



## 超高精度三次元測定機の精度校正法

吉住 恵一

松下電器産業(株)生産技術研究所 〒571 門真市松葉町 2-7

(1990年11月5日受付, 1991年7月19日受理)

### Calibration Methods for Measurement Accuracy of the Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer

Keiichi YOSHIZUMI

Production Engineering Laboratory, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.,  
2-7, Matsuba-cho, Kadoma 571

(Received November 5, 1990; Accepted July 19, 1991)

Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer, UA 3 P, measures by auto-focused 1-2  $\mu\text{m}$  diameter laser spots with the accuracies of 10-50 nm. The measurement range of  $xyz$  coordinate is 80  $\times$  200  $\times$  40 mm with the newly developed wide range model for tilt angle up to  $\pm 30$  degrees. Polar measurement supplies to measure the more steeply curved surface. Calibration methods for three fundamental elements of axes, scale and sensor have been studied. Especially the measurement error caused by the insufficient squareness between  $x$ ,  $y$  and  $z$  axes and the probe error caused by the inclination of the measured surface are mixed in the measured data. The methods to separate these errors from the measured data have been obtained by using concave and convex spheres. The validity of the calibration method is confirmed in the measurement of aspheric lens surfaces.

### 1. まえがき

レンズやミラー等の光学部品は高精度化と非球面化が急速に進んでいる。これらを製作する上で高精度な形状測定機は必須となってきている。

ナノメートル以下まで分解能を高めた表面粗さ測定機の開発が活発になされている。しかし、このように分解能を上げた装置は測定範囲がミクロンのオーダーと極めて狭い。

10~100 mm のオーダーで部品の三次元形状を評価するための三次元測定機で分解能だけでなく三次元座標測定精度をナノメートルレベルまで校正することは極めて重要である。従来 0.1  $\mu\text{m}$  以下の精度で測定できる三次元測定機がなく、これが例えれば非球面レンズ製作における評価のネックとなっていた。

われわれは平面、球面のみならず、回転対称な非球面や回転非対称非球面まで、干渉計と同等の精度で測定で

きる超高精度三次元測定機を開発したことは既に報告している<sup>1-3)</sup>。これは、オートフォーカスにより直径 1~2  $\mu\text{m}$  に集光されたレーザースポットで測定するもので、 $xyz$  軸の測定精度は 10~50 nm、測定範囲は標準モデルで  $xyz$  方向が 40  $\times$  100  $\times$  200 mm、新開発の大口径モデルでは 80  $\times$  200  $\times$  40 mm<sup>4)</sup> である。

直交座標測定では測定面の傾き角は  $\pm 30^\circ$  まで測定できる。極座標測定では凹面なら  $\pm 60^\circ$ 、凸面から  $\pm 180^\circ$  の傾き面まで測定し、測定データを直交座標系に変換することができる。測定データ処理ソフトウェアにおいては、測定物の取付けの傾きと位置の計 6 軸のずれを補正し、形状の設計値からの誤差を出力する 6 軸自動アライメント機能が搭載されている<sup>1,2,4)</sup>。

このような三次元座標精度を保証するのは前例がなく校正法に関する統一規格もない。校正法を研究することは測定機の性能を保証するための必要条件である。われわれの見いだした校正法は測定データ処理ソフトウェア

に組み込まれ、測定結果が 10~50 nm の誤差以内で設計値と比較された形で出力される。

本報告では三次元測定機の測定誤差を考察し、座標軸、スケール、センサーの基本 3 要素について校正法を見いだし、その有効性を具体的な非球面光学素子に適用して確かめた。

## 2. 測定精度の定義

長さは「1メートルは光の 1 秒間に進む距離の 299,811,266 分の 1」と定義され、1秒間は、セシウム原子時計によって  $10^{-12}$  という極めて高い精度で、普遍的な定義が明確になされている<sup>5)</sup>。三次元測定機の精度は規格 (JIS B 7440) で以下のように定められている。

$$\text{測定精度} (\mu\text{m}) = A + B \cdot L / 500 \quad (1)$$

$A$  は測定長さに無関係な固有の誤差、 $B$  は係数、 $L$  は測定長さである。従来の市販の三次元測定機は  $A$  と  $B$  の値が 1 以上であり、1 μm 以上の精度であり精度/寸法比は  $10^{-6}$  に達していない<sup>6)</sup>。

三次元測定機の測定精度は、ゆがみのない理想的な三次元空間における被測定面上の点の座標列が形状測定の結果得られた測定点の座標列を結んだ面からどれだけずれているかと定義できる。これは、いいかえると、被測

定物の真の形状と測定結果との差である。

しかし、この定義から直接、測定機の測定精度を検証することはできない。したがって測定機の精度の検証は間接的にはなるが、明確な物理的意味と、十分な再現性を持つ必要がある。

## 3. 校正項目と方法

座標軸、スケール、センサーは三次元測定機の基本 3 要素である。すなわち、三次元測定機は三次元空間内で  $xyz$  の座標軸を持っている。この三つの座標軸の真直度と直角度は測定精度に効いてくる。次に、これらの座標軸に沿った目盛り（スケール）を各方向に持っている。このスケールと座標軸精度で三次元測定機の座標部分の空間精度が決まる。3 番目にセンサー（プローブ）によって被測定面位置の座標をこの三次元測定機の座標系に正しく伝える必要がある。この基本 3 要素の誤差が三次元測定機の測定誤差として現れる。

測定誤差は測定値のバラツキも含めてすべてこの 3 要素のいずれかに起因すると考えて筆者らは解析、実験、測定データ処理を行っている。各種の任意面形状の三次元座標測定値を保証することは、この独立した基本 3 要素を分離して個別に校正しておくことにより可能にな

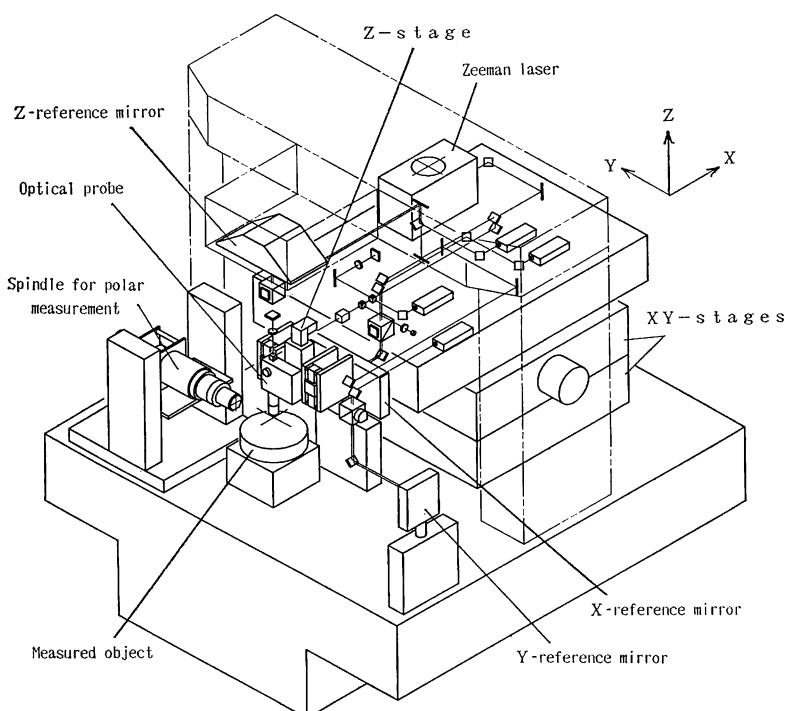


Fig. 1 Schematic configuration of the wide range model of the Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer.

**Table 1** Error items for calibration.

Error items	Error factors
(1) Axes (XYZ-axes)	①Squareness between X, Y and Z-axis ②Straightness of X, Y and Z-axis
(2) Scale	③Accuracy of the wavelength of the stabilized laser
(3) Sensor (Optical probe)	④Dependence on the inclined angle of the measured surface ⑤Dependence on the reflectivity of the measured surface

る。

本機の三次元直交座標測定系に関する校正の各要素について、Table 1 の項目がある。Fig. 1 に大口径用超高精度三次元測定機の概略構成を示す。

座標軸の誤差は各軸間の直角度と各軸の真直度の二つである。本機は Fig. 1 に示したように xyz 3 枚の平面ミラーを参照面とした構造なので、座標軸精度はこれらのミラーの真直度、ミラー間の直角度になる<sup>1,4)</sup>。xyz の移動台のピッキングやヨーイングに起因する誤差はこの参照面との干渉で座標を測定する構成なので 10 nm 以下である<sup>1)</sup>。

スケールは安定化レーザー光の波長であるので校正項目は波長の誤差のみである。

本機のセンサーは非接触で 0.5 mW 低パワーの光プローブなので、接触圧等に起因する誤差はない。被測定面からの反射光で測定を行うのでプローブ誤差は反射光の強度や分布に影響を与える測定面の傾きと反射率にのみ依存する。ただし、測定光のスポット径の範囲で被測定面がなめらかな場合を想定している。

なお、接触式プローブでも接触部は球面になっており測定面の傾きによって接触位置が変わるので面の傾きに依存したプローブ誤差があり本校正が有効である。しかし、接触圧に起因する誤差もあるので光プローブほど単純ではない。

Table 1 の項目の中で、①の XYZ 座標軸の直角度の誤差と、④の測定面の傾きに依存した光プローブの誤差は測定データに混在し、分離校正が困難であった。このたび、これらの誤差を分離し校正する手段を見いだした。他の誤差は後述のように独立して校正可能である。

### 3.1 光プローブ誤差と座標軸直角度誤差の校正

任意に傾いた一定の反射率を持つ曲面の測定における

誤差は測定面の傾き角度にのみ依存し、かつ、角度と誤差が一対一に対応した誤差成分は光プローブの光学的な性質によるので光プローブ誤差と呼ぶ。

ところが実際の測定データには xyz の座標軸が完全に直角でないことに起因する直角度誤差が混在していく。以下にこれらを分離して校正する方法について述べる。

曲率半径の等しい凹面と凸面の基準球面を測定する。これらは高い精度で校正済のものとする。基準球面の校正法は後述する。

これらの測定結果を理想球面の計算式と比較し、誤差  $zd$  が得られる。 $zd$  は、求めたい未知数の座標軸の直角度誤差  $Ea$  と光プローブ誤差  $Ep$  の和となる。

#### 凸面の場合

$$zd(\text{凸}) = Ea(\text{凸}) + Ep(\text{凸}) \quad (2)$$

#### 凹面の場合

$$zd(\text{凹}) = Ea(\text{凹}) + Ep(\text{凹}) \quad (3)$$

##### 3.1.1 直角度誤差の検出と校正

まず直角度誤差  $Ea$  を算出する。理想的な球面を、 $x$  軸と  $z$  軸の直角度誤差があり、光プローブ誤差のない測定機で測定した場合の測定結果から、 $x$  軸と  $z$  軸の直角度誤差  $C(\text{rad})$  の値を算出する。

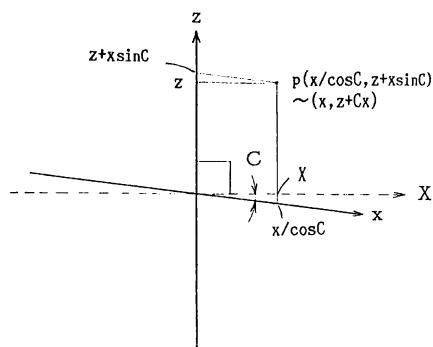
曲率半径  $R(>0)$  の凹凸の球面は次式になる。

$$z = \pm \sqrt{-R + (R^2 - x^2 - y^2)^{1/2}}$$

凸面で、 $x$  軸方向のみを考えると次式になる。

$$z = -R + (R^2 - x^2)^{1/2} \quad (4)$$

$z$  軸に垂直な  $X$  軸から  $-C$  だけ傾いた  $x$  軸を仮定する。Fig. 2 に示すように誤差のない座標系で  $(X, z)$  で表される  $p$  点は傾いた座標系では  $(x/\cos C, z + x \sin C)$  で表される。ここで  $C$  は秒程度の値なので  $\sin C \sim C$ ,



**Fig. 2** When the angle between  $x$  and  $z$  axes tilts by  $C$  from the right angle axis  $X$ , the coordinate of the point  $p(X, z)$  becomes  $\sim(x, z + Cx)$ .

$\cos C \sim 1$  と近似して、 $p$  点は傾いた座標系では  $(x, z + Cx)$  と置けるので、測定データは、

$$z = -R + (R^2 - x^2)^{1/2} + Cx$$

となる。

しかし、この式では  $x=0$  の位置が凸面の先端ではない。この時点では  $C$  の値がわかっていない。測定機は自動的に先端位置を捜してそこを測定座標系の原点とする。具体的には、先端位置を先端付近の2点の測定値と  $R$  の設計値から計算し、その位置まで光プローブを動かして原点位置決めする機能<sup>2)</sup> があり、センタリング機能と呼んでいる。この操作で原点の位置が  $(t, p)$  ずれていると測定データは(5)式のようになる。

$$z = -R + \{R^2 - (x-t)^2\}^{1/2} + p + Cx \quad (5)$$

測定データ(5)から球面の設計式(4)を引いた誤差  $zd$  は球面の頂点付近の  $x$  や  $x-t$  が  $R$  より十分小さいところでは次の近似が成り立つ。

$$\begin{aligned} & \{R^2 + (x-t)^2\}^{1/2} \sim -R + (x-t)^2/2R + Cx \\ & zd \sim \{x^2 - (x-t)^2\}/2R + p + Cx \\ & = (t/R + C)x - t^2/2R + p \end{aligned} \quad (6)$$

センタリング機能により、 $x$  がゼロの近傍で測定誤差  $zd$ 、測定誤差の傾きがゼロになるよう原点が設定されるので、次式の関係が得られる。

$$\begin{aligned} t &= -CR \\ p &= t^2/2R = C^2R/2 \end{aligned} \quad (7)$$

測定データ  $z$  は(4)式に(6)、(7)を代入し、次式で得られる。

$$z = -R + \{R^2 - (x+CR)^2\}^{1/2} + C^2R/2 + Cx \quad (8)$$

同様の計算をして凹面なら測定値は(9)式のようになる。

$$z = R - \{R^2 - (x-CR)^2\}^{1/2} - C^2R/2 + Cx \quad (9)$$

(8)、(9)式の形を視覚的に見るために  $C$  の値を  $7^\circ$  と大きくしてプロットしたものを Fig. 3 に示す。実線が  $C=7^\circ$  破線が  $C=0^\circ$  すなわち理想的な円である。理想的な円からの差  $zd$  は凹凸面で同じ極性になっており、 $C$  が小さい時、差は凹凸面で同じになりそうなことが想像できる。

これを確認するために、(8)、(9)式から球面式を引いた誤差  $zd$  を計算すると、

凸面では、

$$\begin{aligned} zd &= \{R^2 - (x+CR)^2\}^{1/2} \\ &\quad - (R^2 - x^2)^{1/2} + C^2R/2 + Cx \end{aligned} \quad (10)$$

凹面では、

$$zd = (R^2 - x^2)^{1/2} - \{R^2 - (x-CR)^2\}^{1/2}$$

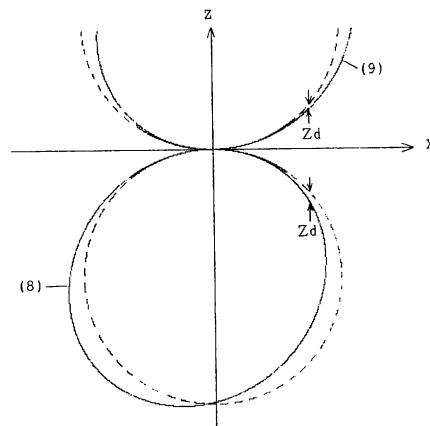


Fig. 3 When the angle between  $x$  and  $z$  axes tilts  $7^\circ$  from the right angle, the measured data of spheres become as the solid lines. The dotted lines are the perfect spheres. The measurement errors  $zd$  of the concave and convex appear to the same direction.

$$-C^2R/2 + Cx \quad (11)$$

となる。

曲率半径  $R=32$  mm の凹面と凸面を、直角度誤差  $C = 4.8 \times 10^{-6}$  (=1秒) の測定機で中点を通る  $\pm 25$  mm を  $x$  方向に測定した場合の測定誤差を(10)、(11)式を用いて計算し、プロットした結果を Fig. 4 に示す。(10)式と(11)式を重ねてプロットしたが、完全に重なった。この形は S 字型になっているので S 字誤差と命名した。

このように直角度誤差  $Ea$  は同じ曲率半径の凹凸面で極性が一致し同じ形になるので、(2)、(3)式は、

$$Ea(\text{凸}) = Ea(\text{凹}) = Ea$$

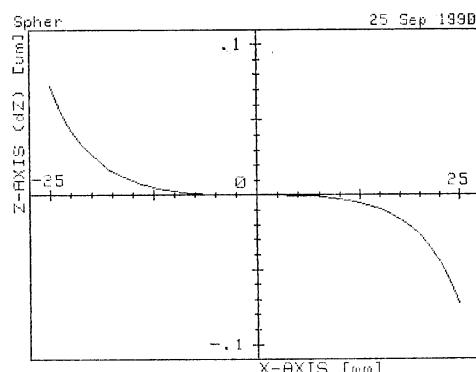


Fig. 4 Calculated "S-curve" error caused by 1 second squareness error between X-axis and Z-axis when both concave and convex spheres are measured. Their radii of the curvatures are 32 mm.

とおける。

一方、光プローブ誤差は以下に説明するように測定面の傾きのみに依存した誤差である。

光プローブは Fig. 5 に示す構造で<sup>1,2)</sup>、半導体レーザー光を被測定面に直径 1 μm に集光し、反射光分布からフォーカスサーボをかけ、z ステージを動かす。z ステージの位置から z 座標を読むことも可能で、間接測定と呼ぶ。

フォーカス誤差があまり測定誤差にならないよう、He-Ne ゼーマンレーザー光を被測定面上に直接、直径 2 μm に集光し、反射光を参照ミラーからの参照光と干渉させて z 座標を測定する方式を直接測定と呼ぶ。He-Ne ゼーマンレーザー光は被測定面が傾いても垂直に入射するよう傾き補正光学系が入っている。

この光プローブにより接触圧はゼロで、測定のばらつきを極小にできる。被測定面の傾きによってフォーカス誤差もほとんどなく、反射光の光路長もほとんど変わらない構造をしている。しかしながら使用光学部品や組立精度の問題や、測定面が最大 ±30° まで傾くと反射光路は著しく変わるので、被測定面の傾きに依存した光プロ

ーブ誤差を考慮しなければならない。

被測定面がなめらかで一定の反射率を持つ場合は、1~2 μm の微小測定スポットの範囲ではある傾きを持つ平面と近似できる。この時、被測定面からの反射光の光路や分布は面の傾き角のみに依存し、傾き角と 1 対 1 に対応する。

光プローブ誤差  $E_p$  を、傾き角度の絶対値のみに依存する誤差  $E_{p1}$  と傾きの方向で反転する誤差  $E_{p2}$  で構成されると置くことが可能である。理由は、同じ曲率半径の凹凸面測定での  $E_p$  は下式で表され、二つの未知数  $E_p$ (凸) と  $E_p$ (凹) を同じく二つの未知数  $E_{p1}$  と  $E_{p2}$  で表せるからである。

$$E_p(\text{凸}) = E_{p1} + E_{p2}$$

$$E_p(\text{凹}) = E_{p1} - E_{p2}$$

したがって、球面の測定誤差  $zd$  は、

$$zd(\text{凸}) = E\alpha + E_{p1} + E_{p2}$$

$$zd(\text{凹}) = E\alpha + E_{p1} - E_{p2}$$

と置ける。したがって、

$$E\alpha + E_{p1} = (zd(\text{凸}) + zd(\text{凹})) / 2 \quad (12)$$

$$E_{p2} = (zd(\text{凸}) - zd(\text{凹})) / 2 \quad (13)$$

(12)式で、 $E\alpha$  は S 字誤差で(10)、(11)式で表され、Fig. 4 に示すように + と - 方向で極性が逆になっている。そこで測定値から得られる(12)式から(10)式、または(11)式を引いた形態が左右対称になるような  $x$ - $z$  軸間の直角度誤差;  $C$  (rad) と、同様に求めた  $y$ - $z$  軸間の直角度誤差;  $D$  (rad) を選ぶことにより、 $E\alpha$  を求めることができ、(12)式から  $E_{p1}$  を求めることができる。

測定値から求めた  $E_{p1}$  と  $E_{p2}$  の例を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。以上のように同じ曲率半径を持つ凹と凸の球面を測定し、これらのデータから直角度誤差と、光プローブ誤差を分離して検出できることがわかった。

直角度誤差は  $z$  座標測定値に  $Cx + Dy$  を加算することにより補正する。

例えば、直角度誤差が 1 秒の時、曲率半径  $R=180$  mm の球面を中心から ±90 mm 測定した時の測定誤差 (S 字誤差) は 60 nm となる。したがって、測定精度 50 nm 以下を保証するためには 0.5 秒以下の座標軸直角度が必要である。本方式ではこの程度の校正是可能である。この時の  $z$  のストロークは 24 mm と短いこともあって一般的な 4 直角マスターを利用した方法ではここまで精度の校正は難しい。以上、非球面レンズ等の測定で問題となることのある  $xy$  と  $z$  軸間の直角度誤差について説明した。

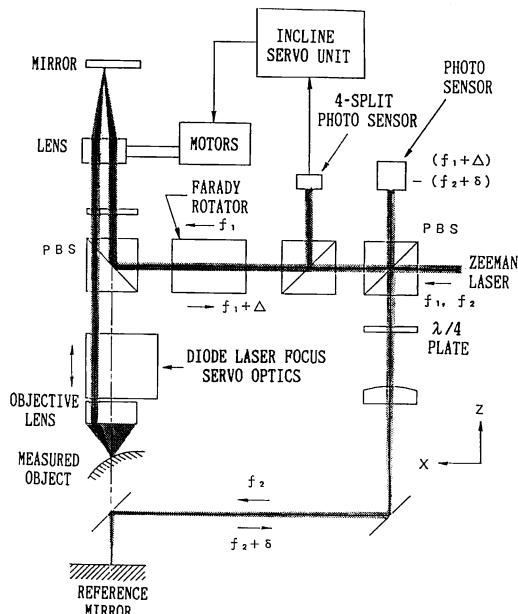
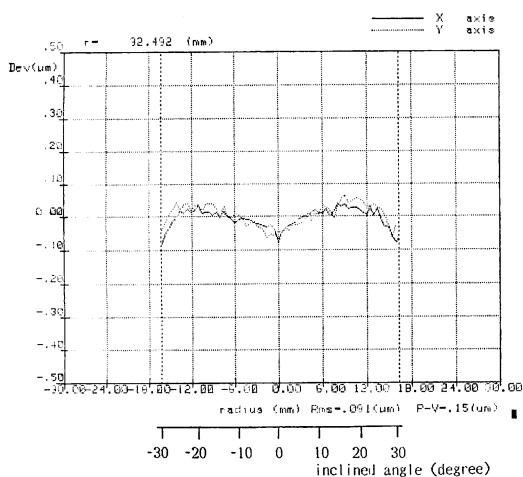
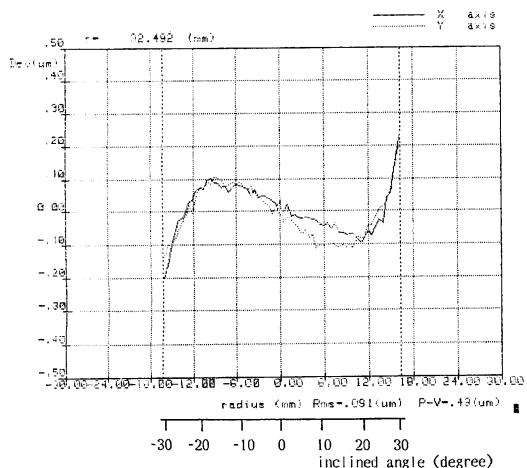


Fig. 5 Schematic configuration of Z-axis measuring optics. Lights from the Zeeman laser and the Diode laser are focused on the same point of the measured object. Measured object and reference mirror are fixed during the X-Y-Z measurement. The other elements move simultaneously.



**Fig. 6**  $E_{p1}$ ; Element of the optical probe error, caused by the absolute value of the inclined angle of the measured surface.



**Fig. 7**  $E_{p2}$ ; Element of the optical probe error, depends on the direction of the inclined angle of the measured surface and turns over for positive and negative directions of the angle of the measured surface.

$x-y$  軸間の直角度の校正是  $xy$  ステージのストロークが大きいので 4 直角マスターで 1 秒程度の精度での校正が可能で、これは非球面レンズの形状測定等には問題のない精度である。

### 3.1.2 光プローブ誤差の検出と補正

上述のように直角度誤差を補正したあとは、 $E\alpha=0$  となるので基準球面を測定値から (12), (13) 式により光プローブ誤差  $E_{p1}$  と  $E_{p2}$  が求められる。

(12), (13) 式の誤差は  $xy$  座標に対応して出てくる

が、これを面の傾きに対応させる。簡単のため、 $x$  方向のみで説明すると、半径  $R$  の球の座標  $(x, 0)$  の位置の面の傾き角  $\theta$  は

$$\theta = \sin^{-1}(x/R)$$

で表される。この式から Fig. 6 と Fig. 7 の下方の目盛りに示すように光プローブ誤差  $E_{p1}$  と  $E_{p2}$  は面の傾き角に対応させることができる。このデータを校正用基準データとしてコンピュータに記憶させておく。

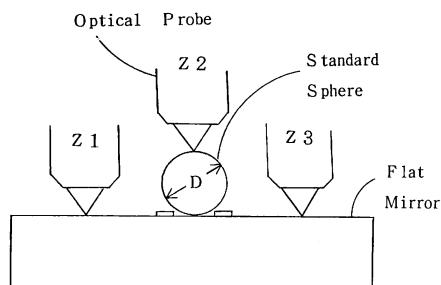
実際の測定の際には測定値の列からそれぞれの測定点での面の傾き角を算出し、その角度における記憶されている校正用基準データを減算することにより光プローブ誤差  $E_{p1}$  と  $E_{p2}$  をゼロにすることができる。

### 3.1.3 校正用基準球面の校正

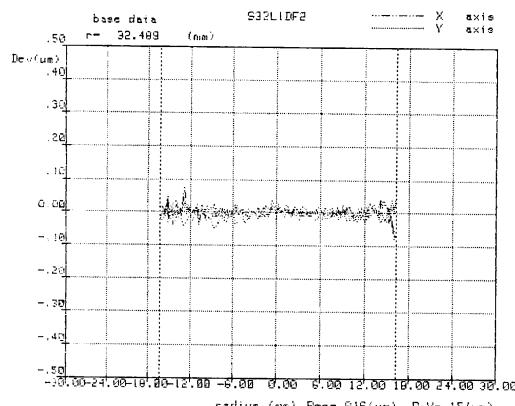
校正用基準球面自体は球面精度と曲率半径の校正が必要である。球面精度は校正済の本測定機によっても可能であるが、市販されている真円度測定機や干渉計によつても可能である。真円度測定機では精度 10 nm で測定できるものがある<sup>9</sup>。干渉計では球面測定精度保証はおおむね  $\lambda/10$ 、つまり 63 nm 程度である。しかし、これは干渉計の参照面の保証精度で、干渉計の繰り返し精度は 6 nm 以下なので<sup>9,10</sup>、被検面を回転させて測定位置を変えて測定することによって 20 nm 程度の精度の校正が可能である。被検面の測定箇所を変えて同じ誤差ができるならば、干渉計の参照面の誤差でこれを測定値から差し引けるからである。

校正用基準球面の曲率半径の校正は、本測定機により Fig. 8 に示す方法で最高で 10 nm 程度の精度で直径を直接測定することにより行う。直径 10 mm 程度の基準球を高精度ミラーの上に置き、球先端とミラー面の  $z$  座標測定値の差が直径である。

曲率半径の絶対値の校正は光プローブ誤差の  $E_{p1}$  の曲率半径成分のみをさらに補正することにより行う。



**Fig. 8** Measurement of the diameter of a standard sphere by using the UA 3P. Optical probe searches the top of the sphere automatically. Diameter;  $D$  equal  $Z_2 - (Z_1 + Z_3)/2$ .



**Fig. 9** Calibrated measured data for the concave sphere master lens.

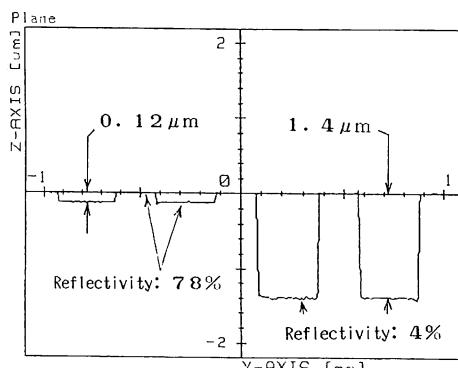
以上のように曲率半径の絶対値も含め光プローブ誤差と直角度誤差を校正した後の基準球面の測定誤差を

**Fig. 9** に示す。

### 3.2 反射率変化による光プローブ誤差の校正

本測定機は測定面の反射率が 3~100% まで測定可能である。しかし、反射光量の変化によってフォーカスサーボの誤差信号の大きさが変わることによって生ずるオフセット電圧による誤差が考えられる。

これは、**Fig. 10** のような反射率の異なる基準段差を作り、触針式表面粗さ計で深さを確認した後、同じ測定値になることを確認することにより校正できる。また、同じ曲率半径の球面に反射率 3.7%, 13%, 64% の反射面を蒸着して測定し、同じような測定結果が得られることによっても確認できる。



**Fig. 10** Calibrated measured data for rectangular grooves having different reflectivity, 78% aluminum coated and 4% glass surface. Measured depth coincide with that of contact probe profilometer.

### 3.3 座標軸の真直度の検出と校正

本機の XYZ 座標軸は、XYZ おののにある 3 枚の参照ミラー面である。従来の三次元測定機では、座標軸の真直度は XYZ ステージの移動真直度によって決まっていたが、これでは、三次元測定機として組んだときの XYZ ステージの移動真直度は 1  $\mu\text{m}$  あたりが限界である。そこで、平面精度の出しやすく、校正のやりやすいミラー面が座標軸となる方法とした。

10 nm という高い平面度を目指した Z 参照ミラーの形状校正法は以下のとおりである。3 枚のミラーの形状をミラー面を上にし、上方を +z 方向として、 $z_1(x, y)$ ,  $z_2(x, y)$ ,  $z_3(x, y)$  とする。**Fig. 1** の測定機の配置で、 $z_1$  を参照ミラーとして  $z_2$  ミラーを測定すると測定結果は  $z_1+z_2$  となる。同様にして 3 枚のミラー形状を、一度参照ミラーを入れ替えて測定すると 3 回の測定結果は以下の式になる。

$$\begin{aligned} z_1+z_2 &= a \\ z_1+z_3 &= b \\ z_2+z_3 &= c \end{aligned} \quad (14)$$

これからそれぞれの形状は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} z_1 &= (a+b-c)/2 \\ z_2 &= (a-b+c)/2 \\ z_3 &= (-a+b+c)/2 \end{aligned} \quad (15)$$

以上により、10 nm 程度の精度で Z 参照ミラーの平面度の校正を行うことができる。

### 3.4 スケールの校正

本測定機における xyz 座標の目盛りは He-Ne 周波数安定化ゼーマンレーザーの波長である。He-Ne レーザーの発振周波数の幅は、500 MHz 程度あるが、安定化しているので、20 MHz 以下の再現性が得られており、発振周波数安定度は  $4 \times 10^{-8}$  以下である。これを真空中での波長誤差にすると 100 mm に対し 4 nm であり本測定機の必要精度に対して十分な精度である。波長の校正是ヨウ素安定化レーザーとの比較により行われる<sup>11)</sup>。

一方、大気中では、気温、気压、湿度により波長がずれる。波長が  $10^{-6}$  だけ変化する要因としては温度で 1°C、気圧で 2.5 mmHg、湿度で 70% である。温度に対する波長変化量は鉄を測定物とするとその熱膨張の 1/10 程度であるので、測定物の温度管理の方が重要な。

本機においては恒温室で使用することにより、 $1 \times 10^{-7}$  程度、すなわち 100 mm に対し 10 nm 以内のスケール精度がある。これには空気のゆらぎによる波長変動も含

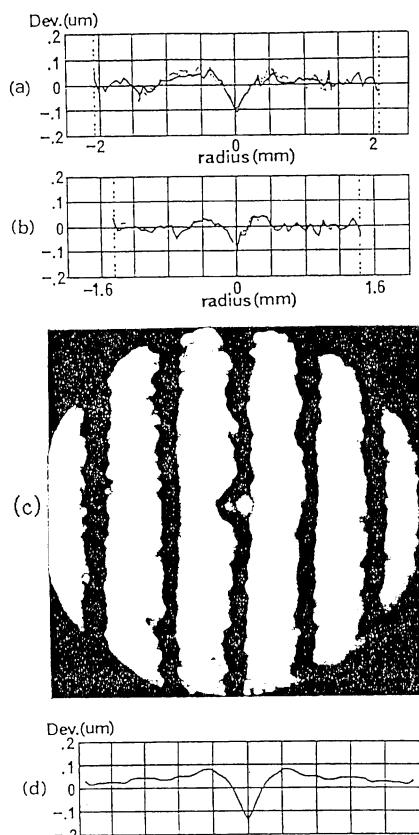
まるる。

#### 4. 非球面測定例

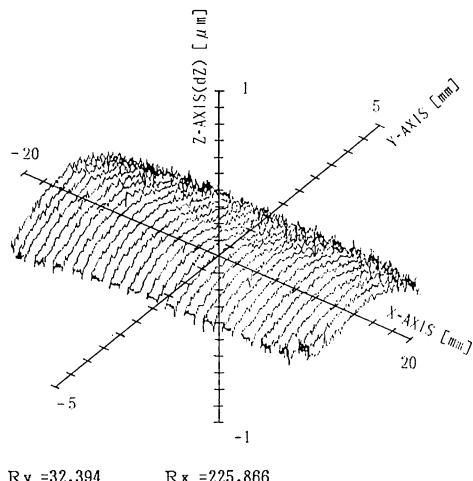
非球面レンズの各面の形状測定による形状誤差の和と透過波面収差が一致すれば測定精度の確認になる。

**Fig. 11** は光ディスク用両面非球面ガラスレンズ各面の型の本機による形状測定結果とこの型でプレスしたレンズの透過波面収差、および、透過波面収差から算出した1面+2面の形状誤差である<sup>12)</sup>。1面+2面の形状誤差と透過波面収差がよく一致していることがわかる。このレンズの形状誤差は下記の非球面設計式からの誤差である。

$$\begin{aligned} z &= f(x) \\ &= (x^2/R) / \{1 + (1 - Ax^2/R^2)^{1/2}\} \\ &\quad + \sum_{k=1}^{20} ak|x|^k \end{aligned}$$



**Fig. 11** Measurement of aspheric molds and their lens. (a) The first surface of the mold. (b) The second surface of the mold. (c) Interferogram of the bi-aspheric lens. (d) The cross section of the interferogram.



**Fig. 12** Measurement of an toric lens. Error from the design data is plotted. Rx and Ry mean the radii of the curvatures of x and y directions.

$x, y, z$ : 直交座標, 回転対称なら  $x$  の代りに  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$  を入れる。

$R$ : 近軸曲率半径,  $A$ :  $1 + \text{conic}$  係数,  
 $ak$ :  $k$  次非球面係数

上記のレンズは回転対称なので  $x$  方向のみを示した。また、1面は面の傾き角が  $40^\circ$  以上の非球面なので直交座標測定 + 極座標測定を行っている。

**Fig. 12** は回転非対称な非球面レンズの  $xy$  走査した測定出力例を示す。この出力は下記の非球面設計式からの誤差である。

$$z = \{Rx - Ry(1 - \sin \phi)\} \cos \theta - Rx$$

ここで

$Rx$ :  $x$  中心部 ( $y=0$ ) での曲率半径

$Ry$ :  $y$  中心部 ( $x=0$ ) での曲率半径

$$\phi = \cos^{-1}(y/Ry)$$

$$\theta = \sin^{-1}[x/[Rx - Ry \{1 - \sin(\cos^{-1}(y/Ry))\}]]$$

この式はドーナツの表面のようなトロイダル面と呼ばれる面で  $Rx$  はドーナツの外周の円の半径,  $Ry$  は割った時の切り口の円の半径である。回転非対称面の1例である。

#### 5. 測定精度の評価

本機は新規のハード構成と上記のような校正法によって測定精度 50 nm 以下を達成した。ここでいう精度とは前記のように被測定物の真の形状と測定結果との差である。これを2章で記した JIS B 7440 の規格(1)に当

てはめて考える。

$$\text{測定精度} = A + B \cdot L / 500 \quad (1)$$

この式は主に接触式の三次元測定機を念頭に入れて決められたものであるが、 $A$ は測定長さに無関係な固有の誤差、すなわち、プローブ誤差や移動ステージのガタ、測定値のゆらぎ等が考えられる。 $B$ は測定長さ  $L$  (mm) に比例した誤差の係数であるので、スケール誤差や一次元だけではない場合は座標軸の直角度誤差、真直度誤差が考えられる。

本機では、直接測定で  $xyz$  の各軸では  $A=20\text{ nm}$ ,  $B=100\text{ nm}$ 、間接測定ではその倍の  $A=40\text{ nm}$ ,  $B=200\text{ nm}$  程度と推定される。

## 6. まとめ

開発した超高精度三次元測定機において任意面形状の測定精度を保証するための校正とデータの補正を行うための方法を述べた。各種の測定誤差を座標軸、スケール、センサーと原因別に分離して検出した。特に、座標軸の直角度誤差とセンサーの誤差は測定値に混在するが、凹凸の球面原器を使用することにより任意面形状測定値の校正とデータ処理ソフトによる補正を可能とした。これにより、比較的容易に測定機のユーザーが校正を行うことができ、50 nm 以下の測定精度を確認することができる。

測定速度と精度の関係や表面粗さ、表面の光学定数な

ど、ほかにも測定精度にかかる要素はあるが、多彩な測定物で異なり複雑化するので今後の検討課題といい。

最後に本測定機の開発、とくに測定用ソフトウェアの開発等でご協力いただいた村尾次男、清水義之、増井二郎氏と関係諸氏に感謝いたします。

## 文 献

- 1) K. Yoshizumi, T. Murao, J. Masui, R. Imanaka and Y. Okino: "Ultrahigh accuracy 3-D profilometer," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 1647-1653.
- 2) 吉住恵一、村尾次男、塙谷雅美、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) 吉住恵一、沖野芳弘：“非球面形状の精密測定システム”，光学，**12** (1983) 450-454.
- 4) 吉住恵一、金島敬之介、妻鹿浩尚：“超高精度三次元測定機”，National Tech. Rep., **36** (1990) 92-99.
- 5) 清野昭一：“メートルの新定義”，精密機械，**50** (1984) 105-111.
- 6) 上野 滋：“三次元測定機の定義と三次元測定機の形式”，マニピスト，**3** (1990) 136-142.
- 7) 吉住恵一：特願平 01-077595.
- 8) ランク テーラー ホブソン社製、タリロンド 73 カタログ。
- 9) ザイゴ社製、ザイゴ マーク 4 カタログ。
- 10) ワイコ社製、ワイコ 6000 カタログ。
- 11) 岩崎茂雄、桜井 雄：“市販波長安定化レーザの波長校正とその安定度”，応用物理，**49** (1980) 870-875.
- 12) Y. Tanaka, Y. Nagaoka and M. Ueda: "Lens and optics for optical disk system," *Proc. Int. Symp. Optical Memory*, Tokyo (1987), Jpn. J. Appl. Phys., **26**, Suppl. 26-4 (1987) pp. 121-124.