

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 4 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360115

研究課題名（和文） 振動下でも使用できる超高精度 3 次元形状計測技術の開発

研究課題名（英文） Ultrahigh-precision 3D-shape measurement technique usable under vertical vibration

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（和文）：振動下にある垂直走査型干渉計の光路差変化をレーザーでリアルタイムかつ高速高精度に計測する手法を開発し、変化情報を基に一定の位相変化終了後毎に LED 光を瞬間点灯させ干渉縞を撮影した。この手法で計測した形状結果を分析しさらなる高精度化には点灯&露光中に加わる振動もその影響を補正する必要を見出し、露光中の光路差変化履歴を基に振動影響を補正して位相を抽出する方法も開発し、その効果を実験で確認した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a new measurement technique for nm-level change of an optical-path-difference (OPD) using laser. This technique can measure OPD of a vertical-scan interference microscope real time and high speed. With the technique we can trigger LED flashings and interferogram exposures right after predefined phase changes even under vertical vibrations. Analyzing the measured 3D-shape obtained with the technique results in that affects of vibration during the exposure should be corrected for higher precision shape measurement. Then we have developed another technique which can extract interference phase just on the exposure-start moment from vibration-affected interferogram intensities and history of OPD changes during the exposure. Validity of the developed technique is proved by experiments using the vertical-scan interference microscope with intentionally generated pulse-like vibration.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2010 年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2011 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：計測工学

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：光干渉，3次元形状，位相抽出，振動，高精度計測

## 1. 研究開始当初の背景

MEMS (Micro Electronic Mechanical Systems) 素子など微細構造物の活用が広く進むにつれて、素子の機能に大きく影響する

微細構造部分の 3 次元形状を、製造工程でも高精度に評価したいという要求があった。対象となる構造物の高さ方向に求められる測定精度は nm に近く複数の段差形状等も測定する必要があり、一般にそれらの高精度計測

には「非振動環境下」で高さ方向に干渉対物レンズを高い精度で走査する干渉顕微鏡システムが使われて来た (Zygo 製品: 非接触表面形状測定器)。すなわちこの高い測定精度を保証するためには、nm 精度での対物レンズの移動と移動終了直後の干渉顕微鏡画像の読み取りがどうしても必要である。このため、空気の揺らぎや振動環境にある製造工程ではその使用は非常に困難だった。

そこで測定対象と干渉対物レンズの距離が干渉縞発現条件下の時に、キャリア縞を含む干渉画像を1枚、もしくは波長の異なる3枚の干渉画像をカラーカメラで一瞬に撮影して、形状計測しようとする取り組みも一部で行われるようになってきた。しかし深い凹凸 (10 $\mu$ m 以上) を持つ MEMS 素子では、一瞬のみの撮影ではある高さに焦点のあった干渉像しか取り込めず、全体形状を高精度に測定することはできない。この点で、一瞬の撮影で形状を測定しようとする方法は、振動下でも3次元形状を何とか測定したいという要求から生まれた、適用範囲と横方向の測定精度を犠牲にする苦肉の方法と言える。

以上のように振動環境下での高精度3次元形状評価の要求は極めて高い。そこで我々がこれまでに培ってきたレーザ応用技術ならびに干渉応用計測技術を使って、振動環境下でも段差を持つ微細構造物の高精度3次元計測を可能とする技術を開発しようとの着想に至った。

## 2. 研究の目的

我々は垂直走査に伴って変化する干渉像を所定の位相変化終了毎に確実に撮影する方法をこれまで研究してきた。そして測定対象が一部に平面を持つ時、その領域が作る干渉縞を利用して光路差変化を高速・高精度に測定するアルゴリズムを開発した。また、その後の実験からこの手法を垂直走査型干渉顕微鏡に組み込むことで、干渉計内で振動を強制的に発生させても平面段差試料を高精度に測定できそうだと感触を得た。

そこで本研究では、工業分野で用いられる MEMS 素子等が持つ粗面までを対象として、その面と参照面が作る干渉計の光路差変化をリアルタイムで高速高精度に計測する手法を開発し、開発した手法を用いて振動環境下で微細加工物の形状を測定して評価し、その形状計測精度の限界を与える原因を解明し、その限界を乗り越える手法を研究し、製造工程で発生しているようなより激しい振動環境下でも微細構造物の3次元形状を高速高精度に計測できる技術を開発することを目的とした。

## 3. 研究の方法

行った主な研究についてその方法を複数のサブテーマに分けて以下に説明する。

### (1) 超精密面を対象にした振動環境でも利用できる垂直走査型光干渉応用形状計測技術の研究

超精密面で構成される標準段差試料を干渉顕微鏡での測定対象にし、垂直走査に伴う対象面と参照面が作る干渉計の光路差変化を青色レーザと高速ラインカメラと FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いてリアルタイムで高速・高精度に評価できるようにする。そして、振動環境にあってもその光路差が正確に所定量変化する毎に高輝度 LED 光をフラッシュ点灯させてその干渉像を PC に取り込んで、振動環境下にあっても安定して3次元形状を評価できる手法を研究し、その有効性を調べると共にこの方法で残る形状誤差の原因を解明してより高精度な測定技術に繋げる。

### (2) 干渉顕微鏡観察下の粗面を対象にする長い垂直走査域での光路差変化の高精度計測技術の研究

高精度3次元形状計測の対象とする表面は必ずしも超精密面のみから構成されるとは限らない。そこで、鏡面から粗面に近づいていく複数の状態の異なる面を対象に、それらの面が作る干渉計の光路差変化を高精度に計測できる手法を研究し、振動環境下でそれらの状態の面が作る微細構造物の3次元形状を高精度に測定できるようにするための基礎技術を開発する。

### (3) 振動環境下で撮影された干渉像からの高精度位相抽出法の研究

(1) で行った研究の結果、さらに高精度な形状計測を振動環境下でも実現するためには、干渉縞の露光中に加わる振動の影響も補正する必要があることが分かった。一般に段差を持つ微細構造物の垂直走査型干渉応用形状計測では光源にレーザでない光を用いる必要があり、そのような光は輝度が低く少し長めの露光時間を必要とする。このため、露光中に加わる振動の影響はどうしても避けられない。そこで、露光中の光路差変化履歴を基に振動の影響を補正して露光開始直後の干渉位相を高精度に抽出できる方法を検討する。

### (4) 露光中も振動している状況下で撮影された光干渉像を用いる高精度3次元計測技術の研究

上の(3)で露光中の振動の影響を補正して露光開始直後の干渉位相を高精度に抽出できる方法を研究開発する結果を受けて、この方法を実際の垂直走査型干渉顕微鏡に組込

み、実際の段差を持つ構造物を突発的な振動が加わる条件下で3次元形状測定しその効果を検証するとともに問題点を評価してさらなる改善を進める。

#### 4. 研究結果

上に述べた個々のサブテーマに沿って得られた研究結果を以下に述べる。

(1) 超精密面を対象にした振動環境でも利用できる垂直走査型光干渉応用形状計測技術の研究

標準段差試料と参照面が作る干渉計を種々の光路差変動下に置いて、青色レーザと高速ラインカメラと FPGA を用いて、一定の光路差変化毎に2次元カメラの露光開始をトリガーしながらLED干渉像を取り込んで形状計測する手法の測定精度を評価し、その効果と限界を調べた。この研究結果に関しては「5. 主な発表論文等」の③にその詳細を図表を含めて記載している。詳しくはそちらを参照されたい。

(2) 干渉顕微鏡観察下の粗面を対象にする長い垂直走査域での光路差変化の高精度計測技術の研究

放電加工が施された粗さの強弱が異なる粗面を複数用い、青色レーザと高速ラインカメラを用いる光路差変化計測法の評価を行い、粗さが大きくなる時にどんな現象が発生し、計測誤差がどれくらい出るか、またこの改善方法としてどんな方法があり、その効果はどれくらいかを詳しく調べた。この研究結果に関しては「5. 主な発表論文等」の②にその詳細を図表も含めて記載している。詳しくはそちらを参照されたい。

(3) 振動環境下で撮影された干渉像からの高精度位相抽出法の研究

(1)で行った研究結果から露光中の振動影響を補正する方法の必要性を確認し、露光中の振動が光強度に与える影響を解析し、光強度から位相を抽出する計算方法と相関させて、振動影響を完全に補正するアルゴリズムを新しく開発した。この研究結果に関しては「5. 主な発表論文等」の①にその詳細を図表も含めて述べている。詳しくはそちらを参照されたい。

(4) 露光中も振動している状況下で撮影された光干渉像を用いる高精度3次元計測技術の研究

(3)で開発した露光中も振動している状況下で撮影された干渉像から干渉位相を高精度に抽出できる方法の研究結果を受けて、この方法を実際の垂直走査型干渉顕微鏡に組

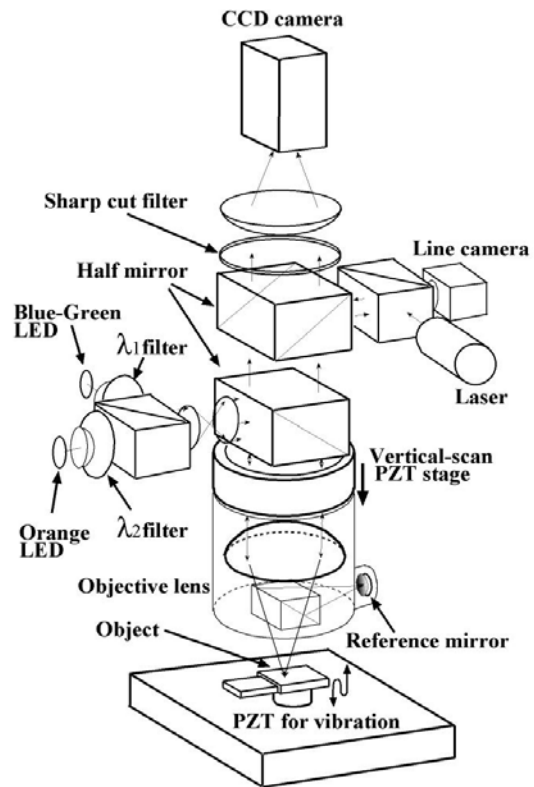


図1 実験装置

み込んで突発的な振動を露光中の干渉計内に発生させ、実験からその効果を確かめた。

以下に、ア. 実験装置、イ. 実験方法、ウ. 測定結果等に関して順に記載する。

##### ① 実験装置

図1に用いた実験装置を示す。ベースにした顕微鏡はニコン製であり、マイケルソン型干渉対物レンズ5倍を装着した。低コヒーレンス光源はOrangeとBlue-Green2種の高輝度LEDである。垂直走査は対物レンズ上部のPZTをFPGAでデジタル制御してレンズが定速での垂直走査になるようにしている。光路差変化のリアルタイム計測用光源として473nmのレーザ光を顕微鏡光軸上に持ち込み、測定物体と干渉対物レンズ内の参照面によるレーザ干渉像を高速ラインカメラで撮影する。垂直走査と外部振動影響下の光路差変化をレーザ干渉像の強度変化からFPGAが80kHzで計測する。垂直走査中にLED光の干渉像の露光開始高さになると2次元CCDカメラへ露光開始信号を送ると同時にLED駆動回路にも点灯用の矩形信号をFPGAから送る。2次元CCDカメラはLED干渉縞のみが撮影できるよう短波長の強いレーザ光を吸収するシャープカットフィルターを前面に設置している。また測定対象試料は標準段差試料(段差50nm)である。実験装置では、干渉計の突発的な光路差変化を露光中に引き起こすべく異なるPZT素子を標準段差試料の下に設置し

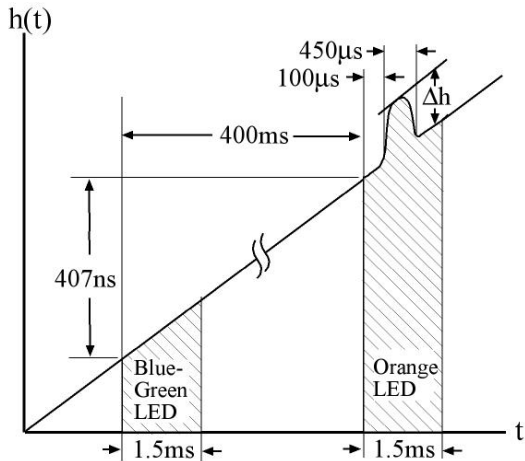


図2 垂直走査中に発生させた突発振動

た。そして注目する測定点が垂直走査下で光路差ゼロ付近となるある1枚の干渉画像の露光開始信号のみに同期して外部振動による光路差変化を疑似発生できるようにした。

②実験方法

振動環境下では光路差変化が一定速度型からずれるので、画像取込の時間間隔も変動する。振動の振幅等が大きくなると光路差変化速度も大きくなり、画像取込直後にすぐ次の取込が必要となる。この取込間隔の短縮化は、許容できる外部振動強度を制限する。そこで、先に述べたように2種のLED光源を用いて長いサンプリング間隔(同じ波長の画像取込は0.815μm毎、2種の画像を交互に取り込むので取込間隔は0.407μm毎)を持つ画像取込手法を用いた。この方法は通常のサンプリング間隔(約70nm)の6倍であり、高さ変化がその値になるまで次の画像を取りこむ必要が無く、許容できる振動強度も6倍となる。

この2色のLED交互点灯を用いる方法での定速垂直走査下での疑似的外部振動発生による高さ変化と光蓄積の様子を図2に示す。繰り返しになるがこの外部振動発生は光路差ゼロ付近のOrange画像1枚の取込に対してのみ行い、その他のOrange画像やBlue-Green画像取込に対しては行わない。これは我々の2色のLED交互点灯を用いた高速高精度計測法では、Orangeの画像が高精度位相計算の中心情報であり、Blue-Greenの位相情報はOrangeの位相情報との差からOrangeの干渉縞の次数計算にのみ使用しており、最終的には得られたOrange縞の次数と位相情報から形状計算を行うからである。振動発生の具体的な方法は、垂直走査開始後0.407μm垂直移動毎にFPGAから出される露光開始信号とLED点灯信号の内、最初から50番目(Orangeの25番目)のLED点灯スタートのみに同期したパルス信号を

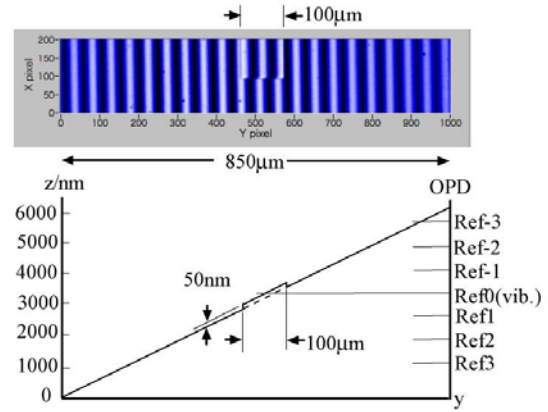


図3 測定した標準段差の断面と干渉像

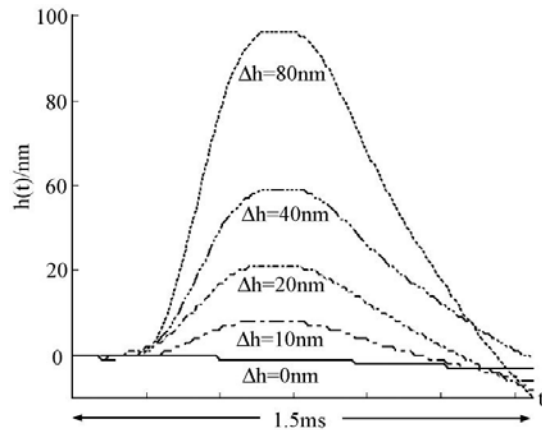


図4 露光中に発生させた5種の突発振動

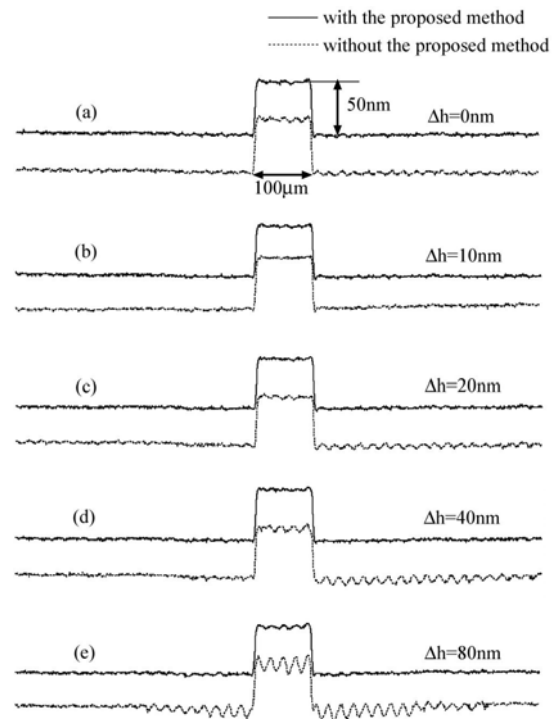


図5 振動下で測定した標準段差試料

FPGA からファンクションジェネレータにも出し、バーストモードでその  $100\mu\text{s}$  後に特定形状の電圧を  $450\mu\text{s}$  間発生させ、試料下の PZT 素子に入力する。発生させた形状は高さ  $\Delta h$  の cosine 波の  $-85$  度から  $85$  度の 1 周期波形である。図 2 では cosine 波の振動発生と一定速度での垂直走査による光路差変化を高さ  $h(t)$  の変化として示し、斜線部はカメラの露光時間を示す。

使った標準段差試料の光路差ゼロ付近の Orange 干渉像とその断面の高さ情報を図 3 に示す。干渉像の上側中心付近に  $50\text{nm}$  の凸部が位置しており、試料は右方向が高くなるように故意に傾斜させた。傾斜させることにより、7 画面を用いる位相抽出計算で、発生させた振動が影響する高さ領域と影響しない高さ領域を測定域に共存させ、計測結果の断面にその影響の強弱を明示できる (図 5 を参照) からである。また、この条件での干渉画像取込時に予想される参照面 7 枚の位置の高さを図 3 の下部右側の軸に示した。Ref0 で示した位置に参照面が来た時に振動を発生させている。故に断面の中心領域は Ref0 で発生させた振動が影響する画像を使った形状計算結果となり、左右両側には振動が無い時の形状が現れることになる。

### ③ 測定結果

実験で発生させた振動は cosine 波の最大高さが  $0\text{nm}$ ,  $12\text{nm}$ ,  $24\text{nm}$ ,  $48\text{nm}$ ,  $100\text{nm}$  となるようにした 5 種であり、これらに関して FPGA が露光中に計測した光路差変化情報を図 4 に示した。次にこれらの条件で測定した標準段差試料の断面形状を図 5 に示す。右上の数字は発生させている cosine 波信号の実際のピーク高さ変化  $\Delta h$  である。試料は故意に傾斜させているので測定された形状は大きく右肩上がりを示すが、そのままでは振動のみによる影響を評価しにくいので、ベース傾斜分を差し引いた値を横方向に平均無しで示した。それぞれで上側が発生している振動情報を基に補正して得た形状、下側が干渉画像強度のみから通常の方法で計算した形状である。

補正の有無の効果と比較すると干渉計内で発生させた振動影響は補正で大きく排除されていることが分かる。補正しない場合は振動が規則的な周期を持つ凹凸形状の誤差を与えるがこれは干渉縞の空間周波数の 2 倍であり、位相シフト法で位相抽出が正しく行われなかったときに発生する誤差と一致している。今回は位相シフト量が  $6\pi \pm 1/2\pi$  であったが、露光中の振動による干渉光の強度変化が位相シフトが正しく行えない場合の強度変化と似た作用で働いたためと考えられる。図 5 の (e) で発生させた振動振幅は  $100\text{nm}$  近いものであるが、その場合でも補正によりほぼ正しく形状を計算できている。

この振幅は 1 波長を用いる場合の垂直サンプリング間隔 ( $600\text{nm}/8=75\text{nm}$ ) を上回っており、1 波長では絶対に計測不可となる条件である。この状態でも高精度に測定ができることは、我々が過去に開発した 2 波長を用いる計測方法が振動影響を受けにくい測定法としても有効であることを示している。

しかし、図 5 を詳細に観察すると振動補正した方が補正しない場合と比較して誤差を少し多めに含む領域も見受けられる。また、振動振幅が大きくなると、補正していても振動影響が結果に現れてくる状況もある (最大振動となる (e) では中心部の凸域に周期的誤差が現れている)。これらの原因に関しては、FPGA のプログラムバグ、カメラへの露光開始トリガーと実際の露光開始タイミングのずれ、カメラの  $y$  値の影響、等に関して調べたが完全な解決には至っていない、今後に残された問題であり、今後も継続した研究を続ける予定である。

## 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 (他 2 名, 1 番目), 振動環境下で撮影された干渉像からの高精度位相抽出, 精密工学会誌, 77 巻 (2011), 502-506, 査読有
- ② 安達正明 (他 2 名, 1 番目), 干渉顕微鏡観察下の粗面の垂直走査域  $100\mu\text{m}$  での光路差変化の高精度測定, 精密工学会誌, 76 巻 (2010), 834-839, 査読有
- ③ 安達正明 (他 3 名, 1 番目), 振動環境でも利用できる垂直走査型光干渉応用形状計測技術, 精密工学会誌, 75 巻 (2009), 1299-1304, 査読有

[学会発表] (計 3 件)

- ① 安達正明 (他 2 名, 3 番目), 振動環境下で撮影された白色干渉像からの高精度形状計測, 2011 年精密工学会秋季大会学術講演会, 2011 年 9 月 22 日, 金沢大学 (石川県)
- ② 安達正明 (他 2 名, 3 番目), 露光中の光路差変化情報を用いた低輝度光源干渉像からの位相抽出の高精度化, 2010 年精密工学会秋季大会学術講演会, 2010 年 9 月 27 日, 名古屋大学 (愛知県)
- ③ 安達正明 (他 2 名, 3 番目), 振動環境下で撮影された白色干渉像からの高精度形状計測, 2009 年精密工学会秋季大会学術講演会, 2009 年 9 月 11 日, 神戸大学 (兵庫県)

〔図書〕（計1件）

- ① 安達正明, 日本工業出版, 走査型干渉顕微鏡観察下の粗面の垂直変位測定, 光アイアンス 22(6), 2011. 6, 35-39,

## 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

### (2) 研究分担者

榎本 文彦 (ENOMOTO FUMIHIKO)  
金沢大学・電子情報学系・助教  
研究者番号: 80135045

秋田 純一 (AKITA JYUNICHI)  
金沢大学・電子情報学系・教授  
研究者番号: 10303265