

干渉顕微鏡観察下の粗面の垂直変位測定（第2報）

金沢大学自然科学研究科機能機械科学専攻, [○]安達正明, 河村昌範, 岩尾雄太

Vertical-displacement measurement of a rough surface observed by an interference microscope (Second report)

Kanazawa university, Masaaki Adachi, Masanori Kawamura, and Yuuta Iwao

Vertical-scanning shape-measurement interferometry using white light is widely used to measure 3D shape of objects. This interferometry however cannot be used in vibrating environment. Because it is required to repeat one-way vertical movements of the predetermined length and interferogram recordings. We are researching a new technology which can accurately measure the real-time changes of optical path difference (OPD) of an interference microscope and can trigger recording at desired OPD. When a rough surface is measured, an interference pattern has complex structures. To obtain OPD change, we used mask patterns to extract components of cosine changes and sine changes from complex structures. Using extracted changes we can measure vertical-displacement of the rough surface. But, measured displacements slightly depend on roughness of the measured area. In this report, we show numerical aperture of the object-lens have effects of roughness-dependence and this dependence can be reduced using a smaller aperture lens.

1. はじめに

垂直走査型干渉顕微鏡を利用する形状計測法は、微細な段差構造物の3次元形状をnm精度で計測できる¹⁾。しかし、nm精度ゆえに外部振動の影響を極めて受けやすい。そこで我々は、この高い計測精度を落とさずに振動環境下でも形状測定を可能にする方法を研究してきた。そして測定面が一部に平面を持つ場合、その干渉縞を利用して、干渉計の光路差変化をリアルタイムで高精度測定する方法を開発し²⁾、振動環境下にあっても段差試料を高精度形状計測できることを報告した³⁾。さらに測定対象が平面を全く持たない場合を想定し、粗面が作る干渉像から干渉計の光路差変化を高精度に測定する方法も研究した。研究開発した方法で測定する時、光路差変化は場所に依存する傾向を持った⁴⁾。これは粗面での反射光のレンズ斜入射効果と考えられた。本報告では、この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、適当に絞ったNAを用いることで鏡面から $R_z=12.4\ \mu\text{m}$ の粗さ試料までの光路差変化を高精度に測定できる見通しがあったことを報告する。

2. 実験装置

ア. 垂直走査型干渉顕微鏡と測定対象面

通常の無限焦点干渉顕微鏡にマイケルソン型対物レンズ5倍（焦点深度 $16.2\ \mu\text{m}$ ）を付けたものである。粗面の垂直移動はPI社の $100\ \mu\text{m}$ ストロークの対物レンズナノポジショナー（P-721.20）を逆さに設置し粗面をその上に載せて用いた。測定対象とした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（ $R_z=0.8, 0.4\ \mu\text{m}$ ）と手元にあった小さな鏡面である。

イ. 光路差変化測定用の追加光学系

測定面と干渉対物レンズ間距離の変化を垂直走査長 $100\ \mu\text{m}$ に渡って干渉計測するためにDPSSレーザー（ $\lambda=473\text{nm}$ ）を用いた。このレーザー光が走査型干渉顕微鏡の光軸に沿って進むようにレーザー光源を取り付ける。対物レンズのNAはレンズ上部に虹彩絞りを入れて制御する（図1参照）。最終的なレーザー干渉縞の高速読み取りではラインカメラ（約50kHz）を用いるが、ここでは計測位置（X画素）による光路差変化測定

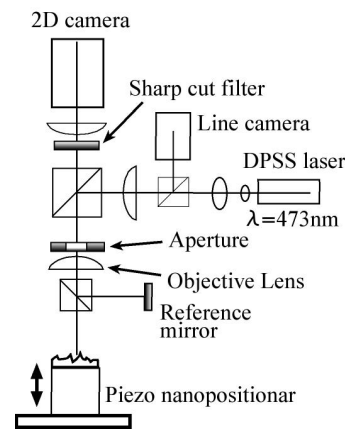


図1 実験に用いた垂直走査型干渉画像読み取り装置
対物レンズはマイケルソン型5倍、Piezoは $100\ \mu\text{m}$ ストローク、対物レンズのNAは虹彩絞りをレンズ上部に入れ制御している

値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（ラインカメラデータをY画素方向で読み取る）を用いた。

3. 垂直変位の測定原理³⁾

垂直変位を計算するプログラムでは、垂直走査に伴う干渉縞変化を使用する。まず、垂直位置（光路差）変化に伴う光強度変化から、変化の位相が異なる2つの信号を抜きだして両者の振幅を規格化し、規格化された値の和と差を求めて再度規格化する。その結果、光路差変化に伴い位相が正確に $\pi/2$ 異なって変化する信号が2種得られるので、それから \tan^{-1} 演算等で高精度な位相の変化を得る³⁾。粗面の場合も処理法はほぼ同様である。ただし、粗面では位相が異なる2つの信号を抜きだす時に、干渉位相情報を基に作られる2種類のマスクを介して干渉光強度の総和信号を計算して2つの信号を得る。こうして画像全体を余すことなく利用し、信号変化を安定化させる。このマスクは粗面を対象にする故、垂直変位で数 μm 移動毎にその時の位相変化情報を基に適したマスクに更新し続ける。

4. 実験結果

ア. 2次元カメラで撮影した干渉像

光路差0が垂直方向走査域の中心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、 $R_z=3.2\ \mu\text{m}$ ）を鉛直方向に $100\ \mu\text{m}$ 、約 $0.65\ \mu\text{m/s}$ の速度で動かしながら、デジタルカメラで変化し続ける2次元のレーザー干渉

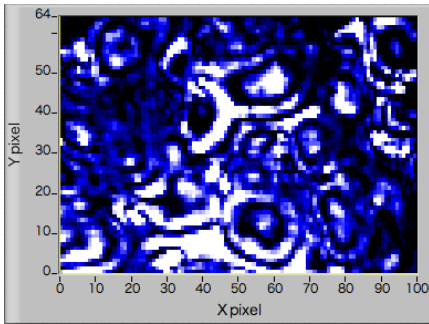


図2 粗面の干渉像 白は光強度が大, 黒は小. X, Y方向の観察幅は約130, 80 μm である

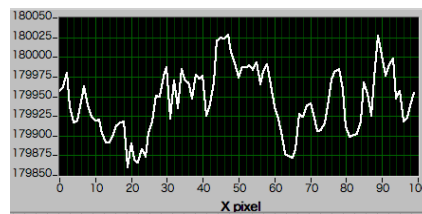


図3 全変化量のX画素位置依存性 ($R_z=3.2 \mu\text{m}$)
縦は光路差/nm. Y方向64画素を用いた時の
変化変動

表1 絞りレバー位置No. (L)とレンズのNA

| レバー(L) | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|------|------|------|-----|------|------|
| NA(lens) | 0.05 | 0.07 | 0.09 | 0.1 | 0.11 | 0.12 |

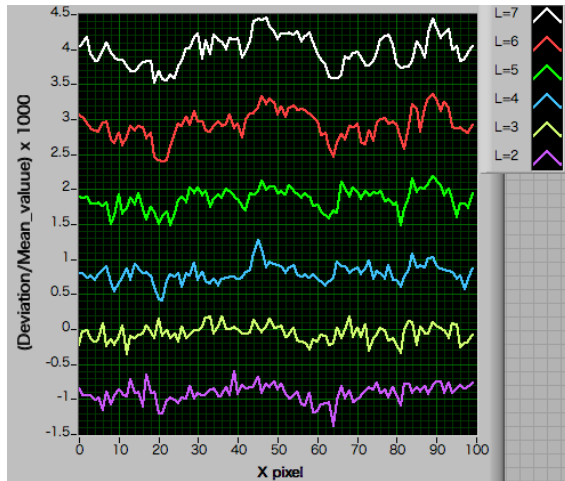


図4 $R_z=3.2 \mu\text{m}$ での絞りレバー位置No. (L)とX画素列別の総変化量

像を20000枚取り込んだ(Y方向64画素×X方向100画素で12bit/画素). その中の1枚を図2に示す. 高速光路差変化測定用のラインカメラはこの干渉像の特定X画素の1列のみ取り込む. そこで, ラインカメラが見るあるX画素のY方向変化64画素20000枚を用いて光路差の変化を計算する. 計算位置(X画素)を変える時, 実際に動かした面の変位は同一なので, 同じ値となるべきである. しかしながら, 総変化量の0.15%程度だが光路差変化はX画素に依存することを再確認した. これを図3に示す. この主原因は, 測定したX画素列での粗さ違いとしか考えられず, その理由は粗面によるレーザ反射波面が持つ対物レンズへの斜入射現象と推測された.

イ. NAを変える時の光路差変化量のX画素依存性

上記の推測の正誤を確認するために, 図1に示す虹彩絞りで対物レンズのNAを変えて粗面の同一箇所での変化を測定してみた. 絞りレバー位置No. (L)とそのNo.で計算されたレンズのNAは表1の通りである. $R_z=3.2 \mu\text{m}$ の放電加工面を用いた場合の絞りレバー位置No. (L)におけるX画素列別の総変化量の変動を図4に示す. これから総変化量の画素列違いでの変動幅を示す標準偏差を計算し, レバー位置No.との相関を求めた. $R_z=3.2, 6.3 \mu\text{m}$ におけるそれらの相関を図5に示す.

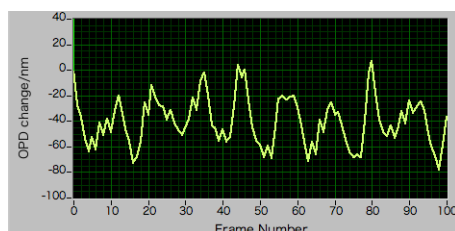


図7 光路差の時間変化の直線からのズレ

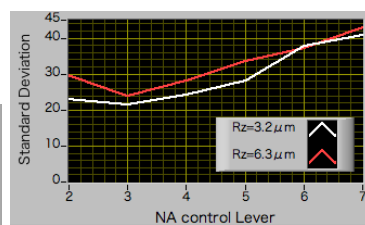


図5 絞りレバー位置No. (L)と標準偏差

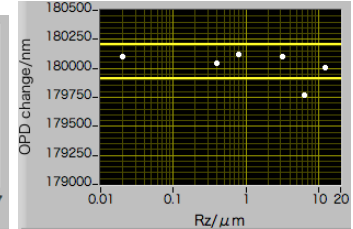


図6 各種試料での最終OPD変化量

ウ. 測定面を変えたときの平均変位測定結果

図5より, 絞りレバー位置No.が3の時, 標準偏差は最小値となった. 斜入射現象のみを考える場合はレバー位置No.2が良いのであろうが, 光量低下やまだ把握出来ていない理由もあると推測する. そこで, レバー位置No.を3に固定し, 測定面の種類を変えてそれらを100 μm 垂直走査する時の総光路差変化量を測定した. 測定試料は粗さ標準片 ($R_z=12.5, 6.3, 3.2, 0.8, 0.4 \mu\text{m}$)と鏡面である. 結果を図6に示す. 総ての試料でほぼ同じ最終変化が得られている. 試料間での変化量の違いは変化総量の0.1%前後である. この測定では試料を載せ替えながら測定を繰り返すので, 個々の測定でタイミングの異なる外部振動の影響が加わっていると考える.

エ. 外部振動の影響の推定

そこで, 変位測定値の時間変化(撮影画像番号に伴う変化)を調べた. この変化から, 外部振動の振幅を推測する. $R_z=6.3 \mu\text{m}$ での変位の時間変化の直線からのズレを抽出し図7に示す. これから130画像/秒で取り込まれる干渉像に与える外部振動の振幅 p_v は光路差で100nmと推測される. この値は測定の開始と終了時で不定値として加わっている. そこで, 図6にこの振幅を平均変化値に±した直線を追加した.

5. 結論

以上, 干渉顕微鏡観察下の粗面が作る干渉像から対物レンズのNA絞りと2種のマスクを用いて光路差変化を高精度抽出する方法の有効性を見い出せた. 試料の粗さにより, 最終計測値は0.1%程度変化するが, これは外部振動により計測開始・終了時点で想定位置が異なっている効果を含んでいる.

参考文献

- 1) 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, (2005)1404p
- 2) 平野ほか, 顕微鏡内蔵型レーザ変位計の開発, 2007年度精密工学会秋季大会講演論文集, 457p
- 3) 安達ほか, 振動環境で利用できる走査型光干渉応用形状計測技術, 2008年度精密工学会秋季大会講演論文集, 195p
- 4) 安達ほか, 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講演論文集, 807p