

振動下で撮影された光干渉像を用いた 高精度3次元形状計測*

安達 正明** 佐部田 龍佳*** 丹羽 康人†

High-Precision 3D-Shape Measurement Using Interferograms Exposed Under Vertical Vibration

Masaaki ADACHI, Tatuyo SABUTA and Yasuto NIWA

Vertical-scanning shape-measurement interferometry using white light could not 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 changes of optical path difference (OPD) of an interferometer at around 20- μ s interval and can trigger interferogram exposure at even the moment when predefined-length movement completes irregularly due to external vibrations. But vibration during exposure does change interferogram intensities captured. This changes result in phase extraction errors and then shape measurement errors. Then we developed the phase-extraction method which utilizes the history of OPD change during exposure and might remove the above errors. In this paper, validity of this method is estimated by shape-measurement experiments using pulse-like vertical vibrations.

Key words: white-light interferometry, vertical scanning, vibration, phase extraction, 3D-shape measurement

1. 緒 言

光干渉を使うと僅か数nmの凹凸であってもその高低幅が光強度から区別できる。これは光の波長が極めて短く、波長の半分の光路差変化で光強度が最大から最小へもしくはその逆へと大きく変化するためである。光干渉はこのように僅かな光路差の違いに極めて敏感である。しかしそれ故に、光干渉を利用した計測技術は周辺環境の振動に非常に弱い。振動があるとその加速度変化で構造体が歪み、歪みが非常に僅かであっても、干渉光強度を変化させるためである。この結果、非常に高い分解能で凹凸計測が可能で光干渉を応用した形状計測技術は容易に製造現場に持ち込めなかった。

しかし、MEMS (Micro Electronic Mechanical Systems) 技術¹⁾の登場は数十 μ mの段差を持つ微細構造素子の製造を促し、それらの機能に直結する微細構造の3次元形状を製造現場でも評価できる技術を要求するようになった。すなわち振動環境下でも光を使い簡単に非接触そして高精度に数~数十 μ mの段差を持った構造物の3次元形状を短時間に高精度測定できる技術を求め始めた。

そこで我々は、振動環境下でも微細構造物の3次元形状を光干渉を用いて高速高精度に測定するための技術を研究してきた。そして振動下でも所定の位相変化量毎に干渉像を正確に撮影開始する技術を開発した²⁾³⁾。しかしより高精度な計測には、干渉像の露光中における振動が光強度に与える影響も補正する必要があると判断した。そこで、露光中の振動等を含む光路差変化情報を用いて、強度変化を受けた干渉光強度から露光開始時の位相を抽出するための方法を考案した⁴⁾。

本論文では、垂直走査型の干渉応用形状測定装置に考案した方法を適用し、露光中に発生させた複数種の振動の下で取り込んだ干渉像から露光開始時の位相を実際に抽出し、形状計算した結果に関して報告する。一般に外部振動の計測結果への影響

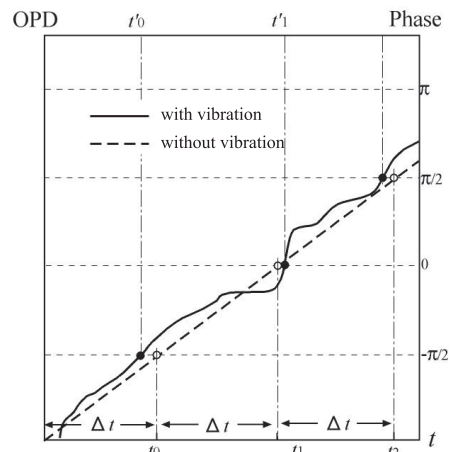


Fig.1 Ideal start-points of exposure for phase extraction in vibrating and non-vibrating environments. The points in non-vibrating are shown with white circles which are equi-spaced with Δt . The points in vibrating environment are shown with black circles and must be triggered by a real-time OPD meter

は干渉計の構造強度や共振の有無によって異なる。そこで、ここでは干渉計の中に外部振動の影響を擬似的に発生するPZTを持ち込んで露光開始直後に突発的な光路差変化を引き起こしている。そして、その位相への影響を考案方法で補正して計算した形状と補正しないまま計算した形状（振動が無かったものと見なして光強度のみから計算した結果）を比較し、その効果や残された問題点を検討した。

2. 振動による形状計測誤差の発生とその除去方法

最初に振動が形状計測誤差を引き起こす大きな理由と、これまでに報告した解決法を簡単に整理しておく。振動には色々な方向があるが、干渉計は光軸方向の光路差変化に極めて敏感であり、それが高精度計測を可能にするので光軸方向の振動を考える。通常、低コヒーレンス光源による干渉縞は光路差ゼロ付近でコントラストが最大となり干渉対物レンズはその状態で像もピントが合うように調整されている。そこで段差を持つ微細構造物の形状測定に広く使われる垂直走査型

* 原稿受付 平成24年5月21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

† (株)小田原エンジニアリング (神奈川県足柄上郡開成町吉田島4289)

干渉顕微鏡では、測定対象もしくは干渉対物レンズ（参照面を内蔵する）を垂直方向に干渉光の平均波長の1/8倍の高さ（位相変化量は $\pi/2$ ）ずつ移動させながら干渉像を撮影し、測定したい高さ範囲全域を光路差ゼロの状態が一方方向に通過するように走査する。その後、画素毎に光路差変化に伴う光強度の変動が最大となる点かどの高さで撮影され、その干渉光強度の位相がどんな値であるかから縦横共に高精度に3次元形状を計算する。このため画像撮影点（サンプリング点）は光強度変動の計算と位相計算が高精度に行い得る平均波長の1/8倍の間隔毎であることが重要となる。

外部振動が全く無い状態ではこのサンプリング点は定速の垂直走査の場合、図1の○が示すように等時間間隔となる。しかし波長の1/8倍は約70nmと短い。非常に小さな環境振動でも顕微鏡の構造体サイズが10cm以上であるため10nm近くは容易に変形してしまう。この変形は光強度を変化させる。これを無視し等時間間隔で画像を取りこみ、最大変動点とその位相から形状を計算すると変動強度と位相共にかなり変化しており重大な形状誤差となる。これを解決するために、垂直走査中の干渉計の光路差変化をリアルタイム測定できるようにする。その結果、振動下でも光路差変化量が波長の1/8倍の点を横切る瞬間を図1の●のように捉えることができ、振動下であってもカメラの露光開始機能を使って正しい位相変化量毎に干渉画像を取得できる。

この光路差変化に関しては、ブルーレーザと高いフレームレートを持つラインカメラを用いてリアルタイム計測する技術を我々は開発し²⁾、その光路差が干渉縞の位相抽出に適した値になった瞬間にLED光源をパルス点灯し干渉像を取り込み、振動下でも高い精度を維持しながら3次元形状計測できることを示した³⁾。

しかし干渉縞の露光開始時点正しく $\pi/2$ の位相変化毎にできても、LEDがONとなってカメラが光を蓄積している間に外部振動で光路差が想定外の変化をすると干渉光強度は変化してしまう。整数nを用いて干渉位相が $(2n-1/2)\pi$ 付近の時は、光路差変化と光強度変化が直線近似でき、取込値と予想値の違いが分かり易い。図2ではこの時のバケット取込⁵⁾の場合を示したが、振動が無い場合は垂直走査で光強度は点線のように直線的増加となるが、振動があると実線のような直線からのずれを辿り、干渉像の光強度はそれぞれの積分値となって値が大きく変わる。その結果、露光開始時点が正しくても変動強度計算や位相計算で誤差が発生し、それらの値を基に計算した形状は誤差を含んでしまう。

上に触れたブルーレーザとラインカメラ信号のリアルタイム処理を用いる方法²⁾では、露光中でも干渉計の光路差変化を記録し続けている。そこで振動によって変わってしまった光強度と露光中の光路差変化情報から露光開始時点の位相を抽出する方法を、その後の「振動環境下で撮影された干渉像からの高精度位相抽出」で提案した⁴⁾。

3. 実験装置

無限焦点型の垂直走査型干渉顕微鏡をベースにした実験装置の光学系を図3に示す。ベース顕微鏡はニコン製のL150であり、マイケルソン型5倍の干渉対物レンズを装着している。低コヒーレンス光源は2種の高輝度LED（BlueGreen： $\lambda_1=501\text{nm}$ 、Orange： $\lambda_2=585\text{nm}$ ）である（2種を使うことの利点は実験方法で述べる）。対物レンズが定速での垂直走査になるように、対物レンズ上部のPZT（PI社ナノボン

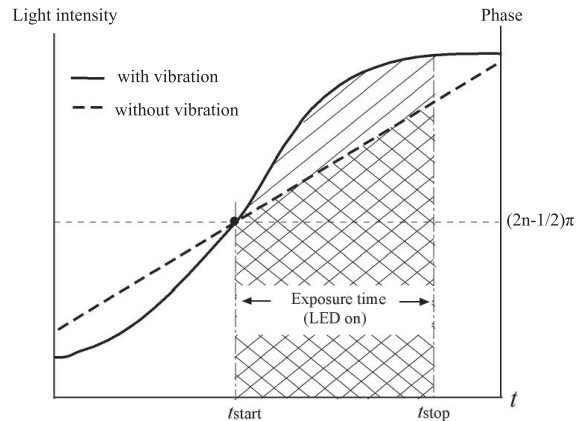


Fig.2 Signals recorded at a pixel of CCD camera having a certain exposure time under vibrating or non-vibrating environment. Both exposures start at a black circle point. But the signal intensities are different, because they are proportional to hatched areas. This different causes errors of phase extraction and modulation calculation

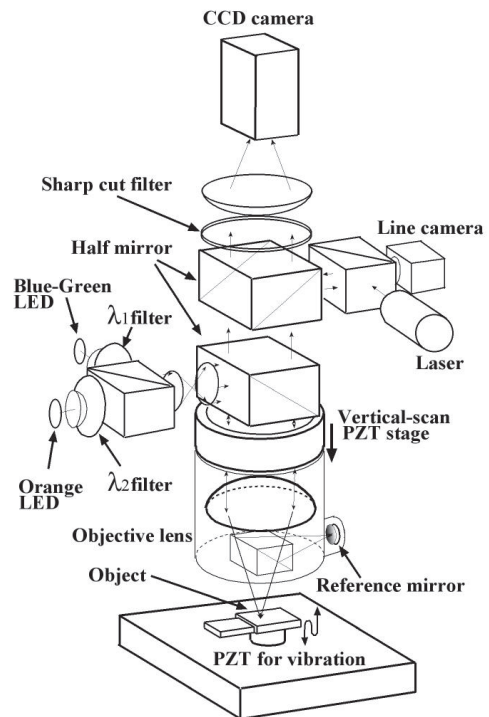


Fig.3 Interference microscope equipped with OPD meter. Optics of the meter is composed of a DPSS laser, a line CCD camera and a sharp-cut filter. Wavelength of the laser is 473nm, and the sharp-cut filter blocks for laser light to enter 2D-CCD camera. A high frame rate of the line camera makes real-time OPD measurement possible. Two different color LEDs are used to measure 3D shape of an object with $6\pi \pm \pi/2$ phase shift

シヨナー:P-721.20)をFPGA (Field Programable Gate Array)でデジタル制御する。光路差変化の計測光源として473nmのブルーレーザ光（昭和オプトロニクス社J050BS）を顕微鏡光軸上に持ち込み、測定物体と干渉対物レンズ内の参照面によるレーザ干渉像を高速ラインカメラ（画像取込速度80kHz）で撮影する。垂直走査に伴うこのレーザ干渉像の強度変化から外部振動影響下の光路差変化もFPGAが80kHzでリアルタイム計算する。さらに垂直走査中にLED光による干渉像の露光開始高さ（サンプリング点）になると、このFPGAは2次元CCDカメラ（Basler

社seA1390-17 gm, 12bit, 1390×1038画素)へ露光開始信号を送ると同時にLED駆動回路にも点灯用の矩形信号を送る. 2次元CCDカメラがLED干渉縞のみを撮影できるように短波長の強いレーザ光を吸収するシャープカットフィルターをカメラ前面に設置している. 測定対象試料は標準段差試料(段差50nm)とした. 図3に示した実験装置では, 露光中に干渉計の光路差変化を引き起こすべくもう一つのPZT素子を標準段差試料の下に設置している. そして段差近傍の点が垂直走査下で光路差ゼロ付近となる1枚の干渉画像の取込開始に同期して, ファンクションジェネレータで突発的振動波形をつくり電圧アンプを介して下のPZT(共振周波数100kHzで最大変位9 μ m)に入れ, 外部振動による光路差変化を疑似発生できるようにした.

4. 実験方法

振動下では光路差変化が一定速度型からずれるので, 画像取込間隔も変動する. 振動の振幅や周波数が大きくなると光路差変化速度も大きくなり, 画像取込直後にすぐ次の取込が必要となる場合もでてくる. この取込間隔の短縮化は, 許容できる振動強度を制限する. そこで, 2色のLED光源を用いた長いサンプリング間隔(同じ波長の画像取込は6 $\pi \pm \pi/2$ 毎の0.815 μ m毎, 2種の画像を交互に取り込むので画像取込間隔は0.407 μ m毎)を持つ画像取込法⁶⁾を用いる事にした. この方法は1波長のみを用いる場合のサンプリング間隔(位相シフト量が $\pi/2$ となる約70nm)の6倍であり, 高さ変化がその値になるまで次を取りこむ必要も無く許容できる振動強度も6倍となる. この2色のLED光源を用いた画像取込のタイミングと光路差変化の関係を図4に示す. ここでのLEDの点灯時間は1.5msとした. 点灯時間の短い方が露光中の振動影響を受けにくい, 振動影響を補正する手法の実験であり, 点灯時間を長めにする事で干渉画像のS/Nを上げる事ができるからである.

この2色のLED交互点灯を用いる方法での定速垂直走査下での疑似的外部振動発生による高さ変化と光蓄積の様子を図5に示す. 繰り返しになるがこの外部振動発生は光路差ゼロ付近のOrange画像1枚の取込に対してのみ行い, その他のOrange画像やBlue-Green画像の取込に対しては行わない. これは2色のLED交互点灯を用いた高速高精度計測法では, Orangeの画像が高精度計算の中心情報であり, Blue-Greenの位相はOrangeの位相との差からOrangeの干渉縞の次数計算にのみ使用しており, 最終的には得られたOrange縞の次数と位相から形状計算を行うからである. また, 1枚の取込画像のみで振動を発生させるのは, 得られた結果とその解釈をできるだけ単純化させるためである.

振動発生の具体的な方法は, 垂直走査開始後0.407 μ m垂直移動毎にFPGAから出される露光開始信号とLED点灯信号の内, 最初から50番目(Orangeの25番目)のLED点灯スタートのみに同期したパルス信号をFPGAからファンクションジェネレータにも出し, パーストモードでその100 μ s後に特定形状の電圧を450 μ s間発生させ, それを電圧増幅して標準段差試料の下のPZT素子に入力する. 発生させた形状は高さ Δh のhanning波形(詳細は測定結果の最初で述べる)と矩形で, 共に2kHzのほぼ1周期波形である. 図5ではhanning波形の発生と一定速度での垂直走査による光路差変化を高さ $h(t)$ の変化として示した.

使った標準段差試料の光路差ゼロ付近のOrange干渉像とその断面の高さ情報を図6に示す. 干渉像の上側中心付近に段差

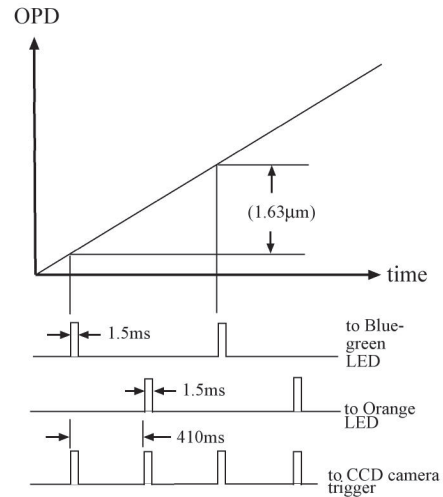


Fig.4 Timing chart of control signals. These signals are coincident with OPD changes drawn on the upper part. This OPD change is assumed to be not under vertical vibration. Values are used in the experiment of this paper

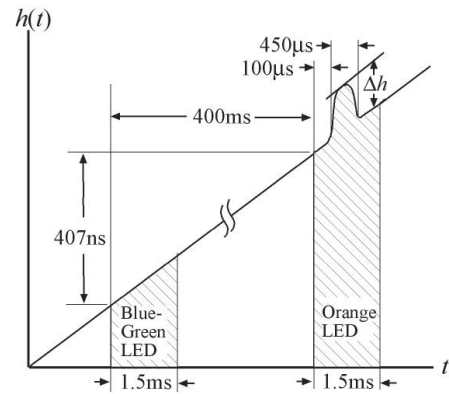


Fig.5 Intentionally generated height change signal Δh , which is added in only one orange-light exposure for the nearly-zero OPD among many exposures during vertical scanning

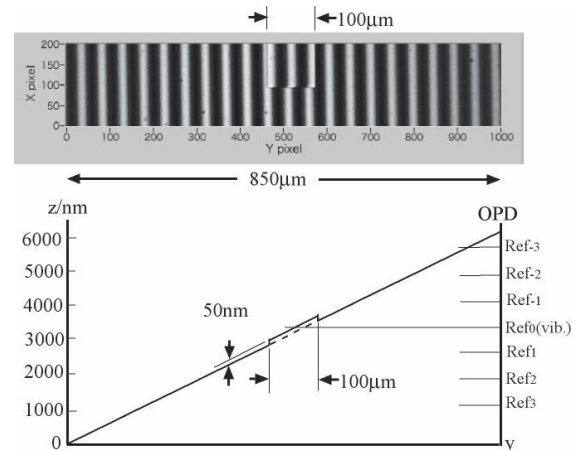


Fig.6 An interference image of the used step-height standard specimen of 50nm. The specimen is inclined so that height measurements of the center area are affected by vibration and those of the right and left areas are not affected. The vibration was generated at the timing when the height of reference mirror becomes Ref₀ level during vertical scanning

凸部が位置しており、試料は右方向が高くなるように故意に傾斜させている（干渉像には横方向の傾斜がはっきりと現れている）。ここでは位相計算に7画面法⁷⁾を用いるが、傾斜させることにより発生させた振動が影響する高さ領域と影響しない高さ領域を同一視野に共存させ、計測結果の断面にその影響の有無を明示できる（図9を参照）からである。この時の干渉画像取込時に予想される参照面7枚の位置の高さを下部右側の縦軸に示した。Ref0で示した位置に参照面が来た時に振動を発生させる。故に断面の中央付近はRef0で発生させた振動が影響する画像を使った形状計算結果となり、両端部には振動が無い時の形状計算結果が現れることになる。

ところでデータ処理の方法を示した「振動下で撮影された干渉像からの高精度位相抽出⁴⁾」では、LED露光中の試料の高さ変化を $h(t)$ 、露光時間を T 、LED光の平均波長 λ を用いて、取込むLED干渉画像（画像番号 i ）毎に以下の C_i と S_i を計算する。

$$C_i = A_i \int_0^T \cos \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} dt \quad (1)$$

$$S_i = A_i \int_0^T \sin \frac{4\pi h_i(t)}{\lambda} dt$$

そして、カメラから読み出される干渉像の光強度 I_i 、($i=3 \sim 3$)を用いて $i=0$ 番目の画像の露光開始時の位相 Φ_i に関し、その $\cos \Phi_i$ 、 $\sin \Phi_i$ を以下のように計算する。

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

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

ここで、 β は表現の簡略化のために使用した C_i と S_i の関数であり位相計算には影響しない。この式(2)、(3)から露光開始時の位相を複素平面上の偏角として求める。

この振動影響補正で用いるのは取り込む画像番号毎の式(1)の値（それぞれ2色の値）と、2色のLEDの干渉光強度 I_i である。式(1)の値はLED露光中の間ラインカメラの画像取込毎(80kHz)にFPGAが加算積分して保管し、総ての画像の取込が終わった時点で、RS232Cシリアルポートを介してLEDの2次元画像取込と形状計算を行うPCに送り、PC側で振動影響を補正し3次元形状を計算する。

5. 測定結果

実験では突発的な振動を12種発生させて3次元形状計測を行った。高さ変化は総て2kHzで変化する信号のほぼ1周期分で、hanning波形（スタート値を高さ0とするcosine波の-85度から始まり85度までの変化をする形状）では最大高さが0nm, 6nm, 12nm, 24nm, 48nm, 100nmとなるようにした6種、また同じ

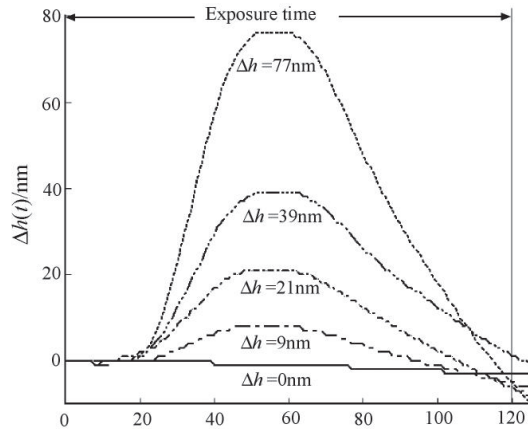


Fig.7 Pulse-like vibration generated during the exposure of an orange-LED interferogram. Unit of X axis is frame number of a line CCD camera during exposure. Values of Δh are peak values and are used to designate one curve from others

高さ変化となるようにした矩形波形6種である。これらに関して式(1)の計算をするためにFPGAが計測している露光中の高さ変化情報をPCに取り出した。ファンクションジェネレータの出力は正確なhanning波形ならびに矩形波形であったが、実際に取り出した露光中の高さ変化にはhanning波形と矩形波形に大きな違いは見られなかった。しかしピーク高さには違いが確認できた。そこで図7では、hanning波形でピーク高さ Δh の違いが大きく異なる5種のみを示した。hanning波形と矩形波形に違いが生じなかったのは、PZTや電圧増幅器の周波数応答、PZT接続部や試料台の剛性、そして標準段差試料の質量が複合的に影響した結果と考えられる。

次に、取り込んでいる総てのLED干渉像毎にこのような光路差変化情報から式(1)を用いて計算した C_i と S_i を図8に示す。横軸は色別の取込画像番号であり、縦軸は最大値を16000に規格化した強度であり、実線と破線はOrange画像に関する C_i と S_i 、点線と一点鎖線はBlue-Greenの C_i と S_i である。図8(a)では発生させた振動が $\Delta h=0$ nmのものであるが、定速度の垂直走査ならびに外部から入る避けようもない振動のために S_i は平均が600ぐらいで画像取込毎に値が大きく変動している。一方 C_i はcosine関数の積分であり、露光開始後の光路差変化は波長に比して小さいためにcosineが1付近にとどまり最大値近傍となっている。図8の(b)、(c)、(d)、(e)と Δh が大きくなるに従い、Orange画像の25番目の C_i と S_i に徐々に大きな変化が現れ始めていることが確認できる。

次に図7と8の条件で測定した標準段差試料のxピクセルが150上の断面形状を図9に示す。右上の数字は発生させているhanning波形信号のピーク高さ Δh である。試料は故意に傾斜させているので測定された形状は大きく右肩上がりとなり、そのままでは振動による影響を比較しにくい。そこで、測定結果から右肩上がりのベース傾斜分を差し引いた形状を横方向に平均無しで示した。それぞれで上側が発生した振動による影響を C_i と S_i 情報を基に補正して得た形状、下側が C_i と S_i 情報を使わずに、干渉画像強度のみから計算した形状である。振動影響は中心部とそこから少し右側に発生している。影響が発生している箇所が(a)~(e)で異なるのは、振動強度を変えながら毎回垂直走査したためであり、測定毎にOrange画像25枚目となる高さが少しずつ異なったためである。

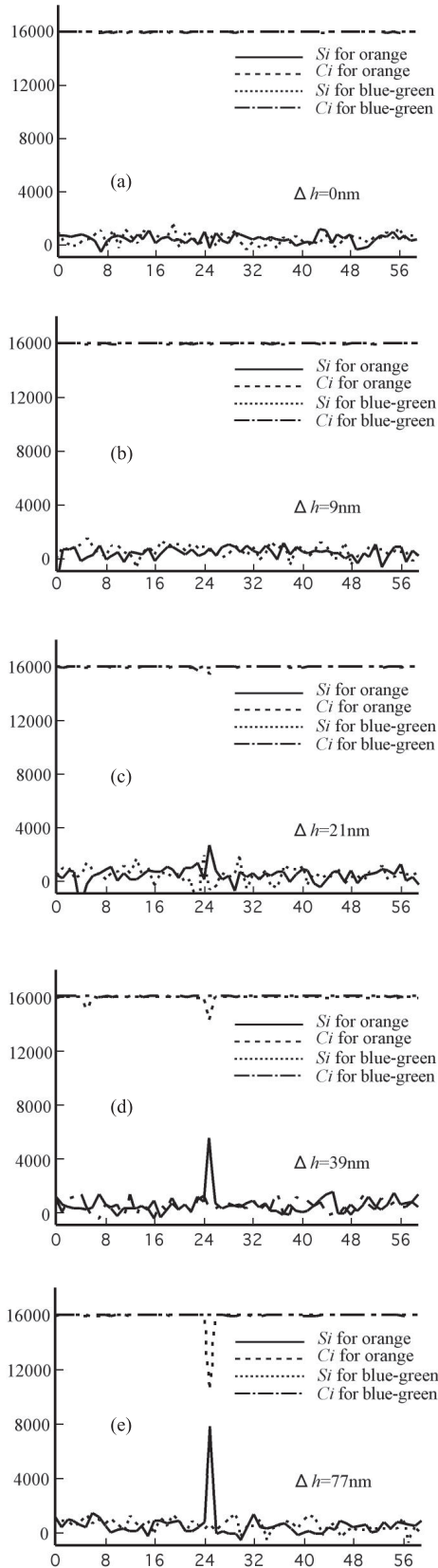


Fig.8 Intensity changes of C_i and S_i calculated from OPD changes during exposures. X axis is order number of interferogram captured through a vertical-scanning. Y axis is intensity normalized to 1,6000 of its maximum value. Solid lines are of S_i and broken lines are of C_i for orange interferograms. Dotted lines are S_i and dotted and a broken lines are C_i for blue-green interferograms. The 25-th orange interferogram is exposed under intentionally generated pulse-like vibration

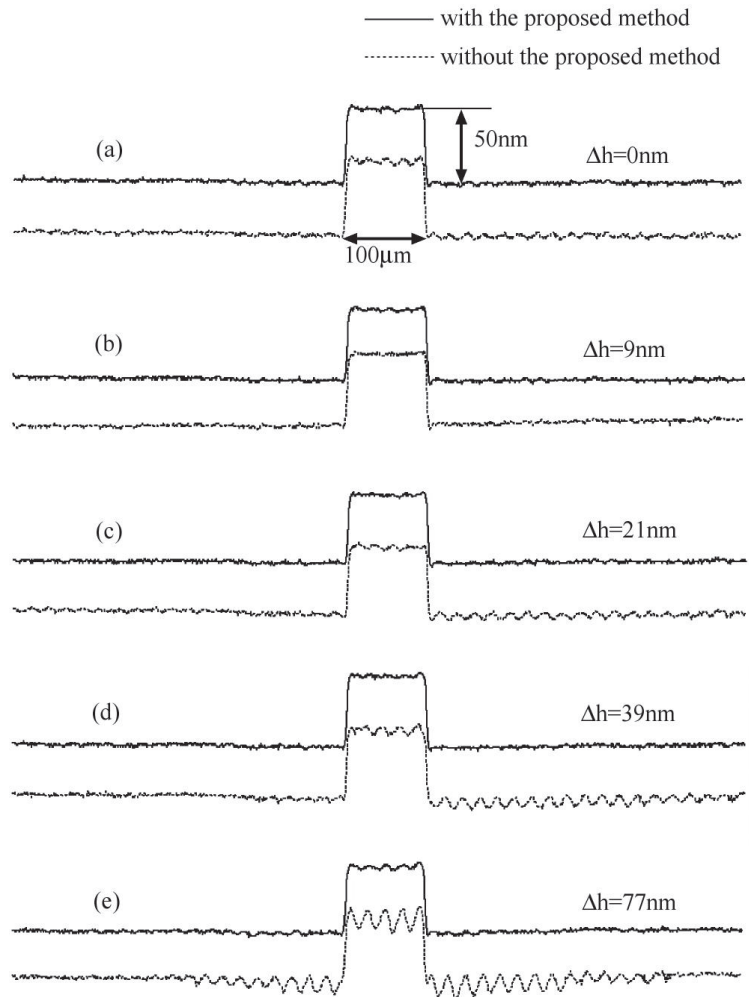


Fig.9 Measured cross-section profiles of the step-height standard. Parameters on two profiles indicate peak heights of pulse-like vibrations which are intentionally generated during the 25th exposure of orange interferogram. Upper profile is calculated by the correction technique of vibrational effect with using C_i and S_i changes shown in Fig.8. Lower profile is calculated by an ordinary technique using interferogram intensities

同じ干渉画像を用いての補正のあるなしに相当する上下を比較すると、特に大きな振動条件では干渉計内で発生させた振動の影響は補正で大部分除去できることが分かる。補正しない場合、振動影響は規則的な周期の凹凸形状誤差を与えるがこれは干渉縞の空間周波数の2倍であり、位相シフトが正しく行われなかったときに発生する形状誤差⁸⁾と一致している。今回は露光開始時の位相シフト量は正しく $6\pi \pm 1/2\pi$ であったが、露光中の振動で干渉光強度が変化し、この強度変化は位相シフトが正しく行えなかった場合の影響に疑似対応したためと考えられる。(e)で発生させた振動振幅は77nmであるが、その場合でも50nmの段差をほぼ正しく形状計算できている。振動振幅77nmは通常の1波長を用いる場合の垂直サンプリング間隔(約70nm)を上回っており、1波長では露光中に次の画像を取得しなければならない状況に結びつくものであり、絶対に計測不可となる条件である。その条件でも測定がなされることは、この2波長を用いる計測方法は光路差変化のリアルタイム計測法と合わせて振動影響を受けにくい測定法の実用化に有効であることを示す。

しかし、振動補正した方が補正しない場合と比較して誤差を多めに含んでいるように見える所 (b) の中心部とその右側近傍) もある。また、振動振幅が大きくなると、補正していても振動影響が計測結果に現れてくる状況もある (最大振幅となる (e) では中心部の凸域に周期的誤差が現れている)。これらの原因に関しては、FPGAのプログラムバグ、カメラへの露光開始トリガーと実際の露光開始タイミングのずれ、カメラの γ 値の影響、等に関して調べたが完全な解決には至らなかった。ただし、図9から本方法が振動下での高精度形状計測に非常に有効であることは確認できた。

6. 考察と結論

垂直走査型干渉計の光路差変化をブルーレーザとラインカメラとFPGAでリアルタイム測定しその情報を用いて、露光中に加わることが予想される外部振動の影響を形状計算結果から除去する方法の有効性を実験で示した。露光中に干渉計内に加えた突発的な振動は0.5ms間に高さ80nm近く上がりすぐに戻る振動である。測定器本体の干渉計構造にもよるがこの強さの変位を干渉計内に引き起こす振動はかなり大きな外部振動になると考えて良いだろう。本論文はそうのように大きな振動の影響も殆ど補正できることを実際に示した。

一方で、我々がここで用いた「2色のLEDを用いる高速高精度3次元形状計測法⁶⁾」は位相シフト量を $6\pi \pm 1/2\pi$ にできる方法である。これは垂直走査速度を高速化できるだけでなく、振動による干渉計の光路差変動に関しても次の画像サンプリングまでの光路差変化量を大きくとれるので加速度の大きな振動の影響を補正しやすい事も確認できた。

ところで、振動下でのnm精度の超高精度計測の実現にはさらなる測定装置のチューニングが必要だとも感じた。これは干渉縞の2倍の周期の形状誤差の発生が図9ではまだ完全に除

去できていないためである。今後もこの原因の分析を進め形状誤差を低減して行きたい。

最後に得られた結果をまとめる。垂直走査型干渉計に光路差変化のリアルタイム計測を持ち込むことで、振動環境下でも一定の位相変化毎に干渉像を取りこめるが、これだけでは露光中の振動影響は除去できない。ここで取り上げた方法は、露光中の振動を含む光路差変化履歴と、振動により変化してしまった干渉光強度を利用して露光開始直後の干渉位相を求める方法であり、干渉計内に突発的に発生させた強い振動に関してもその影響を殆ど排除して正しく形状計測を行うことができた。本方法を用いると振動下でも露光時間を極端に短くする必要が無いので干渉縞のS/Nを良くすることができ、低コヒーレンス光源を利用した高精度干渉計測の広い分野に応用することが可能と思われる。

なお、本研究は科学技術研究費 (課題番号21360115) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 深田, 日暮: MEMS商用化技術の現状と今後の展望, 精密工学会誌 **76**, 5 (2010) 491.
- 2) 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ルタイム測定法, 精密工学会誌, **74**, 11 (2008) 1215.
- 3) 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.
- 4) 安達, 丹羽, 岩尾: 振動環境下で撮影された干渉像からの高精度位相抽出, 精密工学会誌, **77**, 5 (2011) 502.
- 5) D. Malacara: "Optical shop testing, 3rd edition", A John Wiley & Sons, Inc., 2007, 561.
- 6) 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.
- 7) P. d. Groot: Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling windows, Appl. Opt. **34**, 22 (1995) 4723.
- 8) D. Malacara: "Optical shop testing, 3rd edition", A John Wiley & Sons, Inc., 2007, 576.