

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

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

(1986年3月22日受理)

High Speed- and High Resolutive-Moiré Topography by the Method of Fringe Scanning Interferometry

Yasuhiko ARAI and Tadao KURATA

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

This paper describes the high speed- and the high resolutive-automatic 3-D measurement method by applying the special case of the fringe scanning interferometry method proposed by Bruning to the scanning moiré topography. In results, the measurement within the error range of 1/40 fringe and rapid 3-D display output can be achieved by using a micro-computer. Further, the practical problems in this method for instance on the measurement of the living-body are investigated. It is shown that the method is suitable for the automatic 3-D measurement.

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、モアレトポグラフィへと発展してきた¹⁾。この間にさまざまな技術が提案され、実用化されてきた。なかでも近年三次元測定の需要の高まりに応じた非接触かつ三次元的広がり短時間にデータサンプリングできるモアレトポグラフィ法^{2,3)} (以下、モアレ法) は、工学をはじめ医学、服飾等へと広く利用されている^{4,5)}。さらに、この技術に TV カメラを導入した走査モアレ法⁶⁾では、オンラインでの計算機処理が可能であり、凹凸判定ならびに縞次数の決定⁷⁾、三次元グラフィックス等の処理をも瞬時に行なえる自動測定システムが構成されるに至っている。ところが、現在行なわれているような縞の二値化画像による処理^{6,7)}では、画像処理に時間を要し、さらに、使用する格子のピッチを細かくする、またモアレ縞の増倍法^{8,9)}を用いない限り、測定の高分解能化は不可能であるなどの問題がある。このような状況のなかで、光干渉計測法における高精度化への手法をモアレ法に導入した研究が報告されている^{10,11)}。なかでも、縞の解析

精度を低下させる干渉縞のバイアス成分、コントラストの影響等を自動的に補正し、干渉縞信号の高精度位相検出を行なうことのできる¹²⁻¹⁴⁾ 縞走査干渉計を走査モアレ法に導入する手法は、自動化が容易であると考えられ、いくつかの報告がなされている¹¹⁾。

本研究では、この縞走査干渉計の手法の特殊な場合にモアレ縞の基本的性質を適用することにより、高速かつ高精度な走査モアレ法を実現した。この結果、1枚の入力画像より、短時間に一般のモアレ法における縞と縞との間に存在する値を1/40 フリンジ程度で測定することができた。また、実用面において問題となる被測定物体の色むら、明るさのむらについても検討し、本手法が三次元自動測定にきわめて適した手法であることを示した。

2. 走査モアレ法におけるモアレ縞^{6,7,11)}

走査モアレ法は、Fig. 1(A)に示す従来の投影型モアレトポグラフィ¹⁵⁾の第2基準格子 (grating 2) の代りに TV カメラの走査線を仮想的に基準格子 (仮想格子) と想定し、変形格子像を走査線に沿って読み取ることによ

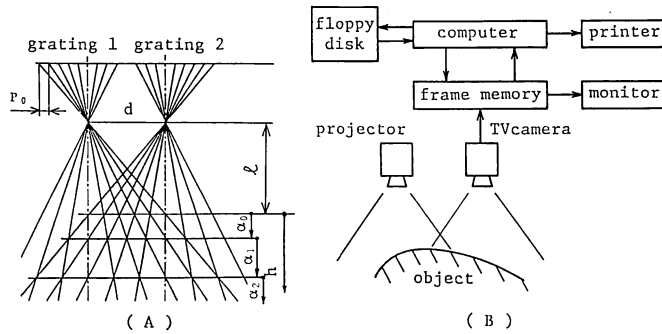


Fig. 1 Principle of moiré topography (A) and schematic diagram of the system (B).

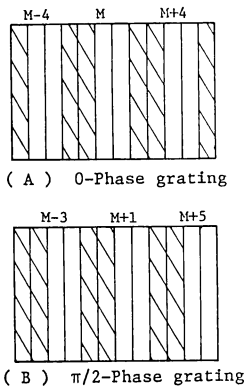


Fig. 2 Phase of the virtual gratings.

りモアレ縞等高線画像を得る手法である⁶⁾。したがって走査線の位相を変化させることによって、発生するモアレ縞の位相をも変化させることができるのである。たとえば、Fig. 1(B)に示すシステムにおいて、TVカメラの走査線4本を、Fig. 2のように一組と考え、仮想格子(斜線部が格子の黒い部分と考える)を定義すると、(A)の0 rad 相の格子に比べて、(B)の状態では格子の位相が $\pi/2$ rad 遅れているため、発生するモアレ縞画像にも $\pi/2$ rad の位相差が生じる。この処理を計算機により行なうと、1枚の入力画像より、0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ rad の4種類の位相の異なったモアレ法における h の深さにある (x, y) 点の縞の強度分布 $I(x, y)_n$ を(1)式として求めることができる。

$$I(x, y)_n = a(x, y) + b(x, y) \cos \left\{ \frac{2\pi f d h}{P_0(l-f)(h+l)} + \frac{\pi}{2} n \right\} \quad (1)$$

ただし、 n は整数

ここで、 $a(x, y)$, $b(x, y)$ 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、照明むら等による係

数である。また、(1)式における各変数は、Fig. 1(A)に示すように P_0 は格子のピッチ、 d は両レンズの主点間距離、 h は縞深さ、 l はレンズ主点より物体上基準点までの距離、 f はレンズの焦点距離である。

3. モアレ縞の位相ならびに座標検出

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 λ に対して、参照光の位相を λ/K 刻みで K 段階変化させることにより、バイアス位相項 δ_i をもった干涉縞の強度 $I(x, y, \delta_i)$ を K 回測定し、

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

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

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{S}{C} \quad (4)$$

(2), (3), (4)式より被測定位相 $\phi(x, y)$ を求めることができる¹²⁻¹⁴⁾。

本研究では、(2), (3)式において、 $I(x, y, \delta_i)$ に対する重みとなる \cos, \sin の値が ± 1 となり演算時にたんに符号の変化として取り扱うことができる高速演算の可能な $K=4$ の特殊な場合を利用することによって、(1)式に示した1枚の入力画像より得た4種類の透過率分布間で次の演算を行ないモアレ縞の位相 $\alpha(x, y)$ を求めた。

$$M_1(x, y) = I(x, y)_0 - I(x, y)_2 = 2b(x, y) \cos \left\{ \frac{2\pi f d h}{P_0(l-f)(h+l)} \right\} \quad (5)$$

$$M_2(x, y) = I(x, y)_3 - I(x, y)_1 = 2b(x, y) \sin \left\{ \frac{2\pi f d h}{P_0(l-f)(h+l)} \right\} \quad (6)$$

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \frac{M_2(x, y)}{M_1(x, y)} = \frac{2\pi f d h}{P_0(l-f)(h+l)} \quad (7)$$

以上のように、1枚の入力画像より得た4種類の画像に対して Bruning の手法の $K=4$ を適用することにより、被測定物体の色むら、照明むら等による影響を除去することができる高速演算アルゴリズムを構成した。

ところが、算出した位相 $\alpha(x, y)$ から座標算出を行なう場合、モアレ法では、Fig. 1(A)に示すように等間隔な縞が発生しないため、基準面からの縞の深さ $h(x, y)$ に対応した各縞ごとの位相 α_N を(8)式のように考える必要がある。

$$\alpha_N + 2\pi N = \frac{2\pi f d h}{P_0(l-f)(h+l)} \quad (8)$$

ただし、 N は縞次数であり、 α_N は \tan^{-1} の主値を考慮し、 $-\pi < \alpha_N \leq \pi$ の範囲に α を換算した値である。(8)式より、 $h(x, y)$ は(9)式として求められる。

$$h(x, y) = \frac{P_0 l (l-f) (\alpha_N + 2\pi N)}{2\pi f d - P_0 (l-f) (\alpha_N + 2\pi N)} \quad (9)$$

以上の演算により、1枚の入力画像から三次元測定を行なうことができる。

4. 実験結果ならびに検討

実験装置は、Fig. 1(B)に示す TV カメラ (2次元 CCD カメラ, 512×512) および、プロジェクタにより構成され、TV カメラより取り込まれたデータは 256 階調のフレームメモリにたくわえられ、16ビットマイクロコンピュータにより処理される。実験における各パラメータは、 $f=75$ mm, $d=95$ mm, $l=1421$ mm, $P_0=0.042$ mm (TV カメラの素子のピッチより決定) として設定した。また、1枚の入力画像より4枚の位相の異なる画像の抽出は2章にも述べたように走査モアレ法の特徴を生かし仮想格子の移動により次のようにして行なった。

サンプリングされた1枚の入力画像を、TV カメラの素子の配列に従い分割し、それぞれの素子に対して走査線方向 (M 方向) と走査線に垂直な方向 (j 方向) にそれぞれ番地を与え、この TV カメラ素子の行列の各要素の輝度として画像を考えると、たとえば、0 phase の画像 I_0 は、Fig. 2 に示すように4本の走査線をペアとして考えることにより、隣りあう M 番目と $M+1$ 番目の走査線上の素子の輝度をそれぞれ $I(M, j)$, $I(M+1, j)$ (M は4の倍数) としてサンプリングし、(10)式に示す定義に従い画面全域において求めることができる。

$$I_0 \triangleq \frac{I(M, j) + I(M+1, j)}{2} \quad (10)$$

また、 $\pi/2$ phase の画像 I_1 では、 $I(M+1, j)$ と $I(M+$

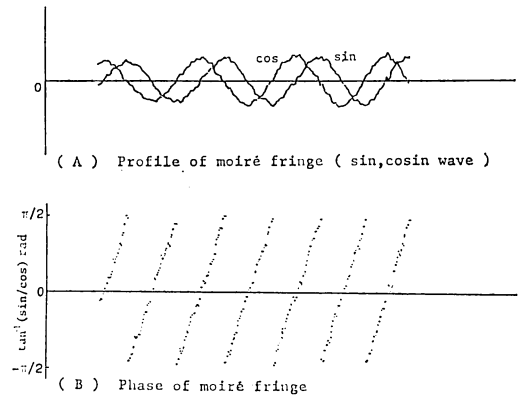


Fig. 3 Moiré fringe on an inclined plane.

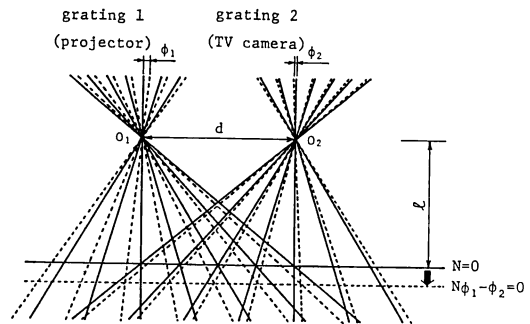


Fig. 4 Influence of the grating's phase difference.

2, j) の素子の輝度に対して同様の演算を行なうことにより求めることができる。このような演算により I_0, I_1, I_2, I_3 を抽出し実験を行なった。

基準面に対して $\pi/6$ rad 傾けた平面についての結果を Fig. 3 に示す。(A)は(5), (6)式より求めたモアレ縞の濃度分布 ($\sin: (I_3 - I_1)/2$, $\cos: (I_0 - I_2)/2$) を示すものである。これらの \sin, \cos を(7)式に代入することにより位相を求めることができる。

ところが、本研究においてモアレ縞を発生させる手法が走査モアレ法であるため、従来格子投影型モアレ法において問題となっていた第1の基準格子と第2の基準格子との位相のずれがこの場合にも問題となる¹⁵⁾。たとえば、Fig. 4 に示すように測定系の設定時に投影側に ϕ_1 、観察側に ϕ_2 の光軸に対する位相ずれが存在しているものとするともアレ縞の透過率分布は、

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos \{ \phi_0(x, y) + \phi_1 - \phi_2 \} \quad (11)$$

となり、Fig. 4 に示すように本来の基準面 ($N=0$) と位相が 0 rad となる面 ($N\phi_1 - \phi_2 = 0$) とが異なってくる。

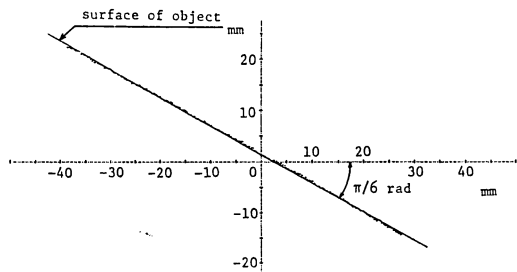


Fig. 5 Measured profile of an inclined plane (see Fig. 3).

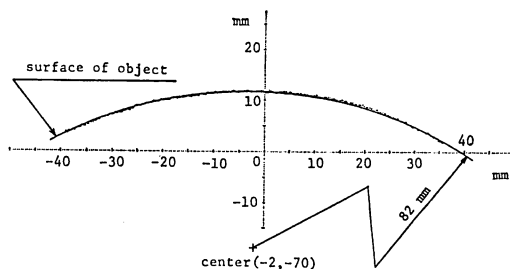


Fig. 7 Measured profile of a cylinder (see Fig. 6).

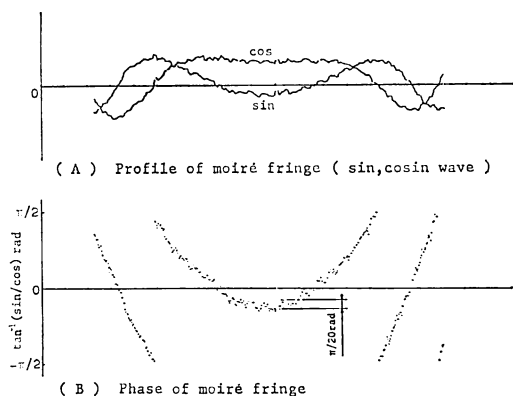


Fig. 6 Moiré fringe on a cylinder.

この問題に対して、従来のモアレ法では、格子移動機構等が検討されてきたが¹⁶⁾、測定精度を高めるに従い、十分に考慮すべき問題である。

本研究では、最も簡単な解決法として、光学系設定時に理論的に求めた本来位相が 0 rad となるべき 5 平面 (縞次数としては、 $N = -2, -1, 0, 1, 2$) を載物台上に設定し、各平面におけるモアレ縞の位相を本手法により、あらかじめ測定しておき、設定時の格子の位相ずれ $\phi_1 - \phi_2$ として定義し、この初期位相ずれをデータ処理時に補正した。これらの処理により求めた位相が Fig. 3 (B) である。Fig. 3 (B) において、右から左に向かうに従い、位相は $\pi/2$ rad から $-\pi/2$ rad へ変化している (位相が減少している)。 $-\pi/2$ rad において \tan^{-1} の主値の関係より $\pi/2$ rad へ位相飛びが生じさらに位相は減少している。すなわち、Fig. 3 (B) ではプロジェクタ、カメラの配置を考慮すると、右から左に向かって縞次数が減少していることになる。よって、右から左に進むに従い凸になっていることがわかる。このような位相の変化の様子より凹凸情報 (縞次数の変化) を自動的に抽出することができる。この位相情報より算出した座標測定結果を Fig. 5 に示す。

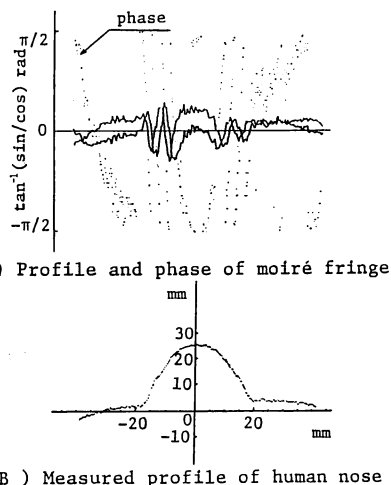


Fig. 8 Measured results on a living body.

同様に半径 82 mm の円筒凸面についての実験結果を Fig. 6 に示す。(B) に示すように両端より中央部に向かって位相が減少し、あきらかに凸面であることが判定できる。この場合の座標測定結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 の結果と被測定物体として中心 (-2, -70) に配置した半径 82 mm の円筒との差の平均値は、0.1 mm、標準偏差は、0.25 mm であった。実験において縞 1 周期の深さが約 10 mm であったことより、モアレ縞 1 周期の約 1/40 程度の測定が行なわれているものと考えられる。また、Fig. 6 (B) の位相情報のばらつきが約 $\pi/20$ rad であったこともこの結果によく対応している。このばらつきの主たる原因は、試作した投影格子の標準偏差 10% 程度のピッチ誤差によるものであると考えられる。しかし、この格子のピッチむらによる影響は、モアレ縞の誤差平均化効果¹⁶⁾により約 2.5% (1/40 フリンジ) まで緩和されていることもわかる。したがって、このような現象を考慮すると、本実験装置の格子のピッチと素子の大きさの関係では、処理の高速化を目的として $K=4$ を採用した場合でも、標準偏差 5% 程度のピッチむらの

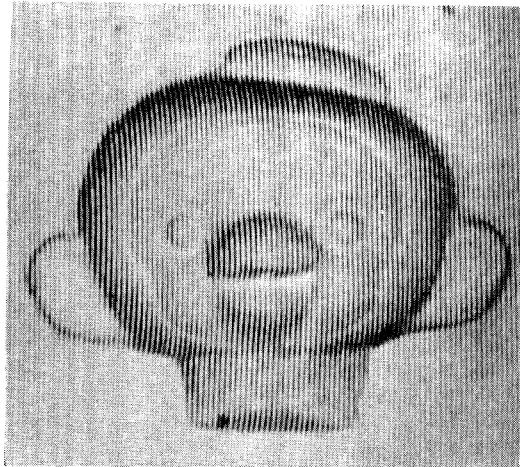


Fig. 9 Deformed gratings on a doll face.

格子を用意すれば、1/100 フリンジ程度の測定も可能であると考えられる。

Fig. 8 は、人体顔面の測定結果である。本手法が人体のもつ色むら、形状による反射むら、照明むら等被測定物体の明るさのむらによる影響を受けることなく測定が行なえることを示している。

Fig. 10 は、Fig. 9 に示す計算機内に取り込まれた変形格子像より求めた人形のレリーフの測定結果である。この場合でも、Fig. 9 に示すような形状による明るさのむらの影響を受けることなく細部にわたる測定が行なわれている。この場合、1/60 s のデータサンプリングよりディスプレイ上への出力に要したマイクロコンピュータによる処理時間は約 3 min であった。このように、本手法は画像の二値化、細線化等の従来の画像処理を必要としないため、また、Bruning の手法の特殊な場合を走査モアレ法に適用しているため、1度のサンプリングデータより、短時間に三次元自動測定を行なうことができた。

5. ま と め

本研究において次のことを明らかにした。

- 1) 本研究で示したアルゴリズムは縞走査干渉計の手法のきわめて特殊な場合を走査モアレ法において実現することにより、約 1/40 フリンジの誤差内での高速三次元測定を可能とした。
- 2) データ処理が簡単なため、1/60 s のデータサンプリングから、35本の三次元断面出力までのマイクロコンピュータレベルでの処理時間は約 3 min であった。

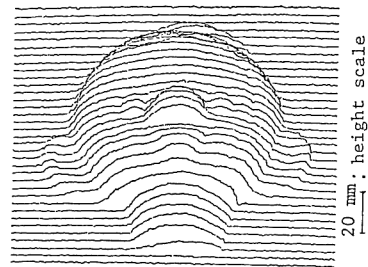


Fig. 10 3-D plot of a doll face.

3) 実際に測定を行なう場合に生じる格子の位相の問題をも検討し、これらの問題に対する解析法を示した。

以上の結果より、本手法が三次元自動測定にきわめて適した手法であることを明らかにした。

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) たとえば、モアレ研究会抄録：*画像技術*, **7** (1976) 37-56.
- 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) 新井泰彦：“走査モアレ縞の代表値について”，*精密機械*, **51** (1985) 558-562.
- 8) D. Post: “Analysis of moiré fringe multiplication phenomena,” *Appl. Opt.*, **6** (1967) 1938-1942.
- 9) 加藤和典：“モアレ法による塑性ひずみの測定について”，*日本機械学会誌*, **79** (1976) 1151-1157.
- 10) 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.
- 11) T. Yatagai: “Automatic topography using high precision digital moiré methods,” *Proc. SPIE*, **361** (1982) 81-88.
- 12) J.H. Bruning: “Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses,” *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2693-2703.
- 13) J. Schwider: “Digital wave-front measuring interferometry; some systematic error sources,” *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3421-3432.
- 14) S. Nakadate: “Fringe scanning speckle-pattern interferometry,” *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2172-2180.
- 15) 吉沢 徹：“格子移動機構を備えた投影型モアレトポグラフィ法”，*精密機械*, **43** (1977) 556-561.
- 16) 植村恒義：*画像計測入門* (昭晃堂，東京，1980) pp. 81-84.