

# 多波長ワンショット干渉計測技術の開発と実用化\*

Development of Multi-Wavelength Single-Shot Interferometry and its Practical Application

北川克一\*\* 坪井辰彦\*\* 杉原洋樹\*\*\* 杉山将† 小川英光††

Katsuichi KITAGAWA, Tatsuhiko TSUBOI, Hiroki SUGIHARA, Masaru SUGIYAMA and Hidemitsu OGAWA

**Key words:** Interferometry, surface profiler, three-wavelength, single-shot, color filter

## 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力な計測手法である。代表的な光干渉計測法として、垂直走査法（白色干渉法）と位相シフト法があり、干渉系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。しかし、複数枚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。また、移動物体や変動の激しい物体は測定できない。

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知られている<sup>1)</sup>。参照面を傾斜させてキャリア縞を導入し、フーリエ変換法などの縞解析手法により位相を検出し、位相から表面形状を得る（図1）。しかし、従来の縞解析手法は、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、高周波成分が失われ、水平分解能が低下するという問題がある。また、位相から高さに変換する際に、隣接画素との位相接続が必要であり、測定対象は平滑面でなければならないという問題もある。これら二つの問題を解決するために筆者らが開発した技術を以下に紹介する。

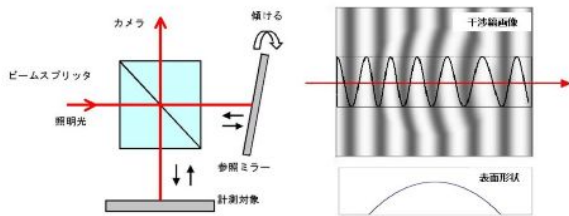


図1 キャリア縞導入方式の原理

## 2. 位相計算アルゴリズム

まず、第一の問題である水平分解能問題の解決のために、筆者らは、局所モデル適合法(Local Model Fit法; LMF法)という位相算出法を開発した<sup>2)</sup>。この方法は、図2に示すよう

に、局所輝度データに縞のモデル関数を適合させて位相を求める（図2）。以下、詳細を述べる。

LMF法では、試料表面の注目点の近傍で、干渉縞の直流成分 $a$ 、振幅 $b$ 、位相 $\phi$ が一定であると仮定する。すると、点 $(x,y)$ における干渉縞画像の輝度 $g(x,y)$ は次式で表される。

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

ここで、 $f_x$ 、 $f_y$ はそれぞれ $x$ 方向、および、 $y$ 方向のキャリア縞周波数である。この式を局所モデルと呼ぶ。

縞周波数 $f_x$ 、 $f_y$ は、参照面と試料面の相対的傾斜角度、および、波長や光学倍率により決まる大域の変数であり、画面内の縞数を計数する方法などにより予め求めておくことができる。その結果、式(1)の未知変数は $a$ 、 $b$ 、 $\phi$ の3個になる。LMF法では、それらを最小二乗法により決定する。すなわち、 $M$  ( $M \geq 3$ )個以上の輝度データを式(1)の局所モデルに適合させて、残差自乗和を最小にする未知変数を求める。ところで、式(1)のモデルは変数 $\phi$ 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、こ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。

$$\xi_c = b \cos \phi \quad (2)$$

$$\xi_s = b \sin \phi \quad (3)$$

また、表記を簡単にするために、

$$\phi_c(x, y) = \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y) \quad (4)$$

$$\phi_s(x, y) = -\sin(2\pi f_x x + 2\pi f_y y) \quad (5)$$

とおくと、式(1)は次式のような線形なモデルになる。

$$g(x, y) = a + \xi_c \phi_c(x, y) + \xi_s \phi_s(x, y) \quad (6)$$

この結果、 $a, b, \phi$ を求める問題は、 $a, \xi_c, \xi_s$ 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。

$$J(a, \xi_c, \xi_s) = \sum_{i=1}^M [a + \xi_c \phi_c(x_i, y_i) + \xi_s \phi_s(x_i, y_i) - g_i]^2 \quad (7)$$

ここで、 $g$ は点 $(x_i, y_i)$ における観測輝度値である。この問題の解 $a, \xi_c, \xi_s$ は次の3元連立方程式を解くことによって解析的に求めることができる。

$$\mathbf{A} \begin{pmatrix} a \\ \xi_c \\ \xi_s \end{pmatrix} = \mathbf{g} \quad (8)$$

ここで、

$$A = \begin{pmatrix} n & \sum \phi_c(x_i, y_i) & \sum \phi_s(x_i, y_i) \\ \sum \phi_c(x_i, y_i) & \sum \phi_c(x_i, y_i)^2 & \sum \phi_s(x_i, y_i)\phi_c(x_i, y_i) \\ \sum \phi_s(x_i, y_i) & \sum \phi_s(x_i, y_i)\phi_c(x_i, y_i) & \sum \phi_s(x_i, y_i)^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$g = \begin{pmatrix} \sum g_i \\ \sum g_i \phi_c(x_i, y_i) \\ \sum g_i \phi_s(x_i, y_i) \end{pmatrix} \quad (10)$$

である。こうして得られた  $\xi_s, \xi_c$  から位相  $\phi$  は、  

$$\phi = \text{atan}(\xi_s / \xi_c) \quad (11)$$

により求められる。この  $\phi$  から、高さ  $h$  は、  

$$h = (\phi / 2\pi + n)(\lambda / 2) \quad (12)$$

により求められる。ここで、 $n$  は整数であり、隣接画素間の位相差が  $\pi$  以下であるという前提のもとで、位相連続により決定される。

本手法は、フーリエ変換法に代表される従来法に比べ、横分解能が高く、計算負荷が低いという特徴がある。

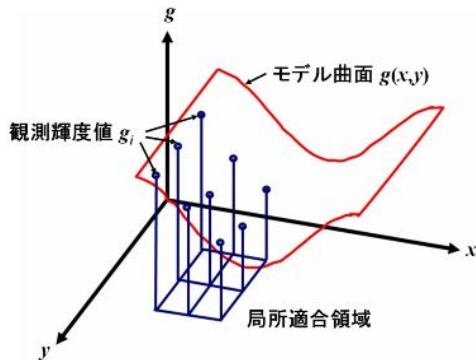


図2 LMF法の原理

### 3. レンジ拡大-多波長ワンショット法

次に、第二の問題である測定レンジ問題、すなわち、隣接画素間の段差制限問題の解決に取り組み、2波長ワンショット法、次いで3波長ワンショット法<sup>3)</sup>を開発した。

#### 3.1 3波長同時撮像系

3波長照明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した。照明系として、最初は市販の3色LED照明装置を使用した。その後、波長の最適化、コヒーレンス長の増大のために、3分岐ライトガイドによる3波長混色系を製作した。さらに、小型化、コストダウン、高輝度化を目的に、多波長帯域フィルタ(Multi-Bandpass Filter)による照明系を開発した(図3)<sup>10)</sup>。図4に実験装置全景を示す。ワンショット測定方式のため、防振台が不要であり、通常の机上に設置可能である。

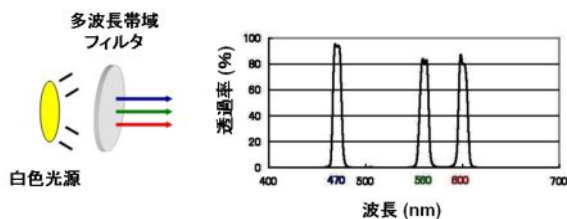


図3 多波長帯域フィルタの分光透過率



図4 実験装置

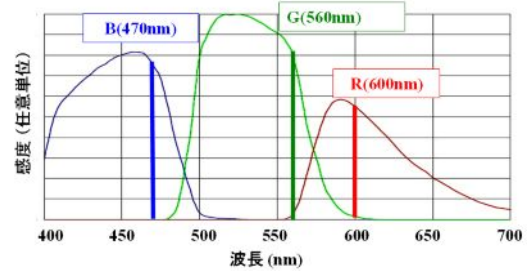


図5 カメラの分光感度と使用波長

#### 3.2 クロストーク補正

図5は、使用した3板カラーカメラの分光感度特性と、使用3波長を示す。カメラのRGB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。筆者らは、以下に述べるクロストーク補正法を開発した<sup>9)</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。

$$\begin{cases} B' = B + aG + bR \\ G' = cB + G + dR \\ R' = eB + fG + R \end{cases} \quad (13)$$

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クロストーク係数である。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、真の輝度は以下の式により求めることができる。

$$\begin{cases} B = B' - aG' - bR' \\ G = -cB' + G' - dR' \\ R = -eB' - fG' + R' \end{cases} \quad (14)$$

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。筆者らは、当初、照明を個別に点灯して得られる画像から、係数を求める方法を使用した。しかし、この方法は、多波長帯域フィルタを用いる照明系のように、個別点灯の不可能な照明系には適用できない。そこで、照明を全灯点灯して得られる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「全灯点灯法」と呼ぶ新しい係数算出法を開発した<sup>9)</sup>。

#### 3.3 周波数推定

局所モデル適合法による位相計算には、キャリア縞の周波数を予め推定する必要がある。正弦波信号の周波数推定法

としては、多くの推定手法が提案されている。しかし、精度が高く、計算負荷の低い実用的な手法は見当たらない。筆者らは、位相勾配を利用した周波数推定法を考案し、上記の問題を解決した<sup>7)</sup>。

### 3.4 多波長アンラッピング

位相アンラッピングは、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（測定レンジ）内で最も良く合致する高さ候補を選択する方法（合致法）による（図6）。すなわち、式(15)により高さの候補値 $h_j(n)$ を求め、最も近接した高さ候補のレンジ（最大値と最小値の差；合致誤差と呼ぶ）が最小になる高さを求める。

$$h_j(n) = (\phi_j / 2\pi)(\lambda_j / 2) + n(\lambda_j / 2) \quad (15)$$

ここで、 $j$ は波長番号( $j=1,2,3$ )、 $n$ は次数、 $\phi$ は位相、 $\lambda$ は波長である。

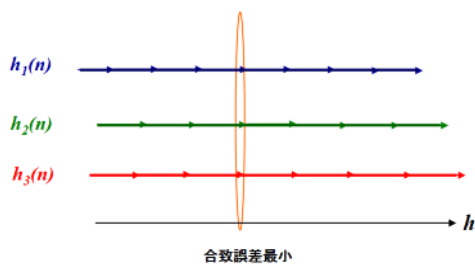


図6 合致法による位相アンラッピング

### 3.5 波長最適化

複数波長を使用して、測定レンジを拡大する手法は、位相シフト法など、他の干渉法と共通である。しかし、これまでに提案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、波長最適化の提案は数少なく、その最適化手法は確立されていない。筆者らは、図7に示すような合致誤差のプロファイルから測定レンジを推定する手法を確立した<sup>8)</sup>。これを利用して、市販カラーカメラの使用を前提にした場合の最適波長として、470nm(B)-560nm(G)-600nm(R)を選定した。この組み合わせでは、図7のように、合致誤差が数十nm以下になる極小値が約4,200nmの位置にあり、4 $\mu$ m程度の測定レンジが期待できる。

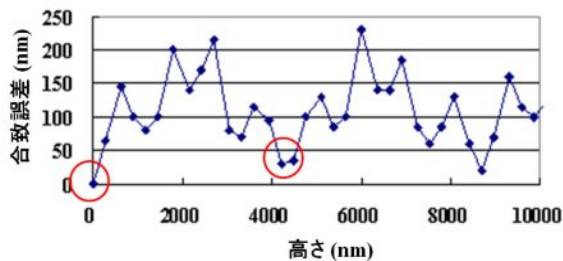
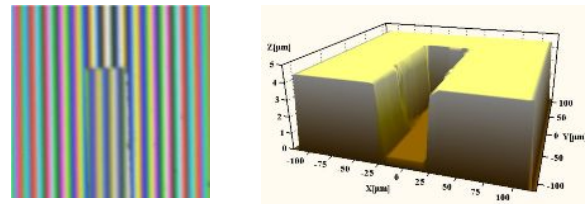


図7 最適波長の合致誤差線図

### 3.6 4 $\mu$ m 段差測定実験

本報告のワンショット測定法を用いて、4 $\mu$ mの急峻な段差を持つ試料を測定した。高精細カメラで撮像された画像の中央部512 $\times$ 480画素を測定対象領域とした。そのカラー画像を図8(a)に示す。また、測定結果を図8(b)に示す。4 $\mu$ m

の段差が安定して測定できていて、その測定再現性 ( $\sigma$ ) は約1nmであった。また、計算時間は、約2s (cpu : Intel Pentium 1.6GHz) であった。



(a) 干渉画像 (カラー) (b) 測定結果

図8 4 $\mu$ m 段差試料の測定

## 4. 本技術の応用

### 4.1 測定対象

インクジェット方式によるカラーフィルタ製造法では、多数のインクジェットノズルにより基板上的各画素(セル)にインクを塗布する。このため、膜厚が非常に重要な管理項目であるが、高速な膜厚測定技術は見当たらない。そこで、3波長ワンショット干渉計測法を利用した自動膜厚測定装置を開発した<sup>9,11)</sup>。膜厚測定対象は、各ノズルの吐出量を評価するための塗布テスト基板であり、100 $\times$ 100mm サイズの基板内に、約30万個のセルが存在する。各セルは、高さ約2 $\mu$ mのブラックマトリックス(BM)で囲まれている。図9(a)に示すように、RGB塗布セルの上下に、インクを塗布しない空セル・ラインを設け、測定された表面形状から、図9(b)に示すように膜厚を求める。

### 4.2 装置構成

開発した装置の外観を図10に示す。市販の3軸直交ロボットに測定光学系を搭載したもので、特別な除振対策は講じていない。顕微鏡の対物レンズ倍率は5倍であり、視野サイズは1.25 $\times$ 0.95mmである。カメラは高精細(1344 $\times$ 1024画素)なので、水平分解能(画素サイズ)は0.92 $\mu$ mである。使用計算機は、Windows PC (CPU 2GHz) であり、GPUを搭載した。

### 4.3 動作フローと自動化技術

#### (1) 動作フロー

本装置の動作フローを以下に示す。

①オートフォーカス→②撮像→③アライメント→④高さ測定→⑤膜厚計算→⑥ステージ移動→①に戻る。

ここで、ステージ移動は③～⑤の計算と並行して実行される。以下に、開発した自動化技術を述べる。

#### (2) オートフォーカス

各画面で表面形状を測定する際に、干渉縞画像の0次縞位置を検出し、それを高さ原点として絶対高さを求める。測定された空セル高さが常に一定になるように、ロボットのZ軸を制御する。

#### (3) アライメント

本装置のような自動装置では、撮像した各画像の位置ずれを画像処理により検出し、ソフト的に位置補正すること

が重要である。しかし、干渉画像では縞の存在のために、通常のアライメント技術が使用できない。筆者らは、位相画像を対象にするアライメント法を開発した。すなわち、撮像された画像をLMF法により位相画像に変換すると、空セル領域が矩形の暗部、または、明部として明確に顕れるので、通常の画像処理アライメント法により位置検出ができる。

#### (4) 膜厚計算

得られた高さデータから、空セル領域の高さを抽出し、それを基準面にして各セルの膜厚を計算する。各セルの中央部70×30画素の平均値を膜厚代表値とする。

### 4.4 テスト結果

#### (1) 表面形状測定結果

カラーフィルタ基板の干渉縞画像を図11(a)に、その表面形状測定結果を図11(b)に示す。エッジ部のノイズを除けば、従来手法（垂直走査干渉法）での高さ測定結果と良く一致した。

#### (2) 膜厚測定精度

繰り返し測定時の再現性（標準偏差 $\sigma$ ）は1~2nmであり、非常に良好である。

#### (3) 測定速度

位相計算はGPUの採用により、また、合致法による高さ計算は、Look-Up-Table方式の採用により、それぞれ大幅に高速化した<sup>10)</sup>。この結果、1画面あたりの所要時間を、1.5sに短縮することができた。この速度は、1画面が約140万画素で構成されているので、1画素あたり約1 $\mu$ sに相当する。

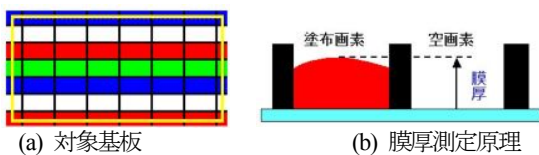
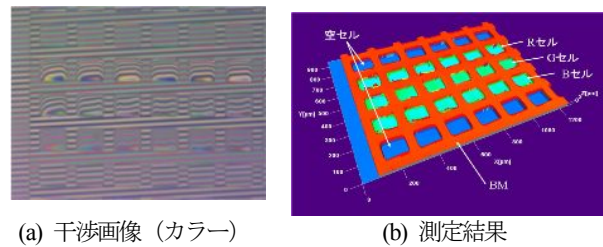


図9 測定対象基板と膜厚測定原理



図10 IJCF 自動膜厚測定装置



(a) 干渉画像 (カラー) (b) 測定結果

図11 カラーフィルタの測定

### 5. おわりに

新しい位相計算アルゴリズムと、多波長ワンショット法により、従来の諸問題を解決し、測定レンジ4 $\mu$ mのワンショット干渉計測技術を開発した。また、この技術を応用して、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を実用化し、防振機構なしで、nmオーダの測定精度と、1画面あたり1.5sの高速測定を実現した。本技術は、防振機構不要、低コスト、高速という特長があり、産業界における干渉計測の適用分野を大きく広げ、オンマシナ計測や、インライン計測への展望を開くものである。今後も、世界をリードする計測技術開発を通じて、“技術立国日本”の再興に貢献したい。

#### 参考文献

- [1] 北川克一：キーンノートスピーチ「ワンショット干渉計測—過去・現在・未来—」, 2011年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2011) 1027.
- [2] M. Sugiyama, H. Ogawa, K. Kitagawa, and K. Suzuki: Single-shot surface profiling by local model fitting, *Appl. Opt.*, **45**, (2006) 7999.
- [3] 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, (2008) 179.
- [4] K. Kitagawa: Fast surface profiling by multi-wavelength single-shot interferometry, *International Journal of Optomechatronics*, **4** (2) (2010) 136.
- [5] 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) (2009) 113.
- [6] 北川克一：3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, 計測自動制御学会産業論文集, (投稿中).
- [7] 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) (2009) 108.
- [8] 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, 精密工学会誌, (投稿中).
- [9] 北川克一, 坪井辰彦, 鈴木一嘉, 大槻真左文：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, (2010) 881.
- [10] 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, (2010) 781.
- [11] 北川克一, 杉原洋樹, 坪井辰彦, 鈴木一嘉, 大槻真左文：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, (採録決定).

-----  
\* 原稿受付 平成23年 月 日

\*\* 東レエンジニアリング (株) (滋賀県大津市大江  
1-1-45)

\*\*\* 東レ (株) (滋賀県大津市園山3-3-1)

† 東京工業大学 (東京都目黒区大岡山2-12-1)

†† 東京福祉大学 (群馬県伊勢崎市山王町2020-1)

北川 克一

1964年東京大学計数工学科卒業。同年東レ (株) 入社。  
2000年より東レエンジニアリング (株) 勤務。エレクトロ  
ニクス事業本部開発センター技監。情報理工学博士(2011)。

坪井 辰彦

2004年立命館大学 工学博士取得。2005年東レエンジニア  
リング(株)入社。現在、エレクトロニクス事業本部開発セ  
ンター2G技師

杉原 洋樹

1998年佐世保工業高等専門学校電子制御工学科卒業。同  
年東レ (株) 入社。エンジニアリング開発センター第3開発  
室計測・制御G部員。

杉山 将

2001年東京工業大学大学院情報理工学研究科計算工学専  
攻博士課程修了。博士 (工学) 。2003年より東京工業大学  
助教授 (2007年より准教授に名称変更) 。

小川 英光

1965年東京工業大学理工学部電子工学科卒業。通産省電  
気試験所(電子技術総合研究所)、東京工業大学を経て2007  
年より東京福祉大学教授。