

研究

疑似移動格子モアレ法による非球面検査

小 野 明

(株)東芝生産技術研究所 〒235 横浜市磯子区新杉田 8

(1986年10月22日受理)

Aspherical Mirror Testing Using a Quasi Lateral Moving Grating Moiré Method

Akira ONO

Manufacturing Engineering Laboratory, Toshiba Corporation,
8, Shinsugita, Isogo-ku, Yokohama 235

An aspherical surface testing method has been presented. The principle ideas come from moiré topography method and computer generated holography. In the process, by inputting designed values of the surface profile to computer null testing can be done without making a reference surface. From the designed values the computer calculates an interference fringe pattern assuming an ideal aspherical surface. This theoretical interference pattern is stored in a frame memory. The aspherical surface under test is set in an interferometer and a moiré pattern of the theoretical and the measured interference fringe pattern on a monitor screen. The moiré pattern indicates the difference between the tested surface profile and the designed profile.

1. はじめに

光学系の高性能化, 軽量化, 低価格化のために, 最近光学非球面の研究が盛んに進められ, 一部実用化も行なわれている¹⁻³⁾. 光学非球面開発のむずかしさは, その製作方法はいうまでもなく, その検査手法にもある. 検査には, 精度 $0.1 \mu\text{m}$ 以下, 測定範囲 $1 \sim 10 \text{ mm}$ の超精密な三次元形状測定装置が要求される. 汎用三次元測定器では測定精度の点で適用困難である. そこで光学非球面検査専用の種々の測定手法が考案されている.

いままでに考案された測定手法を大別すると(1)直接形状測定法, (2)光波面測定法, (3)マルチテスト法に分けられる⁴⁾. 直接形状測定法や, 光波面測定法では, 表面形状や光波面形状の絶対値が測定値として得られるので, 光学的評価を行なうには, さらに理想形状からの形状誤差を求めることが必要となる. ところが, マルチテスト法では, マスタとの形状差を精度高く得ることができ, 直接光学的評価が行なえるため, 最もすぐれた方法といえる. ただしマスタを作製するのに多大な手間を必

要とするところが難点であった.

そこで, マスタ製作の代わりに, 設計形状値を計算機に入力することで, マルチテストが行なえる方法, 「疑似移動格子モアレ法」を考案した. 本方法は上記マルチテスト法の一つ, コンピュータホログラム法⁴⁾と, 移動格子モアレトポグラフィ法^{5,6)}と, 走査モアレ法⁷⁾にヒントを得たものである. 本方法では, 測定物より得られる干渉縞と, 画像メモリに格納されている標準干渉縞パターンとの差を示すモアレ縞を実時間で表示し, モアレ縞の歪より光学非球面の形状誤差を求める. また, あわせてモアレ縞の鮮明度を高めるため疑似移動格子法を工夫した.

2. 背景技術説明

疑似移動格子モアレ法の測定原理説明を明確にするため, ここでは, 移動格子モアレトポグラフィ法について簡単に触れておく.

モアレトポグラフィ法では, 格子像の空間周波数(搬送周波数)とモアレ縞の周波数(変調周波数)が近づくとモアレ縞の鮮明度が著しく低下する. そこで格子を移

動させながらモアレ縞を観察することで、元の格子像を平滑して消し去る方法を高崎が開発した^{5,6)}。

被測定物体の真上に格子を置き、斜め上方より点光源で格子を照射すると、格子の影が物体に投影される。真上よりこの物体を観察すると、物体上の格子影像と格子自身との積のモアレ縞が現われ物体の三次元形状測定が行なえる。このとき、格子を水平に移動すると、格子の透過強度分布 $I_1(x, t)$ と、影像の強度分布 $I_2(x, t)$ は(1)式で示すように、同一位相で変化する。

$$\begin{aligned} I_1(x, t) &= I_1[1 + \cos\{\alpha x + \theta t\}] \\ I_2(x, t) &= I_2[1 + \cos\{\alpha x + \delta(x) + \theta t\}] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 I_1, I_2 は定数、 α は格子の空間周波数、 $\delta(x)$ は物体形状に依存する格子影像の位相変化、 θ は格子移動による位相変化速度、 t は時刻である。

観察されるモアレ像は、 $I_1(x, t)$ と $I_2(x, t)$ との積の時間平均となるので、その強度分布 $I(x)$ は

$$\begin{aligned} I(x) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T I_1(x, t) \times I_2(x, t) dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T I_1 \times I_2 [1 + \cos\{\alpha x + \theta t\} \\ &\quad + \cos\{\alpha x + \delta(x) + \theta t\} \\ &\quad + \frac{1}{2} \cos\{2\alpha x + \delta(x) + 2\theta t\} + \frac{1}{2} \cos\{\delta(x)\}] dt \\ &= I_1 \times I_2 [1 + \frac{1}{2} \cos\{\delta(x)\}] \end{aligned} \quad (2)$$

となる。上式のように直流成分は残るものの、時間平均による平滑化により、物体形状を示すコントラストの高いモアレ縞が得られる。

3. 疑似移動格子モアレ法

3.1 測定原理

考案した疑似移動格子モアレ法による非球面測定の原理について述べる。まず非球面の形状値をコンピュータに入力し、形状誤差がゼロと仮定したときの干涉縞の強度分布を算出する。算出した仮想干涉縞の強度分布を画像メモリに格納し、仮想コンピュータプログラムとする。

次に被測定非球面を Fig. 1 で示す干涉計にセットする。物体光と参照光との干涉縞を TV カメラで観察し、その強度分布をコンピュータに取り込む。走査モアレ法⁷⁾と同様に、コンピュータ内で、干涉縞と仮想コンピュータプログラムとのモアレ縞を算出し表示する。すると得られるモアレ縞が、被測定非球面の形状誤差を示し、非球面検査が行なえることが考えられる。

しかしながら、この方法ではモアレ縞だけを抽出するローパスフィルタの機能がないため^{4,8)}、よほど仮想コンピュータプログラムにおける搬送波の空間周波数を高めないと鮮明なモアレ縞が得られない。とくに非球面の中央部の干涉縞の空間周波数は低いので、モアレ縞の周波数と同程度となり、両者の区別がつきにくくなる。ところが TV カメラの画素数はただだか 500×500 程度と限られているので、仮想コンピュータプログラムの最大空間周波数 f_{mx} (単位: 本/半径) も制約される。たとえ要求される干涉縞歪測定精度を λ/m とすると、

$$f_{mx} \leq 500/m \quad (\text{本/半径}) \quad (3)$$

となる。最大空間周波数 f_{mx} は、物体光の帯域幅と搬送波周波数との和であり、被測定非球面が奥行深いほど、物体光の帯域幅は広くなるので、搬送波の空間周波数を下げないと(3)式の条件を満たせない。

そこで、前述の移動格子モアレトポグラフィ法の原理を導入し、搬送波を用いなくとも、モアレ縞を鮮明化することを考えた。移動格子モアレトポグラフィ法の基本原理は、(1)、(2)式で示すように、第1と第2の格子を同時に、同位相で動かし、得られるモアレ縞の時間平均を観察することである。ここでは第1の格子は干涉縞、第2の格子は仮想コンピュータプログラムである。

ところが、非球面による干涉縞では、場所によって空間周波数が異なるので、2章で述べたように格子の水平移動だけでは位相が均一に変化しない。そこで縞走査法を用いて位相を変化させることにより、非球面検査が行なえるようにした。

3.2 装置構想

前節の測定原理にしたがって、装置を考えたのが Fig. 1 である。干涉計に被測定非球面 (aspherical mirror) をセットし、非球面によって反射されたレーザー光と、参照鏡 (reference mirror) によって反射された

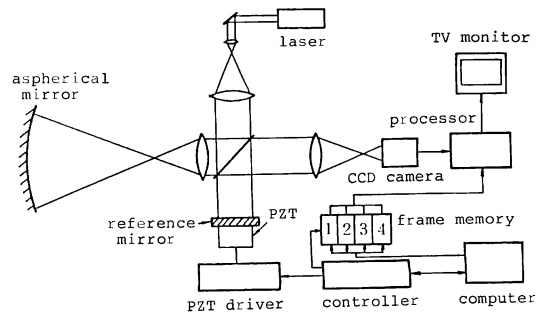


Fig. 1 Optical setup of the quasi lateral moving grating moiré method for aspherical mirror testing.

レーザー光を干渉させ、CCD カメラで観察する。参照鏡は、ピエゾ素子 (PZT) に取り付けられており、参照光の位相を $2\pi/N$ (N は整数) ずつ、CCD カメラの画像取り込みタイミングに同期させて、1/30 秒ごとに变化させる。

計算機では、あらかじめ形状誤差がゼロの非球面鏡を仮想し、これによる干渉縞の強度分布を算出する。ただし、参照光の位相を $2\pi/N$ ずつ N 回変化させたときを考慮して、 N 回、干渉縞強度分布計算を行なう。これら N 個の干渉縞強度分布を、 N 個の画像メモリ (Fig. 1 では 4 個) に順次記憶させる。ここでは干渉縞強度分布を 2 値化してから画像メモリ (frame memory) に記憶させる。

このようにすれば、画像メモリは非常に簡単なものになる。 N 個の画像メモリからは、コントローラによって、順番に、上記 CCD カメラに同期させて、画像信号を出力させる。

N 個の画像メモリ内の干渉縞強度分布が、前節で述べた仮想コンピュータプログラムとなり、位相を変化させることは、格子を移動させることと等価となる。

ここで仮想コンピュータプログラムと、実際の干渉縞とのモアレ縞を演算機 (processor) で算出する。画像メモリ内のプログラム図形は 2 値化されているので、モアレ縞算出は、CCD カメラからのビデオ信号を、プログラム図形の強度値が 1 のとき "on", 0 のとき "off" にするようなゲート回路でよい。プログラム図形が 2 値化データでなく、8 ビットパターンの場合は、実際の干渉縞の強度値との掛け算をリアルタイムで行なう必要があり、装置が複雑になる。

疑似移動格子によって、モアレ縞を鮮明にするには位相変化ごとに得られるモアレ縞の和平均の演算を行なえばよい。平均は肉眼の残像作用を利用して、位相変化ごとに得られるモアレ縞を、たんに次々と、TV モニターに表示し、観察することによっても行なえる。Fig. 1 はこの方法に基づいて描かれている。しかしこの単純な方法では、モアレ縞がちらつき、見づらい恐れがある。

N 個の画像メモリをもち、位相変化ごとのモアレ縞を順に、それぞれの画像メモリに記憶させておき、 N 個の画像メモリを一度に出力させて、画像の和を演算し、画像の和信号を TV モニターに表示させると、平滑化による鮮明なモアレ縞が得られる。あるいは、1 個の画像メモリに N 回のモアレ縞を、重ね書きのように順次加えていき、 N 回書き終わったならば、一度に出力させて TV モニターに表示させることにより平滑化は行な

える。TV モニター画面では、 N 回の重ね書きの間、前回のパターンを保持しておく。つまり TV モニターの画面では $N/30$ 秒ごとに新しく和平均演算されたモアレ縞が表示される。

3.3 測定原理の検討

数式を用いて、測定原理を検討する。Fig. 1 において、CCD カメラから得られる干渉縞の強度分布 $R_i(x, y)$ は、

$$R_i(x, y) = R[1 + \gamma \cdot \cos 2\pi \{w(x, y) + w_e(x, y) + \varphi(x, y) + (1/N)(i-1)\}] \quad (4)$$

で表わせる。ここで、 γ は干渉縞のビジビリティ、 $w(x, y)$ は非球面が設計値どおりの形状をもつと仮想したときの物体光波面、 $w_e(x, y)$ は被測定非球面の位置決め誤差から生ずる波面歪、 $\varphi(x, y)$ は被測定非球面の形状誤差より生ずる波面歪、 i は 1 から N までの整数でピエゾ素子により N 回、参照光の位相を変化させたときの、回数である。

一方、非球面の設計形状値をキーインし、計算機で算出された仮想の干渉縞、すなわち仮想コンピュータプログラムの強度分布 $I_i(x, y)$ は

$$I_i(x, y) = I[1 + \cos 2\pi \{w(x, y) + (1/N)(i-1)\}] \quad (5)$$

となる。モアレ縞は (4) 式と (5) 式の積で表わせ、疑似的移動格子による平滑化は、 $i=1$ から N までの和平均となるので、TV モニター上で得られるモアレ縞の強度分布 $E(x, y)$ は

$$\begin{aligned} E(x, y) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i(x, y) \times I_i(x, y) \\ &= \frac{IR}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 + \gamma \cos 2\pi \left\{ w + w_e + \varphi + \frac{1}{N}(i-1) \right\} \right. \\ &\quad \left. + \cos 2\pi \left\{ w + \frac{1}{N}(i-1) \right\} + \frac{\gamma}{2} \cos 2\pi \{w_e + \varphi\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\gamma}{2} \cos 2\pi \left\{ 2w + w_e + \varphi + \frac{2}{N}(i-1) \right\} \right] \quad (6) \end{aligned}$$

(ただし、 $w=w(x, y)$ 、 $w_e=w_e(x, y)$ 、 $\varphi=\varphi(x, y)$) となる。ところが任意の数値 a に対して、 $N \geq 3$ ならば、

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \cos 2\pi \left\{ a + \frac{1}{N}(i-1) \right\} &= 0 \\ \sum_{i=1}^N \cos 2\pi \left\{ 2a + \frac{2}{N}(i-1) \right\} &= 0 \quad (7) \end{aligned}$$

が成り立ち、(6) 式を整理すると、モアレ縞の強度分布 $E(x, y)$ は

$$E(x, y) = IR[1 + (\gamma/2) \cos 2\pi \{w_e + \varphi\}] \quad (8)$$

となり、直流成分と、モアレ縞を示す項のみが残る。こ

のようにして、疑似的格子移動による平滑化で、モアレ縞が鮮明になることが、数式の上からも確かめられた。

(8)式では、被測定非球面の位置決め誤差に影響される項 $w_e(x, y)$ が含まれるので、モアレ縞の歪が最小になるように、位置決め調整を行なうならば、 $w_e(x, y) \approx 0$ となる。これより残存するモアレ縞の歪 $\varphi(x, y)$ から、被測定非球面の形状誤差が求まる。

前節で示した装置構想では、仮想コンピュータホログラムは2値化されて、画像メモリーに記憶された。2値化された場合のモアレ縞の強度分布を数式で検討してみる。数式を単純化するために、 $w(x, y) = ax$, $w_e(x, y) = 0$, $\varphi(x, y) = \Delta ax$ とし、これらを(4)式に代入すると

$$R_i(x) = R[1 + \gamma \cos 2\pi \{ (a + \Delta a)x + (1/N)(i-1) \}] \quad (9)$$

となり、(5)式に代入すると

$$I_i(x) = I[1 + \cos 2\pi \{ ax + (1/N)(i-1) \}] \quad (10)$$

となる。(10)式を2値化すると、矩形関数になるので、フーリエ級数を用いて表現すると

$$I_i'(x) = I \left[1 + \frac{4}{\pi} \cos 2\pi \left\{ ax + \frac{1}{N}(i-1) \right\} - \frac{4}{3\pi} \cos 2\pi \left\{ 3ax + \frac{3}{N}(i-1) \right\} + \frac{4}{5\pi} \cos 2\pi \left\{ 5ax + \frac{5}{N}(i-1) \right\} - \dots \right] \quad (11)$$

となる。

(8)式と同様に、(9)式と(11)式で表わされる格子の積のモアレ縞の $i=1 \sim N$ までの平均 $E'(x)$ は

$$\begin{aligned} E'(x) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i(x) I_i'(x) \\ &= IR \left\{ 1 + \frac{2\gamma}{\pi} \cos 2\pi(\Delta ax) \right. \\ &\quad + \frac{2IR\gamma}{N\pi} \sum_{i=1}^N \left[-\frac{1}{3} \cos 2\pi \left\{ (4a + \Delta a)x \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{4}{N}(i-1) \right\} + \frac{1}{5} \cos 2\pi \left\{ (-4a + \Delta a)x \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{4}{N}(i-1) \right\} + \frac{1}{5} \cos 2\pi \left\{ (6a + \Delta a)x \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{6}{N}(i-1) \right\} - \dots \right] \end{aligned} \quad (12)$$

ただし $N \geq 3$

たとえば $N=3$ のとき、(12)式は

$$E'(x) = IR + \frac{2IR\gamma}{\pi} \left[\cos \{ 2\pi(\Delta ax) \} + \frac{1}{5} \cos \{ 2\pi(6a + \Delta a)x \} + \dots \right] \quad (13)$$

となり、モアレ縞を示す第2項目のほか、第1項の直流成分と、第3項の6倍高調波がノイズとして残り、その振幅はモアレ縞の振幅の1/5となる。 $N=4$ のとき、(12)式は

$$E'(x) = IR + \frac{2IR\gamma}{\pi} \left[\cos \{ 2\pi(\Delta ax) \} - \frac{1}{3} \cos \{ 2\pi(4a + \Delta a)x \} + \frac{1}{5} \cos \{ 2\pi(-4a + \Delta a)x \} + \dots \right] \quad (14)$$

となり、4倍高調波がノイズとして残る。

このように、仮想コンピュータホログラムを2値化すると、高調波ノイズが残るが、モアレ縞の周波数に比べ、約1桁異なり、振幅も数分の1となるので、鮮明なモアレ縞が得られるものと予想された。

(14)式をコンピュータで計算し、シミュレーションを行なった結果が Fig. 2 である。図中、(a)は干渉縞の強度分布を模式化しており、周波数は $a + \Delta a = 5$ である。(b)は仮想コンピュータホログラムの強度分布を示しており、周波数は $a = 9$ である。したがって周波数差は $\Delta a = -4$ と大きく、通常モアレ縞では鮮明度は非常に劣る。これら(a)と(b)の疑似的移動格子法によるモアレ縞を計算した結果が(c)である。高調波ノイズが残存しているものの、鮮明なモアレ縞が得られていることがわかった。

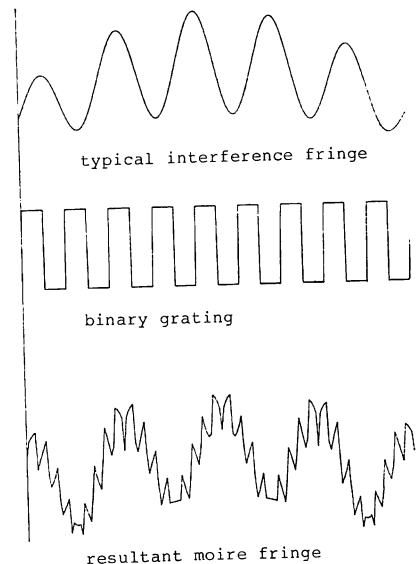


Fig. 2 Fringe intensity distribution of the quasi lateral moving grating moiré fringes obtained by a simplified computer simulation experiment.

4. 測定原理確認実験

Fig. 3 の装置を用いて、画像メモリと演算機の機能をコンピュータで代行させることによる部分的シミュレーション実験を行なった。

被測定非球面には、直径 204 mm, 焦点距離 609 mm のカセグレン (Cassegrain) 式天体望遠鏡の放物面鏡を用いた。放物面鏡で反射された物体光と、ピエゾ素子付参照鏡で反射された参照光が干渉する。干渉縞の強度分布は、 100×100 素子の CCD カメラで観察する。(12)式における N の値を $N=4$ とし、ピエゾ素子によって、参照光の位相を $\pi/2$ ずつ変化させて、干渉縞を観察し、コンピュータに入力する。

コンピュータでは、あらかじめ、放物面の設計値から、仮想の干渉縞の強度分布を、参照光の位相を $\pi/2$ ずつ 4 回変化させて計算する。算出された 4 個の干渉縞の強度分布を 2 値化して、コンピュータの主メモリに記憶させ、仮想コンピュータプログラムとする。

CCD カメラから入力した干渉縞強度分布を $R_i(x)$, 仮想コンピュータプログラムを $I_i'(x)$ として、(12)式をコンピュータで演算し、結果をコンピュータ用ディスプレイに表示した。ディスプレイは中間強度を表示できないので、(12)式の演算結果をさらに 2 値化して表示させた。

得られたモアレ縞を Fig. 4 に示す。中央部の異質なパターンは、放物面中央の穴である。細かいノイズパターンが見られるが全体的にモアレ縞の鮮明度は高い。Fig. 5 で示すように、入力された干渉縞を直接 2 値化するとノイズが見られないので、ノイズは 3.3 節で予想された高調波ノイズと考えられる。

Fig. 6 は同じサンプルをコンピュータプログラムで測定した結果である。ほぼ同じ縞形状をしており、本方

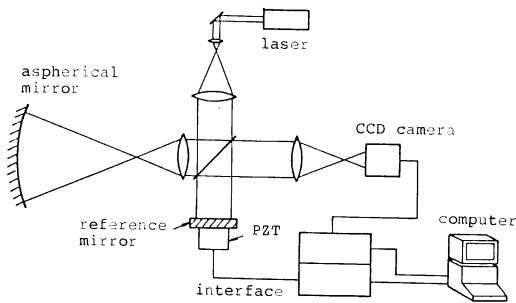


Fig. 3 Experimental setup for testing operation of the quasi lateral moving grating moiré method.



Fig. 4 Experimental result of aspherical mirror testing using the quasi lateral moving grating moiré method. A tested aspherical mirror is a parabolic mirror with a center hole for a telescope. The focus length is 609 mm and the diameter is 204 mm.

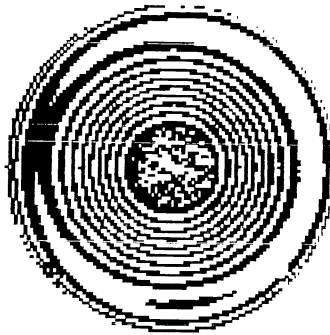


Fig. 5 Binary coded interference pattern of the tested aspherical mirror.

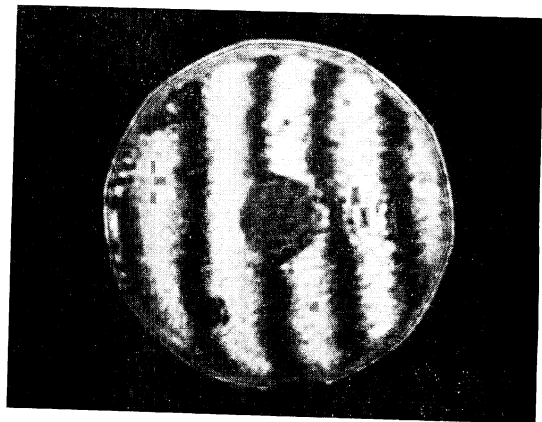


Fig. 6 Experimental result of aspherical mirror testing using the computer generated hologram method. The same sample is tested as tested in Fig. 4.

法でも正しく測定できていることがわかった。さらに本方法のモアレ縞のほうがむしろ鮮明度が高く測定しやすいことがわかった。

本方法の最大の問題点は、カメラの画素数が少ないことである。被測定非球面が $\lambda/10$ の形状誤差をもつとき、これによって反射された物体光波面は $\lambda/5$ の歪をもち干渉縞を $1/5$ 本分変位させるので、要求される測定精度を $\lambda/10$ とすると、少なくとも干渉縞1ピッチあたり、5画素必要になる。TVカメラは約 500×500 画素をもっているので、測定可能な干渉縞の最大空間周波数は50本/半径となる。本方法は前述のように搬送波を必要としないので、測定できる非球面の最大空間周波数も50本/半径となる。

以上より、奥行きあまり深くない非球面の形状誤差測定に、本方法は有効と考えられる。

5. ま と め

非球面測定のため、新しく移動格子 TV モアレ法を考案し、測定原理確認実験を行なった。本方法では、非球面の設計形状値を、コンピュータにキーインするだけで、基準器もコンピュータプログラムも製作する必要なく、簡便に非球面のマルチテストが行なえる。

一部シミュレーションによる、測定原理確認実験を行なった。測定サンプルは、直径 204 mm, 焦点距離 609 mm の放物面鏡で、測定結果として、形状誤差を示す鮮

明なモアレ縞像が、TV モニター上に得られた。このモアレ縞像は、同一サンプルをコンピュータホログラフィ法で測定したとき、得られた縞像とほぼ等しく、本方法で、正確に非球面測定が行なわれていることが確かめられた。

本研究は著者が the University of Arizona, Optical Sciences Center における海外研修中に行なったもので、指導して下さった J. C. Wyant 教授に深く感謝します。

文 献

- 1) 春本 功, 渡部国男: “非球面レンズの製造技術”, 機械の研究, **28** (1976) 27-34.
- 2) 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.
- 3) 玄間隆志, 佐藤卓司, 小林 亨, 横倉 隆, 住谷充夫, 早船健次郎: “非球面形状測定用ホログラフィ干渉計”, 1985年秋季精機学会予稿集 (1985) pp. 423-424.
- 4) 小野 明: “計算機ホログラフィと超精密計測への応用”, 超精密加工と計測, 光岡豊一編 (光学工業技術協会, 東京, 1986) pp. 67-96.
- 5) 高崎 宏: “モアレ縞とその応用(2)”, 機械の研究, **26** (1974) 639-642.
- 6) H. Takasaki: “Moiré topography,” Appl. Opt., **9** (1970) 1467.
- 7) 谷田貝豊彦: “縞画像の解析と処理”, 光学技術コンタクト, **20** (1982) 18-27.
- 8) A. Ono and J. C. Wyant: “Aspherical mirror testing using a CGH with small errors,” Appl. Opt., **24** (1985) 560-563.