

2 波長ワンショット干渉計測*

北川克一** 杉山 将*** 松坂拓哉*** 小川英光** 鈴木一嘉†

Two-Wavelength Single-Shot Interferometry

Katsuichi KITAGAWA, Masashi SUGIYAMA, Takuya MATSUZAKA, Hidemitsu OGAWA and Kazuyoshi SUZUKI

A new surface profiling technique is proposed, which enables us to measure a surface profile without losing high frequency components of sharp edges and with extended phase measurement range. It is accomplished by a newly developed two-wavelength imaging system and the local model fitting (LMF) algorithm for carrier fringe pattern analysis. The experimental results demonstrated that the proposed method can measure steep steps fast and accurately with an extended measurement range, while the robustness against vibration in the conventional single-shot methods is maintained.

Key words: interferometry, surface profiler, two-wavelength, single-shot

1. 結 言

近年、半導体や液晶など様々な産業分野において、ナノメートルオーダの表面凹凸形状を精度良く測定したいという要求が高まってきている。光干渉を用いた表面形状測定法は、速度や測定精度、保守性の観点から最も有望な計測手法である。

代表的な光干渉計測法である位相シフト法¹⁾では、干渉計の測定面と参照面の相対距離を変えながら複数枚の干渉画像を撮像し、その情報から表面形状を推定する。この方法では、複数の画像を撮像する必要があるため、振動などの外乱のある環境下では精度が大きく低下するという問題がある。この解決策として、一枚の画像から表面形状を求めるワンショット計測法が提案されている。それは、参照面を傾斜させてキャリア縞を生成させる方法であり、空間キャリア縞法^{2)~6)}と呼ばれている(図1)。この方法によって得られる1枚の干渉縞画像(図2)からフーリエ変換法³⁾や空間位相同期法^{4)~6)}により表面形状が求められる。しかし、これらの縞解析法は、測定対象面の凹凸周波数がキャリア縞の周波数より十分低いという前提のもとに導出されているため、高周波成分が鈍ってしまうという問題がある²⁾。

この問題を解決するために我々は、局所モデル適合法(Local Model Fitting 法; LMF 法)と名付けた縞画像解析アルゴリズムを提案し、簡単な実験結果を示した⁷⁾⁸⁾。そこで本論文では、まず LMF 法の概要を紹介する。つづいて実データによる精密な実験をおこない、この方法が実用に耐えるものであることを示す。

これらの結果を踏まえて、ダイナミックレンジをさらに拡大するシステムを提案する。そのために、一般に位相シフト法で用いられている2波長位相シフト法の考え方が、LMF法にそのまま適用できることを示し、2波長ワンショット測定法を提

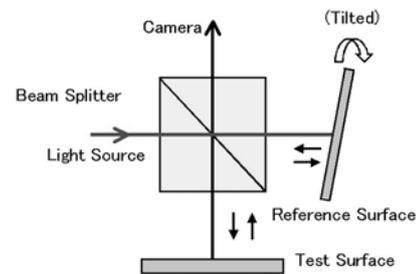


Fig. 1 Optics of spatial carrier interferometry



Fig. 2 Interferogram with carrier fringes

案する。つづいて、このアルゴリズムを実現するために開発した2波長撮像システムについて述べ、350nmの急峻な段差を持つ実試料の測定結果を示す。

2. 局所モデル適合法—LMF 法—

本章では、文献⁷⁾⁸⁾で提案した LMF 法の概要を述べる。

試料表面の点(x,y)に対応する干渉縞画像の輝度を $g(x,y)$ で表す。図1に示すように参照面を傾斜させると、 $g(x,y)$ は次式で表される。

$$g(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos(\phi(x,y) + 2\pi f_x x + 2\pi f_y y) \quad (1)$$

ここで、 $a(x,y)$ は干渉縞の直流成分であり、 $b(x,y)$ は振幅、 $\phi(x,y)$ は位相である。また、 f_x 、 f_y はそれぞれ x 方向、および y 方向のキャリア縞周波数である。

位相 $\phi(x,y)$ は表面高さの関数になっているので、表面形状を求める問題は $\phi(x,y)$ を求める問題になる。

LMF 法では、試料表面の注目点 (x_0, y_0) の近傍で $a(x,y)$ 、 $b(x,y)$ 、 $\phi(x,y)$ が一定であると仮定して、それぞれ a 、 b 、 ϕ で表す。この

* 原稿受付 平成 20 年 5 月 26 日

** 正会員 東レエンジニアリング (株) (滋賀県大津市大江 1-1-45)

*** 東京工業大学 大学院情報理工学研究所 (東京都目黒区大岡山 2-12-1)

† 東レエンジニアリング (株) (滋賀県大津市大江 1-1-45)

とき、式(1)は次のようになる。これを局所モデルと呼ぶ。

$$g(x, y) = a + b \cos(\phi + 2\pi f_x x + 2\pi f_y y) \quad (2)$$

測定対象面がほぼ平坦な場合は、上記の仮定に問題がない。一方、急峻な段差領域ではこの仮定が成立しないが、その影響は近傍領域に限定され、他の領域に伝搬することはない。

縞周波数 f_x, f_y は、参照面と試料面の相対的傾斜角度、および、波長や光学倍率により決まる大域の変数である。よって、画面内で一定であると仮定することができる。それぞれの推定値を \hat{f}_x, \hat{f}_y で表す。 \hat{f}_x, \hat{f}_y は画面内の縞数を数数することにより予め求めておくことができる。その結果、式(2)の未知変数は a, b, ϕ の3個になる。LMF法では、それぞれの推定値 $\hat{a}, \hat{b}, \hat{\phi}$ を3点以上の輝度データを用いて最小二乗法により決定する。すなわち、 n 個 ($n \geq 3$) の輝度データ $g(x_i, y_i)$ を式(2)の局所モデルに適合させて、次式で表される残差自乗和を最小にする $\hat{a}, \hat{b}, \hat{\phi}$ を求める。

$$J_1(a, b, \phi) = \sum_{i=1}^n [g(x_i, y_i) - a - b \cos(\phi + 2\pi \hat{f}_x x_i + 2\pi \hat{f}_y y_i)]^2 \quad (3)$$

標本点 (x_i, y_i) は注目点 (x_0, y_0) の近傍から選ぶのであるが、従来の縞解析法では、直線上に標本点をとるのが一般的であった。しかし、同じ点数のデータを使用する場合、直線上にとるよりも2次的に分布させた方が、標本点をより局在化させることができる。LMF法では、標本点を任意に選択できるので、次章以下の実験では、標本点領域を円形、あるいは矩形にとっている。

ところで、式(2)のモデルは変数 ϕ に関して非線形である。このため、上記の適合は非線形最小二乗問題となり、このまま解くと計算負荷が高くなる。そこで、以下の変数変換を行う。

$$\xi_c = b \cos \phi \quad (4)$$

$$\xi_s = b \sin \phi \quad (5)$$

また、表記を簡単にするために、

$$\phi_c(x, y) = \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y) \quad (6)$$

$$\phi_s(x, y) = -\sin(2\pi f_x x + 2\pi f_y y) \quad (7)$$

とおく。すると、式(2)は次式のような線形なモデルになる。

$$g(x, y) = a + \xi_c \phi_c(x, y) + \xi_s \phi_s(x, y) \quad (8)$$

この結果、 a, b, ϕ を求める問題は a, ξ_c, ξ_s を求める線形最小二乗問題になり、残差自乗和は次のようになる。

$$J_2(a, \xi_c, \xi_s) = \sum_{i=1}^n [g(x_i, y_i) - a - \xi_c \phi_c(x_i, y_i) - \xi_s \phi_s(x_i, y_i)]^2 \quad (9)$$

この問題の解 $\hat{a}, \hat{\xi}_c, \hat{\xi}_s$ は次の線形方程式によって解析的に求めることができる。

$$\mathbf{A} \begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{\xi}_c \\ \hat{\xi}_s \end{pmatrix} = \mathbf{g} \quad (10)$$

ここで、

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} n & \sum \phi_c(x_i, y_i) & \sum \phi_s(x_i, y_i) \\ \sum \phi_c(x_i, y_i) & \sum \phi_c(x_i, y_i)^2 & \sum \phi_s(x_i, y_i) \phi_c(x_i, y_i) \\ \sum \phi_s(x_i, y_i) & \sum \phi_s(x_i, y_i) \phi_c(x_i, y_i) & \sum \phi_s(x_i, y_i)^2 \end{pmatrix}$$

(11)

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} \sum g(x_i, y_i) \\ \sum g(x_i, y_i) \phi_c(x_i, y_i) \\ \sum g(x_i, y_i) \phi_s(x_i, y_i) \end{pmatrix} \quad (12)$$

である。こうして得られた $\hat{\xi}_c, \hat{\xi}_s$ から、位相 $\hat{\phi}$ は次式により求められる。

$$\hat{\phi} = \arctan(\hat{\xi}_s / \hat{\xi}_c) \quad (13)$$

ここで、 \arctan の値域は $-\pi/2 \sim \pi/2$ であるが、 \arctan の中の分母と分子の正負符号を利用することにより、 $-\pi \sim \pi$ に拡張することができる。

式(13)により得られた $\hat{\phi}$ から、高さ h は次式により求められる。

$$h = (\hat{\phi} / 2\pi + m) \cdot (\lambda / 2) \quad (14)$$

ここで、 m は整数であり、隣接画素間の位相差が π 以下であるという前提のもとで、位相接続により決定される。すなわち、隣接画素間の高さの差が $\pm \lambda/4$ 以下ならば、位相から正しい高さを求めることができる。この有効範囲をさらに広くする方法については、4章で述べる。

3. LMF法による測定実験

3.1 実験方法

本節では、実試料を用いて LMF 法の性能を評価する。干渉画像の取得には、市販の光干渉式表面形状測定装置（東レエンジニアリング製 SP-500）を用いた。測定対象は公称値 $67.7 \pm 1.2 \text{nm}$ の標準段差であり、急峻な段差を持っている。光学系は図1に示すマイケルソン干渉計で、照明部には中心波長 603nm 、帯域幅 10nm の干渉フィルタを挿入した。干渉画像はモノクロカメラで撮像し、 512×480 画素のデジタルデータに変換した。

LMF 法のための標本点は、各点を中心とする半径 r の円形領域内に含まれる格子点とした。この場合、標本点の数 n は、約 πr^2 となる。

LMF 法の推定精度は、局所領域の半径 r の選び方に依存する。 r が小さすぎると、パラメータの推定に用いるデータが少なくなるため、雑音の影響を受けやすい。一方、 r が大きすぎると、推定結果が滑らかになり過ぎるため、急峻な段差をもつ表面形状を正しく測定することができない。一般に、滑らかにし過ぎた形状をもとの急峻な形状に戻すことは困難であるが、急峻な形状を維持しつつ雑音を除去することは可能である。そこで、半径 $r/6$ 画素（標本点数 $n=115$ ）と比較的小さめに設定した。また、得られた結果に対して半径 8 画素の円形領域メディアンフィルタを適用することにより、雑音を除去した。

3.2 実験結果

撮像された縞画像を図3に示し、LMF法による測定結果を図4に示す。エッジ部が急峻な形状として測定され、ノイズも抑制されている。

さらに、LMF法、空間位相同期法⁶⁾、位相シフト法（5ステップ法）⁹⁾による測定結果の断面図を図5に示す。位相シフト法、空間位相同期法の結果には、LMF法と同じメディアンフィルタを適用した。図5より、LMF法が位相シフト法と同様に、エッジをよく保存していることがわかる。また、図5の左上の数値は、段差を10回繰り返し測定した結果を示している。上が平均値、()内が標準偏差 (σ) である。LMF法がワンショット

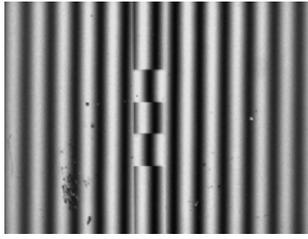


Fig. 3 Interferogram of 67nm step height

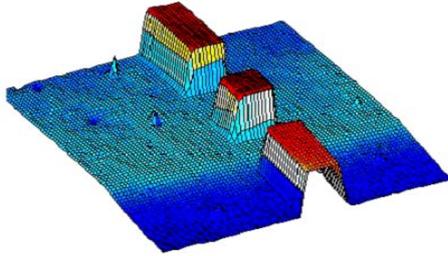


Fig.4 Surface profile obtained by LMF

法であるにもかかわらず、位相シフト法に近い測定精度を持ち、

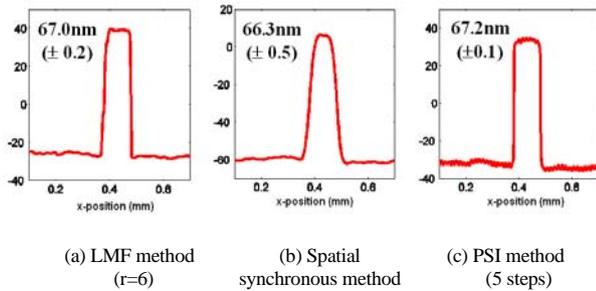


Fig.5 Surface profiles by three methods. The measured step height (average) is shown with its repeatability (σ) in the upper-left corner for each method

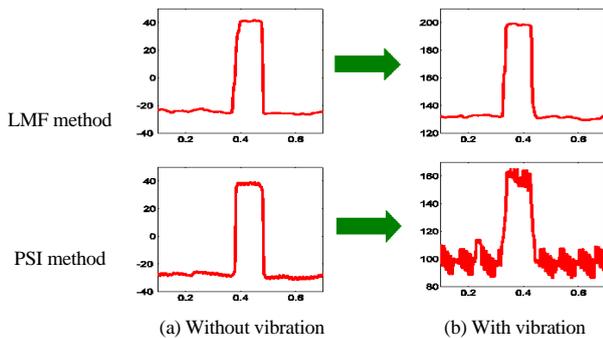


Fig. 6 Effects of vibration

空間位相同期法よりも高精度であることが分かった。

次に、ワンショット法の重要な利点である耐振動性の確認実験を行った。振動がない場合と微振動を付与した場合の LMF 法と位相シフト法の測定結果の比較を図 6 に示す。カメラのシャッター速度は 1/1000 sec に設定した。ワンショット法の優位性が明らかである。

4. 2 波長ワンショット法

4.1 アルゴリズム

2 章で述べたように、LMF 法によって正しい高さを求めることができるのは、隣接画素間の高さの差が $\pm \lambda/4$ 以下の場合で

あり、これ以上の不連続な段差のある対象には適用できない。この問題は位相シフト法と共通であり、その解決法として、2 波長位相シフト干渉法が提案されている¹⁰⁾。この考え方は LMF 法に対してもそのまま適用できる。たとえば、「等価波長法」¹⁰⁾によれば、2 つの波長 λ_1, λ_2 ($\lambda_2 > \lambda_1$) で測定した位相 ϕ_1, ϕ_2 から、

$$\lambda_{eq} = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (15)$$

によって定義される等価波長 λ_{eq} を使って、高さ h は

$$h = \{(\phi_1 - \phi_2) / 2\pi + m\} \cdot (\lambda_{eq} / 2) \quad (16)$$

により求めることができる。ここで、 m は未知の整数である。

通常の可視光領域内で 2 波長を選択すると、 $2\lambda_1 > \lambda_2$ となるので、 $\lambda_{eq} > \lambda_2$ が成立する。よって、この方法により段差の最大許容値は $\lambda_2/4$ から $\lambda_{eq}/4$ に拡大されることになる。

この方法は単純であるが、レンジと同時に位相誤差も λ_{eq}/λ_2 倍に拡大される。この問題を避けるため、等価波長法により得られた高さを第 1 波長 λ_1 の次数 m_1 の決定にのみ利用する「次数決定法」¹⁰⁾が提案されている。 m_1 は

$$m_1 = \text{Round}[(\lambda_1 \phi_1 - \lambda_2 \phi_2) / 2\pi(\lambda_2 - \lambda_1)] \quad (17)$$

で与えられる。ここで、‘Round’は四捨五入法による整数化演算を意味する。

得られた m_1 から、高さ h は次式により求められる。

$$h = (\phi_1 / 2\pi + m_1) \cdot (\lambda_1 / 2) \quad (18)$$

4.2 2 波長撮像システム

2 波長法をワンショット計測に適用した例として、Schmidt の報告¹¹⁾がある。しかし、その撮像系は多くの 2 波長位相シフト法と同様、照明系に挿入した干渉フィルタを逐次切り換えて 2 回撮像するものであり、厳密な意味のワンショット計測ではない。厳密なワンショット計測を行うためには、異なる波長の干渉縞画像を同時に撮像する必要がある。この撮像システムの実現には、以下の二つの方法が考えられる。

(1) 2 波長光混合照明による方法：狭帯域の 2 波長光を混合して干渉系に入射する。撮像系は粗い波長選択性を持つだけでよい。Pfortner ら¹²⁾は、光源に 3 台のレーザを使用し、3 板式カラーカメラにより 3 波長位相シフト法を実現しているが、光学系の詳細は報告されていない。

(2) 波長分離撮像系による方法：白色光源による干渉画像を、干渉フィルタや分光器により波長分離して撮像する。波長の選択に柔軟性があるが、光学系が複雑であり、安価な実現は困難と予想される。

筆者らは、市販の 3 色 LED 照明装置（メーカー：CCS、型式：HLV-3M-RGB-3W）（図 7）とカラーカメラによる安価で小型のワンショット用 2 波長撮像システムを開発した¹³⁾。使用した照明光源の仕様を表 1 に示す。光のコヒーレント長は、ほぼ (中心波長)²/帯域幅に等しいので、今回使用する赤(R)と青(B)の LED 光のコヒーレント長は約 9~20 μm となる。よって、参照面と試料面の相対的傾斜角度を過大にしない限り、撮像面の全面に干渉縞が得られる。

使用したカラーカメラ（メーカー：Bastler、型式：sca640-70gc）の分光感度特性と、R,B の LED の中心波長を図 8 に示す。この 2 個の LED を点灯して、カラーカメラで撮像すると、カメラの B フレームから 470nm の画像、R フレームから 627nm の画像が得られ、クロストークは 1% 以下で無視できる。この場合の等

価波長は式(15)により 1877 nm となり、隣接画素間の段差が 469nm まで許容される。

4.3 実験結果

提案手法の検証実験のために、3.1 節と同じ表面形状測定装置（東レエンジニアリング製 SP-500）（図 9）の照明・撮像系を 2 波長撮像システムに交換し、LMF 法による 2 波長計測ソフトを搭載した。

レンジ拡大機能を確認するために、公称段差 350nm のパターンを持つ石英試料を測定した。

図 10 は提案撮像系で得られたカラー画像であり、図 11 と図 12 は色分離により得られた B 成分画像、R 成分画像である。左下約 1/4 の矩形領域がパターン凹部である。



Fig. 7 RGB LED illuminator

Table 1 Specifications of the illuminator

| Color | Wavelength nm | Bandwidth nm |
|-------|---------------|--------------|
| R | 627 | 20 |
| G | 530 | 35 |
| B | 470 | 25 |

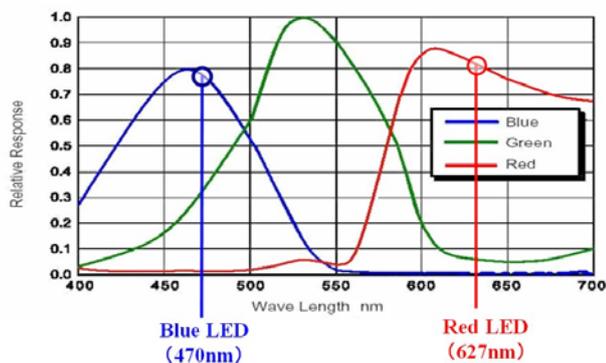


Fig. 9 Surface profiler used for experiments

Fig. 8 Spectral curves of LEDs and color camera

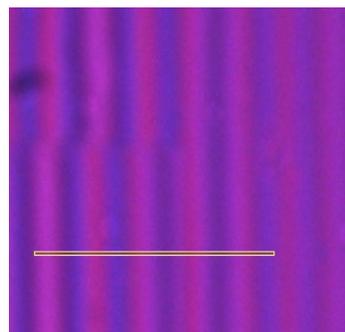


Fig. 10 Captured color image with the profile-analyzed line

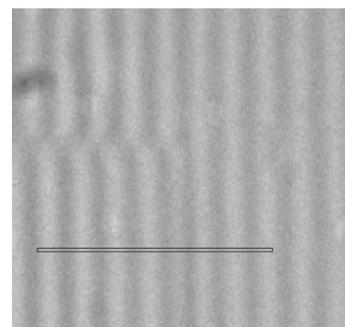


Fig. 11 Extracted image of B component

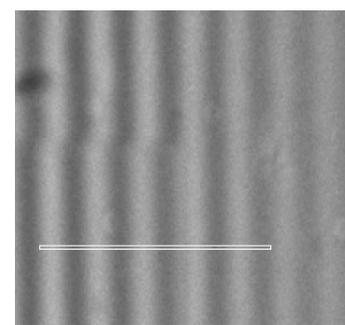


Fig. 12 Extracted image of R component

最初に、図 10～図 12 に横線で示した領域の測定結果を示す。図 13 は B 成分、R 成分の輝度断面図である。このデータに LMF 法を適用することにより、図 14 に示す二つの位相断面図 ϕ_1 , ϕ_2 を得る。モデルの当てはめに用いたデータ点数は水平方向に 25 点であり、周波数 f_x は画面内の縞本数を目視で数えて推定した。

まず、R 信号の位相 ϕ_2 のみを用いて 1 波長高さ計測を行った結果を図 15 に示す。段差値は 44nm となった。これは公称値 350nm から $\lambda_2/2 (=314\text{nm})$ を減算して得られる「端数高さ」36nm に近い値である。

次に、2 波長高さ計測を行った。位相接続された 2 個のデータ ϕ_1 , ϕ_2 から、式(16),(18)を用いて高さ h を求めた。式(16)の等価波長法による高さ $h(\text{eq})$ と、式(18)の次数決定法による高さ $h(\text{order})$ を図 16 に示す。両者とも 350nm の段差を正しく測定しているが、予想通り、後者の方が雑音が少ない。

表 2 は、式(18)の 2 波長ワンショット法、 ϕ_2 だけを用いた 1 波長ワンショット法、および白色干渉法¹⁴⁾による段差測定値を比較したものである。提案した 2 波長ワンショット法が測定レンジを拡大していることがわかる。

最後に、図 10 の画像を使用して、3 次元形状を一括測定する

実験を行った。近傍データ数を、水平 25 画素、垂直 5 画素、計 125 個とし、式(18)の次数決定法を用いた。結果を図 17 に示す。この結果は白色干渉法の結果 (図 18) とよく一致している。なお、512×480 点の高さ計算に要した時間は、市販 PC (cpu: Intel Pentium 1.6GHz)を使用して、1.31sec であった。

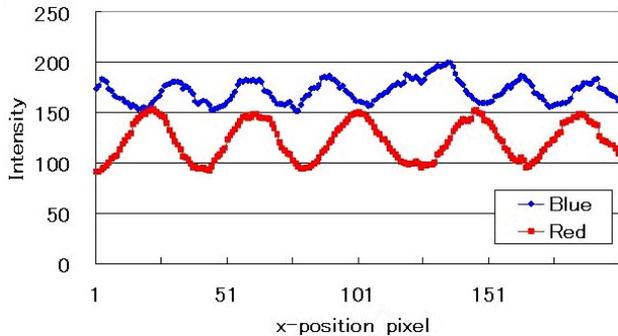


Fig. 13 Intensity profiles of the B and R fringes along the horizontal line indicated in Fig. 10-12

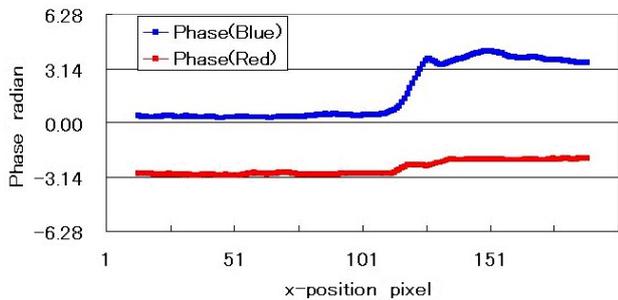


Fig. 14 Phase profiles of the B and R fringes

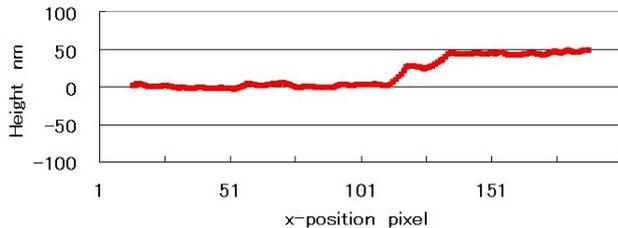


Fig. 15 Surface profile by one-wavelength single-shot method

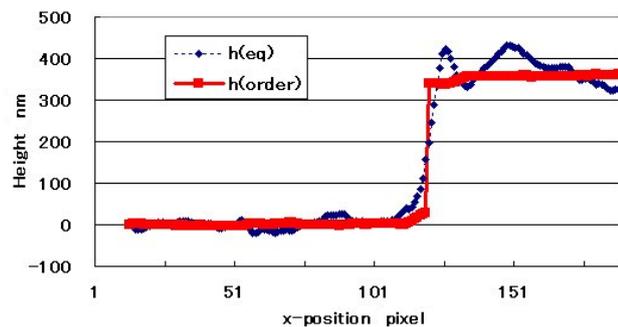


Fig. 16 Surface profiles by two-wavelength single-shot method

Table 2 Comparison of measured step heights

| Method | Step-height nm |
|---|----------------|
| One-wavelength single-shot interferometry | 44 |
| Two-wavelength single-shot interferometry | 357 |
| White-light interferometry | 371 |

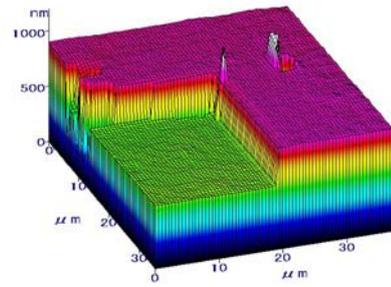


Fig. 17 3D surface profile by two-wavelength single-shot method

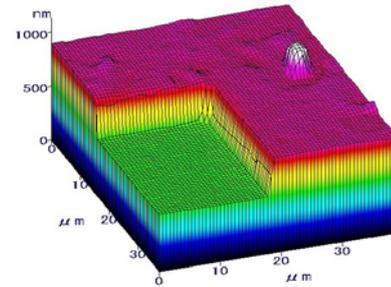


Fig. 18 Surface profile by white-light interferometry

5. 結 言

本論文では、新しい干渉計測法として、2 波長ワンショット法を提案した。この方法は、市販 LED 照明とカラーカメラにより構成される安価で小型の 2 波長同時撮像システムと、局所モデル適合法 (LMF 法) と名付けた縞画像解析アルゴリズムを組み合わせたものである。測定レンジが広く、高周波成分の鈍りが少なく、振動の影響を受けないという特徴がある。350nm の急峻な段差をもつ実試料表面形状が正しく測定できることを確認した。

参 考 文 献

- 1) J. H. Brunning et al.: Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses, *Appl. Opt.*, **13**, (1974) 2693.
- 2) J. Kato: Real-time fringe analysis for interferometry and its applications, *J. Jpn. Soc. Precis. Eng.*, **64**, (1998) 1289 (in Japanese).
- 3) M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi: Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry, *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, (1982) 156.
- 4) S. Toyooka and M. Tominaga: Spatial fringe scanning for optical phase measurement, *Opt. Commun.*, **51**, (1984) 68.
- 5) K. H. Womack: Interferometric phase measurement using spatial synchronous detection, *Opt. Eng.*, **23**, (1984) 391.
- 6) J. Kato et al.: Video-rate fringe analyzer based on phase-shifting electronic moire patterns, *Appl. Opt.*, **36**, (1997) 8403.
- 7) M. Sugiyama, H. Ogawa, K. Kitagawa and K. Suzuki: Single-shot surface profiling by local model fitting, *Appl. Opt.*, **45**, (2006) 7999.
- 8) M. Sugiyama, T. Matsuzaka, H. Ogawa, K. Kitagawa and K. Suzuki: One-shot profiling of sharp bumpy surfaces, *JSPE Spring Meeting*, (2007) 585 (in Japanese).
- 9) P. Hariharan, B. F. Oreb, and T. Eiju: Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm, *Appl. Opt.*, **26**, (1987) 2504.
- 10) Y.-Y. Cheng and J.C. Wyant: Two-wavelength phase shifting interferometry, *Appl. Opt.*, **23**, (1984) 4539.
- 11) J. Schmidt: Two-wavelength interferometry combined with N-point technique, *Proc. SPIE*, **3744**, (1999) 200.
- 12) A. Pfortner and J. Schwider: Red-green-blue interferometer for the metrology of discontinuous structures, *Appl. Opt.*, **42**, (2003) 667.
- 13) K. Kitagawa, M. Sugiyama, T. Matsuzaka, H. Ogawa and K. Suzuki: Two-wavelength single-shot interferometry, *Proc. of SICE Annual Conference*, (2007) 724.
- 14) N. Balsubramanian: U.S. Pat., 4340306, (1982).