

2波長ワンショット干渉計測

東レエンジニアリング(株)

東京工業大学

北川 克一・小川 英光・鈴木 一嘉／杉山 将・松坂 拓哉

急峻な形状変化にも対応し、測定レンジも広い新しいワンショット表面形状測定法を提案する。本手法は、干渉光学系の参照面を傾斜させてキャリア縞を導入し、得られた縞画像に、局所的にモデル関数をフィッティングすることにより位相情報を求め、高さに換算する。さらに、測定レンジを拡大するために、2個のLEDとカラーカメラとから構成される2波長同時撮像システムを組み合わせて、2波長ワンショット計測装置を実現した。急峻な段差を含む表面形状を正確に測定可能で、かつ、振動の影響を受けないことを確認した。

はじめに

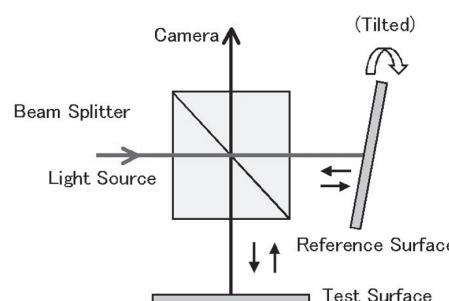
近年、半導体や液晶など様々な産業分野において、ナノメートルオーダーの表面凹凸形状を精度良く測定したいというニーズが高まっている。光干渉を用いた表面形状測定法は、速度や測定精度、保守性の観点から最も有望な計測手法である。

代表的な光干渉計測法である位相シフト法では、干渉顕微鏡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。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点があった。この問題の解決策として、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。その代表例が、参照面を傾斜させてキャリア縞を導入する空間キャリア縞法である（第1図）。これで得られる1枚の干渉縞画像（第2図）からフーリエ変換法¹⁾や空間位相同期法^{2), 3)}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縞の周波数より十分低いという仮定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った。

本稿では、新しい縞画像解析アルゴ

リズムである局所モデル適合法と、ワンショット法のために開発した2波長撮像システムを提案する。また、これらを組み合わせた2波長ワンショット測定法の実験結果を示す。



第1図 空間キャリア縞法の光学系



第2図 干渉縞画像

局所モデル適合法 —LMFアルゴリズム—

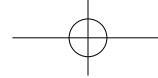
一般的表現

第1図に示すように参照面を傾斜させると、得られる輝度 $g(x,y)$ は次式で表される。

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

ここで、 $a(x,y)$ は直流成分、 $b(x,y)$ は干渉振幅である。位相 $\phi(x,y)$ が表面高さに依存する。 f_x, f_y はそれぞれ x 方向、 y 方向のキャリア縞周波数である。

局所モデル適合法 (Local Model Fitting法；以下、LMF法と呼ぶ)^{4), 5)}では、試料表面のある点 (x_0, y_0) の近傍で $a(x,y)$, $b(x,y)$, $\phi(x,y)$ が一定と仮定して、



モデルを次式で定義する。

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

測定対象面が平坦な場合は、上記の仮定に問題が無い。一方、急峻な段差領域では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、波長、光学倍率により決まる大域的変数で、画面内で一定と仮定できる。それぞれの推定値 \hat{f}_x, \hat{f}_y が画面内の縞数カウントなどにより得られているとすると、未知変数は a, b, ϕ の 3 個になり、点 (x_0, y_0) の近傍の n 点 ($n >= 3$) の輝度データを用いて、最小自乗法により決定することができる。すなわち、

$$\begin{aligned} (\hat{a}, \hat{b}, \hat{\phi}) = \operatorname{argmin}_{(a, b, \phi)} \sum_{i=1}^n [g(x_i, y_i) - a \\ - b \cos(\phi + 2\pi f_x x_i + 2\pi f_y y_i)]^2. \end{aligned} \quad \dots(3)$$

この式は ϕ に関して非線形であり、計算負荷が高い。そこで、以下の変数変換を行う。

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

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

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

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

この結果、最小自乗問題は次式のようになる。

$$\begin{aligned} (\hat{a}, \hat{\xi}_c, \hat{\xi}_s) = \operatorname{argmin}_{(a, \xi_c, \xi_s)} \sum_{i=1}^n [g(x_i, y_i) - a \\ - \xi_c \varphi_c(x_i, y_i) - \xi_s \varphi_s(x_i, y_i)]^2. \end{aligned} \quad \dots(8)$$

この式は a, ξ_c, ξ_s に関して線形であり、解 $\hat{a}, \hat{\xi}_c, \hat{\xi}_s$ は次の三元連立方程式を解いて得られる。

$$A \begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{\xi}_c \\ \hat{\xi}_s \end{pmatrix} = g, \quad \dots(9)$$

$$A = \begin{pmatrix} n & \sum \varphi_c(x_i, y_i) \\ \sum \varphi_c(x_i, y_i) & \sum \varphi_c(x_i, y_i)^2 \\ \sum \varphi_s(x_i, y_i) & \sum \varphi_s(x_i, y_i) \varphi_c(x_i, y_i) \\ \sum \varphi_s(x_i, y_i) & \sum \varphi_s(x_i, y_i) \varphi_c(x_i, y_i) \\ \sum \varphi_s(x_i, y_i)^2 \end{pmatrix}, \quad \dots(10)$$

$$g = \begin{pmatrix} \sum g(x_i, y_i) \\ \sum g(x_i, y_i) \varphi_c(x_i, y_i) \\ \sum g(x_i, y_i) \varphi_s(x_i, y_i) \end{pmatrix}. \quad \dots(11)$$

ここで、

得られた $\hat{\xi}_c$ と $\hat{\xi}_s$ から、点 (x_0, y_0) の位相 $\hat{\phi}$ は次式により得られる。

$$\hat{\phi}(x_0, y_0) = \arctan(\hat{\xi}_s / \hat{\xi}_c) + 2m\pi \quad \dots(12)$$

ここで、 m は未知の整数であり、隣接画素間の位相差が π 以下との前提で位相アンラッピングにより決定される。

特別な場合

測定対象面がほぼ平坦な場合には、直流成分 a を複数の縞が含まれる領域の平均輝度から推定することができ、未知変数は b, ϕ の 2 個になる。この場合、計算式はより単純になり、特に、 $n = 2$ の場合には、縞が x 方向にのみ存在するとして、以下のように単純になる。すなわち、2 個の輝度データ $g(x)$, $g(x + \Delta x)$ から、位相 $\hat{\phi}(x + \Delta x/2)$ は次式により得られる。

$$\hat{\phi}(x + \Delta x/2) = \arctan(\hat{\xi}_s / \hat{\xi}_c) + 2m\pi \quad \dots(13)$$

ここで、

$$\hat{\xi}_c = G(x) \varphi_c(x + \Delta x) - G(x + \Delta x) \varphi_c(x) \quad \dots(14)$$

$$\hat{\xi}_s = G(x) \varphi_s(x + \Delta x) - G(x + \Delta x) \varphi_s(x) \quad \dots(15)$$

$$G(x) = g(x) - a \quad \dots(16)$$

$$G(x + \Delta x) = g(x + \Delta x) - a \quad \dots(17)$$



1 波長ワンショット法

実験方法

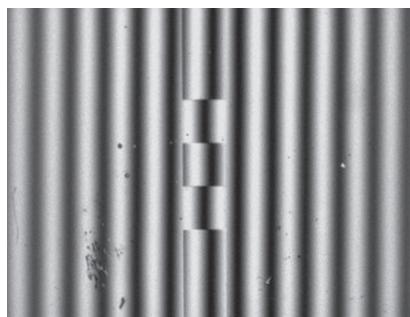
本節では、実試料の干渉画像を撮像し、LMF 法により解析するとともに、従来法の測定結果と比較する。干渉画像の取得には、東レエンジニアリング製の光干渉式表面形状測定装置 SP-500 を用いた。測定対象は公称値 $67.7 \pm 1.2\text{nm}$ の標準段差であり、急峻な段差を持っている。光学系は第 1 図に示すマイケルソン干渉計で、照明部には中心波長 603nm 、帯域幅 10nm の干渉フィルタを挿入した。干渉画像はモノクロカメラで撮像され、 512×480 画素のデジタルデータに変換される。画像の縞解析計算は MATLAB に依った。

LMF 法に使用する近傍データは、各点を中心とする半径 r の円内とした。従来の縞解析法ではライン上のデータを使用するのが一般的であるが、LMF 法では任意のデータを使用できる。同じ点数のデータを使用する場合、データ領域をライン状にするよりも円状にした方が局所性が高く、良い結果が得られた。

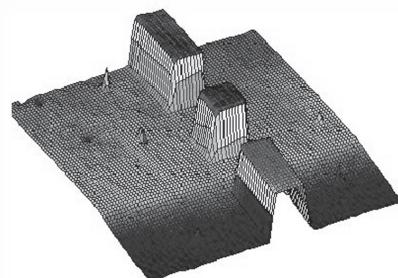
LMF 法の推定精度は、局所領域の半径 r の選び方に依存する。 r が小さすぎると、パラメータの推定に用いるデータが少なくなるため、雑音の影響を受けやすい。一方、 r が大きすぎると、推定結果が滑らかになり過ぎるため、急峻な段差をもつ表面形状を正しく測定することができない。一般に、滑らかにし過ぎた形状をもとの急峻な形状に戻すことは困難であるが、急峻な形状を維持しつつ雑音を除去することは可能である。そこで、 r を比較的小さめに設定して測定を行い、得られた結果に対してメディアンフィルタを適用することにより、雑音を除去することにした。

実験結果

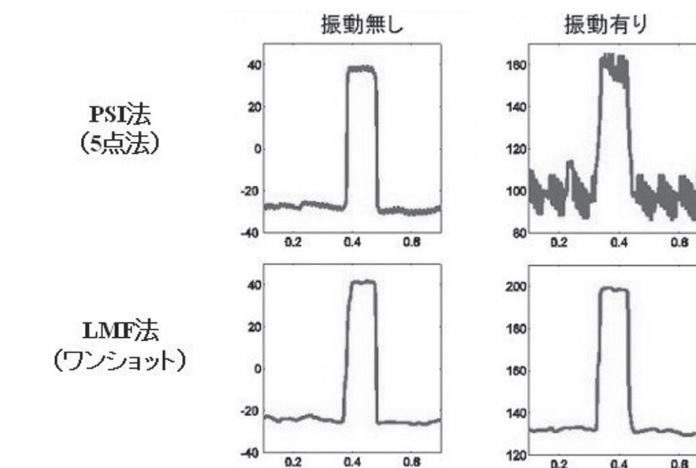
撮像された縞画像を第3図に示す。LMF法の近傍データパラメータ r を6とし、得られた結果に半径8の円形領域メディアンフィルタを適用した結果を第4図に示す。エッジ部が急峻な形状として測定され、ノイズも抑制され



第3図 67nm段差のワンショット画像



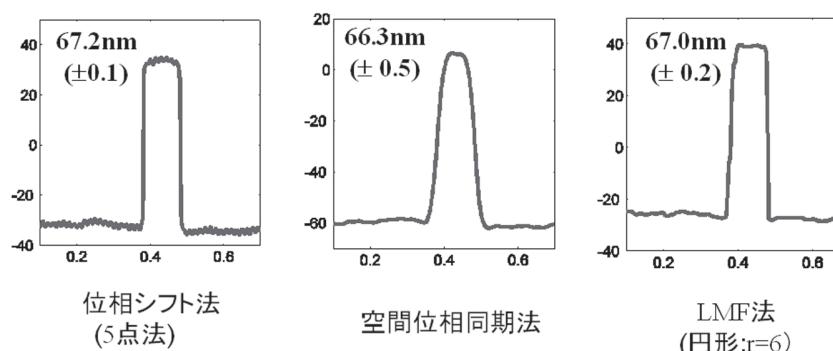
第4図 LMF法による67nm段差の測定結果



第6図 振動の影響

ている。

さらに、位相シフト法、空間位同期期法、LMF法の3方法の測定結果（1ラインのプロファイル）を第5図に示す。位相シフト法の結果には、提案法と同じメディアンフィルタを適用した。エッジが鈍らないというLMF法の特徴が顕れている。また、第5図の左上の数値は、10回の繰り返し測定の結果を示していく、上が平均値、（）内が標準偏差（ σ ）である。LMF法がワンショット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、空間位同期期法よりも高精度であることが分かった。



第5図 他の方法との比較

振動の影響

ワンショット法の重要な利点は、耐振動性である。微振動を付与した場合の位相シフト法とLMF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。

2波長ワンショット法

アルゴリズム

前節で述べたように、空間キャリア法では隣接画素間の位相差が π を超えると正確な測定ができない。この問題は、位相シフト法でも共通であり、解決法として2波長干渉法が良く知られている⁶⁾。2つの波長 λ_1 , λ_2 で測定した位相 ϕ_1 と ϕ_2 から高さを求める。最も簡単な方法は「等価波長法」であり、以下の式により高さ H を得る。

$$H = (\Phi / 2\pi + N) * (\lambda_{eq}/2), \quad \dots(18)$$

ここで、 N は整数であり、等価波長 λ_{eq} と、その位相 Φ は次式で表される。



第7図 RGB LED 照明装置

第1表 照明装置の仕様

Color	中心波長 (mm)	帯域幅 (mm)
R	627	20
G	530	35
B	470	25

$$\Phi = \phi_1 - \phi_2, \quad \dots (19)$$

$$\lambda_{eq} = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1). \quad \dots (20)$$

この方法により、段差の最大許容値は $\lambda_1/4$ から $\lambda_{eq}/4$ に拡大できたことになる。

この方法は単純であるが、レンジの拡大と同時に位相誤差も λ_{eq}/λ_1 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波長の次数 N_1 の決定にのみ利用する「次数決定法」が提案されている。すなわち

$$N_1 = \text{Round} [\lambda_1 \phi_1 - \lambda_2 \phi_2] / 2\pi(\lambda_2 - \lambda_1), \quad \dots (21)$$

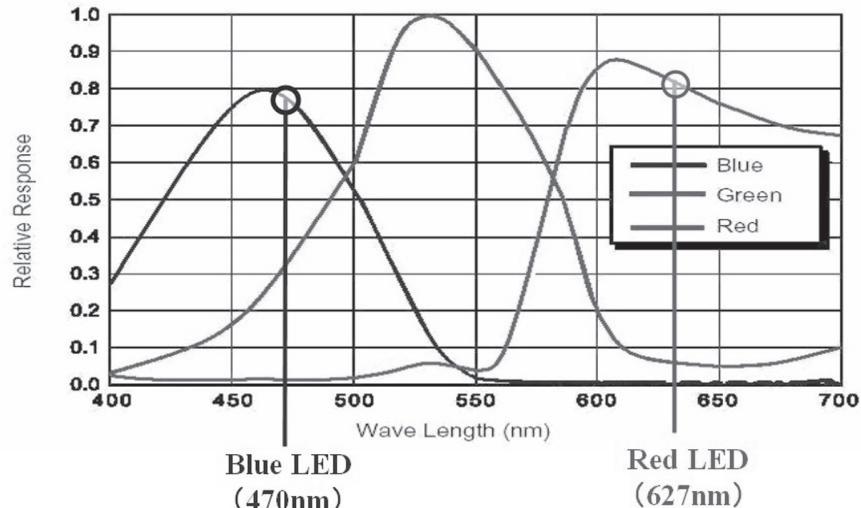
ここで、「Round」は四捨五入法による整数を意味する。

高さ H は次式で求められる。

$$H = (\phi_1 / 2\pi + N_1) * (\lambda_1 / 2). \quad \dots (22)$$

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するには、異なる波長での干渉縞画像を同時に撮像する必要がある。これまで、安価でコンパクトな撮像系は得ら

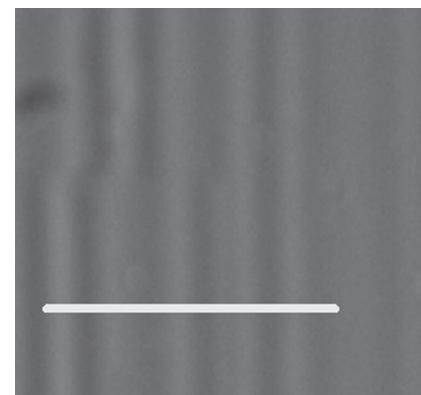


第8図 カラーカメラの分光感度とLEDの中心波長



第9図 実験装置

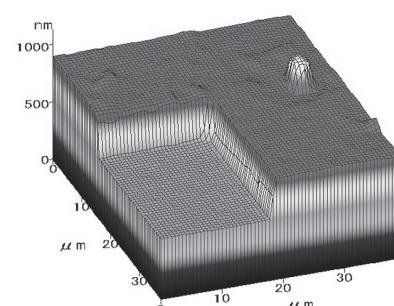
れていない。筆者らは市販の3色LED照明装置（第7図）とカラーカメラによるワンショット用2波長撮像システム



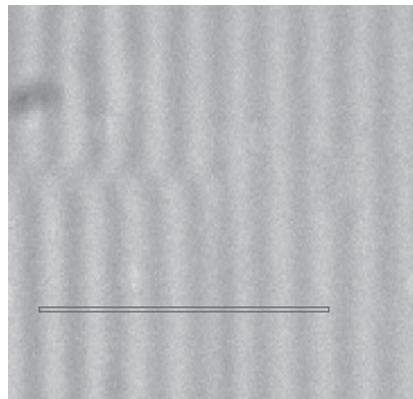
第11図 2波長ワンショット画像
(オリジナルはカラー画像；白線はプロファイル解析部)

ムを開発した⁷⁾。照明装置の仕様を第1表に示す。R,Bの帯域幅20~25nmは、コヒーレント長が約10~20 μmであることを意味し、実験目的には十分である。

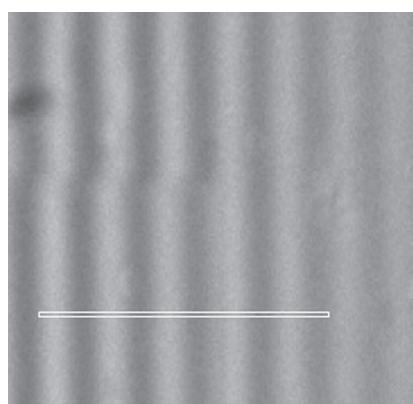
第8図は、カラーカメラの分光感度特性と、2個のLEDの中心波長を示す。この2個のLEDを点灯して、カラーカメラで撮像すると、カメラのBフレームから470nmの画像、Rフレームから627nmの画像が得られる。この場合の等価波長は 1877nm となる。これは、



第10図 従来法による測定結果



第12図 抽出されたB成分画像



第13図 抽出されたR成分画像

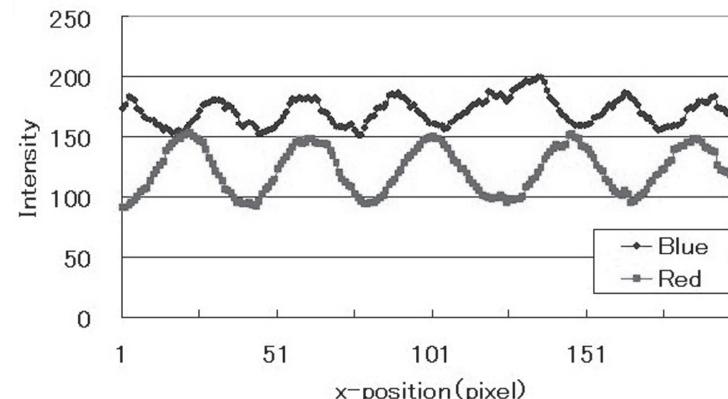
隣接画素間の段差が469nmまで許容されることを意味している。

実験結果

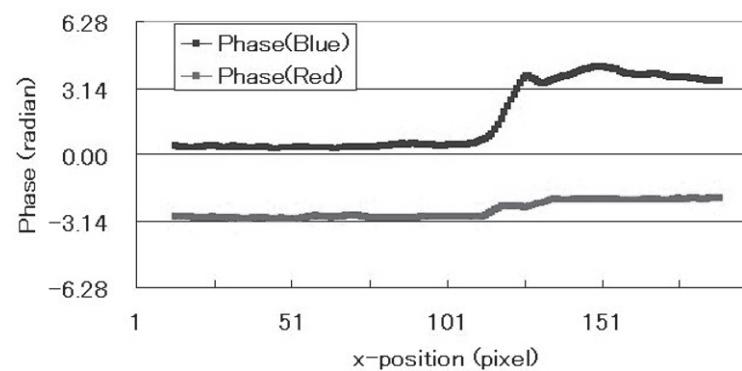
提案手法の検証実験のために、東レエンジニアリング（株）製 表面形状測定装置SP-500⁸⁾（第9図）の照明・撮像系を2波長撮像システムに交換し、LMF法ソフトと2波長計測ソフトを搭載した。

レンジ拡大機能の確認のため、公称段差350nmのパターンを持つ石英試料を測定対象とした。従来法の白色干涉法で測定した結果を第10図に示す。

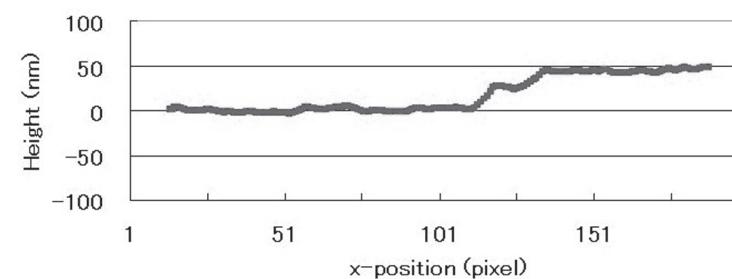
第11図は提案撮像系で得られたカラー画像であり、色分離により得られ



第14図 プロファイル解析個所の輝度プロファイル



第15図 位相プロファイル



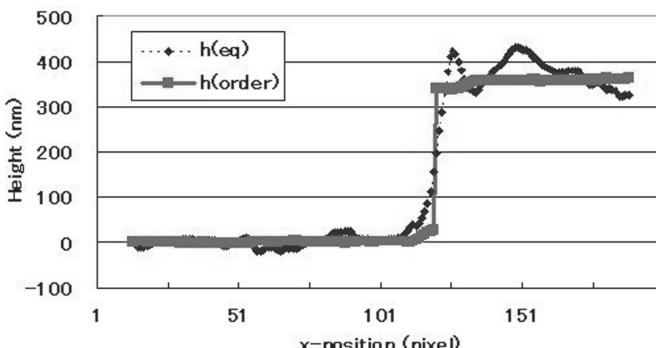
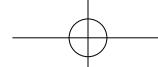
第16図 1波長ワンショットによる表面プロファイル

たB成分画像、R成分画像を第12図と第13図に示す。

最初に、第11図～第13図に示したプロファイル解析部の測定結果を示す。B成分、R成分の輝度プロファイルを第14図に示す。これから、LMF

法により第15図に示す二つの位相プロファイルが得られる。フィッティングに用いたデータ点数は25点（水平）であり、周波数は画面内の縞本数を目視でカウントして推定した。

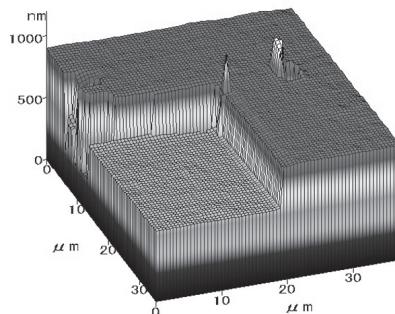
先ず、R信号の位相のみを用いて1



第17図 2波長ワンショットによる表面プロファイル

第2表 段差測定値の比較

方法	測定値 (nm)
白色干渉法	371
1波長ワンショット法	44
2波長ワンショット法	357



第18図 2波長ワンショット計測法による350nm段差計測結果

波長高さ計測を行った結果を第16図に示す。段差値は44nmとなり、これは公称値350nmから $\lambda/2$ (=314nm)を減算して得られる「端数高さ」36nmに近い数値である。

次に、2波長高さ計測を行った。二つのアンラップされた位相データから、前節の式(18)と式(22)を用いて、高さを計算した。等価波長法による高さ h_{eq} と、次数決定法による高さ h_{order} を第17図に示す。予

想通り、後者の方がノイズが少なく、350nmの段差を正しく測定できている。

第2表は、三つの方法による段差測定値を比較している。提案の2波長ワンショット法が測定レンジを拡大している。

最後に、三次元測定結果を第18図に示す。近傍データ数は、水平25×垂直5画素、計125画素である。結果は従来法の結果(第10図)と良く一致している。

おわりに

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。市販LED照明とカラーカメラにより構成される安価でコンパクトな2波長同時撮像システムと、局所モデル適合(LMF)法と名付けた新しい縞画像解析アルゴリズムとを組み合わせている。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) M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-Transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry", Journal of Optical Society of America 72 (1), 156-160 (1982)
- 2) S. Toyooka and M. Tominaga, "Spatial fringe scanning for optical phase measurement", Opt. Commun., Vol. 51, No. 2, pp. 68-70 (1984)
- 3) K. H. Womack, "Interferometric phase measurement using spatial synchronous detection", Opt. Eng. Vol. 23, pp. 391-395 (1984)
- 4) M. Sugiyama, H. Ogawa, K. Kitagawa, and K. Suzuki, "Single-shot surface profiling by local model fitting", Appl. Opt. 45, 7999-8005 (2006)
- 5) 杉山将、松坂拓哉、小川英光、北川克一、鈴木一嘉：急峻な段差を持つ表面のワンショット形状計測法、精密工学会 2007年度春季大会学術講演会論文集、585-586 (2007)
- 6) K. Creath, "Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry", Appl. Opt., Vol. 26, pp. 2810-2816 (1987)
- 7) K. Kitagawa, M. Sugiyama, T. Matsuzaka, H. Ogawa, and K. Suzuki, "Two-Wavelength Single-Shot Interferometry", Proc. of SICE Annual Conference 2007 (計測自動制御学会学術講演会予稿集), 724-728 (2007)
- 8) 東レ検査機器のホームページ：
<http://www.scn.ty/user/torayins/>

【筆者紹介】

北川克一

東レエンジニアリング(株)
エレクトロニクス事業本部
開発センター
技監
〒520-2141 滋賀県大津市大江1-1-45
TEL : 077-544-1646
FAX : 077-544-1690
E-mail :

katsuichi_kitagawa@toray-eng.co.jp
〈主なる業務歴及び資格〉
画像処理応用・光干渉計測の技術開発に従事。計測自動制御学会技術賞、ViEW2003小田原賞、手島記念財団発明賞を受賞。計測自動制御学会認定計測制御エンジニア。

小川英光

東レエンジニアリング(株) 顧問
東京福祉大学教授
東京工業大学名誉教授
〈主なる業務歴及び資格〉
信号画像処理、学習理論の研究に従事。
電子情報通信学会論文賞5回、計測自動制御学会技術賞、手島記念財団発明賞等受賞。

鈴木一嘉

東レエンジニアリング(株)
エレクトロニクス事業本部

開発センター技師

〒520-2141 滋賀県大津市大江1-1-45
TEL : 077-544-1646
FAX : 077-544-1690
E-mail :

kazuyoshi_suzuki@toray-eng.co.jp

〈主なる業務歴及び資格〉
光干渉計測の技術開発に従事。

杉山 将

東京工業大学計算工学専攻 准教授

URL :
<http://sugiyama-www.cs.titech.ac.jp/~sugi/>

〈主なる業務歴及び資格〉
統計的機械学習、信号・画像処理の研究に従事。

松坂拓哉

東京工業大学
計算工学専攻修士課程 在学中

〈主なる業務歴及び資格〉
光干渉計測の研究に従事。

東レエンジニアリング株式会社

〈代表者名〉 代表取締役社長 中村時夫
〈本社住所〉
東京都中央区日本橋本石町3-3-16
日本橋室町ビル

URL : <http://www.toray-eng.co.jp/>

〈資本金〉 15億円

〈年商〉 東レエンジニアリング単独: 811億円
〈従業員数〉 東レエンジニアリング: 924人
関係会社: 1,136人

合計: 2,060人

〈事業内容および会社近況〉

I. エンジニアリング事業

1. 総合プラントエンジニアリング事業
2. 機器事業
3. FA事業
4. ソフトサービス

II. エレクトロニクス事業

1. 液晶・半導体に関するボンダー、真空印刷封止、露光機など高精度の微細加工装置
2. FPD基板用塗工装置（東レスリットノズルコータ）
3. IDタイトラー、各種外観・異物検査装置、表面形状測定装置、パネルプローブ
4. 高速プリンター、水質分析計、酸素計、プロセス計測器、繊維計測器、オートディスペンサー、各種検査機器、生産管理、MESシステムなど

Keyword	空間キャリア縞法	干渉計の参照面を傾けて、キャリア縞を導入し、得られる一枚の干渉画像から位相（高さ）情報を復元する方法。
	位相シフト法	干渉計測において、参照光と測定光間に3段階以上の位相差を与え、得られた干渉光の強度変化から、参照光と測定光の位相差を算出する方法。
	白色干渉法	垂直走査法、低コヒーレンス干渉法とも呼ばれる。光源に可干渉距離の短い白色光を使用して、参照鏡の位置を走査し、干渉縞の変調が最大となる点を求めるにより高さ情報を得る方法。
	フーリエ変換法	空間キャリア縞法における代表的な縞解析法。一次元、または二次元フーリエ変換と逆変換により、キャリア周波数成分を除去し、変調位相成分のみを抽出して高さ情報を得る方法。
	位相アンラッピング	位相接続とも呼ばれる。位相シフト法などで位相が得られた場合、それらは $-\pi \sim \pi$ の範囲に折り畳まれている（wrapされている）ので、 2π の整数倍だけ増減して元に戻すこと。