



## 一般関数を用いた shadow moire の縞走査法における 縞次数の自動決定法

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

(1993年5月10日受付, 1993年7月16日受理)

### Technique for Automatically Detecting Fringe Orders in Shadow Moire Image

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 May 10, 1993; Accepted July 16, 1993)

A method of a high resolution three-dimensional shape measurement using the fringe scanning method has been proposed for a shadow moire system. A numerical analysis by the Newton-Raphson method is employed for detecting the shape of a three-dimensional object. This paper describes a new technique for automatically choosing an appropriate initial value in the numerical analysis of the fringe data obtained with the highly resolute shadow moire system. Experimental results show that this technique is effective in the automatic three-dimensional measurement using a shadow moire system.

#### 1. はじめに

モアレトポグラフィは1970年代初期に Meadows, 高崎らによって提案された<sup>1,2)</sup>非接触3次元形状測定法である。このモアレトポグラフィと呼ばれる用語は、主に日本国内で用いられるもので、projection moire (格子投影型)、と shadow moire (実体格子型)を総称した測定技術である<sup>3)</sup>。

近年のマイクロエレクトロニクスの発展にともなってこのようなモアレトポグラフィにも画像処理技術の導入がなされ、その自動化が進められてきている。さらに、干渉縞の解析技術として発達してきた縞走査法<sup>4)</sup>等の導入によって、現在では、projection moire において、50分の1 wave 程度の縞解析がなされるに至っている<sup>5)</sup>。

一方、projection moire に比べて shadow moire は、取り扱いが容易であるにもかかわらず、一枚の格子のみ

によってシステムが構成されているために、縞走査などの技術の導入が難しく、shadow moire のサブフリンジ解析は、立ち後れていた。この問題に対して、縞走査法の一般解とも言える arctangent 関数を用いない縞解析法が提案され、shadow moire においても projection moire と同程度の測定精度で解析が行われるに至っている<sup>6,7)</sup>。ところが、この手法では、非線形方程式の解法のために用いられている数値解析法(現在は Newton-Raphson 法が用いられている<sup>6,7)</sup>)の初期値の設定の自動化がなされていない問題がある。この初期値の設定の問題は、従来のモアレトポグラフィにおける縞次数の決定<sup>8)</sup>とほぼ同じ意味を持つものであり、上記の手法の自動化を図るにあたって解決しなければならない重要な問題である。

本研究では、上記の手法の初期値の与え方についての議論を行い、その自動化のための一手法を提案してい

る。また、数種類の測定対象による実験結果は、いずれの場合にも、本手法によって誤りなく初期値の決定が行われることを示し、本手法の有効性を示している。

## 2. 原理

### 2.1 Arctangent を用いない縞走査法<sup>6,7)</sup>

一般に、縞情報は、(1)式によって表すことができる。

$$I(x, z) = A(x, z) + B(x, z) \cos \phi(x, z) \quad (1)$$

ここで、 $A(x, z)$ ,  $B(x, z)$  は、それぞれ縞のバイアスならびに、振幅を表す係数で、光源の強さと縞のコントラストに関係する値である。また、 $\phi(x, z)$  は、所要の縞の位相である。(1)式には、 $A(x, z)$ ,  $B(x, z)$ ,  $\phi(x, z)$  の3個の未知数がある。したがって、(1)式を空間領域で解くためには、(1)式に関係する独立した3種類の式が必要となる。

$$I(x, z)_n = A(x, z) + B(x, z) \cos(\phi(x, z) + \psi_n(x, z)) \quad (2)$$

一般には、(2)式に示すように、(1)式に既知の位相項  $\psi_n(x, z)$  を新たに持たせた縞を発生させ、 $\phi(x, z)$  を求めている。ところが、shadow moire では、(2)式のような既知の位相項をすべての縞に対して一定に持たせることが困難であるため、サブフリンジ解析が遅れていた。この問題に対して、現在広く用いられている arctangent 関数 (以下 arctan 関数) を用いた手法の問題点を議論することによって、arctan 関数を用いる限り shadow moire では、縞走査のような縞解析は困難であることを示し、結果として arctan 関数を用いないことによって、従来の手法の代わりを果たすことのできる新たな手法が提案され、縞の深さ  $h(x, z)$  が直接求められている。この新しい手法では、光学系のパラメータを変化させることにより、(1)式に関係する独立した3種類の式を導き、さらに、(3)式を定義して、(3)式に示すような関数  $f(h)$  を数値解析法によって直接縞深さ  $h(x, z)$  について解いている<sup>6,7)</sup>。

$$f(h(x, z)) = \frac{I(x, z)_0 - I(x, z)_1}{I(x, z)_2 - I(x, z)_1} = \frac{\cos \frac{2\pi d \cdot h(x, z)}{s \cdot (h(x, z) + l)} - \cos \frac{2\pi \cdot (d + \Delta d_1) \cdot h(x, z)}{s \cdot (h(x, z) + l)}}{\cos \frac{2\pi \cdot (d + \Delta d_1) \cdot h(x, z)}{s \cdot (h(x, z) + l)} - \cos \frac{2\pi d \cdot h(x, z)}{s \cdot (h(x, z) + l)}} \quad (3)$$

ここで、(3)式より  $h(x, z)$  を求める数値解析の過程において、初期値の設定が要求される。

### 2.2 数値解析法の初期値設定における問題点

一般に、(3)式に示す関数  $f(h)$  は、縞深さ  $h(x, z)$  に対して、Fig. 1 (b)に示すような関数となる。ただし、shadow moire では、Fig. 2 に示す光学系のパラメータの違い、また、光学系の設定の違い等によって Fig. 1 (b)に示す曲線の形状は変化する。ここでは、dynamic event をも測定することができる Fig. 2 に示すような3台のカメラを用いた場合<sup>6)</sup>についての議論を行う。

Fig. 1 (b)に示すように(3)式に示す関数は、 $-\infty$  から  $+\infty$  にいたる曲線群よりなっている。初期値の設定とは、具体的には、数値解析時にどの曲線を選択するかを意味するものである。たとえば、Fig. 1において、測定結果として求められた(3)式に対応する  $f_1$  について考えると、第二番目の曲線 (エリアIV, V, VI) を用いて解析を行うならば、縞の深さ  $h(x, z)$  は、A点の値となり、第三番目の曲線 (エリアVII, VIII, IX) ではB点となる。このように、(3)式のような曲線群から関数では、曲線を選択を誤ると結果は違ったものとなる。この初期値の設定の問題は従来のモアレトポグラフィの縞解析における縞次数の決定に相当する問題である

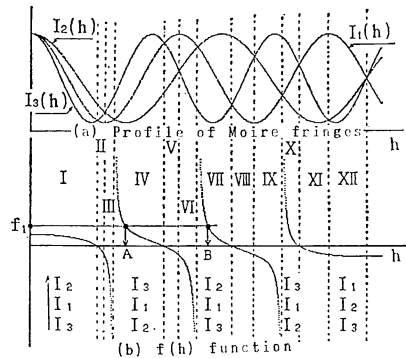


Fig. 1 How to obtain an initial value for the numerical analysis.

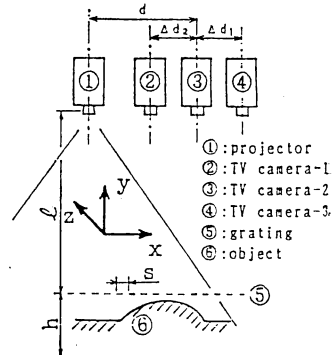


Fig. 2 Optical system for shadow moire.

と考えられる。

### 2.3 初期値設定法

初期値の設定において最も簡単な手法は、Fig. 1(a)に示す3種類の曲線の大小関係(画像の明暗の関係)とFig. 1(b)に示す曲線群との関係を用いるものである。たとえば、Fig. 1において、Iのエリアでは、 $I_2 > I_1 > I_3$ 、IVのエリアでは、 $I_3 > I_1 > I_2$ である。また、他のエリアでも、 $I_1, I_2, I_3$ の大小関係が存在する。この関係を用いると、 $I_2 > I_1 > I_3$ であれば、少なくとも、IのエリアかVIIのエリアであると考えられ、それぞれの初期値を用いて、数値解析を行うことが可能となる。ところが、この関係だけでは、6とおりの条件しか選別できない。現実のシステムでは、レンズの焦点深度から考えて、10本以上の曲線から唯一本の曲線を誤りなく選択しなければならない。そのためには、新たな条件が必要となる。そこで、以下に示す手法を提案する。

Fig. 1(b)に示す(3)式のグラフ  $f(h)$  は、縞深さ  $h(x, z)$  の増加に対して、固有の形状をした曲線群である。この特徴を利用することによって、初期値の設定が行える。

まず始めに、上記の3種類の曲線の大小関係を利用し、できる限り初期値となるべき候補を絞り込む。次に、いくつかの候補となるべき初期値(初期値を  $h_{0i}$  と名付け、サフィクスの  $i$  によってそれぞれの初期値に番号付を行っておく)を2.1に示す手法に代入して、候補となる個々の初期値  $h_{0i}$  に対してそれぞれの仮の縞深さ  $h_{2i}$  を求める。この  $h_{2i}$  と測定値としての縞の濃淡分布  $I_1, I_2, I_3$  から(1)式に示した縞のバイアス  $\hat{A}(x, z)$  と振幅  $\hat{B}(x, z)$  を(4)式によって推定する。

$$\begin{bmatrix} \hat{A}(x, z) \\ \hat{B}(x, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\phi_1(x, z, h_{2i})) \\ 1 & \cos(\phi_2(x, z, h_{2i})) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1(x, z) \\ I_2(x, z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $\hat{A}(x, z) + \hat{B}(x, z)$  の物理的な意味は、縞の最も明るい部分の値を示すものであり、 $\hat{B}(x, z)/\hat{A}(x, z)$  は、縞のコントラスト  $C(x, z)$  を示すものである。

$$C(x, z) = \hat{B}(x, z)/\hat{A}(x, z) \quad (5)$$

ここで、次の2点を check する。

- (1)  $\hat{A}(x, z)$  と  $\hat{B}(x, z)$  の和があらかじめ定めた値よりも大きくなっていないか?
- (2)  $C(x, z)$  が縞のコントラストとして適切か否か?

画像入力として CCD カメラ、フレームメモリを利用しているので、(1)の条件は、 $\hat{A}(x, z)$  と  $\hat{B}(x, z)$  の和がフレームメモリの濃淡に対する解像度(256階調)を越えている、あるいは、光学系をセットした際に最も縞の

明るい部分に対して設定した値を越えているなどの場合には、物理的な矛盾となる。(2)の条件も同様にモアレ縞としての物理的性質を逸脱する場合には、物理的矛盾として扱い、このような値を推定するに至った初期値は、誤った仮定にもとづくものであると判断する。

このような check を行っても初期値として複数の候補がなおも存在する場合には、いくつか離れた点において同様の check を行う。上記の check を5点ほど行ってもさらに判断がつかない場合には、上記の check を行うにあたって求めた  $\hat{A}(x, z)$  と  $\hat{B}(x, z)$  の和、さらに、 $C(x, z)$  の各 check 点間における変化の様子を標準偏差の大小比較によって定量化し、比較検討する。この作業は、とりもなおさず冒頭に述べた、Fig. 1(b)に示す(3)式のグラフの各曲線ごとの特徴を用いた比較検討法である。すなわち、測定対象としてフラットなプレートを格子に平行に置いていない限り、画像として数本の縞を解析することになる。これらの縞は、(3)式の関数に帰属するものとなる。ところが、(3)式では、縞のバイアス  $A(x, z)$  と振幅  $B(x, z)$  は、パラメータとなっていないため、いくつかの異なる点で  $\hat{A}(x, z)$ 、 $\hat{B}(x, z)$  を推定してゆくと、(3)式としての計算結果そのものでは物理的矛盾のない値となっても、初期値が適切でない場合(正しい曲線で解析が行われていない場合には、推定されたバイアス  $\hat{A}(x, z)$ 、振幅  $\hat{B}(x, z)$  は各曲線の特徴(曲線の形状の違い)にもとづいて、物理的に矛盾を含む結果となる。この矛盾を根拠に初期値を決定することができる。

### 3. 結果と検討

Fig. 2に示した光学系<sup>7)</sup>において、 $d=270$  mm,  $\Delta d_1 = \Delta d_2 = 60$  mm,  $l=1130$  mm,  $s=2$  mm と各パラメータを設定し、実験を行った結果を Table 1に示す。

1点目では、 $N=3, 5, 7, 10$  という曲線が各モアレ縞の濃淡分布の大小関係より選ばれ、それぞれの値において、仮の縞深さの値(H2)が計算されている。また、その結果より(4)、(5)式を用いて、バイアス(SA)、振幅(BB)、コントラスト(CC)が求められている。ここで、明らかなように、 $N=7, 10$  ではバイアスと振幅の和が、255を越えているので、これらの値は、誤った初期値にもとづくものであると考えられる。 $N=3$  に関しても、実際の光学系では、縞の最も明るい部分に対するフレームメモリ上の値が230を越えないように設置されているので、この時点で誤った初期値にもとづくものであると判断できるが、本手法の正当性をより詳細に示すため

に、あえて、縞の最も明るい部分に対する値を255と設定して計算を続けた。第2点目…第5点目と計算を重ねても、 $N=3$ か5かの判断はつかない。そこで、5点目を求めたのちに、コントラストの変化を標準偏差 (SDC)

として計算すると、 $N=3$  の場合は  $SDC=5.93 \times 10^{-2}$ 、 $N=5$  では、 $SDC=2.59 \times 10^{-2}$  となり、 $N=3$  は  $N=5$  に対して2倍以上に変動していることがわかる。各点におけるコントラストの変化の様子を Fig. 3 (b) に示す。

**Table 1** Calculated results for obtaining the initial value of the numerical analysis in the measurement of a plane.

	A(I)	B(I)	C(I)	Ratio	N	I. V.	H2	SA	BB	CC
①	114	215	205	-0.909755	3	11.0	12.58	178.5	65.1	0.365
	114	215	206	-0.913427	5	23.0	21.62	164.2	51.7	0.315
	114	216	208	-0.919239	7	31.0	30.12	233.6	120.0	0.514
	114	217	209	-0.920838	10	46.0	47.94	234.5	120.9	0.516
②	121	218	199	-0.804113	3	11.0	12.45	180.5	60.8	0.337
	121	218	200	-0.815633	5	23.0	21.90	167.1	51.0	0.305
③	130	219	190	-0.680357	3	11.0	12.29	181.6	53.8	0.297
	130	218	192	-0.700834	5	23.0	22.17	169.9	48.8	0.288
④	142	217	180	-0.505923	3	11.0	12.05	182.1	45.2	0.249
	142	217	182	-0.538838	5	23.0	22.47	172.8	46.1	0.267
⑤	154	214	169	-0.251105	3	11.0	11.72	181.7	36.3	0.200
	154	213	171	-0.294329	5	23.0	22.79	174.9	42.6	0.244

$N=3$ ,  $SDD=9.41$ ,  $SDC=0.0593$ ;  $N=5$ ,  $SDD=1.07$ ,  $SDC=0.0259$ .

I. V.: Initial value, H2: Calculated result of shape, SA: Estimated value of bias, BB: Estimated value of amplitude, CC: Estimated value of contrast, SDD: Standard deviation of maximum value of profile, SDC: Standard deviation of contrast of profile.

**Table 2** Calculated results for obtaining the initial value of the numerical analysis in the measurement of a sphere object

	A(I)	B(I)	C(I)	Ratio	N	I. V.	H2	SA	BB	CC
①	152	120	129	-0.733525	2	7.5	8.264	117.6	34.6	0.295
	152	117	123	-0.833333	4	15.5	16.45	135.0	18.4	0.136
	152	113	117	-0.906103	6	26.0	25.79	127.2	24.9	0.196
②	152	113	140	-0.311164	2	7.5	7.913	117.8	36.4	0.309
	152	109	134	-0.411135	4	15.5	15.67	135.4	28.4	0.210
	152	105	129	-0.493124	6	26.0	26.35	127.0	27.7	0.218
③	149	105	148	-0.010526	2	7.5	7.596	117.0	38.6	0.330
	149	101	144	-0.097328	4	15.5	15.34	134.1	39.8	0.297
	149	97	140	-0.170775	6	26.0	26.78	126.0	32.0	0.254
④	144	97	155	0.225000	2	7.5	7.310	115.9	41.8	0.361
	144	93	152	0.144128	4	15.5	15.17	132.0	50.1	0.380
	144	89	148	0.071429	6	26.0	27.08	124.5	36.4	0.292
⑤	139	89	159	0.395264	2	7.5	7.090	114.8	45.0	0.392
	139	86	157	0.328257	4	15.5	15.07	129.2	59.0	0.457
	139	82	155	0.269414	6	26.0	27.29	122.7	41.2	0.336

$N=2$ ,  $SDD=2.61$ ,  $SDC=0.0353$ ;  $N=4$ ,  $SDD=12.5$ ,  $SDC=0.114$ ;  $N=6$ ,  $SDD=4.22$ ,  $SDC=0.0502$ .

Symbols are same as Table 1.

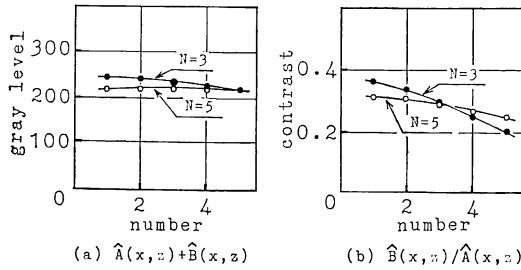


Fig. 3 The behavior of  $A+B$  and  $B/A$  in the calculated results shown in Table 1.

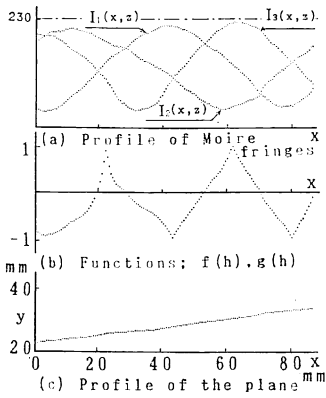


Fig. 4 Measured results of a tilted plane object.

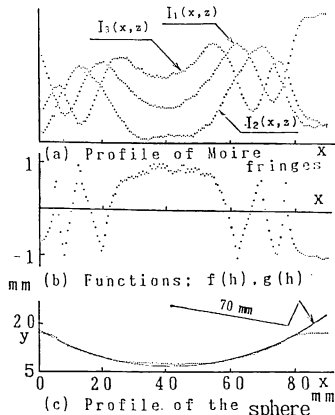


Fig. 5 Measured results of a sphere object.

縞の濃淡は、照明むら等により、変化するものと考えられるが、コントラストはほぼ一定の値を保つものと考えられる。したがって、この結果より、 $N=5$  は  $N=3$  に比べてより正しい初期値であると考えられる。また、

$\hat{A}(x, z)$  と  $\hat{B}(x, z)$  の和の変化を見ると標準偏差 (SDD) で 9 倍以上も異なっている。

Fig. 3 (a) に  $\hat{A}(x, z) + \hat{B}(x, z)$  の変化の様子を示す。これらの結果から、 $N=5$  が正しい初期値であると計算機は判断している。この結果に引き続いて初期値を  $N=5$  として 2.1 に示す手法によって縞を解析した結果を Fig. 4 に示す。被測定物体としてのプレートの位置を測定システムは正確に捉えることができています。同様に、球面の測定を行った場合の結果を Table 2 に示す。この場合には、 $N=2$  が初期値として選択され、Fig. 5 に示すような自動測定がなされている。

#### 4. ま と め

本研究において、下記に示す結果を得た。

- 1) Arctan 関数を用いない、shadow moire における縞走査の解析時に必要不可欠な数値解析のための初期値の自動決定法が示されている。
- 2) 数種類の実験条件下で、本手法を検討し、実験においてその有効性が示されている。

平成 4 年度関西大学在外研究員として本研究を行うにあたって熱心に議論していただいた、New York 州立大学 Stony Brook 校の Fu-Pen Chiang 教授ならびに Warsaw 工科大学の Kujawinska 助教授に深く感謝いたします。

#### 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: "Moire topography," *Appl. Opt.*, **9** (1970) 1467-1472.
- 3) D. Malacara: *Optical Shop Testing*, 2nd Ed (Wiley Interscience, New York, 1992) pp. 653-686.
- 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) 新井泰彦, 横関俊介, 山田朝治: "実体格子型モアレトポグラフィ法の高感度化", *光学*, **21** (1992) 39-42.
- 7) 新井泰彦, 横関俊介, 山田朝治: "動的測定のための高感度実体格子型モアレトポグラフィ法", *光学*, **21** (1992) 464-468.
- 8) 新井泰彦, 阿波啓造, 倉田忠雄: "走査モアレ法の縞次数自動決定法", *精密工学会誌*, **52** (1986) 900-904.