



## 実体格子型モアレトポグラフィ法の高感度化

新井 泰彦\*・横関 俊介\*\*・山田 朝治\*

\* 関西大学工学部機械工学科 〒564 吹田市山手町 3-3-35

\*\* 九州工業大学情報工学部機械システム工学科 〒820 飯塚市大字川津 680-4

(1991年7月8日受付, 1991年10月21日受理)

### High Resolutive Shadow-Moiré

Yasuhiko ARAI,\* Shunsuke YOKOZEKI\*\* and Tomoharu YAMADA\*

\* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kansai University, 3-3-35, Yamate-cho, Suita 564

\*\* Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Computer Science and System Engineering, Kyushu Institute of Technology, 680-4, Kawazu, Iizuka 820

(Received July 8, 1991; Accepted October 21, 1991)

This paper describes a new high-resolutive 3-D measurement method for the shadow-moiré. The measuring method is based on the principle of producing moiré fringes in the moiré topography and the advantage of the fringe-scanning technique independent of illumination and reflection variations. Experimental results show that the measurement accuracy is obtained more than 1/50 fringe.

#### 1. はじめに

Meadows<sup>1)</sup>, 高崎<sup>2)</sup>らによって1970年代初頭に提案されたモアレトポグラフィ法(以下,モアレ法)は,非接触3次元測定技術として現在,工学,医学,歯学,服飾などの分野で広く用いられている<sup>3)</sup>.3次元形状測定法として開発されたモアレ法は,自動化とともに高感度,高精度化が求められ,特に,格子投影型モアレ法では,縞走査法の技術<sup>4)</sup>の導入によって,高感度化が進められてきた<sup>5)</sup>.ところが,格子投影型モアレ法に比べて取扱いが容易,かつ測定精度が高いと考えられている実体格子型モアレ法では,光学系に,格子が1枚しか用いられていないため,格子を左右に移動させるだけでは,発生するモアレ縞の位相は変化しない.したがって,格子投影型のように2枚の格子間の位相差を用いてモアレ縞に位相の変化を与えることは,実体格子型では物理的に困難である.

このように,縞走査法を適用するために必要不可欠な

位相の異なった数種類のモアレ縞画像を実体格子型モアレ法において得ることは厳密には不可能であると考えられている<sup>6)</sup>.そのために,縞走査技術の導入がむずかしく,高感度化は十分に進んではいないのが実状である.このような問題に対して,いくつかの縞走査法の導入例が提案されている<sup>7,8)</sup>.ところが,いずれの手法でも,測定領域において位相シフト量の異なる縞を発生させる場合に,測定範囲が限られている<sup>7)</sup>,あるいは,位相シフト量が縞次数ごとに異なることから原理的な誤差を含んでいる<sup>8)</sup>など十分な高感度化は行われていない.本研究では,被測定物体の照明,反射むらの影響を受けない縞走査法の特長を利用し,しかもモアレ縞の発生原理にもとづく新しい実体格子型モアレ法の高感度化の手法を提案する.

本手法によって,実体格子型モアレ法も容易に測定の高感度化がなされ,その結果としてより広い分野での利用が促されるものと考えられる.

2. 測定原理

従来、縞走査法をモアレ法に導入する場合には、最低3種類位相の異なった縞を発生させ、その縞画像間で  $\tan^{-1}$  の演算によって縞の位相を抽出していた。この考え方は、格子投影型のように、2枚の格子間に所要の位相差を持たせておき、その結果生じる数種類の所要の位相差を持ったモアレ縞間の演算によって、縞の位相を求め、さらにその位相から縞深さを求める場合には、有効である。しかし、実体格子型では、所要の位相差を持つ縞を発生させることが困難であるため、上記の考え方による縞走査法の導入はむずかしいと考えられていた。

この問題に対して、本報では、実体格子型モアレ法の縞解析のための手法を、縞走査法をより一般化することによって以下に示すように提案している。

Fig. 1 に示す光学系において、TV カメラにより検出されたモアレ縞の明暗分布  $I(x, z)$  は、(1)式として表すことができる<sup>7)</sup>。

$$I(x, z) = a(x, z) + b(x, z) \cos \frac{2\pi d \cdot h}{s(h+l)} \quad (1)$$

ここで、 $a(x, z)$ ,  $b(x, z)$  は、照明むら、反射むらに対する係数であり、 $h$  は被測定量の縞深さである。

いま、格子-TV カメラ間距離： $l$  あるいは、TV カメラ-プロジェクター間距離： $d$ 、格子ピッチ： $s$  のいずれかを変化させると、(1)式に示すモアレ縞の明暗分布は変化する。

ここで、格子-TV カメラ間距離： $l$  を  $\Delta l$ 、 $-\Delta l$  だけ変化させた場合を考えると、それぞれの明暗分布  $I_{\Delta l}(x, z)$ ,  $I_{-\Delta l}(x, z)$  は、それぞれ(2), (3)式として表現することができる。

$$I_{\Delta l}(x, z) = a(x, z) + b(x, z) \cos \frac{2\pi d \cdot (h + \Delta l)}{s(h+l)} \quad (2)$$

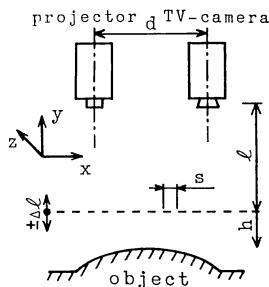


Fig. 1 Schematic diagram of the shadow moiré.

$$I_{-\Delta l}(x, z) = a(x, z) + b(x, z) \cos \frac{2\pi d \cdot (h - \Delta l)}{s(h+l)} \quad (3)$$

このような、(1), (2), (3)式に対して、本研究では、 $a(x, z)$ ,  $b(x, z)$  の影響を除去するために、(4)式に示すような関数  $f(h)$  を定義し、その関数より縞深さ  $h(x, z)$  を直接求めることを考えた。

$$f(h) = \frac{I(x, z) - I_{\Delta l}(x, z)}{I_{-\Delta l}(x, z) - I(x, z)} = \frac{\cos \frac{2\pi d \cdot h}{s(h+l)} - \cos \frac{2\pi d \cdot (h + \Delta l)}{s(h+l)}}{\cos \frac{2\pi d \cdot (h - \Delta l)}{s(h+l)} - \cos \frac{2\pi d \cdot h}{s(h+l)}} \quad (4)$$

従来の考え方では、実体格子型モアレ法への縞走査法の導入は困難であると考えられていた。これに対して、本手法では、縞の位相を介して縞深さを求める従来の手法ではなく、モアレ縞の発生原理にもとづき、縞深さ  $h(x, z)$  を数値計算により直接高感度に求める手法を提案している。

Fig. 2 に示すように、 $f(h)$  は周期的に単調減少する関数であるから、(4)式に示す  $h(x, z)$  に対する非線形方程式  $f(h)$  の根を、Newton-Raphson 法<sup>9)</sup>によって求めることにした。本手法では、一般に公表されている Newton-Raphson 法のプログラムを利用するために、実験結果  $\alpha$  に対しての  $f(h)$  の新しい関数  $F(h)$  を(5)式のように定義した。この(5)式の解を(6)式に示す Newton-Raphson 法の反復公式によって、第  $i+1$  番目の解  $h_{i+1}(x, z)$  と第  $i$  番目の解  $h_i(x, z)$  との  $h_i(x, z)$  に対する相対差  $|(h_{i+1} - h_i)/h_i|$  が収束判定定数 ( $10^{-5}$ ) に収まるまで繰り返し求め続けることにした。

$$F(h) = f(h) - \alpha = 0 \quad (5)$$

$$h_{i+1} = h_i - \frac{F(h_i)}{F'(h_i)} \quad (6)$$

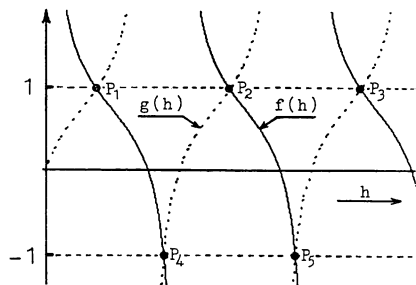


Fig. 2 Functions  $f(h)$  and  $g(h)$  vs a fringe depth  $h$  that are shown by solid lines and dashed lines, respectively.

ここで、 $F'$  は  $h$  についての偏微分を表す。

Newton-Raphson 法では、関数の連続性等の制限があるために、実際には、(4)式で示す関数  $f(h)$  と  $f(h)$  の逆数  $g(h)=1/f(h)$  を Fig. 2 に示すように同時に定義し、 $f(h)$ 、 $g(h)$  が不連続になることを考慮して、Fig. 2 に示す  $f(h)$ 、 $g(h)$  の交点  $P_1, P_2, \dots$  点において他方の式に切り替えて、縞深さを求める演算を繰り返し行った。この場合に、Newton-Raphson 法の初期推定値  $h_0$  は、光学系設定時に求めることのできる縞のもっとも明るい点と暗い点の縞の深さ方向  $h(x, z)$  に対する座標を、各縞ごとにあらかじめ与え、物体の凹凸にともなう式の切り替えとともに順次変化させて演算した。

### 3. 結果と検討

Fig. 3 に  $l=1, 235 \text{ mm}$ 、 $d=285 \text{ mm}$ 、 $s=2 \text{ mm}$ 、 $\Delta l=2 \text{ mm}$  と設定された光学系で、光学基板の石膏レプリカによって作製した平面を傾けて測定した場合の3種類の  $\Delta l$  の移動量に相当するモアレ縞の明暗分布の測定結果を示す。Fig. 4 は、Fig. 3 に示した断面 A-A' においての本手法による演算結果を示す。Fig. 4(A) に示す Fig. 3 の A-A' の明暗分布において、照明むらの影響がバイアスに認められる。この明暗分布から求めた(4)式の  $f(h)$ 、 $g(h)$  に対応する実験結果を Fig. 4(B) に示す。Fig. 2 に示す  $f(h)$ 、 $g(h)$  の切り替えがスムーズに行われていることが確認できる。Fig. 4(C) に A-A' の断面形状の演算結果を示す。この場合に、測定における rms 測定精度が、1/50 フリンジ以下であることも確

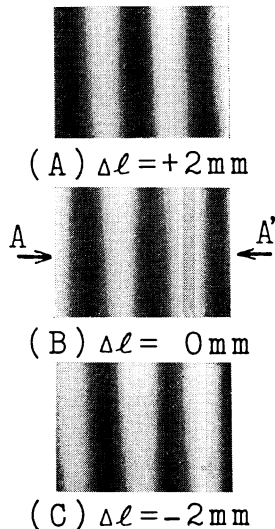


Fig. 3 Moiré fringes of a tilted plane object with different displacement  $\Delta l$ s.

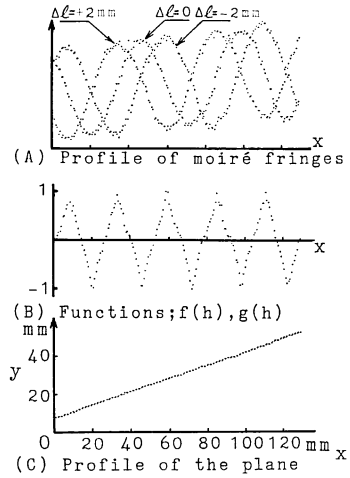


Fig. 4 Measured results of a tilted plane object with the help of functions  $f(h)$  and  $g(h)$ .

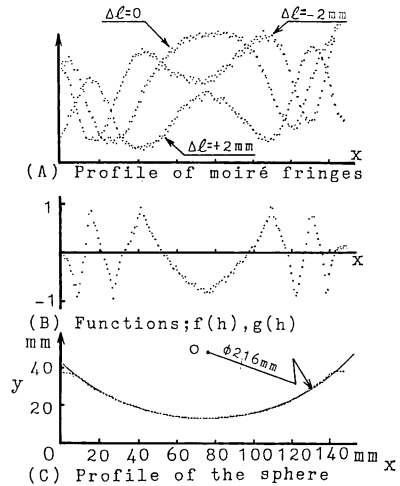


Fig. 5 Measured results of a sphere object with the help of functions  $f(h)$  and  $g(h)$ .

認することができた。Fig. 3 と同様の条件で球面の測定を行った結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(A) に示した3種類の明暗分布から求めた  $f(h)$ 、 $g(h)$  に対応する実験結果を Fig. 5(B) に、さらに、Fig. 5(C) に断面形状の演算結果を示す。平面、球面にかかわらずいずれの場合にも新しく提案した手法によって高感度な測定が行えることがわかった。

### 4. おわりに

本研究における成果を以下に示す。

- 1) 従来困難であると考えられていた実体格子型モアレ法の高分解能化を、縞の位相を介して縞深さを求める

のではなく、モアレ縞の発生原理にもとづき、縞深さを直接求めることのできる手法によって実現した。

2) 試作装置による原理確認実験において、本手法の rms 測定精度が約 50 分の 1 フリンジであることがわかった。

以上の結果より、本手法が実体格子型モアレ法を用いた 3 次元自動測定にきわめて有効な手法であることを明らかにした。

最後に、論文作成にあたり多くのご教示をいただいた東京農工大学吉澤徹教授に感謝の意を表します。

### 文 献

- 1) D.M. Meadows, W.O. Johnson and J.B. Allen: "Generation of surface contours by moire patterns," *Appl. Opt.*, **9** (1970) 942-947.
- 2) H. Takasaki: "Moiré topography," *Appl. Opt.*, **9** (1970) 1467-1472.
- 3) たとえば、モアレ研究会抄録: 画像技術, **7** (1976) 37-56.
- 4) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2693-2703.
- 5) 新井泰彦, 倉田忠雄: "縞走査干渉計の手法による高速かつ高分解能なモアレトポグラフィ法", *光学*, **15** (1986) 402-406.
- 6) 吉澤 徹: "モアレ三次元計測", *光技術コンタクト*, **29** (1991) 421-428.
- 7) 新井泰彦, 倉田忠雄: "縞走査法による格子照射型モアレトポグラフィの測定精度向上", *光学*, **18** (1989) 311-315.
- 8) 吉澤 徹, 富沢貞友: "位相シフトを導入した実体格子型モアレトポグラフィ法", 1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1990) pp. 291-292.
- 9) D. D. McCracken (森口繁一, 伏見正則共訳): 科学技術計算 (共立出版, 東京, 1971) pp. 47-56.