



## 超高精度三次元測定機

吉住 恵一\*・村尾 次男\*\*・塩谷 雅美\*・今中 良一\*・沖野 芳弘\*

\* 松下電器産業(株)ディスクシステム部 〒571 門真市元町 22-6

\*\* 松下電器産業(株)無線研究所 〒571 門真市大字門真 1006

(1986年6月27日受理)

### Ultra High Accurate 3-Dimensional Profilometer

Keiichi YOSHIZUMI,\* Tsugio MURAO,\*\* Masayoshi SHIOYA,\*  
Ryoichi IMANAKA\* and Yoshihiro OKINO\*

\* Disc Systems Division, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.,  
22-6, Motomachi, Kadoma 571

\*\* Wireless Research Laboratory, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.,  
1006, Ozakadoma, Kadoma 571

An ultra high accurate 3-dimensional profilometer using laser heterodyne interferometer has been developed. We have measured the profiles of aspheric lenses and their molds by this machine. Both the X-Y-Z coordinate surface profiles measurement and the polar coordinate measurement are applicable. The measuring accuracy of X-Y-Z coordinate is better than  $0.05 \mu\text{m}$  when inclination of the investigated surface is smaller than  $\pm 25^\circ$ . The measuring accuracy of polar coordinate measurement is also better than  $0.05 \mu\text{m}$  when the inclination of the aspheric surface is smaller than  $\pm 50^\circ$ . The dynamic range of X-Y-Z measurement is  $40 \times 40 \times 20 \text{mm}$ .

### 1. はじめに

非球面単レンズ化した光ディスク用対物レンズ<sup>5)</sup>は、非球面量が大きく、 $0.1 \mu\text{m}$  以下の高い形状精度が要求される。このような非球面レンズを測定評価するためには、測定機は  $0.05 \mu\text{m}$  以下の測定精度が必要であり、測定値は設計値である非球面式と比較できる完全な三次元座標で得られる必要がある。

ところが、これらの要求を満たす測定機は従来はなかった。われわれは、前回発表の光ヘテロダイン法による非球面形状測定システム<sup>1-3)</sup>に後述の傾きサーボの改良や極座標測定<sup>4,6)</sup>を加える等をして、 $0.05 \mu\text{m}$  以下の精度の三次元座標の測定値が得られる装置を開発し、非球面のレンズと鑄型の測定評価を行なった。

従来の三次元測定機では以下の理由から、 $0.1 \mu\text{m}$  以下のオーダーの測定精度が得られなかった。

1) 測定の基準座標軸が測定機の三次元移動台の移動方向になっているが、移動台の移動真直度やドリフトを

$0.1 \mu\text{m}$  以下にするのは困難である。

2) 接触型測定機の場合、被測定面の傾きに応じて測定位置が変わるが、プローブの大きさが必要測定精度に比べ大きいので、測定位置を  $0.1 \mu\text{m}$  以下の精度で決定するのは困難である。

3) 従来の光プローブ型測定機の場合少なくとも被測定面上にフォーカスサーボをかける必要があるが、後述のように被測定面の傾きの変化による反射光路の変化から  $1 \mu\text{m}$  以上のフォーカス誤差が発生する。

本装置では、上記3点に関して、

1) 三次元座標の基準軸を移動台の移動軸とはせず、面精度  $0.01 \mu\text{m}$  以下のミラー面にしたことにより、基準座標軸の精度  $0.01 \mu\text{m}$  を達成した。

2) プローブの大きさは直径  $2 \mu\text{m}$  に集光されたレーザー光で、被測定面の傾きによる測定位置の誤差はほとんど発生しない。

3) 被測定面からの反射光から直接光ヘテロダイン法で測定するため、測定誤差はフォーカス誤差の1桁以下

と小さい。傾き補正サーボ系により、被測定面の傾きが変化しても反射光の光路は変化しないので、反射光と参照光とを干渉させて測定することができる。

以上より、3軸とも、測定精度  $0.05 \mu\text{m}$  以下を満たす測定機の実現が可能になった。

傾きが、 $\pm 25^\circ$  を越える面の場合、直交座標測定がむずかしくなるので、極座標測定が併用できるようにした。極座標測定だけでは三次元座標は得られないが、同一箇所を傾き  $\pm 25^\circ$  の範囲内で直交座標測定を行なうことによって、極座標測定の測定点の三次元座標が得られ、また、両方の測定結果を比較することによって極座標測定の回転中心を求め、座標変換して極座標測定データを三次元座標に直すことができる。

## 2. 測定原理

Fig. 1 に本測定装置の測定光学系の原理図を示す。被測定面と参照ミラーは、直交座標測定の際は固定しており、測定光学系全体が  $X$ - $Y$  方向に動く。極座標測定の際は、被測定面のみが  $X$  軸を中心に回転する。対物レンズとフォーカスサーボ光学系は測定光を被測定面上に集光させるために  $Z$  軸方向に動く。

周波数  $F1$  と  $F2$  で発振するゼーマンレーザー光は、偏光プリズムで分離され、それぞれ被測定面と参照ミラー上で反射し、光検出器上で重ね合わせられる。被測

定面の  $Z$  方向高さ変化に伴って、反射光の周波数はドプラシフトし、 $F1 + \Delta$  となる。参照ミラーからの反射光  $F2 + \delta$  との差から被測定面の高さを測定する。

$\delta$  は  $X$ - $Y$  移動台の移動真直度不足によって発生する量である。 $\Delta - \delta$  の積分値が面精度  $0.01 \mu\text{m}$  以下の参照ミラー面を基準とした被測定面の形状の  $Z$  座標であり Fig. 5 と Fig. 6 で示すように、本装置の測定精度は移動台精度より  $\delta$  の補正分だけ高い。

$X$ - $Y$  座標は、 $X$ - $Y$  移動台上の  $Z$  軸移動台に取り付けられた対物レンズの位置の測定から得ている。こうすることによって  $Z$  軸移動台に移動真直度不足があっても  $X$ - $Y$  座標の測定値に誤差が生じない。ハーフミラーによって分離されたゼーマンレーザーの測定光と参照光を  $Z$  軸移動台と固定部のそれぞれに取り付けられたミラー面に照射し、これらの反射光を干渉させ、ミラーの移動量を高精度に測定することにより  $X$ - $Y$  座標が得られる。

被測定面へレーザー光を集光させるためにフォーカスサーボをかけているのは、反射光の波面を参照光の波面に合わせ干渉させられるようにするためである。本装置では対物レンズの動きから  $Z$  座標を測定することもできるが、後述のように測定精度は落ちる。

ところで、フォーカスサーボがかかっている場合、被測定面が傾くと反射光の反射方向が変わるので、参照光と

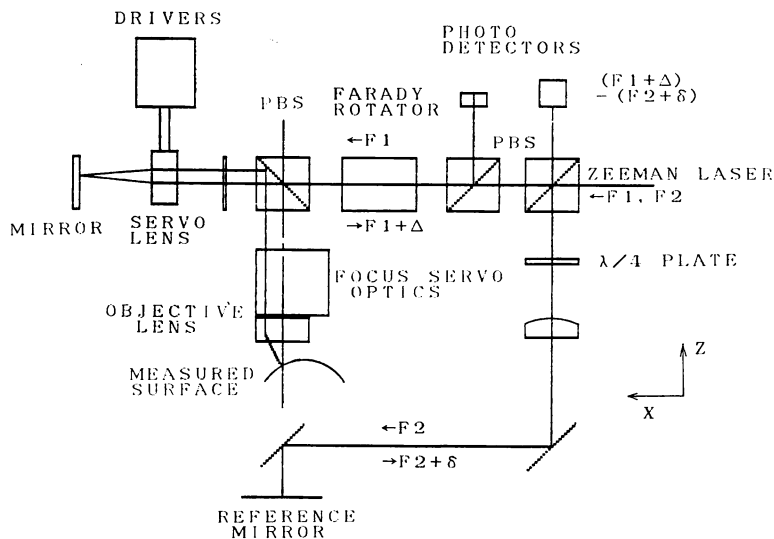
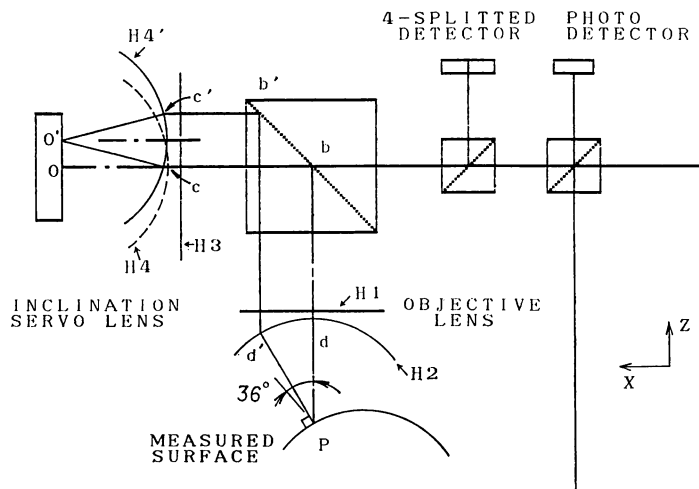


Fig. 1 Schematic configuration of  $Z$ -axis measuring optics. In  $X$ - $Y$ - $Z$  measurement, whole measuring optics moves in the  $X$ - $Y$  direction, but the measured object and reference mirror are fixed. In polar coordinate measurement, only the measured object rotates around  $X$ -axis. Objective lens and focus servo optics move in the  $Z$  direction to focus the measurement light on the surface of the measured object in each case.



**Fig. 2** Concept of the compensation for the inclined plane. The wavefronts of parallel rays change their from flat ones H 1, H 3 to spherical ones H 2, H 4 after they transmitted in objective and servo lenses. The servo lens moves from the dotted line to the solid line according to the inclination of the measured object. Numerical aperture (NA) of the objective lens is 0.6, so that the direction of the rim ray is  $36^\circ$  against the light axis.

干渉させることができなくなる。そこで、これを補正するため傾き補正サーボを開発した。傾き補正サーボの満たすべき特性は、次の3点である。

- 1) 被測定面の傾きが変化しても参照光と干渉させる光検出器上での反射光の光位置が変化しないこと。
- 2) 傾き補正サーボによって、測定光の光路長が変わらないこと。
- 3) 傾き補正サーボによって、測定光の測定位置が変わらないことが望ましい。

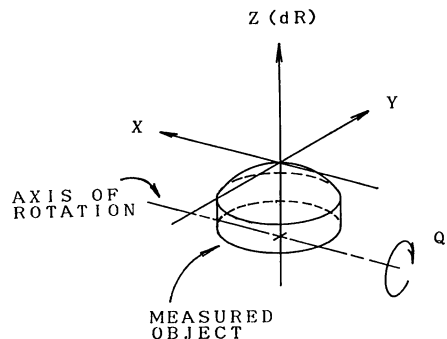
**Fig. 2** に傾き補正サーボの基本概念を示す。対物レンズは、NA が 0.6 で、傾きの補正レンズと共に無限遠収差補正されている。したがって、光路に垂直な平面 H 1 上で位相がそろった光線は対物レンズ通過後は、球面 H 2 上で位相がそろう。同様に平面 H 3 上で位相がそろった光線は球面 H 4 上で位相がそろう。したがって平面 H 1 や H 3 に垂直に入る平行光はどこを通過しても光路長は等しい。

Z 座標の測定は、光路 b-d-P の光路長の変化を測定すればよいが、被測定面が図のように傾いている場合は光路 b-d-P を通る光は元の方向に反射せず、参照光と干渉させられない。そこで、傾き補正用のレンズとミラーを追加して、4分割光検出器の出力を誤差信号として、補正レンズを光の波面が図の破線の位置から実線の位置になるように垂直に動かせる。その結果、光路は b'-d'-P となり被測定面に垂直に入射するので、被測定面の傾きによらず光検出器上で参照光と干渉させること

ができるようになる。

また、傾き補正サーボによって波面が H 4 から H 4' に移動しても、ミラーの面精度等の範囲内でしか光路長は変わらない。したがって、この傾き補正サーボによって、被測定面が傾いたときでも、同じ測定点からの反射光が光路長を変えずに光検出器上に達し、参照光と干渉させることができる。

前回の報告<sup>1-3)</sup>では、対物レンズそのものを動かして傾き補正サーボをかけた。この方式でも反射光を入射光と同一方向に戻すことができ、測定は可能であるが、不便な点があった。これは、対物レンズの動き量だけ測定位置が動くので、測定位置の位置ぎめがオープンループでできないこと、および、極座標測定ができないという点であった。本方式ではこれらの問題点は解決できた。



**Fig. 3** Measuring geometry of X-Y-Z and polar; R-Q measurement.

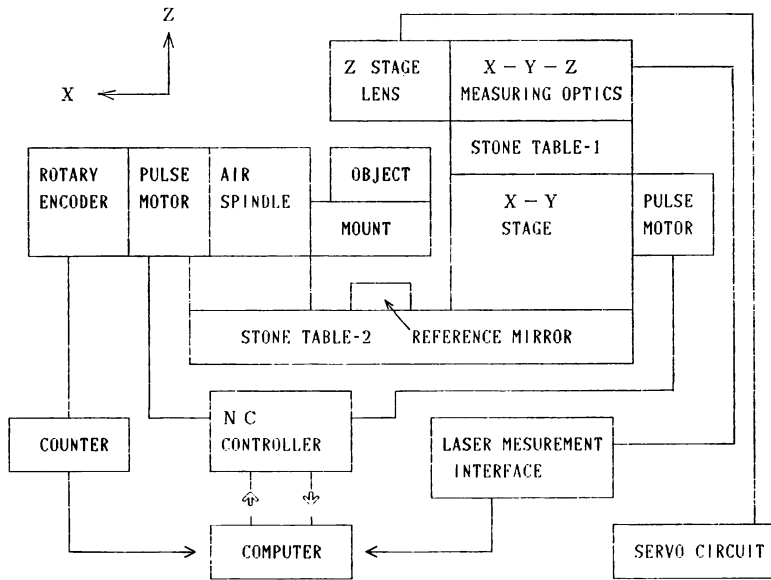


Fig. 4 Total constitution of the profilometer.

### 3. 測定装置

Fig. 3 に三次元測定と極座標測定の座標系を示す。

Fig. 4 に本装置の概略を示す。被測定物はエアスピンドル上に設置される。測定光学系は振動や経時ドリフトに強い大理石の上に配置し、大型 X-Y ステージ上になっている。この X-Y ステージとエアスピンドルは、石定盤上に配置され、コンピュータによる NC 制御で駆動する。Z ステージはフォーカサーボの応答性を良くするためリニアモーター制御になっている。

フォーカサーボは、半導体レーザーと He-Ne レーザーの測定光の両者から誤差信号が得られるようにしており、測定目的に応じて、どちらからサーボがかけられる。以下のデータはすべて半導体レーザーによるものである。

本装置ではフォーカサーボによって、対物レンズが Z 方向にリニアモーター駆動で動くが、対物レンズの位置を光ヘテロダイン法で測定することも可能である。これは、測定精度は落ちるが、被測定面からの直接の反射光からは測定できない粗面の測定に利用できる。

被測定物は、アオリと位置のおおの 2 軸の微調装置を介して、エアスピンドルに取り付けられている。位置の微調装置は、直交座標測定のみときは調節する必要はないが、極座標測定るときは、被測定物の近似球面の中心付近を中心として回転するよう微調装置で被測定物の取付け位置を調整してから測定する。

測定位置、経路は、X-Y ステージ、および、エアス

ピンドルをコンピュータによる NC 制御で駆動してきめる。測定速度は平均で、0.25 mm/s である。NC 制御の最小移動距離は X-Y 方向が  $0.125 \mu\text{m}$  で測定分解能が 5 nm、回転方向はそれぞれ  $0.02^\circ$  および、 $0.001^\circ$  である。X-Y-Z の測定ダイナミックレンジは、 $40 \times 40 \times 20 \text{ mm}$  である。

コンピュータは、NC のコントロール、測定と測定データの処理等を行なう。

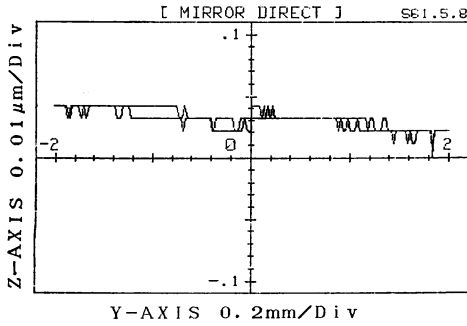
被測定面上の測定経路に傷や埃があると測定できないことがある。そのときに欠陥位置の X-Y 座標を検出して、NC 制御によって自動的にその位置を迂回して測定する自動測定プログラムを開発した。また、測定データは X-Y-Z、または、極座標の座標列として出てくるが、被測定物の取付けが傾いていても、設計値と比較できるように、測定値を座標変換によって、設計値にカーブフィットさせ、設計値と被測定物との形状の差が得られるアライメントプログラムを開発した。

### 4. 測定結果

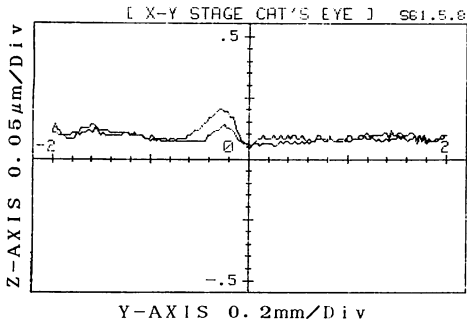
#### 4.1 基準球、基準ミラー測定による測定精度の確認

測定データは X-Y-Z 座標、または極座標の数値列で出てくる。実際問題としてはこの数値列から被測定物の形状の設計値との差を求め、グラフ化する等の処理をする必要がある。本装置からは生の測定データと入力した計算式との差が出力される。測定値の信頼性、再現性を見るため、測定例はすべて往復測定データである。

Fig. 5 は面精度  $0.01 \mu\text{m}$  以下の平面ミラーの形状の



**Fig. 5** Measurement of a flat mirror surface. Measurement is done twice on the same path. Repeatability and linearity are proved under 0.01 μm.



**Fig. 6** Linearity of the X-Y stage movement while measuring the flat mirror shown in Fig. 5.

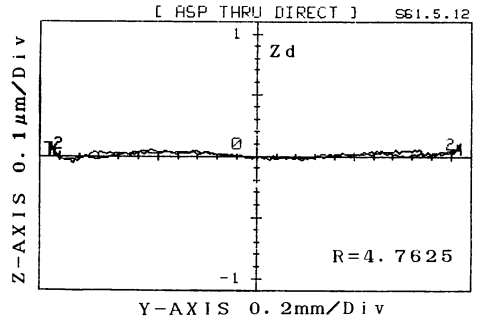
測定結果である。±2mm の範囲を往復測定している。直線性、再現性とも本装置の最小分解能である 0.01 μm 程度に収まっている。一方、Fig. 6 は同測定範囲での本装置の移動台の移動真直度の測定値である。真直度は 0.1 μm の範囲内にさえ入っていないことがわかる。このように本装置では使用した移動台の真直度より 1 桁以上高い測定基準軸が得られている。

Fig. 7 は本装置による半径 4.7625 mm の基準球の測定値である。この基準球は理想球面からの差が 0.02 μm 以下と非常によいことが、真円度測定器と干渉計で確認されている。球の先端を中心に Y 軸方向に ±2mm の範囲を測定している。X, Y, Z は三次元座標の測定値、Z<sub>d</sub> は理想球面との差で、測定値から

$$Z_d = Z + R \pm (R^2 - X^2 - Y^2)^{1/2}$$

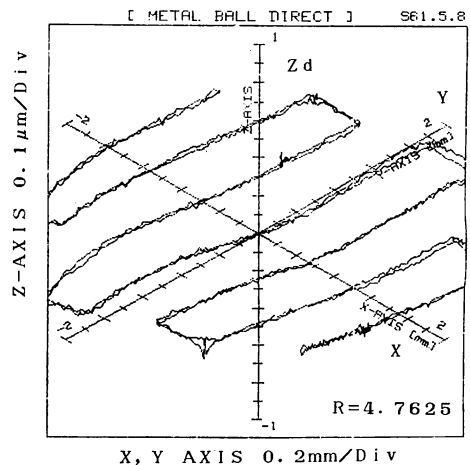
の計算式により得られる。

グラフは、縦軸に Z<sub>d</sub>、横軸に Y 座標をとって上のデータをプロットしたものである。±2mm の位置での被測定面の傾きは ±25° である。このデータから本装置の傾き ±25° 以内での測定精度が ±0.05 μm 以下であることがわかる。

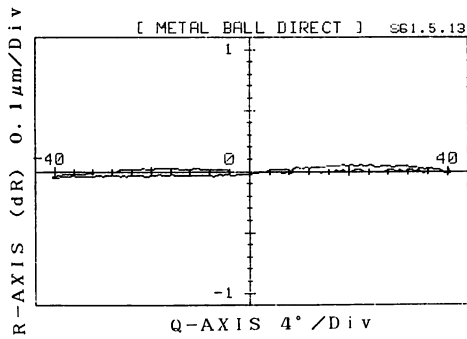


SPHERE ( Y - Z )		[ METAL BALL DIRECT ]		S61.5.12	
START	16:22:58	STOP	16:24:17	SPENT	0:1:19
X [mm]	Y [mm]	Z [μm]	Z <sub>d</sub> [μm]	Q [deg]	
1	-0.0007	-2.1007	-4.65249	-0.01030	0.0000
2	-0.0008	.40433	-17.18573	-0.01811	0.0000
3	-0.0011	.59532	-37.27795	-0.0142	0.0000
4	-0.0014	.78895	-65.64655	.00446	0.0000
5	-0.0019	1.00811	-107.64029	.01250	0.0000
6	-0.0021	1.19861	-152.89394	.01246	0.0000
7	-0.0023	1.39331	-207.79017	.03686	0.0000
8	-0.0021	1.61220	-280.37853	.04494	0.0000
9	-0.0025	1.80278	-353.40471	.01628	0.0000
10	-0.0032	1.99588	-437.11263	.04534	0.0000
11	-0.0029	1.98864	-423.79997	.03430	0.0000
12	-0.0030	1.79571	-350.52987	.01421	0.0000
13	-0.0025	1.60301	-277.12390	.01082	0.0000
14	-0.0026	1.41235	-213.66117	.01424	0.0000
15	-0.0026	1.19073	-150.83672	.03369	0.0000
16	-0.0022	.99059	-105.59362	.01207	0.0000
17	-0.0017	.80743	-68.77986	.00257	0.0000
18	-0.0014	.61253	-39.48288	-.01010	0.0000
19	-0.0011	.39381	-16.30482	-.01775	0.0000
20	-0.0007	.20140	-4.28852	-.01954	0.0000
21	-0.0005	-.00283	-.02110	-.00640	0.0000

**Fig. 7** Measurement of precise 3/8 inch diameter sphere whose shape differs less than 0.02 μm from ideal sphere. Measured ±2mm from the top of the sphere twice by the Y-direction. A portion of the measured numeral data are shown below. X, Y and Z are raw data. Z<sub>d</sub> means the difference from the ideal sphere R=4.7625 mm. Inclined angles of the surface are ±25° at Y=±2mm. Measuring accuracy is proved within ±0.05 μm from these data.



**Fig. 8** Measurement of 3/8 inch sphere, scanned by X and Y directions in this order. Measured data are shown in 3-dimensional graph.



SPTNDLF	[ METAL BALL DIRECT ]		S61.5.13	
	START	STOP	SPENT	
	0 [deg]	Z [um]	X [mm]	Y [mm]
1	-0.070	-0.0155	.00015	-.00055
2	.1975	-.01055	.00015	-.00055
3	4.9835	.01055	.00014	-.00054
4	9.9035	.02637	.00015	-.00055
5	14.8200	.03165	.00015	-.00055
6	19.7190	.04220	.00015	-.00055
7	25.1985	.03632	.00015	-.00055
8	30.0945	.04220	.00015	-.00055
9	35.0030	.01582	.00015	-.00057
10	39.9130	0.00000	.00015	-.00056
11	39.7880	-.01582	.00015	-.00055
12	34.9080	-.00527	.00015	-.00055
13	30.0235	.00527	.00014	-.00055
14	25.1505	0.00000	.00015	-.00056
15	19.5980	0.00000	.00017	-.00055
16	14.8330	-.00527	.00016	-.00055
17	9.9570	0.00000	.00014	-.00055
18	5.0485	0.00000	.00015	-.00055
19	.1700	0.00000	.00013	-.00055

Fig. 9 Polar coordinate measurement of 3/8 inch sphere. Range of measurement is  $\pm 40^\circ$ . A portion of the measured numerical data are also shown.

Fig. 8 は本装置による同一基準球の三次元測定例である。Z 方向は、やはり R との差:  $Z_d$  をプロットし、X-Y 方向は測定値そのままをプロットしている。

Fig. 9 は本装置による同一基準球の極座標測定データである。Fig. 7 と同一部分を  $\pm 40^\circ$  の範囲で測定した。Q は基準球の中心を軸に基準球を回転させたときの回転角、 $d_R$  は半径のずれの測定値で Z 座標測定値と同じである。連続測定しているが、Fig. 9 では紙面のスペースの関係で  $5^\circ$  ごとに測定値を打ち出している。往復測定でやや測定値のドリフトがあるものの極座標測定でも、ほぼ測定精度  $0.05 \mu\text{m}$  以下を満たしていることがわかる。

#### 4.2 非球面形状の測定

Fig. 10 の(a), (b)は、光ディスク用の非球面対物レンズ第2面のレンズとその鋳型の測定結果である。三次元座標の測定値から、座標変換によって非球面レンズの取付けのミスアライメントを補正し、設計値との差をプロットしている。X-Z 方向と Y-Z 方向で往復測定を行っており、濃い実線が X-Z 測定、薄い破線が Y-Z 測定データである。中央部の突起も含め鋳型とレンズの面形状は正確に一致していること、設計値との差が  $0.02 \mu\text{m}$  程度であることがわかる。なお、突起部は面積

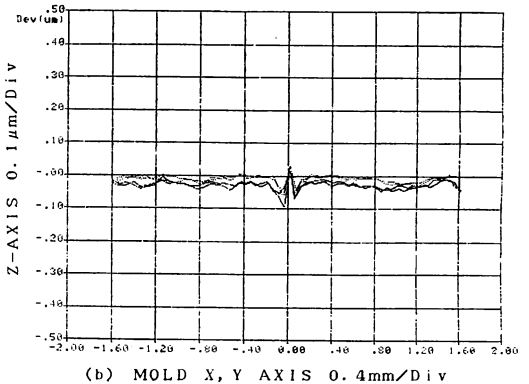
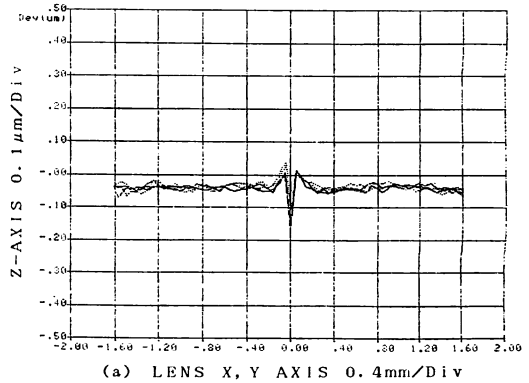
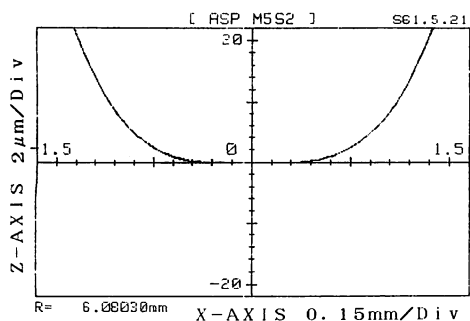


Fig. 10 Measurement of an aspheric glass lens and its mold. Alignment of the measured data was done by a computer. As the result of it, differences from the designed data are plotted. Dark solid lines are X-Z measurement and thin dotted lines are Y-Z ones. Each measurement were done twice. (a) Second surface of the aspheric lens. (b) Mold of the same surface.

が小さいのでレンズの性能への影響はない。Fig. 11 は、同じレンズの測定データで縦軸に球面との差:  $Z_d$  (非球面量) をプロットしたものである。

Fig. 12 は、第1面の鋳型の測定データである。第1面は鋳型の周辺部の傾きが  $\pm 37^\circ$  と大きいので、直交座標と極座標の測定を組み合わせたデータとなっている。極座標測定は、傾き  $\pm 25^\circ$  までは Y-Z 測定と同一経路を通過し、 $\pm 38^\circ$  まで測定している。極座標測定データは Y-Z 測定データと一致するように測定時の回転中心を求め、直交座標系に変換し、アライメントを補正し設計値との差をプロットしている。X-Z, Y-Z, 極座標とも往復測定なので、グラフ上は6本の線が見えている。極座標測定では回転軸の軸心のふらつきがあるが、第1面も中心部を除き設計値との差はほぼ  $0.05 \mu\text{m}$  以内に入っていることがわかる。



SPHERE	( X - Z )	[ ASP M5S2 ]	S61.5.21		
START	11:41:37	STOP	11:42:33		
X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Zd [μm]		
1	.00433	-.00003	-.00527	-.00217	-.0010
2	.09021	-.00001	-.74904	-.06942	-.0010
3	.18929	-.00003	-3.07001	-.10795	-.0010
4	.29519	.00001	-7.45348	-.07271	-.0010
5	.40959	.00003	-13.73065	-.09572	-.0010
6	.45286	.00004	-19.68078	-.34289	-.0010
7	.60358	.00009	-29.11763	-.93157	-.0010
8	.68673	.00012	-37.30960	1.61093	-.0010
9	.79407	.00015	-49.17920	2.91236	-.0010
10	.90251	.00017	-62.63983	4.72016	-.0010
11	1.00797	.00017	-76.96128	7.17591	-.0010
12	1.08994	.00020	-88.90900	9.50094	-.0010
13	1.19336	.00023	-104.86040	13.41460	-.0010
14	1.30642	.00025	-123.45381	18.56553	-.0010
15	1.40212	.00028	-140.03892	23.83640	-.0010

Fig. 11 Measured data X-Za of the second surface of the aspheric lens are plotted. Za also denote the differences from a sphere.

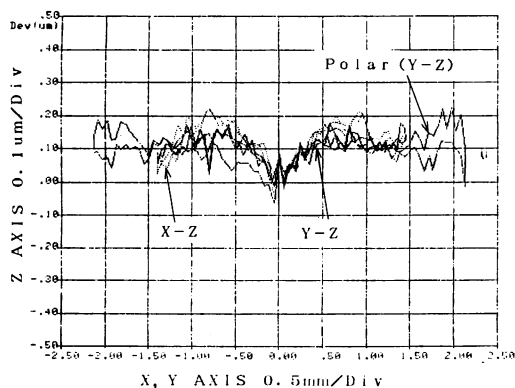


Fig. 12 Measurements of a mold of the first surface of the aspheric lens. Both rectangular and polar coordinate measurements are done. Rectangular measurement is done for ±1.4 mm from the center of the mold where inclined angles are smaller than ±25°. Polar coordinate measurement is done from the rims of the mold where inclined angles are ±38°. Polar coordinate data are transformed to rectangular ones by comparing with rectangular data. Differences from the designed data are plotted.

上述の2往復の測定時間は1分40秒で、通常の接触型三次元測定機に比べ、著しく測定時間が短縮できる。これは測定面上を連続走査して測定できるからである。

4.3 対物レンズ位置の測定結果

本装置では対物レンズのZ方向の動きを0.01 μmの

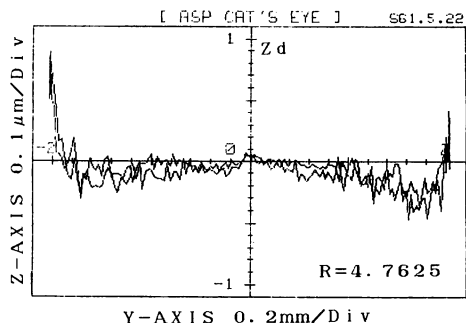


Fig. 13 Movement of the objective lens while measuring 3/8 inch sphere. Vertical axis shows Za. The amount of Za indicates the focus error of the profilometer. Measuring error is proved 1/10 times smaller than the focus error.

Table 1 Relations between inclined angle and measurement error when focus error is 0.5 μm. Measurement error is proved under 0.05 μm.

Inclined angle θ(°)	0	10	20	25
Measurement error (nm)	0	8	30	47

精度で測定することもできる。ミラーを対物レンズと一体に動くように挿入し、このミラーからの反射光からZ座標も測定するわけである。フォーカサーボは被測定面上に集光した半導体レーザーの反射光を二つに分け、二つのピンホールを透過した光量の差から誤差信号を得ている<sup>1,7)</sup>。対物レンズの位置から面形状を測定するのは、フォーカサーボの精度に依存するので精度は1桁落ちるが、この方法で形状のわかっている基準球測定を行えばフォーカス誤差量と測定誤差との関係がわかる。

Fig. 13は、基準球のFig. 7と同経路を測定したときの対物レンズの位置の測定結果を、縦軸をR=4.7625 mmの理想球面との差、Zaで示したものである。この

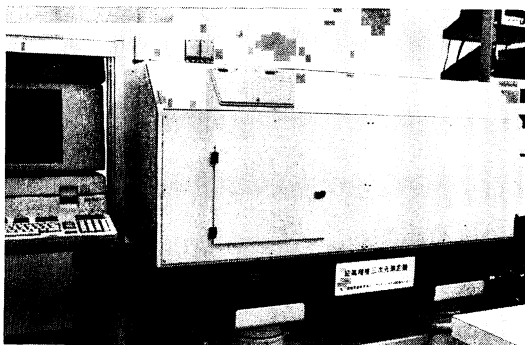


Fig. 14 Photograph of the profilometer.

データから傾き  $25^\circ$  以内ではフォーカス誤差は  $0.5 \mu\text{m}$  以内に入っていることがわかる。

フォーカス誤差を  $\delta$  とすると、測定誤差  $\Delta Z$  は被測定面の傾き  $\theta$  に依存し、次式で表わされる<sup>1)</sup>。

$$\Delta Z = \delta (1 - \cos \theta)$$

この式は、Fig. 7 と Fig. 13 のようなデータを比較して、ほぼ正しいことがわかっている。この式から、Table 1 に示すようにフォーカス誤差を  $0.5 \mu\text{m}$  としたとき、測定誤差は、 $0.05 \mu\text{m}$  以下となることがわかる。

## 5. ま と め

Fig. 14 に本測定装置の外観写真を示す。

光ヘテロダイン測定法を利用した、超高精度三次元測定機を開発した。非球面レンズと、その鋳型の形状測定を行ない、設計値と比較した。本装置は、ゼロ点を変えずに直交座標系と極座標系の両方の測定が可能であるので、極座標測定だけではできない  $R$  の決定等の絶対形状測定や、測定部が被測定面の中心を通っているか等もわかる。測定精度は、被測定面の傾き角が  $\pm 25^\circ$  までの

場合、3軸とも、 $0.05 \mu\text{m}$  以内、極座標測定では、非球面形状測定の場合、傾き  $\pm 50^\circ$  の面までの測定精度が同様に、 $0.05 \mu\text{m}$  を達成した。

## 文 献

- 1) 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.
- 2) K. Yoshizumi and Y. Okino: “Precise measuring method for aspheric surfaces using a laser heterodyne interferometer,” CLEO '83, Technical Digest (1983) pp. 222-223.
- 3) 吉住恵一, 細美哲雄, 沖野芳弘: “光ヘテロダイン法を利用した非球面形状の精密測定システム”, 自動制御連合講演会予稿集 (1982) pp. 593-594.
- 4) D. Visser, T. G. Gijsbers and R. A. M. Jorna: “Molds and measurements for replicate aspheric lenses for optical recording,” Appl. Opt., **24** (1985) 1848-1852.
- 5) 田中康弘, 上田昌明, 長岡良富: “両面非球面ガラスレンズの設計とその応用”, 機械設計, **30** (1986) 36-41.
- 6) 泉谷徹郎, 石灰勲夫: “光ディスク用非球面ガラスレンズの設計とその応用”, 機械設計, **30** (1986) 42-50.
- 7) Y. Fainman, E. Lenz and J. Shamir: “Optical profilometer: a new method for high sensitivity and wide dynamic range,” Appl. Opt., **21** (1982) 3200-3208.