

3波長ワンショット干渉計測における最適波長選択と測定レンジ拡大

北川克一*

Optimum Wavelength Selection to Extend the Unambiguous Measurement Range of the Three-Wavelength Single-Shot Interferometry.

Katsuichi KITAGAWA*

This paper presents a novel method for selecting optimum measurement wavelengths in multi-wavelength interferometry. It is based on a coincidence error analysis in exact fractions solutions. By this method, three wavelengths of 470, 560, and 600 nm have been selected. With these wavelengths, a surface profiler has been developed using three-wavelength single-shot interferometry, and an extended measurement range over 8 μm has been experimentally proved.

Key Words. Interferometry, Surface profiler, Three-wavelength, Single-shot, Optimum wavelength

1. はじめに

光干渉に基づく表面形状測定法は、超高精度な三次元計測法として産業界でも広く利用されているが、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、参照面を傾斜させてキャリア縞を導入し、1枚の縞画像から三次元形状を求める空間キャリア縞法^{1)~7)}と呼ばれるワンショット干渉法が提案されている (Fig. 1)。この方法によって得られる1枚の干渉縞画像 (Fig. 2) からフーリエ変換法²⁾、空間位相同期法^{3)~5)}、局所モデル適合法⁶⁾⁷⁾などにより表面形状が求められる。

しかし、空間キャリア縞法は、位相シフト法と同じく、得られた位相から高さを求めるに際して、位相アンラッピングを必要とする。位相周期 (2π) が光源波長の $1/2$ に相当するので、隣接画素間の段差が光源波長の $1/4$ 以下という前提で、位相を接続する。この段差限界のために、大きな段差のある測定対象には適用できない。この問題の解決のために、筆者らは、多波長ワンショット計測法を提案し、2波長の場合に 350nm 段差⁸⁾⁹⁾、3波長の場合に $1\mu\text{m}$ 段差の測定に成功している¹⁰⁾¹¹⁾。

ところで、これらの報告においては、市販の RGB-LED 照明を使用したので、3波長は B: 470nm , G: 530nm , R: 627nm に固定されていた。しかし、3波長ワンショット法のさらなる測定レンジの拡大のためには、使用波長の最適な組み合わ

せが存在すると予想される。

複数波長を使用して、測定レンジを拡大することは、多波長位相シフト法¹²⁾のほか、ゲージブロックなどの校正に利用されている多波長干渉法¹³⁾も共通である。しかし、これまでに報告された多波長法のほとんどがレーザ光源を使用しているため、波長が限定され、波長最適化の報告は数少ない。Pfortner et al.¹⁴⁾は、3個のレーザを使用し、それらの波長が互いに素であり、公約数のないことが望ましいとしている。Towers et al.¹⁵⁾は、等価波長が等比級列になるように3波長を決定する方法を提案しているが、具体的な波長は記載していない。Falaggis et al.¹⁶⁾は、近赤外波長帯を利用した多波長干渉距離計において、合致法に基づく最適波長探索法を提案しているが、両端の2波長を固定した場合に、中間波長が避

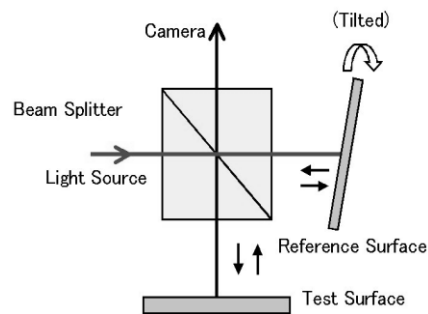


Fig. 1 Optics of spatial carrier interferometry



Fig. 2 Interferogram with carrier fringes

* 東レエンジニアリング (株) 開発本部要素技術開発センター
滋賀県大津市大江 1-1-45

(E-mail: katsuichi_kitagawa@toray-eng.co.jp)

* R&D Div., Toray Engineering Co., Ltd., 1-1-45 Oe, Otsu

けるべき条件を述べていて、一般的な最適化手法とは言えない。以上のように、この問題に対する明快な解法は報告されていない。(注1)

本報告では、第2章において3波長ワンショット法の概要を述べ、第3章で合致法アルゴリズムと測定レンジの推定法を考察し、第4章で、最適波長の探索と、その結果として得られた3波長を用いた実験結果を報告する。(注2)

2. 3波長ワンショット法

本章では、筆者らが提案した3波長ワンショット法¹⁰⁾¹¹⁾の概要を述べる。

2.1 干渉光学系と撮像系

Fig.1に示すように、2光束干渉系において、参照面を傾斜させてキャリア縞を導入する。3波長撮像系は、市販の3色LED照明装置(CCS; HLV-3M-RGB-3W)とカラーカメラ(Basler; sca640-70gc)により構成される。LEDの中心波長(公称値)は、B(470nm), G(530nm), R(627nm)である。Fig.3は、カラーカメラの分光感度特性と、3個のLEDの中心波長を示す。この3個のLEDを同時点灯して、カラーカメラで撮像し、RGB画像に分解すると、3波長に対応する干渉画像が得られる。

2.2 クロストーク補正法

カメラの分光感度曲線は、Fig.3に示すようにオーバーラップしているため、B,G,R信号にはクロストークがある。そこで、観測輝度(B', G', R')が、真の輝度(B, G, R)とクロストークの強度を表す係数 $k_{GB}, k_{RB}, k_{BG}, k_{RG}, k_{BR}, k_{GR}$ により、

$$\begin{pmatrix} B' \\ G' \\ R' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & k_{GB} & k_{RB} \\ k_{BG} & 1 & k_{RG} \\ k_{BR} & k_{GR} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表されると仮定して、クロストーク補正を行う²⁰⁾。係数は、各照明を個別点灯し、R,G,B輝度の相関から求めることができる。

2.3 周波数推定法

縞画像からキャリア縞周波数を高速、かつ高精度に得るために、筆者らが開発した方法(位相勾配法)²¹⁾を使用する。本方法は、正弦波 $g(x) = A \cos(2\pi f x + \phi(x))$ で表される観測信号(f が求める周波数)に、周波数推定値 f' のモデル信号 $g'(x) = A' \cos(2\pi f' x + \phi'(x))$ を最小二乗適合し、得られた位相 $\phi(x)$ の勾配 $d\phi'(x)/dx$ から、

$$\hat{f} = f' + \frac{1}{2\pi} \left(\frac{d\phi'(x)}{dx} \right) \quad (2)$$

(注1) 2波長干渉計測においては、等価波長(Equivalent wavelength)の考え方を導入し、その1/2を測定レンジとする手法が良く知られている。しかし、この手法は誤差を考慮していない、また、位相情報を有効活用していないために、正しい測定レンジを与えないことが示されている。¹⁷⁾

(注2) 本論文は、文献17),18),19)の中で報告した内容を基本とし、 $8\mu\text{m}$ 段差を対象とした実験結果を追加したものである。

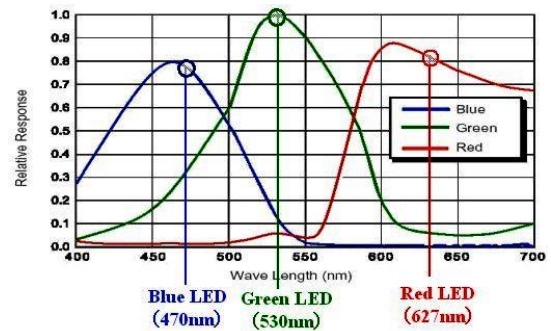


Fig.3 Spectral response curves of color camera, with the peak wavelengths of three LEDs

により、新しい周波数推定値 \hat{f} を求める。この推定を繰り返すことにより推定精度を向上することができる。位相計算には、次節に述べる局所モデル適合法を利用する。

2.4 位相計算法

各点における位相は、局所モデル適合法(Local Model Fitting法; 以下、LMF法と呼ぶ)⁶⁾⁷⁾により求める。すなわち、各点の近傍の n 点($n \geq 3$)の輝度データを次式の正弦波状モデル関数に最小二乗適合する。

$$g(x, y) = a + b \cos(\phi + 2\pi f_x x + 2\pi f_y y) \quad (3)$$

ここで、未知変数は、バイアス成分 a 、振幅 b 、位相 ϕ の3個であり、キャリア縞周波数 f_x, f_y は前節の推定法により、あらかじめ求めておく。

この最小二乗問題は非線形であるが、 $\xi_c = b \cos \phi$ 、 $\xi_s = b \sin \phi$ の変数変換により、モデルを線形化して、線形最小二乗問題に変換できる。よって、未知パラメータ a, ξ_c, ξ_s は、3元連立方程式を解いて解析的に求められる。位相 ϕ は

$$\phi = \text{atan} \left(\frac{\xi_s}{\xi_c} \right) \quad (4)$$

により求められる。

2.5 3波長位相アンラッピング

各波長で得られた位相から高さの候補を算出し、予想される高さ範囲内で最も良く合致する高さ候補を選択する方法を採用した。この方法は、古くからブロックゲージの校正に使用されている「合致法」(exact fraction method)¹³⁾と同じである。詳細は、次章に述べる。

2.6 実試料測定実験

提案手法の検証のために、段差が約1130nmの標準段差試料を対象とする測定実験を行った。実験装置は、東レエンジニアリング(株)製表面形状測定装置SP-500²²⁾の照明・撮像系を3波長撮像システムに交換したもので、パソコンに3波長計測ソフトを実装した。

キャリア縞を横方向に導入して得られたカラー画像をFig.4に示す。画像データは、横512画素×縦480画素×8bit

×3色で構成されている。画面中央下部の矩形の不連続個所が約1 μm の段差部である。Fig.4に白線で示したy=360ラインの輝度データから、クロストーク補正、周波数推定を実施し、LMF法を用いて得られた各波長の位相プロファイルを図.5に示す。これらの位相データから、合致法を用いて計算したy=360ラインの高さプロファイルをFig.6に実線で示す。1 μm を越える段差が次数推定の誤りなく測定できている。また、点線は式(6)で定義される合致法の合致誤差で、段差エッジ部を除き、10nm以下である。このデータは、4.1節で利用される。

次に、全面の3次元高さ測定結果を図.7に示す。エッジ部を除き、全面で正しい次数推定のできていることが分かる。



Fig.4 Color image of 1 μm step height (512×480pixel)

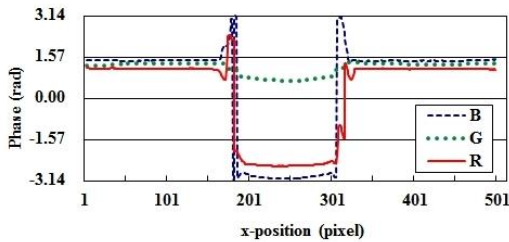


Fig.5 Phase profiles of three wavelengths at y=360

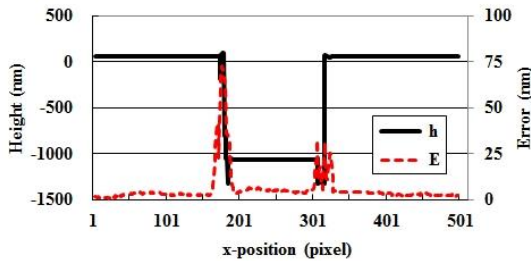


Fig.6 Height profile at y=360. The dotted line shows the coincidence error that is referred to later in section 4.1.

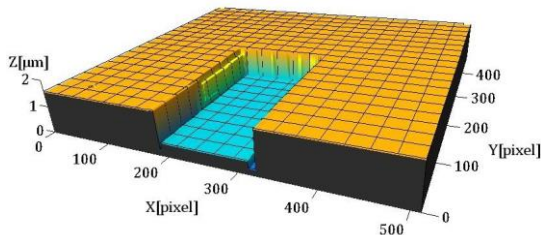


Fig.7 Measurement result of 1 μm step height

3. 測定レンジ推定法

本章では、合致法アルゴリズムの詳細を述べたあと、測定レンジがどのように決まるかを考察し、その推定法を導出する。

3.1 合致法アルゴリズム

合致法は、多波長干渉法において、複数の位相情報から高さを決定する一手法として知られている。たとえば、3波長の場合には、 i を波長番号 ($i=1, 2, 3$)として、波長 λ_i 、位相 ϕ から、次式により各波長の高さ候補値が得られる。

$$h_i(n_i) = \left(\frac{\phi_i}{2\pi} + n_i \right) \left(\frac{\lambda_i}{2} \right) \quad (5)$$

ここで、 n_i は未知の干渉次数(整数)である。位相と波長に誤差が無ければ、真の高さで3波長の高さ候補値が一致する。しかし、通常は誤差が存在するので、Fig.8に示すように、予想される高さ範囲の中で、最も合致誤差の小さい高さ候補値の組み合わせ(図中のMinimum Error点)を求め、高さとする。合致誤差の指標としては、レンジ(最大値と最小値の差)、平均偏差、分散などが考えられるが、比較実験の結果から、それらに有意な差がないと判断し、次式で表現されるレンジを合致誤差の指標とした。

$$E(n_1, n_2, n_3) = \max[h_1(n_1), h_2(n_2), h_3(n_3)] - \min[h_1(n_1), h_2(n_2), h_3(n_3)] \quad (6)$$

ここで、 $\max[]$ 、 $\min[]$ は、それぞれ最大値、最小値を意味する。

筆者らが採用した具体的な手順を以下に述べる。与えられた高さ測定レンジ内で、第3波長の次数 n_3 を変えながら、式(5)により第3波長の高さ候補値 $h_3(n_3)$ を計算する。次に、それに最近傍の第1、第2波長の高さ候補値 $h_1(n_1)$ 、 $h_2(n_2)$ を次式で求める。

$$h_i(n_i) = \left(\frac{\phi_i}{2\pi} + \text{Round} \left[\frac{h_3(n_3)}{\left(\frac{\lambda_i}{2} \right)} \right] \right) \left(\frac{\lambda_i}{2} \right) \quad (7)$$

ここで、 $i=1, 2$ であり、 $\text{Round}[]$ は四捨五入による整数化を意味する。

得られた高さ候補値の組み合わせの中から、式(6)による合致誤差 E が最小になる組み合わせを求める。

また、最終的な高さ計算式として、3つの高さ候補値の単純平均、重み付き平均などが考えられるが、筆者らは次式で表現される単純平均を採用した。

$$h = \frac{h_1(n_1) + h_2(n_2) + h_3(n_3)}{3} \quad (8)$$

3.2 合致法における測定レンジ

合致法で誤りなくアンラッピングできる高さ範囲（以下、UMR; Unambiguous Measurement Range とする）を考える。位相推定に誤差があると、高さ候補値に誤差が入り、Fig.8 に示すように、合致誤差最小高さが Minimum Error 点ではなく、Next Minimum Error 点になる可能性がある。この場合、両者の間隔が UMR になる。

次に、この UMR がどのように決まるかを考察する。真の高さを 0 と仮定すると^(注3)、3つの位相はすべて 0 になる。式(5)により、第3波長の次数 n_3 を変えながら^(注4)、第3波長の高さ候補 $h_3(n_3)$ を計算し、それに最近傍の第1、第2波長の高さ候補 $h_1(n_1)$ 、 $h_2(n_2)$ を求め、式(6)により合致誤差 E を計算する。前章の3波長ワンショット法で使用した3波長 (B: 470nm, G: 530nm, R: 627nm) の場合、第3波長の高さを横軸とし、第1、第2波長の最近傍高さ候補と合致誤差 E を縦軸にしてプロットすると、Fig.9 が得られる。このグラフを合致法における誤差線図 (Coincidence error diagram) と名付ける。

この誤差線図（ただし、高さ範囲：0~5000nm）において、合致誤差の第2最小点（Next Minimum Error 点）は、A 点（各波長の高さ候補値が 1855, 1880, 1881nm；平均値 1872nm）であり、位相誤差高さ換算値^(注5)が、この点の合

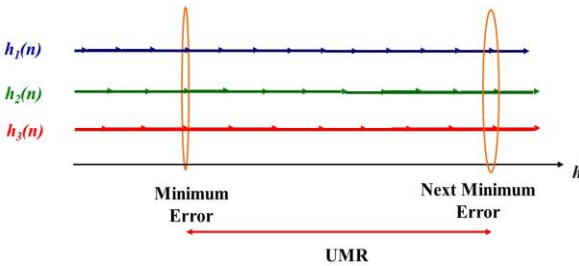


Fig.8 Exact fraction method and the UMR

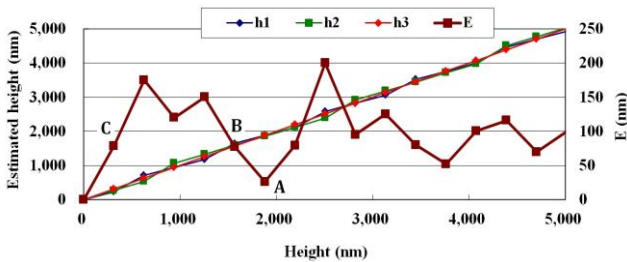


Fig.9 Coincidence error diagram (470-530-627nm)

(注3) 以下の議論の単純化のために真の高さを 0 と仮定したが、任意の高さにおいても、誤差線図の横軸がシフトするだけで、同じ形状のグラフが得られる。

(注4) 他の波長の候補点を用いると、少し異なる誤差線図が得られる。しかし、合致点付近では、各波長の高さ候補が近接するので、いずれの波長を使用しても、合致周期の議論に影響はない。よって、計算負荷を考慮して、最も長い波長のデータを使用した。

(注5) 式(6)で定義される合致誤差には、位相推定誤差のほかに、波長誤差も寄与するが、それらを含めて、位相誤差と呼び、高さに換算した値（位相誤差高さ換算値）で表現することにする。

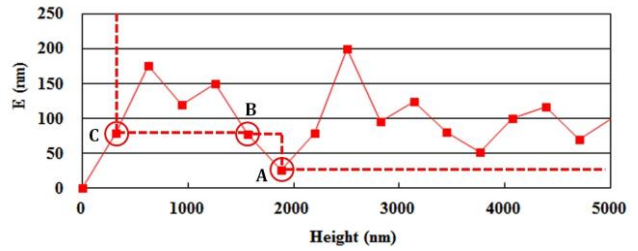


Fig.10 Coincidence error diagram and its critical points determining the UMR

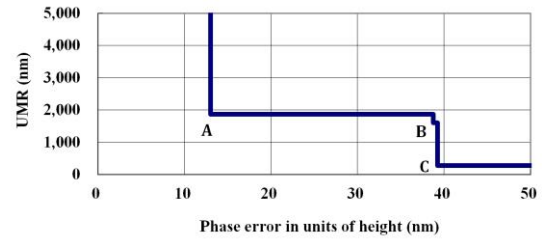


Fig.11 UMR diagram

致誤差 (26nm) の 1/2 (13nm) を越えるかどうかで、UMR が変化する。すなわち、位相誤差高さ換算値が 13nm 未満の場合には、UMR が 5000nm 以上になり、13nm を越えると、A 点の高さ (1872nm) が UMR になる。

誤差線図において、このような UMR を決める重要な点 (critical points) は、Fig.10 の円で囲んだ極小点 (A,B,C 点) であり、この点を結ぶ点線が、位相誤差高さ換算値と UMR の関係を示している。よって、図を書き換えて、横軸を許容位相誤差高さ換算値 (合致誤差の 1/2)、縦軸を UMR とすると、Fig.11 が得られる。この図 (UMR 線図と呼ぶ) を用いて、位相誤差 (高さ換算値) が与えられた時の UMR を求めることができる。すなわち、位相誤差高さ換算値と UMR の関係は、13nm 以下で 5000nm 以上、13~38.75nm で 1872nm、38.75~39nm で 1601nm、39nm 以上で 271nm となる。

3.3 測定レンジの推定方法

前節の検討結果から、測定レンジは、位相誤差に依存し、誤差線図、あるいは、UMR 線図により推定可能である。ここでは、3波長の場合のレンジ推定方法をまとめる。

(1) 誤差線図の作成

(a) 位相を 0 とした時の第3波長の高さ候補値を次式により計算する。計算する次数 n_3 ($n_3=0,1,\dots$) の範囲は目標高さレンジから決定する。

$$h_3(n_3) = \left(\frac{\lambda_3}{2}\right)n_3 \quad (9)$$

(b) 上記で得られた各高さ候補値に最も近い第 i 波長 ($i=1, 2$) の高さ候補値 h_i を、次式により計算する。

$$h_i(n_i) = \text{Round} \left[\frac{h_3(n_3)}{\left(\frac{\lambda_i}{2}\right)} \right] \quad (10)$$

(c) 得られた高さ候補値の合致誤差 E を、式(6)により計算する。

(d) 横軸を h_3 、縦軸を E とした誤差線図を作成する。

(2) 上記誤差線図の極小点データから、UMR 線図を作成する。

(3) 予想される位相誤差から UMR を求め、測定レンジとする。

4. 波長最適化実験

4.1 最適波長の探索

前章のレンジ推定法を利用して、いろいろな波長の組み合わせにおける測定レンジを求め、それが最大になる組み合わせ（最適波長）を探索した。位相誤差高さ換算値は、 $1\mu\text{m}$ 段差測定時の合致誤差 (Fig. 6) が、段差部を除き 10nm 以下であったことから、最大で 10nm 程度と想定した^(注6)。探索範囲は、市販カラーカメラの RGB 帯域 (Fig.3, Fig.15 参照) と顕微鏡の波長特性から、B 波長= $460\sim 480$, G 波長= $500\sim 570$, R 波長= $580\sim 630$ とした。市販フィルタの入手可能性やフィルタの中心波長精度を考慮して、探索ピッチを 10nm とした。その結果、 $3\times 8\times 6=144$ 通りの組み合わせが探索候補となった。

すべての組み合わせを評価した結果、 470nm (B)- 560nm (G) - 600nm (R) の組み合わせを最適波長として選定した。本報告では、探索の例として、第 1 波長を 470nm 、第 3 波長を 600nm に固定し、第 2 波長を $530, 540, 550, 560\text{nm}$ とした場合の誤差線図を Fig.12(a)(b)(c)(d) に示す。また、UMR 線図を Fig.13 に示す。選定した 470nm (B)- 560nm (G) - 600nm (R) の測定レンジは、位相誤差高さ換算値が $10\sim 15\text{nm}$ の時に $8.7\mu\text{m}$ となり、 10nm 未満の時は $10\mu\text{m}$ 以上になると予想される。

4.2 最適波長による実験

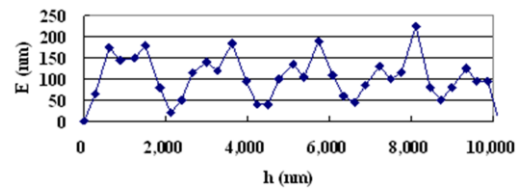
4.2.1 実験方法

レンジ拡大機能の確認のため、公称段差が $8\mu\text{m}$ の標準段差試料を測定対象として、測定実験を行った。

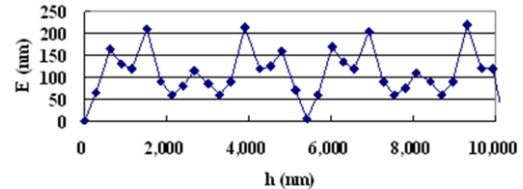
(1) 干渉光学系と撮像系

実験装置は、基本的に 2.6 節に述べたものと同一であるが、3 波長照明系は、Fig. 14(a) に示すように、白色光源と多波長帯域フィルタ (Multi-Bandpass Filter; MBPF) により構成した²⁰⁾。このフィルタは、Fig. 14(b) に示すように、前節の手法で選択された 3 波長を帯域透過する特性を有している。また、その帯域幅は 10nm であり、コヒーレンス長は約 $20\mu\text{m}$ であ

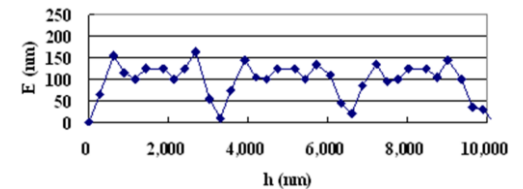
(注 6) 位相誤差は、照明光の波長誤差、光学系の収差、試料面の凹凸、振動、電子ノイズ、位相計算アルゴリズムなど多くの因子に依存する。ここでは、測定環境も試料も類似している過去の実験データ (Fig. 6) から、位相誤差を推定している。



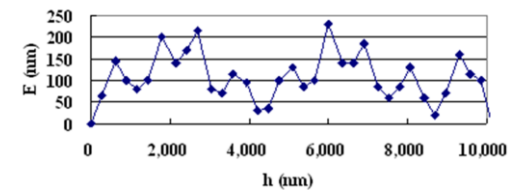
(a) $\lambda_2=530\text{nm}$



(b) $\lambda_2=540\text{nm}$



(c) $\lambda_2=550\text{nm}$



(d) $\lambda_2=560\text{nm}$

Fig.12 Coincidence error diagrams to select the optimum second wavelength with the 1st and 3rd wavelengths fixed

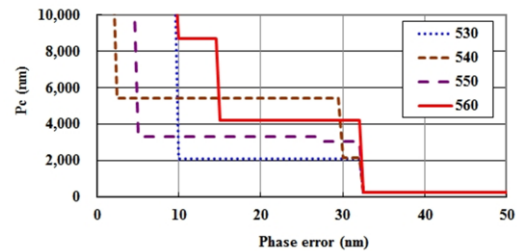
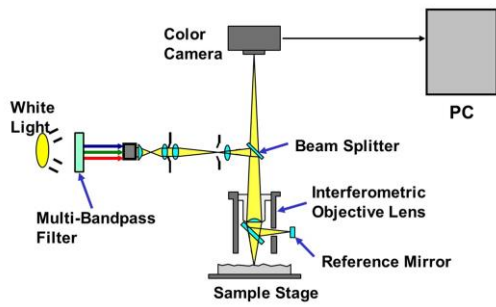


Fig.13 UMR diagrams of various second wavelengths

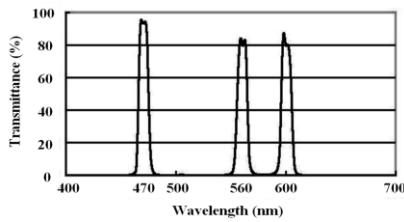
る。撮像系には、140 万画素 (1360×1024 画素) の 3 板式カラーカメラ (日立国際電気, HV-F22CL) を使用した。Fig. 15 は、カラーカメラの分光感度特性と、使用した 3 波長を示す。

(2) クロストーク補正

筆者らが報告した方法²⁰⁾により、式(1)で定義したクロストーク係数を求めた。結果は次式のようになり、クロストー



(a) Optical configuration



(b) Spectral transmittance of Multi-Bandpass Filter

Fig.14 Experimental setup

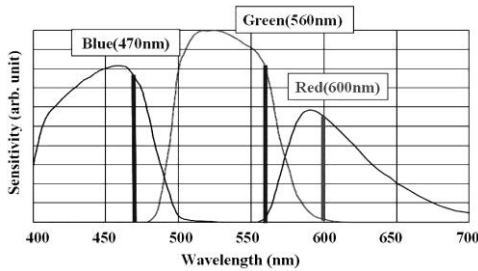


Fig.15 Spectral sensitivity of camera and three wavelengths

は非常に小さい。これは、Fig. 15 からの予想と一致している。

$$\begin{pmatrix} B' \\ G' \\ R' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1 & 0.00 \\ 0.00 & 0.11 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix} \quad (11)$$

この係数を用いて、クロストーク補正、すなわち、観測輝度(B', G', R')から真の輝度(B, G, R)を求めた。

4.2.2 実験結果

従来法との比較が容易なように、高精細カメラで撮像された画像の中央部 512×480 画素領域を測定対象とした。カラー画像を Fig.16 に、画面の $y=240$ ラインにおける 3 波長の位相を Fig.17 に示す。LMF 法の使用データサイズは、横 5 画素×縦 25 画素である。さらに、高さと合致誤差のプロファイルを Fig.18 に示す。合致誤差はエッジ部を除き 10nm 以下であり、8 μm のレンジ確保に必要な条件である 15nm 以下を満たしている。画面全体の測定結果を Fig.19 に示す。8 μm の段差が安定して測定できていて、その測定再現性 (σ) は約 1nm であった。また、全面的計算時間は、Windows PC (CPU: Intel Core i7 2.5GHz)において、約 200ms であった。

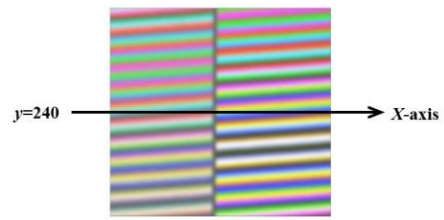


Fig.16 Color image of 8 micron step height

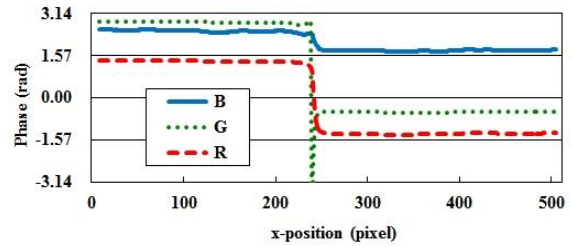


Fig.17 Phase profiles of three wavelengths at $y=240$

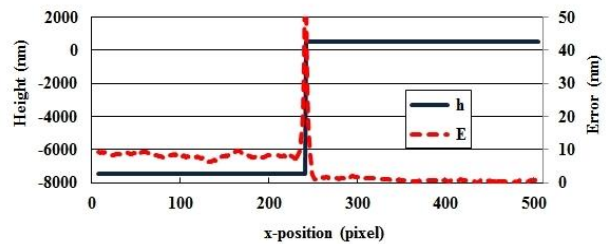


Fig.18 Height and coincidence error profiles at $y=240$

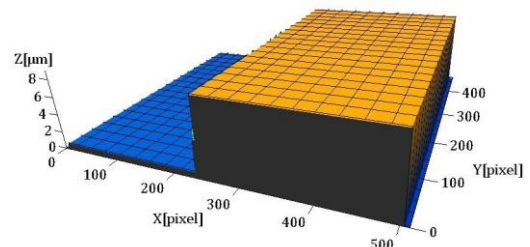


Fig.19 Measurement result of 8 μm step height

5. 結 言

3 波長ワンショット干渉法の測定レンジ拡大を目的として、位相アンラッピングにおける合致法を解析し、位相誤差が与えられた時に、任意の波長の組み合わせにおける測定レンジが推定できる手法を見出した。これにより、波長の最適な組み合わせを探索することが可能になった。市販カラーカメラの使用を前提に最適波長を探索し、470nm (B)-560nm (G) - 600nm (R) を選定した。この波長を用いた実験により、8 μm の標準段差試料の表面形状が安定に測定可能なことを確認した。本提案手法は、多波長位相シフト法など、他の多波長干渉計測にも適用可能である。

参考文献

- 1) 加藤純一：実時間干渉じま解析とその応用,精密工学会誌, **64-9**, 1289/1293 (1998)
- 2) M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi: Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry, *J. Opt. Soc. Am.*, **72-1**, 156/160 (1982)
- 3) S. Toyooka and M. Tominaga: Spatial fringe scanning for optical phase measurement, *Opt. Commun.*, **51-2**, 68/70 (1984)
- 4) K. H. Womack: Interferometric phase measurement using spatial synchronous detection, *Opt. Eng.*, **23-4**, 391/395 (1984)
- 5) J. Kato, I. Yamaguchi, T. Nakamura and S. Kuwashima: Video-rate fringe analyzer based on phase-shifting electronic moire patterns, *Appl. Opt.*, **36-32**, 8403/8412 (1997)
- 6) M. Sugiyama, H. Ogawa, K. Kitagawa, and K. Suzuki: Single-shot surface profiling by local model fitting, *Appl. Opt.*, **45-31**, 7999/8005 (2006)
- 7) 杉山, 松坂, 小川, 北川, 鈴木: 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)
- 8) 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)
- 9) 北川, 杉山, 松坂, 小川, 鈴木: 2 波長ワンショット干渉計測, *ViEW2007 ビジョン技術の実用ワークショップ講演論文集*, 189/195 (2007)
- 10) 北川克一：3 波長ワンショット形状計測法, 精密工学会 2008 年秋季大会学術講演会講演論文集, 179/180 (2008)
- 11) K. Kitagawa: Fast surface profiling by multi-wavelength single-shot interferometry, *International Journal of Optomechatronics*, **4-2** 136/156 (2010)
- 12) Y.-Y. Cheng and J.C. Wyant: Two-wavelength phase shifting interferometry, *Appl. Opt.*, **23-24**, 4539/4543 (1984)
- 13) C. R. Tilford: Analytical procedure for determining lengths from fractional fringes, *Appl. Opt.* **16-7**, 1857/1860 (1977).
- 14) A. Pfortner and J. Schwider: Red-green-blue interferometer for the metrology of discontinuous structures, *Appl. Opt.*, **42-4**, 667/673 (2003)
- 15) C. E. Towers, D. P. Towers and J. D. Jones: Generalized multifrequency selection for full-field interferometric shape measurement, *Proc. SPIE* **5502**, 406/409 (2004)
- 16) K. Falaggis, D. P. Towers and C. E. Towers: Optimum wavelength selection for the method of excess fractions, *Proc. SPIE* **7063**, 70630V/70630V-9 (2008)
- 17) 北川克一：光干渉に基づく産業用表面形状計測法に関する研究, 東京大学博士論文, 102/119 (2011)
- 18) 北川, 坪井, 鈴木, 大槻：3 波長ワンショット干渉計測を利用したインクジェット方式カラーフィルタの自動膜厚測定装置, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, 881/882 (2010)
- 19) 北川, 杉原, 坪井, 鈴木, 大槻：3 波長ワンショット干渉計測によるインクジェット方式カラーフィルタの膜厚測定, 精密工学会誌, **78-1**, 86/91 (2012)
- 20) 北川克一：3 波長干渉計測のためのクロストーク補正, 計測自動制御学会産業論文集, **8-14**, 113/116 (2009)
- 21) 北川克一：位相勾配検出による干渉縞画像の 2 次元周波数推定, 計測自動制御学会産業論文集, **8-13**, 108/112 (2009)
- 22) Toray Engineering Co. 3-D Non-Contact Surface Profiler SP-700/500 Series.
<http://www.toray-eng.com/lcd/inspection/lineup/sp-500.html>
(accessed 2013.5.8)

[著者紹介]

北川 克一 (正会員)

1964 年東京大学計数工学科卒。同年、東レ(株)入社。1989 年より画像処理を応用した半導体検査機器の研究開発に従事。2000 年より東レエンジニアリング(株)勤務。2001 年度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, 2011 年度精密工学会技術賞, 2012 年度精密工学会論文賞を受賞。計測制御エンジニア。情報理工学博士(2011 年, 東京大学)



This material is the final manuscript for:

Katsuiichi KITAGAWA, "Optimum Wavelength Selection to Extend the Unambiguous Measurement Range of the Three-wavelength Single-shot Interferometry", *Transactions of SICE*, 50(4), 335-341 (2014).

北川克一, "3 波長ワンショット干渉計測における最適波長選択と測定レンジ拡大", 計測自動制御学会論文集, 50(4), 335-341 (2014).