



## 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

新井 泰彦・倉田 忠雄

関西大学工学部機械工学科 〒564 吹田市山手町 3-3-35

(1988年7月18日受理)

### Improvement in Precision of the Grid Illumination Type Moiré Method by Using the Method of Fringe Scanning

Yasuhiko ARAI and Tadao KURATA

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

This paper describes a high precision 3-D measurement method by applying the fringe scanning method to the grid illumination type of moiré topography. Further, an automatic method of order number determination of moiré fringes in this method is discussed. Results suggest that the automatic and high precision 3-D shape measurement by using the grid illumination type of moiré topography is possible.

#### 1. はじめに

モアレ縞による測定技術は、測長、測角に始まり、歪測定、3次元形状測定としてのモアレトポグラフィ法(以下、モアレ法)へと発展してきた<sup>1)</sup>。なかでも、生体計測を始めとした3次元測定の需要の増大に伴い、モアレ法は、急速な発展を遂げてきた<sup>2-8)</sup>。モアレ法には、格子投影型と呼ばれる測定法と格子照射法と呼ばれるものがある<sup>9)</sup>。

前者は、2枚の基準格子を用いることによって、人体はもとより車等の大型物体の3次元形状測定も可能であることが知られている。しかし、測定装置設定時には、2枚の格子の平行度、光軸合せ等、装置が複雑であるがゆえの問題も含んでいる。ところが、視点をかえると、2枚の格子を利用しているため、装置構成にあたっての自由度が高いとも考えられる。すなわち、2枚の基準格子をたくみに操作することによるTVカメラを用いた走査モアレ法<sup>6)</sup>、また、光干渉計測法における縞走査技術<sup>10,11)</sup>を用いた測定の高精度化<sup>8)</sup>等の新しい技術が報告され、さらに、これらの技術を用いたマイクロコンピュータによる3次元自動測定システムが構成されるに

至っている<sup>12)</sup>。

一方、後者は、1枚の格子により構成されているため、装置の取扱いは容易である半面、前者に比べて、装置を構成するにあたっての自由度が低いため、計算機を用いた自動計測のための手法(たとえば、凹凸判定法、縞次数決定法等)、また縞走査技術を用いた測定の高精度化等の技術は、立ち遅れているのが現状である。

本研究では、装置の取扱いが容易な格子照射型モアレ法において、縞走査技術を用いた測定の高精度化を提案し、原理確認実験を行なった。

試作装置による実験結果より、本報において提案した格子照射型モアレ法の縞走査技術による測定の高精度化が実現可能であることを確認した。また、縞次数自動決定法開発に対する示唆を与え、格子照射型モアレ法の自動化の可能性についての検討を行なっている。

#### 2. 格子照射型モアレ法における縞走査

##### 2.1 位相差をもつ縞画像の発生法と検出原理

一般に、縞走査技術を利用するためには、何種類かの異なった位相情報をもつ縞画像を発生させ、かつ検出する必要がある<sup>10,11)</sup>。ところが、格子照射型モアレ法で

は、格子を移動させることによる不要縞の除去技術は報告<sup>4)</sup>されているものの、格子投影型モアレ法で行なわれているような2枚の格子の一方の格子の位相を変化させることによる縞走査<sup>12)</sup>は、Fig. 1に示すように、1枚の格子を用いて測定を行なうために、不可能であると考えられる。この問題に対して、本報では、数種の位相の異なったモアレ画像を発生させるための手法を、まずはじめに提案する。

Fig. 2に位相の異なる縞画像発生原理を示す。

Fig. 2に示すように、格子条の位相が点Pにおいて変化している grating (A) をモアレ法の格子として使用すると、発生する等高縞は、area A, C では、Fig. 1に示したと同様の等高縞となる。ところが、area B では、area A, C に比べて、grating (A) のP点における位相の変化によって、位相の異なった等高縞が発生する。この現象を用いると、格子条の位相変化を0,  $\pi$ ,  $\pi/2$ ,  $-\pi/2$  rad と設定していくことにより、area B において、それぞれの位相差をもつモアレ縞を発生させることが可能となる。この手法を用いると、格子照射型モアレ法への縞走査技術の導入は可能であると考えられる。

ところが、位相が異なった縞を得るために、格子をそ

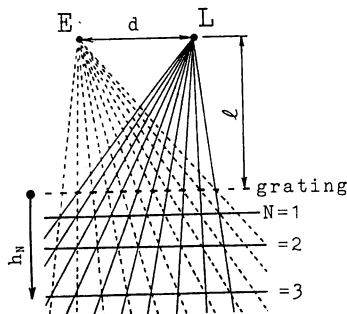


Fig. 1 Principle of the grid illuminating type of moiré topography.

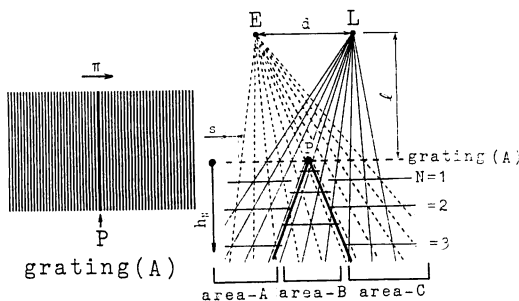


Fig. 2 Principle of this system.

のつど取り換えようとする、そのたびごとに格子の平行度、ならびに格子条の平行度が問題となる。また、被測定物体に対して一部分の領域のみの測定だけでなく、被測定物体全域にわたる測定が通常望まれるはずである。

これらの問題に対して、Fig. 3に示すような  $P_0$ ,  $P_{-\pi/2}$ ,  $P_{\pi/2}$ ,  $P_{\pi}$  の各点において、格子条に位相差が与えられた格子を作成し、かつ、スライド機構によって格子の移動が可能な測定システム (Fig. 4) を製作するならば、格子をシフトさせることによって、位相差をもつ数種の縞を被測定物体全域において、部分的にはあるが、発生させることが可能となる。さらに、この部分的に発生させた位相差をもつ縞を用いて行なう測定を格子をシフトさせながら繰り返し行ない、その結果を集積するならば、被測定物体全域にわたる測定も可能である。

Fig. 5に、上記の測定システムを用い、球面(直径150 mm)を測定対象とした場合に得られる縞画像例を示す。この場合、1画面内に測定領域を2カ所 (area 1, 2) 設定している。

0 rad 位相の縞に比べて、area 1 では、 $\pi/2$  rad, area 2 では、 $\pi$  rad 位相が変化していることが確認できる。さらに、Fig. 4 に示したシステムを用いることにより、

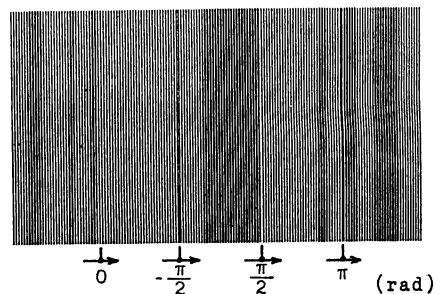


Fig. 3 Grating with phase difference.

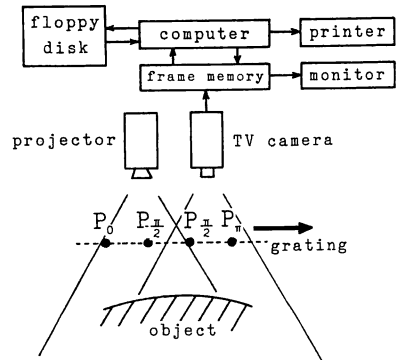


Fig. 4 Schema of system.

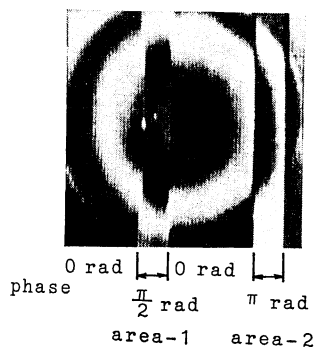


Fig. 5 Phases of fringes in the measuring area.

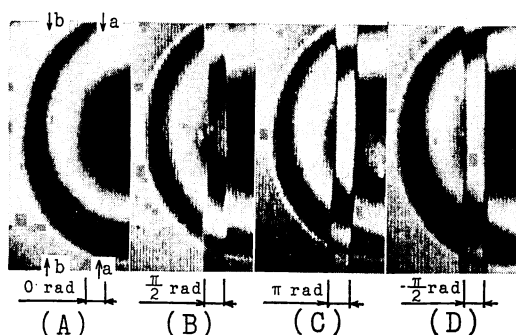


Fig. 6 Moiré pictures in the measuring area.

被測定物体全域にわたって、位相の異なる4種の縞画像を得ることができる。ここでは、Fig. 6(A) 0 rad 位相に示す a-a, b-b 断面の測定を行ない、本手法の正当性を検討する。実験では、格子スライド機構を用いて、測定者が、測定位置を測定エリア内に設定しつつ行なった。この作業において、(A) 0 rad, (B)  $\pi/2$  rad, (C)  $\pi$  rad, (D)  $-\pi/2$  rad ( $3\pi/2$  rad) と位相の異なる縞画像を得た結果が、Fig. 6 である。

Fig. 6 において、各測定断面 (a-a, b-b) でのモアレ縞の位相の変化を確認することができる。ここで、Fig. 2 の原理に示した area A, C に対応する測定エリア外での縞の位相がすべて Fig. 6(A) に示す 0 rad 位相の縞と一致していることもわかる。この結果は、試作装置による実験が、Fig. 2 の原理に従ったものであることを示している。

次に、Fig. 6 に示す画像を用いて、3次元座標を算出する。

### 2.2 3次元座標検出法<sup>12)</sup>

Fig. 2 に示す格子照射型モアレ法では、0,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $-\pi/2$  rad の4種類の位相の異なるモアレ縞に対して、検出された測定エリア内の縞の強度分布  $I(x, y)_n$

を(1)式として表わすことができる。

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

ここで、 $l$  は光源 L (あるいは、画像の観察点 E) と格子との距離、 $d$  は光源 L と画像を観察する点 E との距離、 $s$  は格子のピッチ、 $h(x, y)$  は grating (A) からの被測定表面までの距離 (縞深さ) であり<sup>14)</sup>、 $n$  は整数である。また、 $a(x, y)$ ,  $b(x, y)$  は、モアレ縞の画像各部分での被測定物体の色むら、反射むら、照明むら等に対する係数である。

縞走査干渉計では、縞の被測定位相  $\phi(x, y)$  を求めるために、参照光の波長  $\lambda$  に対して、参照光の位相を  $\lambda/K$  刻みで、 $K$  段階変化させることにより、バイアス位相項  $\delta_i$  をもった干渉縞の強度  $I(x, y, \delta_i)$  を  $K$  回測定し、

$$c = \sum_{i=0}^{K-1} I(x, y, \delta_i) \cos \left( 2\pi \frac{i}{K} \right) \quad (2)$$

$$s = \sum_{i=0}^{K-1} I(x, y, \delta_i) \sin \left( 2\pi \frac{i}{K} \right) \quad (3)$$

$$\phi(x, y) = \tan^{-1}(s/c) \quad (4)$$

(2), (3), (4) 式より、被測定位相  $\phi(x, y)$  を求めることができる<sup>10, 11, 13)</sup>。

本報では、Fig. 6 に示す4種類の位相をもつ画像から、(1)式に示す4種類の透過率分布を求めることができるので、次に示す演算を行ない、モアレ縞の位相  $\alpha(x, y)$  を求めた。

$$M_1(x, y) = I(x, y)_0 - I(x, y)_2 = 2b(x, y) \cos \left\{ \frac{2\pi \cdot h(x, y) \cdot d}{s \{l + h(x, y)\}} \right\} \quad (5)$$

$$M_2(x, y) = I(x, y)_3 - I(x, y)_1 = 2b(x, y) \sin \left\{ \frac{2\pi \cdot h(x, y) \cdot d}{s \{l + h(x, y)\}} \right\} \quad (6)$$

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \frac{M_2(x, y)}{M_1(x, y)} = \frac{2\pi \cdot h(x, y) \cdot d}{s \{l + h(x, y)\}} \quad (7)$$

ところが、算出した位相  $\alpha(x, y)$  から、物体表面の座標算出を行なう場合、正接関数は周期関数なので、物体表面がなめらかな形状をしているとして、(8)式を使って位相をつながなければならない。

$$\alpha_N(x, y) + 2\pi N = \frac{2\pi \cdot h(x, y) \cdot d}{s \{l + h(x, y)\}} \quad (8)$$

ただし、 $N$  は縞次数であり、 $\alpha_N(x, y)$  は  $\tan^{-1}$  の主値を考慮し、(7)式より求めた位相  $\alpha(x, y)$  をモアレ縞の周期  $2\pi$  rad に対応させるために、 $-\pi < \alpha_N(x, y) \leq \pi$

の範囲に換算した値である。

(8)式より、縞深さ  $h(x, y)$  は、(9)式として求められる。

$$h(x, y) = \frac{\{\alpha_N(x, y) + 2\pi N\} \cdot l \cdot s}{2\pi \cdot d - s \cdot \{\alpha_N(x, y) + 2\pi N\}} \quad (9)$$

### 3. 測定結果ならびに検討

#### 3.1 測定結果とその精度

実験装置は、Fig. 4 に示す TV カメラ (2次元 CCD カメラ, 512×512), プロジェクタ, および移動機構をもつ格子より構成されている。TV カメラより取り込まれた画像は、256 階調のフレームメモリに蓄えられ、16 ビットマイクロコンピュータにより処理される。装置の各パラメータは、Fig. 2 に対して、 $d=300$  mm,  $l=1200$  mm,  $s=1.2$  mm と設定した。

Fig. 6(A) に示す画像の測定エリア内 a-a における縞の位相ならびに 3 次元座標を算出した結果を Fig. 7 に示す。

前報<sup>12)</sup>に示した格子投影型モアレ法の縞走査技術による結果と同様に、Fig. 7(A)の位相において、両端より中央部に向かって位相が減少し、被測定物体の形状が凸面であることが判定できる。この位相情報より算出した座標測定結果が Fig. 7(B) である。本実験における測定精度は、統計的処理により、前報<sup>12)</sup>に示した投影型モアレ法の縞走査技術による結果と同様に、位相情報のばらつきにおいて約  $\pi/20$  rad であった。このことは、モアレ縞の 1 周期に対応する高さの差の 1/40 の精度で測定ができることに対応する。

Fig. 6(A)の b-b 断面における縞の位相ならびに 3 次元座標を、Fig. 7 と同様に 4 種類の位相をもつ縞を発生させ、算出した結果が Fig. 8 である。

Fig. 8 においても、Fig. 7 に示した結果と同程度の測定が行なわれていることが確認できた。

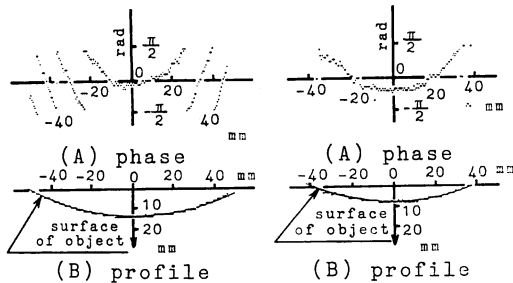


Fig. 7

Fig. 8

Fig. 7 Results in section a-a in Fig. 6(A).

Fig. 8 Results in section b-b in Fig. 6(A).

Fig. 7, 8 の結果が示すように、各測定エリア内で位相が異なったモアレ縞を発生させ、そのつど座標を算出し、その結果を集積すれば、前述のように、被測定物体全域にわたる測定も可能であることが確認できる。

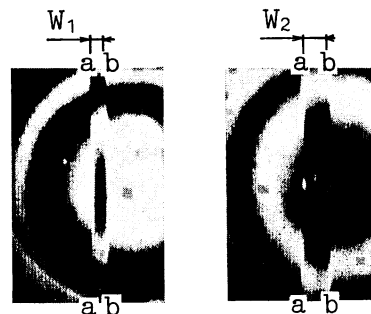
#### 3.2 縞次数の自動決定法

Fig. 1 が示すように、モアレ法では、発生する縞は、等高縞である。しかし、縞深さ間隔は、遠方になればなるほど大きくなる性質がある。この問題は、縞次数  $N$  を変数とする縞深さ  $h(x, y)$  の式<sup>14)</sup>を定義することによって解決することができる。したがって、縞深さの式として、(9)式を定義し、利用する本報においても自動測定を行なうには、(5)~(7)式より求めた縞の位相に加えて、縞次数  $N$  を求めておかなければならない。

本実験では、被測定物体を格子面から垂直方向にあらかじめ移動させ、その移動に伴い変化する縞の数を、測定の基準となる点 (ここでは、球面の最も突出した点) において計数することによって、縞次数を求め、(9)式に基づき座標を算出した。本報のように自動測定を行わない場合には、上記の手法によって縞次数を決定した後座標の算出を行なうことができる。しかし、自動測定を行なう場合には、縞次数の自動決定法が必要となる。その一手法として次の方法を提案する。

Fig. 9 に示すように、本手法では、格子面と被測定物体との距離に関係して、測定エリアの幅  $W$  が変化する。Fig. 9(B)は、(A)に比べて格子面から遠い位置に被測定物体を設定した場合である。明らかに、測定エリア幅  $W$  が(A)に比べて大きくなっていることがわかる。この測定エリア幅  $W$  が変化する現象を光切断法の原理<sup>15)</sup>に従って、Fig. 10 を用いて説明する。

光源の位置  $L$  に対して観察点  $E$  より  $P$  において位相が変化する格子を用いた場合のモアレ法を考える。



(A) the distance between the grating and object is close. (B) the distance between the grating and object is away.

Fig. 9 A decidable method of sequence number of moiré fringes.

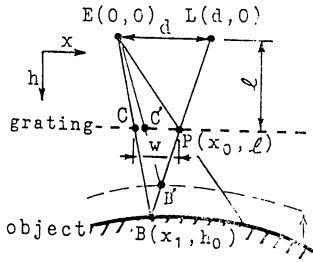


Fig. 10 An automatic method of order number determination of moiré fringes.

Fig. 9(A)において、測定エリアを形成するボーダライン a-a は、格子条の位相が変化する線であるから、Fig. 10 では、P 点に対応する。一方、測定エリアの他の境界線 b-b は、測定物体面上の a-a の影であり、Fig. 10 では、B 点に対応する。さらに、B 点を E 点より観察すると、格子面上では、B 点は C 点に対応する。すなわち、C 点と P 点との距離が測定エリア幅  $W$  であることがわかる。

ここで、被測定物体が格子面に近い場合を考えると、C 点は C' 点へと移動し、測定エリア幅  $W$  は小さくなることがわかる。

さらに、測定エリア幅  $W$  が計測可能であれば、 $\angle ELB$  と  $\angle CPB$  との関係から B 点の座標  $h_0$  は、(10)式として求めることができるとともに、格子面から被測定物体表面までの距離を、 $h_0 - l$  として求めることができる。

$$h_0 = d \cdot l / (d - W) \quad (10)$$

一般に、絶対縞次数の決定は、ぼんやりとした幅をもつモアレ縞に対する演算であるから、位相の測定ほどに演算精度を必要とするものではないと考えられるので、(10)式によって、縞次数を決定することができる。

まず、概数として測定エリア幅  $W$  をパターン認識等を用いて測定すると、(10)式より格子面から被測定物体表面までの距離を  $\overline{h_0 - l}$  として、概算することができる。次に、あらかじめ(9)式を用いて、絶対縞次数  $N$  と格子面から被測定物体表面までの距離との表を作成しておけば、概算した  $\overline{h_0 - l}$  と表との対応によって、絶対縞次数  $N$  の推定は可能である。

現在、測定時のシステム構成の各パラメータと測定エリア幅との関係および精度の検討等、本報で示した手法の自動化にあたっての基礎的データを採取するとともに、液晶パネルを格子として用いたシステム構成の検討を行なっている。さらに、それらの情報に基づき、計算機が自動的に効率よく測定エリアを設定し、測定を行な

っていく AI の手法による自動測定システムの開発を行なっている。

#### 4. ま と め

本研究において次のことを明らかにした。

- 1) 従来困難であると考えられていた縞走査技術による格子照射型モアレ法の高分解能化が可能であることを示した。
- 2) 試作装置による原理確認実験において、格子投影型モアレ法に縞走査技術を適用した場合と同程度の測定が可能であることがわかった。
- 3) 自動化にあたっての縞次数自動決定法を示し、本手法の自動化が可能であることを示唆した。

最後に、研究にあたって、熱心にご助言ならびにご指導くださった大阪大学工学部応用物理学科横関俊介先生に心より感謝いたします。

#### 文 献

- 1) 高崎 宏: “日本のモアレ研究”, 応用物理, **51** (1982) 535-538.
- 2) D. M. Meadows: “Generation of surface contours by moiré patterns,” Appl. Opt., **9** (1970) 942-947.
- 3) H. Takasaki: “Moiré topography,” Appl. Opt., **9** (1970) 1467-1472.
- 4) 高崎 宏: “モアレトポグラフィ”, 応用物理, **49** (1980) 913-920.
- 5) 鈴木正根: “モアレトポグラフィ計測法(II)”, 画像技術, **6** (1975) 35-47.
- 6) 谷田貝豊彦: “走査モアレ法と三次元形状の自動計測”, 応用物理, **47** (1978) 370-375.
- 7) 吉沢 徹: “位相検出によるモアレ法の高感度化”, 精密機械, **51** (1985) 816-821.
- 8) T. Yatagai: “Automatic topography using high precision digital moiré methods,” Proc. SPIE, **361** (1982) 81-88.
- 9) 植村恒義: 画像計測入門 (昭晃堂, 東京, 1980) pp. 81-84.
- 10) J. H. Bruning: “Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses,” Appl. Opt., **13** (1974) 2693-2703.
- 11) J. Schwider: “Digital wave-front measuring interferometry; some systematic error sources,” Appl. Opt., **22** (1983) 3421-3432.
- 12) 新井泰彦: “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.
- 13) 谷田貝豊彦: “光干渉計測法の最近の進歩”, 精密機械, **51** (1985) 695-702.
- 14) 鈴木正根: “モアレ縞による三次元計測”, 精密機械, **40** (1974) 746-753.
- 15) 杉山 聰: “3次元形状の光学的自動測定”, 計測と制御, **19** (1980) 470-475.