

二波長位相シフトデジタルホログラフィーによる 表面形状測定

井田 登士・山口 一郎・横田 正幸

群馬大学工学部電気電子工学科 〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1

Surface Shape Measurement by Phase-Shifting Digital Holography with Dual Wavelength

Takashi IDA, Ichirou YAMAGUCHI and Masayuki YOKOTA

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Gunma University, 1-5-1
Tenjin-cho, Kiryu 376-8515

A new method for surface contouring is proposed and verified by experiments. It uses phase-shifting digital holography with dual wavelength. Two digital holograms are recorded before and after wavelength shift provided by current tuning of a laser diode and the difference of the phases reconstructed with each of the wavelengths are derived numerically to deliver contours of a diffusely reflecting surface. Since normal incidence can be employed, the method does not need subtraction of tilt component from the phase difference and is free from shadowing effect compared with the dual incidence method.

Key words: phase-shifting digital holography, surface shape measurement, wavelength shift, noise reduction

1. はじめに

機械部品や精密機器などの表面形状測定には、触針法が最もよく使用されている。しかし、時間がかかり、対象に損傷を与える恐れもあり、複雑な曲面の測定に不向きといった欠点を有している。そのため、非接触で高速な表面の形状の測定が広く求められている。この要求をよく満たすのが、光を用いる方法である^{1,2)}。鏡面の形状測定にはいろいろな干渉計が使われているが、粗面に対しては、感度や操作性の面で満足なものはまだないといってよい。共焦点顕微鏡や低コヒーレンス干渉計は、光学系が複雑で測定点の走査が必要なため測定に時間を要し、格子投影法や三角測量法は、感度の低さと斜入射による影の出現が複雑な形状の場合に障害となる。また、いずれの方法も結像系を用いているため、深度の深い物体や、異なった深さにある表面を同時に測定することはできない。

デジタルホログラフィーによれば、結像レンズを使わずに数値的な焦点合わせによって奥行きのある物体を再生でき、しかも再生された位相値をもとにするため、高い測

定感度を実現することが可能となる^{3,4)}。特に、参照光を位相シフトさせて物体光の複素振幅を直接求める位相シフトデジタルホログラフィーは、再生像には共役像やゼロ次像が現れず高画質が得られるので、複雑な形状にも対処できる^{5,6)}。これまでに、物体照射光を傾ける前後での再生位相の差をとる方法が提案された^{7,8)}。しかし、斜入射が必要なため、位相差には傾斜に対応するオフセットが入り、その除去により空間分解能が低下した。また、複雑な物体では影の領域も発生する。これを解決するために、物体照射光の入射角でなく波長を変える方法が考案された^{9,10)}。波長シフトの簡単な方法として、半導体レーザーの電流変調によるモードホップを使い、約 500 μm の等高線感度を得た。同じ原理の測定は、従来のホログラフィーにおいて二波長法^{11,12)}としてよく知られている。しかし、像再生に1つの波長を使うため、記録時から異なる波長の再生像は色収差の影響を受け、その影響は波長差を増して、感度を上げるほど顕著になる。デジタルホログラフィーでは、数値的再生において記録時と同じ波長を使える

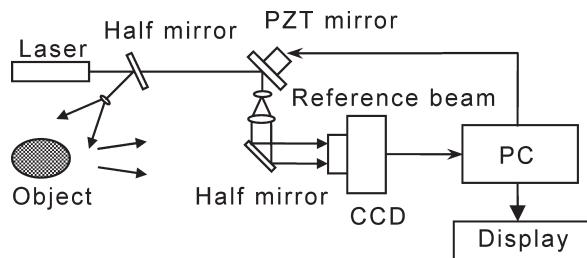


Fig. 1 Setup of phase-shifting digital holography.

ため、その影響はない。また、従来のホログラフィーのように干渉縞でなく位相差を直接処理するので、表面の反射率のむらに強く、分解能の向上やノイズの抑制がより簡単となる。今回は、その方法を球面の形状測定に適用し、位相差に生じるノイズの除去によって精度を改善した。

以下に、本法の基本原則、実験とその結果について述べる。

2. 基本原則

2.1 ホログラム記録と像再生

ここではまず、位相シフトデジタルホログラフィーの原理を説明した後、二波長による表面形状測定法の原理を述べる。用いられる基本的な光学系を Fig. 1 に示す。レーザー光を参照光と物体光に分け、半透明鏡を介してほぼ同じ方向から CCD に入射させる。このときの干渉縞の最小間隔は、参照光が平行とすると、波長 λ 、CCD から物体を見込む角 α に対して、 λ/α で与えられる。物体光の複素振幅を求めるためには、ピエゾ鏡により参照光の位相をシフトさせて干渉縞をずらしたときの複数の強度分布を利用する。

結像の関係式を、 z 軸の原点を CCD の中心位置として Fig. 2 の座標系をもとに導く⁶⁾。参照光と物体光の複素振幅を

$$U_R(x, y) = A_R \exp[i\phi_R(x, y)] \quad (1)$$

および

$$U(x, y) = A(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \quad (2)$$

とすると、CCD に記録される干渉強度は、位相シフト量を δ として次のように与えられる。

$$\begin{aligned} I(x, y; \delta) &= |U_R(x, y) \exp(i\delta) + U(x, y)|^2 \\ &= |U_R|^2 + |U|^2 + U U_R^* \exp(-i\delta) \\ &\quad + U^* U_R \exp(i\delta) \end{aligned} \quad (3)$$

物体光の複素振幅は、位相差 $\delta=0, \pi/2, \pi$ に対する 3 枚のパターンを使う場合には

$$U(x, y) = \frac{1-i}{4U_R^*} \left\{ I(x, y; 0) - I\left(x, y; \frac{\pi}{2}\right) \right\}$$

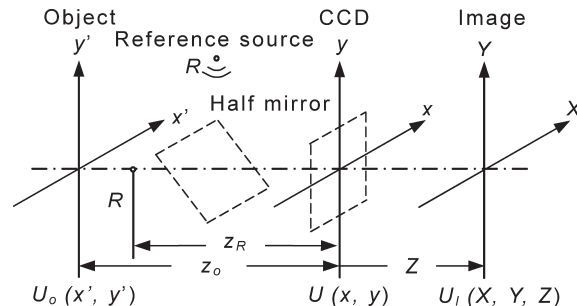


Fig. 2 Coordinate systems for hologram recording and image reconstruction.

$$+i \left[I\left(x, y; \frac{\pi}{2}\right) - I(x, y; \pi) \right] \quad (4)$$

となる。これに次のフレネル変換を施すと、CCD から Z の距離にある平面上での像の複素振幅が求められる。

$$U_I(X, Y, Z) = \iint U(x, y) \exp\left[ik \frac{(X-x)^2 + (Y-y)^2}{2Z} \right] dx dy \quad (5)$$

ここで、 $k=2\pi/\lambda$ は波数である。物体が (x'_0, y'_0, z_0) の位置にある点光源の場合、像強度 $|U_I|^2$ は $(X, Y, Z) = (x'_0, y'_0, -z_0)$ で最大になり、そこが点像の中心となる。 Z を変えて像強度を計算する過程を数値的な焦点合わせといい、これによりレンズの焦点調節のような機械的な動きを要さずに三次元情報が得られる。

再生像の数値計算には、二次元の高速フーリエ変換 (FFT) を用いる。そのとき、式 (5) をフーリエ変換とみなすか (フーリエ変換法または single-FFT 法)、コンボリューションとみなすかにより、FFT の利用回数が 1 回または 2 回となる。コンボリューション法 (または double-FFT 法) においては、CCD 上の複素振幅のフーリエ変換

$$\hat{U}(\xi, \eta) = \iint U(x, y) \exp[i2\pi(\xi x + \eta y)] dx dy \quad (6)$$

に式 (5) の積分核のフーリエ変換 $\exp[i\pi\lambda Z(\xi^2 + \eta^2)]$ を乗じた後で、もう一度フーリエ変換して再生像の複素振幅を得る。この場合の再生像のサンプル間隔は、CCD の画素ピッチ p に等しい。一方、フーリエ変換法では、CCD 上の複素振幅 $U(x, y)$ に位相関数 $\exp[i\pi(x^2 + y^2)/\lambda Z]$ をかけてからフーリエ変換を行うと、再生像が得られ、その像のサンプル間隔は $(\lambda Z/L_x, \lambda Z/L_y)$ (ただし L_x, L_y は CCD の縦および横の全受光面の大きさ) に等しい。コンボリューション法は、再生距離が小さいときに適し、フーリエ変換法は大きい再生距離に適している。これらの境界となる距離は、画素数を N 、 $L_x=L_y=L$ とすると、

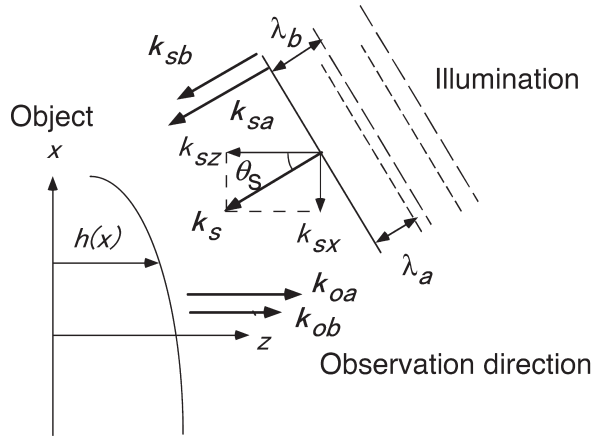


Fig. 3 Principles of surface shape measurement by dual wavelength phase-shifting digital holography.

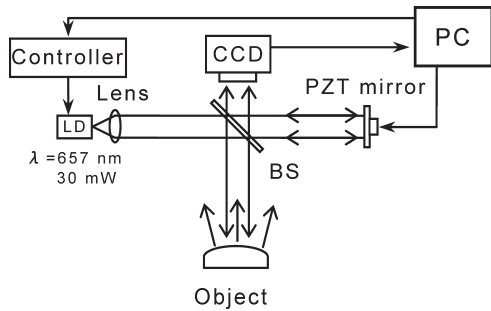


Fig. 4 Setup for contouring by dual wavelength phase-shifting digital holography.

$$Z_c \equiv L^2 / \lambda N = Np^2 / \lambda \quad (7)$$

で与えられる。この条件は、両者のサンプリング間隔が等しくなる距離として導かれる。

2.2 表面形状測定

Fig. 3 に示すように、粗面物体を平行光で照射し、基準面 (x, y) に対する入射角を θ_s とする。変化前後の波長を λ_a, λ_b とし、それぞれの照射光の波動ベクトルを $\mathbf{k}_a, \mathbf{k}_b$ で表す。各波長で参照光の位相を $\pi/2$ ずつシフトさせながら CCD で 3 枚の画像を取り込み、式 (5) を使って物体面での複素振幅分布 $U_{Ia}(x, y, -z_0)$ と $U_{Ib}(x, y, -z_0)$ を求める。ただし、この場合の波長として、ホログラム記録時と同じものを使うことにする。このとき、波長変化による物体上の位相変化は、Fig. 3 のように波動ベクトルを x 成分と z 成分に分解すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \arg[U_{Ia}(x, y, -z_0) U_{Ib}^*(x, y, -z_0)] \\ &= -(k_{saz} - k_{sbz} - k_{oaz} - k_{obz}) h(x, y) - (k_{sax} - k_{sbx}) x \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) の最右辺の第 1 項は基準面からの高さに比例し、

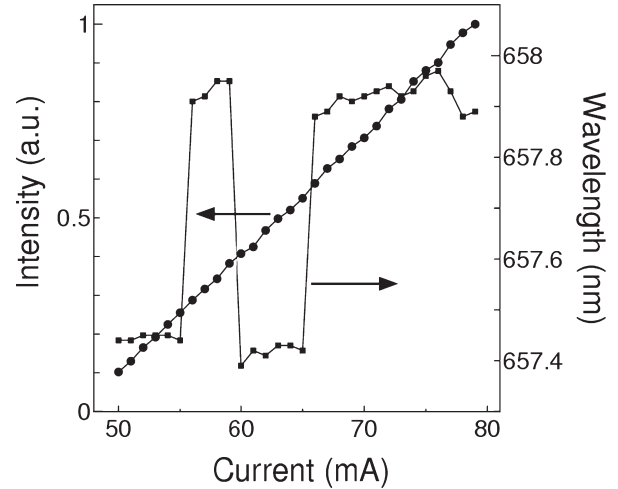


Fig. 5 Wavelength and intensity variations against injection current.

同第 2 項は傾きを表すキャリアーに相当する。このキャリアーは、垂直入射により消去することができる。しかし、波長でなく入射角を変える方式においては、垂直入射にしてキャリアーを消すと等高線感度も 0 になってしまうので斜入射の配置をとる必要があり、したがって位相差からキャリアー成分を差し引く処理も欠かせなかった^{7,8)}。

等高線感度を求めるために、式 (8) の位相差を波長によって表すと

$$\Delta\phi(x, y) = -2(k_a - k_b) h(x, y) = -4\pi h(x, y) / \Lambda \quad (9)$$

で与えられる。ただし、

$$\Lambda = 1 / (1/\lambda_a - 1/\lambda_b) \quad (10)$$

は合成波長を意味する。以下の実験のように、 $\lambda_a = \lambda$ 、 $\lambda_b = \lambda + \Delta\lambda$ とおくと、等高線感度は次式で与えられる。

$$\Delta h = \Lambda / 2 = \lambda^2 / 2\Delta\lambda \quad (11)$$

ただし、最後の式では、波長の変化 $\Delta\lambda$ がもとの波長 λ に比べて十分に小さいとした。

3. 実 験

用いた実験装置を Fig. 4 に示す。光源として波長 $\lambda = 657$ nm、出力 30 mW の半導体レーザーを使い、CCD には 512×512 画素、画素ピッチ $12.92 \times 12.87 \mu\text{m}^2$ のものを用いた。素子の出力は 8 ビットで AD 変換され、フレームメモリーを介してクロック 1.8 GHz のパソコンに入力される。配置における参照光と物体光の光路差は約 20 cm であるが、可干渉度に問題はなかった。参照光の位相は、フィードバック機構付きのピエゾ鏡 (Physik Instrumente P-753.12C) で最初の状態から 2 段階シフトされ、合計 3

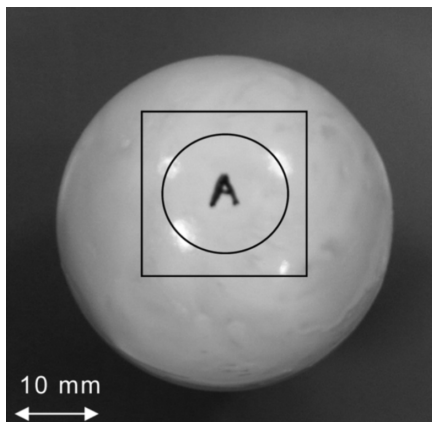


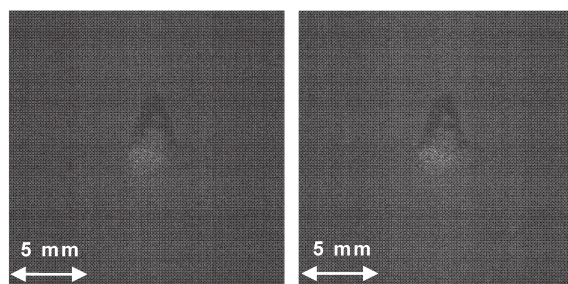
Fig. 6 Object of measurement.

枚のホログラムが撮られる。波長を変化させるには、半導体レーザーの注入電流を変える。なお、温度は25°C一定となるよう0.01°Cの精度でコントロールされている。その注入電流による波長特性をFig.5に示す。電流の増加とともに、波長にして0.5 nm程度のモードホップが生じている。このモードホップによる波長変化を用いることにした。この場合の等高線感度は、式(11)を使うと $\Delta h=420\ \mu\text{m}$ となる。波長変化と同時に出力も変化するが、解析には位相を使うので、ホログラムが記録される限りその影響は小さい。従来の二波長ホログラフィー干渉法では、波長によって像強度が変化すると干渉縞のコントラストが低下する。

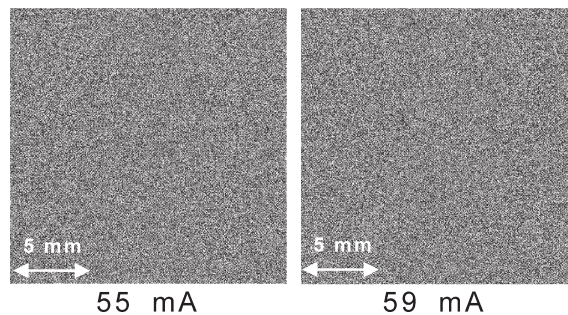
形状の測定対象として、直径39.6 mmのピンポン玉を選んだ。CCDから物体の頂点までの距離は320 mmである。物体の写真と測定領域をFig.6に示す。もとの表面では光が内部からも散乱され、下で述べる二波長での再生像の位相差にノイズが乗るため、上に白色の塗装を施した。また再生距離の確認のためにマークを描き、それが最も明瞭に再生されるように再生距離を選んだ。注入電流を55 mAおよび59 mAとしたとき、それぞれで3ステップの位相シフトでホログラムを記録した。このときの波長を波長計(アンリツ製MV02)で測定した。その値は、657.44 nmおよび657.95 nmであり、波長シフトは10回の測定で $0.51\pm 0.004\ \text{nm}$ であった¹⁰⁾。この場合に波長の差は $\Delta\lambda=0.51\ \text{nm}$ と波長に比べても小さいので、位相シフトに必要なピエゾの変位量は同じにとった。像再生にはフーリエ変換法を使い、それぞれの波長における振幅と位相の分布を求めた。各波長での3枚のホログラムの記録時間は、合計で1秒程度であった。

再生距離を320 mmとしたときの、それぞれの波長における強度と位相の分布をFig.7に示す。マークの像は

Intensity



Phase



55 mA

59 mA

(657.44 nm)

(657.95 nm)

Fig. 7 Intensity and phase of the reconstructed images for different injection currents.

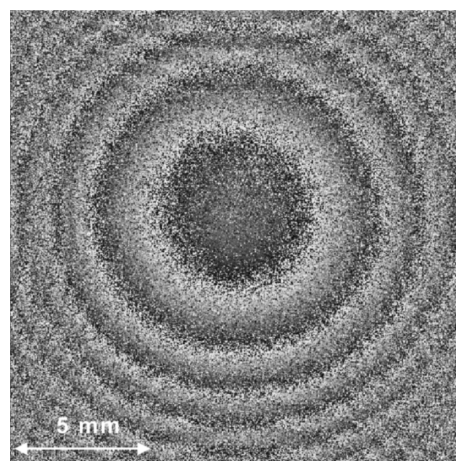


Fig. 8 Distribution of phase difference.

この再生距離で最も鮮明であり、深度は前後に±10 mm程度であった。一方、位相分布は、このマークの影響をほとんど受けていないことがわかる。このことは、反射率に大きなむらのある物体の測定において非常に有利となる。それぞれの波長での位相分布の差をFig.8に示す。予想されるように、ニュートン環と同じ分布になっている。しかし、詳細に観察すると、スペckルノイズが目立ち、CCD上の干渉縞の最小ピッチが画素ピッチより小さいときに生ずるエリアジングによる折り返しノイズも、画像の

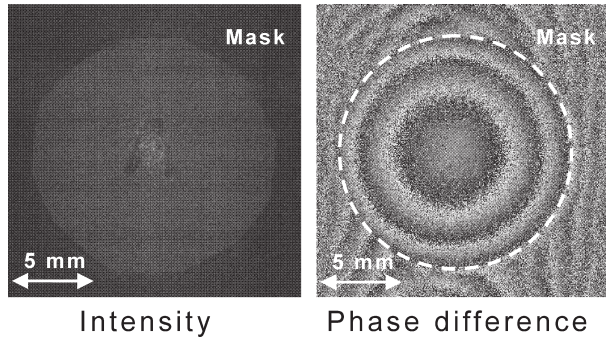


Fig. 9 Intensity and phase difference of the pingpong ball with a mask.

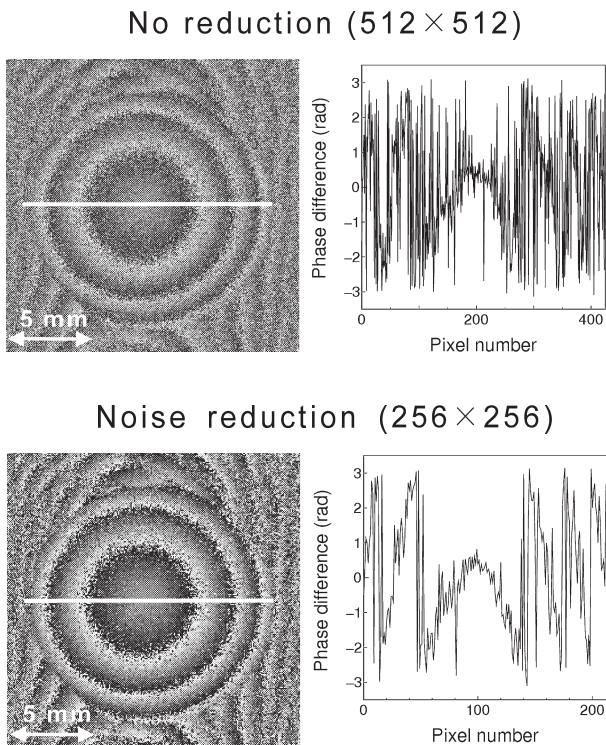


Fig. 10 Effect of noise reduction of the phase difference and cross-sections.

上下左右に現れており、位相接続を妨げることがわかる。

エリアジングをなくすため、物体に黒い紙製のマスクをつけて実験を行った。物体の大きさの制限は、CCDからの物体の見込み角を α として、 λ/α がCCDの1画素の大きさより大きくなるという条件で与えられる。この条件から、物体の許容サイズは約16 mmとなり、マスクは直径15 mmの大きさの円形のものとした。その再生像の強度と位相差をFig. 9に示す。マスクの存在する部分でできた縞はマスクの形状を示すものであり、マスクの内側の位相差分布にエリアジングは起こっていないことがわかる。

次に、スペックルノイズを抑制するために、次の方法を

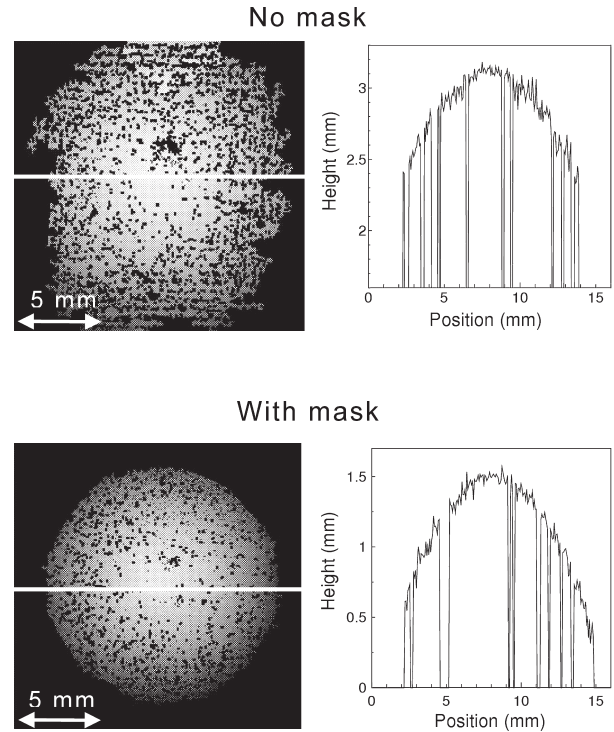


Fig. 11 Results from phase-unwrapping.

とった。すなわち、各波長での再生振幅の積の分布を求めて、振幅の積の値が隣接する4画素内の値が最大となる画素での位相差を選択する方法を用いた。これは、振幅が低いときの位相は信頼性が低いことを考慮した処理である。この処理の前後の位相差の分布をFig. 10に示す。また、実線で示した直径上での位相差の断面も同時に表示している。隣接する4画素を1画素に置き換えるため画素数が 512×512 のデータが 256×256 と少なくなるが、図から明らかなように、ノイズ低減効果は顕著である。

こうして、スペックルノイズを低減した位相差に位相接続を施した。ホログラムの撮影にマスクを付けていないものと付けたものについて、結果の画像と断面をFig. 11に示す。球の頂点を通るような断面をとり、その断面に球面を近似した二次式をフィッティングし、その係数から曲率半径を計算した。結果はマスクなしでは22.6 mm、マスク付きでは19.9 mmであった。実際のピンポン玉の半径は19.8 mmであり、マスク付きの結果とよく一致した。マスクなしでの誤差の原因は、スペックルノイズによる位相接続の誤差であると考えられる。また、球の頂点を通る同じ直線上での断面におけるフィッティング曲線との標準偏差を比較すると、マスクなしが約 $66 \mu\text{m}$ 、マスク付きは $45 \mu\text{m}$ であった。マスクなしの場合では、エリアジングの影響(Fig. 8の上下左右にみられる折り返し部分)によって誤差が生じている。

4. 考 察

以上の実験結果から、本方法が粗面の表面形状の測定に有効に利用できることがわかった。本方法では、半導体レーザーのモードホップを使って、表面を観察方向に垂直な基準面で切ったときの等高線を直接得ることができるので影は生じない。また、波長を固定して物体に変形を与える前後でホログラムを記録すれば、再生像の位相差から面外方向の変位分布を測定することができる¹³⁾。

本方法の特徴として、数値的な像再生を使うので、機械的な焦点調節を行わずに深い測定領域をカバーすることができる。また、位相差を直接求めるために、表面の反射率のむらを受けない。従来の形状測定では、表面に生じる干渉縞を利用するので、反射率のむらの影響が大きかった。しかし、本方法では、物体の各点からの光は CCD 上の全面に拡散されるため、低反射率の位置の情報もよりよく再生される。これらの特徴は、測定対象をよりさまざまなものに広げるのに有効であろう。

問題点は、参照光の位相シフトにより、記録時間が通常の軸外し型デジタルホログラフィーの3倍になることである。現在の3枚のホログラム記録時間は1秒弱であるが、高速デジタルカメラを使用して、0.03秒にすることは可能である。それにより、今後は生産現場などでの利用も期待できる。現在の最大の問題は、スペckルノイズの抑制である。これは、測定精度を理論限界である表面粗さの値(数 μm 程度)に向上させるためと、位相接続を円滑に行うために必須である。位相差分布の空間平均によりスペckルの影響を抑制できるが、位相が跳ぶ位置での断面が変形を受け、位相接続に影響する。より有効な抑制法が望まれている。

5. 結 論

レーザー光の波長をわずかに変化させて粗面を照射したときの反射光の位相変化を、位相シフトデジタルホログラフィーで数値的に求める方式の、表面形状測定法を開発した。この方法の最大の特徴は、垂直入射を使うために影の生じる心配がなく、基準面も観察方向に垂直となっていることである。波長変化は、温度安定化した半導体レーザーの注入電流の変化によるモードホップを利用した。1段のモードホップでは $0.51 \pm 0.004 \text{ nm}$ の波長変化が得られ、これにより $420 \pm 3.0 \mu\text{m}$ の等高線感度となった。この感度は、モードホップの段数を増すことによりさらに向上させることが可能である。ただし、本実験で用いたレーザー

で2段のモードホップを得るのは困難であった。こうして、安価な方法で波長シフトが実行できる。本法では、結像レンズのない簡単な光学系を使っているため、物体からの距離も高い空間分解能を要求しない限り大きくとれ、また物体の深度もレンズの焦点深度に制約されない。したがって、マイクロマシンのような微小で深い物体にも適用できる。

今後の実用化の鍵は、コンパクトな測定ヘッドを開発するとともに、スペckルノイズをより効果的に抑制したうえで、従来の測定結果との十分な比較を行うことにある。

実験を手伝ってくださった阿部博一君に感謝する。

文 献

- 1) 山口一郎, 山本明弘: “光を用いた3次元形状測定技術”, 塑性と加工, **40**, No. 460 (1999) 442-447.
- 2) F. Chen, G. M. Brown and M. Song: “Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods,” *Opt. Eng.*, **39** (2000) 10-22.
- 3) J. W. Goodman and R. W. Lawrence: “Digital image formation from electronically detected holograms,” *Appl. Phys. Lett.*, **11** (1967) 77-79.
- 4) U. Schnars and W. Juptner: “Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction,” *Appl. Opt.*, **33** (1994) 179-181.
- 5) I. Yamaguchi and T. Zhang: “Phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1268-1270.
- 6) I. Yamaguchi, J. Kato, S. Ohta and J. Mizuno: “Image formation in phase-shifting digital holography and applications to microscopy,” *Appl. Opt.*, **40** (2001) 6177-6186.
- 7) I. Yamaguchi, J. Kato and S. Ohta: “Surface shape measurement by phase-shifting digital holography,” *Opt. Rev.*, **8** (2001) 85-89.
- 8) I. Yamaguchi, S. Ohta and J. Kato: “Surface contouring by phase-shifting digital holography,” *Opt. Lasers Eng.*, **36** (2001) 417-428.
- 9) I. Yamaguchi, S. Yamashita and M. Yokota: “Surface shape measurement by dual-wavelength phase-shifting digital holography,” *Fringe 2005, Proc. of 5th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns*, eds. W. Osten and W. Juptner (2005) pp. 396-403.
- 10) I. Yamaguchi, T. Ida, M. Yokota and K. Yamashita: “Surface shape measurement by phase shifting digital holography with dual wavelengths,” *Appl. Opt.*, **45** (2006) 7610-7616.
- 11) B. P. Hildebrand and K. A. Haines: “Multiple-wavelength and multiple source holography applied to contour generations,” *J. Opt. Soc. Am.*, **57** (1967) 155-162.
- 12) M. Yonemura: “Wavelength-change characteristics of semiconductor lasers and their applications to holographic contouring,” *Opt. Lett.*, **10** (1985) 1-3.
- 13) I. Yamaguchi, J. Kato and H. Matsuzaki: “Measurement of surface shape and deformation by phase-shifting image digital holography,” *Opt. Eng.*, **42** (2003) 1267-1271.