

ハロゲン光干渉像からの高精度位相抽出

金沢大学 機械工学系, 安達正明

High-precision phase extraction from interferograms of a halogen lamp

Kanazawa university Masaaki Adachi

Vertical-scanning shape-measurement interferometry using white light is widely used to measure 3D shape of small step-like objects. In the measurement many interference images of white light are captured at each vertical sampling point and interference phase are extracted for the maximum-modulation fringe image in them. But, widely used phase-extraction algorithm have been developed for the interferogram of coherent light. Therefore phase-extraction errors are thought to be not negligible. I have developed a new algorithm which can be applied for in-coherent light.

I. 研究の目的

MEMS素子等の微細段差構造物の3次元形状測定では段差部でアンラップが使えないこともあり、垂直走査しながら取り込む多数枚のインコヒーレント光干渉顕微鏡画像が使用される。一方、干渉画像より高精度に3次元形状を求める為に多くの種類の位相シフト法がこれまでに提案されてきた。

しかし提案されている位相シフト法は、光路差が変化しても光強度のモジュレーションが一定である高コヒーレンス光源による干渉画像を対象とする方法ばかりで、光路差でモジュレーションが大きく異なるインコヒーレント光干渉縞の光強度変化を前提にした位相シフト法は我々の知る限りなかった。

そこで我々はコンピュータシミュレーションを使って7枚までの画像を用いる位相抽出法の中に、インコヒーレント光干渉像にも使える高精度な方法がないかを調べた。その結果、よく知られる5画面法¹⁾や7画面法²⁾は位相シフト量がちょうど $\pi/2$ の時には極めて精度が良いが、シフト量が $\pi/2$ からずれるに従い、系統的な抽出誤差が現れることを知った。そこでシフト量が $\pi/2$ からずれても、ずれた量を使ってあまり大きな抽出誤差を発生しない新しい位相シフト法をコンピュータシミュレーションで探し出しこれまでに提案した³⁾。

だが、提案した方法が他の良く用いられている方法と比較して効果的に働くか否かを実際の干渉像データを用いて実証することは容易ではなかった。なぜなら、7画面法等を用いる時の抽出誤差の強弱は測定点の位相の関数でもあり、その誤差強度の位相依存性は線形になる(図5)。そこで平行な段差の上面と下面で位相を抽出し差を採って段差高さを計算しても、上面と下面が平行であるため強度が一定の誤差となり誤差の有無を視覚的に判別しにくいからである(消えるわけではない。異なる中心波長を使う装置の段差測定値と比較する必要が有り難しい)。加えて位相シフト量を高精度に制御してやらないと、制御からずれたシフト誤差が与える抽出誤差が、インコヒーレント光故に生じる抽出誤差を上回る場合もあり、その違いを識別しにくいからである。

ところで、最近の市販されている垂直走査型形状測定装置は極めて高い計測精度をカタログでは記載している。この精度を考える時、インコヒーレント光でシフトが $\pi/2$ からわずかにずれて発生する誤差は無視できないと予想される。そこで、我々はハロゲンランプを組み込んだ垂直走査型干渉顕微鏡において干渉像取得と同時に実際の位相シフト量も高精度に計測し、位相シフト量が $\pi/2$ からずれた場合に抽出位相の誤差が提案した方法や7画面法でどれくらい生じるかを評価してみた。

II. 実験装置と実験結果

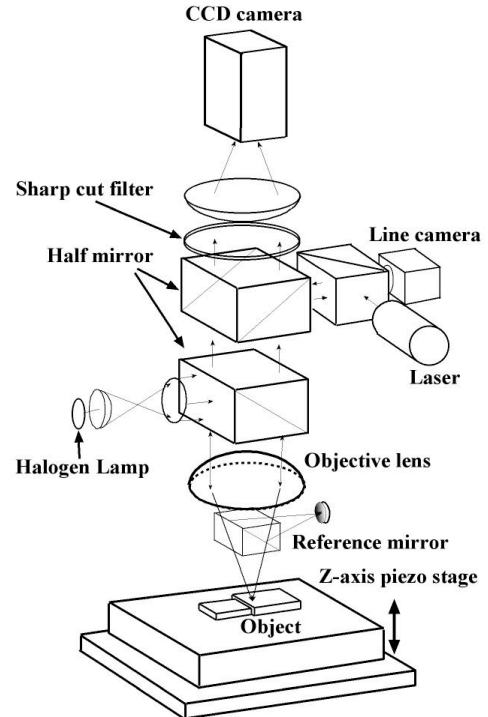


図1 実験に用いた垂直走査型干渉像読み取り装置
対物レンズはマイケルソン型5倍, Laserは473nm

ハロゲンランプを組み込んだ干渉顕微鏡を図1に示す。顕微鏡には実際の光路差変化を測定するためのレーザを使った変位計測用光学系⁴⁾も組み込んである。垂直走査はPI社のPZTステージを用い、低速でゆっくり動かしながら約0.73nm前後のサンプリング間隔で白色干渉像とレーザ干渉像を11000枚取り込んだ。上方の白色干渉像読み取りカメラの前にはレーザ光除去のためのフィルターを入れた。取込中には当然外部からの無視できない上下振動が入り、また干渉像にも雑音信号が混ざる。そこで11000枚の総ての画像に関して取込時間方向に40枚の強度を平均しそれらの影響をなるべく排除して使うこととした。また測定対象としたのは光学ミラーである。

実際の光軸上での光路差変化の計測には変位計測用アルゴリズム⁴⁾を用いた。計測値は測定する垂直(Z)位置で位置に依存する系統的な誤差を持つ。しかし、この誤差は対物レンズのNA効果から派生するものであり、白色干渉位相計測では同じ対物レンズのNA効果が同様に働くので実際のZ位置に依存する系統的誤差は無視した。

平均の後に得られる約11000枚の白色干渉像から適当な間隔で抜き出した像を図2に示す。これらの干渉画像のある画素での画像取込に伴う光強度変化とラインカメラ画像から同様に得られるレーザ光強度変化を図3に示す。

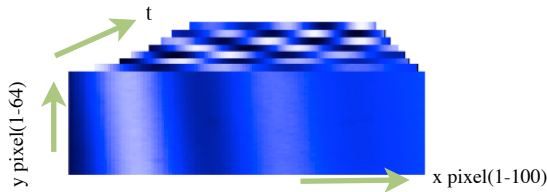


図2 光路差変更に伴う白色干渉像の時間変

提案した低コヒーレント干渉縞の位相シフト法は図4のさし絵に示すような光強度変化を仮定しており、コヒーレンス長の違いへの感受性も低い。コンピュータシミュレーションで発生させた白色干渉画像からこの方法で抽出した位相の誤差を図4に示す。x軸は位相シフト量であり、y軸は測定点の位相であり、z軸は誤差を%で示している。位相シフト量は分かっていることを前提にしているが、このようにどんな位相シフト量のところでも低い誤差で位相抽出が出来る。一方図5では、同じ干渉像から7画面法で抽出した位相の誤差を示す。測定点の位相に依存する線形的な誤差が強く現れている事が分かる。ただし、位相シフト量が $\pi/2$ の時は誤差は非常に低くなる。5画面法も似た傾向を示す。

実際に取り込んだデータからの位相抽出に当たっては、まず精度比較のための基準となる位相値を得る必要が有る。そこで位相シフト量が $\pi/2$ の7画面法を用いた。次に任意の位相シフト量で使う白色干渉画像の画面番号の計算は図3に示した同時取り込みのレーザ干渉信号からの光路差変化を用いた。 $\pi/2$ に対し $\pm 10\%$ の位相シフト量ずれ下での抽出位相値を、基準とした位相値と比較した結果を図6に示す。x方向は干渉像のx画素であり、y軸は抽出位相から形状に換算した時の(誤差/nm)である。実線が10%のシフト誤差、破線は-10%のシフト誤差、黒は7画面位相シフト法を使った誤差、青は提案した方法による誤差である。図中の大きなランプ信号はその場所での位相値である。7画面法と提案している方法を比較すると、提案方法は誤差をかなり低減できる事が分かる。しかし、提案方法で使用している調整定数を一部修正してもシミュレーション結果(図4)までの低減効果は得られなかった。得られた結果は、位相シフト誤差 $\pm 10\%$ では7画面法で高さ誤差が最大2nmだが提案方法では高さ誤差が最大1nm弱だった。

III. 考察ほか

我々が以前報告した「2個の高輝度LEDを用いる高速高精度形状測定法⁵⁾」では、光路差の一定量変更と共に色別の干渉像を交互に取り込む必要が有り、位相シフト量を正確に π の(整数+半整数倍)には出来なかった。しかし、ここで確認した方法³⁾を用いることでより高精度に位相が抽出できることが分かった。

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) P.Hariharan, B.F.Oreb, and T.Eiju, Appl. Opt., 26, 2504-2506 (1987).
- 2) Peter de Groot, Appl. Opt., 34, 4723-4730 (1995).
- 3) M.Adachi, Optical Review, 15, 148-155 (2008).
- 4) 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.
- 5) 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.

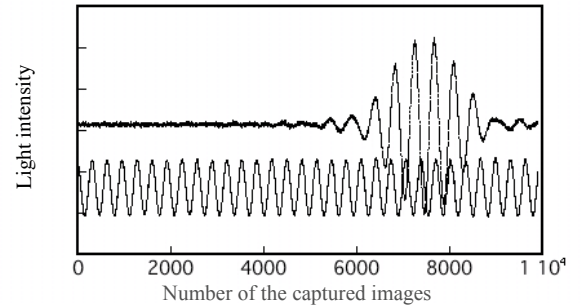


図3 光路差変更に伴う光強度変

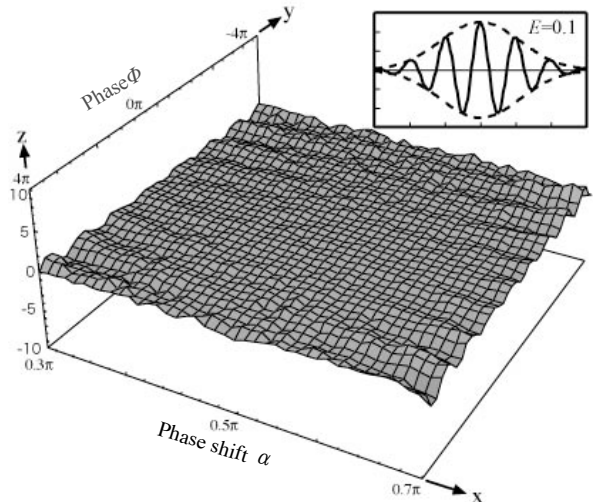


図4 非コヒーレント光に関する提案した方法での位相抽出結果 x軸は位相シフト量, y軸は位相値, z軸は%表示での誤差

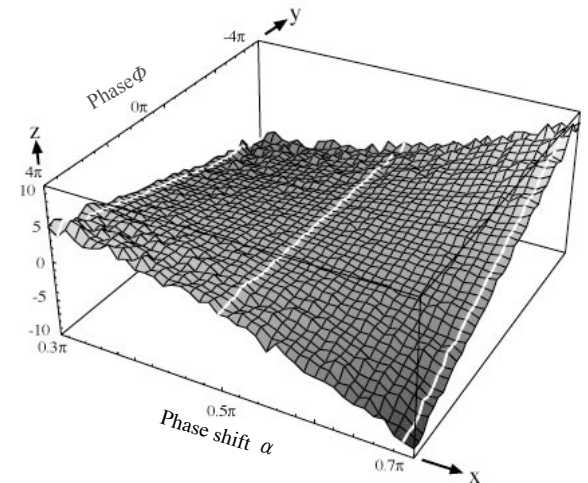


図5 非コヒーレント光に関する7画面法を用いての位相抽出結果 x軸は位相シフト量, y軸は位相値, z軸は%表示での誤差

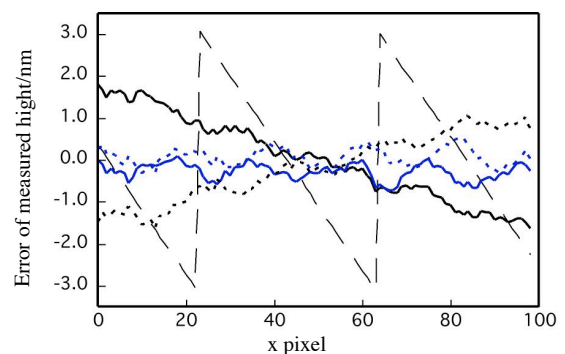


図6 非コヒーレント光に関する位相抽出結果の比較 実線はシフト誤差が10%, 破線は-10%, 黒は7画面法, 青は提案した方法