

## 位相シフト量推定に基づく高精度位相シフト干渉法

遠藤 潤二<sup>\*1</sup> 陳 軍<sup>\*2</sup>

## Phase-shifting interferometry using estimated initial phases

Junji Endo<sup>\*1</sup> Jun Chen<sup>\*2</sup>

Phase-shifting interferometry is a very powerful tool for high-precision measurement both in industry and in scientific research. However, the measurement accuracy is strictly affected by the phase shift values that introduced to form interferograms. Usually an expensive equipment such as a piezoelectric device is used, and a pre-calibration procedure is also needed. The authors propose a method to estimate the phase shift value of each interferogram from the intensity distribution. The usefulness of the proposed method was demonstrated by computer simulation.

## 1. 緒言

光学分野において反射鏡やレンズなどの品質を評価するために、様々な計測法が開発され、また実用に供されてきた。干渉計測法は、非接触かつ高精度な計測が可能であることから、幅広く用いられている。

数ある干渉計測法の中でも、位相シフト法<sup>1-3)</sup>は特に高精度であることが知られている。物体光と参照光との相対的な位相差を変えた 3 枚以上の干渉画像を計測に用いることで、照明光の光量ムラが計測に及ぼす影響を排除できることが高精度の一番の要因である。

光源にレーザ、干渉素子に複プリズムを用いた透過型の干渉計の例を図 1 に示す。光源から射出した可干渉光を 2 本に分け、一方は被検物体を透過あるいはそこで反射して位相が変化した物体光とし、他方を参照光として両者を干渉させ、形成された干渉縞の間隔や曲がり具合から物体光の位相を計測するというものである。

図 1 の干渉計で、パイプリズムを図の左右方向に微動させれば、容易に位相シフト法を実現することができる。<sup>4-5)</sup>例えば -x 方向に微動すると、参照光はパイプリズムのより厚いところ、物体光はパイプリズムのより薄いところを通るので、図の状態と比べて物体光は位相が進み参照光は位相が遅れて、両者の相対的な位相差が変わる。通常は、複数枚の干渉画像間の位相差が事前に高い精度で判っている必要があるため、ピエゾ素子などを用いて高精度に位相を制御しながら、その都度干渉画像を撮影していた。また計測に先立って、位相制御機構、図ではパイプリズムを微動する機構の制御量と実際の位相シフト量の間の関係をキャリブレーションデータとして持っている必要がある。

一方、位相差が判っていない場合の計算処理法も考案されている。<sup>6-9)</sup>いずれの方法も複雑な計算が必要で、フーリエ変換法を用いた方法<sup>9)</sup>では数 10 枚以上の干渉画像を

撮影し、その全てを複素フーリエ変換して一旦数 10 枚分の位相分布を求め、それらの中の任意の小領域の位相を複素平面上にプロットして円を形成し、その円上の位置から各干渉画像の初期位相を求めるという処理を行う。

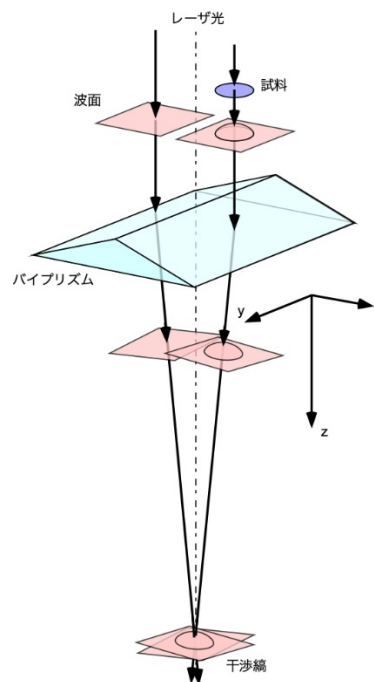


図 1 共通光路位相シフト干渉顕微鏡の構成図

この方法は、数学的にはもちろん正しくキャリブレーションも不要であるが、論理的な一貫性にやや難がある。1 枚でも良いはずの位相分布を数 10 枚一旦求めているが、それを持って「位相分布である」としないのは、フーリエ変換法では十分な精度が得られにくいからである。そのため、各位相分布データに共通する 1 点あるいは共通する小領域の平均値だけを複素平面上にプロットして、残りのデ

<sup>\*1</sup> エフケー光学研究所研究開発部長, 東京工芸大学工学部非常勤講師  
2021 年 3 月 25 日 受理

<sup>\*2</sup> 東京工芸大学工学部工学科教授

ータは廃棄する。複素平面上では、プロットした位相データが円上に分布し、その円上の回転角が各干渉画像の初期位相である。しかし、各干渉画像の円上の位置はフーリエ変換法で得られた精度しか有していない。この方法でもある程度の精度が得られるのは、初期位相の精度にやや難があっても、多数の干渉画像を用いて位相シフト法で事実上の最小2乗法を行っているからである。しかし膨大なフーリエ変換の計算位相分布を求めていながら、そのほとんどを廃棄しているので、著しく効率が悪い。少なくとも数10枚分の位相分布が得られているのだから、それを平均して位相分布であるとする方が、論理的にずっと明快である。

筆者らは、干渉縞数程度の広さで位相が一定であると見なせる領域が被計測領域内にあれば、位相シフト法の原理に基づいて初期位相を決定できる新しい方法を考案した。この方法によれば、高精度な微動機構もキャリブレーションも不要で、干渉縞画像も数枚からせいぜい10枚程度で良い。さらに、それらの干渉画像は適当にばらついていけば何波長にわたっていても、また順序が前後していても計測には全く影響しない、という制約の極めて少ないもので、装置および計測プロセスの簡略化と合わせて将来的にも有望である。

## 2. 位相シフト干渉法の原理<sup>1-3)</sup>と問題点

まず、位相シフト法の原理と問題点について説明する。例として図1の干渉計を用いて説明するが、他の2光束干渉についても有効である。光源から波長 $\lambda$  (伝搬数 $k=2\pi/\lambda$ )の光の一部は被検物体を照射し、物体光を形成する。もう一部はそのまま通過し、参照光となる。物体光と参照光は複プリズムによって光軸方向にそれぞれ角度 $\theta$ だけ屈折される。照射光が進む方向を $z$ 軸、それと直交する $x$ - $y$ 平面を取って、物体光と参照光の複素振幅はそれぞれ

$$\tilde{u}_o(x, y) = A_o(x, y)e^{i[kz \cos \theta + kx \sin \theta + \varphi(x, y) + \delta/2]} \quad (1)$$

$$\tilde{u}_r(x, y) = A_r(x, y)e^{i[kz \cos \theta - kx \sin \theta - \delta/2]} \quad (2)$$

となる。ここで、 $A_o(x, y)$ と $A_r(x, y)$ はそれぞれ物体光と参照光の振幅で、光源の空間的な強度分布や被検物体の吸収などの影響から均一な値を持たず、強度ムラが存在する。 $\varphi(x, y)$ は被検物体を透過したときの位相ずれで、物体の厚さと屈折率に依存する。 $\pm \delta/2$ は複プリズムを光軸に対して垂直に移動させたときの位相シフトである。

物体光と参照光が撮像面で重なり合って干渉し干渉縞を形成する。複プリズムを移動させて、位相シフト $\delta_m$ を与えたときの干渉縞強度分布は

$$I_m(x, y) = A_o^2 + A_r^2 + 2A_oA_r \cos[\Phi(x, y) + \delta_m] \quad (3)$$

となる。標記の簡潔化のため、変数の一部の座標 $(x, y)$ を省略した。また、

$$\Phi(x, y) = 2kx \sin \theta + \varphi(x, y) \quad (4)$$

で、第2項は被検位相で、第1項は参照光の波面に対する物体光の波面の傾きに対応する。(3)式において、物体波および参照波の強度ムラ $A_o(x, y)$ と $A_r(x, y)$ が一定の値ではないため、高い精度で位相分布を得ることは難しい。位相シフト法はこの課題を克服するために考案された。参照光の位相を $M$ 回変えたとき、各測定点において $M$ 個の測定値 $I_m^*$ が得られる。検出系の雑音などの影響から、この測定値は(3)式の理論値とは僅か異なる。そこで、これらの測定値の全体に最も近い正弦関数を求めれば、最も確からしい位相値が求められる。計算上の便宜から、(3)式を変形すると

$$\begin{aligned} I_m(x, y) &= A_o^2 + A_r^2 + 2A_oA_r \cos(\Phi) \cos(\delta_m) \\ &\quad - 2A_oA_r \sin(\Phi) \sin(\delta_m) \\ &= C_o + C_1 \cos(\delta_m) + C_2 \sin(\delta_m) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} C_o &= A_o^2 + A_r^2 \\ C_1 &= 2A_oA_r \cos(\Phi) \\ C_2 &= -2A_oA_r \sin(\Phi) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、最小自乗法を用いて、光強度の測定値を(3)式に適合して、 $C_1(x, y)$ 、 $C_2(x, y)$ を決め、これらから位相を計算する。測定値と理論値の標準偏差の自乗は、

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (I_m - I_m^*)^2 \\ &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [C_o + C_1 \cos(\delta_m) + C_2 \sin(\delta_m) - I_m^*]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

である。この偏差が最小値になるよう三つの未知数の値を決める。それには、上の式を三つの未知数に対する偏微分をゼロに等しくさせればよい。すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial C_o} &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M 2[C_o + C_1 \cos(\delta_m) + C_2 \sin(\delta_m) - I_m^*] = 0 \\ \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial C_1} &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M 2[C_o + C_1 \cos(\delta_m) + C_2 \sin(\delta_m) - I_m^*] \cos(\delta_m) = 0 \\ \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial C_2} &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M 2[C_o + C_1 \cos(\delta_m) + C_2 \sin(\delta_m) - I_m^*] \sin(\delta_m) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

を連立方程式として、解けばよい。これらの方程式を整理して行列を用いて表すと、

$$\mathbf{A}(\delta_m) \mathbf{c} = \mathbf{B}(\delta_m) \quad (9)$$

となる。ただし、

$$\mathbf{A}(\delta_m) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \cos(\delta_j) & \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sin(\delta_m) \\ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \cos(\delta_m) & \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \cos^2(\delta_m) & \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sin(\delta_m) \cos(\delta_m) \\ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sin(\delta_m) & \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \cos(\delta_m) \sin(\delta_m) & \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sin^2(\delta_m) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{c} = \begin{pmatrix} C_o(x, y) \\ C_1(x, y) \\ C_2(x, y) \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{B}(x, y; \delta_m) = \begin{pmatrix} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I_m^* \\ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I_m^* \cos(\delta_m) \\ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I_m^* \sin(\delta_m) \end{pmatrix} \quad (12)$$

である。(8)式を  $\mathbf{c}$  について解くと、

$$\mathbf{c} = \mathbf{A}^{-1}(\delta_m) \mathbf{B}(\delta_m) \quad (13)$$

このように三つの未知数  $C_0(x, y)$ 、 $C_1(x, y)$ 、 $C_2(x, y)$  が求まれば、(6)式の関係から被検の位相分布は、

$$\Phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{-C_2(x, y)}{C_1(x, y)} \quad (14)$$

と求められる。これが最も一般的な位相シフト干渉法の位相導出アルゴリズムである。このアルゴリズムから、任意の三つ或はそれ以上の位相シフトを与えたときの干渉縞の強度から、被検の位相値が求められることがわかる。

しかし、被検の位相分布を正確に算出するには、位相シフトを正確に与える必要がある。このため一般には、ピエゾ素子などを用いた微動機構で  $2\pi/M$  の位相シフトを与えているが、微動機構の微動量と印加電圧の関係は温度の影響を受けていつも一定とは限らないので、計測に先立って微動量と位相シフト量のキャリブレーションデータを採取しておく必要があり、また位相シフト量の誤差が少なからぬ計測誤差の原因となるため、高精度に微動量を制御できる高価な装置が必要である。

さらに、得られた位相分布には、(4) 式から解のように、干渉縞画像作成時の波面の傾きが重畳している。このため、位相分布内の位相が一定と見なせる領域を選び、その部分の傾きを最小二乗法などで求めて、位相分布に補正を加えることが必要である。

### 3. フィッティングによる初期位相推定法

図 1 のようにバイプリズムを移動したときに、物体波と参照波の進行方向に位相シフトが与えられる。しかし観察面では、位相シフト  $\delta$  は (3) 式のように余弦関数の中に入っているため、干渉縞は横にシフトする。位相シフト  $\delta_m$  が正確に  $2\pi/M$  なら、干渉縞は余弦関数の周期の  $1/M$  分だけ横方向にシフトする。すなわち、干渉画像  $I_1$  の干渉縞の位置に対して  $I_2$  の干渉縞のシフト量、すなわち初期位相を正確に決定できれば、干渉画像  $I_2$  が  $I_1$  に対してどれだけ位相をシフトしたときの画像かを知ることができる。

図 2 は位相シフトを  $\pi/2$  [rad] ずつ与えた 4 枚の干渉画像の例で、簡単のために図 1 のように参照光と物体光を  $x$  方向にのみ傾けて干渉させている。中央の円形の領域は試料に見立てた部分で、周辺から中心に向かって厚さあるいは屈折率の変化によって位相が  $0$  から  $\pi$  [rad] 変化するよう

に設定している。周りは均質の物体で、位相が一定である。

で同じ座標位置を占めるように選んだ同じ大きさの位相が一定な領域を示している。

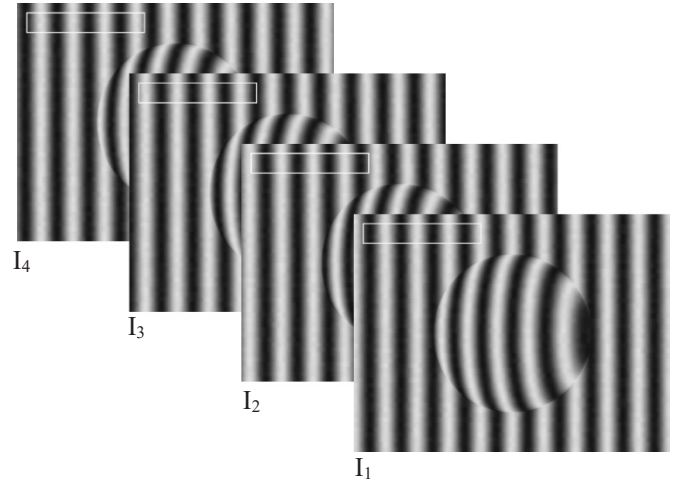


図 2 位相シフトを  $\pi/2$  ずつ与えた 4 枚の干渉縞画像

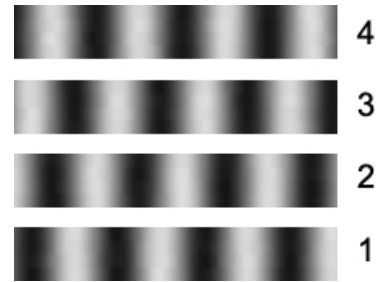


図 3 被検位相が一定の領域の干渉縞画像

白線で囲んだ矩形領域を切り出した画像を図 3 に示す。この図からも 4 つの画像の手前から奥に向かって、干渉縞が  $1/4$  間隔ずつシフトしていることが判る。この各領域内では、干渉縞の強度  $I(x)$  が余弦関数的に変化するので、 $m$  枚目の領域内の干渉縞の強度分布は

$$I_m(x) = B + A \cos \left[ \frac{2\pi}{d} x + \delta'_m \right] \quad (15)$$

という形で表される。 $\delta'_m$  は、各領域における余弦関数の初期位相である。図 4 のように、干渉縞の強度プロファイルを求め、(15)式に適合させると、この式のバイアス  $B$ 、振幅  $A$ 、干渉縞間隔  $d$  および初期位相  $\delta'_m$  を決めることが出来る。

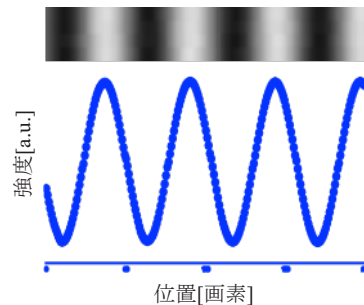


図 4 干渉縞強度のフィッティング

この方法によって各干渉縞画像の初期位相を決定するプロセスをまとめると、

- ① N 枚からなる一連の干渉縞画像を用意する
- ② 位相が一定であると見なせる領域を選ぶ
- ③ 個々の干渉縞に直交する方向の強度プロファイルを求める
- ④ 個々の干渉縞強度分布に  $\cos$  関数をフィッティングし求められた N 個の初期位相からそれぞれの干渉縞画像作成時の初期位相を求め
- ⑤ (14) 式に従って位相分布を求める
- ⑥ フィッティングで得られた波面傾斜成分を用いて位相分布の傾きを補正する

ここでは、説明が分かりやすいため、位相シフトを  $\pi/2$  ずつ与えた干渉縞画像を用いたが、この方法を用いた初期位相の推定は、位相シフトが等間隔である必要がなく、適当にばらついた数枚以上程度の干渉画像と、その領域内に干渉縞数本程度の広さの位相が一定と見なせる領域があればよい。干渉縞画像にノイズが無ければ、選択した領域の上端 1 ラインの強度プロファイルをフィッティングするだけで、その画像の初期位相を決めることができる。このときに求められる初期位相は、上端 1 ラインの左端のピクセルの初期位相である。

一般にはノイズは無視できないので、選択した領域内で干渉縞が水平あるいは垂直であれば処理上は好都合である。例えば図 4 のように y 方向で同じ位相を有する場合には、各ピクセルの明るさを縦方向に平均化した数値を用いて、ノイズを軽減することができる。

## 4. 位相推定のシミュレーションと結果

### 4.1 シミュレーション方法

位相計測精度を検討するためには、試料によって変調された位相分布がどれだけ忠実に算出できるかを吟味する必要がある。そこで、計算機シミュレーションによって、所定の位相変化を与えた干渉縞画像を作成し、従来法と本方法を比較することとした。

図 5 は、試料として与えた位相分布で、ピクセル数は  $640 \times 480$  である。中央に半径 160 ピクセルの試料に模した部分があり、中心に  $\pi$  [rad]、外周部に向かって  $0$  [rad] になるような位相遅れを与えた。実際の干渉画像では、迷光、映像信号、あるいは機械的な振動などが原因となって、ノイズが乗っている。

そこでシミュレーションでは、ノイズがない場合に加えて、物体波の振幅にノイズを導入した場合、および位相シフト  $2\pi m/M$  の項にランダムなノイズを重ねさせた場合について、計算を行った。物体波にノイズを重ねさせるにあたって、ピクセル毎にランダムなノイズを加えるのでは実際の様子との差が大きいので、10 ピクセル角の領域毎にランダムなノイズを加え、さらに  $3 \times 3$  の平均化フィルタを通してなだらかに変化させた。

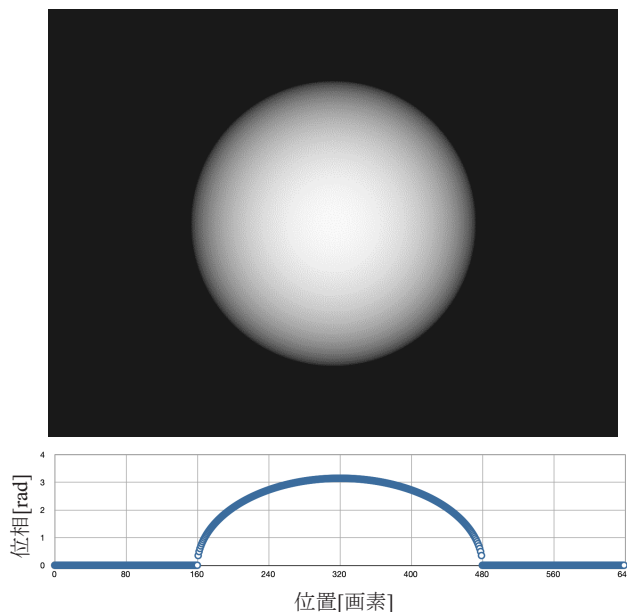


図 5 シミュレーション用の位相分布

最大  $\pm 5\%$  のノイズをランダムに加えた位相分布の画像を図 6 に示す。図 5 の画像と比較すると、濃淡のムラが重畳していることが解る。またその一部を拡大した例を図 7 に示す。○印はノイズを与えただけのとき、実線は平均化フィルタを施したときのノイズである。



図 6 最大  $\pm 5\%$  のノイズを加えた位相分布

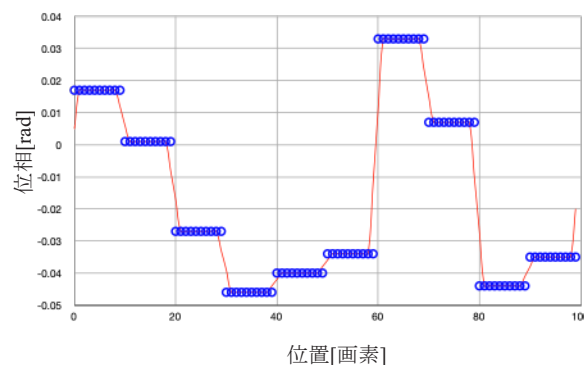


図 7 シミュレーション用の位相分布



こうして設定した位相分布を物体波に加えられた試料による位相変化であるとして、初期位相が  $2\pi/64$  ずつ与えた 64 枚の干渉画像を作成した。画像は通常 8 ビット、256 段階で表すので、(3)式の最大値がノイズによる変動分も含めてその範囲に入るように、参照光と物体波の振幅を 7 とした。これにより、ノイズを除いた干渉縞の強度の変化幅が 0~196 となるため、これにノイズを加えた強度の最小値が負の値にならないように 15 のマージンを加えた。

干渉縞強度のプロファイルの算出には、干渉画像の左上から (20 ピクセル, 20 ピクセル) の位置を左上の角とする横 240 ピクセル×縦 40 ピクセルの領域を選び、干渉縞に沿って平均した値を用いた。また、従来法では位相シフト量が正しいものと考えますが現実には誤差があるので、干渉縞画像作成毎にランダムに誤差を与えた。位相シフトを与えた干渉画像を、従来法による計算には等間隔に、本手法の計算には等間隔からずらして選び、求められた位相分布と設定した位相分布を比較して絶対的な精度を検討した。

## 4.2 結果

位相誤差の指標としては、PV(Peak to Valley, 最大値から最小値の差)と RMS(Root Mean Square, 二乗平均平方根)が最もよく用いられる。前者は誤差の最大値で、後者は計測点全体のばらつきを示す。ここでは、RMS 値を用いることにした。まず、64 枚の干渉縞画像から等間隔に選んだ干渉画像を用いた結果を表 1 に示す。

表 1 ノイズがない場合の精度比較(RMS 値[ $\lambda$ ])

枚数	4	8	16	32
従来法 ( $\delta$ 既知)	1/524	1/1180	1/3382	1/5498
本方法	1/524	1/1177	1/3227	1/4593

いずれの方法においても、干渉縞画像枚数が増加すると計測精度が向上しているが、これは位相の計算に最小二乗法を用いて最適化されているためである。従来法との比較で、干渉縞画像枚数が 4 枚、および 8 枚では有意な差は無く、16 枚、32 枚では従来法よりやや精度が劣っている。これは、従来法では与えられた位相シフト量が厳密に正しいとして計算を行っているのに対して、本方法においては干渉画像から位相シフト量を決定するときの誤差があるため、当然の結果であると言える。

次に、物体光の振幅と位相シフトに誤差をランダムに与えた場合について調べた。位相シフト誤差が大きい場合、従来法では大きな位相誤差が生じるのが明らかのため、ここでは校正された市販のピエゾステージの典型的な誤差の大きさと同程度の 2% で計算を行った。結果を表 2 に示

す。本手法は安価で誤差が大きいピエゾステージを用いる場合でも有効である。

ここでも、本方法では干渉画像枚数が増加すると計測精度が低下する傾向が見られるが、位相シフトに誤差がある場合には従来法を上回る精度が得られている。

表 2 誤差がある場合の精度比較(RMS 値[ $\lambda$ ])

振幅誤差	$\pm 5\%$		$\pm 5\%$		$\pm 5\%$	
位相	0%		$\pm 1\%$		$\pm 2\%$	
画像数	4	16	4	16	4	16
従来法	1/287	1/636	1/278	1/566	1/257	1/444
本方法	1/274	1/606	1/272	1/517	1/270	1/500

続いて、選択した干渉縞画像の中の 1 枚が振動や微動機構の誤作動によって与えられた初期位相が大きくずれたケースを想定して、等間隔に選んだ中の 3 枚目を 1/64 波長ずれたとなりの干渉縞画像と入れ替えて計算した結果を表 3 および表 4 に示す。振幅ノイズをそれぞれ 0%、5% とし、位相シフトのずれが重ならないように、干渉縞画像作成時の位相シフト誤差を 0% とした。干渉縞画像をずらせる方向が前と後で得られた精度に大きな差がある場合があるので、表には両方の値を載せた。

表 3 ノイズがない場合の精度比較(RMS 値[ $\lambda$ ])

振幅誤差	ノイズなし			
画像数	4		16	
	前	後	前	後
従来法( $\delta$ 既知)	1/202	1/196	1/878	1/781
本方法	1/534	1/545	1/3079	1/3087

表 4 誤差がある場合の精度比較(RMS 値[ $\lambda$ ])

ノイズ	振幅誤差 5% 位相シフト : 誤差なし			
画像数	4		16	
	前	後	前	後
従来法	1/186	1/168	1/557	1/509
本方法	1/298	1/295	1/674	1/670

これからの結果から、本方法によれば複数枚の干渉縞画像のうちの 1 枚が本来の位相シフト量から  $1/64$  波長ずれた場合に、精度の低下防止に有効であることが解る。またほとんどの場合、そのずれの方向によって精度の低下に大きな影響を受けないことも解る。

## 5. まとめ

従来の位相シフト法では、その位相差が事前に高い精度で判っている必要があった。このため、ピエゾ微動などを用いて高精度に位相を制御する機構が必須であった。本研究では、干渉画像内に位相が一定と見なせる領域が干渉縞数本分あれば、位相シフト法の原理に基づいて干渉画像間の相対的な位相差が求められることを示し、計算機シミュレーションによって従来法と同等、位相シフト量に誤差がある場合はそれ以上の計測精度が得られることを明らかにした。

この方法によって、高価な微動機構が不要になり計測装置の大幅なコストダウンと、計測プロセスの簡略化が可能になる。

## 参考文献

- 1) 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, pp. 2693-2703 (1974).
- 2) H. Schreiber, J. H. Bruning, "Phase Shifting Interferometer", in Optical Shop Testing, Malacara, D., ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, pp. 547-666 (2007).
- 3) 谷田貝豊彦, 「応用光学 光計測入門」, 丸善株式会社 (2005).
- 4) 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, pp. 158-161, 2001.
- 5) 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", Appl. Opt. 41, pp. 1308-1314, 2002.
- 6) Y. Ishii, J. Chen, and Kazumi Murata, "Digital phase-measuring interferometry with a tunable laser diode", Opt. Lett. 12, pp. 233-235(1987).
- 7) J. S. Slepicka and S. S. Cha, "Stabilized nonlinear regression for interferogram analysis", Appl. Opt. 34, No.23, pp.5039-5044(1995).
- 8) E. Yu and S. S. Cha, "Two-dimensional regression for interferometric phase extraction," Appl. Opt. 37, No.8, pp.1370-1376(1998).
- 9) G. Lai and T. Yatagai, "Generalized phase-shifting interferometry", J. Opt. Soc. Am. A 8, 822-827(1991).