

### 3 波長ワンショット干渉計測におけるクロストーク係数推定

北川 克一\*

#### Crosstalk Coefficient Estimation for Three-Wavelength Single-shot Interferometry by Model Fitting Technique

Katsuichi KITAGAWA\*

Crosstalk compensation is an essential technique in three-wavelength single-shot interferometry which uses a commercially available RGB LED illuminator and a color camera in the imaging system. To estimate the crosstalk coefficient more easily than the conventional method, we have developed a new method which does not require three images. Instead, it estimates the coefficients from a single image by fitting the observed RGB data to a model function which is derived from a crosstalk model and an interference model. The test results agreed well with those by the conventional method.

**Key words:** crosstalk coefficients, crosstalk compensation, three-wavelength, interferometry, single-shot

#### 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<sup>1)~7)</sup>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枚の干渉縞画像からフーリエ変換法<sup>2)</sup>、空間位相同期法<sup>3)~5)</sup>、局所モデル適合法<sup>6),7)</sup> などにより表面形状が求められる。

しかし、この方法には、得られた位相から高さを求める際に、隣接画素間の段差が光源波長の1/4以下という制約条件があるため、測定レンジが狭いという問題がある。この問題解決のために、筆者らは、多波長ワンショット計

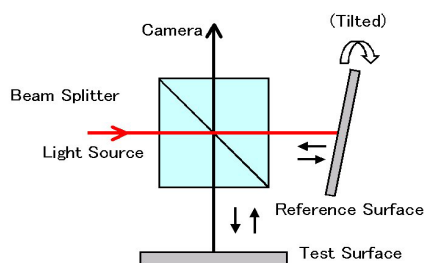


Fig. 1 Optics of spatial carrier method



Fig. 2 RGB-LED illuminator

測法を提案し、2波長の場合に350nm段差<sup>8)~9)</sup>、3波長の場合に1μm段差の測定に成功している<sup>10)~11)</sup>。

撮像系は、Fig. 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: Basler, 型式: sca640-70gc) により構成される。LEDのピーク波長 (カタログ値) は、470nm, 530nm, 627nmである。Fig. 3は、使用したカラーカメラの分光感度特性と、3個のLEDのピーク波長を示す。この3個のLEDを同時点

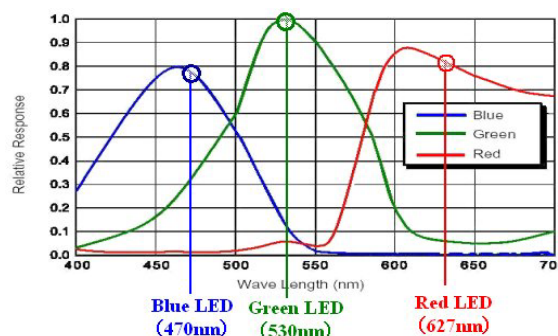


Fig. 3 Spectral sensitivity of the color CCD camera, with the peak wavelengths of three LEDs.

\* 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 滋賀県大津市大江 1-1-45 (E-mail: katsuichi\_kitagawa@toray-eng.co.jp)

\* R&D Center, Electronics Division, Toray Engineering Co., Ltd. (Received April 11, 2011)

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。しかし、カメラの R,G,B 分光感度曲線は互いにオーバーラップしているため、各信号間にはクロストークが発生する。特に、B 波長成分から G 信号へのクロストークは数十%と推測され、クロストーク補正が必要である。

筆者らは、カラー投影方式の三次元計測分野で報告されているクロストーク補正の考え方<sup>12~16)</sup>をワンショット干渉計測に適用し、以下に述べるクロストーク補正法を提案した<sup>17)</sup>。

クロストーク現象は、次式に示すような線形のモデルで表される。

$$\begin{pmatrix} B' \\ G' \\ R' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a & b \\ c & 1 & d \\ e & f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $B',G',R'$ は観測輝度、 $B,G,R$ は真の輝度、 $a, b, c, d, e, f$ はクロストークの強度を表す係数（以下、クロストーク係数、あるいは、係数と呼ぶ）である。真の輝度は以下の式により求めることができる。

$$\begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a & b \\ c & 1 & d \\ e & f & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} B' \\ G' \\ R' \end{pmatrix} \quad (2)$$

以上に述べたクロストーク補正のためには、クロストーク係数をあらかじめ求める必要があるが、筆者らは、照明を個別に点灯して得られる 3 枚の画像から、係数を求める方法（従来法、または、個別点灯法と呼ぶ）を使用してきた<sup>17)</sup>。しかし、この方法には、2.3 節で述べるいくつかの問題があり、「全灯点灯法」と呼ぶ新しい係数算出法を開発した。

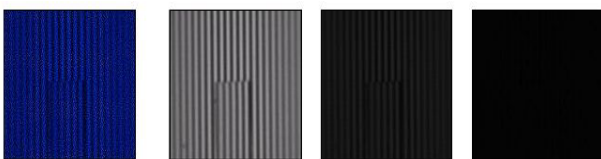
本報では、第 2 章で従来のクロストーク補正係数の算出法を述べ、第 3 章で新しい算出法を提案する。

## 2. 従来のクロストーク係数算出法

### 2.1 アルゴリズム

各波長の照明を単独点灯して 3 枚のカラー画像を撮像する。それらを色分解し、画像の各画素における R,B,G 輝度値を回帰分析する。この回帰係数がクロストーク係数である。具体的な方法を次節に示す。

### 2.2 実験結果



(a) Color image (b) B image (c) G image (d) R image

Fig. 4 Captured color image with B-LED on, and its decomposed B,G,R images.

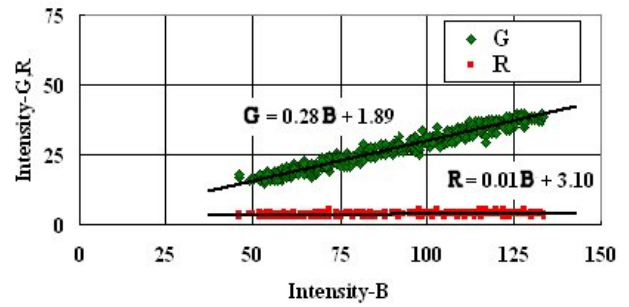


Fig. 5 Correlation among the RGB values

1 $\mu$ m 標準段差試料を対象表面とし、青色 LED 照明を単独点灯して得られたカラー画像と、その色分解により得られた BGR 成分画像を Fig. 4 に示す。この画像（512 $\times$ 480 画素）の上部、 $y=120$  ライン上の各画素における R,B,G 輝度値から、Fig. 5 に示すような B 輝度と G 輝度、R 輝度の相関図が得られ、その回帰係数から、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、他の LED を単独点灯し、(3)式に示す係数行列が得られた。Fig. 3 の分光特性から予想される数値と合致している。また、本係数を用いて、クロストークが有効に補正されることは、前報<sup>17)</sup>で報告した。

$$\begin{pmatrix} 1 & a & b \\ c & 1 & d \\ e & f & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0.05 & 0.00 \\ 0.28 & 1 & 0.04 \\ 0.01 & 0.04 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

### 2.3 従来法の問題点

従来法には、二つの問題点がある。第一に、照明を個別に点灯して 3 枚の画像を撮像し、その輝度を回帰分析する必要があるため、手間がかかる。第二に、多波長帯域フィルタ<sup>(注1)</sup>を用いる照明系<sup>18)</sup>のように、個別点灯の不可能な照明系には適用できない。これらの問題点を解決するため、照明を全灯点灯して得られた 1 枚のカラー画像からすべてのクロストーク係数を一括して求める方法を次章に提案する。

## 3. 新クロストーク係数算出法

### 3.1 アルゴリズム

3 波長ワンショット干渉計において、3 波長の照明を全灯点灯し、測定対象として、表面が均質で平坦な領域の存在する試料を選ぶ<sup>(注2)</sup>。すると、その平坦領域内では、干渉縞の直流成分 $\alpha$ 、干渉振幅 $\gamma$ 、位相 $\phi$ 、周波数 $f$ （これらを波形パラメータと呼ぶ）が一定と仮定できるので、 $x$  方

(注1) 多層薄膜干渉を利用した多波長帯域通過型フィルタ (Multi-Bandpass Filter) であり、ハロゲン光源のような白色照明装置 1 台と組み合わせて、多波長混合照明系が単純な構成で実現できる。

(注2) クロストークは、照明系と撮像系に依存する装置定数であり、試料には依存しない。よって、その係数算出時には、任意の試料を選択できる。

向にキャリア縞が存在するとして、あるライン上の座標点  $x$  における輝度  $B(x)$ ,  $G(x)$ ,  $R(x)$ は、以下の干渉縞モデルで表される。

$$\begin{cases} B(x) = \alpha_B + \gamma_B \cos(\phi_B + 2\pi f_B x) \\ G(x) = \alpha_G + \gamma_G \cos(\phi_G + 2\pi f_G x) \\ R(x) = \alpha_R + \gamma_R \cos(\phi_R + 2\pi f_R x) \end{cases} \quad (4)$$

(4)式を(1)式に代入すると、座標  $x$  における観測輝度が波形パラメータとクロストーク係数をパラメータとして、以下の式で表現される。

$$\begin{cases} B'(x) = \{ \alpha_B + \gamma_B \cos(\phi_B + 2\pi f_B x) \\ \quad + a \{ \alpha_G + \gamma_G \cos(\phi_G + 2\pi f_G x) \\ \quad + b \{ \alpha_R + \gamma_R \cos(\phi_R + 2\pi f_R x) \} \} \\ G'(x) = c \{ \alpha_B + \gamma_B \cos(\phi_B + 2\pi f_B x) \} \\ \quad + \{ \alpha_G + \gamma_G \cos(\phi_G + 2\pi f_G x) \} \\ \quad + d \{ \alpha_R + \gamma_R \cos(\phi_R + 2\pi f_R x) \} \\ R'(x) = e \{ \alpha_B + \gamma_B \cos(\phi_B + 2\pi f_B x) \} \\ \quad + f \{ \alpha_G + \gamma_G \cos(\phi_G + 2\pi f_G x) \} \\ \quad + \{ \alpha_R + \gamma_R \cos(\phi_R + 2\pi f_R x) \} \end{cases} \quad (5)$$

この観測輝度モデルと実測データとを最小二乗適合すること、すなわち、次式を評価関数とする最小二乗問題を解くことにより、クロストーク係数を得ることができる。

$$J = \sum_{i=1}^n \left[ \{B_i - B'(x_i)\}^2 + \{G_i - G'(x_i)\}^2 + \{R_i - R'(x_i)\}^2 \right] \quad (6)$$

ここで、 $n$  はデータ数、 $B_i$ ,  $G_i$ ,  $R_i$  ( $i=1, n$ ) は座標  $x_i$  における観測輝度値である。また、未知パラメータは、各波長の波形パラメータ  $\alpha_j, \gamma_j, \phi_j, f_j$  ( $j=B, G, R$ ) とクロストーク係数  $a, \dots, f$  の合計 18 個である。これら 18 個のパラメータが得られるためには、観測輝度値データが 18 個以上必要であり、これはデータ数  $n$  が 6 個以上必要であることを意味する。

### 3.2 実験方法と結果

1 $\mu$ m 標準段差試料を 3 波長ワンショット撮像した画像 (Fig. 6) を用いて、クロストーク係数算出を試みた。観測輝度値として、画像の  $y=120$  ライン上で、 $x$  座標が画面中央部の  $\pm 100$  画素 (データ数  $n=201$ ) の輝度値を使用した。そのデータを Fig. 7 に示す。非線形最小二乗適合には、Microsoft Excel 2003 の最適化ツールであるソルバーを使用した。クロストーク係数の初期値は、すべて 0 とし、波形パラメータの初期値は、Fig. 7 の波形から目視推定した。

適合されたモデル輝度波形を Fig. 8 に示す。観測輝度波形 (Fig. 7) と良く一致していて、適合が正しく行われていることがわかる。得られたクロストーク係数  $a, \dots, f$  を式 (7) に、各波長の波形パラメータ  $\alpha_j, \gamma_j, \phi_j, f_j$  ( $j=B, G, R$ ) を Table 1 に示す。

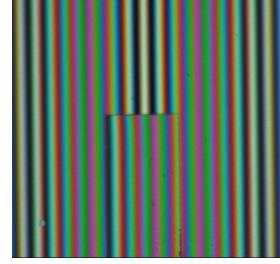


Fig. 6 Captured color image

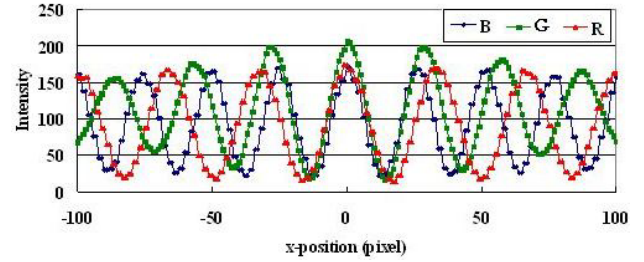


Fig. 7 Observed intensities

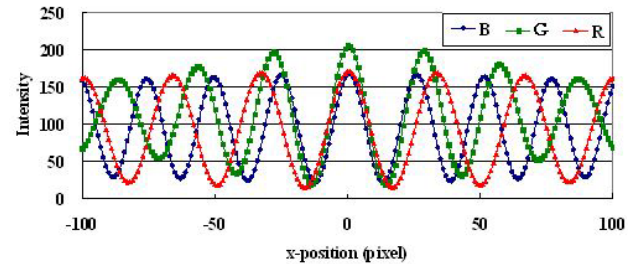


Fig. 8 Fitted values of intensities

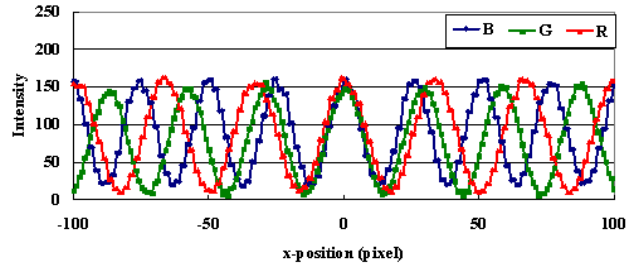


Fig. 9 Crosstalk-compensated intensities

$$\begin{pmatrix} 1 & a & b \\ c & 1 & d \\ e & f & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0.05 & 0.00 \\ 0.30 & 1 & 0.04 \\ 0.00 & 0.06 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Table 1 Obtained waveform parameters

	B	G	R
$\alpha$	90	80	87
$\gamma$	69	71	74
$\phi$	-0.15	-0.07	-0.09
$f$	0.0394	0.0344	0.0300

得られた係数は、(3)式に示した単独点灯法の結果とほぼ一致していて、本提案手法の妥当性を示している。また、(2)式により得られる補正後の輝度（真の輝度）を Fig. 9 に示す。各波長の輝度波形がほぼ正弦波になっていて、クロストーク補正の効果が顕れている。

#### 4. まとめ

3 波長ワンショット干渉計測のための新しいクロストーク係数算出法を提案した。3 波長の光源を点灯して得られる 1 枚のカラー画像の輝度値に、クロストークモデルと干渉モデルを組み合わせたモデル関数を最小二乗適合することによって、すべてのクロストーク係数を一括して推定する。市販 3 色 LED 照明装置とカラーカメラによる撮像系に適用した結果、良好な結果が得られ、本提案手法の妥当性が確認された。従来の光源を単独点灯する方法に比べて、操作が簡単であり、また、単独点灯が困難な照明系にも適用可能という特徴がある。

#### 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**, 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, I. Yamaguchi, T. Nakamura, and S. Kuwashima: 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 in Takamatsu* (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, 精密工学会誌, **75-2**, 273/277 (2009)

- 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**, 136/156 (2010)
- 12) D. Caspi, N. Kiryati and J. Shamir: Range imaging with adaptive color structured light, *IEEE Trans. on Patt. Anal. Machine Intell.*, **20**, 470/480 (1998)
- 13) P. S. Huang, Q. Y. Hu, F. Jin, and F. P. Chiang: Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring, *Opt. Eng.*, **38**, 1065/1071 (1999)
- 14) 佐藤辰雄, 築根秀男: カラー符号化を用いたレンジファインダ, 電気学会システム・制御研究会, SC-00-5, 23/28 (2000)
- 15) Z. Zhang, C. E. Towers, and D.P. Towers: Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency selection, *Opt. Express*, **14**, 6444/6455 (2006)
- 16) Z. H. Zhang, C. E. Towers and D. P. Towers: Phase and colour calculation in colour fringe projection, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **9**, 81/86 (2007)
- 17) 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)
- 18) 北川克一, 杉原洋樹: 3 波長ワンショット干渉法に基づいたインクジェット方式カラーフィルタ自動膜厚測定装置の高速化—多波長帯域フィルタと GPU の利用—, 精密工学会 2010 年秋季大会学術講演会講演論文集, 781/782 (2010)

[著 者 紹 介]

きた がわ かつ いち  
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)技監。2001 年度本会技術賞, ViEW2003 小田原賞, 手島記念財団発明賞を受賞。2011 年博士(情報理工学; 東京大学)。SICE 計測制御エンジニア。