

## 研究

## 全面走査型非球面形状測定機

関口 修利・加藤 正彦

オリンパス光学工業(株)技術開発部 〒192 八王子市石川町 2951

(1986年10月18日受理)

## Aspheric Surface Profilometer

Nobutoshi SEKIGUCHI and Masahiko KATO

Research Department, Olympus Optical Co. Ltd.,  
2951, Ishikawa-cho, Hachioji 192

A precise profilometer using an optical probe in which focused laser beam is scanned over the entire aspheric surface was developed. By adopting a mechanism which makes the incident beam coincide with the normal of the test surface on each testing point, it becomes possible to measure any steep aspherical surfaces commercially available. The importance of eliminating the setting errors caused by both residual linear and angular misalignment within the instrument and any decentration/tilt of the test surface is pointed out. An algorithm employed in the data processing system enabled us to eliminate the setting errors effectively. With this algorithm, the measurement accuracy of  $\pm 0.12 \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ ) is attained.

## 1. はじめに

精密加工技術の発展には、それに対応するだけの計測技術が不可欠である。近年多岐にわたる光学機器に使用され、光学特性の向上、コンパクト化、ローコスト化に大きく貢献している“非球面”においても例外でなく、その光学的優位性を得るべく面形状測定の高精度化が要望されている。

非球面形状測定の手法としては、従来より波面による方法<sup>1,2)</sup>と光プローブによる機械的走査方式<sup>3,4)</sup>とが考えられている。これらの方式のメリット、デメリットについては種々に論じられているが、われわれは後者を採用することとし、光プローブにより被検面全面を非接触で走査する方式(非接触測長方式)を採った。

この方式を選んだ理由は、

- 1) 被検面を破損したり、測定圧による接触歪を生じる恐れがない、
- 2) 測定点の位置情報が明確である、
- 3) 対物レンズ等の光学系の負担を軽くすることができ、測定範囲も広くとれる、
- 4) 参照とする原器が不要である、

等である。

非球面の加工法という点からすれば、金型を用いた単体成型方式、レプリカによる面創成方式などが実施されているが、従来からある研削・研磨方式に比べてその軸対称性に関する疑問が大きい。そこで、本機ではこれまでの走査方式のような一断面だけの測定ではなく、被検面全面を走査し、その形状を求めるということを考慮した。

さらに、非球面の持つ光学的優位性を十分に引き出すという要求に応えるため、本機では $\pm 0.1 \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ ,  $\sigma$ : 標準偏差)の測定精度を目標とした。これを実現するためには種々の機能を付加する必要があった。傾き角の補正機構やセッティング誤差の自動補正機能などである。

本論文では、これらの機能の概要を述べるとともに、セッティング誤差の測定結果に及ぼす影響の分析、その重要性およびこの影響を自動的に補正する機構について報告する。

## 2. 構成および測定原理

本機の構成を Fig. 1 に示す。測定系、NC テーブル、電装系の三つに大別される。測定系は、干渉計、ロータリ

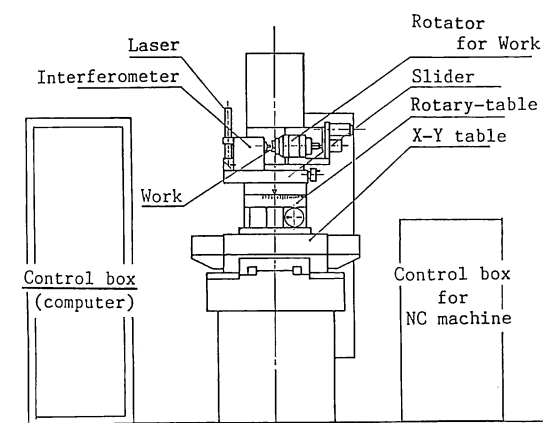


Fig. 1 Schematic diagram of the measuring system.

テーブル、ワーク回転部とからなり、このうち干渉計は鉛直方向に回転軸を有するロータリーテーブルに固定されている。この回転により、干渉計の光プローブから発する光ビームは、対向して取り付けられた被検面の経線方向の走査を行なう。ワーク回転部は、被検面を装着し、水平方向の回転軸をもって被検面を回転させる。これによって光ビームは被検面上で輪帯軌道を描くこととなる。この2種類の回転により、被検面全面の走査が可能となる。また、このとき得られる走査軌跡は球面となり、これを参照面としている。

干渉計の光プローブはオートフォーカス機能を有し、走査軌跡上で生じる参照球面からのずれに追従して常に被検面に焦点を結ぶようになっている。実際に得られる測定量は Fig. 2 の  $\Delta$  で示すものであり、径方向の非球面量に相当するものであるが、これを干渉縞の変化から計測し、被検面の形状を算出している。なお、参照球面の曲率半径は、それぞれの被検面に対する近似曲率半径となるように設定する。ここでいう近似曲率半径とは、本機の測定において入射光と反射光のなす角の最大値が最小になるような曲率半径を意味する。この設定は、ロータリーテーブルを固定している NC テーブル

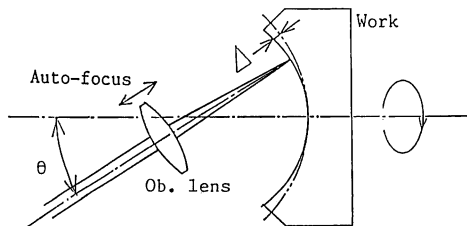


Fig. 2 Schematic diagram of the measuring method.

により行なう。本機では、凸凹それぞれ 2.5 mm~100 mm の参照球面の生成が可能になっている。

電装系では、測定系における各駆動部の制御および測定データの処理を行なう。本機では、データ点数は最大 200 輪帯、一つの輪帯中に最大 800 点のデータを取得することが可能であり、したがって 1 回の測定で最大 16 万点のデータ取得が可能である。

なお、ロータリーテーブル、ワーク回転部、光プローブの各摺動部にはエア軸受けを用いている。

### 3. 光学系および付加機能

光学系の概略図を Fig. 3<sup>5)</sup> に示す。偏光特性を利用した干渉計に傾き補正用キャッツアイおよび光プローブのオートフォーカス機構を付加した構成となっている。光源には He-Ne レーザー (5 mW: 波長 0.633  $\mu\text{m}$ ) を使用し、得られる干渉縞を電氣的に 16 分割することにより、約 0.02  $\mu\text{m}$  の分解能を得ている。

以下に高精度を得るために付加した機能を掲げる。

#### 1) 傾き角補正機構

球面とは異なり、非球面では各点で曲率が異なるため、それによって生じる被検面への入射光(往路)と反射光(復路)とのずれを極力抑える必要がある。Fig. 3 に示すような光路において、キャッツアイを光軸と垂直な方向に移動させて、光路を光軸に平行にシフトさせると被検面上の集束点を変えずに対物レンズの NA (0.35) の範囲内で被検面への入射角を制御することができる。これにより、往路と復路を一致させ、参照光との間で生じる干渉縞の可視度を良好な状態に保つことができる。本機では、 $\pm 7^\circ$  の補正が可能である。これはすでに発表されている非球面の測定に十分対応できるものである。

#### 2) オートフォーカス機構

光プローブの対物レンズの焦点距離は  $f \sim 10 \text{ mm}$  であり、ビーム径は  $2a \sim 2 \text{ mm}$  とすると測定誤差は、

$$(a/f)^2 \sim 0.01$$

で効くため、本機ではオートフォーカスの精度は  $\pm 1 \mu\text{m}$  とした。また、光プローブの作動範囲を  $\pm 5 \text{ mm}$  とし、前述の傾き補正機構とともに大非球面量を有する被検面の測定にも対応できるようにした。

#### 3) 光路長の設定

参照光路中に特殊なプリズムを挿入することによって、コンパクトに被検光路と参照光路の光路長をほぼ等しくし、マルチモードのレーザーを用いたとしても干渉縞の可視度を劣下させることなく、レーザーの波長変動

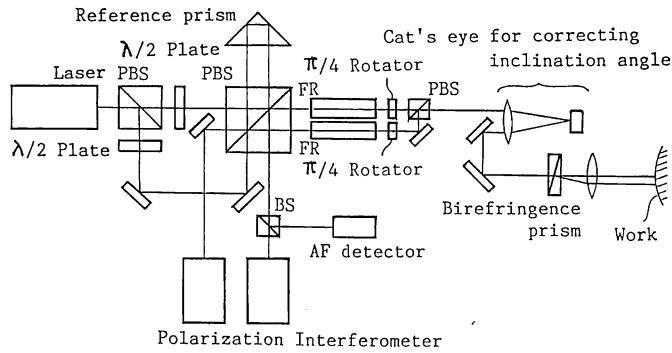


Fig. 3 Schematic diagram of the optical setup.

による影響を少なくした。

4) 異物や傷に対する対策

被検面上の異物や傷に弱いのは光プローブによる走査方式の欠点であるが、電気的な保護回路を用いることにより、そのような場合にも正常に近い測定ができるようにした。

5) セットアップ誤差の自動補正機構

通常の測定において、被検面の取付け誤差 (シフト  $E_x, E_y$ , 傾き  $\alpha, \gamma$ ) やロータリーテーブルとワーク回転系の軸ずれ ( $\epsilon, \delta$ ) は不可避である。とくにサブマイクロンオーダーの測定ではこの影響は無視できない。本機では測定データから計算処理によりそれらの量を3次元的に算出し、補正を行なった。これにより作業者の負担は著しく軽減された。

4. セットアップ誤差の補正機構

ここでいうセットアップ誤差とは測定系の設定誤差および被検面の取付け誤差の両者を指す。測定系の設定誤差とは Fig. 4(a) に示すようにワーク回転部の回転軸とロータリーテーブル回転中心との位置ずれを指す。 $\epsilon, \delta$  の定義は図に示すとおりである。また、被検面取付け誤差とは Fig. 4(b) に示すように測定系の座標系と被検面固有の座標系とのずれを指し、図のように4種の成分に分けられる。すなわち、シフト量  $E_x, E_y$  と傾き量  $\alpha, \gamma$  である。Z 軸方向のシフト量  $E_z$  については干渉計カウンターのリセットにより無視することができる。

Fig. 5 は、おのおののセットアップ誤差が測定量に与える影響を示している。四つのグラフの横軸は被検面中央からの距離、縦軸は測定誤差 (単位は  $\mu\text{m}$ ) である。順に  $\epsilon, \delta, E_x, \alpha$  についての結果であって、約  $1500 \lambda$  程度の非球面量の非球面を被検面とし、設計値どおりに作られていると仮定して算出したものである。いずれの場

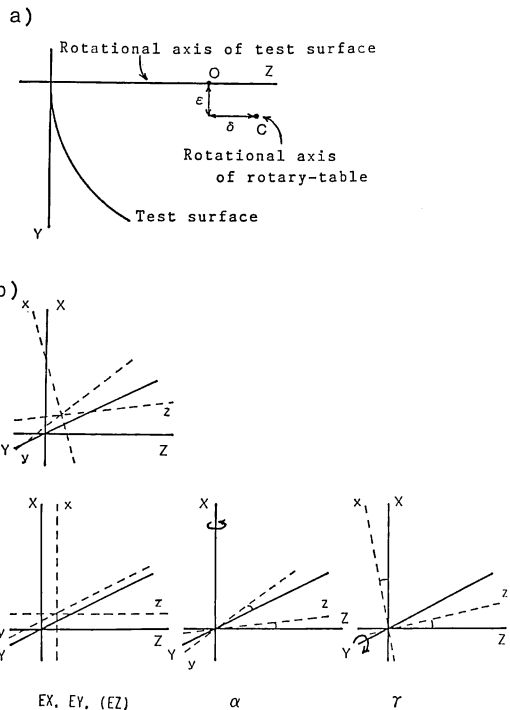


Fig. 4 Setting errors caused by the misalignment of (a) the measuring system ( $\epsilon, \delta$ ), (b) the test surface ( $E_x, E_y, \alpha, \gamma$ ).

合にもセットアップ誤差量が大きければ測定誤差量も大きくなることが明らかである。一般には測定誤差量の中にはこれらの誤差量が合成されて存在しているわけであり、何らかの方法で分離しなければならない。 $\epsilon, \delta$  による影響は回転対称な特性を持ち、 $E_x, \alpha$  による影響は回転非対称な特性を持っていることがわかる。さらに詳しくみると、 $\delta$  は連続的なカーブを有するのに対し、 $\epsilon$  は中央部で不連続な部分を有すること、また  $E_x$  は逆 S 字型であるのに対し、 $\alpha$  は S 字型というようにそれぞれの特徴に基づいて分離していくことができる。

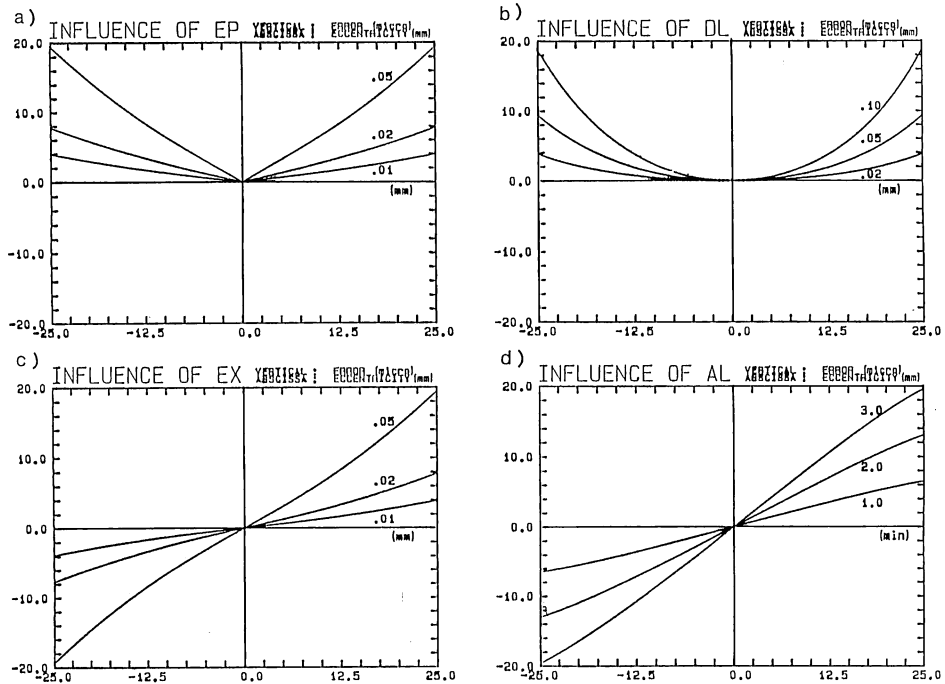


Fig. 5 Influence of the setting errors. (a)  $\epsilon$ , (b)  $\delta$ , (c)  $Ex$ , (d)  $\alpha$ .

次に測定系の設定誤差の算出、補正方法について述べる。Fig. 6 の O は本来あるべきロータリーテーブル回転中心位置、C は実際のロータリーテーブル回転中心位置で、実際に得られる測定量は図中  $CP_k$  で示す量となる。しかし、本来欲しいデータは  $OP_k$  の方向に測った場合の測定データ  $X_k$  で、この量を推定する必要がある。 $X_k$  は次の式で表わされる。 $A_k = R_0 + \delta - Z_0 + L_k$  とすると、

$$X_k = \{(A_k \sin \theta_k + \epsilon)^2 + (A_k \cos \theta_k - \delta)^2\}^{1/2}$$

ここで、 $R_0$ : 近似曲率半径、 $L_k$ : 測定量、 $Z_0$ :  $f(\epsilon)$  ( $f(s)$ : 非球面式)。

$X_k$  の近似展開式は、次の式のようなになる。

$$\begin{aligned} X_k &= X_k(\epsilon, \delta) \\ &= X_k(\epsilon_0, \delta_0) + \sum_i (\partial X_k / \partial \xi_i) \Delta \xi_i \\ &\quad (\xi_i = \xi_{i0} + \Delta \xi_i \quad \xi_i = \epsilon, \delta) \end{aligned}$$

被検面上の同一の点に対して、 $\epsilon, \delta$  がそれぞれゼロの場合に得られる測定量を  $M_k$  とすると、

$$M_k(\theta_k + \phi_k(\epsilon, \delta)) = R_0 - X_k(\epsilon, \delta) \quad (1)$$

となる。

あらかじめそれぞれのセッティング誤差の影響量を微係数の形で定式化しておき、(1)を用い最小自乗法により  $\Delta \epsilon, \Delta \delta$  を算出し、逐次近似で  $\epsilon, \delta$  を求めた。また、得られた  $\epsilon, \delta$  により、 $A_k, X_k$  を求め、測定量を得

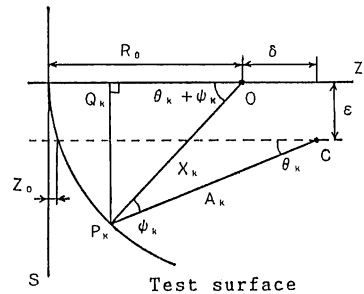


Fig. 6 Calculations of  $\epsilon$  and  $\delta$ .

る。このとき  $\phi_k$  も算出し、 $\theta_k + \phi_k$  における測定量とする。

被検面の取付け誤差の算出、除去方法については、Fig. 7 に示すように、あるロータリーテーブル位置  $\theta_i$ 、ある被検面回転角  $\phi_j$  における測定量を  $L_{ij}$  とすると以下のような式で表わされる。

$$L_{ij} = (R - Z_0) - (R - Z_{ij}) \sec \theta_i$$

$Z_{ij}$  の近似展開式は、

$$\begin{aligned} Z_{ij} &= Z_{ij}(Ex, Ey, \alpha, \gamma) \\ &= Z_{ij}(Ex_0, Ey_0, \alpha_0, \gamma_0) + \sum_m (\partial Z_{ij} / \partial \xi_m) \Delta \xi_m \\ &\quad (\xi_m = \xi_{m0} + \Delta \xi_m \quad \xi_m = Ex, Ey, \alpha, \gamma) \end{aligned}$$

となる。

上記の2式およびあらかじめ定式化されている  $Ex$ ,

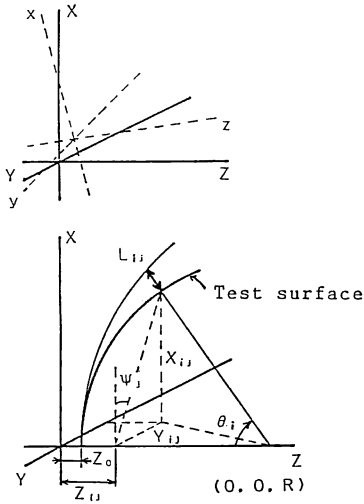


Fig. 7 Calculations of  $E_x, E_y, \alpha$  and  $\gamma$ .

$E_y, \alpha, \gamma$  のそれぞれの影響を表わす各種係数から  $\epsilon, \delta$  の場合と同様に最小自乗法および逐次近似法によって  $E_x, E_y, \alpha, \gamma$  を算出し、得られた結果から各測定点における  $L$  を求め、これを補正後の測定量としている。

実際には、以上のプロセスは回転対称成分の算出・補正、非回転対称成分の算出・補正という二つのステップにより実現される。なお、この計算処理に使用する測定データは、互いに直交する4方位10輪帯分計40データで十分である。

### 5. セッティング誤差補正のシミュレーション

種々の被検面に対して、種々のセッティング状況を想定し、その場合に得られる測定データを予測し、セッティング誤差算出ルーチンにかけて、その結果から算出精度および補正精度について検討を行なった。

その結果、算出精度は与える誤差量が、軸ずれ量 ( $\epsilon, \delta$ ) が  $\pm 10 \mu\text{m}$  以内、シフト量 ( $E_x, E_y$ ) が  $\pm 10 \mu\text{m}$  以内、傾き量 ( $\alpha, \gamma$ ) が  $\pm 1'$  以内であればそれぞれ  $\pm 0.5\%$  以内、 $\pm 1.0\%$  以内、 $\pm 1.0\%$  以内に算出できることが確かめられた。そしてそれによるデータの補正精度は、本機の測定精度に大きな影響を及ぼすことのないレベルであることが確かめられた。なお、ここで掲げた各種セッティング誤差量は通常の設定状態と十分対応したものである。

Fig. 8 はその一例で、縦軸は測定誤差量、横軸は被検面中央からの距離を表わしている。セッティング誤差量としては、 $\delta$  に  $30 \mu\text{m}$ 、 $\epsilon$  に  $10 \mu\text{m}$ 、 $E_x$  に  $10 \mu\text{m}$ 、 $\gamma$  に  $1'$  という値を与えている。なお被検面として非球

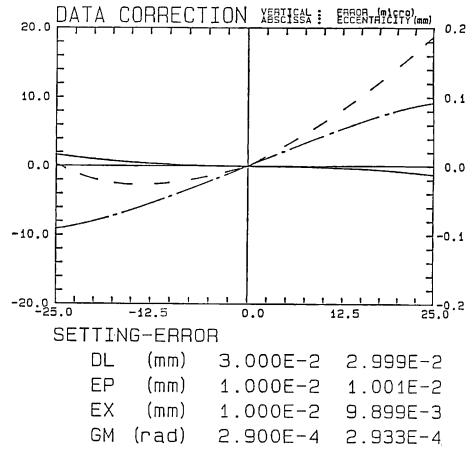


Fig. 8 Results for simulation of eliminating the setting errors.

面量約  $1,500 \lambda$  のものを想定した。破線はこのような条件下で測定した場合に予想される生データであり、 $+20 \mu\text{m}$ 、 $-5 \mu\text{m}$  程度の測定誤差を生じることがわかる。これについて  $\epsilon, \delta$  の補正をかけると一点鎖線に示されるように、回転対称成分は除去され、軸ずれ量 ( $\epsilon, \delta$ ) の影響が取り除かれて回転非対称成分のみ残ることがわかる。オーダーとしては  $\pm 10 \mu\text{m}$  程度である。さらに  $E_x, E_y, \alpha, \gamma$  について補正をかけると実線に示すような結果が得られる。このグラフに関しては縦軸は右側のスケールを用いるが、これより  $\pm 0.02 \mu\text{m}$  以内に抑えられていることがわかる。これは本機の測定精度を保つ上で十分な補正精度である。

なお、本機では、被検面の取付け状況および測定系の設定状況のみを出力する簡易測定モードを設けており、本測定にはいる前に、被検面のセッティング誤差がこのシミュレーションで得られた許容範囲内にあるか否かを知ることができる。

### 6. 測定実験

本機の評価を試みるため、測定実験を行なった。実験は次の三つのステップに分けられる。

- 実験1：球面を被検面としての測定誤差解析
- 実験2：球面を被検面としての精度検定
- 実験3：非球面測定による再現性の検定

#### [実験1] 方法

本機の測定実験には被検面として下記の3種の球面を用いた。

$R = 3.0 \text{ mm}$  (凹, 有効径  $4.0 \text{ mm}$ )

$R = 10.0 \text{ mm}$  (凸, 有効径  $15.0 \text{ mm}$ )

$R=80.0$  mm (凸, 有効径 60.0 mm)

いずれもガラス製, 面精度  $\lambda/10$  以下で作製されたもので, この3種の選定に当たっては, 本機の測定範囲の上限と下限に近く, CDピックアップやカメラ, ビデオプロジェクター等に用いられるレンズを意識している。これらを理想球面と仮定し, 測定ごとにセッティング状況を変え, 各10回の測定(各測定5,000点のデータ取得)を行なった。

#### [実験1] 結果および考察

一般に測定誤差といった場合には, 測定系の振動による誤差と測定機固有の誤差成分が考えられる。振動成分はランダムに発生するものであり, その対処としては系に機械的な除振を施すとか電気系の安定化を図るとか各種駆動部分の安定化等の手段を講じる必要がある。しかし, 系固有の成分についてはどのような測定条件においても必ず発生するものであり, そのため種々の測定条件を設定することによりその測定結果から発見することが比較的容易である。今回の測定ではほぼ理想球面と考えることのできる3種類の被検面についてそれぞれ異なるセッティング条件を設定したため, 各測定結果に共通に現われる傾向を捕えてそれを除去するように補正データを作成し, 補正を行なった。

Fig. 9は, 本実験により得られた結果で, 例として, ロタリーテーブルの回転特性を掲げた。横軸は駆動量, 縦軸は誤差量を単位  $\mu\text{m}$  で示している。ここで得られたデータは, ソフトウェア上で補正值として登録され, 測定生データに加算することとした。

次に, 測定生データからセッティング誤差を除去する過程のチェックを行なった。Fig. 10(a)は測定系の設定誤差の影響が強く出ている例で, 測定生データをそのままプロットしたものである。これを前述のルーチンにかけると Fig. 10(b)のように設計値カーブにきわめてよくフィットした結果が得られ, 補正ルーチンが正しく作用していることがわかる。また Fig. 11(a)は被検面の取付け誤差の影響が強く出た例で, 測定生データは回転非対称になっている。Fig. 11(c)は同じデータを被検面の正面からみたような表現方法を取っており, これをみても回転非対称性がよく現われている。これについても同様に補正ルーチンにかけると Fig. 11(b), (d)のように設計値によくフィットした結果が得られる。このようにしてセッティング誤差の補正が実測データに対しても正しく行なわれていることが確かめられた。

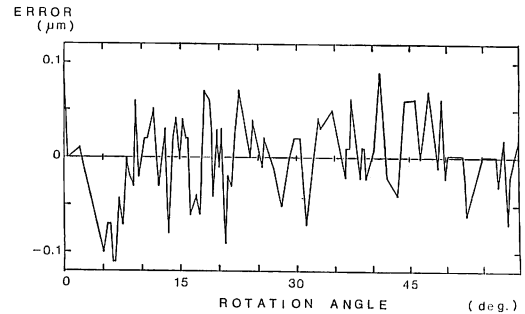


Fig. 9 Errors caused by the angular setting of the rotary table.

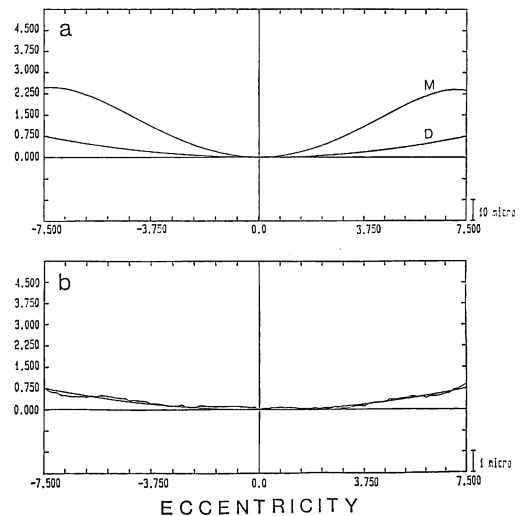


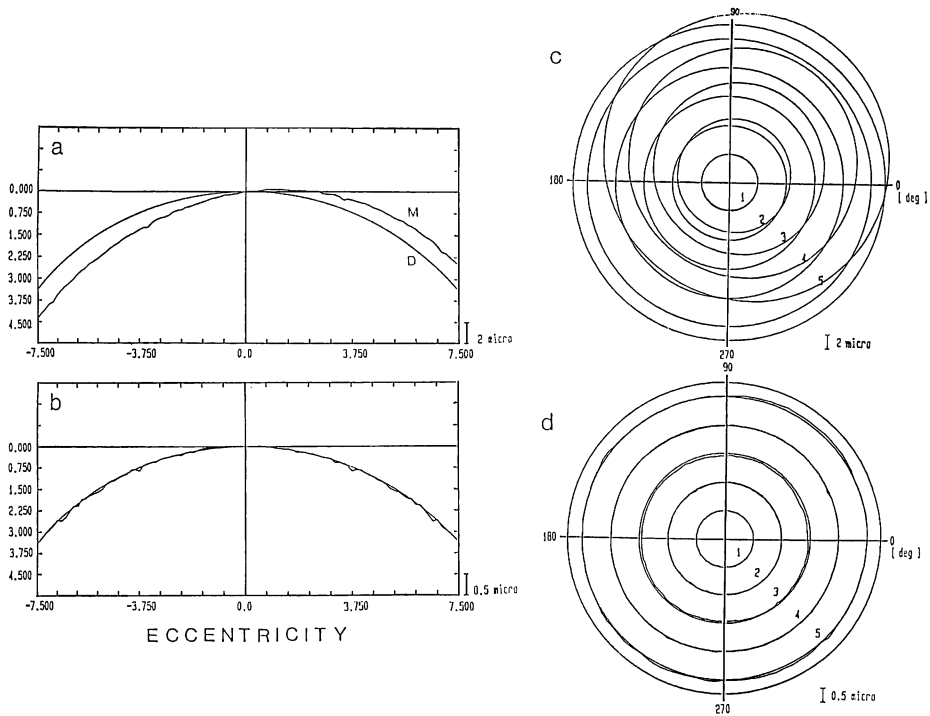
Fig. 10 Measured data (M) represented with the designed shape (D). (a) Raw data mainly influenced by  $\epsilon$  and  $\delta$ . (b) Final data obtained after being corrected by our algorithm.

#### [実験2] 方法および結果

実験1と同じ被検面を用い, セッティング状況をかえることなくそれぞれ10回の測定を行なった。各測定におけるデータ点数は5,000点である。その結果を Table 1 に示す。これより, 本機の測定精度は  $3\sigma$  で  $\pm 0.12 \mu\text{m}$  といえることができる。

Table 1 Evaluation of the accuracy of this measuring system.

	Curvature (mm)	Measurement range (mm)	Measurements ( $\mu\text{m}$ )	
			Mean	S. D.
1	10.001	15.0	0.0049	0.0404
2	-3.007	4.0	-0.0015	0.0292
3	79.996	60.0	0.0138	0.0393



**Fig. 11** Measured data (M) represented with the designed shape (D). (a, c)Raw data mainly influenced by  $Ex, Ey, \alpha$  and  $\gamma$ . (b, d)Final data obtained after being corrected by our algorithm.

**[実験 3] 方法および結果**

被検面として非球面を用い、10回の測定を行なった。データ点数は、前回までと同じく 5,000 点である。現在の加工レベルでは、用いた被検面が設計値どおり加工されているという確信が得られないため、測定の再現性のみを見ることとした。その結果、再現性として、 $\pm 0.09 \mu\text{m}$  (3 $\sigma$ ) が得られた。

**7. 考 察**

われわれは、非球面形状測定において、被検面の取付け誤差や測定系の設定誤差がサブミクロンオーダーの測定精度に影響を及ぼすことを示し、その補正方法について検討した。

Powell<sup>9)</sup> は、本機と同様に走査方式により非球面形状を測定する方法について報告しており、その中で測定系の設定誤差が測定精度に及ぼす影響について論じている。彼は、結論として測定系の設定誤差が測定精度に与える影響はきわめて小さく、無視できる量であるとしている。しかし、彼が対象としている被検面は曲率半径が 100 mm 以上のもので、しかも NA が小さいものであり、われわれが対象としたカメラレンズや CD ピック

アップ用レンズの場合とは異なる。NA が比較的大きく、曲率半径が数 mm から数十 mm の被検面を測定対象とする場合にはセッティング誤差に十分な注意を払う必要がある。

上述のシミュレーション結果および測定結果は、被検面の形状が設計値によくフィットしている場合にはきわめて効果的である。しかし、被検面形状が設計値と大幅に異なる場合にはセッティング誤差の補正ルーチンがあまりよく作用せず、補正結果に大きなうねりを生じることがある。一般に成型品は設計値によくフィットしていると考えて差し支えないが、たとえば作成途中の金型に関しては、被検面の形状は設計値と異なっていると考えなければならず、このような現象が顕著となる。これは、本方式がすべて設計値を基準にしてセッティング誤差などを算出、補正しているためである。すなわち、被検面形状が設計値と大幅に異なっている場合には、それによる測定量とセッティング誤差による影響量との見分けがつかず、そのためすべてをセッティング誤差によるものと仮定して除去してしまうのである。一般にこのような二つの量の性質は異なり、その差の分がうねりとなって現われてくる。この影響を軽減する方法の一つとし

て、参照球面の曲率中心位置に関する正確な情報を与えることが掲げられる。この場合には、セッティング誤差のうちの回転対称成分はこの情報によって補正することが可能となるため、補正されずに残った回転対称成分は被検面の設計値からの隔差であると考えることができる。

## 8. ま と め

- 1) 干渉測長方式を応用し、非接触で被検面全面の測定ができる非球面形状測定機を作製した。その測定精度として  $\pm 0.12 \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ ) が得られた。
- 2) 測定データからセッティング誤差を算出する手法を開発し、通常の測定において発生するレベルのセッティング誤差でも測定精度に影響しない程度に補正できることを確認した。
- 3) 本機の仕様を以下にまとめる。

測定精度:  $\pm 0.12 \mu\text{m}$  ( $3\sigma$ )

測定時間: 約6分 (データ取得時間)

約15分 (標準サイクルタイム)

傾き角補正:  $\pm 7^\circ$

測定範囲:  $R \pm (2.5 \sim 100 \text{ mm})$

直径  $4.5 \sim 70 \text{ mm}$

最後に、本測定機の開発は、オリンパス光学工業(株)技術開発部・川上一雄、川島隆、毛利工、久保允則の諸氏の協力により実現されたことを記す。また、適切なアドバイスをくださった同取締役技術開発部長諸隈肇博士に感謝する。

## 文 献

- 1) T. Yatagai and T. Kanoh: "Aspherical surface testing with shearing interferometer using fringe scanning detection method," *Opt. Eng.*, **23** (1984) 357-360.
- 2) M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi: "Fourier transformation method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 156-160.
- 3) I. Powell: "Aspheric surface calibrator," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 3367-3377.
- 4) 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.
- 5) 加藤正彦, ほか: 特開昭 60-97205.