

# 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\*

安達正明\*\* 平野勇輝\*\*\* 河村昌範† 岩尾雄太†

Vertical-Scanning Shape-Measurement Interferometry Applicable under Vibrating Environment

Masaaki ADACHI, Yuuki HIRANO, Masanori KAWAMURA and Yuuta IWAO

Vertical-scanning shape-measurement interferometry using white light is widely used to measure 3D shape of objects having step-like shape. This interferometry however cannot be used under vibrating environment. Because, it is required to accurately repeat predefined-step movements over vertical measurement range. We developed new technology which can measure the changes of optical path difference (OPD) of an interference microscope with nanometer resolution. This uses a line camera and a FPGA device and can measure OPD changes with around 20- $\mu$ s interval. We built this technology onto a vertical-scanning interferometer and estimated performance of the developed technology using some vibration conditions.

**Key words:** white-light interferometry, real-time measurement, vibration, phase, vertical scanning, nanometer

## 1. 緒 言

低コヒーレンス光の干渉を利用する垂直走査型形状測定法が報告<sup>1)~3)</sup>され始めてから20年近くが経過し、ヒステリシスが極めて低く抑えられるようになった高精度ピエゾ駆動装置の登場や測定装置組み込みソフトウェアの機能充実もあって、垂直走査型の高精度3次元形状測定装置は近年広く使われている。この普及には、数mm以上の作動距離を確保しながら段差等の3次元形状をnm精度で測定できることや、垂直走査により対物レンズの焦点深度以上の高低差があってもボケのない形状を測定できる特長が注目されたのだと考える。そして、高精度な加工が施された微細構造物やMEMS (Micro electro mechanical systems) 素子が最近の商品に多く利用されて来ており、それらの高精度形状評価にこの特長が向いているからでもあろう。

しかしこの種の装置は、参照面内蔵の干渉対物レンズ（もしくは測定対象物）を垂直方向に決められた量（基本的には光の波長の1/8倍）だけ高い精度で動かしその都度干渉像を撮影しながら、対象物の高低差以上の範囲を一方に走査して形状を測定している。故に上下振動の残る環境下では、干渉画像撮影時の垂直位置が振動によって想定位置からずれる場合も多く、nmという高い形状計測精度を実現するのは極めて難しいとされる。

垂直走査型形状測定法の走査速度の高速化を目指して我々が以前に開発した「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<sup>4)</sup>：以下では高速nm精度形状計測と呼ぶ」でも正確な垂直移動量（位相シフト量）の制御が必要であり、この装置を振動環境下にある製造現場に持ち出すことは難しかった。一方で最近では、フラットパネルなど大型部品の一部分の突起形状を本体から切り出すことなく高精度に測定したいなどの要求も現場にはあると聞く。この要求ではゴミの付着や接触傷を避けるために部品と測定ヘッド間

に間隔を固定し易いスペーサーを挿入する事も難しく、環境振動を極めて受けやすい状況下での高精度形状計測技術が要求されると思われる。当然、従来の垂直走査型干渉応用形状測定装置の利用は極めて難しいようである。

そこで我々はここ数年、垂直走査型光干渉応用形状測定装置の振動環境下への応用技術の研究してきた。ここで対象とする振動はその振幅値が重要であるが、ここでは仮想的な静止点から見た装置台の振動振幅を指さないことにする。装置は通常除振台に搭載されるが、除振台の性能よりも装置構造の機械強度によって干渉計の実際の光路差変動量は大きく異なる。そこで本論文での振動とは光路差変動を与える測定ヘッドと測定対象物間の直接的な距離変動を指すことにし、またその大きさは剛性の高い装置構造をとっても容易に除去しきれないサブミクロン以下の小さな振幅の振動を指すこととする。光干渉計測は光の波長が数百nmであるが故にnm精度の高い形状測定を可能にするものであり、例えばサブミクロン以下の振動振幅でもnm精度の計測では重大な誤差を招くからである。一方で十nm前後の振動は極めて小さな振幅でもあり、構造強度を上げたり、光干渉信号を基にしたアクティブ制振技術<sup>5)~7)</sup>を用いてもそう容易には除去できない振動と思われ、その対応技術が強く求められると我々は考える。

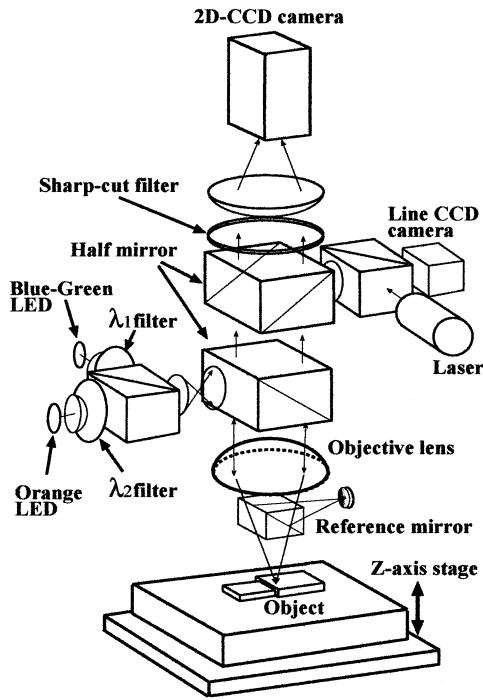
今回我々は、被測定面がMEMS素子に見られるように段差を持つ平面等から構成されるとする条件下で、微小振幅振動があっても段差高さを高精度に測定できる技術を開発した。この方法は「走査型白色干渉顕微鏡に内蔵可能な光路差変化量のリアルタイム測定法<sup>8)</sup>」として先に報告した高い変位計測精度を有するアルゴリズムを、FPGA (Field Programmable Gate Array) デバイスを使用してリアルタイムに高速実行させることで可能になったものである。報告<sup>8)</sup>したアルゴリズムに沿ってリアルタイムに干渉光路差を抽出するには通常のコンピュータ(PC)では性能に限界があり難しい。そのような場合の解決法として高性能なFPGAの利用が最近進む。そこで論理回路言語でデータ処理法を記述し、リアルタイム実行が可能なシステムとして完成させ、その機能をON, OFFして結果を比較し、効果を繰り返し性を含めて確認することは、高速かつ高精度性を扱う精密工学の分野においては意味のあることと考えて行った。

\* 原稿受付 平成20年9月27日

\*\* 正会員 金沢大学大学院

\*\*\* (株)ジーシー

† 金沢大学大学院

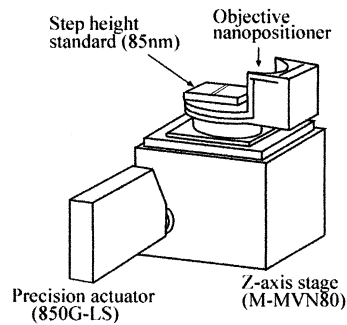


**Fig.1** Interference microscope equipped with OPD meter. Optics of the meter is composed of a DPSS laser, a line CCD camera and a sharp-cut filter. Wavelength of the laser is 473nm, and the sharp-cut filter blocks for laser light to enter 2D-CCD camera. A high frame rate of the line camera makes real-time OPD measurement possible. Two different color LEDs are used to measure 3D shape of an object with 2D-CCD camera

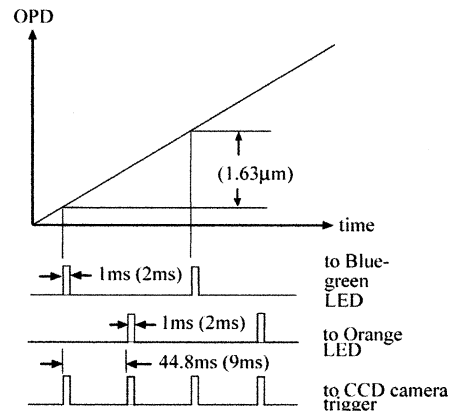
本論文ではこの方法を用いることで、干渉計内に故意に導入した振幅 100nm, 周波数 10Hz までの振動の影響を排除して標準段差試料の段差 85nm の形状を変動量 1 nm 前後で測定できることを実験結果を中心に示す。この方法は高精度ピエゾ駆動装置や振動による光路差変動のアクティブ制振技術<sup>5)~7)</sup>を一切用いない測定であり、故にアクティブ制振と併用することで、さらに大きな振幅や高い周波数の振動にも対応出来るようになると考えている。

## 2. 垂直走査型形状測定装置と振動発生機能組み込み走査ステージ

実験に用いた垂直走査型 3 次元形状測定装置の光学系を図 1 に示す。これは「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」<sup>8)</sup>の光学系と同じである。低コヒーレンス光源は光学系の左側に示す 2 種の高輝度 LED (Blue-green LED: 中心波長  $\lambda_1 = 501\text{nm}$ , Orange LED: 中心波長  $\lambda_2 = 585\text{nm}$ ) である。3 次元形状計測での垂直走査に伴う干渉画像のサンプリング間隔は約 400nm であり、波長の異なる干渉画像を交互に記録するので位相シフト量に換算すると約  $6\pi \pm \pi/2$  となっている。光学系の右側に位置するレーザ光源とラインカメラは光路差変化のリアルタイム測定に用いるものであり、測定領域内の一部の平面が作るレーザ干渉像を高速で読み取れる構造となっている。このレーザ光 (波長は 473nm) は使っている低コヒーレンス光と比べて短波長で光強度も高いので、低コヒーレンス光の干渉像読み取り 2 次元カメラに入射しないようにシャープカットフィルターをカメラ直前に配置している。今回の研究では外部からの振動影響を干渉対物レンズ (マイケルソン型 5 倍)



**Fig.2** Z scanning stage which can vertically vibrate a specimen. A base Z-stage is Newport M-MVN80 and is powered by 850G-LS actuator in Z scanning. An objective nanopositioner is placed on the stage and used to vertically vibrate a specimen. In an experiment the Z-axis stage in Fig.1 is displaced with this stage and this makes Z-axis scanning and vertical vibrating in parallel

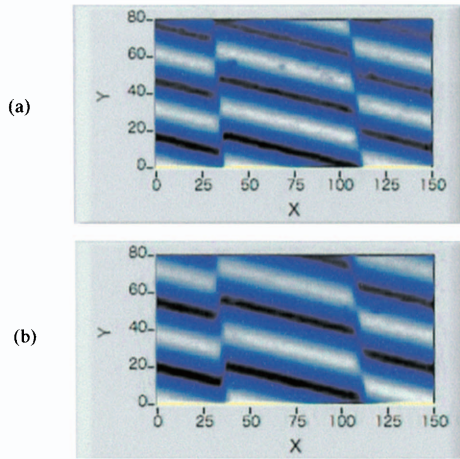


**Fig.3** Timing chart of control signals. These signals are assumed to coincident with OPD changes drawn on the upper part. Values are used in the experiment of this paper. Values in parentheses were used in the experiment of the published paper<sup>1)</sup>

と測定対象物間に疑似的に発生できるように、図 1 下部の測定物を載せる Z 軸走査ステージを、干渉計内に起こるであろう振動の、振幅や周波数の制御が可能な図 2 の走査ステージで置き換えた。図 2 のベースとなる Z 軸ステージは Newport 社の M-MVN80 であり、同社の精密アクチュエータ 850G-LS (低速タイプ:  $6\text{--}78 \mu\text{m/s}$ , エンコーダ分解能  $7.98\text{nm}$ ) を組み込んでいる。このステージ上に、上下方向の振動発生器として、PI 社の対物レンズナノポジショナー (P-721.20) を逆さに設置し、ポジショナー上に段差 85nm の標準試料を置いて測定対象としている。対物レンズナノポジショナーへの位置指令はアナログ入力モードとし、(株) NF 回路設計ブロックの信号発生器 WF1946A からの正弦波信号をその入力端子に接続している。

## 3. リアルタイム変位計を用いない条件下での形状測定結果

「高速 nm 精度形状計測」<sup>4)</sup>で報告した方法では PI 社の対物レンズナノポジショナーを用いて 20 倍のミロー型対物レンズを  $40 \mu\text{m/s}$  の定速で垂直走査しながら、約 400nm 毎に高輝度発光 LED を 2ms 間だけ発光させつつ 2 種の干渉画像を交互に取り込んだ (図 3 の括弧書きパルスデータ参照)。ポジショナーへの位置指令信号と LED 点灯信号、カメラへのトリガー信号は PC 内のリアルタイムボードを用いて作製した。その結果、オペレーティングシステムの負荷の時間的変動に



**Fig.4** Interference patterns of the measured step-height standard. Both patterns are captured around OPD of zero. (a) shows the pattern of blue-green light ( $\lambda_1 = 501\text{nm}$ ). (b) shows the pattern of orange light ( $\lambda_2 = 585\text{nm}$ )

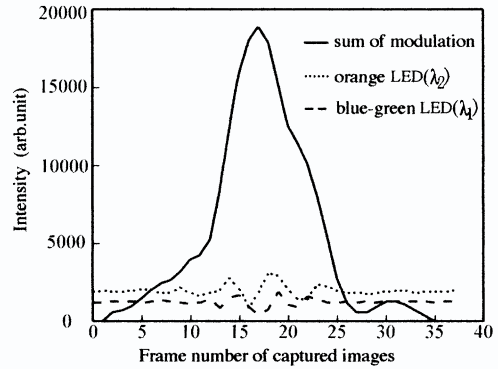
よらずに滑らかで高精度な垂直位置制御と画像取込ができていた。本研究では、制御が可能な振動発生器としてナノポジショナーを用いるために一定速度の垂直走査にはこれを使っていない。そして、垂直走査は精密アクチュエーター 850G-LS でZ軸ステージ M-MVN80 がほぼ  $10 \mu\text{m/s}$  の定速度移動となるようにし、信号発生器 WF1946A から 22.3Hz のパルス信号を出して、高輝度 LED の交互点灯とそれに同期した画像撮影を行った(図3参照)。形状測定装置全体を大型除振台に載せ、外部から故意的な振動を一切加えない通常の実験環境下での2色LEDを用いた干渉画像取込である。LED点灯時の光路差の時間変化は図3上部の光路差変化となるように調整しているが、垂直走査にナノポジショナーを用いず低速での垂直移動による測定なので除振台を介して外部の振動を受けて光路差は正確な直線的増加をしていないと予想される。取り込まれた各LEDでの干渉画像を図4の(a)と(b)に示す。X画素27と113付近に縦に入っているのが段差の境界である。

2色LEDの交互点灯で取り込んだ画像毎の光路差変化量は一定ではないと思われるが、取り込んだ干渉画像から「高速nm精度形状計測」<sup>4)</sup>で報告した手法で3次元形状計算を試みた。2次元カメラの個々の画素毎に垂直走査に伴う干渉光強度変化のエンベロープを計算し、どの干渉像が光路差0に最も近いかを調べる。ある画素で計算したエンベロープを図5に示す。このピークを与える位置の $\lambda_2$ の干渉画像(撮影時のZ軸想定移動量は画像番号から分かる)での光路差OPDを次式(1)で計算する。

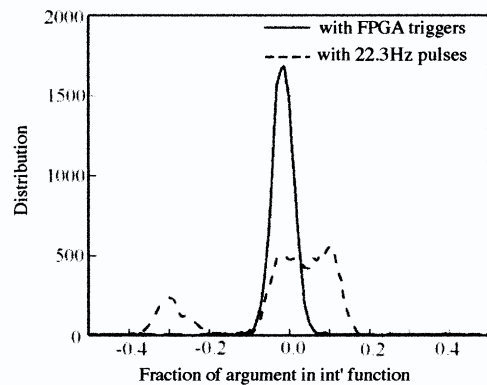
$$OPD = \text{int}' \left\{ \frac{\lambda_e \Delta\phi - \lambda_2 \phi_2}{2\pi\lambda_2} \right\} \lambda_2 + \lambda_2 \frac{\phi_2}{2\pi} \quad (1)$$

この式で、 $\lambda_e$ は $\lambda_1$ と $\lambda_2$ から計算される等価波長であり、 $\Delta\phi$ は波長 $\lambda_1$ と $\lambda_2$ での位相 $\phi_1$ と $\phi_2$ の差である。この $\phi_1$ は $\lambda_2$ の画像撮影時の光路差のまま波長のみ $\lambda_2$ から $\lambda_1$ に変えて干渉画像を取り込み位相を抽出した値に変換している。第1項の $\text{int}'$ は $\lambda_2$ の干渉縞の次数を計算しており、第2項はその縞内での位相 $\phi_2$ から分かる光路差変化量である。この計算をカメラの1画素毎に行い、その干渉像撮影時のZ軸移動量と合わせて視野全体の3次元形状を得る。

この方法で垂直走査により取り込んだ干渉画像を用いた形状計算を4回繰り返して試みたが、その中で取込画像毎の光



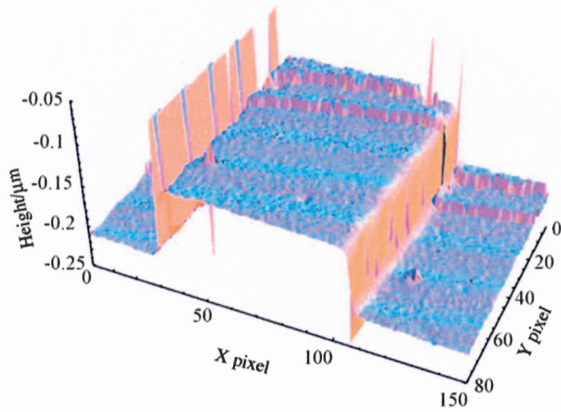
**Fig.5** Light intensity changes along captured images at a certain pixel of 2D-CCD camera. Dotted curve is of orange light and broken curve is of blue-green light. Solid curve is sum of the modulation intensities regarding each light. All the images are captured with 22.3Hz pulses



**Fig.6** Distribution curves of fractions for the argument in  $\text{int}'$  function of Eq(1). The fractions are calculated at all the 2D-CCD pixels. Solid curves is of the interferograms captured with FPGA triggers. Broken curve is of those captured with 22.3Hz pulses

路差変化量が大きく変動しておらず段差らしい3次元形状を計算できたのは1回のみであった。その測定でのエンベロープが図5である。「高速nm精度形状計測」<sup>4)</sup>ではピークが1つの滑らかな変化がほぼ確実に得られたが、図5では小さなものを含めると3つのピークからなる左右に非対称の歪んだ形となっている。また、これらの干渉像での式(1)の $\text{int}'$ 関数(干渉縞の次数を計算する整数への丸め込み)の端数(切り捨て値)分布を図6の破線で示す。全画素で調べて得られるこの端数の分布が0を中心に0近傍に集まっている場合(例えば図の実線)は干渉縞の次数がどの画素でも正しく求まっていることを示し、0から離れて幅広く分布する場合は次数を間違えて計算している可能性が高いことを意味する。破線のカーブでは次数計算の信頼性が殆どなくなる-0.5や0.5付近には分布がないが、0近傍から離れたところにも2つピークが存在し、場所毎に値が異なるオフセットが抽出位相値に載っていることを示す。この取込画像から標準段差85nmの3次元形状を計算した結果を図7に示す。図7では奥行き(-Y)方向に異なる取込画像番号(エンベロープピークを持つ画像番号)から計算されたために段のように見える形状がある。これは、図4に見られるように傾斜している表面の干渉画像を約400nm垂直移動しながら撮影した時の光路差変化量が外部振動により想定量と違ったため、想定量との差が段となって現れたものである。また、同じピーク画像から計算されている手前の領域でも奥行き方向に低い空間周波数



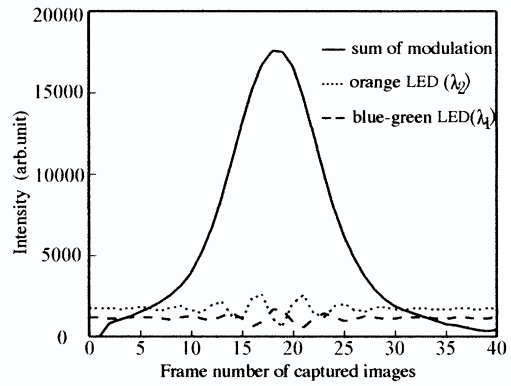


**Fig.7** 3D output shape of the step height standard( 85nm). This is measured without FPGA trigger. No intentional vibration is added, but unavoidable vibration affects interferograms captured

で小さな振幅の正弦波的变化が見られる。これは図4 (b) の干渉画像の空間周波数の2倍であり、位相計算で用いる画面間での位相シフト量が振動によりずれてしまい抽出位相に誤差として影響<sup>9)10)</sup>したものと解釈できる。なお、図7でのX画素が35付近で見られる垂直板のような形状は、標準段差の境界での干渉光強度の低下等による高さ計算の異常から出てくるもので、周辺画素の高さを基にしたメデアンフィルターで除けるものであるが、ここでは1画素毎の高さ計算結果をそのまま示した。

#### 4. リアルタイム変位計を用いての 振動環境下での形状測定結果

ここでの光路差変化量のリアルタイム測定法<sup>8)</sup>は、測定対象とする干渉像内で位相が $\pi/2$ 前後異なる2箇所での、垂直走査に伴う光強度変化を利用する。用いるのはレーザー光なので高さの広い範囲にわたる垂直走査でも干渉光強度変化のモジュレーションはゼロにならない。この2箇所を含む線上領域の光強度分布を1画素12bit、1ライン512画素のデータとして高速ラインカメラで撮影する。ラインカメラからのデジタル信号はカメラリンクを介して1ライン当たり10 $\mu$ s前後で直接Altera社のStratix II 60-1 FPGA(Field Programmable Gate Array)ボード(logic element数: 60,440)に転送される。このFPGAボードはレーザー干渉像の位相が $\pi/2$ 前後異なる2箇所付近について、試料が平坦であることを利用し、受光面積を5画素分にするため連続する5画素からなるグループを2個、合わせて10画素の信号を抜き出す。その後、2グループ毎の合計光強度を計算し、垂直(Z軸)走査に伴う合計値の時間変化から最大値と最小値を探し出し、それを用いて2つの合計値を共に振幅1の変化に規格化する。規格化した2つの変化に関して、次にその和と差を計算し、計算値の変化を再度規格化する。再規格化された和信号と差信号の変化は垂直移動に伴う干渉位相変化の正確なcosine変化とsine変化になる<sup>8)</sup>。ところで、高速ラインカメラから入力するフレーム信号は58kHzであり、線上領域の光強度分布を与える一群の信号と次の撮影に相当する一群の信号の間にブランキングと呼ばれる信号送出不の時間を持つ。FPGAボードはこのブランキング時間に、上記の処理を実行し2種の正確な正弦波変化から画像取込毎の垂直移動量をサブnm精度で計算し、変位を累積していく。累積した変位



**Fig.8** Light intensity changes along captured images at a certain pixel of 2D-CCD camera. Dotted curve is of orange light and broken curve is of blue-green light. Solid curve is sum of the modulation intensities regarding each light. All the images are captured with FPGA triggers

量が所定量(位相シフト量)を越えた時点で、速やかに図3下部のパルス信号を出す。本実験ではZ軸ステージを精密アクチュエーター850G-LSを用いて10 $\mu$ m/sで動かすので、フレームレート58kHzではZ方向0.2nmの変位毎にラインカメラ画像が取り込まれ、次の取込までに累積変位量が計算されるリアルタイム計測となっている。なお、垂直走査を通して干渉光強度変化のモジュレーションはゼロにならないがその幅の増減はありえる。そこで、垂直走査約1 $\mu$ m毎に規格化用のパラメータ(最大値と最小値)を更新しながら計測を続ける。ただしFPGAボードからのトリガー信号を受けて後、高輝度LEDは1ms間点灯するので、その間にほぼ10nm動いている。この1ms間は一定の速度で光路差が変化をしていると仮定し、仮定と実際の違いによるずれは形状計算では無視している。

リアルタイム変位計を用いて、最初に故意的な振動を加えない状態で取り込んだ画像から、ある画素での垂直走査に伴う干渉光強度変化のエンベロープを計算した。これを図8に示す。 $\lambda_1$ ならびに $\lambda_2$ の干渉画像の光強度変化を波線と点線で示す。図5と比較すると極めて滑らかなそして対称性の良いエンベロープが計算されている。次に3次元形状計算に伴う、干渉縞次数計算での整数への丸め込み時の端数(切り捨て値)分布を計算したものを図6に実線で示す。0付近に端数分布が集中し、縞次数が正しく計算され抽出位相が全画素域で一様な精度を持っていることを示している。

次に図2のZ軸ステージのナノポジショナー(振動発生部)で強制的な外部振動を数種類発生させて、同じくリアルタイム変位計を用いての形状測定を行った。発生させた振動は振幅が25nmでは周波数が5Hzと10Hz、振幅50nmでも5Hz、10Hz、20Hz、振幅100nmでは10Hzの6種類である。振動を発生させているので位相シフト量が所定量になるまでの時間間隔は一定値から大きくずれる。故意的な振動を発生させない状態での発生振動振幅を0nmと表示することにして、10Hzの周波数(図9(a))の場合のみでの取込時間間隔の画像番号による変化を図9(b)に示す。振幅0nmは故意的な振動を加えていない場合だが、時間間隔は最大で10ms近く変動している。振動振幅が大きくなるにつれて、取込時間間隔の変動量はほぼ比例して大きくなっている。用いている2次元画像取込ボードは最速で100枚/秒なので、これ以上の変動幅は試さなかった。以上の6種類の振動環境下でも端数分布やエンベロープの変化は図6の実線や図8に近いものとなった。図9の変動幅が最大の振幅100nm、周波数10Hzの振動条件下での

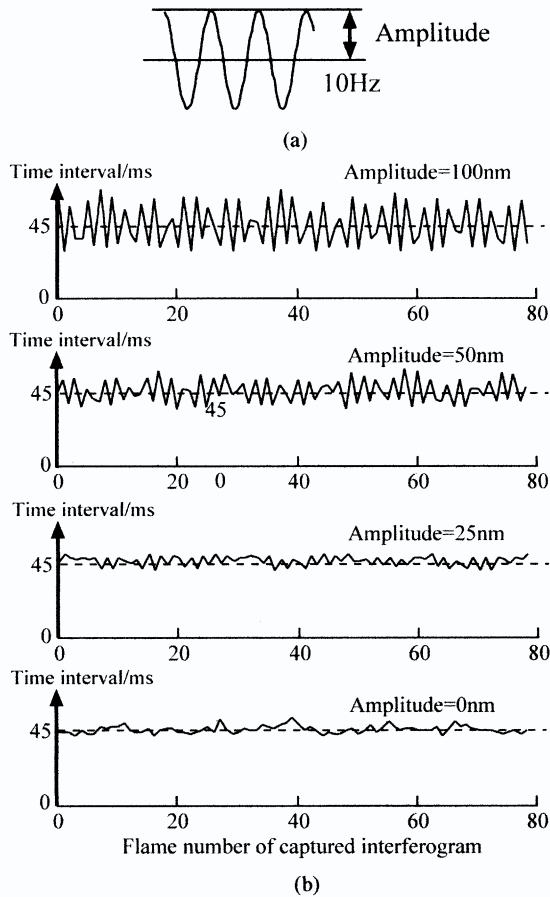


Fig.9 (a) generated vibration in the interferometer. (b) Interval time changes of interferogram capturing. Vibration frequencies are all 10Hz, but vibration amplitude are different. The base Z-table is scanned at 10 $\mu$ m/s by the 850G-LS actuator

3次元形状測定結果を図10に示す。図7と異なり綺麗な段差形状が測定できている。図7の測定結果を含め、8種類の振動環境下で得られた3次元形状の測定結果からY画素が5付近のX方向の断面形状を計算した結果を図11に示す。測定対象は85nm  $\pm$  1.1nmの標準段差であり、リアルタイム変位計を用いた場合はほぼ正しく段差が測定できている。故意的な振動がなくてもリアルタイム変位計を用いない場合は、環境による振動もしくはZ軸ステージの走査速度の変動のために4回の測定中1回しか形状が計測できず、できた測定でも標準段差形状が大きく誤って計算される結果が出ている。

### 5. 考察と結論

ここでは振動環境下でも垂直走査型干渉顕微鏡を用いて微細構造物の3次元形状を高精度に測定できる方法を報告した。光路差変化量の計測に用いたリアルタイム変位計は、測定対象物体がMEMS等のキーデバイスのように一部に平坦部を持つとしてその平坦部の干渉像を利用しており、ここではその条件を満たす測定対象として段差85nmの標準段差試料を使用した。

実験で用いた対物レンズはミラー型でなくマイケルソン型干渉計を持つ5倍のタイプである。この理由は、レンズ中心部に小さな参照鏡を持つミラー型では、変位計が用いるレーザー光の干渉画像に参照鏡の影が出たからである。このため高倍率で良く使われるミラー型対物レンズは現時点では使えな

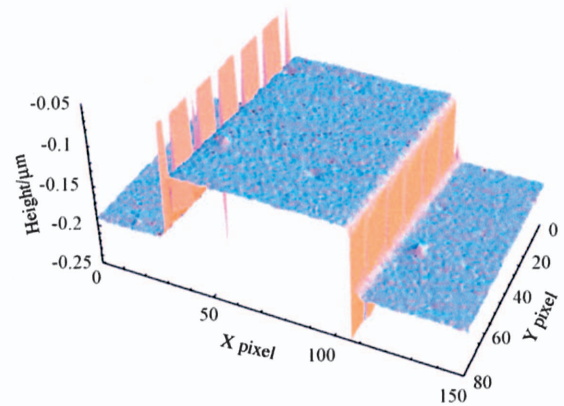


Fig.10 3D output shape of the step height standard(85nm). Used interferograms are captured with FPGA triggers under 10Hz vibration of 100-nm amplitude

い。ただし、リネークタイプの干渉計を用いることで高倍率化は可能と考える。

実験で強制的に導入した振動は最も激しいもので振幅が100nmで周波数が10Hzである。この振動条件はこれまでに報告されているセンサーと電子制御を用いた干渉計のアクティブな制振の試み<sup>5)~7)</sup>で対応可能となる振動条件と比較するとかなり振幅は小さく周波数も低い。しかし、本方法はピエゾ駆動素子等の制振用アクチュエータを全く用いない方法であり、比較対象とすべき条件は大きく違うと考える。高速で高精度な制振用アクチュエータを本方法と併用すれば、アクチュエータの応答速度が許す範囲でかなり激しい振動にも対応が可能になると考える。併用した場合は激しい外部振動による影響を、高周波数成分を効果的に減衰できる一般的除振台そして干渉計のアクティブ制振を用いて周波数10Hz前後で振幅を100nm程度の振動に減衰できれば良いと考える。なお、本方法で使用しているリアルタイム変位計で得られる光路差変位量はアクティブ制振にも利用できるものである。

一方、センサーと電子制御を用いた干渉計のアクティブ制振<sup>5)~7)</sup>の試みが、振動環境下にある垂直走査型形状測定装置に単独で使えるかは以下の点で少し疑問と感じる。まず現時点で市販されている垂直走査型形状測定装置は1nm以下の測定誤差をカタログに記載している。すなわち垂直走査時の撮影に要求される対物レンズの想定位置と実際位置との差は1nm前後である。走査しながらのこの高い位置決め精度を振動環境下のアクティブな制振方法のみで実現することはかなり難しいと推測する。ただしアクティブな制振は高精度な形状測定には役に立たないわけではない。実は干渉画像を数枚のみ使って基準となる画像の位相分布を抽出して3次元形状を計算する位相シフト法ではそれほど高い位置精度を求めない。なぜなら位相シフト法で位相抽出の対象とする基準画像はある1時点で撮影されるものであり、振動の変位は画像の総ての画素で一様に加わる。故に、1枚の画像に関して得られる高さ情報を画像内の周辺画素と比較する3次元形状算出には強く影響はしない(振動は位相シフト誤差を介して影響するがその影響はかなり小さい)。しかし垂直走査型形状測定装置では、多数枚の干渉画像から画素毎に光路差が0に近い画像番号とその位相情報を抜き出して高さを計算し、視野全体の形状を得る。そこで走査中でも1nm前後の高い位置計測精度が必要なのである。

次に報告した実験条件以上の激しい振動に装置がさらされ

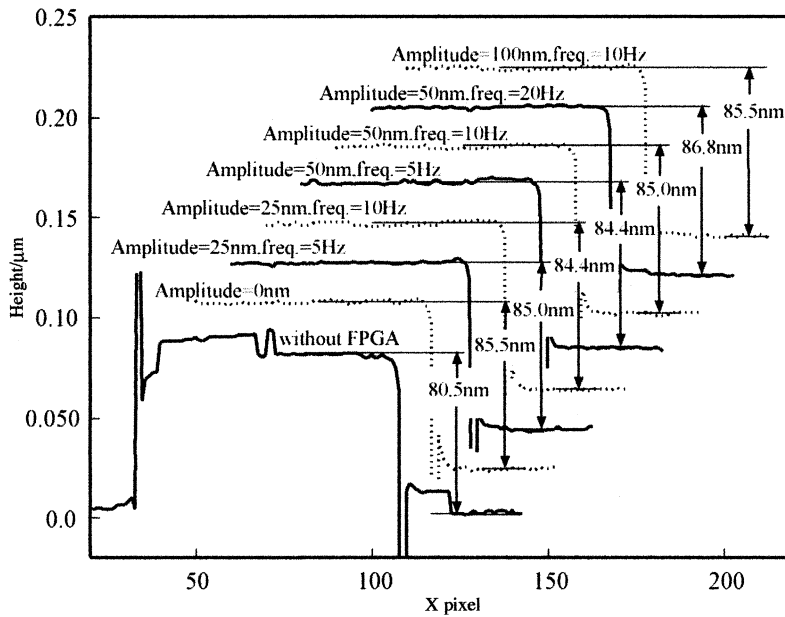


Fig.11 Measured cross-section profiles of the step height standard. Parameters on each plot are amplitude and frequency of vibrations, which are generated at the sample stage. By the use of FPGA triggers, cross-section profiles are correctly measured. Without FPGA trigger the cross-section profile is not measured correctly, even under no intentional vibration

た場合を、より大きな振幅とより高い振動数に単純だが分け、出てくる問題点を考えよう。大きな振幅の振動にさらされて問題となるのは、所定の光路差変化毎に必要な干渉画像を2次元カメラで確実に取り込めなくなる恐れである。取り込んだ画像を2次元カメラからPCに転送中に大きな振幅の影響で光路差が所定量以上に変化し、垂直走査の移動も加わって撮影に必要な値に戻らない場合、その画像は完全に取りこぼしてしまう。一方、高い周波数の振動で1番大きな問題となるのは、2次元カメラの露光時間中に発生する干渉光強度の変動である。画像撮影タイミングと振動には同期性はない。故に振動変位が最高点や最低点付近となり光路差変化が露光時間中に少ない場合と、変位が中間点となり変化が大きい場合がある。この変動はリアルタイム測定値が示す露光開始直前の位相値と実際に記録する位相値に画像毎での違いを生む。これを避けるにはなるべく短い露光時間で必要な明るさの干渉画像を撮影することであろう。

上記で大きな振幅や高い周波数への対応での問題点を単純化して議論したが、近い将来入手可能なハード等の利用で対応可能となる本方法の振動範囲を大まかに見積もってみる。リアルタイム計測の周波数は現在58kHzであり、レーザの出力、ラインカメラ、FPGA共に現在市販されつつある最高性能商品は現状の3～6倍の能力を持つ。使用した2次元カメラは撮影速度100枚/秒であるが現在は最高10000枚/秒のカメラが出現している。最大のネックはカメラの露光時間であろう。現状では高輝度LED光源の格段の高輝度化は難しい。だが、これもカメラにイメージインテンシテファイヤを装着する方法による100倍程度の高感度化は十分可能である。各要素が決める機能を検討すると、現状性能の改善にはカメラの高速化と高感度化が最も効果的であり、振動の周波数×振幅で百倍前後の対応は可能と考える。現状はそれと比較すると1%程度の性能と判断される。

なお、本報告では2波長の光源を用いる形状計測法を用いて振動下での形状計測を実験したが、使った方法は必要な画像のサンプリング間隔を光路差で0.8 μm前後と長くできるために、使用する2次元カメラの画像読み取り速度条件を大きく緩和するものと考えている。

以下に本研究で得られた結果を簡単にまとめる。

- 1) 測定対象物を強制的に振幅100nm、10Hzで正弦波的に振動させる環境下でも、垂直走査に高精度ピエゾ駆動装置を用いずにリアルタイム変位計のみを用いることで、垂直走査型3次元形状測定を実施することができた。
- 2) 振幅100nm、周波数10Hzまでの7種類の振動条件下での85nmの標準段差試料を用いた測定では、段差変動幅が1nm前後での測定精度であった。
- 3) より激しい外部振動に対応できるようにするためには、2次元カメラの高速化と高感度化、光源の高輝度化、そしてアクティブな制振機構の併用などが有効と考える。

なお、本研究は科学研究費補助金(18560247)の助成を受けたものである。

### 参考文献

- 1) G.S.Kino and S.S.C.Chim: Mirau correlation microscope, Appl. Opt., **29**,26 (1990) 3775.
- 2) B.S.Lee and T.C.Strand: Profilometry with a coherence scanning microscope, Appl. Opt., **29**,26 (1990) 3784.
- 3) T.Dresel, G.Hausler, and H.Venzke: Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar, Appl. Opt., **31**,7 (1992) 919.
- 4) 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.
- 5) I.Yamaguchi et al: Active phase-shifting interferometers for shape and deformation measurements, Opt. Eng., **35**, 10(1996) 2930.
- 6) L.He: Vibration-compensated interferometry system using phase-modulating interference fringe subdivision technology, Appl. Opt., **45**,31 (2006) 7987.
- 7) A.Pinto and F.Laguarta: Development of a line-scan CCD-based fringe tracker for optical interferometry, Appl. Opt., **45**, 26 (2006) 6694.
- 8) 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.
- 9) J.Schmit and K.Creath: Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase shifting interferometry, Appl.Opt., **34**, 19 (1995) 3610.
- 10) P.d.Groot: Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window, Appl. Opt., **34**, 22 (1995) 4723.