

シングルショット高精度位相計測透過型干渉顕微鏡の開発 Single-shot phase-shifting interference microscopy using a polarization camera

陳 軍, 豊田 光紀
Jun Chen, Mitsunori Toyoda

東京工芸大学、243-0297 神奈川県厚木市飯山南5-45-1
Tokyo Polytechnic University, 5-45-1 Iiyama-Minami, Atsugi, Kanagawa 243-0297, Japan

概要

光導波路や生物試料のような微小で透明な位相物体の迅速、高精度計測のため、偏光カメラを用いたシングルショット透過型共通光路位相シフト干渉顕微鏡を開発しました。位相シフト干渉顕微鏡では、干渉する物体光と参照光の間に、 $\pi/2$ ずつの位相シフトを導入した4つの干渉縞画像からサブナノメートル以下の精度で被検の位相を高精度で計測できます。しかし、位相シフトを与えた複数の干渉画像の撮影が必要のため、動的な計測には不向きである。そこで、個々の画素に異なる偏光方向の偏光板を貼り付けた偏光カメラを導入することでシングルショット位相計測を可能にしました。

1. はじめに

光導波路や生物細胞のような微小で透明な位相物体の高精度計測はフォトニクスやバイオニクスの分野で強く求められている[1]。我々はバイプリズムやウォラストンプリズムの横移動を用いた共通位相シフト干渉顕微鏡の研究に取り組んできた [2~4]。このシステムでは干渉する2光波がほぼ同じ光路を通過するため、振動や空気ゆらぎなどの影響をほとんど受けない。また、必要な位相シフトはプリズムの横移動で精密に導入できる。微小な位相物体を高精度で計測できることから研究や生産現場で応用されている。しかし、ピエゾ素子でプリズムを移動させて位相シフトを導入しているため、秒程度の時間がかかる。そのため、実時間の計測には不向きであった。そこで、偏光カメラを用いるシングルショット共通光路位相シフト干渉顕微鏡を構成し、実験でその有効性を確かめたので報告する。

2. 光学系と原理

偏光カメラを用いる透過型位相シフト干渉顕微鏡の構成をFig.1に示す。これは透過型光学顕微鏡の結像系にウォラストンプリズム(WP)(方解石、分離角 2°)を挿入したもので、光源には強度安定化He-Neレーザー(HP社製、発振波長:632.8nm、直線偏光、パワー:2mW)を用いた。光源からの光を平行光にし、 $\lambda/2$ 板で光の偏光方向を 45° 方向に調整したのち

試料を照射する。

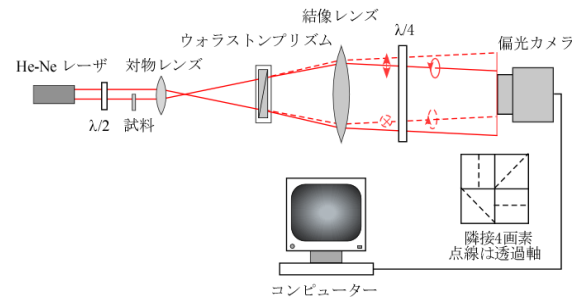


Fig.1 Experimental setup

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。試料は無遠補正の対物レンズ(20倍、NA0.4)と焦点距離が200mmの結像レンズでカメラの撮像面に結像される。試料を透過した光と試料のない部分を透過した光はWPによって偏光方向が直交する二つの光に分け、 $\lambda/4$ 板で右、左回りの円偏光にしたのち、検出面で重ね合わせる。干渉縞の検出には、個々の画素の前に、透過軸が 45° ずつ回転した微小な偏光板が張り付けた偏光カメラ(ソニー製、XCG-CP520)を用いる。位相シフトを与えた4つの画像がシングルショットで撮像できるため、リアルタイムの計測が可能となる。干渉縞の強度分布はCCDカメラで検出され、コンピューターに取り込まれる。干渉縞の強度分布は

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

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光波の波面の傾きで、 $\delta_j (j=1\sim 4)$ は偏光カメラによって導入される位相シフトである。Fig.1の挿入図には隣接4画素に張り付けた偏光板の透過軸の方向を示した。 45° の透過軸の方位差が 90° の位相シフトに対応する。 $\varphi(x, y)$ 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、

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

となる。ただし、 n_r は参照領域の屈折率である。シングルショットで撮像した一つの干渉縞画像から4つの位相シフトした画像が得られ、位相計測が可能とな

る。

3. 実験と実験結果

開発した干渉顕微鏡の性能を確かめるためいくつかの実験を行った。

3.1 位相計測の線形性とシステム誤差

まず、位相計測の線形性とシステム誤差を評価するため、被検試料を入れずに、チルト波面の計測を行った。実験結果をFig. 2に示す。Fig. 2(a)はモザイク様の画像だが、同じ偏光方向の画素を抽出すると、(b)のような $\pi/2$ ずつ位相シフトした干渉画像が得られた。これらの干渉画像に対して4-Step位相導出法で計算したチルト位相分布の3Dプロットとラインプロファイルを示す(c)と(d)を示す。また、光学系のひずみとそれを除去した残差を(e)、(f)に示し、rms誤差は約3.6nmであった。

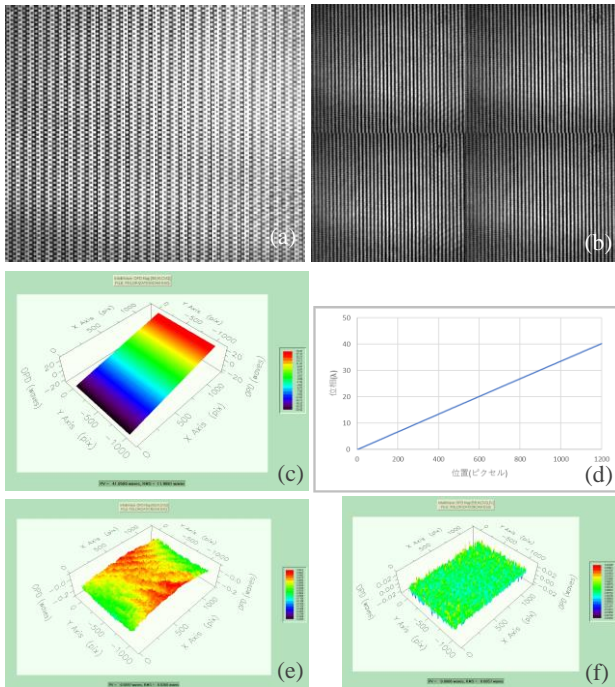


Fig.2 Experimental results for measuring the tilt wavefront between the object and reference waves.

3.2 偏光保持光ファイバーの計測

偏光カメラを用いた位相シフト干渉顕微鏡の有効性を確かめるため、PANDA型偏光保持光ファイバーの測定を行った。計測サンプルとしては、偏光保持光ファイバーを厚さ $31\mu\text{m}$ にスライスし、研磨したものをを用いた。計測結果をFig.3に示し、(a)~(d)はシングルショットで撮像した1枚の画像から抽出した4つの位相シフトを与えた干渉画像で、(e)と(f)は計測で得られた位相分布(屈折率分布に比例)の擬似カラー表示と位相分布の3Dプロットである。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ことがわかる。また、試料を移動させながら位相シフトを与えた干渉縞画像の動画が撮像でき、動的な計測が可能であることが分かった。

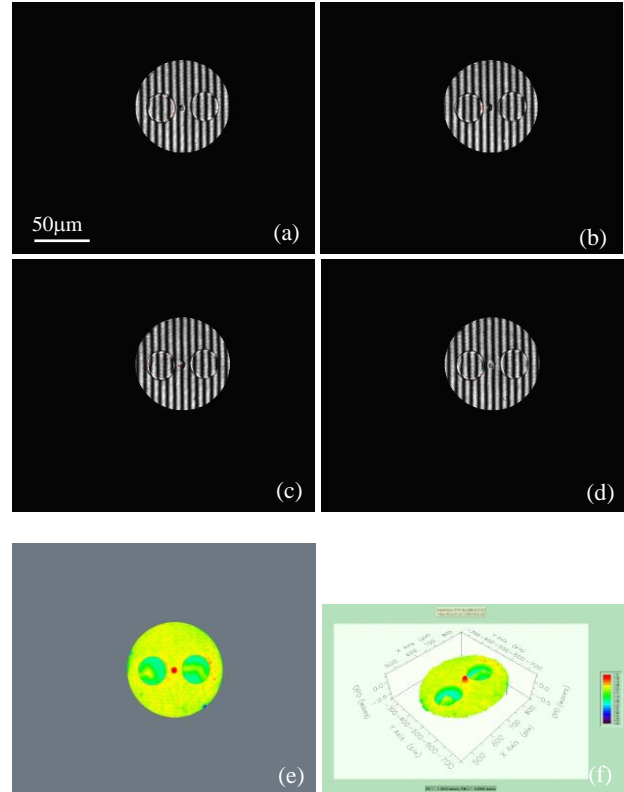


Fig.3 Experimental results for measuring polarization remaining optical fiber.

4. まとめ

微小な位相物体の高精度実時間計測を実現するため、透過型共通光路位相シフト干渉顕微鏡システムに偏光カメラを導入し、基礎的な実験を行った。バックグラウンドノイズを取り除いたRMS誤差は200分の1波長であった。光ファイバーの計測実験で、この方法の有効性を確かめた。

6. 参考文献

- [1] M. K. Kim, “Digital Holographic Microscopy”, Springer, (2011).
- [2] J. Endo, J. Chen, D. Kobayashi, Y. Wada, and H. Fujita, Appl. Opt. 41, 1308(2002).
- [3] 陳 軍, 東京工芸大学工学部紀要 Vol.43, No.1, 258(2020).
- [4] 陳 軍, 菱山大吾, 豊田光紀, 第71回応用物理学会春季学術講演会 24a-P05-5 (発表予定, 2024).