

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*

安達 正明** 藤本 健太*** 平野 勇輝†

Real-Time Changing-OPD Measurement Technique Applicable to a Scanning White-Light Interference Microscope
Masaaki ADACHI, Kenta FUJIMOTO and Yuuki HIRANO

We propose changing-OPD (optical path difference) measurement technique which can be built in a scanning white-light interference microscope. The technique uses a laser beam introduced around an optical axis of the interference microscope. The laser beam reflected by a reference mirror in an objective lens and the laser beam reflected by a specimen surface make interferograms at an observing plane. These interferograms are continuously captured by a high-speed CCD line camera during a vertical scanning. Changing light intensities at two pixels having different phase and different modulations are normalized as having unity amplitude, and then subtraction and sum of them are calculated. From the calculated values changing phase is calculated and then change of OPD is also calculated after every interferogram capturing. To check accuracy of the proposed technique we carried out an experiment using a precision vertical scanning stage. After a 96 μ m vertical scanning, total changed OPD at different portions on the specimen surface are calculated and estimated having less than 10 nm in difference.

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

1. 緒 言

微小物体の3次元形状を非接触で高速高精度に測定するには各種の光学顕微鏡が利用できる。例えば共焦点レーザ顕微鏡¹⁾や、白色干渉顕微鏡²⁾、白色共焦点顕微鏡³⁾を用いる方法などが知られている。この中で0.1 μ mの高分解能測定にも対応しているのは白色干渉顕微鏡を用いる方法である。白色干渉顕微鏡による測定精度をさらに高める方法として、位相抽出法を組み込む方法も提案され、位相を利用すると1nm近くの違いも分解できることが報告されている⁴⁾⁵⁾。しかし、この高分解能を製造工程での部品検査に利用しようと考え、顕微鏡を精密測定室から工程に持ち出すと、残念ながら満足いく結果は得られない。これは、振動環境下では試料台と光学測定ヘッドの間隔が振動の影響を受けて百nm前後は容易に変化し、測定しようとしている高さ情報に試料台変位が誤差として加わってしまうからである。この現象はその昔、タリステップやタリサーフで0.1 μ m以下の段差形状を高精度に測定しようとした方々にはなじみの問題だったと聞いている。それから長い年月を経た現在でもなお、製造工程で高精度計測を行おうとする場合この環境振動が与える問題は大きな悩みの種である。

しかし試料台の中心部と測定ヘッド間の距離をリアルタイムで高精度に測定できる方法が開発できれば、この問題は解決できる。ここで試料台の中心部と言う条件は重要である。もし、試料台の一周辺部の高さやヘッド中心部の高さを高精度なリアスケールなどで計測し得たとしても、上から見て両者の位置が(水平方向に)ずれていると、振動による試料台等のたわみが原因となるアッペ誤差⁶⁾が発生し、得られた測定値は役に立たなくなるからである。

そこで、我々は走査型白色干渉顕微鏡に位相抽出法を組み

込む高精度3次元形状測定法⁵⁾の製造工程導入技術の開発をここ数年での大きな目標とした。そして測定する対象を、近年利用が進むMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)素子のように階段型形状を持つ物体に限定し、測定視野内にある被測定物は必ず微小であっても平面領域を持つとして、その面と干渉対物レンズ間の光路差変化を、顕微鏡に追加装着したラインカメラとレーザ光を用いてリアルタイムに測定する方法を研究した。用いた測定原理はリアルタイム測定にむくと我々が考えるFringe pattern min-max comparison法⁷⁾である。開発した方法で微小平面領域と測定ヘッド間の光路差変化をnm精度でリアルタイム測定できれば、その値を利用した撮影トリガー信号をカメラに送ることで、位相抽出法を組み込んだ走査型白色干渉形状測定法が必要とされる所定の光路差変更毎の干渉画像を正しく何枚でも取り込むことができる。その結果、振動環境下でも正しく位相シフトされた画像を利用できるので、視野内の全ての点での三次元形状を高精度に測定できると考える。ここでは、そのための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に関して報告する。

2. 測定方法

顕微鏡視野内のある微小な平面領域と干渉対物レンズ(参照ミラーを内蔵)間の距離変化を測定するには短波長半導体レーザ光を用いる。レーザ光は干渉長が長く試料台が数mm上下に動いても干渉縞のコントラスト低下があまりない。またビーム状なので発散角度をレンズで容易に制御でき、顕微鏡のカメラ装着部から半透明鏡を介して顕微鏡の光軸近傍に容易に導入することが可能である。さらに光軸近傍を通して落射させると干渉顕微鏡のミラー等を利用することが可能となり顕微鏡の試料台や干渉対物レンズ内に特別な構造を持ち込む必要もないからである。図1に実験装置の概要を示す。光路差変化によるレーザ光の干渉光強度変化を取り込むのは高速ラインカメラである。ただし、本報告の実験では視

* 原稿受付 平成20年1月15日
** 正会員 金沢大学理工学域
*** (株)バイオニア
† (株)ジーシー

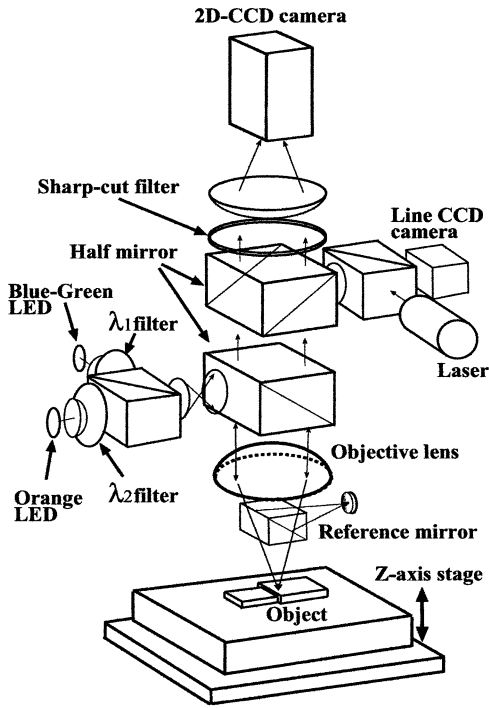


Fig.1 Interference microscope equipped with changing-OPD meter. Optics of the meter is composed of a diode laser, a line CCD camera and a sharp-cut filter. Wavelength of the laser is 473nm, and the sharp-cut filter blocks for laser light to enter 2D-CCD camera. A high frame rate of the line camera makes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

野全体の干渉情報を観測するためにラインカメラ部分に2次元カメラを用いた。このカメラで撮影するレーザ干渉像は試料の微小平面からの反射光と参照ミラーからの反射光が作り出す像である。そしてピントが試料表面から少しでも平面からの反射光どうしの干渉によるため光強度変化幅（モジュレーション）には大きな変動が無いと仮定している。実際にマイケルソン型の5倍対物レンズを用い2次元カメラで観察した標準段差試料の干渉縞を図2に示す。図2(a)は試料表面の高さがピント面から48μm下の場合、またピント面の時を図2(b)に、そして48μm上の場合を図2(c)に示す。そしてピント面の48μm下から上方にZ軸ステージを96μm走査しながら、ある画素における最大光強度と最小光強度の変化を抽出した結果を図3に示す。このように約96μm動いても干渉縞のモジュレーションに大きな変化は見られないし、図2の(a),(c)の干渉縞パターンも大きくは変わっていない。そこで試料台のZ方向走査では、干渉の位相のみが変化すると見なし、この場合の試料面の高さ変化をリアルタイム測定する方法を以下に示す。

いまカメラが測定する干渉画像中のある2点AとBでの、時間tでの光干渉強度 $I_A(t)$ と $I_B(t)$ はZ方向走査で位相のみが変化すると見なせるので式(1)で与えられる。

$$\begin{aligned} I_A(t) &= M_A \cos[2kh(t) + \varphi_A] + A_0 \\ I_B(t) &= M_B \cos[2kh(t) + \varphi_B] + B_0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで M_A , M_B は干渉のモジュレーション, 2は往復を示す倍数, k は波数, $h(t)$ は振動の影響を受けながら上方方向に走

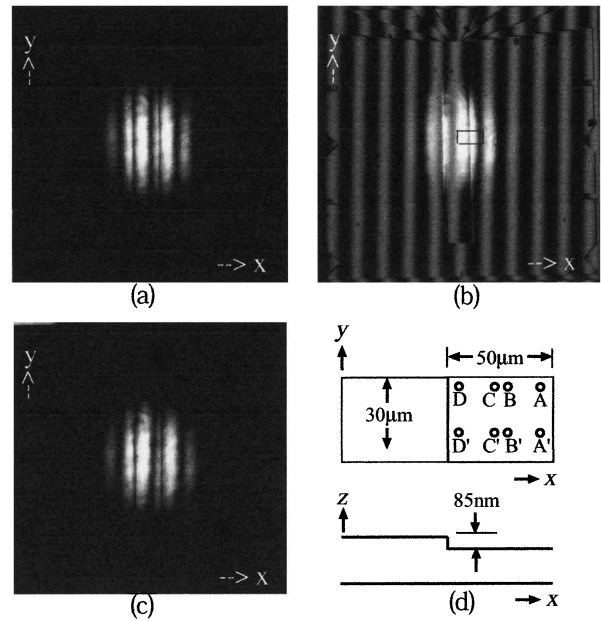


Fig.2 Interference pattern of a measured step-height standard. (a) shows the pattern of the standard whose surface is 48μm low from a focus plane of the objective. (b) shows the pattern of the standard whose surface is just at the focus plane. (c) shows the pattern of the standard whose surface is 48μm high from the focus plane. (d) shows positions of pixels used to measure changing-OPD. An area of (d) is shown as a black box at a center of the pattern (b).

査されるZ軸ステージ上の試料の平均高さであり、 φ_A , φ_B は $h(t)=0$ での2点A,Bでの初期位相で A_0 , B_0 は光強度のオフセットである。今、ステージが上方方向に数波長程度動き始める時に測定される光強度の変化から、それぞれの点での最大値と最小値を抽出するとそれらは以下となる。

$$\begin{aligned} I_{A-Max} &= M_A + A_0 \\ I_{A-Min} &= -M_A + A_0 \\ I_{B-Max} &= M_B + B_0 \\ I_{B-Min} &= -M_B + B_0 \end{aligned} \quad (2)$$

そこでこれらを用いて、それ以降に取り込まれる光強度変化 $I_A(t)$ と $I_B(t)$ から以下の式で変化幅が規格化された $I_{NA}(t)$ と $I_{NB}(t)$ を計算する。

$$\begin{aligned} I_{NA}(t) &= \frac{2I_A(t) - (I_{A-Max} + I_{A-Min})}{I_{A-Max} - I_{A-Min}} = \cos[2kh(t) + \varphi_A] \\ I_{NB}(t) &= \frac{2I_B(t) - (I_{B-Max} + I_{B-Min})}{I_{B-Max} - I_{B-Min}} = \cos[2kh(t) + \varphi_B] \end{aligned} \quad (3)$$

次に、これら2つの値の和 $I_{ADD}(t)$ と差 $I_{SUB}(t)$ を考えると、それらは次の式となる。

$$\begin{aligned} I_{ADD}(t) &= \cos[2kh(t) + \varphi_A] + \cos[2kh(t) + \varphi_B] \\ &= 2 \cos\left[\frac{4kh(t) + \varphi_A + \varphi_B}{2}\right] \cos\left(\frac{\varphi_A - \varphi_B}{2}\right) \\ I_{SUB}(t) &= \cos[2kh(t) + \varphi_A] - \cos[2kh(t) + \varphi_B] \\ &= -2 \sin\left[\frac{4kh(t) + \varphi_A + \varphi_B}{2}\right] \sin\left(\frac{\varphi_A - \varphi_B}{2}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

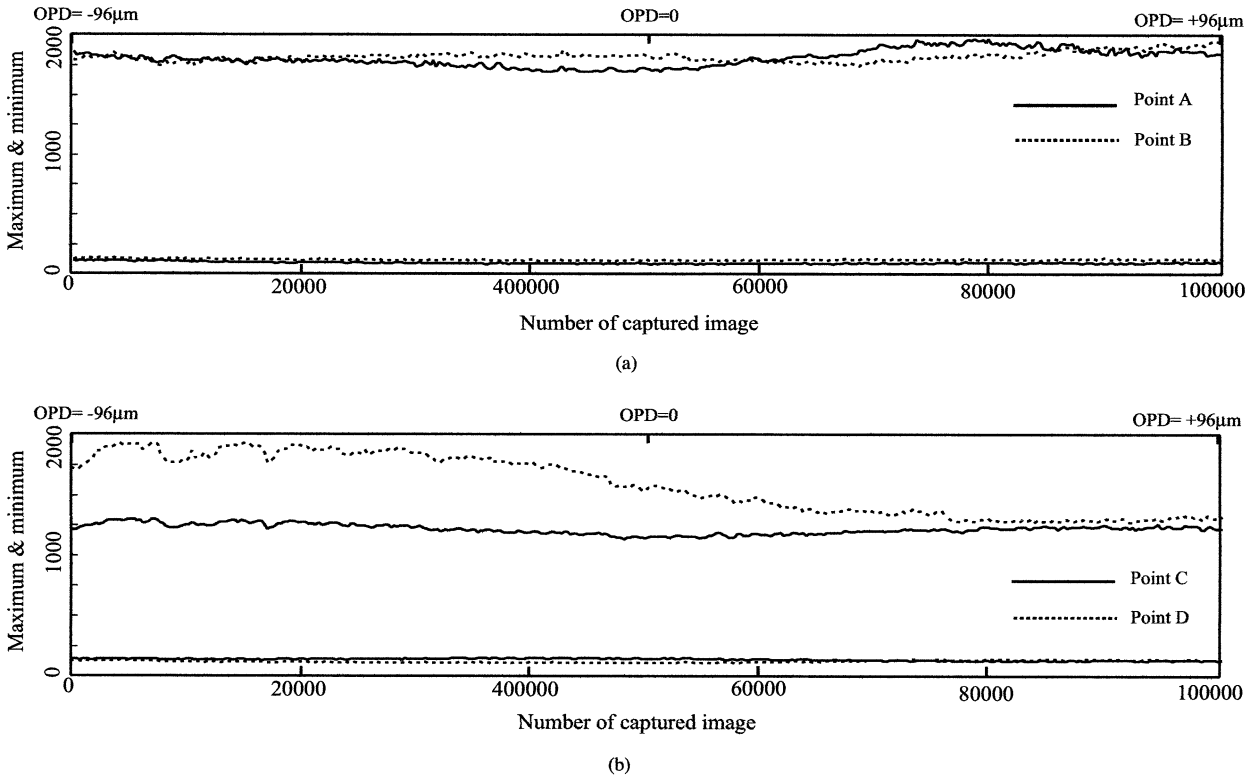


Fig.3 Modulation changes over 96µm-Z scanning. Upper curves in each figure mean changes of maximum intensity of interference light and lower curves mean changes of minimum intensity of light. (a) is changes measured at point A and B in the figure 2(d). (b) is changes measured at point C and D in the figure 2(d).

これら $I_{ADD}(t)$ と $I_{SUB}(t)$ のステージ走査での変化に関する最大値, 最小値の差を求めると, それらは式 (4) の右辺第 2 因子より 2 点 A と B での高さの違いに依存した値である. 故にステージの上下走査に対してこれらの値は近似的には変化しないと考えられる. これらの値を用いてもう一度規格化すると, それらは次式となる.

$$\begin{aligned}
 I_{NADD}(t) &= \cos \left[\frac{4kh(t) + \varphi_A + \varphi_B}{2} \right] \\
 I_{NSUB}(t) &= -\sin \left[\frac{4kh(t) + \varphi_A + \varphi_B}{2} \right]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

故にステージの数波長程度の最初の移動と共に取り込んだ信号変化から, 2 回の規格化に必要なパラメータである式 (2) ならびに式 (4) の右辺の第 2 因子を求めておき, その後の時間 t_1 で取り込んだ光強度から, 式 (5) の 2 つの値 $I_{NADD}(t_1)$ と $I_{NSUB}(t_1)$ を求める. また, その直後の t_2 で取り込んだ光強度からもこの 2 つの値 $I_{NADD}(t_2)$ と $I_{NSUB}(t_2)$ を求める. そして両者から以下の式より, 走査時間 $(t_2 - t_1)$ での高さ変位量 Δh を求める.

$$\begin{aligned}
 \Delta h(t_2 - t_1) &= \frac{1}{2k} \left\{ \arg \left[I_{NADD}(t_2) - i \cdot I_{NSUB}(t_2) \right] \right. \\
 &\quad \left. - \arg \left[I_{NADD}(t_1) - i \cdot I_{NSUB}(t_1) \right] \right\}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

ここで, i は単位虚数である. 式 (2) の 4 つの値は, 高さ $h(t)$ の変化に関してあまり変化しないと考えられるので, 短い上下移動の範囲内では定数と見なせ, また式 (4) から式 (5) を求める規格化に必要なパラメータも定数と考えられるので, 取り込んだ光強度に対し式 (6) までの計算をかなり高速で行

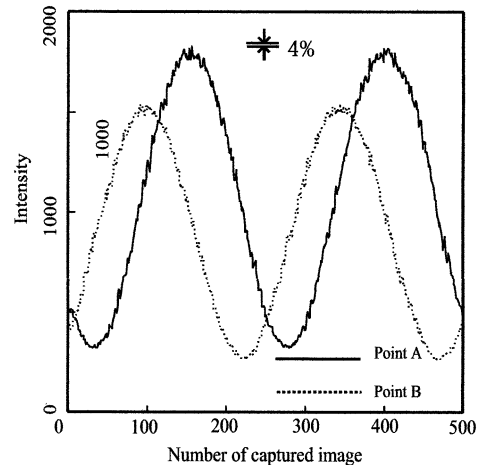


Fig.4 Interference light intensity changes measured at the point A and the point B. Changing is of a start portion of 96-µm scanning.

うことが可能となる. その結果, 取り込んだ時点から大きな時間遅れ無しに高さの変位量 Δh をリアルタイムに計算できる. そして最終的には Δh の総和から光路差変化量を知ることができる. なお 2 回の規格化に用いるパラメータは, レーザ波長数周期分の移動毎に更新することで, 抽出精度の維持を図るものとする.

3. 実験と考察

用いた Z 軸テーブルは走査量が極めて高精度に制御できる PI 社の対物レンズ駆動装置 (P-721.20 型 PIFOC, 走査範囲 100µm, 制御位置分解能はほぼ 1nm) を上下逆にしたものである. 位置指令はアナログ入力モードとして, 楕円エフ回路設計ブロックの WF1946A (16bit 分解能) からのランブ波を用いた. 走査スピードは 240nm/s に設定し, 走査量

を $96\mu\text{m}$ とした。また、干渉対物レンズは(株)ニコン製のマイケルソン型 5 倍であり、NA は 0.13、物理的焦点深度はカタログでは $16.2\mu\text{m}$ である。製造工程等での振動環境下の計測では極めて高速に光路差変化を測定すべきなので 58000frame/s のラインカメラを用いる予定であるが、今回は標準段差試料 (VLSI 社 Model number SHS-880 QC, Step Height: $84.9 \pm 1.1\text{nm}$) を測定対象として使い、段差近傍の場所による干渉像の変化なども調べるために 2 次元カメラ (浜松ホトニクス (株) :C7300:12bitA/D, 画素サイズ $6 \times 6 \mu\text{m}$) をサブアレイモードで用いた。また、レーザ光源には組み込みが簡単で、白色干渉画像取り込み用 2 次元カメラへの入射をシャープカットフィルターで防げる小型の短波長半導体レーザ光源 (Sawtech 社, Model DPBL-9050, 473nm , 50mW) を用いた。

標準段差試料表面を光路差ゼロ付近で白色光とレーザ光の同時照射下で観察した干渉画像は図 2(b) であり、これに対して $48\mu\text{m}$ 離して観察した画像は図 2(a)、また $48\mu\text{m}$ 近づけて観察した画像は図 2(c) である。図 2(b) の黒い四角で示す段差付近が実験で用いた測定対象領域であり、それを模式的に示したものが図 2(d) である。この中の (A, B), (A', B'), (C, D), (C', D') の 4 組が変位測定で用いる位相の異なる 2 点の組である。 $84.9 \pm 1.1\text{nm}$ の段差は D, D' 点の左約 $3\mu\text{m}$ 付近にあり、D や D' 点はピントぼけによる影響を受けやすい点として用いた。

光路差ゼロの焦点が合う所より下に $48\mu\text{m}$ 離れた図 2(a) の所から Z 軸ステージを上方向に $96\mu\text{m}$ 走査しながら干渉像を速度 250frame/s で連続取り込みし、取り込んだ画像の A, B 点での干渉光強度の最大値や最小値を抽出したものが図 3(a) である。ピントぼけの影響を受けやすい C, D 点で抽出した最大値や最小値の変化を図 3(b) に示す。図 3(b) の D 点では図 3(a) と比べて大きな振幅の変動が観察されている。

理論で述べた変位測定で用いる位相の異なる 2 点 (A, B) の走査開始付近での光強度変化を図 4 に示す。この 2 点は式 (4) から (5) への規格化に伴う誤差の混入が少なくなるようにその位置を選んでおり、位相差 ($\phi_a - \phi_b$) は 0.48π である。ところで、以降に述べる測定点での光強度はその点を含む y 方向 5 画素の平均値を使うことにした。これは時間分解能を犠牲にすること無く信号対雑音強度比 (S/N) をなるべく改善する時に誤差がどの程度まで少なくできるかを知るためであり、面積比で 5 倍の縦長画素サイズ (ラインカメラに多い) のカメラを用いた場合と同等な S/N になると考える。

Z 方向に $96\mu\text{m}$ 走査しながら取り込んだ光強度の変化からステージ移動量を算出したものを図 5 に示す。この算出では式 (3) と (5) の規格化で用いる最大強度と最小強度を光路差変化の 2 波長毎に更新している。図 5 では (A, B) 点以外に (A', B'), (C, D), (C', D') 点から算出した結果もあわせて示す。ただし、4 つの測定値は重なりを防ぐため $10\mu\text{m}$ づつオフセットを増やしながらか表示した。4 点すべてで Z 軸走査テーブルへの入力値とほぼ同じ結果が得られている。

この図 5 での指令値が左端付近、ならびに右端付近での縦横約 500 倍の拡大図を図 6, 7 に示す。両図共に 4 つの測定値は 10nm づつオフセットを増やしながらか表示している。図 7 では (A, B) と (A', B') 間, (C, D) と (C', D') 間で両者の幅が狭くなると共に、(A, B), (A', B') と (C, D), (C', D') 間では上下に開きが見られる。図 6 と 7 の総ての測定値に見られる小さな上下変動は同じ x 座標位置で発生しており走査

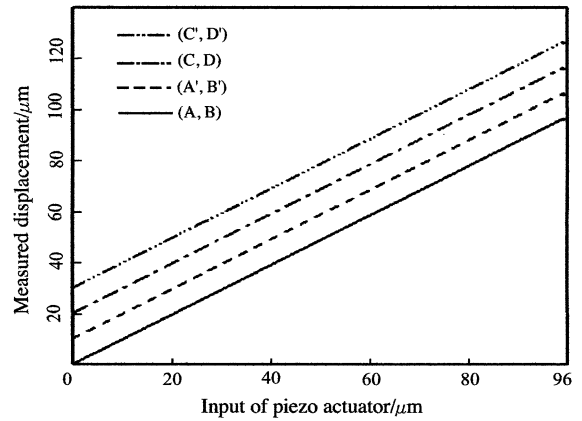


Fig.5 Measured displacement over $96\mu\text{m}$ Z-scanning. Measurement are carried out at four different areas and measured values are plotted with different offset for easy viewing.

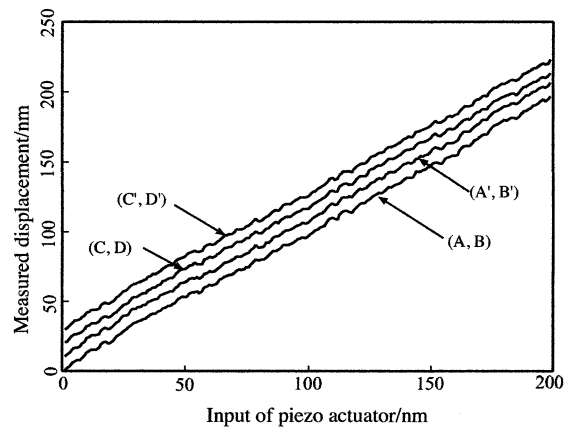


Fig.6 500-times enlarged plots about left side portion of Fig.5. The left side is starting point of $96\mu\text{m}$ scanning. The curves are plotted with different offset (10nm in space) for easy viewing.

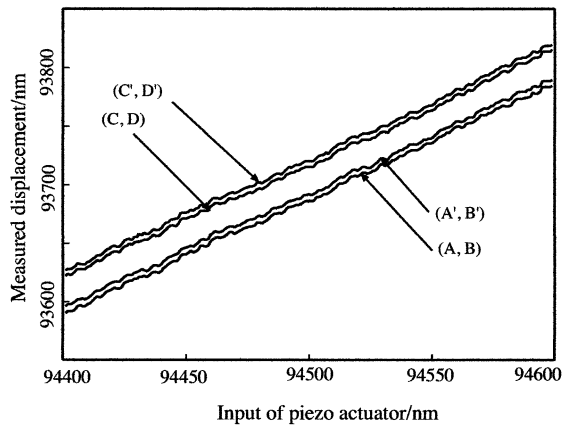


Fig.7 500-times enlarged plots about right side portion of Fig.5. The right side is an ending part of $96\mu\text{m}$ scanning. Offset of each curves are the same as those in Fig.6.

中の外部振動によるものであることを示す。また図 7 では先に触れたように幅の変化が見られるが、総変位量が終盤となる $95\mu\text{m}$ 地点で測定点が異なってもその違いが約 10nm しかずれていないことをこの図は示しており、繰り返し測定精度がかなり高いことを示す (時間を変えての繰り返し測定は行っていない。なぜなら精密測定室とは言え単発的な外乱による変形等があり正確な繰り返しが行えないからである。そこで

4. ま と め

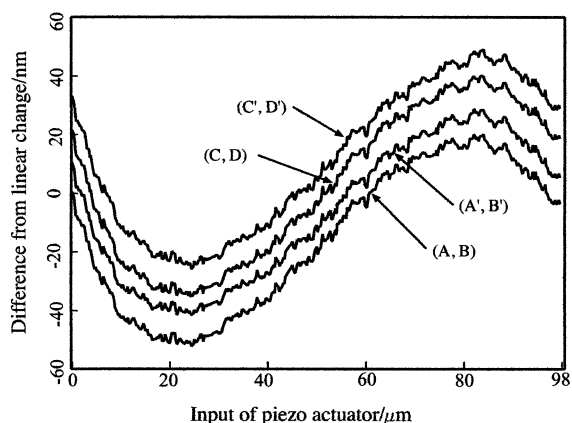


Fig.8 Deviation errors from the linear change at each Z position.

1回のZ軸走査においてモジュレーションの異なる複数の組での計測結果の変化が同じようになれば繰り返し精度が高いと判断した)。

次に、図5の計測値に関してその直線の変化からの逸脱量を計算したものを図8に示す。最大で50nm以下の逸脱量だがすべての測定点でピント位置から離れた点で計算値が下に凸で、ピント位置から近い点で上に凸となっている。これは試料表面がピント位置から離れることに伴う光路差の変動であろうと推測する。そうであればこの逸脱量はシステムチックな誤差なので補正は可能と考える。なお図8の曲線での縦値はx軸が示す位置の前後20nm間のデータを平均した値である。なぜなら図6や7から分かるように計測値には外乱に依る変動幅(直線の変化からのズレ)が10nm弱あり、この幅は平均しないと図8を見にくくするからである。

次に、最大光強度と最小光強度の更新を光路差2波長から5波長毎にした場合の違いを調べた。これらは予想通り96000nmの変位に対して最終的な変化幅は数nmであった。また、全走査域に関して(A, B)と(A', B')での2つの測定値の差の標準偏差を調べると3nm前後であった。一方、段差近傍の(C, D)や(C', D')点では差の標準偏差は少し大きくなった。ところが測定点の組を段差の左側に持っていくと段差から同じ距離であっても標準偏差はもっと大きくなった。標準偏差の増加は段差高さにも依るだろうが、段差に近づくにつれて単調増加的に出てくるであろうと思われた特徴は残念ながら読み取れなかった。対物レンズの倍率やNAそして段差高さにも依るので、ここでは数値表現を避けて段差からなるべく離れた地点を測定する2点に選ぶべきであろうとしか言えない。

ところで図4から分かるように干渉光強度の最大値と最小値、特に最大値はショット雑音の影響を強く受ける。この雑音はここで述べた変位測定法にどれくらい影響するかも検討されるべきであろう。そこで、数値計算で振幅やオフセットが4%変動する場合の抽出変位の変動を評価した。その結果、最大で約3nmの誤差に留まることが分かった。また、この誤差は最大最小の更新が行われた時点で解消するものであり、さらに干渉光強度変化が周期的な変化であるために最終的な累積変位にはあまり影響しないものであると理論的にも推測できるものである。

以上、走査型白色干渉顕微鏡を用いて振動環境下で高精度な3次元形状測定を行おうとする場合に必要となる「顕微鏡に内蔵可能な光路差変化量の測定方法(測定対象物体と干渉顕微鏡の間隔をリアルタイム測定するための技術)」に関して述べた。この方法は我々の知る限り世界で初めて報告される方法であり、またその測定精度も非常に良いと確認できた。実際の振動環境下でこの技術を適用するには、高速ラインカメラとそのデジタル出力を取り込んだ後に変位を高速計算するFPGA(Field Programmable Gate Array)とが必要であり、我々は現在その開発を行っている⁸⁾。計算アルゴリズムも簡単なために使っているFPGAはリアルタイム性に関して十分な性能を有することが確認できている。ただし、プログラムを完全なものにリファインし顕微鏡に組み込み振動環境下で計測が正しく行い得ることを確認するにはまだ多くの作業が必要である。そこで、ここでは顕微鏡に内蔵可能な光路差変化量の測定手法とその実験結果を報告した。

得られた結果を簡単にまとめると以下ようになる。

- 1). 白色干渉顕微鏡を用いる走査型3次元形状測定装置に追加して、測定物体と対物レンズ間の光路差をリアルタイム測定するための光学系を提案し、その光学系が正しく機能することを確認した。
- 2). カメラで取り込まれる干渉縞から高い精度で光路差変化量を計算する新しいアルゴリズムを提案し、それは96000nmのテーブル走査量に関して繰り返し誤差が約10nmであった。

最後にこの研究は科学研究費補助金(基盤研究(C)18560247)を利用して行っていることを付記する。

参 考 文 献

- 1) リアルカラーコンフォーカル顕微鏡「OPTELCIS-C130」, Laser-Tec製, または走査型共焦点レーザ顕微鏡「OLS1100」, SHI-MADZU製。
- 2) Kieran G. Larkin: Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry, *J. Opt. Soc. Am. A*, **13**, 4 (1996) 832.
- 3) 石原満宏, 佐々木博美: 非走査マルチビーム共焦点撮像系による高速三次元計測, *精密工学会誌*, **64**, 7 (1998) 1022.
- 4) A. Harasaki, J. Schmit, and J. C. Wyant: Improved vertical-scanning interferometry, *Appl. Opt.*, **39**, 13 (2000) 2107.
- 5) 安達正明, 上田寛治, 榎本文彦: 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) 1404.
- 6) 児玉賢一, '位置センサと検出システム', 次世代精密位置決め技術, 「精密工学会 超精密位置決め専門委員会 次世代精密位置決め技術編集委員会」監修, 404p (2000)
- 7) X. Chen, M. Gamaglia, and J. A. Yeazell: Phase-shifting interferometry with uncalibrated phase shifts, *Appl. Opt.*, **39**, 4 (2000) 585.
- 8) 安達正明, 平野勇輝, 藤本健太, 泉沢俊裕: 顕微鏡内蔵型レーザ変位計の開発, 2007年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, 457.