2波長ワンショット干渉計測

Two-Wavelength Single-Shot Interferometry

北川克一节, 杉山将1, 松坂拓哉1, 小川英光*, 鈴木一嘉* Katsuichi KITAGAWA †, Masashi SUGIYAMA ‡, Takuya MATSUZAKA ‡, Hidemitsu OGAWA †, and Kazuyoshi SUZUKI † *: 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

katsuichi kitagawa@toray-eng.co.jp

1: 東京工業大学 大学院情報理工学研究科 計算工学専攻

sugi@cs.titech.ac.jp

概要: 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。

1. 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(図1)。これ で得られる1枚の干渉縞画像(図2)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。



2. 局所モデル適合法-LMFアルゴリズム

2.1 一般的表現

図1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。

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

(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。

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

$$(\hat{a}, \hat{b}, \hat{\phi}) = \underset{(a,b,\phi)}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^{n} \left[g(x_i, y_i) - a - b \cos(\phi + 2\pi \hat{f}_x x_i + 2\pi \hat{f}_y y_i) \right]^2.$$

この式は¢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。

$$\xi_c = b\cos\phi,\tag{4}$$

$$\xi_s = b \sin \phi, \tag{5}$$

$$\varphi_c(x, y) = \cos(2\pi \hat{f}_x x + 2\pi \hat{f}_y y), \tag{6}$$

$$\varphi_s(x, y) = -\sin(2\pi \hat{f}_x x + 2\pi \hat{f}_y y). \tag{7}$$

この結果、最小自乗問題は次式のようになる。

$$(\hat{a}, \hat{\xi}_c, \hat{\xi}_s) = \underset{(a, \xi_c, \xi_s)}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^{\infty} \left[g(x_i, y_i) - a - \xi_c \varphi_c(x_i, y_i) - \xi_s \varphi_s(x_i, y_i) \right]^2.$$
(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。

$$A\begin{pmatrix} \hat{a}\\ \hat{\xi}_c\\ \hat{\xi}_s \end{pmatrix} = g, \tag{9}$$

$$A = \begin{pmatrix} n & \sum \varphi_{c}(x_{i}, y_{i}) & \sum \varphi_{s}(x_{i}, y_{i}) \\ \sum \varphi_{c}(x_{i}, y_{i}) & \sum \varphi_{c}(x_{i}, y_{i})^{2} & \sum \varphi_{s}(x_{i}, y_{i})\varphi_{c}(x_{i}, y_{i}) \\ \sum \varphi_{s}(x_{i}, y_{i}) & \sum \varphi_{s}(x_{i}, y_{i})\varphi_{c}(x_{i}, y_{i}) & \sum \varphi_{s}(x_{i}, y_{i})^{2} \end{pmatrix},$$

$$(10)$$

$$\left(\sum_{i=1}^{n} g(x_i, y_i) \right)$$

$$(11)$$

$$g = \left(\frac{\sum g(x_i, y_i)\varphi_c(x_i, y_i)}{\sum g(x_i, y_i)\varphi_s(x_i, y_i)} \right).$$
(11)

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。

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

2.2 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。

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

$$\hat{\xi}_{s} = G(x) \varphi_{c}(x + \Delta x) - G(x + \Delta x) \varphi_{c}(x)$$
(14)

$$\widehat{\xi}_{c} = G(x) \varphi_{s}(x + \Delta x) - G(x + \Delta x) \varphi_{s}(x)$$
(15)

$$G(x) = g(x) - a \tag{16}$$

$$G(x + \Delta x) = g(x + \Delta x) - a \tag{17}$$

3. 1波長ワンショット法

3.1 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±1.2nm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され、512×480 画素のディ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。

3.2 実験結果

撮像された縞画像を図3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、位相シフト法、空間位相同期法、LMF 法の3方法の測定結果(1ラインのプロファイル) を図5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、 図5の左上の数値は、10回の繰り返し測定の結果 を示していて、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 間位相同期法よりも高精度であることが分かっ た。



図3 67nm段差のワンショット画像



図4 LMF法による67nm段差の測定結果



図5 他の方法との比較

3.3 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。



図6 振動の影響

4. 2波長ワンショット法

4.1 アルゴリズム

2.1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_I , λ_2 で測定した位相 ϕ_I 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。

 $H = (\Phi/2\pi + N)^{*} (\lambda_{eq}/2),$ (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。

$$\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\phi}_1 - \boldsymbol{\phi}_2, \tag{19}$$

 $\lambda_{eq} = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1).$ (20) この方法により、段差の最大許容値は $\lambda_1 / 4$ から

 λ_{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_I 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N₁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、

 $N_{l} = \text{Round}[(\lambda_{1}\phi_{l} - \lambda_{2}\phi_{2})/2\pi(\lambda_{2} - \lambda_{l})],$ (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=($\phi_l/2\pi + N_l$)*($\lambda_l/2$). (22)

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 得られていない。筆者らは市販の3色LED照明装 置(図7)とカラーカメラによるワンショット用2 波長撮像システムを開発した[7]。照明装置の仕様 を表1に示す。R,Bの帯域幅20~25nmは、コヒーレ ント長が約10~20µmであることを意味し、実験 目的には十分である。

図8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 1877 nm となる。これは、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。



図7 RGB LED照明装置

表1

照明装置の仕様



図8 カラーカメラの分光感度とLEDの中心波長

4.3 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-500[8](図 9)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。



図9 実験装置

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 来法の白色干渉法で測定した結果を図10に示す。



図10 従来法による測定結果

図11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たB成分画像、R成分画像を図12と図13に示す。



図11 2波長ワンショット画像 (白線はプロファイル解析部)



図12 抽出されたB成分画像



図13 抽出されたR成分画像

最初に、図11~図13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 ァイルを図14に示す。これから、LMF法により図 15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波長高さ計測 を行った結果を図16に示す。段差値は44nmとな り、これは公称値350nmからλ/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、3.1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)*を図 17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。

表2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、三次元測定結果を図18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(図10)と良く一致している。



方法	測定值(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



図18 2波長ワンショット計測法に よる350nm段差計測結果

5. 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

- 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講演論文集, 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.tv/user/torayins/

北川克一:東レエンジニアリング(株)技監. 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.

杉山将:東京工業大学計算工学専攻准教授.統計的機械学習,信号・画像処理の研究に従事.ホームページは http://sugiyama-www.cs.titech.ac.jp/~sugi/

松坂拓哉:東京工業大学計算工学専攻修士課程在学中.光 干渉計測の研究に従事.

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.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.光干渉計測の技術開発に従 事.