球面が安価に作製され実用化されている。周知のように非球面を光学系に用いることで, 光学特性の向上, 小型軽量化, 低価格化が図れる。このような状況に伴い, 形状測定技術の高精度化が要求されている。

非球面形状測定の手法として代表的なものを以下に掲げる¹⁻⁹⁾。

- (1) 機械走査式
 - ・触針式
 - ・非接触式
- (2) 干渉計式
 - ・シアリング法

- ・計算機合成ホログラム法
- ・ヌルテスト法
- ・ゾーンプレート法
- ・スキャッタープレート法
- ・被検物をデフォーカスする方法

これらの方式には各々長所, 短所があるが, 今回われわれは干渉計式のシアリング法を選択した。この方式を選んだ理由は,

- ・非接触なので, 被検面を傷付けたり測定圧による接触歪みを生じない。
 - ・参照とする原器が不要である。
 - ・シア量をコントロールすることで, 干渉縞の本数を制御できる。
 - ・被検面を一度に二次元的に測定できる。
- 等である。

また本測定器はシアリング法のほかに光路の切り替えによってトワイマン・グリーン法で非球面量の小さい非球面を高精度に測定できるようになっている。

1.2 非球面測定時の問題点

非球面測定時に問題となる点を以下に述べる¹⁰⁻¹²⁾.

- (1) ヌルテスト以外の干渉測定では、被検面から戻ってきた波面と平面波あるいは球面波と干渉させる。この場合、非球面量が大きくなると干渉縞の間隔が非常に密となり、ディテクターの検出分解能をはるかに上回ってしまい測定が不可能となる。
- (2) 通常の干渉計では、被検面が球面である場合に対して収差が取り除かれている。つまり、軸上の一点から出た光を一点に集めるのはよいが、そのほかの光線に対してはほとんど収差補正がされていない。だから非球面を測定すると、入射光線と反射光線の光路が一致しないので干渉計内の光学系で収差が発生する。結果として観測される波面には、被検面の形状情報と光学系で発生した収差を含んだものとなる。そこでこの二つを分離するか、一方を差し引く必要がある。
- (3) 被検面が球面系の場合、入射光と反射光の光路が一致しているので波面の形状がそのまま被検面の形状に比例している。しかし非球面の場合はこれらの光路が一致していないので、波面形状と実際の被検面形状とを対応付けるには一定の計算処理が必要となる。

1.3 本システムの特徴と目標仕様

本測定システムでは、シアリング干渉法を採用することで大きな非球面量の被測定面に対応し、かつ縞走査法により高精度測定を可能としている。このほかに以下のような特徴を備えている。

(1) 自動アライメント

非球面測定では、被検面の位置や傾き等のアライメントが特に重要であり微調整が必要となってくる。そこで被検面を取り付けるステージはパルスモーターにより6軸(位置 x, y, z 軸, 角度 α, β 軸, 回転 θ 軸)の自由度を有している。そして被検面からの反射光の位置と光量を検出しながら各軸を動かして最適な測定位置へセッティングする。

(2) デジタルヌルテスト法

非球面を測定することによって光学系内で発生する収差を取り除くため、あらかじめ被検面の非球面係数、近軸曲率やそのほかの光学素子の設計値を用いてコンピュータにより理想的なすなわち設計値どおりの被検面を測定した時の収差を計算しておく。次に測定結果からこの値を引き、真に必要な波面情報を得る。

本手法は計算機プログラムを利用したヌルテストの一

変形と見なせるが、この手法をデジタルヌルテストと呼ぶ。

目標仕様を次に示す。

- ・波面測定精度 $\lambda/20$
- ・測定対象物 非球面, 球面, 平面
- ・測定方法 縞走査シアリング法
トワイマン・グリーン法
(縞走査も可)
- ・測定範囲 曲率: 3~100 mm (凹)
3~24 mm (凸)
平面

2. 測定原理および構成

2.1 シアリング干渉法

通常干渉計では被検波面と参照波面(球面波あるいは平面波)を干渉させ、被検波面の等高線に対応する干渉縞を生ずる。一般の非球面で非球面量が大きくなると波面の湾曲が複雑になり、非球面量の増大とともに多数の干渉縞を生ずるようになる。特に急激に密になった干渉縞は検出器の分解能を越えてしまい測定が不可能となる。

しかし参照波として球面波や平面波ではなく、わずかに横ズラシ(lateral shear)した被検波面自身と干渉させれば、両者の差は小さく縞本数の少ない干渉図形が得られる。

いま被検波面を $\phi(x, y)$, これを x 方向に微小量 s だけシアした波面を $\phi'(x, y)$ とする。両者を座標 x, y の多項式として表すと、それぞれ以下ようになる。

$$\phi(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} a_{mn} x^m y^n \quad (1)$$

$$\phi'(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} a_{mn} (x-s)^m y^n \quad (2)$$

この時干渉波面を表す式は、 ϕ の二項展開より

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= \phi(x, y) - \phi'(x, y) \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} m a_{mn} x^{m-1} y^n s \end{aligned} \quad (3)$$

になり、シアリング干渉では干渉縞が被検波面のシア方向の偏微分になっていることがわかる。

さらにこの式から、 $\sum a_{0n} y^n$ の成分が失われるので正しく波面を求めるには x, y 両方向にシアをして積分しなければならぬことおよび感度(干渉縞の本数)はシア量 s を適当に選ぶことで可変になることがわかる。このようにシアリング法では大きく湾曲した波面を測定でき、参照面が不要である。

2.2 縞走査法¹³⁾

縞走査法を用いない干渉縞の読み取り精度は、通常

$(1/20)\lambda$ 程度である。この場合は干渉縞を強度信号として取り込み、細線化、尾根線追跡等の手順で、干渉縞の明暗のピークを追跡しピークを求める。この時の干渉縞は光路差 $(1/2)\lambda$ ごとに1本現れるので、縞のピークのみを追跡しその中間値を生かさない計測法では測定精度は低くならざるを得ない。画像処理で中間値を生かさそうとすると、膨大な処理時間を要し実用的ではない。縞走査法では、被検波面と参照波面の間に規則的な位相差を与えながら複数枚の干渉縞を取り込み簡単な処理で被検波面の位相分布を直接求めることができる。干渉縞の強度分布は波数 $2\pi/\lambda$ を k として

$$I(x, y) = 1 + \gamma(x, y) \cos \{2k(\Phi(x, y) + \Delta)\} \quad (4)$$

で与えられる。ここで $\Phi(x, y)$ は被検波面と参照波面間の光路差、 Δ は一定の光路差、 $\gamma(x, y)$ は干渉縞の明瞭度の場所的变化を表す。

$\Phi(x, y)$ を求めるためには、干渉縞を一周期にわたって変調する必要がある。縞走査法では Δ を段階的に変化させることでこれを行う。一波長を N 分割した時の第 j 番目の Δ の変化は、

$$\Delta_j = j\lambda/N \quad (5)$$

で与えられ、その時の強度分布を I_j とすれば、次式に従って位相 $\Phi(x, y)$ を求めることができる。

$$\Phi(x, y) = 1/(2k)$$

$$\times \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{j=0}^{N-1} I_j \sin 2k\Delta_j}{\sum_{j=0}^{N-1} I_j \cos 2k\Delta_j} \right) \quad (6)$$

縞走査法のうち、 $N=4$ の場合は上述の演算はさらに簡略化され

$$\phi(x, y) = 1/(2k) \times \tan^{-1} \{ (I_1 - I_3)/(I_0 - I_2) \} \quad (7)$$

となる¹⁴⁾。この方式は4ステップ法と呼ばれている。今回われわれの製作した干渉計では、4ステップ法を採用し、処理速度の向上を図っている。

2.3 構成と原理

2.3.1 全体構成

このような縞走査法によるシアリング干渉測定を行うための干渉光学系を Fig. 1 に示す。光源 He-Ne レーザーから出たビームは、顕微鏡対物レンズとピンホールを透過することで球面波に変換される。この球面波はミラー M1、ビームスプリッター BS2、ミラー M2 と進みコリメータレンズ L1 で平行光となり、ダイバージャレンズ L2 で収束する球面波として被検面 W1 に入射する。次に W1 で反射した波面のうちビームスプリッター BS2 で反射する成分を考える。被検面 W1 の情報を含んだ波面はシア・縞走査部 SF1 で波面の横ずらし

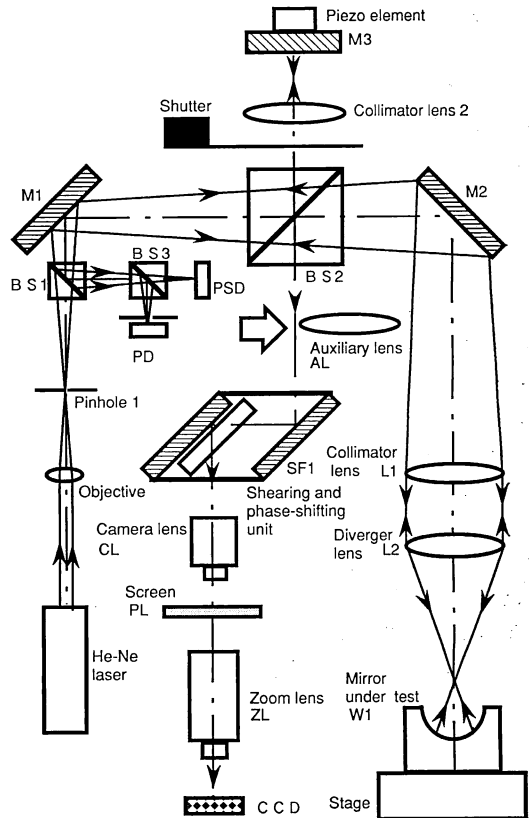


Fig. 1 Schematic of shearing phase-shifting interferometer.

をされるとともに、横ずらしされた一方の波面に任意の位相差(光路差)を与えることで縞走査も行う。このシア・縞走査部の機構については、次の2.3.2項で説明する。

被検面 W1 がピント板 PL 上に結像するようにカメラレンズ CL が動き、横ずらしの波面同士の干渉による干渉縞を PL 上に投影する。

次にその干渉縞はズームレンズ ZL により適当な倍率にされ撮像素子 CCD に結像する。またビームスプリッター BS2 とシア・縞走査部 SF1 の間の光路には挿入レンズ AL が脱着可能になっている。このレンズ AL は被検面の非球面量が大きく干渉光学系の途中で光束が発散しケラレてしまう場合に、通常の大きさの光学素子でもそのような波面をすべて拾えるように光束を収束させる役目をする。

2.3.2 シア・縞走査部

本システムでは波面の横ずらしと縞走査を2枚の半透明鏡の組み合わせで行っている。Fig. 2 にその機構を説明する。ここで簡単のため被検面から戻ってきた波面

の光軸上の光線を a_0 とする。全反射鏡 M3 と半透明鏡 HM2 は平行板バネでつながっている。全反射鏡 M3 と半透明鏡 HM1 は干渉計本体の壁面に固定され、半透明鏡 HM2 は縞走査用のピエゾ素子 PZ を介してシアリング制御用のパルスモーター PM に支えられている。

半透明鏡 HM1 の裏面反射を a_1 、HM1 を透過し HM2 の表面で反射した後再び HM1 を透過する光線を a_2 とする。HM1 と HM2 の間隔 L を調整することで、 a_1 と a_2 の間隔すなわち波面の横ずらし量をコントロールできる。これは PM を駆動することにより、半透明鏡 HM2 をピエゾ素子ごと押し上げて HM1 と HM2 の間隔を調節することで行う。この時、両者は平行板バネによりその平行度を保っている。ただし HM2 を下げた場合、HM1 と HM2 が密着してしまうと鏡の表面に付着したゴミ等により鏡面を傷つけてしまう恐れがあるため、極薄の箔を挟み鏡面同士が完全に密着するのを防いでいる。

またこのような構成で波面の横ずらしをすると、多重

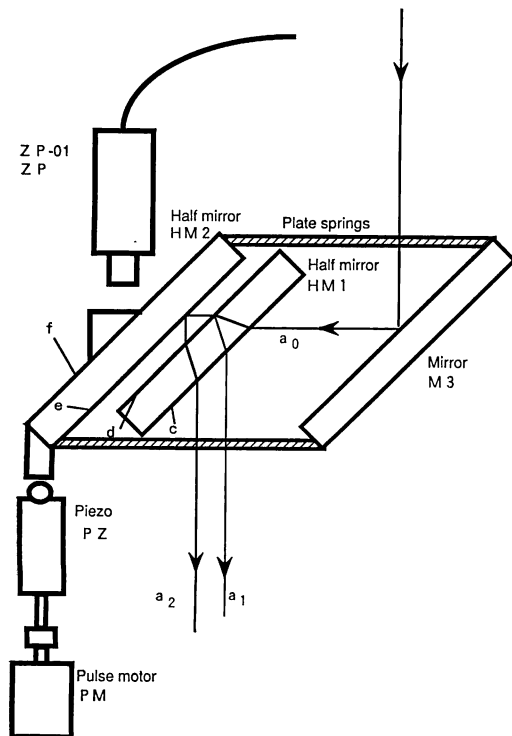


Fig. 2 Mechanism of shearing and phase-shifting unit. Shear is introduced by pushing up HM2 by PM. Phase-shift is done by PZ. The amount of shear and phase-shift is measured by ZP.

反射によるゴーストの問題が生ずる。ゴーストの比はできれば 1/100 以下が望ましいが、その時の光の利用効率は 1/10 以下となってしまふ。そこで 2 枚の平行平板の透過率、反射率を適当に設定しなければならない。

Fig 2 に示すように平行平板の各面を c, d, e, f とする。 c, f 面に反射防止コーティングを施した時、 d, e 面の強度反射率を R, R' とすると、干渉縞のコントラストを最良にするには、 a_1 と a_2 の光強度を等しくする

$$(1-R)^2 R' = (1-R) \sqrt{R} \quad (8)$$

を満たす R', R を求めればよい。本システムでは光の利用効率を考慮して、 $R=0.24, R'=0.42$ とした。この時光の利用効率は約 24% である。

適当なシア間隔に設定した後に縞走査法で測定を行う。縞走査は半透明鏡 HM2 を支えているピエゾ素子 PZ を駆動することにより a_2 の光のみに光路差 (位相差) を与えて行う。この際、HM2 の駆動量は正確に一波長を N 分割しないと誤差となって結果に影響してくる。

そこで HM2 の動き量を、分解能 100 分の $1 \mu\text{m}$ を有するオリンパス製の光学式非接触表面形状測定用ピックアップ ZP-01 で直接モニターし縞走査測定にフィードバックしている。また縞走査法のうちでも 4 ステップ法を採用し、取り込みデータの演算はロックアップテーブルを用いてハード的に行うことで高速化を図っている。

2.3.3 自動アライメントとステージ部

球面測定の場合は球面の被検面の光軸に対する傾き等はすべて球面の横ずれに置き直すことができる。しかし非球面測定の際は、被検面の中心軸が決まっているので、これと光軸を合わせるためにアライメントが必要になる。本システムでは被検面を取り付けるステージに Fig. 3 に示すような 6 軸の自由度を持たせている。すなわち光軸に垂直な面内のソフト x, y 軸とそれら各軸の回りの回転 α, β 軸、光軸の z 軸とその回りの回転 θ 軸である。これら各軸はパルスモーターによりコンピュータから駆動できるようになっている。

次に実際のアライメントのアルゴリズムを Fig. 4 で説明する。被検面から反射してきた波面のうちビームスプリッタ BS2 で透過しビームスプリッタ BS1 で反射した光束はビームスプリッタ BS3 で 2 分割されそれぞれ位置検出素子 (PSD) とフォトダイオード (PD) に入射する。そして被検面の横ずれや傾きによる反射光の位置変化を PSD で検出し、光軸 z 方向の位置決めは PD

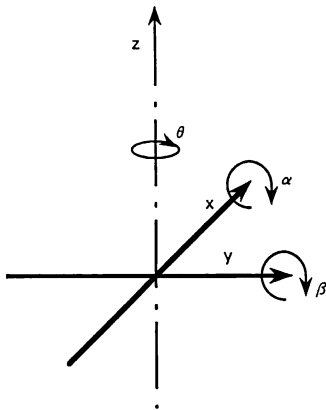


Fig. 3 Degree of freedom of the stage. For automatic precise alignment of a test surface the stage has three translation axes and three rotational axes that are controlled by a computer.

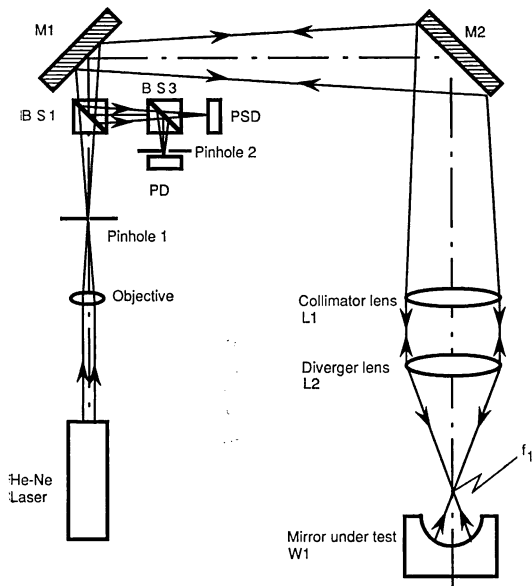


Fig. 4 Schematic of alignment system. W 1 is aligned automatically so that the reflected light from W 1 maximizes the signal output from PD and its spot on PSD is centered.

で光量を検出して行く。

まず被検面の近軸曲率半径、有効径、非球面係数を用いて入射光線と反射光線の光路が最も近くなるような被検面の測定位置を計算する。これを最適測定位置と呼ぶ。

ステージは初め一番下がった状態にあり、ここで被検面を取り付ける。干渉計のダイバージェンスの焦点位置 f_1 にはファイバセンサーの光線が通っていて、ここ

を被検面が横切るのを検出し、この位置を基準として被検面の面頂を焦点 f_1 へ持って行く。ここで微調整のため PSD の出力が中心となりかつ PD の出力が最大になるようにステージ x, y 軸を調節する。

次にあらかじめ計算した最適測定位置へステージを移動し、その位置において一定範囲内で α, β, x, y 軸を動かして PSD の出力を見ながらさらに精密なアライメントをする。

本アルゴリズムによるアライメントの再現性はシフト x, y 軸で $3 \mu\text{m}$ 以内、傾き α, β 軸で 8 分以内である。

3. シミュレーションと測定結果

3.1 シミュレーション

3.1.1 シミュレーションの背景および手順

光学系で発生する収差をあらかじめコンピュータで計算し測定結果から差し引くデジタルマルチテストで所期の測定精度を得るためには、干渉計のレンズ面の曲率、間隔、偏心等の光学系のパラメータがある公差内に収まっていなければならない。しかし一つの光学面のパラメータだけでも曲率半径、面間隔、屈折率、単独の偏心等があり、これらの組合せを考えると非常に数が多くなり、それらを一つ一つ計算することは多大な労力を要する。そこでレンズ設計プログラム code-V の自動公差決定機能を用いた。

この機能は波面の RMS 変化に基づいて公差を決定するものである。ところで実際の測定で問題となるのは波面の peak to valley 値であるので、まず 100 分の 1 以上の RMS 変化をおこすパラメータを求め、その中より代表的なものについて光線追跡を行い波面変化の P-V 値を計算した。

今回の測定に用いた被検面は凹面の非球面で、その非球面量 (光線方向と光軸方向) 並びに波面の傾き (波長/被検面の有効半径) を **Fig. 5** に示す。特に波面の傾きはピント板上での干渉縞の間隔を決定するので重要な量である。具体的には有効径: 14.574 mm, 近軸曲率: 14.93 mm で波面の最大傾斜が 386λ /有効半径である。この図からわかるように周辺部での波面の傾斜がきつくなっている。

3.1.2 光学系、被検面のティルト、シフト

公差の所期設定として、曲率半径誤差干渉縞 12 本、面間隔誤差 $50 \sim 100 \mu\text{m}$, 屈折率誤差 $2/1,000$, アステigmatism 3 本を用いた。その結果この範囲内では測定精度 $1/10$ 波長 (RMS で $1/100$ 波長) を越えるようなものはない。

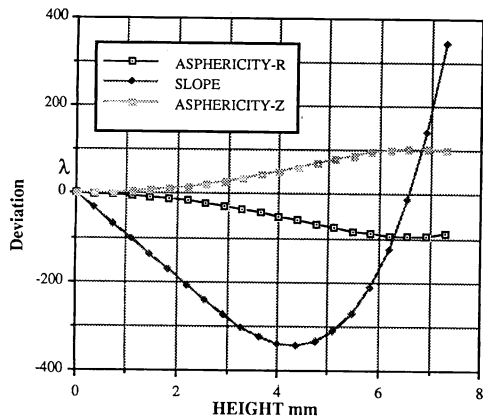


Fig. 5 Characteristics of test asphere. The test asphere is concave. Its effective diameter is 14.574 mm. Its maximum magnitude of slope is 386 waves/semi-diameter. R-Asphericity is measured toward the center of the best fitting sphere. Asphericity-Z is along its optical axis. Slope is for the reflected wavefront.

ダイバージェンスは単独では非常に偏心に敏感であるが、被検面と共に偏心させると RMS エラーが小さくなることが確認された。これはアライメントさえできれば、誤差は被検面とダイバージェンスとの相対的な位置で決まり、全体的には影響が少なくなることを示唆していると解釈される。結像レンズはシアリング部の後の共通光路の部分なので、ここでの影響は少ないと考えられる。

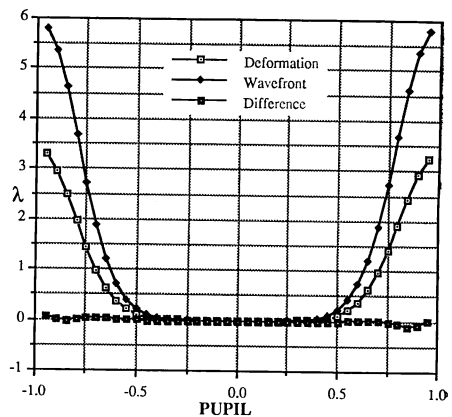
また被検面の位置決めに要求される精度はシフト 9 μm 、デフォーカス 14 μm 、傾き角 10 分程度である。

3.1.3 被検面の形状と波面収差の変化

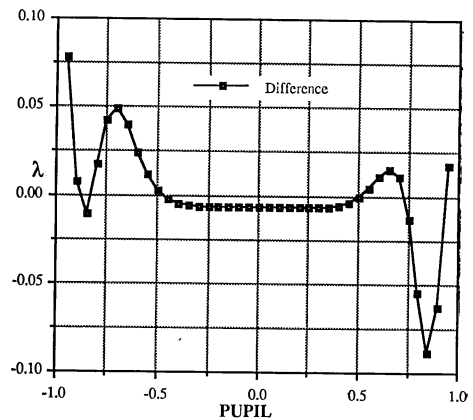
Fig. 6 はこの被検面にわずかな形状誤差を与えた場合に測定される波面収差がどのように変化するかを光線追跡でシミュレーションしたものである。(a)のグラフは被検面の変化量、波面の変化量並びに被検面の変形量を2倍したものと波面変化との差を計算したものである。(b)のグラフは、差の部分拡大したもので波面から推定される変形量と実際の変形量の誤差はこの値の半分になる。数波長の形状誤差ならば波面の変化量を単純に半分にするれば、実際の形状誤差が推定できることがわかる。

3.1.4 ピント板の位置

この被検面は波面の傾斜がきつくとピント板付近で光線が交錯し火面を形成する。このようなところでの波面は、わずかな伝播距離で大きくその形を変えてしまう。ピント板を置く位置は、干渉計の中で最も注意すべきパ



(a)



(b)

Fig. 6 Surface deformation vs. wavefront error. The test surface is deformed by a known amount. The wavefront change from the nominal value on the detector is calculated in code-V. The difference between the one-half of the wavefront change and the deformation, marked by a symbol ■, is shown in fig. (a), whose magnified plot is depicted in fig. (b).

ラメータの一つである。**Fig. 7** はピント板を置く位置で波面がどのように変化していくかを Zernike 係数で追ったものである。Zernike 多項式は光学設計プログラム code-V で FRINGE Zernike と呼ばれるものを採用した¹⁵⁾。図中 Z4 はデフォーカス、Z5, Z12, Z21 はアスティグマティズム、Z9, Z16, Z25, Z36 は球面収差に関する Zernike 係数である。横軸は本来ピント板が置かれるべき位置からのズレ量を mm で表し、縦軸はその時の Zernike 係数の変化量を表している。ピント板の位置決めは、この Zernike 係数の中で線形に変化しているものを用いて正確に行うことができる。

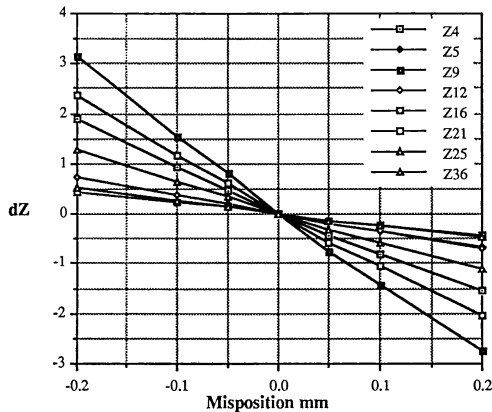


Fig. 7 Change of Zernike coefficients by detector mispositioning. This graph shows that the Zernike coefficients change linearly as the detector is moved away from the ideal position. Z4 is for defocus, Z5, Z12, and Z21 are for astigmatism, and Z9, Z16, Z25, and Z36 are for spherical aberration.

3.2 デジタルヌルテストと測定結果

この被検面が理想的な場合つまり全く計算値どおりにできている時に CCD 上に観測される波面を code-V で光線追跡シミュレーションした結果の一断面を **Fig. 8** に示す。この計算結果からわかるように、この非球面を測定すると 200 λ くらいの収差が発生している。したがって測定結果からこのシミュレーション波面を差し引けば被検面の不完全性に対応した波面収差が残る。これらの演算は波面を 37 項の Zernike 多項式に展開して行っている。

またデジタルヌルテストを実現するためにはシミュレーション時における干渉計のレンズ等の設定と実際の測定時の設定とが正確に一致していなければならない。これを合わせるために CCD 上で被検面が結像する大きさを計算し、実際の測定時にその大きさに被検面が結像するように微調整を行う。

デジタルヌルテストにより干渉計内で発生した収差を取り除いた結果の一断面を **Fig. 9 (a)** に示す。同じ一断面を触針式形状測定器タリサーフで測定した結果を **(b)** に示す。両者の差異の主な原因として、光学素子の不均一性 (通常よりもかなり大型なビームスプリッタ BS2 を作製したが、これの脈理など)、被検面のアライメントがわずかにずれたことによる高次収差の影響が考えられる。

これらの原因は実際の光学系の情報を含んだより精密なデジタルヌルテストや、波面測定を行いながら、その

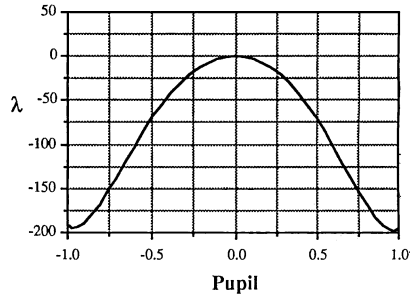


Fig. 8 Simulated wavefront for testing.

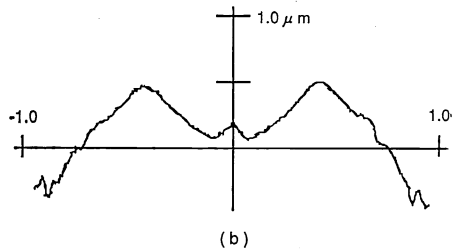
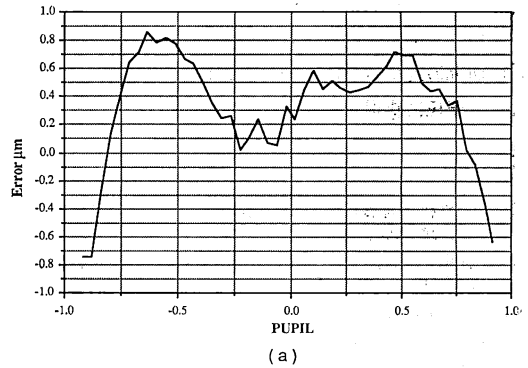


Fig. 9 Measurement result. An estimated figure error of the test asphere by Digital Null Test shown in (a), and a measurement result of the same asphere by a stylus method in (b).

Zernike 係数の変化をアライメントヘフィードバックすることのでかなり取り除かれると考えられる。

干渉計測では被検非球面の絶対形状を得るのは一般に困難である。干渉光学系の光学パラメータや被検面のアライメント状態で、測定される波面のティルトやデフォーカスの状態が異なってくるからである。本測定装置でもティルトとデフォーカスは基本的に除去している。したがって測定結果は非球面金型のうねり等のローカルなエラーは精度よく測定できるが、近似曲率半径の誤差を含むグローバルなエラーはティルト等の除去により一律キャンセルされている。しかし近似曲率のわずかな誤差

は、レンズ組立後に小さな焦点移動として表れ、レンズの収差を大きく損なうものではないと考えられる。

4. ま と め

本システムの研究開発を通してデジタルマルチテストを行う際に必要な干渉光学系の加工精度、位置決め精度、アライメント精度が明確になった。またこれらの情報を有効に利用した縞走査シアリング干渉計と自動アライメント、デジタルマルチテスト等を組み合わせることで従来干渉測定が困難であった非球面量を有する被検面の二次元形状測定が可能となった。

本研究を進めるに当たり有益な助言をいただいた諸先輩諸君研究室長ならびに干渉計の製作の協力をいただいた研究部諸氏に感謝する。

文 献

- 1) 関口修利, 加藤正彦: “全面走査型非球面形状測定機”, 光学, **16** (1987) 67-74.
- 2) 吉住恵一, 村尾次男, 塩谷雅美, 今中良一, 沖野芳弘: “超高精度三次元測定機”, 光学, **15** (1986) 496-503.
- 3) 加納敏夫, 谷田貝豊彦, 斎藤弘義: “縞走査シアリング干渉法による非球面の干渉測定”, 光学, **12** (1983) 455-459.
- 4) 谷田貝豊彦: “計算機プログラムを用いた非球面の干渉測定”, 光学, **5** (1976) 228-232.
- 5) J. C. Wyant: “Holographic and moiré techniques,” *Optical Shop Testing*, ed. D. Malacara (John Wiley and Sons, Inc., New York, 1978) pp. 381-408.
- 6) A. Offner: “Null tests using compensators,” *Optical Shop Testing*, ed. D. Malacara (John Wiley and Sons, Inc., New York, 1978) pp. 439-458.
- 7) 大山永昭, 辻内順平, 本田捷夫: “波長変化を用いたゾーンプレート干渉計による非球面計測”, 光学, **15** (1986) 329.
- 8) 蘇 徳欽, 本田捷夫, 辻内順平, 大山永昭: “拡散板干渉計による非球面凹面の実用的なテスト”, 第46回応用物理学会学術講演会予稿集 (1985) p. 46.
- 9) 横関俊介: “非球面計測の現状と動向”, オプトロニクス, **3** (1986) 64-71.
- 10) H. Kurita, T. Yatagai and H. Saito: “Interferometric test of aspheric surfaces and geometrical interpretation,” *Proceedings of ICO-13*, Sapporo (1984) pp. 446-447.
- 11) H. Kurita, K. Saito, M. Kato and T. Yatagai: “Influence of system aberrations on interferometric aspheric surface testing,” *Proc. SPIE*, **680** (1986) 47-52.
- 12) 斎藤圭介, 栗田裕之, 加藤正彦: “非球面干渉計における収差補正”, 第47回応用物理学会学術講演会予稿集第3分冊 (1986) p. 70.
- 13) J. H. Bruning, D. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: “Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses,” *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2693-2703.
- 14) J. C. Wyant: “Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems,” *Appl. Opt.*, **14** (1975) 2622-2626.
- 15) Code-V Reference Manual, **I** (Optical Research Associates, 1988) p. 2A-335.