

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18560247

研究課題名（和文） 上下振動している微細構造物の高精度3次元形状測定法の開発

研究課題名（英文） 3D-shape measurement method of a small object vibrating vertically

研究代表者

安達 正明（ADACHI MASAOKI）

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：50212519

研究成果の概要：垂直走査型の白色干渉形状測定法では装置と測定対象を一定間隔に保ち、測定ヘッドを数十 nm ステップで近づけながら、毎回干渉像を記録する必要があり、振動環境下では使用不可能だった。開発した手法では垂直走査型白色干渉顕微鏡内にレーザ光を持ち込み、白色光と同軸で被測定面に照射し、レーザ干渉像を高速ラインカメラで取り込む。この干渉像を FPGA で高速処理し光路差変化を nm 精度で抽出して、撮影が必要となる光路差のタイミングで白色光をフラッシュさせることで、振動環境下でも段差を持つ微細構造物の3次元形状を高精度に測定できるようになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,400,000	0	2,400,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	360,000	3960,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・(知能機械学・機械システム)

キーワード：白色干渉，高精度計測，光路差，リアルタイム計測，段差，FPGA，振動，3次元形状

1. 研究開始当初の背景

フラットパネル等の薄型ディスプレイ商品の部品製造工程においては、発光材料等を極薄の決められた厚みで挟み込むためのバンプ（スペーサー用の突起）など、段差を有する微細な構造物の高精度な形状評価法が求められている。この理由は、最近のディスプレイの大型化要求によって重量ならびに製造上の観点から必然的に用いられ生産さ

れるようになった薄型ディスプレイでは、発光や偏光の制御が可能な材料をフラットパネル上に極めて薄く広げた後に透明電極等で挟み込み、電圧を加えたり電流を流して発光や光の透過特性を制御して色んな映像を表示する手法が採られており、挟み込む材料の厚みは材料中の電界や電流量に影響して、光学特性や耐久性そして消費電力性などから非常に重要な制御すべきパラメータとなるからである。故に大型パネル上に作られるバ

ンプの形状(数十 μm 前後の微細な突起の形状)は製造工程での重要な検査項目であり、そこでこのバンプを、ゴミ等の付着を避けるために非接触で、非常に高精度にそして高速に3次元形状測定できる技術が必要とされる。

しかしながら、高さ方向に数 nm と言う極めて高い測定精度を有する従来の微細な段差形状測定法(各種の走査型顕微鏡や光干渉顕微鏡そして垂直走査型白色干渉顕微鏡等を利用する方法)では、測定対象物が測定装置に対してほぼ確実に静止している状況が必要であった。すなわち、製造工程などの各種機械動作に伴う振動がどうしても入ってしまう環境下では、測定台にそのまま大型部品を搭載して光等を用いて非接触で数 nm と言う極めて高い測定精度で形状計測する手法は構築できなかった。

このため実際の製造工程でのバンプ等の形状評価では、抜き取り検査を行うしか方法がなく、バンプを含む測定部分を切り出し、測定装置に対して一定の距離となるように3本の支柱で保持される測定台に切り出し部を載せて、振動環境下でも距離を一定に保つようにして測定するか、または振動がほとんどない状況を時間と手間を十分に掛けて準備して、測定精度があまり十分とは言えない大型3次元形状測定器で無理やりに測定するしか方法がない状況であった。

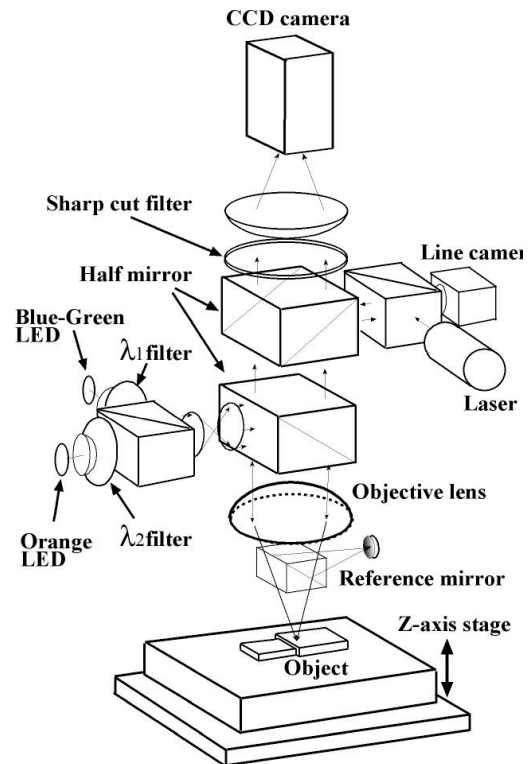
2. 研究の目的

数十 μm の深い段差を持つ微細表面の3次元形状を nm の極めて高い精度で簡単かつ高速に測定するには、垂直走査型白色干渉顕微鏡を利用する方法が最近の方法の中では最も有力である。この方法は極めて高い測定精度がその特長だが、測定に関しては垂直走査しながら約 70nm 間隔毎に2次元干渉像をカメラで撮影しそれらを総てコンピュータに取り込む必要があり速度は残念ながら高くはできなかった。そこでこの高い測定精度を維持しながら、高速測定性も高めることを狙って我々は、2色の高輝度LEDを用いる垂直走査型干渉応用形状測定法を開発してきた。これは、垂直走査での2次元干渉画像を取りこむ垂直方向のサンプリング間隔を従来法に比べ極めて長い 400nm 毎として高速化を行うことにその特徴があった。我々はこの長いサンプリング間隔を活かすと、振動環境下でも必要な干渉像を取りこぼすことなく効率的に取得できる機能を付与できるようになることに着目した。そこで本研究では、2色の高輝度LEDを用いる垂直走査型干渉応用形状測定法とその開発に使

った装置を出発点とし、これをハード・ソフト両面で大幅に改造し、必要な新たな機能を追加して、振動環境下でも段差形状を持つ微細構造物の3次元形状を nm 精度で高速高精度に測定できるようにする事を本研究の目的とした。

3. 研究の方法

上で述べたように、高精度な3次元形状測定には我々が独自に開発してきた2色の高輝度LEDを用いる高速干渉測定法を利用する。この方式での段差形状測定では、干渉の光路差を数 nm の精度で 800nm (高さ方向には 400nm)ずつステップ的に順次変化させながら2次元干渉像を多数毎取り込む。製造工程などの振動環境下ではこの正確な光路差制御が極めて難しい。そこで下図のように、この2色の高輝度LEDを用いる垂直走査型干渉顕微鏡本体にレーザ光源を内蔵させて干渉顕微鏡の光軸に沿ってレーザ光を照射し、測定したい部分の光路差をラインカメラを用いて極めて高速にそして高精度に測定する方法を新たに開発する。そして、光路差が所定量変化した瞬間毎に2色のLEDを交互にフラッシュ点灯して必要な光路差変化毎の干渉像を撮影する方法を用いることにした。



この方法を用いると、以下の効果が期待できるようになる。

- 1). 干渉顕微鏡の3次元形状測定用の光軸と、光路差変化測定用のレーザ光の光軸を一致させ得るため、高精度測定でしばしば問題となるアッペ誤差が発生しない
- 2). レーザ光は干渉長が長く、大きな光路差での微小な光路差変化も測定できるので、簡単な構造を採ることによって可能となる長いストローク長を持つ垂直走査用Z軸テーブルも高精度形状測定に使える
- 3). レーザ光を用いるため、その波長を長さ標準として用いて、より高精度な形状評価法に近づけることが可能となる

その結果この方法は振動環境下でも使える事となり、また従来の白色干渉応用3次元形状測定法と同等かそれ以上の性能を持つこととなる。以上の方法は、レーザ干渉と白色干渉の長所を組み合わせたものである。このようにして両干渉計の長所を利用して、振動環境下でも数nmの精度で3次元形状を測定する方法を開発する。

4. 研究成果

以下に得られた成果を箇条書きで記載する。

- 1). フラットパネルやMEMS部品などで作られる段差はその表面がほとんど精密加工されて鏡面状をしている。5倍のマイケルソン型干渉対物レンズを使って得られるこの表面が作るレーザ光の干渉像であっても、光路差を0.1mm変える時には光強度変化のモジュレーションやオフセットはかなり変化した
- 2). しかし光路差を数 μm のみ変える場合、干渉位相の異なる2つの領域の光強度変化に着目し、それらの光路差変化に伴う光強度変化を共に振幅1に規格化し、規格化した信号の和と差を求めて、和と差の変化も再度振幅1に規格化すると、それらの再規格化信号2つから干渉の位相変化量が高精度に抜き出せることを突き止めた
- 3). そこで高速ラインカメラでこのレーザ干渉像を撮影し、撮影データを高速FPGAボードにカメラリンクを介して直接取込み、取り込んだデータを上記2)の手法で高速に処理することで、干渉の位相変化が高速で抽出できるようになった(画像取込から位相計算終了までの所要時間は約20 μ 秒)
- 4). この位相データを基に所定光路差変化毎にLEDをフラッシュ点灯させて2次元のLED干渉像の取込を行い、3次元形状

計測が正しくできることを確認した

- 5). どの程度までの振幅や周波数を持つ振動の環境下で、本方法が有効かを、FPGAボードの中間処理結果をPCに取り込み評価しながら調べた。そしてそれらは、垂直走査での干渉画像サンプリング間隔と外部振動の振幅や周波数から想定される予想値とほぼ一致することを確認した
- 6). 一方、干渉位相の異なる2つの領域選択のための条件も調べた。2つの領域は位相差で $\pi/2$ 離れているのが理想的である。しかし、 $\pi/2$ から約 $\pi/6$ のズレがあってもあまり影響は少なかった
- 7). 段差のある表面では段差境界近傍に2つの領域を選択することはピンボケの影響を受けやすいので避けるべきであるが、どの程度離すべきかに関して実験的に調べた。しかし、段差の左右で評価値が違うなど簡単な結果は得られなかった。これには視野内の段差位置や顕微鏡全体の光学系構成も関係してくるようである
- 8). 以上の現象は本方法が測定位置や測定対象を選ぶことを意味し、対象によって高精度な光路差計測を難しくすると予想された
- 9). そこで位相の異なる2つの領域のみを対象とせず、また対象面を鏡面のみでなく細かな凹凸を持つ粗面にも拡張するための、この方法の問題点を調査した
- 10). 細かな凹凸を持つ粗面の場合、光路差変化と共にピンボケで各画素でのモジュレーションやオフセットが大きく変化する。そこで3つの画素での強度変化の全体的かつ相対的な関係からこの問題を解決する方法を検討した。しかしうまく行かなかった
- 11). そこで、ESPI(Electronic Speckle pattern Interferometry)の手法を適用するようにした。この方法は画面全体を用いるので、特定画素の問題は発生しない。そして2次元カメラによるレーザ干渉像からラインカメラデータに相当する1次元データを抜きだし、ESPIの手法を適用する実験を行い、今後の粗面への本方法の展開に関する貴重な指針を得た
- 12). 本研究開発では、対物レンズにマイケルソン型干渉対物レンズを用いた。この型の対物レンズは高倍率化が難しく、高倍率測定では一般にミロー型のレンズが良く用いられる。このミロー型を用いて本研究開発法を行おうとする場合の問題点も調べた。その結果、レーザ光はミロー型レンズの内部ミラーで一部が遮られ、うまく中心部のレーザ干渉像を取得できなくなった。これを避ける方法として顕微鏡内部に散乱板を導入してみた。散乱板を用いると影はなくなったが、しかし干渉位相は光路

差変化と共にかなり不規則な変化を示し、このままでは所定の精度が得にくい事を確認した。最終的に、本方法を高倍率のレンズを用いて実施するためにはリニーク型の干涉顕微鏡が適当であるとの結論を得た

なお、本研究で開発した方法によって、振幅 100nm 周波数 10Hz の人工的な振動環境下で段差 85nm を持つ標準段差試料の 3 次元形状を測定した。この測定では振動を故意に打ち消す方法でなく、2 次元干涉画像を撮影するタイミングのみをラインカメラ画像を介して光路差をリアルタイムに計測した結果を基に電氣的に制御して行っている。振幅 100nm はあまりに小さい振動と感ずるかも知れないが、本方法は nm 精度の高精度な 3 次元形状を測定しようとする手法であり、その精度を維持しようとする場合、振幅 100nm の振動は非常に大きな障壁となるものであり、正しく標準段差を測定できたことは本手法の有効性を示すものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 安達正明, 藤本健太, 平野勇輝, “走査型干涉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 巻, 1215-219, 2008, 査読有
- ② M.Adachi, “Phase-shift algorithm for white-light interferometry insensitive to linear errors in phase shift”, Optical Review Vol. 15, 148-155, 2008, 査読有
- ③ M.Adachi, Y.Nishide, “Simultaneous measurement of nanometric longitudinal displacement and micrometric lateral displacement by using one line CCD camera”, Proceeding of SPIE, vol.6374, 6374A8-1~6374A8-9, 2006, 査読有

[学会発表] (計 4 件)

- ① 安達正明, 河村昌範, 岩尾雄太, “干涉顕微鏡観察下の粗面の垂直変位測定”, 精密工学会 2009 年度春期大会学術講演会, 2009.3.12, 東京
- ② 安達正明, “微細段差形状の高速高精度光応用 3 次元形状測定法”, 精密工学会 2009 年度春期大会学術講演会, 2009.3.12, 東京
- ③ 安達正明, 平野勇輝, 河村昌範, 岩尾雄

太, “振動環境で利用できる走査型光干涉応用形状計測技術”, 精密工学会 2008 年度秋期大会学術講演会 2008.9.18, 仙台

- ④ 安達正明, 平野勇輝, 藤本健太, 泉澤俊裕, 五十島一興, “顕微鏡内蔵型レーザ変位計の開発”, 精密工学会 2007 年度秋期大会学術講演会, 2007.10.13, 旭川

[その他]

ホームページアドレス

<http://www.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/~physics/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安達 正明 (ADACHI MASA AKI)
金沢大学・機械工学系・教授
研究者番号: 50212519