

## 複プリズムを用いた共通光路位相シフト干渉顕微鏡の高精度化の研究

陳 軍 \*1

## Improvement of the phase measurement accuracy of common-path phase-shifting interference microscope using a Fresnel biprism

Jun Chen \*1

Several techniques are presented for improving the phase measurement accuracy of the common-path phase-shifting interference microscope. Experimental results for elimination of the system phase error using a subtraction procedure is shown. The residual RMS phase error smaller as  $\lambda/1000$  corresponding to 0.6nm was achieved. Experimental results for measuring the refractive index distribution of polarization-maintaining optical fibers are presented to demonstrate the usefulness of the method.

## 1. 背景と目的

高度情報化社会を支える基盤技術として、情報通信技術 (ICT) は、目覚ましい発展を遂げつつある。特に光ファイバーや光導波路型デバイスは ICT のキーデバイスとして重要である。デバイスの性能はコア部の屈折率や複屈折率分布に強く依存するため、高分解能・高精度計測技術が研究開発や生産現場で希求されている。加えて、近年の急速な社会の高齢化の進展から、病変細胞の識別や細胞機能の解明を目的とする生体細胞や生体組織の非侵襲定量計測の重要性と必要性が医学・生物分野でも高まっている。ミクロスケールの観測は透過型光学顕微鏡が有効であるが、ほぼ透明な生細胞は光吸収の差が微小であり、染色処理を施して観測されていた。しかし、染色観察法は生細胞そのものではなく、固定化組織の観測であり、定量計測も不可能であった。このような微小透明体 (位相物体) の観測は明暗のコントラストに変換したゼルニケの位相差顕微鏡<sup>1)</sup>や偏光干渉色のコントラストを付けて可視化する微分干渉顕微鏡<sup>2)</sup>により現実性を増したが、定性観察であり定量観察は望めなかった。

定量性を有する位相物体の観測には干渉と光学顕微鏡を合体した干渉顕微鏡が有効である。より高精度観測を実現するには位相シフト干渉法<sup>3,4)</sup>などの高精度位相計測法を現場使用に耐える安定性と高感度という、相反する因子で導入する必要がある。

このような戦略のもと、我々は、光導波路・光ファイバーなどの透過物体の屈折率分布を高速・高精度で計測するシステムの確立を目的として位相シフト干渉顕微鏡を1989年に世界に先駆けて提案した。<sup>5)</sup>しかし、マッハツェンダー干渉計を用いていたため振動や空気揺らぎに影響され、現場での応用展開には難があった。干渉計をマイケルソン型などに変更して検討を重ねたが同様に制約が生

じた。反射型である Mirau 型、マイクロフィジー型<sup>6)</sup>の導入は比較的簡単であるが表面形状計測では良好であるが位相物体の計測には不向きであった。

高感度と安定性の両立が高精度測定実現には必須である。そのブレイクスルーとして我々は共通光路に着目した。具体的には、複プリズムの横方向移動による位相シフト干渉顕微鏡の開発である。<sup>7,8)</sup>干渉する2光束はほぼ同じ光路を通ると、振動や空気揺らぎによる位相変動が相殺され、除振台なしでも干渉計測が可能となった。高精度干渉顕微鏡の実現を目指して、回折格子法<sup>9,10)</sup>、ゼロ次光参照光法<sup>11)</sup>、位相ロック干渉法など<sup>12)</sup>の多くのシステムが提案されているが、我々の提案した共通光路位相シフト干渉顕微鏡システムは(1)光学顕微鏡との親和性、(2)位相シフト導入の正確性、(3)顕微鏡の空間分解能の保持性などの点で他システムより格段の優位性を有している。

本研究では、共通光路位相シフト干渉顕微鏡システムのさらなる高精度化の実現を目的とした方法と結果について述べる。

## 2. 原理と光学系

本研究で用いた透過型位相シフト干渉顕微鏡の構成を図1に示す。これは透過型光学顕微鏡の結像系に複プリズムを挿入したもので、光源には強度安定化 He-Ne レーザ (HP 社製、発振波長: 632.8nm、パワー: 2mW) を用いた。光源からの光を平行光にしたのち、被検試料を照射する。このとき、被検試料を入射光の片側に位置するように設定し、残りの片側は参照光として用いる。試料は対物レンズ (20X, NA 0.40) 及び拡大レンズによって拡大し、検出面に結像される。検出面と拡大レンズの間に鋭角  $2^\circ$  の複プリズム (BK7) を挿入した。これにより、物体光と参照光は互いに重なり合うように屈折し、検出面で干渉する。なお、

\*1 東京工芸大学工学部工学科教授  
2020年3月25日 受理

複プリズムの稜線による光の回折の影響を除去するため、試料の中間像面に細いワイヤを設置し、稜線にあたる光を除去した。位相シフト干渉法を適用して高精度計測を実現するため、複プリズムを piezo 素子に取り付け、光軸に垂直な方向で移動させて位相シフトを導入する。2π の位相シフトを与えるための複プリズム移動量は 18.121μm であった。

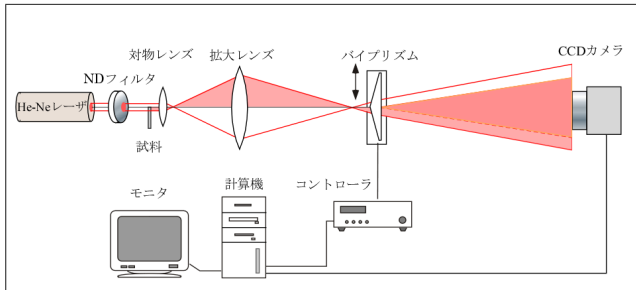


図1 共通光路位相シフト干渉顕微鏡の構成図

位相シフトを与えた干渉縞の強度分布は CCD カメラで検出され、画像ボードを介してコンピュータに取り込まれる。干渉縞の強度分布は

$$I(x, y; \delta_j) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi fx + \varphi_s(x, y) + \varphi_o(x, y) + \delta_j] \quad (1)$$

と表すことができる。ここで  $a(x, y)$  と  $b(x, y)$  は干渉縞のバイアスと振幅で、 $2\pi fx$  は干渉する 2 光束の波面の傾きで、また、 $\varphi_s(x, y)$  は被検物体がないときの検出位相で、システム誤差である。 $\varphi_o(x, y)$  は被検の位相分布で、厚さ  $t$ 、屈折率分布  $n(x, y)$  の試料の場合、

$$\varphi_o(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} t [n(x, y) - n_r] \quad (2)$$

となる。 $\delta_j$  は複プリズムの横移動による位相シフトである。位相計測を行う際、piezo 素子で複プリズムを光軸に対して横方向に移動させて  $\delta_j = (j-1)\pi/2$ , ( $j=1\sim 5$ ) のように位相シフトを導入し、5つの干渉縞画像  $I_j$  をコンピュータに取り込み、位相導出アルゴリズムを用いて被検の位相分布を計算する。一般に、4-Step 法の位相導出アルゴリズム、

$$2\pi fx + \varphi_s + \varphi_o = \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \text{ mod } 2\pi, \quad (3)$$

を用いて位相計算を行う。しかし、線形的な位相シフト誤差がある場合は、5-StepB というアルゴリズム

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{I_1 - 4I_2 + 4I_4 - I_5}{I_1 + 2I_2 - 6I_3 + 2I_4 + I_5} \right) \text{ mod } 2\pi, \quad (4)$$

がより有効である。算出された位相分布から波面の傾き成分を除去したのち、(2)式から被検の屈折率分布を算出した。

干渉する 2 光束はほぼ同じ光路を通り外乱や振動に強い。また、位相シフトはプリズムの横方向移動によって導入され、反射鏡の移動を用いた方法に比べ、同じ位相シフトを

与えるための移動量が大きく、位置制御の精度や安定性の条件が大幅に緩和される。

しかし、位相シフト誤差による影響やシステム誤差が存在し、これらを低減すれば、位相計測精度のさらなる高精度化が可能となる。

### 3. 誤差低減の実験と実験結果

位相計測誤差の主な原因は次の二つである。一つは位相シフト誤差で、与えられた位相シフトが正確に  $\pi/2$  の整数倍にならず、ずれがある。位相導出アルゴリズムは位相シフトが正確に  $\pi/2$  ずつ与えられていることを前提として導出したもので、位相シフト誤差はもちろん位相計測誤差をもたらす。もう一つはレーザビームや光学系を構成する光学部品の不完全性、波面収差などに由来する誤差である。以下に、それぞれの誤差除去法と実験結果について述べる。

#### 3.1. 位相シフト誤差による影響の低減

二つのアルゴリズムに対して、位相シフト誤差が存在する場合の位相計測誤差を解析し、5-StepB の方が位相計測誤差を大幅に低減できることが判明した。以下に、5-StepB を用いた結果を述べる。

#### 3.2. システム誤差の計測と除去

システム誤差を計測するには、被検試料を入れずに、位相計測を行えばよい。複プリズムを piezo 素子で  $4.53\mu\text{m}$  ずつ移動させて位相シフトを導入し、5つの干渉画像をコンピュータに取り込んだ。それらの干渉画像を図 2 (a)~(e) に示す。

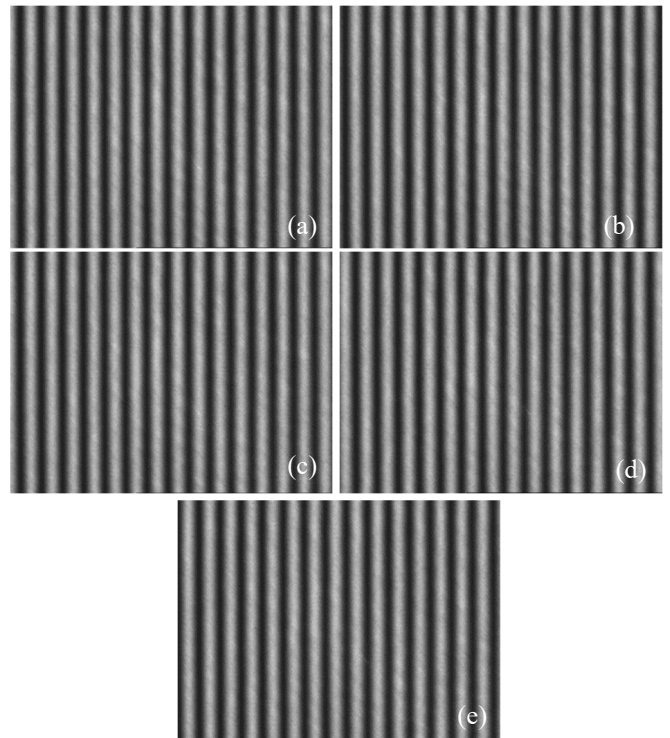


図2  $\pi/2$  ほどの位相シフトを与えた 5 つの干渉縞画像 (3) 式の位相導出アルゴリズムで算出した位相分布の 3D

プロットと中心線に沿ったラインプロファイルを図3(a)と(b)に示した。干渉する2光束間の波面の傾きに対応している。なお、PV=15.159λは干渉縞の本数を意味する。

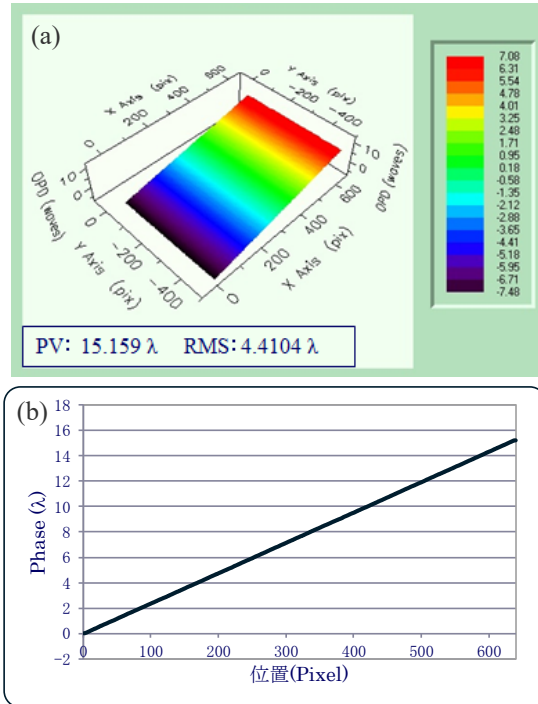


図3 計測で得られた位相分布

最小2乗法を用いて、得られた傾きの位相分布を平面に適合したうえ、傾き成分を除去したものの擬似カラー表示画像とラインプロファイルを図4に示した。PVでλ/30程度の誤差があった。

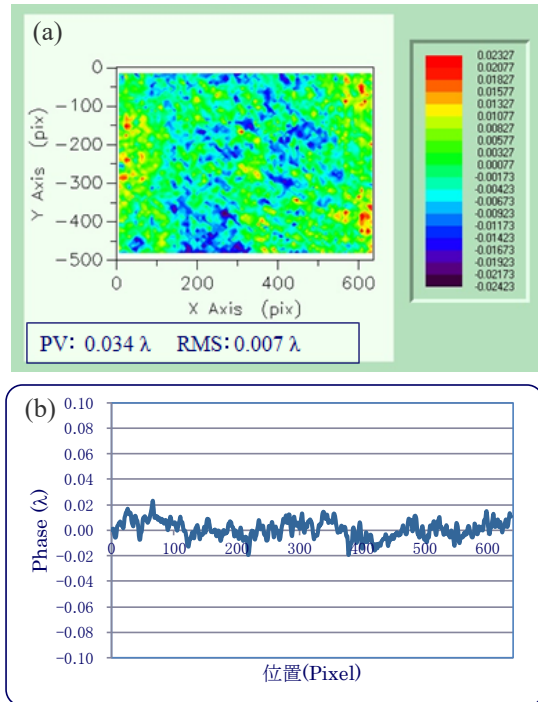


図4 (a)システム誤差の擬似カラー画像  
(b)誤差のラインプロファイル

今回のシステムが共通光路を有し、非常に高い再現性

があるため、システム誤差をコンピュータに保存しておけば、以降の計測結果から減じて除去できる。そこで、再度位相計測を行い、システム誤差を除去した結果を図5に示す。PVでλ/200、RMSでλ/1000(0.6nm相当)の著しく高い精度が得られた。

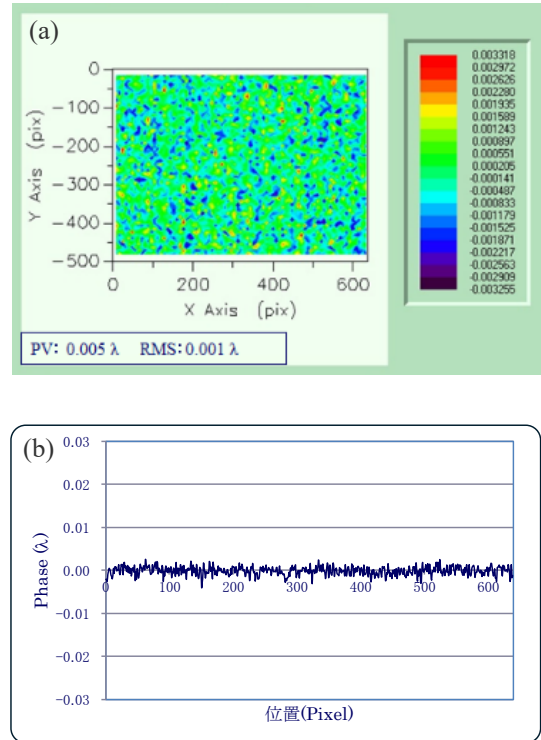


図5 (a)システム誤差を除去したあとの誤差分布画像  
(b)誤差のラインプロファイル

### 3.3. 偏光保持光ファイバーの計測

高精度化した位相シフト干渉顕微鏡の有効性を示すため、Bow-tie型偏光保持光ファイバーの測定を行った。計測サンプルは、外径125μmの偏光保持光ファイバーを厚さ31μmにスライスし、研磨したものをを用いた。図6にサンプルの透過型光学顕微鏡像を示す。測定結果を図7に示した。(a)は干渉画像の一つで、(b)~(d)はそれぞれ計測で得られた位相分布(屈折率分布に比例)の擬似カラー、位相分布の3Dプロット、ラインプロファイルである。中心部のコア部の屈折率が最も高く、“肩部”はクラッド、その両サイドは応力付与部に対応している。応力付与部の屈折率が最も低くなっている。従来困難な微小領域の屈折率分布を高い精度と安定性で計測可能であることを明示できた。





図6 Bow-tie型偏光保持光ファイバーの断面写真

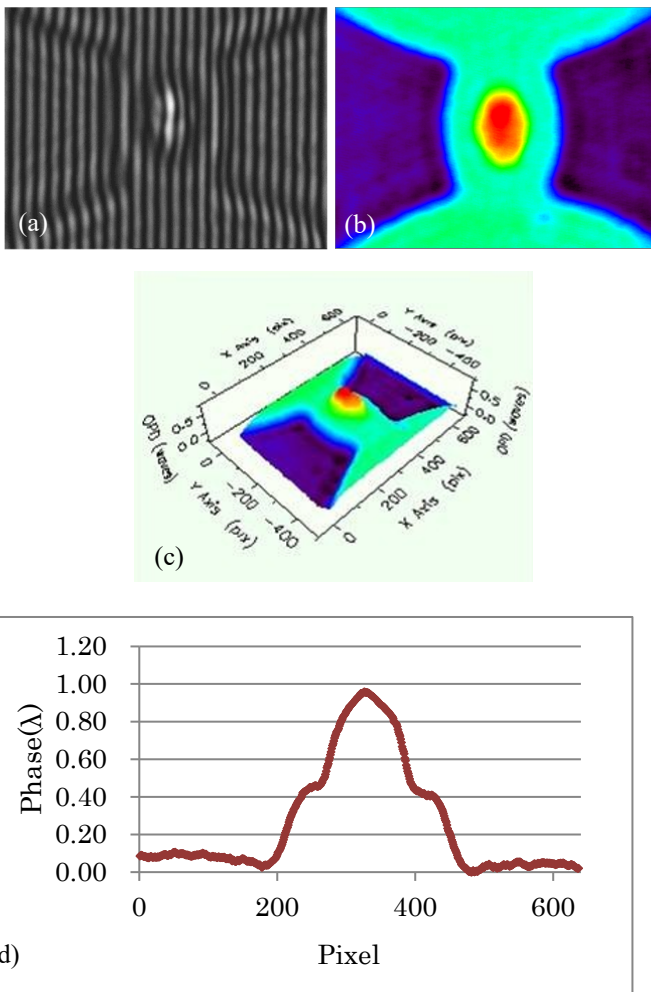


図7 Bow-tie型偏光保持光ファイバーの屈折率分布の計測結果：(a)干渉縞画像 (b)位相分布の擬似カラー画像 (c)位相分布の3Dプロット (d)中心線に沿ったラインプロファイル

#### 4. まとめ

複プリズムの横方向移動を用いた透過型位相シフト干渉顕微鏡は、波面分割型干渉計に位相シフト法を適用したユニークな光学系である。干渉する2光束がほぼ共通の光路を取るため、振動や空気の揺らぎなどの外乱に強く、除

振台なしでも高精度な計測が可能となった。複プリズムの横移動によって位相シフトを導入した。移動幅が大きく位置制御がしやすいことに加え、振動に強くなった。この優れた安定性を活かし、システムノイズをバックグラウンドノイズとして除去する方法を提案し、位相計測のさらなる高精度化を実現できた。この方法は光導波路の研究・生産現場での応用が期待される。

#### 参考文献

- 1) F. Zernike, "Phase-contrast, a new method for microscopic observation of transparent objects," *Physica* 9(7), 686-698 (1942).
- 2) G. Nomarski, "Microinterferométrie différentielle et ondes polarisées," *J. Phys. Radium* 16, 9-135 (1955).
- 3) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White, and J. Brangaccio, "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surface and lenses", *Appl. Opt.* 13, 2693-2703 (1974).
- 4) H. Schreiber, J. H. Bruning, "Phase Shifting Interferometer", in *Optical Shop Testing*, D. Malacara, ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 547-666 (2007).
- 5) J. Chen, N. Baba, and K. Murata, "Quantitative measurement of a phase object by fringe scanning interference microscopy", *Appl. Opt.* 28, 1615-1617 (1989).
- 6) Y. Ishii, J. Chen, R. Onodera, T. Nakamura, "Phase-shifting Fizeau interference microscope with a wavelength-shifted laser diode", *Opt. Engineering*, Vol.42, No.1, 60-67 (2003).
- 7) J. Chen, J. Endo, Y. Niino, and H. Fujita, "Phase-shifting interference microscopy using a Fresnel's biprism", *Proc. of SPIE*, 4416, *Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology*, 158-161(2001).
- 8) J. Endo, J. Chen, D. Kobayashi, Y. Wada, and H. Fujita, "Transmission laser microscope using a phase-shifting technique and its application to measurement of optical waveguide", *App. Opt.* 41, 1308-1314(2002).
- 9) G. Popescu, T. Ikeda, R. R. Dasari, and M. S. Feld, "Diffraction phase microscopy for quantifying cell structure and dynamics," *Opt. Lett.* 31(6), 775-777 (2006).
- 10) T. Ikeda, G. Popescu, R. R. Dasari, and M. S. Feld, "Hilbert phase microscopy for investigating fast dynamics in transparent systems," *Opt. Lett.* 30(10), 1165-1167 (2005).
- 11) G. Popescu, L. P. Delored, J. C. Vaughan, K. Badizadegan, H. Iwai, R. R. Dasari, and M. S. Feld, "Fourier phase microscopy for investigation of biological structures and dynamics," *Opt. Lett.* 29, 2503-2505(2004).
- 12) E. Watanabe, T. Hoshiba, and B. Javidi, "High-precision microscopic phase imaging without phase unwrapping for cancer cell identification," *Opt. let.* 38, 1319-1321 (2013).