

3波長ワンショット干渉計測

Three-Wavelength Single-Shot Interferometry

北川克一

Katsuichi KITAGAWA

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

概要: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1枚の縞画像から、3次元形状を測定する手法が知られている。筆者らは、これまでに、2波長ワンショット干渉計測法を開発し、350nmの段差形状の測定に成功している。本報告では、さらなる測定レンジ拡大のために、3波長ワンショット法を提案する。LED照明装置とカラーカメラにより、3波長同時撮像光学系を構成する。これにより得られる1枚のカラー干渉縞画像から、3波長の位相情報を抽出して3次元形状を求める。このために必要な要素技術として、位相勾配による周波数推定法を考案した。急峻な段差を含む約 $1.1\mu\text{m}$ の段差形状を正確に測定可能なことを確認した。

1. はじめに

光干渉を用いた表面形状測定法は、高速・高精度・非接触という特徴があり、産業界でも広く使用されている。しかし、従来の代表的な干渉計測法である白色干渉法や位相シフト法では、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低下するという問題がある。また、走行物体の測定も困難である。

これら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[1-5]と呼ばれている(図1)。この方法によって得られる1枚の干渉縞画像からフーリエ変換法[2]や空間位相同期法[3-5]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[1]。

我々は、この問題を解決するために、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た [6,7]。

次の課題は、測定レンジの拡大である。1枚の縞画像からは縞次数の決定ができないので、正しい位相アンラッピングには、隣接画素間の段差が光源波長(λ)の $1/4$ 以下という前提条件を必要とする。我々は、この問題解決のために、2波長ワンショット法を提案し、350nmの段差の測定に成功し

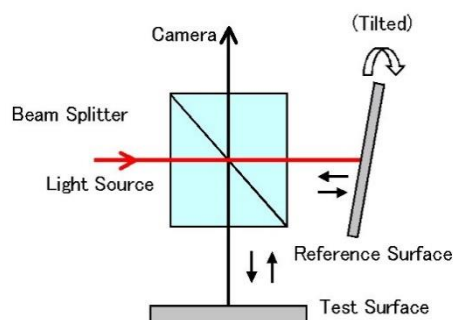


図1 空間キャリア縞法の光学系

た[8,9]。

本報では、3波長を使用することによって、測定レンジをさらに拡大した結果について報告する。

2. 測定原理

2.1 干渉光学系と撮像系

図1に光学系を示す。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、既報告の2波長撮像システム[8,9]と同じく、図2に示す市販の3色LED照明装置(メーカー:CCS, 型式:HLV-3M-RGB-3W)とカラーカメラ(メーカー:Bastler, 型式:sca640-70gc)により構成される。照明装置の仕様を表1に示す。LEDの中心波長(カタログ値)は、470nm, 530nm, 627nmである。また、帯域幅は $20\sim 35\text{nm}$ である。これは、コヒーレント長が約 $10\sim 20\mu\text{m}$ であることを意味し、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。

図3は、使用した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すると、3波長干渉画像が得られる。



図2 RGB LED 照明装置

表1 照明装置の仕様 (typ.)

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

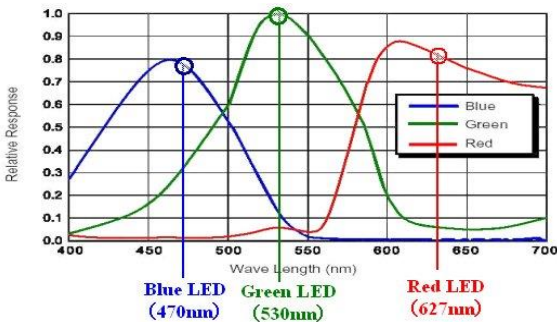


図3 カラーカメラの分光感度とLEDの中心波長

2.2 クロストーク補正法

図3に示すように、カメラの分光感度曲線はオーバーラップしているのので、B,G,R 信号間にはクロストークがある。特に、B 波長成分から G 信号へのクロストークが無視できない。

そこで、以下のような線形のモデルを仮定し、クロストークの補正を行う。すなわち、観測輝度 (B', G', R') は真の輝度 (B, G, R) とクロストークの強度を表す係数 a, b, c, d, e, f により

$$\begin{cases} B' = B + aG + bR \\ G' = cB + G + dR \\ R' = eB + fG + R \end{cases} \quad (1)$$

と表される。

係数は c を除き、数%と小さいので、係数の積の項を無視すると、真の輝度を以下の式により求めることができる。

$$\begin{cases} B = B' - aG' - bR' \\ G = -cB' + G' - dR' \\ R = -eB' - fG' + R' \end{cases} \quad (2)$$

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。実験例は3.2節に述べる。

2.3 周波数推定法

(1) 推定アルゴリズム

縞画像からキャリア縞周波数を得る方法としては、ピークカウント法、自己相関法、フーリエ変換法などが考えられるが、発表者らは、新しい推定法として、周波数と位相との関係を利用する方法(「位相勾配法」と呼ぶ)を提案する。本方法は2次元の周波数推定に適用可能であるが、先ず1次元の周波数推定で原理を述べる。

観測信号が次式で表されるとする。 f が求める周波数である。

$$g(x) = A \cos(2\pi f x + \phi(x)) \quad (3)$$

これに、周波数初期推定値 f_0 のモデル関数

$$g'(x) = A' \cos(2\pi f_0 x + \phi'(x)) \quad (4)$$

をフィッティングして、位相 $\phi'(x)$ を求める。この位相計算には、2.4節で述べる局所モデル適合法を利用する。

得られる位相 $\phi'(x)$ は、

$2\pi f x + \phi(x) = 2\pi f_0 x + \phi'(x)$ の関係から、

$$\phi'(x) = 2\pi(f - f_0)x + \phi(x) \quad (5)$$

と表される。

ここで、 $\phi(x) = \text{一定}$ と見なせる領域(基準平面と呼ぶ)を考えると、図4のように、位相の勾配 $d\phi'/dx$ が周波数誤差 $f - f_0$ に依存する。よって、式(5)の両辺を微分して得られる次式により、周波数推定ができる。

$$f = f_0 + (d\phi'/dx) / 2\pi \quad (6)$$

ここで、位相勾配は、最低2点のデータから求めるので、最も簡易的には、基準平面内の異なる2点 (x_1, x_2) における位相 ϕ'_1, ϕ'_2 から、

$$f = f_0 + (1/2\pi)(\phi'_2 - \phi'_1) / (x_2 - x_1) \quad (7)$$

により、周波数 f が得られることになる。なお、正しい位相勾配を求めるため、通常、位相アンラッピングが必要である。

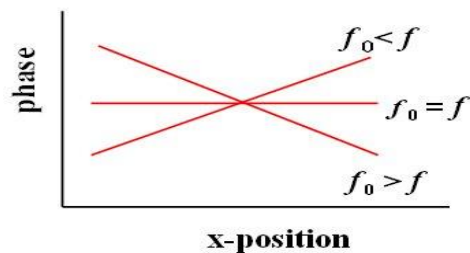


図4 位相勾配法による周波数推定の原理

次に、この方法を2次元に拡張すると、式(5)は次式のようになる。

$$\phi'(x,y) = 2\pi(f_x - f_{x_0})x + 2\pi(f_y - f_{y_0})y + \phi(x,y) \quad (8)$$

また、式(6)に相当する周波数推定式は、次式のようになり、x方向とy方向の周波数が同時に推定できる。

$$f_x = f_{x_0} + (d\phi'/dx)/2\pi \quad (9)$$

$$f_y = f_{y_0} + (d\phi'/dy)/2\pi \quad (10)$$

この方法は、干渉縞の周波数や方向に依らず、高精度で周波数推定ができるという特徴がある。

(2) 計算機実験

本提案手法の検証のため、以下のような計算機実験を行った。

【条件】

観測データ : $g(x) = \cos(2\pi fx)$

雑音付加 : (-0.1,+0.1) の一様雑音

モデル関数 : $g'(x) = A' \cos(2\pi f_0 x + \phi'(x))$

真の周波数 f : 0.020

初期周波数 f_0 : 0.019 (相対誤差 5%)

位相計算データサイズ : 25 点

【結果】

図5に観測データとモデル関数(ただし、振幅 A' を1、位相 ϕ を0としている)を示す。フィッティングにより得られたアンラッピング後の位相 $\phi'(x)$ と回帰式を図6に示す。位相勾配 0.00628 から、周波数推定値は、 $0.019 + 0.00628/2\pi = 0.02000$ となり、相対偏差 $1/2000$ 以下で真値と一致した。また、初期周波数の広い範囲で真値に収束することを確認した。

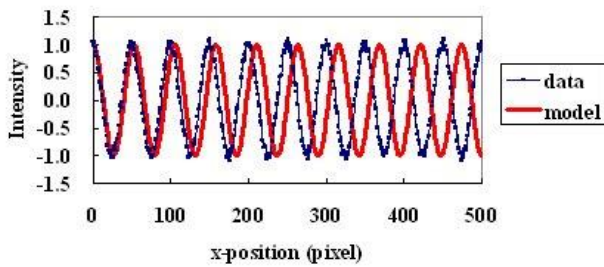


図5 観測データとモデル関数の波形

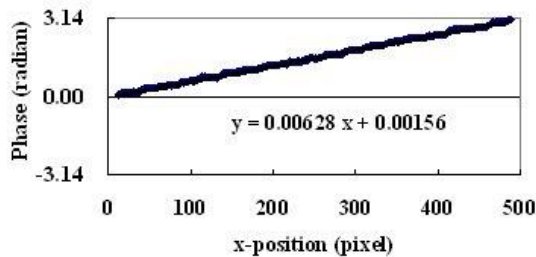


図6 位相と位相勾配

2.4 波長校正法

前節の手法により正確な縞周波数が得られるので、縞周波数 f が、波長光源の波長 λ に反比例することを利用して、3つの波長を相対的に校正することができる。すなわち、一つの波長を基準波長 λ_0 とし、他の二つの波長 λ_i を次式により校正する。

$$\lambda_i = (f_0/f_i) \lambda_0 \quad (11)$$

今回使用した光源の帯域幅は、表1のように20-35nmと広く、また、中心波長も厳密ではないので、本手法による波長校正は有用である。

2.5 位相計算法

各点における位相は、発表者が先に提案した局所モデル適合法 (LMF 法) [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で表される正弦波状モデル関数に最小自乗適合する。

$$g(x,y) = a + b \cos(\phi + 2\pi f_x x + 2\pi f_y y) \quad (12)$$

ここで、 a は直流成分、 b は干渉振幅である。位相 ϕ 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り、2.3項の推定法などにより既知であるとする。

ところで、式(12)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、そ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。

$$\xi_c = b \cos \phi \quad (13)$$

$$\xi_s = b \sin \phi \quad (14)$$

また、表記を簡単にするために、

$$\phi_c(x,y) = \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y) \quad (15)$$

$$\phi_s(x,y) = -\sin(2\pi f_x x + 2\pi f_y y) \quad (16)$$

とおく。すると、式(12)は次式のような線形なモデルになる。

$$g(x,y) = a + \xi_c \phi_c(x,y) + \xi_s \phi_s(x,y) \quad (16)$$

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。

$$J(a, \xi_c, \xi_s) = \sum_{i=1}^n [g(x_i, y_i) - a - \xi_c \phi_c(x_i, y_i) - \xi_s \phi_s(x_i, y_i)]^2 \quad (17)$$

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。

$$\mathbf{A} \begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{\xi}_c \\ \hat{\xi}_s \end{pmatrix} = \mathbf{g} \quad (18)$$

ここで、

$$A = \begin{pmatrix} n & \sum \phi_c(x_i, y_i) & \sum \phi_s(x_i, y_i) \\ \sum \phi_c(x_i, y_i) & \sum \phi_c(x_i, y_i)^2 & \sum \phi_s(x_i, y_i)\phi_c(x_i, y_i) \\ \sum \phi_s(x_i, y_i) & \sum \phi_s(x_i, y_i)\phi_c(x_i, y_i) & \sum \phi_s(x_i, y_i)^2 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$g = \begin{pmatrix} \sum g(x_i, y_i) \\ \sum g(x_i, y_i)\phi_c(x_i, y_i) \\ \sum g(x_i, y_i)\phi_s(x_i, y_i) \end{pmatrix} \quad (20)$$

である。

こうして得られた $\hat{\xi}_c, \hat{\xi}_s$ を、式(13)(14)から導出される次式に代入して位相 ϕ が求められる。

$$\hat{\phi} = \arctan(\hat{\xi}_s / \hat{\xi}_c) \quad (21)$$

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。

2.6 3 波長位相アンラッピング

2 波長ワンショット干渉法では、2 波長位相シフト法のために提案されている「等価波長」[10]の考え方が適用できた[8,9]。しかし、3 波長の場合にはそのままの適用が難しく、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) [11]を利用した提案がある[12,13]。

発表者らも、各波長で得られた位相から高さの候補値を算出し、予想される高さ範囲内で最も良く合致する高さ候補を自動探索する方法を採用した。すなわち、式(23)により高さの候補値 $h_i(n)$ を求め、図 7 に示すように、最も近接した高さ候補の組み合わせのレンジ (最大値と最小値の差) が最小になる高さを求める。

$$h_i(n) = (\phi_i / 2\pi + n) \cdot (\lambda_i / 2) \quad (23)$$

ここで、 i は波長番号 ($i=1,2,3$)、 n は次数、 ϕ は位相、 λ は波長である。

最適次数の探索範囲は、0 次縞の位置と凹凸レンジから決定する。

なお、この方法は位相接続が不要であり、各画素独立計算という特徴がある。

3. 実験結果と考察

提案手法の検証実験のために、図 8 に示す東レエンジニアリング(株)製 表面形状測定装置 SP-500 [14]の照明・撮像系を 3 波長撮像システムに交換し、3 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、段差が約 1130nm の標準段差試料を測定対象とした。

3.1 縞画像撮像

提案撮像系でカラー画像を撮像した (図 9)。中央下部に凹形状の段差がある。この画像を各色成分に分解すると、図 10 が得られる。波長に依存して、縞周期の変化していることが観察される。

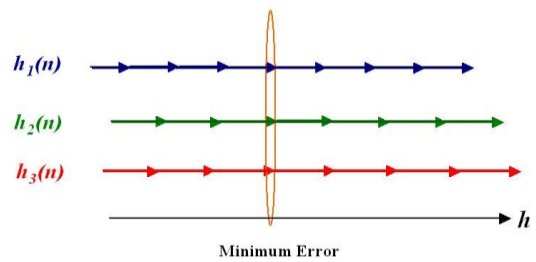


図 7 合致法の原理



図 8 実験装置

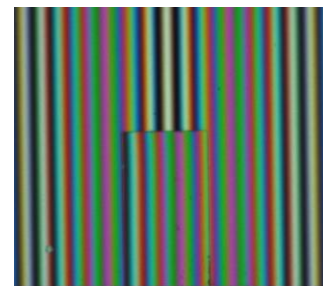


図 9 3 波長ワンショット画像

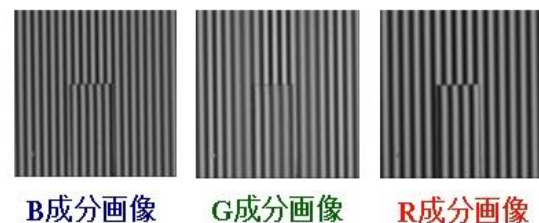


図 10 各成分画像

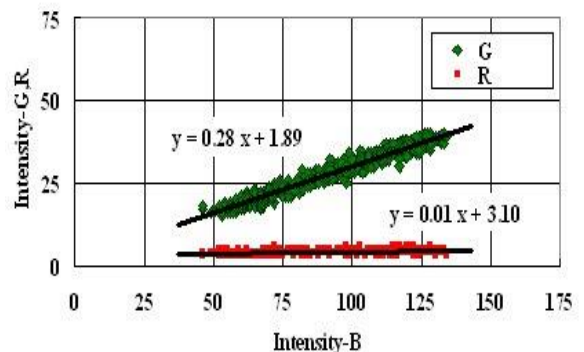


図 11 B から G,R へのクロストーク

3.2 クロストーク補正

まず、本撮像系におけるクロストーク補正係数を求める。B 照明のみを点灯して画像を採取し、G 輝度、R 輝度への寄与を求めた結果を図 11 に示す。

回帰係数から、クロストーク係数として、 $c=0.28$ 、 $e=0.01$ が得られた。同様の方法で、 $a=0.05$ 、 $f=0.04$ 、 $b=0.00$ 、 $d=0.04$ が得られた。

これらの係数を使用して、式(2)によりクロストークを補正した。補正前後の G 輝度プロファイルを図 12 に示す。補正前の波形では 2 つの周波数の混在によるビート信号が観測されるが、補正後の波形ではそれが消えている。図 13 は、FFT により得られた補正前後の信号の周波数スペクトルであり、480nm 付近の波長成分が補正により除去されていることが確認できる。

3.3 周波数推定

2.3 項記載の「位相勾配法」により、各波長のキャリア周波数を推定した。基準領域は画面上部の平坦面で、横 400×縦 200 画素の矩形とした。位相計算はデータサイズ 25×5 画素の LMF 法による。また、位相アンラッピングは、MST (Minimum Spanning Tree)法[15]による。結果を表 2 に示す。

表 2 周波数推定結果

Color	f_x (1/pix)	f_y (1/pix)
B	0.0394	0.0005
G	0.0343	0.0005
R	0.0301	0.0004

3.4 波長校正

前節の結果を利用し、R(赤)波長を基準にして、式(11)により他の 2 波長を校正した。結果を表 3 に示す。図 13 に示した波長スペクトルのピークと良く一致している。

表 3 光源の波長校正結果と公称波長

Color	校正結果(nm)	公称波長(nm)
B	478.5	470
G	548.9	530
R	(627)	627

3.5 位相計算

LMF 法により各波長の位相を求めた。使用データサイズは横 25 画素×縦 5 画素である。y=360 ラインにおける各波長の位相プロファイルを図 14 に示す。平坦面に傾斜がないことにより、設定周波数の正しさを確認できる。

3.6 高さ計算

位相データから、2.6 節に述べた「合致法」を用いて、高さを計算した。y=360 ラインの高さプロファイルを図 15 に、全面の 3 次元高さ計算結果を図 16、図 17 に示す。1130nm の段差が正しく測定で

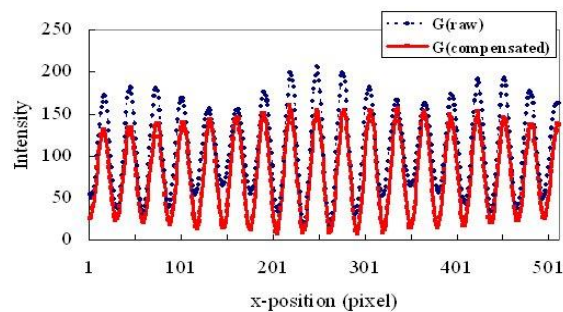


図 12 クロストーク補正の効果

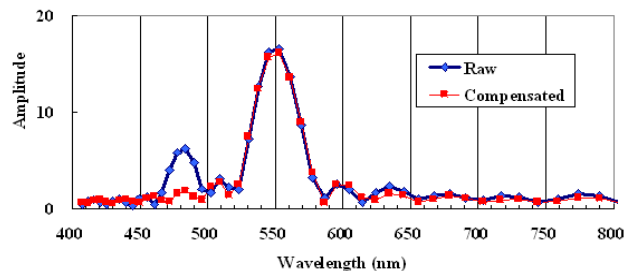


図 13 クロストーク補正による波長スペクトルの変化

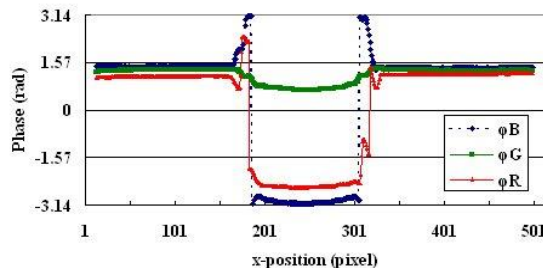


図 14 位相プロファイル (y=360 ライン)

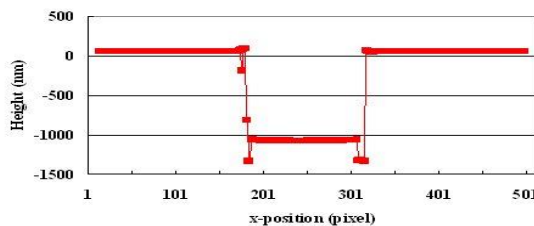


図 15 高さプロファイル (y=360 ライン)

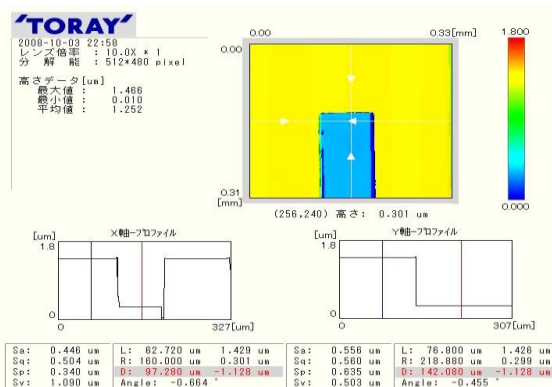


図 16 1130nm 段差測定結果画面

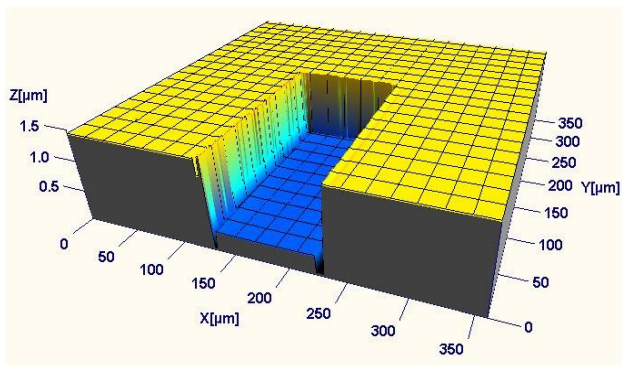


図 17 1130nm 段差計測結果 (3D 表示)

きている。なお、512×480 画素の全面の高さ計算に要する時間は、Pentium 1.6GHz 搭載の PC において 1.22sec であった。また、段差測定の実用性(σ)は数 nm 程度であり、本手法の十分な実用性を確認できた。

4. まとめ

本報告では、新しい干渉計測法として、3 波長ワンショット法を提案した。市販 LED 照明装置とカラーカメラにより、安価でコンパクトな 3 波長同時撮像干渉光学系を構成する。これにより得られる 1 枚のカラー干渉縞画像から、各波長の位相情報を抽出して 3 次元形状を求める。このために必要な要素技術として、

- (1) クロストーク補正法
- (2) 周波数推定法
- (3) 波長校正法
- (4) 位相計算法
- (5) 3 波長アンラッピング法

を確立した。

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。1000nm を越える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。

今後、使用波長の最適化、多波長アンラッピング手法の比較検討などにより、さらなる測定レンジ拡大とロバスト性の向上を図りたい。

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**, 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**, 156-160 (1982)
 [3] S. Toyooka and M. Tominaga: Spatial fringe scanning for optical phase measurement, *Opt. Commun.*, **51**, 68-70 (1984)
 [4] K. H. Womack: Interferometric phase measurement using spatial synchronous detection, *Opt. Eng.*, **23**, 391-395 (1984)

[5] J. Kato et al.: Video-rate fringe analyzer based on phase-shifting electronic moire patterns, *Appl. Opt.*, **36**, 8403-8412 (1997)
 [6] M. Sugiyama, H. Ogawa, K. Kitagawa, and K. Suzuki: Single-shot surface profiling by local model fitting, *Appl. Opt.*, **45**, 7999-8005 (2006)
 [7] 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)
 [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] 北川克一, 杉山将, 松坂拓哉, 小川英光, 鈴木一嘉: 2 波長ワンショット干渉計測, *ViEW2007 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集*, 189-195 (2007)
 [10] Y.-Y. Cheng and J.C. Wyant: Two-wavelength phase shifting interferometry, *Appl. Opt.*, **23**, 4539-4543 (1984)
 [11] 谷田貝豊彦:「光計測入門」, 丸善, 106-108 (1988)
 [12] K. Iwata, J. Zhang, and H. Kikuta: Consideration of fractional fringe method on the basis of the least squares method, *Optical Review*, **10**, 202-205 (2003)
 [13] A. Pfortner and J. Schwider: Red-green-blue interferometer for the metrology of discontinuous structures, *Appl. Opt.*, **42**, 667-673 (2003)
 [14] 東レ検査機器のホームページ:
<http://www.scn.tv/user/torayins/>
 [15] M. Takeda and T. Abe: Phase unwrapping by a maximum cross-amplitude spanning tree algorithm: a comparative study, *Opt. Eng.*, **35**, 2345-2351 (1996)

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.

This material is the final manuscript for:
 北川克一:「3 波長ワンショット干渉計測」、ViEW2008 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, 5-10 (2008.12.4-5;パシフィコ横浜)

This material is the final manuscript for:
 Katsuchi Kitagawa: "Three-Wavelength Single-Shot Interferometry", *Proc. of Vision Engineering Workshop (ViEW) 2008*, 5-10 (Yokohama, Dec. 2008) (in Japanese)