

非球面形状の精密測定システム*

吉住 恵一・沖野 芳弘

松下電器産業(株)ディスクシステム開発センター 〒571 門真市元町 22-6

(1983年8月12日受理)

Precise Measuring System for Aspheric Surfaces

Keiichi YOSHIKUNI and Yoshihiro OKINO

Disc Systems Development Center, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.,

22-6, Motomachi, Kadoma 571

A precise X-Y-Z noncontact measuring system using a laser heterodyne interferometer for aspheric or arbitrarily curved surfaces has been developed. Its accuracy is better than $0.1 \mu\text{m}$ and its tolerance of slope angle is $\pm 30^\circ$. The newly developed optical method is used to measure an inclined surface directly with a focused frequency stabilized laser light. Mechanical or other kinds of errors cause small measuring errors because the coordinate of an investigated surface is directly measured by a change in the frequency of the frequency-stabilized laser light reflected from the investigated surface. A high power (2.5 mW) He-Ne Zeeman laser is also used to measure a surface having low reflectivity such as glass or plastic.

1. はじめに

近年、光学機器の設計製作において、非球面の必要性は増している。現在、ほとんどの光学機器には、球面のレンズやミラーが使われているが、球面には本質的に種類の収差があるため、複数個のレンズを組み合わせ、これらの収差を低減させているのが現状である。一方、これらのレンズ系は、非球面レンズに置き換えることによって、大幅に枚数を削減できる¹⁻³⁾。さらに、非球面は、球面より進んだ新しい機能のレンズを作ることもできる。製法と測定法が困難なため、まだ広く使われるには至っていないが、精密加工技術の進歩によって、種々の面形状を自由に精度よく作れるようになってきた⁴⁾。

測定法については、すでに各種の方法が提案されている。これらは二つの手法、すなわち、干渉測定法と、座標測定機に大別される。干渉測定法は、 $0.1 \mu\text{m}$ 以下の高い測定精度が得られる。しかし、シュアリング干渉法⁵⁾等を除いては、非球面の波面を作るための原型が必要であり、正確な原型を作るための工程が必要となる。一方、従来の座標測定機は、任意の曲面の測定が直接に可能である。しかし、移動台の機構精度、測定プローブの精度等から、光学部品の測定に十分な精度は得にく

い。

本方式は、干渉計のもつ高い測定精度と、任意の曲面の測定が可能な座標測定機の利点を兼ね備えたものである。本方式では、周波数の安定化されたゼーマンレーザの光を被測定面上に絞り込み、反射光の周波数変化から被測定面の座標位置を測定する。被測定面が傾いても、被測定面からの反射光が入射光と同一の光路をとるような光学系を開発したことにより、傾いた曲面の測定が可能となった。フォーカスサーボは、測定の補助手段として使われるが、測定精度は、フォーカスサーボの精度よりもよい。また、機構精度等に起因する誤差も測定精度に与える影響は少ないため、原理的には測定精度 $0.01 \mu\text{m}$ が達成可能である。

2. 測定原理

測定方式として、被測定面の状態によって2段階の方式が考えられる。簡単のため、第一の方式から説明する。全体の構成を **Fig. 1** に示す。発振周波数が安定化された He-Ne 横ゼーマンレーザは、周波数 F_1, F_2 の互いに偏波面が直交したレーザ光を発する。測定光 F_1 は X 方向に偏波しており、偏光プリズム S_1 と S_2 を透過し、被測定面上に集光される。被測定面を X-Y 方向に移動させることにより、被測定物の厚さ変化、すなわち Z 成分の変化が、ドブラー効果によって反射光

* 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

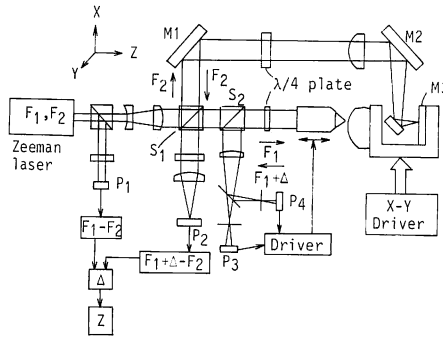


Fig. 1 First step in our measuring system.
P: Photo sensors, M: Mirrors, S: Polarized beam splitters.

の周波数変化 Δ を引き起こす。λ/4 板の作用で反射光は Y 方向に偏波するが、S 偏波の光のみ一部反射する偏光プリズム S_2 によって一部反射し、再び二つに分けられ、ピンホールを通過し、光検出器 P_3 と P_4 に達する。 P_3 と P_4 の出力の差から作られたフォーカス誤差信号^{6,7)}によってフォーカスサーボがかけられる。

偏光プリズム S_2 を透過した反射光は光検出器 P_2 に到達する。周波数 F_2 の参照光は Y 方向に偏波しているため、 S_1 で反射し、ミラー M_3 で反射し、光検出器 P_2 に達する。光検出器 P_2 上では、これら二つの反射光のビート周波数 $F_1 + \Delta - F_2$ が検出される。参照光を、被測定物と同一移動台上におかれたミラー M_3 で反射させるのは、移動台の、X-Y 平面からずれた動きを補正し被測定物の面形状のみを正確に測定するためである。 $F_1 - F_2$ との比較から Δ が得られ、 Δ の積分から厚さ Z が得られる。

ところで、この第一の方式では、被測定面が傾いた場合に反射光の一部が対物レンズ外に出てしまい、また、参照光と光路が一致せず、検出できる信号は小さくなる。とくに、反射率の低いガラス面等の測定は困難となる。この点を改良したのが次の第二の方式で、被測定面が傾いても反射光の光路の中心位置は変わらず、安定で精度のよい測定が可能となる。原理は、**Fig. 2** に示すように入射レーザー光のビーム径を対物レンズの口径より小さくし、被測定面上に絞る。面が θ 傾いたときは、**Fig. 2(a)** のように反射光は入射光の方向に対して、 2θ 傾くので、同一光路を戻らない。ところが、ビームスプリッターにより反射光の一部を四分割光検出器上に入射させ、光路が光検出器の中心からずれた場合は誤差信号を出力し、サーボモータにより対物レンズを X-Y 方向に移動させる。そうすると、反射光は **Fig. 2(b)** に示すように入射光と同一光路を戻るようになる。収差がない

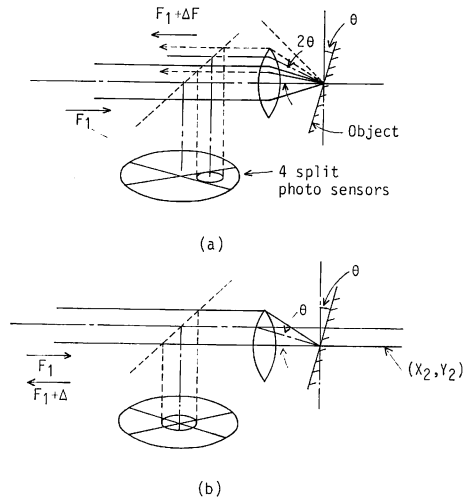


Fig. 2 (a) Object is inclined and lens does not move.
(b) Lens moves in X-Y direction by servo signals.

限り、光が対物レンズのどの部分を通っても光路長は変わらず、したがって、面が傾いても Z 方向の測定値に影響を及ぼさない。

一方、測定点の X-Y 座標は、常に対物レンズの光軸上にあるから、X-Y 座標を正確に測るには、被測定物の移動量 (X_1, Y_1) から対物レンズの移動量 (X_2, Y_2) を引いた $(X_1 - X_2, Y_1 - Y_2)$ を精度よく測定すればよい。 $(X_1 - X_2, Y_1 - Y_2)$ は、対物レンズを載せた移動台と、被測定物を載せた移動台上にそれぞれミラーを置き、Z 方向を測定したゼーマンレーザーの光を一部分離した光によって **Fig. 3** に示すように、Z 方向同様、ヘテロダイン法により高精度に測定できる。面の測定可能な最大傾き角は、対物レンズの NA に依存するが、 $NA = 0.6$ 、作動距離 3 mm の対物レンズを使用した場合、 $\pm 30^\circ$ の傾きの面まで測定できる。さらに、非球面レンズ面等の回転対称な面の測定には、被測定レンズの軸を 30° 傾け、この軸を中心にレンズを回転させて測定するならば、 $\pm 60^\circ$ の傾き面をもつレンズまで、全面測定可能となる。

ただし、いわゆる光学的粗面を測定する場合は、反射光の方向が急速に変化し、測定がむずかしくなる。したがって、反射率の大きい非研磨の金属面の測定には、むしろ、第一の方式のほうが適している。**Fig. 3** に、第二の方式による測定システムの構成を示す。

3. 実験装置と測定例

光源は、2.5 mW の He-Ne の横ゼーマンレーザー⁸⁾を

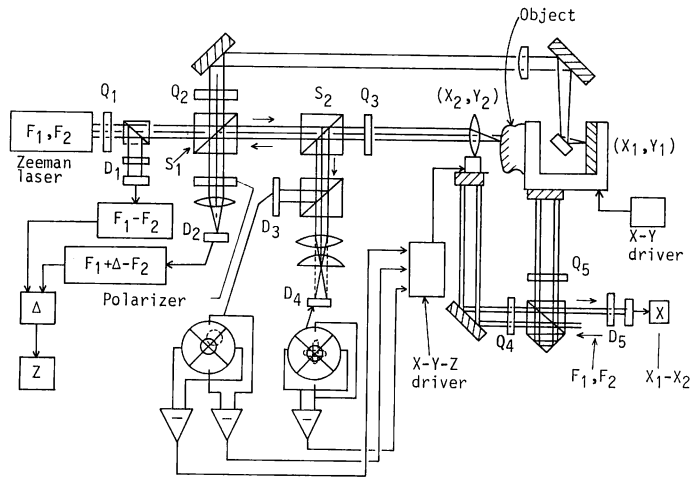


Fig. 3 Schematic view of the measuring system.
 D₁₋₅: Photo sensors, Q₁₋₅: Quarter wave plates, S: Polarized beam splitters.

使用した。対物レンズは小型の X-Y-Z 移動台上に固定され、DC モータによって駆動される。被測定物は、X-Y 方向に移動できるテーブル上に置かれ、DC モータによって駆動される。これらの移動台の移動真直度は 1 μm 以下である。被測定物を X 方向に移動させ、X 座標と厚さ Z が同時に出力される。測定プロセスは、コンピュータにより制御されている。測定例は Fig. 4 に示す。干渉測定器によって、面精度があらかじめ確認された球面レンズを測定し、測定精度が 0.1 μm 以下であることを確認した。

4. 考 察

4.1 集光点でのスポットサイズの計算

第一の方式では、測定光は対物レンズの開口一杯に入射させる。第二の方式では、ガウス型の強度分布の対物レンズの開口径より小さいスポットサイズの平行光を入射させる。これらの対物レンズによって集光された点のスポットサイズは以下ようになる。第一の方式の場合、開口面での光強度分布が均一と仮定すると集光点での光の強度分布 $I(\rho)$ は次式で表わされる⁹⁾。

$$I(\rho) \propto \text{Besinc}^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} NA \cdot \rho \right) \quad (1)$$

ただし、 $\text{Besinc}(x) = J_1(x)/x$, $J_1(x)$ は第一種の一次のベッセル関数である。

ここで、 ρ は光軸からの距離、 NA は開口数を表す。一方、ガウスの入射光が、対物レンズの開口径より十分小さい場合、 $I(\rho)$ は次のガウス分布になる。

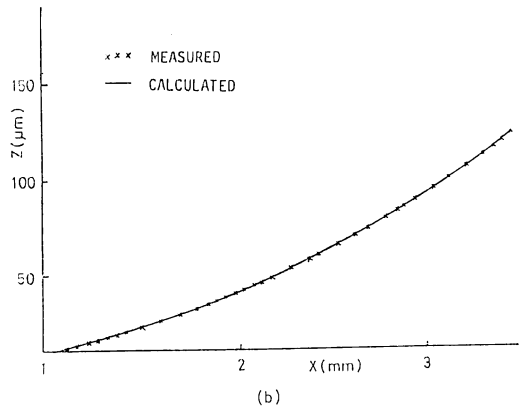
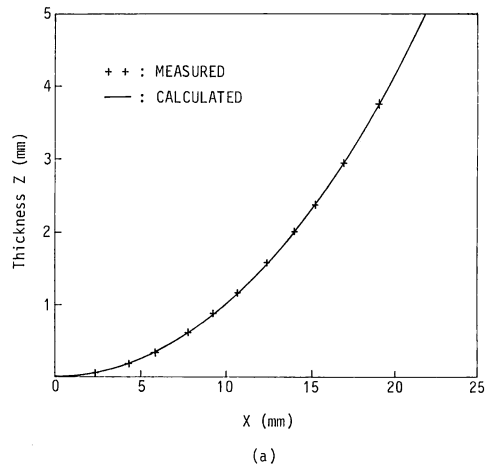


Fig. 4 Results of measuring a spheric surface.
 (a) Measurement of entire surface.
 (b) Measurement of a small part.

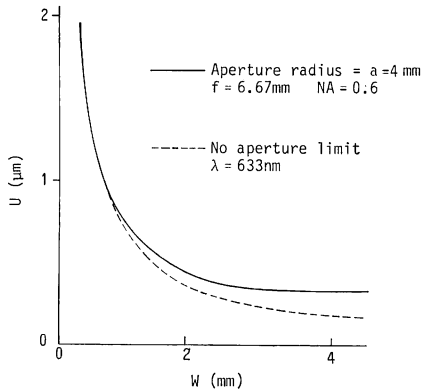


Fig. 5 Radius of the incident beam W , versus radius of the focused spot U .

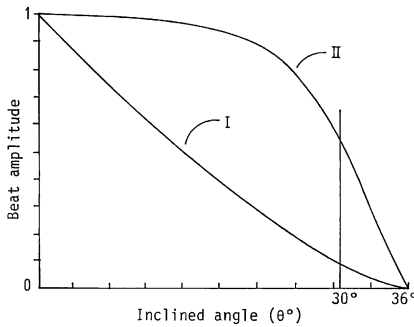


Fig. 6 Inclined angle (θ) versus beat amplitude. Curve I and II indicate First step and Second step method respectively. When $NA=0.6$, $\theta\alpha=36^\circ$.

$$I(\rho) \propto \exp\left\{-\left(\frac{2\pi}{\lambda} NA_e \cdot \rho\right)^2\right\} \quad (2)$$

ここで、等価的 NA として、 $NA_e = W/\text{焦点距離}$ を定義した。 W は、入射光の、強度が中心部の $1/e$ になる位置までの半径を示す。(1)式はエアリーディスクであるが、スポットサイズ U (強度が $1/e$ になるまでの半径) は、 $0.3 \lambda/NA$ ($NA=0.6$ のとき $0.32 \mu\text{m}$) となる。(2)式では、 U は、 $\lambda/(2\pi NA_e)$ となる。

第二の方式の場合、入射光はガウス型であるが、周辺が対物レンズの開口によって遮蔽されるため、スポットサイズ U は、Fig. 5 の実線のようになる。 U の値が対物レンズ一杯に光が入った場合の2倍になるとき、 $W=0.29a$ (a は対物レンズの開口半径) となるが、第2の方式では、この W の値を採用した。

4.2 被測定面の傾きの影響

第一および第二の方式における被測定面の傾き角と、反射光が対物レンズを通して光検出器上に戻る割合、す

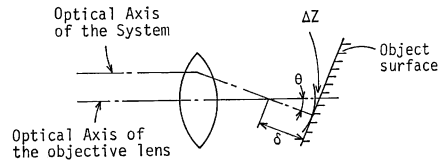


Fig. 7 When the focus error is δ , and the inclined angle of the surface is θ , the measuring error ΔZ becomes $\delta(1/\cos \theta - 1)$.

なわち、検出する信号強度の関係を4.1節で示した入射光分布を仮定して求めた。結果のみ、Fig. 6 に示す。 Fig. 6 から、被測定面の傾きが 30° のとき、第一の方式では検出する信号は8%に落ちるが、第2の方式では54%にしか落ちないことがわかる。

4.3 測定精度について

測定精度の理論的限界は以下のように考えられる。被測定面の Z 方向の座標の変化速度を v とすると、反射光の周波数は $F_1(1-2v/c)$ となる (c は水の速度)。厚さ Z は v の積分であるので、

$$Z = \int v dt = \frac{c}{2F_1} \int \Delta dt$$

で表わされる。ここで Δ は、反射光の周波数の変化量を表わす。したがって、測定精度は F_1 の変動量に依存するが、レーザの周波数の安定度 ($\Delta F/F$) は 1.5×10^{-9} である⁸⁾ ので、測定精度は原理的には $0.01 \mu\text{m}$ よりよい。

次に、現実に精度をきめる要素である、移動台の精度、サーボの精度、対物レンズの収差、機構の温度による収縮、光路中の空気屈折率変化について調べ、測定精度を上げる方策につき考察する。

まず、移動台の移動精度で問題となるのは、移動台の傾きである。移動台が移動中にわずかに傾いた場合、アップの誤差と呼ばれる誤差を生ずる。たとえば、 X 方向のみ考えると、移動台の移動量の測定点の X 座標と、被測定面上の測定点の X 座標との差を l_x とし、移動台の y 軸を中心とした傾き角を α_y とすると、測定誤差 δ_x は $l_x \alpha_y$ となる。 δ_x を $0.01 \mu\text{m}$ 以下にするには、 $l_x = 10 \text{ mm}$ とすると $\alpha_x < 1 \mu\text{rad}$ である必要がある。他の座標についても同様である。この移動台精度は、現実的に達成可能である。

サーボ誤差では、フォーカスサーボのみ問題となる。フォーカス誤差を δ としたとき、Fig. 7 に示すように測定誤差 ΔZ は、 θ を被測定面の傾き角として、次式のようになる。

$$\Delta Z = \delta \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)$$

したがって、 θ が小さいときはほとんど問題にならないが、 $\theta=25^\circ$ のとき $\Delta Z=0.1\delta$ 、 $\theta=30^\circ$ のときは 0.15δ となる。したがって、フォーカス誤差を、 $0.1 \mu\text{m}$ 以下にするならば、誤差は $0.015 \mu\text{m}$ 以下にできる。

レンズの収差については、対物レンズへ入射する平行光の光束の位置によって、集光位置が ΔZ ずれたとしても、フォーカスサーボがかけられているため、常に集光位置に被測定面が来る。したがって、対物レンズと被測定点の距離は ΔZ だけ変化するが平行光の部分の光路長は $-\Delta Z$ 変化し、合計の光路長は変わらず、近似的には測定誤差は生じない。厳密に調べても測定誤差は対物レンズのもつ収差量の10分の1以下で、主要な誤差の原因にはならない。

構成要素の温度ドリフトについては、鉄の線膨張率が $1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ であるので、参照光と測定光の光路差が 9 cm のとき、測定中の温度変動が 0.1°C 以内であれば精度 $0.01 \mu\text{m}$ が可能となる。空気の屈折率変動は、鉄より1桁小さいのでほとんど問題にならない。以上のことから、測定精度には移動台の精度、温度ドリフト、フォーカス誤差が最も影響するが、誤差 $0.01 \mu\text{m}$ 程度にすることも可能なことがわかる。

5. ま と め

きわめて高精度の面形状の座標測定法を開発した。前

述の第二の方式については、非球面レンズの形状測定に有力な方法である。一方、第一の方式については、非研磨のざらついた面の測定も可能だが、この点は今後の詳しい検討が必要である。測定精度については、 $0.1 \mu\text{m}$ の精度は確認した。 $0.01 \mu\text{m}$ の精度が可能なのは示したが、この実験的確認も今後の検討課題である。

最後に、本研究をすすめるに当たり、激励いただいた当センターの神尾主幹技師、回路関係でご協力いただいた辻氏およびYHPの関係諸氏、ご助言いただいた当社中研の永島氏に感謝いたします。

文 献

- 1) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (Pergamon Press, New York, 1975) p. 196.
- 2) J. Haisma, E. Hugues and C. Babolat: *Opt. Lett.*, **4** (1979) 70.
- 3) J. Murai, Y. Matsui and I. Harumoto: *SMPTE J.*, **88** (1979) 542.
- 4) R. A. Jones: *Opt. Eng.*, **18** (1979) 390.
- 5) 加納敏夫, 谷田貝豊彦, 斉藤弘義: 第8回光学シンポジウム (1983).
- 6) Y. Fainman, E. Lenz and J. Shamir: *Appl. Opt.*, **21** (1982) 3200.
- 7) S. Ando, I. Taniguchi and T. Miyazawa: *Appl. Opt.*, **5** (1966) 1961.
- 8) H. Takasaki, N. Umeda and M. Tsukiji: *Appl. Opt.*, **19** (1980) 435.
- 9) 草川 徹: レンズ設計のための波面光学 (東海大学出版会, 1975) p. 21.