

振動環境下で撮影された干渉像からの高精度位相抽出*

安達 正明** 丹羽 康人† 岩尾 雄太†

Phase Extraction from Interferograms captured under Vibrating Environment

Masaaki ADACHI, Yasuto NIWA and Yuuta IWAO

Vertical-scanning shape-measurement interferometry using white light cannot be used under vertically vibrating environment. Because, it is required to repeat predefined-length vertical movement with nanometer accuracy and interferogram capturing just after the movement. We developed the technology which can measure the changes of optical path difference (OPD) of an interferometer with nanometer resolution at around 20- μ s interval. So, the technology can trigger interferogram capturing at even the moment when predefined-length movement happens to complete at an abnormal timing due to external vibrations. But vibrations in exposure time would change interferogram intensity captured. This change results in non-negligible measurement errors. Then we develop new phase extraction method which utilize history of OPD change in the exposure time and can remove the above errors. Validity of this method is also estimated by computer simulations.

Key words: white-light interferometry, vibration, phase extraction, vertical scanning, nanometer

1. 緒 言

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 素子が近年各種製品に広く利用されており、それら素子では駆動される微細構造体の寸法が性能に大きく影響すると言われる。このため高精度な形状検査が求められるが、微細構造体は多くの場合に段差形状を含むので光学的検査では低コヒーレンス光源を組み込んだ垂直走査型干渉顕微鏡が広く使用される。この顕微鏡を使う形状測定では低コヒーレンス光干渉像の位相を高い精度で抽出することで、寸法換算した計測精度は縦方向に nm を上回るレベルにもなる。一方で検査の高速性を確保するために 2 次元高速カメラを組み込み、垂直走査速度が 135 μ m/s の性能を誇る装置も市場には出現している¹⁾。

しかし、nm を上回る縦方向の高い計測精度を確実に実現するためには極めて高いレベルで整えられた環境でこの装置を使用する必要がある。一般的な環境下では空気擾乱や外部振動が計測を妨害して満足な結果が得られるとは限らない。そこで、カラー干渉像を 1 枚のみ撮影しそこから RGB の波長別位相情報を抜き出すことで振動下でも高精度に形状評価しようとする試みも出てきている²⁾。だが、段差高さが対物レンズの焦点深度長や干渉長に近くなる場合は干渉像のピンボケやコントラスト低下が影響し計測分解能の急速な低下は避けられない。

我々は干渉顕微鏡にレーザ光源を組み込み、レーザを用いて垂直走査中の干渉計の光路差変化を高速高精度に計測できる方法をこれまでに開発した³⁾。この方法を用いると、光路差変化が位相シフト条件を満たす瞬間を 5 万分の 1 秒の精度で捉える事が出来る。そこで垂直走査中にこの検出機能を用いて正確にシフトされた干渉像を多数取得することで、振動環境下でも段差構造物を高い精度で形状計測できることを確認した⁴⁾。

だが、nm を上回るレベルの形状計測精度を振動環境下でも確実に満足させるためにはまだ問題が残されていた。それは露光時間中の外部振動による光路差変化の影響である。レーザ光を使った光路差変化の高速高精度計測を用いて露光開始時点有位相シフト条件が満足される瞬間に制御しているので、露光時間が極めて短ければ振動があってもその影響は無視できる。しかし形状計測に使うのが低コヒーレンス光の拡大干渉像であり、装置内での熱発生を抑え高速点灯を行うために高輝度 LED を使うと光強度は弱くなる。その結果 S/N の高い干渉画像を得るためにはどうしても長めの露光時間が必要となる。この露光中の不規則な外部振動が問題なのである。特に測定精度が 1nm レベルを上回るようにしたい場合は小さな振動も大きな問題となる。これを光路差変化情報を基にした PZT 素子を用いる光路差の能動制御で押さえ込もうとしても突発的な変動には絶対に対応出来ないし、制御の目標精度となる 1nm 前後への短時間での変動収束制御も困難である。そこで我々は、露光中の光路差変化情報を受動的に利用する高精度位相抽出法を研究した。

ここではその結果得られた、撮影された低コヒーレンス光干渉強度と露光中の光路差変化情報を基にした高精度な位相抽出法に関して述べる。後半では外部振動を正弦波的变化や矩形的な変化を含むように PC 内で自由に変えられるようにして、その時の位相を抽出しその結果を入力値と比較する簡単なシミュレーション結果等についても述べる。

2. 露光開始時の位相の抽出原理

中心波長 λ の光の干渉像を、 $\pi/2$ の位相シフト直後に露光時間 T で撮影することを想定する。一定速度で垂直走査している時、瞬間的な干渉光強度と時間の関係は図 1 のようになるので露光時間 T で取り込まれる画像の光強度は斜線部分の面積に比例する。今 i 番目に取り込まれる画像の振動環境下での光強度を考える。光強度変化のモジュレーションの振幅を A_i とし露光中の時間 t に関して垂直走査や外部振動等により高さが $h_i(t)$ で変化するとした時、 i 番目の画像の干渉光強度 I_i は次

* 原稿受付 2010 年 11 月 7 日

** 正 会 員 金沢大学理工研究域 (金沢市角間町)

† 金沢大学大学院自然科学研究科

式で与えられる.

$$\begin{aligned}
 I_i &= A_i \int_0^T \cos \left[\phi_i + \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} \right] dt + I_0 \\
 &= A_i \int_0^T \left[\cos \phi_i \cdot \cos \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} - \sin \phi_i \cdot \sin \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} \right] dt + I_0 \quad (1) \\
 &= \cos \phi_i \cdot A_i \int_0^T \cos \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} dt - \sin \phi_i \cdot A_i \int_0^T \sin \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} dt + I_0 \\
 &= \cos \phi_i \cdot C_i - \sin \phi_i \cdot S_i + I_0
 \end{aligned}$$

ここで, C_i と S_i は

$$\begin{aligned}
 C_i &= A_i \int_0^T \cos \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} dt \\
 S_i &= A_i \int_0^T \sin \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} dt \quad (2)
 \end{aligned}$$

であり, 式 (1) の ϕ_i は求めるべき露光開始時の位相である. いま式 (2) では, 外部振動が小さかったり露光時間が短かく露光中の変位が小さければ $h_i(t)$ が小さいため $C_i \gg S_i$ となるので, 式 (1) の最終式の右辺第 2 項は第 1 項に比べて非常に小さく第 2 項を近似の補正項として扱える. そこで, 取込画像の光強度から外乱を無視した 0 次近似として位相シフト法で位相 ϕ_{00} を求める. そして, 露光中の $h_i(t)$ が分かっているとして式 (2) から求めた S_i と $\sin \phi_{00}$ を使って式 (1) の右辺第 2 項の大きな値を求めこれを左辺に移項することで, $\cos \phi_i \cdot C_i + I_0$ を求める. これを振動影響が 0 次近似で補正された光強度として位相抽出の式に代入し, 位相値を得る方法⁵⁾も検討した. しかし, 低コヒーレンス光源は輝度が低いため露光時間の長い方が光強度信号は大きくなって画像の S/N は良い. 露光時間が長くなると 0 次近似としての位相 ϕ_{00} と露光開始時の位相 ϕ_i は違いが大きくなり近似の精度が低下する (後ほどのシミュレーションで具体例を見る). また第 1 項 \gg 第 2 項も成り立たなくなる. そこで, 長い露光時間や大きな $h_i(t)$ でも成立する方法が必要となる.

ところで高精度形状計測に広く使われる位相シフト法では, 位相, モジュレーション, オフセットの 3 つの未知数に対して位相を $\pi/2$ づつシフトしながら取り込んだ 3 画面のみを使う方法から, 雑音や位相シフト誤差が残る状況下にあっても抽出位相精度を上げるために 4 画面, 5 画面, 7 画面, さらに多くの画面を利用する方法もこれまでに開発されている⁶⁾. そして, より多くの画面と良く検討された位相計算式を用いる方法が相対的に高い抽出精度を持つことは広く知られている. このためここで求める振動下での位相抽出法も過去に研究され報告されてきた位相計算式の形も反映させるべきである. すなわち露光時間中の外部振動が単に補正できるだけでなくより精度の高い位相シフト法の計算式も同時に考慮された方法にすべきと思われる.

以上の観点から良く知られている位相計算式を考慮した方法を探す上で, 使用画面数があまり多くなく抽出位相の信号対雑音強度比の点で現在も広く使われている 5 画面法をここでは具体的に上げ, 最終的に得られた露光開始時の位相抽出法を以下に説明する. 取り上げた 5 画面法⁷⁾ではその 3 画面目の位相は

$$\phi_{3_sf} = \tan^{-1} \left[\frac{2I_2 - 2I_4}{2I_3 - (I_1 + I_5)} \right] \quad (3)$$

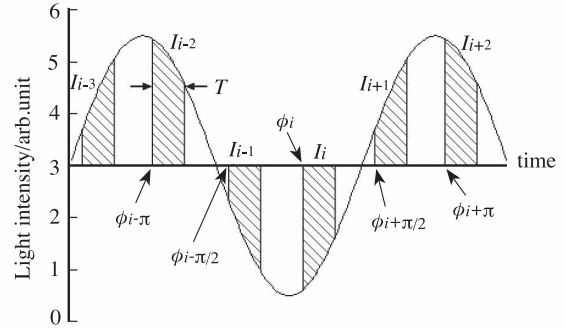


Fig.1 Camera signal intensities I_i obtained with a constant vertical-scanning speed. The intensities are proportional to the hatched areas having start phase ϕ and exposure time T

で計算される. この式の両辺を良く見ると右辺の引数の分母は $\cos \phi_{3_sf}$ に強い相関を持っている事が分かる. そこで分母を式 (1) を使って変形してみると

$$\begin{aligned}
 2I_3 - (I_1 + I_5) &= 2 \cos \phi_3 \cdot C_3 - 2 \sin \phi_3 \cdot S_3 + 2I_0 \\
 &\quad - (\cos \phi_1 \cdot C_1 - \sin \phi_1 \cdot S_1 + I_0) \\
 &\quad - (\cos \phi_5 \cdot C_5 - \sin \phi_5 \cdot S_5 + I_0) \quad (4) \\
 &= \cos \phi_3 \cdot (2C_3 + C_1 + C_5) - \sin \phi_3 \cdot (2S_3 + S_1 + S_5)
 \end{aligned}$$

となる. ただし露光開始時の位相は画面毎に正確に $\pi/2$ づつシフトされていると仮定して, $\phi_1 + \pi = \phi_3 = \phi_5 - \pi$ とした. 一方で式 (3) の右辺の引数の分子は $\sin \phi_{3_sf}$ に強い相関を持っているがそれは同様に

$$\begin{aligned}
 2I_2 - 2I_4 &= 2 \cos \phi_2 \cdot C_2 - 2 \sin \phi_2 \cdot S_2 + 2I_0 \\
 &\quad - 2 \cos \phi_4 \cdot C_4 + 2 \sin \phi_4 \cdot S_4 - 2I_0 \quad (5) \\
 &= 2 \sin \phi_3 \cdot C_2 + 2 \cos \phi_3 \cdot S_2 + 2 \sin \phi_3 \cdot C_4 + 2 \cos \phi_3 \cdot S_4 \\
 &= 2 \sin \phi_3 \cdot (C_2 + C_4) + 2 \cos \phi_3 \cdot (S_2 + S_4)
 \end{aligned}$$

となる. ただし, $\phi_2 + \pi/2 = \phi_3 = \phi_4 - \pi/2$ とした. このように式 (4) は $\cos \phi_{3_sf}$ に, 式 (5) は $\sin \phi_{3_sf}$ に強い相関を持つ式でありこれらは共に $\cos \phi_3$ と $\sin \phi_3$ の項からなる. そこで, 相関を持つものが $\cos \phi_{3_sf}$ と $\sin \phi_{3_sf}$ であるので両式は互いに強く独立だとしこれを連立方程式として解くことにより露光時間中の光強度変動が補正された高精度な $\cos \phi_3$ と $\sin \phi_3$ を求めることが出来ると考えた. これを行うと

$$\begin{aligned}
 \cos \phi_3 &= \frac{[2I_3 - (I_1 + I_5)] \cdot 2(C_2 + C_4) + 2(I_2 - I_4)(2S_3 + S_1 + S_5)}{(2C_3 + C_1 + C_5) \cdot 2(C_2 + C_4) + (2S_3 + S_1 + S_5) \cdot 2(S_2 + S_4)} \quad (6)
 \end{aligned}$$

$\sin \phi_3$
$$= \frac{-[2I_3 - (I_1 + I_5)] \cdot 2(S_2 + S_4) + 2(I_2 - I_4)(2C_3 + C_1 + C_5)}{(2C_3 + C_1 + C_5) \cdot 2(C_2 + C_4) + (2S_3 + S_1 + S_5) \cdot 2(S_2 + S_4)}$$
 となった. これから露光開始時の位相 ϕ_3 が求まる. ここで式 (2) で与えられる C_i と S_i を光路差変化情報 $h_i(t)$ から計算するには A_i も必要だが, 式 (6) では C_i と S_i は $\cos \phi_3$ の式にも $\sin \phi_3$ の式にも分子は 1 次, 分母は 2 次と同じ形が入っている. その結果, 位相の計算では A_i の寄与は消えるので, C_i と S_i は式 (2) の積分記号の中だけを計算することにした.

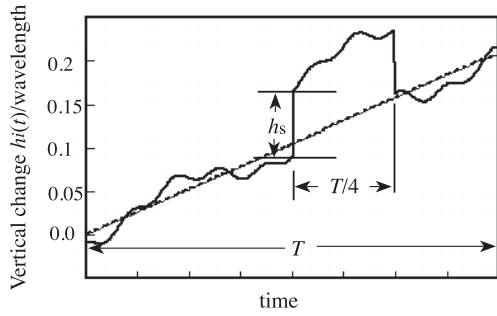


Fig.2 Vertical changes $h_i(t)$ used for the computer simulation. Changes drawn with solid line are assumed to generate in exposure time on the target frame for phase extraction. This involves a rectangle-like change, height of h_s and width of $T/4$, and some wave-like changes beside a constant-speed vertical scanning change. Straight broken line is assumed to generate on the other frames which are affected by only the constant-speed vertical scanning.

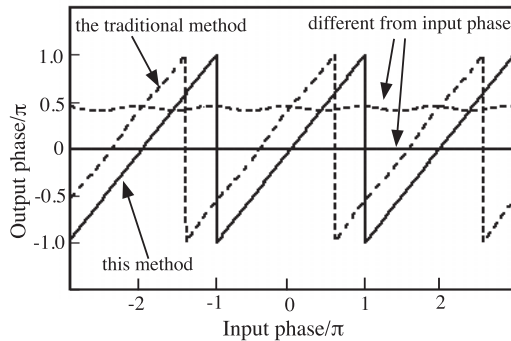


Fig.3 Comparison of output phase of this method and output phase of the traditional method. A solid line is the output phase of this method and completely overlap with input phase. A broken line is the output phase of the traditional method. A center horizontal line is difference between input and output phases of this method. A wave-like broken line is difference between input and output phases of the traditional method.

3. シミュレーション結果

露光開始時の位相の以上の抽出原理は理論的に問題がないと考えられるが、実際に用いた場合の妥当性を確認するためにいくつかのシミュレーションを行った。まずはPC内で任意に与えることの出来る露光中の外部振動等による光路差変化を4つの要素からなるとした。振幅と周期と位相が違う2種の正弦波、階段状の矩形波、垂直走査のために一定傾斜で増加する三角波、の4つである。三角波以外のそれぞれは位相抽出計算に使う5個の画面毎に独立な数値を入力できるようにした。そして繰り返すことになるが露光開始は位相シフト直後に正確に行えるとし、また露光時間や画像間で結果的に異なる値を取る雑音強度も自由に変わるようにした。シミュレーションで露光中に加えた外部振動と垂直走査による高さ変化の最初の例を図2に示す。5個の画面毎に異なるパラメータを設定できるが、ここでは簡単のため5画面位相シフト法での位相抽出の対象となる3画面目のみにこの変化を加え他の画面は垂直走査による直線の高さ変化しか受けていないとして、式(6)で $\cos\phi_3$ と $\sin\phi_3$ とを計算して位相を求める。3画面目の露光開始時の位相値を変えながら(他の画像の入力位相もこれに伴って変わる)、計算から得られた出力値と入力値、並びにそれらの差を求めたものを図3に示す。図では入力値をx軸で表示するのみでなくグラフに

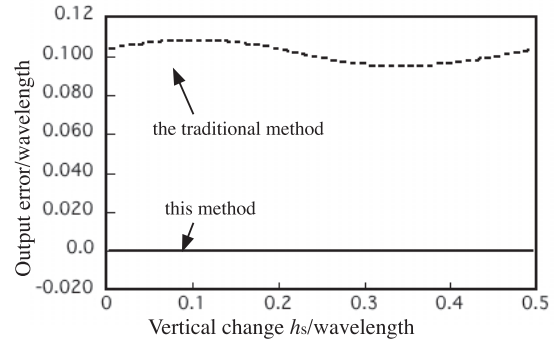


Fig.4 Output phase dependence on the rectangle height h_s . A solid line is of difference between input and output phases of this method. A broken line is of difference between input and output phases of the traditional method.

点線としても示したが、本方法での出力値である実線は綺麗に入力値の点線に重なった。一方で比較のため本方法を用いないでそのまま従来通りに位相抽出した時の出力値を破線で示した。当然だが従来法は全画面で位相が露光開始時の位相より少し進んだ光強度(図1参照)となっているので出力位相は入力位相に対して左方向にずれている。本方法や従来法による出力値と入力値との差も求めこれらを実線や破線のカーブとして示した。従来法では外乱による高さ変化が3画面のみに加わっているため初期位相が変化すると波状の誤差が発生している。本方法では縦軸を拡大しても誤差は全く発生していなかった。以上では3画面目のみに外部振動による高さ変化を導入したが、それ以外の画像にも異なる外部振動を導入してみた。その場合でも本方法は入力値と重なる出力値を示し上記の抽出原理は問題がないことを確認できた。

次に図2に示した4つの振動要素のうち考慮するものを垂直走査による変化と矩形変化のみに制限し、矩形幅は $T/4$ のままに矩形高さ h_s を高くして行った時の入力位相と出力位相の違いを求めた。得られた結果を図4に示す。本方法では違いは0を示す実線となった。一方、従来法では違いは図3の破線のように入力位相に応じて変化する波状となるので、入力値の $-\pi$ から π までの平均出力を計算しこれを図4では破線で示した。従来法で求めた違いは矩形の高さが大きくなるにつれて変動し h_s が $\lambda/2$ に達すると光強度は h_s の高さが0の場合と同じとなって元に戻る。本方法ではそんな大きい高さ変化に至るまで入力値との違いはなく位相が正しく抽出できている。

最後に本方法による振動下での位相抽出結果と、本方法が基礎とした位相シフト法による位相抽出結果の相関関係を調べた。位相シフト法は長い歴史がありこれまでに位相抽出精度のより高い方法を求めて色んな方法⁶⁾が提案されてきている。それらは耐雑音や耐シフト誤差に対して違いを持っている。ここでは基礎とした位相抽出法の特長を本方法が内包しているか否かを調べてみた。比較のために5画面法以外に新たに取上げた位相シフト法は3画面法と7画面法である。干渉光強度が光路差変化に対して雑音のない正確な正弦波的变化を示し、位相シフトも正確に行われる時、抽出される位相には位相シフト法の違いによる変化はない。また本方法では露光開始時の位相においてはシフト誤差が入り込まない方法を前提としており、また露光時間内の外部振動の影響も除去しているので、基礎とした位相シフト法と本方法と相関は耐雑音特性から調べるしかないと考えた。そこでこの目的のために3画面法による位相シフト法として式(7)に示す方法を用い、またその時の露光中の

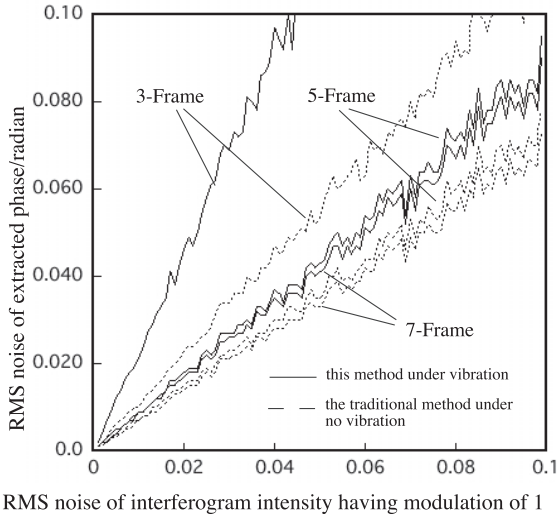


Fig.5 Random noise dependence of this method, which are derived from the traditional phase-shift methods and are shown as solid curves. In this calculation height changes of Fig.2 are supposed to disturb interferogram intensity of the center frame. As comparison, the traditional phase-shift methods are also used to extract random noise dependence and obtained results are shown as the dotted-line curves. In the later case no height change is supposed.

外部振動影響を補正した位相抽出式として5画面法の場合と同様にして計算した式(8)と(9)を得た。また7画面法の位相シフト法は式(10)となる⁶⁾ので、同じく位相抽出式は次の式(11)と(12)を得た。

$$\varphi_i = \tan^{-1} \left\{ \frac{I_{i-1} - I_{i+1}}{2I_i - (I_{i-1} + I_{i+1})} \right\} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sin \varphi_i &= \frac{1}{\alpha} \left[(I_{i-1} - I_{i+1})(2C_i + S_{i-1} - S_{i+1}) \right. \\ &\quad \left. - \{2I_i - (I_{i-1} + I_{i+1})\}(S_{i-1} + S_{i+1}) \right] \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \varphi_i &= \frac{1}{\alpha} \left[\{2I_i - (I_{i-1} + I_{i+1})\}(C_{i-1} - C_{i+1}) \right. \\ &\quad \left. + (I_{i-1} - I_{i+1})(2S_i + C_{i-1} - C_{i+1}) \right] \quad (9) \end{aligned}$$

$$\varphi_i = \tan^{-1} \left\{ \frac{7(I_{i-1} - I_{i+1}) - (I_{i-3} - I_{i+3})}{8I_i - 4(I_{i-2} + I_{i+2})} \right\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sin \varphi_i &= \frac{1}{\beta} \left[\{7(I_{i-1} - I_{i+1}) - (I_{i-3} - I_{i+3})\} \{8C_i + 4(C_{i-2} + C_{i+2})\} \right. \\ &\quad \left. - \{8I_i - 4(I_{i-2} + I_{i+2})\} \{7(S_{i-1} + S_{i+1}) + S_{i-3} + S_{i+3}\} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \varphi_i &= \frac{1}{\beta} \left[\{8I_i - 4(I_{i-2} + I_{i+2})\} \{7(C_{i-1} + C_{i+1}) + C_{i-3} + C_{i+3}\} \right. \\ &\quad \left. + \{7(I_{i-1} - I_{i+1}) - (I_{i-3} - I_{i+3})\} \{8S_i + 4(S_{i-2} + S_{i+2})\} \right] \quad (12) \end{aligned}$$

ここで式(8)、(9)の α や式(11)、(12)の β は式(6)の分母に相当するものであり、位相計算には影響しないので簡易表現のために導入した係数である。そして、中心画像にのみ図2に示し

た外部振動による高さ変化を導入し、総ての画像の光強度にはガウス分布をとるランダム雑音を加えた。その後補正式を用いて外部振動の影響を除去した位相抽出を行い、雑音強度を変えながら入力位相値と抽出位相値の違いを計算した。結果を図5に実線で示す。一方、比較のために外部振動を含まない瞬時露光の光強度もつくり、その場合の雑音強度を変える時の式(7)、(3)、(10)による従来の位相シフト法による抽出位相値と入力位相値との違いも求めた。この結果を図5に点線で示す。3画面法、5画面法、7画面法総てにおいて外部振動が入った場合の本方法による補正結果(実線)と外部振動が入らない場合の従来法の結果(点線)は似た耐雑音特性を有しており、本方法は基礎とした位相シフト法の特長を正しく反映していることが分かる。ここで本方法による補正值が従来法を雑音強度で上回ったこと理由は、補正式が複雑な式となったために雑音影響を受けやすくなったからと推測した。しかし、本方法が図2に示した外部振動の影響を強く排除でき、振動が全く無く、位相シフト誤差もない場合の位相シフト法の雑音特性に近い特性を持つことは確認できた。

4. 考 察

露光中に外部振動があってもその影響を排除して露光開始時の位相を抽出する方法を提案した。提案した方法はシミュレーションで調べた3画面、5画面、7画面法に限らず広く他の位相抽出法にも使えると考える。なぜなら殆どの位相シフト法は総て式(3)や(7)や(10)のように分母は cosine に分子は sine に強い相関を持つ形で表記されているからである。そして耐雑音特性により優れる5画面や7画面を基礎にした方法が3画面法を基礎にした方法に比べて良い結果が出たことは本方法が位相シフト法のアルゴリズムの長所をそのまま引き継ぐ性質を持つことを示す。なお、広く知られる4画面位相シフト法をここに取り上げなかったのは位相抽出の対象とする画像が4枚中の1枚目になっていたからである。他の方法と比較して違いが出てその解釈が複雑になることを避けて、ここでは使用する複数画像の中心の画像に関して位相を求めている3画面、5画面、7画面法に比較の対象を絞った。

ところで、本方法は露光時間中の光路差変化を正しく補正できるので露光時間をより長くしていった場合の影響を次に考えて見る。露光時間を長くすると時間蓄積される光強度は増え、加えてある種の雑音は平均化され少しづつ影響が小さくなる。しかし一定速度の垂直走査中に露光し、位相シフトを $\pi/2$ とする時には露光時間はその間の位相変化が最大でも $\pi/2$ 以内になるように限られてしまう。我々が以前高速位相シフト法で採用した $3\pi \pm \pi/2$ の位相シフトを行う場合⁸⁾はこの上限 $\pi/2$ は消える。しかしこの場合でも式(2)より露光中の位相変化は最大でも π 以下が望ましい。 π を上回ると C_i と S_i の両方が共にゼロに近づくので式(6)では雑音の影響が大きくなると推測する。

5. 結 論

垂直走査型干渉顕微鏡を用いて nm 精度で3次元形状を測定するには正確な位相シフトを介して高精度に位相を抽出することが求められる。このため振動環境下では被測定面が容易に nm を越えて上下に動くためその精度での測定は非常に難しい。我々

はこの問題を解決するために、垂直走査中の干渉計の光路差を高速高精度にリアルタイム計測し、垂直移動量が求められる位相シフト量となった瞬間に干渉像を露光開始することで高精度に位相抽出する方法を研究してきた。しかし、露光中の上下振動による光強度変動も実は高精度形状計測には大きな誤差要因であった。

そこで、本論文では高速高精度に測定された露光中の光路差変化情報を用いて、振動によって変化してしまった干渉光強度から露光開始時の位相を高精度に求める方法を提案した。

提案した方法は以下のようにまとめられる。

- (1) 露光中の光路差変化を式 (2) の計算値として取り込むと、基礎とする位相計算に式 (3) を利用する場合、露光開始時の位相を式 (6) の形で近似を用いずに抽出することができる。
- (2) この方法は位相抽出の基礎にした位相シフト法の特長を反映しており、ここで取り上げた3画面、5画面、7画面を用いる位相シフト法以外にもより良い位相シフト法が開発されれば、その式にも応用可能な方法である。
- (3) この方法は露光時間を長く採ってもその間の外部振動を補正して正しく露光開始時の位相を求めることができる。そこで、低輝度な低コヒーレンス光源であっても露光時間

を長くして強い光強度を得て画像の S/N を上げ、高精度に位相抽出する手法に道を拓く方法である。

なお、この研究は科研費 (21360115) の助成を得たものである。

参 考 文 献

- 1) キヤノン NewView™ 7300.
- 2) 北川：広域モデル適合による多波長ワンショット干渉測定，2010年度精密工学会秋季大会学術講演論文集，(2010) 777.
- 3) 安達，藤本，平野：走査型白色干渉顕微鏡に内蔵可能な光路差変化量のリアリアルタイム測定法，精密工学会誌，**74**，11 (2008) 1215.
- 4) 安達，平野，河村，岩尾：振動環境でも利用できる垂直走査型光干渉応用形状計測技術，精密工学会誌，**75**，11 (2009) 1299.
- 5) 岩尾，丹羽，安達：露光中の光路差変化情報を用いた低輝度光源干渉像からの位相抽出の高精度化，2010年度精密工学会秋季大会学術講演論文集，(2010) 755.
- 6) P. d. Groot: Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window, *Appl. Opt.*, **34**, 22 (1995) 4723.
- 7) P. Hariharan, B. F. Oreb and T. Eiju: Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm, *Appl. Opt.*, **26** 13 (1987) 2504.
- 8) 安達，上田，榎本：2個の高輝度 LED と垂直走査型干渉計を用いる高速 nm 精度形状計測，精密工学会誌，**71**，11 (2005) 1401.