

干渉顕微鏡観察下の粗面の垂直変位測定

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

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

Vertical-scanning shape-measurement interferometry using white light cannot be used in vibrating environment. Because it is required to repeat one-way phase-shift movements of the predetermined length over a measurement scanning range. We are researching a new technology which can accurately measure the real-time changes of optical path difference (OPD) of an interference microscope. When a rough surface is measured, an interference pattern has complex structures and it is difficult to measure its vertical displacement. Then we consider mask patterns to extract cosine changes and sine changes from complex structures. By using extracted changes we can measure vertical-displacement of the rough surface.

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, nm 精度で微細な段差構造物の 3 次元形状を計測できるが¹⁾, 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ための改良方法をこれまで研究してきた. そして測定面が一部に平面を持つ場合, その面が作る干渉縞を利用して, 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⁾, その方法によって振動環境下にある標準段差試料を高精度に 3 次元形状計測できることを報告した³⁾.

しかし, 高精度測定を行いたい対象が常に平面を持つとは限らない. そこで, 対象が粗面しか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を今回研究した. そして, 粗面でも光路差変化が測定可能であることを確認した.

2. 実験装置

1). 垂直走査型干渉顕微鏡と測定対象粗面

通常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 $16.2 \mu\text{m}$) を付けている. 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) を逆さにして用いた. 測定対象とした粗面は放電加工で作製された日本金属電鍍製の表面あらさ標準片 ($Rz12.5 \mu\text{m}$) である.

2). 垂直変位測定用光学系

測定面と干渉対物レンズ間距離の変化を干渉計測するために DPSS レーザ ($\lambda = 473\text{nm}$) を用いた. これを走査型干渉顕微鏡に取り付けたものを図 1 に示す. 本研究では高速計測用にラインカメラを用いた測定方法を開発するが, ここでは計測位置 (Y 画素) による測定値の違いを評価するために浜松ホトニクス (株) の 2D カメラ C7300 (ラインカメラデータを X 画素方向で読み取る) を用いて粗面のレーザ干渉像 (図 2) を取り込んでいる.

3. 垂直変位の測定原理³⁾

1). 測定対象が平面を持つ場合

測定対象が平面の場合は反射波面に細かい変化は無く対象面が垂直方向に移動しても干渉縞に大きなパターンの変化は

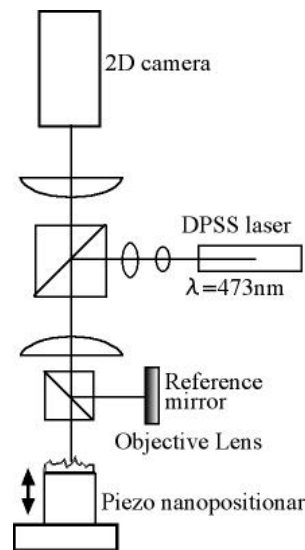


図 1 実験に用いた垂直走査型干渉画像読み取り装置
対物レンズはマイケルソン型 5 倍, Piezo は $100 \mu\text{m}$ ストローク

無い. そこで干渉位相が互いに異なる 2 つの画素での, 垂直位置 (光路差) 変化に伴う光強度変化から振幅が規格化された 2 つの変化を計算し, 計算値の和と差を求めて再度規格化することで, 光路差変化に伴って正確に余弦的, 正弦的变化を行う変数 2 個を抽出して高精度な位相変化を得る³⁾.

2). 測定対象が粗面の場合の問題点

粗面の場合, 反射波面は面方向に細かい空間変化を持つ. このため垂直位置が変化すると細かく異なる波面がピンボケにより混ざり合い干渉画像は不規則な変化をする. すなわち特定画素に着目する信号振幅の規格化はほんの少しの垂直変位でしか有効でなく, その信号変化も垂直変位と共に振幅が雑音レベルに落ちる可能性も出る. このため平面で有効な特定の 2 画素を用いる方法は粗面の連続変位測定には使えない.

3). 問題解決の方法

粗面を対象とするスペックル干渉の手法をこの解決に利用することを我々は思いついた. スペックル応用変形計測では 1 画素での光強度が不規則に変化しても変形前と変形後の画像の差の 2 乗を画像全体で観察すると縞の移動や平均強度はゆっくりと正弦波的な変化をする. すなわち 1 画素でなく画像全体の情報を扱うことで変化が平均化され安定化する. そこで計測する画素全体を使い位相が余弦的, 正弦的变化をするものを抜き出して規格化し用いることにした.

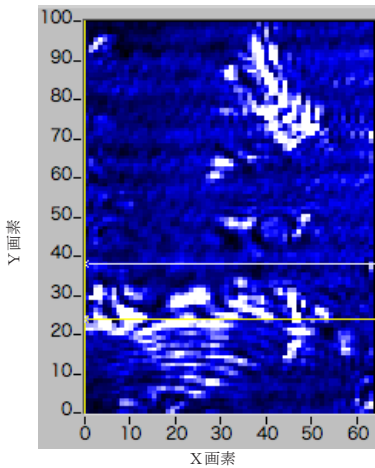


図2 粗面の干渉像 白は光強度が大, 黒は小. Y画素が24の所は光強度が高く, 38の所は低い. X, Y方向の観察幅は約80, 130 μm である.

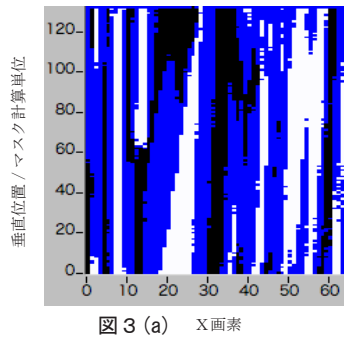


図3 (a) X画素

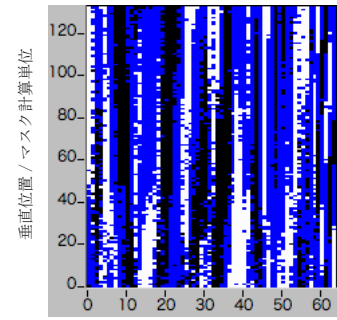


図3 (b) X画素

図3 垂直移動に伴う cos 変化抽出用マスク (白=1, 青=0, 黒=-1) の変化
(a) 光強度の強いY画素が24付近
(b) 光強度の弱いY画素が38付近

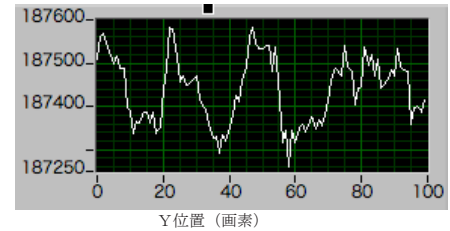


図5 全変位量のY画素位置依存性.
縦は光路差/nm. Y位置による違いは200/187000の約1/1000. X方向64画素を用いた時の変動.

4. 実験結果

1). 画素の2グループ化

粗面を垂直変位させた時に干渉光強度は画素毎に振幅や位相が異なる変化をする. そこで光路差をある地点から位相で約 $\pm\pi/2$, $\pm\pi$ 離散的に変化させた時にどんな変化をするか調べてそれらを sin, -sin, cos, -cos 型の4種の変化に分類した. そしてこの分類情報から, 線上(X方向)光強度に掛けて全画素の総和を採ると総和が sin 的变化, cos 的变化となるマスクパターン(画素抜きだしパターン)2種を作製した. 総和の変化は正確な sin 変化, cos 変化となる必要は無い.

2). マスクパターンの垂直変位に伴う変化

このマスクパターンはそれを抽出した垂直位置周辺でしか基本的には有効でない. そこで, 高さ位置が約 $1\mu\text{m}$ 変わる毎に新たなマスクパターンを抽出しそれを用いて変位を抽出し続ける. 図2の干渉像で光強度の強いY=24画素位置でのマスクパターンと, 弱いY=38画素位置でのマスクパターンの垂直位置変化に伴うパターン変化を図3(a), (b)に示す.

3). 変位測定結果のバラツキ

ラインカメラの位置(カメラのY方向)のライン上(カメラのX方向)の光強度にマスクパターンを掛けて総和を採り, その後は平面計測と同じ処理で変位を抽出する²⁾. 粗面をZ軸ポジショナーでゆっくり約 $100\mu\text{m}$ 移動させながら, 干渉画像(64×100画素)を連続して20万枚取り込む. Y=38画素位置での変位測定結果と総和2種の振幅の変化を図4に示す. 垂直変位はY位置が異なっても同じ筈なので, 誤差評価

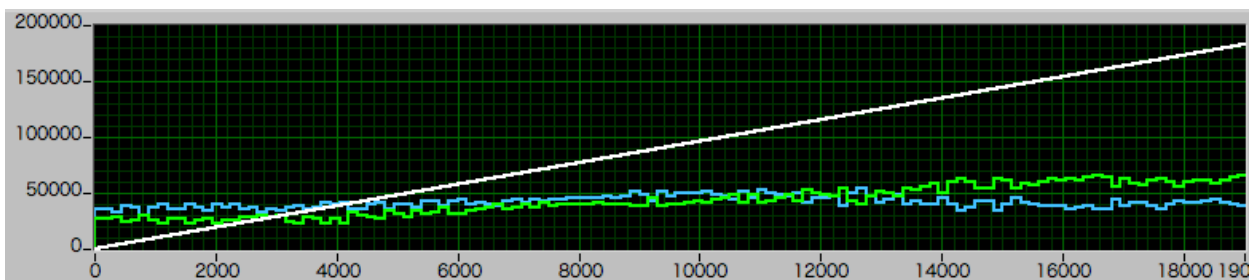


図4 Y画素が38での垂直移動(X軸は取込画像番号)に伴う変位計測値/nmとマスク後の総和値信号振幅(cosとsin)変化

には各Y位置別に最終変位値を求めて比較すれば良い. 比較結果を図5に示す. 位置による違いが無いのが理想的だが, 約 $100\mu\text{m}$ 移動で最終結果の標準偏差は40nmとなった. X方向の使用画素数は64だがこれを下げると偏差は上がる.

4). 測定変位値と光強度との相関

約 $100\mu\text{m}$ 移動での測定変位量のY位置依存性を見ると, 光強度が大きい線上では変位が大きめ, 強度が小さい線上では変位が少なめの傾向があった. この現象の理由の1つにレンズのNA効果が考えられる. 測定面への入射光強度はほぼ同じだが反射光強度が違うのは粗面の拡散反射のためであり, レンズに戻る割合が高い所(明るい所)は斜入射効果は少く, 変位は相対的に大きくなっていると思われる.

5. 結論

以上, 干渉顕微鏡観察下の粗面が作る干渉像から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だせた.

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