位相シフトを導入したモアレトポグラフィ法 による反射物体の測定*

富 沢 貞 友** 吉 澤 徹***

Profile Measurement of Reflective Objects
by Phase-Shifting Moiré Topography

Teiyu Tomisawa and Toru Yoshizawa

Phase-shifting moiré topography system has been developed for the profile measurement of reflective objects such as optical disks. The collimated laser beam incident on the grating produces Fourier images due to diffraction. The image with different diffraction order deforms in accordance with the surface profile of the object behind the grating. The deformed pattern reflects back to the reference grating and, after superposition on the grating it produces moiré fringe which gives the contour of the surface. The order of the diffracted beam can be chosen by the iris stop of the CCD camera arranged in telecentric optics for contour observation. In this trial low sensitivity inherent to the conventional moiré method can be overcome by phase-shifting technique utilized in interferometric measurement. The hill or valley of the surface can also be identified by computation based on this principle. Our development can bring the sensitivity of $3\ \mu\text{m}$ in contour interval and the depth of observation ranging $70\ \mu\text{m}$ which are not appropriate for the interferometric measurement.

Key words: moiré topography, profile measurement of reflective objects, Fourier image, telecentric optical system, phase-shifting technique

1. はじめに

鏡面のような反射面をもつ物体の平面性測定には二光束干渉法やフィゾー干渉法などが用いられている。これらの方式にあつては測定感度は光源の波長の数分の一といった感度の高いものとなっているが、その反面、物体表面のうねりのように光の波長に比して大きな凹凸が問題となる場合には、高い感度が逆に障害となって、干渉縞の数が多くなりすぎて縞が密になって

しまい、このため縞をカウントすることが困難となったり、干渉縞自体が観察できないといった問題があった。こうした事態に対応するために、例えば斜入射干渉計を用いて測定感度を $5\ \mu\text{m}$ まで低下させた手法が報告されている。しかしこうした考え方では干渉計測のもつ高感度な特性をあえて低減化させるためにビームの入射角を大きくとる必要があり、このためにホログラフィック素子といった特殊な素子を用いることが必要とされている¹⁾。またこの例でも $20\ \mu\text{m}$ ないし $30\ \mu\text{m}$ 程度の測定深度を得ているにすぎない。

本研究では、実体格子型モアレトポグラフィ法を反射物体に適用し、一般の干渉計では測定が困難な $50\ \mu\text{m}$ 以上の比較的大きな面の凹凸を測定することを行った。この手法では基準として使用する素子は一般の明暗格子1枚であり、シンプルで高精度な光学系をつくりあげることができる。ただし、通常モアレトポグラフィ

* 原稿受付 平成3年11月19日

** 学生会員 東京農工大学工学部 (小金井市中町2-24-16)

*** 正会員 東京農工大学工学部

法²⁾のままでは測定感度が低すぎるので、干渉計測に用いられている位相シフト法³⁾を導入することによって測定感度を高めた。また画像データをコンピュータ処理することで物体表面の凹凸の自動判別を行うとともに形状表示を行った。

2. 原理

一般の実体格子型モアレトポグラフィ法にあっては、等高線を表すモアレ縞の間隔 Δh は一定ではなく、モアレ縞の次数によって異なるものとなっている⁴⁾。このためにすべての等高線を同じ位相だけシフトさせることができるように、点光源から発した光をコリメータレンズによって平行光束とするとともに、縞パターンを観察系に対してもいわゆるテレセントリック光学系を利用することとした。またテレセントリック光学系を採用することによって、物体表面の凹凸がある程度大きくなっても縞や物体を観察できる効果ももたらされる。Fig.1に平行光によるモアレトポグラフィ法の原理図を示す。格子を透過した光線はフーリエイメージを形成し⁵⁾、格子の像を物体表面に形成する。この格子像は格子面からある一定の決まった距離を隔てて周期的に形成される。しかし物体が反射物体である場合には物体表面には格子像はほとんど認められない。物体表面に投影された格子像は物体の表面形状に応じて変形しいわゆる変形格子像を形成し、この変形格子像が反射し基準格子と重なり合うことでモアレ縞が発生する。この場合縞間隔 Δh は縞次数によらず一定となる。得られるモアレ縞間隔 Δh は、物体表面によって反射さ

Fig.1 Principle of moire topography using collimated light

れるビームが基準格子位置で格子のピッチ p だけずれる量に相当する値となるので、Fig.1より式(1)のように表される。

$$\Delta h = \frac{p}{2 \tan \theta} \quad (1)$$

ここで θ は光の入射角である。したがって光の入射角 θ や、格子のピッチ p を変化させることによって縞間隔、すなわち感度を変更させることができる。ここでコントラストのよいモアレ縞を得るためには、物体表面に格子像を形成させる必要はなく、光線が物体表面で反射して再び基準格子と重なり合うときに格子像を形成するように格子と物体との距離を設定すればよい。

一般に格子に光が入射した場合には光の回折現象が生じるが、これは格子のピッチが細かいほど顕著に現れる。ここで、透過型回折格子に光が入射した場合、回折は格子面で反射する場合にも起こり、反射回折光と透過回折光とがFig.2のように生じるが、本法では透過回折光のみを利用する。Fig.2では反射および透過回折光を ± 1 次までについて示してある。ここで、光の入射角を θ_0 、格子のピッチを p 、入射光の波長を λ とすると m 次の回折光の回折角 θ_m は式(2)のように表される。

$$\sin \theta_m = \sin \theta_0 + m \frac{\lambda}{p} \quad (2)$$

Fig.2 Diffraction by grating. θ_0 : incident angle, θ_m : diffraction angle ($m = \pm 1, \pm 2, \dots$)

したがって、対応する m 次の回折光によって形成される等高線を観測できる方向はこの回折角 θ_m の方向に限定されることになる。この場合式(1)は次式のように書き

Fig.3 Selection of diffraction order

改められる,

$$\Delta h = \frac{p}{2 \tan \theta_m} \quad (3)$$

Fig.3のように格子に平行光が入射した場合、実際には格子面からの反射回折光や透過した後の物体表面による反射回折光がいくつも生じ、それらが互いに重なってしまうためにモアレ縞のコントラストが低下してしまう。ここで必要なものは透過反射光のみであるから、反射回折光は除去する必要がある。そこで、使用する回折光の選択にはFig.3に示すようにレンズの焦点距離の位置に絞りを置くことで行った。透過した回折光が物体表面によって反射し、さらに格子で回折した光をレンズでとらえ、その光を撮影カメラの絞りを利用して目的とする次数の反射回折光によるモアレ縞を選択するようにした。

こうした配置によって格子に平行光を入射させ、テレセントリック光学系によって観察することとなるため、モアレ縞は等間隔の等高線が形成される。Fig.4のように、実際には図中で濃淡で示してある等高面と物体とが交わっている部分に等高線としてのモアレ縞が生じる。さて、こうしてモアレトポグラフィ法に位相シフトを適用するわけであるが、ここではモアレ縞の位相を $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ (それぞれの画像を l_0, l_1, l_2, l_3 とする)と変化させた四枚の異なるモアレ縞画像を用いて測定を行うことにした。位相の異なるモアレ縞を得るためには、縞間隔を $\Delta h/4$ ずつずらしたモアレ画像をつくる必要がある。ここで生じるモアレ縞

Fig.4 Generation of moire contours and phase shift by moving grating

は等間隔であるから、格子を面と垂直に物体方向に縞間隔 Δh の $1/4$ ずつ移動させることで、位相のずれたモアレ縞を得ることができる。厳密には格子物体間距離を変化させるとフーリエイメージ距離も変化し、形成される格子像の強度分布も変化する事となる。これは位相を変化させるとモアレ縞のコントラストも変化してしまうことを意味する。しかしながら、格子像の形成位置はある程度幅をもっているうえ、格子のシフト量はフーリエイメージを形成する周期よりも十分に小さいのでここでは無視する。得られた画像データから位相情報 ϕ を得るには、

$$\phi = \tan^{-1} \frac{l_3 - l_1}{l_0 - l_2} \quad (4)$$

の式によって演算処理し、これより全体の位相分布 $\phi(x,y)$ を得た。この $\phi(x,y)$ をもとに物体上の特定点を基準にとり、各点の位相の増減分を足し合わせる事によって位相の接続を行った。この操作により物体面上の各点について、それぞれの位相分布 $\phi(x,y)$ が連続的に得られ、したがって物体表面の凹凸は自動的に決定される。こうして得られた位相 $\phi(x,y)$ と縞間隔 Δh より物体表面上の点 (x,y) に対応する z 座標を次式

$$z(x,y) = \Delta h \frac{\phi(x,y)}{2\pi} \quad (5)$$

より算出し、各点の三次元座標を得ることができる。

3. 装置構成

Fig.5に装置構成図を示す。光源には直線偏光をもつHe-Neレーザを用い、ビームは偏光板 P_1 を透過させた後コリメートした。Fig.1の配置において入射角45度の平行光を格子G(ピッチ $p=100\mu\text{m}$)へ入射させ、格子Gの後に測定物体をセットした。フーリエイメージを用いているため、格子と物体との距離を格子像を形成する周期の整数倍の位置に設定することができる。モアレ縞の位相のシフトを行うためには格子を面と垂直方向に微動できるようにした。今回の実験装置では一回のシフトにつき格子の送り量は $12.5\mu\text{m}$ であり、微動機構の送り精度は $\pm 1\mu\text{m}$ とした。格子ピッチ $p=0.1\text{mm}$ 、光の入射角 $\theta=45^\circ$ および光の波長 $\lambda=632.8\text{nm}$ とした場合、フーリエイメージが形成される位置は格子からほぼ 2.88mm ごととなる。これに対してシフト量は3回で $37.5\mu\text{m}$ であって、格子像が形成される周期に比べて十分に小さく、格子物体間距離の変化に起因するモアレ縞のコントラスト変化は無視できる。格子を透過した回折光がさらに測定物体で反射したものを再びレンズ L_2 で集光し、CCDカメラでモアレ画像を取り込む。格子面での反射光(反射回折光)と物体からの反射光(透過回折光)とは偏光角が異なるため、これを利用して偏光板 P_1, P_2 によって反射回折光のみを除去できるように調節した。すなわち透過回折光と偏光板 P_2 の方位を一致させることにより、透過回折光のみを観察できるように

した。そしてCCDカメラによってとらえた位相の異なる4枚のモアレ縞画像 I_0, I_1, I_2, I_3 を画像メモリ装置に取り込み、この画像データを式(4)および式(5)によって演算処理して物体上の各点の三次元座標を算出した。

4. 測定結果

測定物体として直径約80mmのシングルCDを選び測定した。Fig.6にモアレ縞の位相を次々とシフトさせたと

Fig.6 Four moiré images of a compact disk with shifted phase. $p=100\mu\text{m}$, $\theta=45^\circ$, $\Delta h=50\mu\text{m}$, 0th order

Fig.5 Schematic diagram of the system

Fig.7 Wire-frame expression of computed result of the object in Fig.6

Fig.8 Contour Map of computed result of the object in Fig.6 and the cross sections

Fig.9 64 gray level expression of computed result of a hard disk

きのパターン変化の様子を示す。ここでディスクが楕円形に見えるのは、斜め45度方向より観察しているためである。このときのモアレ縞間隔は $50\mu\text{m}$ （格子ピッチ $p=100\mu\text{m}$ 、光の入射角 $\theta=45^\circ$ であり0次回折光を利用した）であった。Fig.7はその測定結果から表面の形状をワイヤフレーム表示（表示データは128点 $\times$ 128点）したものである。また z 方向の倍率は x 、 y 方向に対して100倍にとってある。Fig.8は同じデータを等高線および断面で表示したものであり、等高線間隔は $5\mu\text{m}$ となっている。各断面は等高線マップにおいてA-A', B-B', C-C', D-D', E-E'で示される個所についてを表示したものである。このディスクに関しては、最大で $67\mu\text{m}$ のうねりがあることが測定された。

Fig.9はハードディスクに関する測定結果を高さ方向について64階調で表示したものであるが、明るい色は

Fig.10 Cross sections of the object in Fig.9

ど高いことを示し、暗い色は低いことを示している。Fig.9におけるA-A', B-B'で示される個所の断面をFig.10に示す。面の凹凸は最大で $25\mu\text{m}$ 程度と測定されたが、その凹凸は穴の周辺やディスク端部で顕著に生じており、周辺部を除いたディスク表面は3ないし $5\mu\text{m}$ 程度の緩やかな凹凸となっていることが示されている。

Fig.11(a)および(b)は、最大で $60\mu\text{m}$ 凹凸を持つ金属板を測定し、触針式測定器（東京精密製 surfcom 200B）による測定結果との比較を行ったものである。図中の断面①はモアレ測定装置による測定結果を示し、断面②は触針式測定器による測定結果を示している。ただし両者の測定位置を物体面上の同じ個所にとるとは厳密には困難であるので、同一と思われる位置での断面を比較したものである。図より両者の断面形状はほぼ一致していることがわかり、またモアレ法による結果ではノイズによると思われる微小な凹凸のつてはいるが、 $3\mu\text{m}$ 程度の測定精度は得られているものと考えられる。

Fig.11 Comparison of measured results. ① cross section by phase-shifting moiré method, ② cross section by contact profilometer

5. まとめ

反射物体を対象としてモアレ等高線による形状測定を行った。一般のモアレトポグラフィ法のみでは測定感度が不十分であるために、位相シフト干渉法を導入することによって感度を高めるとともに、物体表面の凹凸の自動判別も行いうる手法を導入した。その結果、

1. 基準となるものは明暗格子1枚であり、シンプルな光学系が組み立てられる。
 2. 等高線を用いた計測および表示を行っており、三次元形状の直観的理解がしやすい。
 3. $70\mu\text{m}$ 程度の測定深度を有するとともに、 $3\mu\text{m}$ 程度の分解能をもつ面計測方式である、
- といった特徴を有する測定システムを開発することができた。

参考文献

- 1) 小林富美男, 南 芳高, 鈴木正根: ホログラムスクリーンを用いた斜入射干渉計, 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1991) 937.
- 2) H.Takasaki: Moiré topography, Appl.Opt., 9 (1970) 1467.
- 3) J.H. Bruning: Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses, Appl.Opt., 13 (1974) 2693.
- 4) 吉澤 徹: 画像計測入門 (精機学会画像計測分科会編), 昭晃堂 (1979) 90.
- 5) J.M.Cowley: Diffraction Physics, North-Holland, Amsterdam (1975) 19.