

干渉顕微鏡観察下の粗面の垂直走査域

100 μm での光路差変化の高精度測定*

安達正明** 河村昌範† 岩尾雄太†

Precision OPD Change Measurement in a 100- μm Vertical-Scanning Range
Using Rough-Surface Interferogram under an Interference Microscope

Masaaki ADACHI, Masanori KAWAMURA and Yuta IWAO

A vertical-scanning shape-measurement interference microscope using white light is widely used to measure 3D shape of a small object. This microscopy however cannot be used in vibrating environment. Because it is required to repeat one-way vertical movement of the predefined length and interferogram recording after that. We are researching a new technology which can accurately measure the real-time changes of optical path difference (OPD) and can trigger the recordings. When a rough surface is observed under the microscope, an interference pattern has very complex structures. To measure OPD change from the pattern, we use flexible masks to extract components of cosine change and sine change from the complex-structure change. Using the extracted changes we can obtain continuous phase change over a 100- μm vertical movement. But, the total phase change of the movement slightly depend on roughness of the measured area. This dependence is showed to be affected by a numerical aperture of an object-lens and can be reduced using a smaller aperture lens.

Key words: interference microscope, vertical scanning, phase measurement, 3-D shape measurement, numerical aperture

1. 結 言

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^{1)~3)}を用いると、レンズのピンぼけの影響を受けずに理想的な測定環境下では nm の高さ精度で微細な段差構造物の3次元形状を計測できる^{4)~6)}。しかし nm 精度での測定となると小さな外部振動や空気擾乱が大きく影響し始め、実際には高度な除振性能を有する装置台と空気の流れ込みを防ぐ工夫なども必要不可欠となる。測定したい微小部を持つ部品のサイズが大きくなるとそれらを活用しても理想的な安定環境への到達に時間を要し、計測時間の制約があるとそれらの応用もかなり難しい。そこで我々は、nm という高い計測精度を落とさずに振動や空気擾乱が残る環境下でも形状測定を可能にする方法を研究している。

そして顕微鏡視野内の一部に平面部がある場合、低コヒーレンス光と同軸で進むレーザ光を顕微鏡内に導入し、平面部が作るレーザ干渉縞の時間変化を利用して、干渉計の光路差(位相)変化を高精度に測定するアルゴリズムを報告した⁷⁾。またそのアルゴリズムを基に干渉縞をFPGA(Field Programmable Gate Array)で高速リアルタイム処理し、所定の光路差変化毎に低コヒーレンス光をフラッシュ点灯して干渉像を取り込む手法で、振動環境下にあっても段差試料を高精度に3次元形状計測できることもこれまでに報告した⁸⁾。

しかし測定したい部分が視野内に常に平面を持つとは限らない。そこで、粗面が作る干渉縞の変化から干渉計の光路差変化を抽出する方法を最近調べている。そして干渉縞にPC内で作る仮想的なマスクを組み合わせることで、100 μm 近い垂直走査に伴う

粗面の光路差変化を連続抽出できること、しかし最終的な変化総量は粗面の粗さに依存する傾向を持つことなどを先の学術講演会で発表した⁹⁾。

ここでは、干渉顕微鏡観察下の粗面の垂直走査全域での光路差変化の高精度測定法を論文として整理し、変化総量の粗さ依存性が対物レンズのNAを変えることによって低減できること、また、実験的に最適と思われた値のNAを用いることで鏡面からRz=12.5 μm の粗さ試料までの光路差変化を0.2%以下の変動幅で高精度に測定できるようになったことを報告する。

2. 実験装置

2.1 形状計測用垂直走査型干渉顕微鏡

ここで用いる形状計測用顕微鏡は無限焦点型の顕微鏡にマイクロソロン型干渉対物レンズ5倍(焦点深度16.2 μm)を付けたものである(図1)。3次元形状計測で用いる低コヒーレンス光源としてオレンジの高輝度LEDを組み込んでいる。PI社の100 μm ストロークの対物レンズナノポジショナー(P-721.20)を試料台に逆さに設置し粗面試料をその上に載せて、PCから直線的増加をするアナログ電圧をポジショナーに出力して粗面の垂直走査を行う。3次元形状計測の対象とする粗面と参照面が作る低コヒーレンス光の干渉縞は上部の2次元CCDカメラで撮影する。

2.2 光路差変化測定のための追加光学系

測定面と参照面の光路差の変化を垂直走査域100 μm に渡って高精度に計測するために干渉長が長く小型で波面パターンの品質に優れたDPSS(Diode Pump Solid State)レーザ(波長は473nm)を用いた。このレーザ光が干渉顕微鏡の光軸上を進むようにレーザ光源位置を調整して取り付ける。また対物レンズのNAが与える効果を調べるために、対物レンズ上部に虹彩紋りを入れて紋り半径をレバー位置で変更できるようにした。振動環境下

* 原稿受付 平成21年9月7日
** 正会員 金沢大学大学院(金沢市角間町)
† 金沢大学大学院

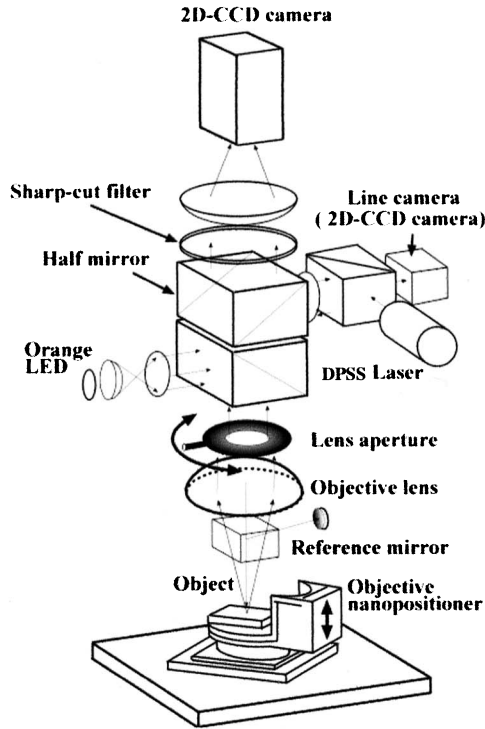


Fig.1 Vertical-scanning interference microscope equipped with OPD meter. Optics of the meter is composed of a diode pump solid state laser, a line CCD camera and a sharp-cut filter. Wavelength of the laser is 473 nm, and the sharp-cut filter blocks for the laser light to enter a 2D-CCD camera. A high frame rate of the line camera makes real-time OPD measurement possible. In this paper the line camera is displaced with another 2D-CCD camera and interferograms captured by the camera are used to develop an algorithm of the OPD meter applicable to rough surfaces

等での3次元形状計測ではレーザ干渉縞の高速読み取りに高速ラインカメラ（フレーム転送速度は約 50kHz 以上）を用いるが、この実験では垂直走査を1回行った時の撮影粗面位置（ラインカメラの見位置）による光路差変化の違いを評価するために、浜松ホトニクス（株）の2次元カメラC7300（X画素×Y画素=100×64で、ラインカメラ撮影画像をY方向で読み取る）をラインカメラの代わりに用いている。

2.3 測定試料

測定対象とした粗面は日本金属電鍍製の放電加工あらか標準片（ $R_z=12.5, 6.3, 3.2 \mu\text{m}$ ）とラッピング加工あらか標準片（ $R_z=0.8, 0.4 \mu\text{m}$ ）である。また、鏡面が作る干渉縞の同じデータ処理法による垂直変位量を評価するために、手元にあった小さな鏡面試料も測定対象とした。

3. 光路差変化の測定原理

3.1 干渉光強度の時間変化の2回規格化法

光路差変化を干渉を利用して高精度に測定するには、垂直走査に伴う干渉光強度変化の2回規格化が効果的である¹⁰⁾。この方法の鏡面試料に対する応用は報告済み⁷⁾であるが、読者の便宜と本論文でのスムーズな論理展開を考慮し以下に要点を整理する。まず垂直走査に伴って光路差のみが変化すると仮定すると、干渉画像の時間変化から、変化の位相が異なる2点 A, B での光強度信号 $I_A(t)$ と $I_B(t)$ を抜きだすと次式のようになる。

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

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、 $h(t)$ は上方向に走査される Z 軸ステージ上の試料の走査開始時点からの移動高さ、 ϕ_A, ϕ_B は $h(t)=0$ での A, B での初期位相、 A_0, B_0 は光強度のオフセットである。いまステージが最初の数波長程度を移動し終えた時点で、移動中に連続測定された光強度の変化から2点での最大値と最小値をそれぞれ抽出する。その抽出値を用いて、測定されている光強度変化 $I_A(t)$ と $I_B(t)$ から平均値がゼロで振幅が1に規格化された次式の $I_{NA}(t)$ と $I_{NB}(t)$ を計算する。

$$\begin{aligned} I_{NA}(t) &= \cos[2kh(t) + \phi_A] \\ I_{NB}(t) &= \cos[2kh(t) + \phi_B] \end{aligned} \quad (2)$$

これら $I_{NA}(t)$ と $I_{NB}(t)$ の和 $I_{ADD}(t)$ と差 $I_{SUB}(t)$ を考えると、それらは次式のように変形できる。

$$\begin{aligned} I_{ADD}(t) &= 2 \cos\left[\frac{4kh(t) + \phi_A + \phi_B}{2}\right] \cos\left(\frac{\phi_A - \phi_B}{2}\right) \\ I_{SUB}(t) &= -2 \sin\left[\frac{4kh(t) + \phi_A + \phi_B}{2}\right] \sin\left(\frac{\phi_A - \phi_B}{2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

そこで、 $I_{ADD}(t)$ と $I_{SUB}(t)$ を求め、これらの垂直移動に伴う変化の最大値と最小値の差を求め、それらを用いて $I_{ADD}(t)$ と $I_{SUB}(t)$ を再度振幅1に規格化すると、次式となる。

$$\begin{aligned} I_{NADD}(t) &= \cos\left[\frac{4kh(t) + \phi_A + \phi_B}{2}\right] \\ I_{NSUB}(t) &= -\sin\left[\frac{4kh(t) + \phi_A + \phi_B}{2}\right] \end{aligned} \quad (4)$$

このように2回規格化することで2点 A, B での初期位相 ϕ_A, ϕ_B に関わらず、位相が正確に $\pi/2$ ずれる信号変化2種を得る（ ϕ_A, ϕ_B はどんな値でも良い訳ではない。 $\phi_A - \phi_B$ が $\pi/2$ 近傍にあると式 (3) から式 (4) への規格化で掛ける係数が小さくて済み、混入を避けられない強度雑音の影響を受けにくい）。故にステージの最初の数波長程度の移動で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を求めておき、その後、 $t=t_1$ で取り込んだ光強度から、式 (4) 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 $t=t_2$ 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。

$$\begin{aligned} \Delta h(t_2-t_1) &\equiv \frac{1}{2k} \tan \Delta \phi(t_2-t_1) = \frac{1}{2k} \tan(\phi_{t_2} - \phi_{t_1}) \\ &= \frac{1}{2k} \frac{\sin \phi_{t_2} \cos \phi_{t_1} - \sin \phi_{t_1} \cos \phi_{t_2}}{\cos \phi_{t_2} \cos \phi_{t_1} + \sin \phi_{t_2} \sin \phi_{t_1}} \\ &= \frac{1}{2k} \frac{-I_{NSUB}(t_2)I_{NADD}(t_1) + I_{NSUB}(t_1)I_{NADD}(t_2)}{I_{NADD}(t_2)I_{NADD}(t_1) + I_{NSUB}(t_2)I_{NSUB}(t_1)} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで ϕ_{t_i} は式 (4) での位相とし、時間を置かない連続した光強度読み取りであることから $\Delta \phi = \phi_{t_2} - \phi_{t_1} < 1$ が成立して $\Delta \phi \equiv \tan \Delta \phi$ とした。このようにして光強度変化が光路差変化のみを受けて式 (1) で与えられる限り、1回のパラメータ抽出後、

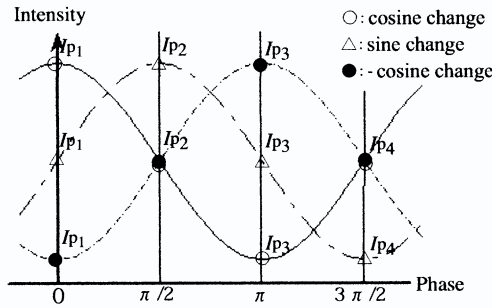


Fig.2 Interference-light-intensity changes by phase. ○ are typical cosine change, ● and △ are typical -cosine and sine changes respectively. I_{p1} , I_{p2} , I_{p3} , I_{p4} are light intensities at phase of 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$

画像読みとり毎の高さ変化量が符号を含めて式 (5) のように計算でき、累積和から高精度な光路差変化量を得ることができる。

3.2 粗面の光路差変化測定への展開

粗面の場合も位相が異なる2つの信号を抜きだして規格化を2回行えば良いと考えられる。ただし粗面では鏡面と異なり特定の2箇所の信号のみを高さが変わっても継続して使う⁷⁾ことは出来ない。なぜなら粗面が作る干渉縞は面内方向にかなり細かい。また垂直位置が変わると対物レンズのピンぼけ状況が変わり、光が混ざり合う水平幅が変化する。それら両者が相まって干渉状態が垂直走査中の高さで大きく複雑に変化するからである。

ところで対物レンズには直径や焦点距離で変わる焦点深度があり、深度の範囲内で対象との距離が変わっても像に大きな変化はないとされる。そこで垂直走査量がレンズの焦点深度に比べて短い範囲では、走査に伴う光強度変化の振幅は変わらず、位相が進む割合も全面素でほぼ一定と仮定した(実験でこの仮定が有効だと分かる)。そしてこの範囲毎に、各画素での光強度変化が cosine, sine, -cosine, -sine 型変化の中のどれに近いかを分類し、似た変化を採る画素の光強度を全面素から集め加算して式 (1) の2つの信号とすることにした。具体的には走査直後のみカメラ信号からモジュレーションが大きく位相の異なる2つの画素を探し出しその光強度変化を使って、大まかに $\pi/2$ ずつ位相が増えて行く時の干渉画像4枚, P_i ($i=1 \sim 4$) を抜きだす。この時、個々の画素での光強度 I_{pi} ($i=1 \sim 4$) は図2に示すように cosine, sine, -cosine 型変化ならばその最大値や最小値が現れる位相が型毎に異なる。そこで画素毎に $I_{p1} - I_{p3}$, $I_{p2} - I_{p4}$, $I_{p3} - I_{p1}$, $I_{p4} - I_{p2}$ を計算しどれが最大か調べる。図2では位相増加に伴う理想的な正弦波型変化を示したが、正確に cosine, sine 等で無くても例えば $I_{p1} - I_{p3}$ が最大ならばこの画素での変化は cosine に近く、 $I_{p3} - I_{p1}$ が最大ならば -cosine, $I_{p2} - I_{p4}$ が最大ならば sine, $I_{p4} - I_{p2}$ が最大ならば -sine に近いと判断できる。この分類に従って光強度変化を全面素から集め加算するための、干渉像に掛ける要素が 1, 0, -1 からなる cosine 変化抽出用と sine 変化抽出用の2種のマスクを作る。例えば cosine 抽出用のマスクでは cosine に近い画素は 1, sine や -sine に近い画素は 0, -cosine に近い画素は -1 とする。このマスクを掛けて見た画像全体の強度信号は同種の変化のみが合計されるので大きな振幅を持つ cosine 変化となる。同じく sine のマスクでは sine に近い画素は 1, cosine や -cosine に近い画素は 0 などとする。2種類のマスクを掛けて得た光強度の合計から S/N の良い2つの変化信号を得る。この信号

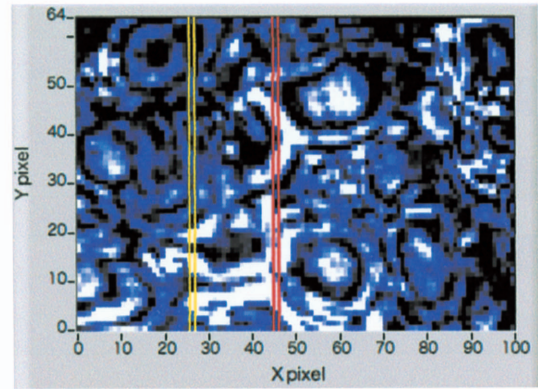


Fig.3 Interferogram of a rough surface. Surface roughness is $R_z=3.2\mu\text{m}$. White portions mean bigger light intensity and black portions mean less light intensity. X size of the interferogram is 130 μm and Y size is 80 μm in the real surface. Line camera captures the area surrounded by yellow or red lines, for example

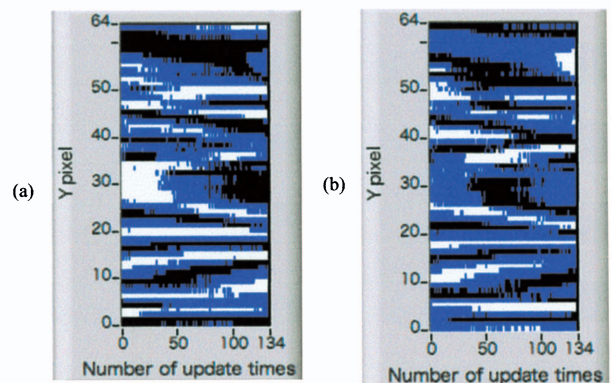


Fig.4 Updated mask patterns changing with a vertical movement of a rough surface. (a) shows a changing pattern to extract cosine-like change. (b) shows a changing pattern to extract sine-like change. Horizontal axis is the number of update times. White area means mask element is 1, blue area is 0, black area is -1. These are extracted at X pixel of 26

は位相が正確に $\pi/2$ ずれている必要は無く、式 (1) の信号とするから式 (4) で正確に $\pi/2$ ずれた変化となる。

このマスクは焦点深度に比べて短い垂直移動毎にその時の干渉状態を基に適したマスクに更新し続ける。更新の場合、位相が $\pi/2$ ずつ異なる新たな4枚の干渉画像(先の説明での P_i) は、更新直前までの位相変化情報を基に精度良く抜きだすことができる。

このようにして総ての画素の信号変化を余すことなく利用する。この方法は鏡面が作る干渉縞にも利用が可能と推測されるなど、被測定面の適用範囲を先に報告した平面を対象とする方法⁷⁾に比べて大きく拡大できると思われる。

4. 実験結果

4.1 粗面の2次元干渉像

図1のLED光を利用すると光路差が0に近い位置を確認できる。その高さが垂直走査域の中間付近に来るようにしてナノポジショナー (P-721.20) で粗面(放電加工面, $R_z=3.2\mu\text{m}$) を上方向に約 $0.65\mu\text{m/s}$ の速度で $100\mu\text{m}$ 動かす。この時、ラインカメラ部に取り付けた2次元デジタルカメラで変化し続ける2次元レーザ干渉像を20000枚取り込む(1画像はX方向100画素×Y方向64画素で12bit/画素、1画像の撮影毎に光路差が平均

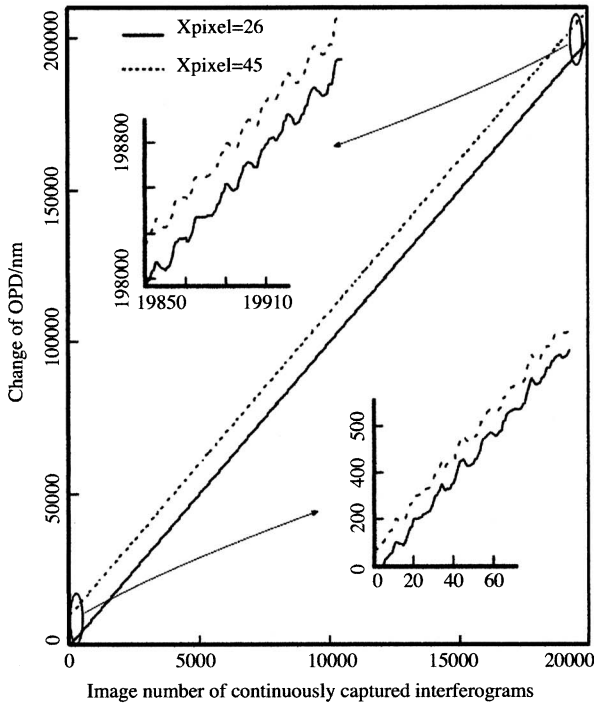


Fig.5 Measured OPD change over a 100 μm Z-scanning. Measurement are carried out at two different X-pixel positions and measured changes are plotted with different offset for easy viewing. Rz=3.2 μm

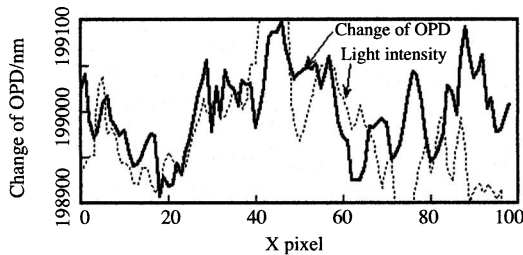


Fig.6 Total change of OPD at each X-pixel position, which are measured using a line interferogram data (64 pixels along the Y direction). Dotted curve is total light intensity at each X pixel regarding the interferogram of Fig.3

で約 10nm 変わる). 一定撮影速度で極めて多数枚の画像を速やかに取りこむために、ここではX方向とY方向の画素数を制限している。取り込んだ中から光路差0付近のレーザ干渉画像1枚を抜きだしたものを図3に示す。

4.2 光路差変化量とその X 画素位置依存性

振動下等での垂直走査型3次元形状計測を可能とするために光路差変化のリアルタイム測定で用いる高速ラインカメラは、図3の干渉像の特定X画素位置でのY方向強度変化(黄色や赤色で囲った部分)のみを撮影し続ける。そこで、ラインカメラが取り込むことになる1画素×64画素の画像20000枚を用いてそのX画素位置での光路差変化を計算してみた。計算では位相がだまかに $\pi/2$ ずつ異なる4枚の干渉画像 P_i ($i=1\sim 4$)の初回の抜きだしと、マスクを使った2回目以降の抜きだしに精度の違いが予想できるので、マスク2回目以降となる処理画像19951枚を計算対象にした。図3の黄色で囲むX画素位置26でのY方向64画素データにおける、光路差変化1.5 μm (焦点深度16.2 μm の約9%)毎のマスク更新でのマスク要素変化の様子を図4に示す。図4の横軸は更新番号、縦軸はマスクのY画素、その画素での

Table 1 Number of the lever position and NA of objective lens at the number

Lever Position No.(L)	2	3	4	5	6	7
Numerical Aperture	0.05	0.07	0.09	0.1	0.11	0.12

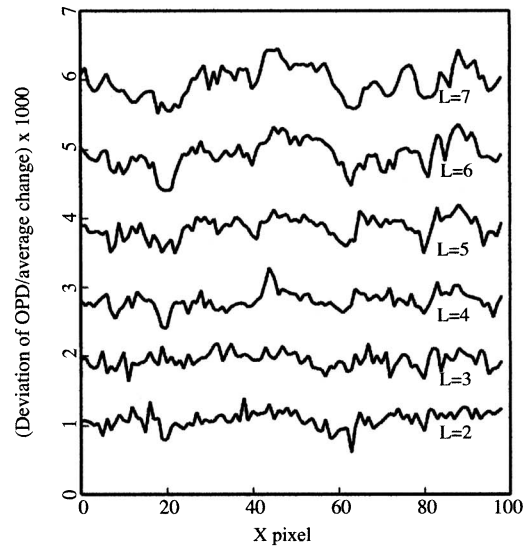


Fig.7 Total change of OPD at each X-pixel position measured with some numerical apertures of the objective lens. Measurement are carried out at six different NA values and measured values are plotted with different offset for easy viewing. Rz=3.2 μm

要素が1の場合を白、0の場合を青、-1の場合を黒とし更新134回分を示した。(a)は cosine 変化抜きだしマスクの変化、(b)は sine 変化抜きだしマスクの変化であり、(a)で白や黒の所は cos や -cos の変化に近く(b)では0を示す青となっている。100 μm の垂直走査中に134回更新を繰り返したがマスクはゆっくりとしか変わっていない(故に更新間隔は必要以上に十分短くその中では3.2節の仮定が成り立っている)。このフレキシブルに変わるマスクをY方向光強度変化に掛け総和を採って得られる大きな振幅の変化から光路差変化を求める。X画素位置26だけでなく赤で囲む画素位置45でも光路差変化をこのようにして計算し、得られた光路差変化と取込画像番号との関係を図5に示す。両者の重なりを防ぐためにX画素45での測定値を少し上にずらして示した。画像番号増加に伴ってほぼ直線的に増える光路差の抽出結果が得られている。走査の最初付近と最後付近を拡大した変化も示したがそれらでは外部振動等による下向きの変化も両画素で同じように計測されていることがわかる。この測定では実際に粗面を動かして画像を連続撮影するのは1回だけなので、面の最終変位量は計算位置(X画素)を変えても同じ値となるべきである。全X画素位置での最終変位量を拡大したものを図6に実線で示す。最終変位量は平均変化量の0.1%以内だがX画素位置で違うことが確認できる。実線を良く見ると変位量の横方向変化は雑音のように全くランダムでなく画素位置と何らかの関係があるように思われる。図3で反射光強度が強いと思われるX画素位置では最終変位量が大きくなっているようである。そこで、図3の各X画素でY方向光強度を加算した時の加算値のX画素別相対変化を図6に点線で示した。両者は似た傾向を持つことが分かる。ところで粗面に照射されるレーザ光強度分布は横方向にゆっくりとした変化はあるが、図3から予想されるほどの強度変化は存在していない。

そこで図3の強度分布は個々の反射点から対物レンズに戻る光量の違い、すなわち粗面の各点による拡散反射角度幅や平均反射方向の違いが影響していると考えられた。そうすると、図6の最終変位量の変動の主な理由は測定点からのレーザー反射波面の対物レンズへの斜入射（レンズ面で平均された）現象と推測される（入射角度が大きくなると位相変化量は小さくなる¹¹⁾）。

4.3 NA を変える時の光路差変化量の X 画素位置依存性

上記の推測の正誤を確認するために、図1に示したように対物レンズのすぐ上に虹彩絞りを入れた。そして対物レンズの実効半径を変えながら、ナノポジショナー（P-721.20）で粗面を垂直方向にのみ 100 μm 動かしながら、X画素位置別の総変位量を繰り返し測定してみた。虹彩絞りのレバー位置 N_0 （L）とそのLで虹彩半径から計算されるレンズのNAは表1の通りである。放電加工面（ $R_z=3.2 \mu\text{m}$ ）での絞りレバー位置別の総変化量のX画素位置依存性を図7に示す。縦軸はそのLでの総変化量の平均値に対する相対値であり、1000倍した相対変動値をLの値毎にオフセットを変えて重ならないように示した。Lを小さくし、NAが小さくなると画素位置別の変動が低下する様子が見られる。また、これから画素位置違いでの変動幅を示す標準偏差を計算し、Lとの相関を求めた。 $R_z=3.2 \mu\text{m}$ の放電加工面以外に、新たに $R_z=12.6 \mu\text{m}$ の放電加工面でも同様の測定を繰り返し、粗面2種におけるLと標準偏差の相関を調べた結果を図8に示す。

4.4 粗さ（測定面）を変えた時の光路差変化測定

図8より、絞りレバー位置 N_0 のLが3である $NA=0.07$ の時に標準偏差は最小であることが分かる。反射波面の斜入射効果のみを考える場合はL=2が入射角の幅を最も制限して良いであろうが、制限による光量低下等もあり、標準偏差は大きくなったのだろうと推測する。ここでは標準偏差が最小になるL=3の場合に注目し、その絞り半径で測定面（粗さ）をいくつか変えて100 μm の走査で20000枚取り込む時の中間走査域18000枚分での総光路差変化量を測定した。測定した試料は放電加工した粗さ標準片（ $R_z=12.5, 6.3, 3.2 \mu\text{m}$ ）とラッピング加工した粗さ標準片（0.8, 0.4 μm ）、そして身近にあった鏡面であり、測定値は全X画素域（0～100）での平均である。結果を図9に○で示す。ここでX軸は R_z 粗さ / μm の常用対数であり、鏡面の粗さは $R_z=20\text{nm}$ として表示した。総ての試料でほぼ同じ最終変化量が得られている。試料間での変化量の違いは平均変化総量の0.2%以下であった。ただしここでの測定では試料を載せ替え（時間を変え）ながら垂直走査測定を繰り返すので、個々の測定でタイミングや変化の異なる外部振動の影響が加わっていると考えられる。

4.5 光路差変化測定値に及ぼす外部振動の推定と除去

図9の測定では測定開始時と終了時には、外部振動等による予測できない垂直変位が総光路差変化量に加わり、これが測定面を換えた場合に最終結果の異なる一要因ともなる。そこでこの外部振動の振幅を変位測定値の時間変化から推測した。 $R_z=6.3 \mu\text{m}$ の粗さ面の垂直変位の時間変化データから直線変化との違いを抽出したものを図10に示す。干渉像は130画像/秒で取り込まれるので、干渉像に影響している外部振動は周波数約12Hz、振幅pvは光路差で80nmと推測される。この変動値は測定の開始時と終了時に不定値として加わっている。そこで、この振動影響を除去するために光路差変化測定に用いる18000枚の計算

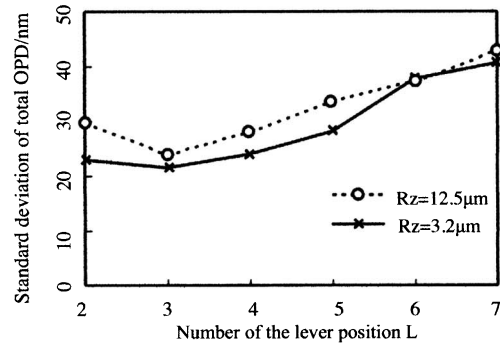


Fig.8 Standard deviation of total changes of OPD. These deviation depend on the numerical aperture of the objective lens. The minimum deviation is obtained with the lever position of L=3

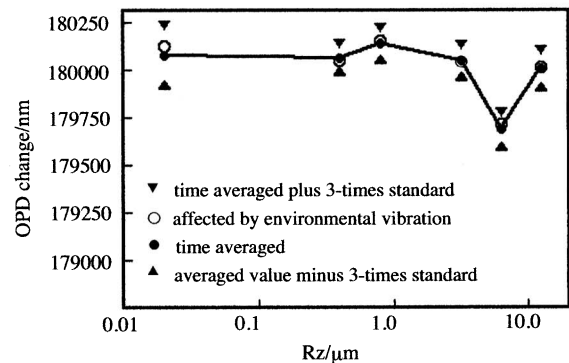


Fig.9 Total OPD change measured from 18000 interferograms captured over 90 μm Z-scanning. These measurements are carried out for 6 surfaces having different roughness. Horizontal axis is roughness measured in R_z unit. White circles mean changes affected by environmental vibration. Black lines connect time-averaged changes which are not affected by the vibration. Black triangles mean 3-times standard deviation plus or minus the averaged values

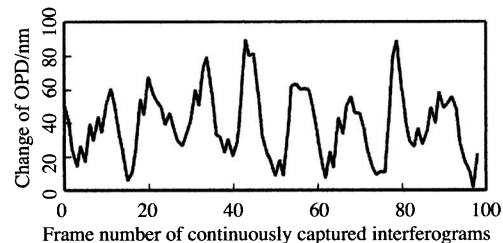


Fig.10 Measured OPD deviation from a linear change. These deviation are thought to come from vertical vibration of the surface

スタート画像を±900枚の範囲でずらしながら、ずらした場合の最終変位の平均とその変動の標準偏差を計算した。図9に●とそれを結ぶ線で平均値の変化を、平均値に対して標準偏差を±3倍して加算した値を▼と▲で示す。粗さ面 $R_z=6.3 \mu\text{m}$ に限って測定値は総て小さいが、他の面での平均値はほぼ同じ値である。図9で粗さが異なることによるこの変動は、全体変化量平均の0.2%以下であり、ここで述べた光路差変化量の測定方法は粗さの影響が少ないことが分かる。

5. 考 察

5.1 光路差変化が測定可能な粗面の粗さ範囲

ここまでで、鏡面から $R_z=12.5 \mu\text{m}$ の放電加工面までの6種類の粗さの異なる試料を取り上げて、その垂直変位量を調べ、粗さ

違いによる変動が平均変位量の 0.2% 以下と十分少ないことを実験で確認した。粗さがさらに大きくなった粗面はどうなるだろうか。実験を行った視点から推測すると、粗さが激しくなり測定面の傾斜が増すと、干渉縞が密になってカメラの1画素内に 0.5 本以上の縞が入り込み輝度が低下し、干渉のモジュレーションも大きく低下する。この現象は $R_z=6.3$ や $12.5 \mu\text{m}$ の放電加工面でも光路差がゼロに近い位置を確認するためにLED光源を点灯し、干渉縞を接眼レンズを通して見ると確認できる。そのため、急斜面が増えるとその情報は使えない。しかし、粗さが大きくても粗面の局所的な頂点や鞍部、また谷底点など傾斜が小さくなる点では干渉縞の密度は低く、目視でも干渉変化のモジュレーションは確保されている。本測定法では1列に並ぶ複数画素を使うので、その中にモジュレーションの大きい画素がどれくらいはいるかで測定可能性が判断されるべきであろう。ただし、ここで述べた光路差変化測定法は低コヒーレンス光の干渉を応用した3次元形状測定に使用する事を前提とした方法である。故に上記の傾斜角度増大による測定不可能性は3次元形状測定にもそのまま当てはまり、形状測定が困難な表面にもなるので、光路差変化測定の必要性もなく問題は発生しないと考える。

次に、図9で $R_z=6.3 \mu\text{m}$ の放電加工面のみが 0.2%前後とは言い他の面に比べて変化量が小さくなったことの原因を検討した。結論から言うと $R_z=6.3 \mu\text{m}$ の干渉像の輝度が、 $R_z=12.5 \mu\text{m}$ を含む他の粗面と比べて小さかったため、 $R_z=6.3 \mu\text{m}$ の粗面の傾斜が相対的に大きかったことがその理由と思われる。すなわち、平均傾斜が大きいことが対物レンズへの実効的入射角度を大きくし、結果的に斜入射効果で位相変化量が減った¹¹⁾と考えた。ただし、その減少量は全体平均の 0.2%程度であり、この光路差変化測定法の精度は十分高いと我々は考える。

5.2 測定値の直線性

垂直変位測定での実際の垂直変位量と測定値の直線性は確保できているかを考えてみる。先に報告した「光路差変化量のリアルタイム測定法⁷⁾」では、直線の変化からの変動を拡大すると系統的なずれが現れ、これは対物レンズへの斜入射効果による影響と推測された。今回は対象が粗面であり、レンズのNAも最終的には 0.07 と小さくしてある。その結果、斜入射による直線性からの変動特性は平面での報告に比べて小さいが同じ傾向のずれは今回も観察されている。

5.3 カメラのY方向画素数と測定精度の関係

ここでは垂直走査しながらの 20000 枚の2次元干渉像の速やかな画像取得を実現するために、Y方向画素数を 64 と大きく制限したデータを用いた。高速読み取り用のラインカメラには画素数 1024 や 2048 等の製品も存在する。画素数は容易に増やせるのでここでは画素数を増やす効果を検討する。取り込んでいる測定データを基にY画素数を 64 から 32 に半減したデータを用いて垂直変位を計算すると、予想通りにX画素位置が違うことによる変動幅は大きくなった。故に測定画素数を増加させると多いデータの平均値が与える変動幅減少効果がここでも期待できる。しかし、

大きな画素数は計測での読み取り速度、転送速度、計算時間の増大を必要としリアルタイム性を低下させる問題を招く。故に変位測定速度から決まるリアルタイム度とその変位測定で許容される誤差からラインカメラの画素数は決定されるべきと考える。

最後に、ここでは対物レンズのNAを絞るために、対物レンズ直上部に虹彩絞りを設けたが、このままでは低コヒーレンス光源による干渉像に対してもNAを絞ってしまう。そこで、振動環境下での3次元形状測定での虹彩絞りはラインカメラの結像レンズ付近に移す必要がある。この実験では、その位置での虹彩絞りの自由な半径変更が難しかったので、対物レンズの直上部に虹彩絞りを設けている。

6. 結 論

干渉顕微鏡観察下の粗面が作る干渉像に干渉状態によってフレキシブルに変化する仮想的マスクを掛けて得られる2種の光強度変化の2回の規格化を用いて、光路差変化を高精度抽出する方法を見い出した。

以下に得られた内容を簡単にまとめる。

1. 粗面の 100 μm にも及ぶ垂直変位を nm の分解能で、また測定位置での違いを 1/1000 の変動で高精度に計測できた
2. 計測値の変動には測定する部分の粗さの違いの影響が見られた
3. 粗さの違いの影響は、対物レンズのNAを 0.07 と絞ることでかなり低減できた
4. 絞ったNAのレンズを用いて鏡面から粗面の試料 ($R_z=12.5 \mu\text{m}$) までの垂直変位が測定できた
5. 最終変位測定値は、粗さの異なる粗面試料によって 0.2% 程度変化した

なお、本研究は科研費 (21360115) 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) Zygo New View 5000, キヤノン販売㈱.
- 5) Wyko NT3300 Optical Profiler.
- 6) 安達ほか, 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.
- 7) 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.
- 8) 安達, 平野, 河村, 岩尾, 振動環境でも利用できる走査型光干渉応用形状計測技術, *精密工学会誌*, **75**, 11 (2009) 1299.
- 9) 安達, 河村, 岩尾, 干渉顕微鏡観察下の粗面の垂直変位測定, 2009 年度精密工学会春季大会, 807.
- 10) K. G. Larkin: A self-calibrating phase-shifting algorithm based on the natural demodulation of two-dimensional fringe patterns, *Optics Express*, **9**, 5, (2001) 236.
- 11) K. Creath: Calibration of numerical aperture effects in interferometric microscope objectives, *Appl. Opt.*, **28**, 15 (1989) 3333.