

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5130513号  
(P5130513)

(45) 発行日 平成25年1月30日(2013.1.30)

(24) 登録日 平成24年11月16日(2012.11.16)

(51) Int.Cl. F I  
**GO 1 B 11/16 (2006.01)** GO 1 B 11/16 G  
**GO 1 B 9/021 (2006.01)** GO 1 B 9/021

請求項の数 9 (全 18 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2006-66766 (P2006-66766)                  (22) 出願日 平成18年3月10日(2006.3.10)                  (65) 公開番号 特開2007-240465 (P2007-240465A)                  (43) 公開日 平成19年9月20日(2007.9.20)                  審査請求日 平成21年3月9日(2009.3.9)</p> <p>特許法第30条第1項適用 「2005年度修士論文発表会 論文概要集」平成18年2月22日、和歌山大学発行、p. 6、p. 8</p>	<p>(73) 特許権者 504145283                  国立大学法人 和歌山大学                  和歌山県和歌山市栄谷930番地                  (74) 代理人 110001069                  特許業務法人京都国際特許事務所                  (74) 代理人 100095670                  弁理士 小林 良平                  (72) 発明者 森本 吉春                  和歌山県和歌山市栄谷930番地 和歌山大学システム工学部内                  (72) 発明者 藤垣 元治                  和歌山県和歌山市栄谷930番地 和歌山大学システム工学部内</p>
---	---

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 3次元変位ひずみ計測方法及び装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

- a) 計測物体に、異なるレーザ光源から出射される同一波長の3つの物体光を異なる方向から照射し、
- b) 各物体光から分岐される3つの参照光と計測物体からの反射光との干渉像を、各参照光の位相を互いに異なる速度で物体光に対して変化させつつ複数枚、2次元撮像素子で撮影し、
- c) フーリエ変換を用いて位相変化速度の異なる干渉成分を抽出することにより3つの物体光による干渉像を分離し、
- d) 各干渉像より、各物体光の照射方向に応じた方向の計測物体の変位分布を計測することにより計測物体の3次元変位を計測する方法。

10

【請求項2】

基準面に既知の3次元変位を与えつつ前記方法で該変位を計測しておき、その結果に基づいて計測物体の未知の3次元変位量を計測する請求項1に記載の3次元変位計測方法。

【請求項3】

前記既知変位の計測を複数回繰り返し、その平均を取ることにより未知変位の計測精度を高める請求項2に記載の3次元変位計測方法。

【請求項4】

2次元撮像素子の各画素における演算結果に基づいて平滑化処理を行うことによりノイズ除去を行い、未知変位の計測精度を高める請求項1～3のいずれかに記載の3次元変位

20

計測方法。

【請求項 5】

2次元撮像素子の各画素毎に、該画素及び周辺画素の位置とそれら画素について請求項1～4のいずれかに記載された方法により計測された変位とに基づき、ひずみを算出する3次元ひずみ計測方法。

【請求項 6】

a) 計測物体に、異なるレーザ光源から出射される同一波長の3つの物体光を異なる方向から照射する物体光照射手段と、  
 b) 各物体光から分岐され、互いに異なる速度で物体光に対する位相が変化する3つの参照光を生成する参照光生成手段と、  
 c) 計測物体からの反射光と前記3つの参照光の干渉像を撮影する2次元撮像素子と、  
 d) 2次元撮像素子により複数枚撮影された干渉像に基づき、フーリエ変換を用いて位相変化速度の異なる干渉成分を抽出することにより3つの物体光による干渉像を分離する分離手段と、  
 e) 各干渉像より、各物体光の照射方向に応じた方向の計測物体の変位分布を計測する変位計測手段と  
 を備える3次元変位ひずみ計測装置。

10

【請求項 7】

更に、2次元撮像素子の各画素毎に、該画素及び周辺画素の位置とそれら画素について計測された変位とに基づきひずみを算出するひずみ算出手段を備える請求項6に記載の3次元変位ひずみ計測装置。

20

【請求項 8】

a) 計測物体に、異なるレーザ光源から出射される同一波長の複数の物体光を異なる方向から照射し、  
 b) 各物体光から分岐される複数の参照光と計測物体からの反射光との干渉像を、各参照光の位相を互いに異なる速度で物体光に対して変化させつつ複数枚、2次元撮像素子で撮影し、  
 c) フーリエ変換を用いて位相変化速度の異なる干渉成分を抽出することにより前記複数の物体光による干渉像を分離し、  
 d) 各干渉像より、各物体光の照射方向に応じた方向の計測物体の変位分布を計測することにより計測物体の変位を計測する方法。

30

【請求項 9】

2次元撮像素子の各画素毎に、該画素及び周辺画素の位置とそれら画素について請求項8に記載された方法により計測された変位とに基づき、ひずみを算出するひずみ計測方法

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、3次元物体（立体物）の3次元変位及びひずみを計測する方法及び装置に関する。

40

【背景技術】

【0002】

鋼構造物、コンクリート構造物、樹脂・セラミック構造物等の構造物の欠陥検査や、産業現場などにおいて、立体物の3次元変位やひずみの分布を計測する手法が求められている。従来のひずみ計測では、ほとんどの場合にひずみゲージが用いられているが、ひずみゲージを貼ることのできる場所は限られるため、広い領域や或る物体の全面のひずみの分布を得ることは困難であった。また、マイクロマシンの材料試験や特性評価試験に際しても微小な変位やひずみの計測が必要とされる。

【0003】

3次元物体の変位を高精度に計測する手法の一つに、位相シフトデジタルホログラフィ

50

法がある（例えば、非特許文献1参照）。位相シフトデジタルホログラフィ法では、物体に主レーザ光（物体光）と、それに対して位相をシフトさせた参照光とを照射し、物体の変位前後の両光の干渉像をCCDカメラにより撮影する。こうして撮影した干渉像を逆フーリエ変換することにより、物体表面の各部位の変位分布をデジタルデータとして計測する。この方法は、分布表面の変形量や変位量を非接触で、しかも高速で計測することができるという大きな特長を持つため、種々の用途に適用することができる。

#### 【0004】

特許文献1には、位相シフトデジタルホログラフィ法の一つの改良方法が開示されている。これは、ハレーションやスペckルノイズによる影響を低減することにより高精度の変位・ひずみ計測を行うことを目的としたものである。

非特許文献1には、2光波の照射で計測物体の3方向の変位（3次元変位）を求めることができる位相シフトデジタルホログラフィ法が記載されている。

特許文献2には、計測物体に対して2方向からレーザを照射し、方向ごとにシャッタを使って照射方向を順番に切り替え、それぞれの画像を順に撮影することにより、計測物体の面内方向および面外方向の変位を高精度に計測することができる方法が記載されている。

#### 【0005】

【特許文献1】特開2005-265441号公報

【特許文献2】特願2005-256539号明細書

【非特許文献1】大瀧博貴，坂上賢一，隆雅久「位相シフトデジタルイメージプレーンホログラフィ干渉法による変位計測」，日本実験力学学会2005年度年次講演会，No. 5，130-135(2005)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

#### 【0006】

特許文献1に記載の方法によれば計測物体の面外方向の変位を高精度に計測することができるが、この方法は、計測対象物体に正面から物体光を照射するとともに、それに対して位相をシフトさせた参照光を重畳して撮影し、干渉縞を得るものであるため、1方向の変位（面外変位）しか計測することしかできない。

非特許文献1に記載の方法では、2光波の照射で3方向の変位を求めているため、面内方向の精度が不十分である。

特許文献2に記載の方法では、計測物体に対して2方向からレーザを照射するが、方向ごとにシャッタを使って照射方向を順番に切り替え、それぞれの画像を順に撮影しているため、計測に多くの時間を要する。

#### 【0007】

本発明はこれら従来の方法の欠点を解決するものであって、位相シフトデジタルホログラフィを用いた変位計測において、3次元変位計測を一挙に且つ短時間でいう手法を提供する。また、変位計測手法によって得られた変位分布からひずみ分布を算出する手法も提供する。

【課題を解決するための手段】

#### 【0008】

上記課題を解決するために成された本発明に係る3次元変位計測方法は、

- a) 計測物体に、異なるレーザ光源から出射される同一波長の3つの物体光を異なる方向から照射し、
- b) 各物体光から分岐される3つの参照光と計測物体からの反射光との干渉像を、各参照光の位相を互いに異なる速度で物体光に対して変化させつつ複数枚、2次元撮像素子で撮影し、
- c) フーリエ変換を用いて位相変化速度の異なる干渉成分を抽出することにより3つの物体光による干渉像を分離し、
- d) 各干渉像より、各物体光の照射方向に応じた方向の計測物体の変位分布を計測する

10

20

30

40

50

ことにより計測物体の3次元変位を計測するものである。

【0010】

この3次元変位計測方法を用いて計測物体の未知の3次元変位量の絶対値を計測するには、基準面に既知の3次元変位を与えつつ前記方法で該変位を計測しておき、その結果に基づいて計測物体の未知の3次元変位量を計測する。

【0011】

上記の3次元変位計測方法において、既知変位の計測を複数回行い、その平均を取ることにより未知変位の計測精度を高めることができる。

【0012】

計測精度を高めるには、2次元撮像素子の各画素における演算結果に基づいて平滑化処理を行うという方法をとることもできる。

10

【0013】

そして、計測物体の3次元ひずみは、2次元撮像素子の各画素毎に、該画素及び周辺画素の位置とそれら画素について前記方法により計測された変位とに基づき算出することができる。

【0014】

上記方法に対応する、本発明に係る3次元変位計測装置は、

- a) 計測物体に、異なるレーザ光源から出射される同一波長の3つの物体光を異なる方向から照射する物体光照射手段と、
  - b) 各物体光から分岐され、互いに異なる速度で物体光に対する位相が変化する3つの参照光を生成する参照光生成手段と、
  - c) 計測物体からの反射光と前記3つの参照光の干渉像を撮影する2次元撮像素子と、
  - d) 2次元撮像素子により複数枚撮影された干渉像に基づき、フーリエ変換を用いて位相変化速度の異なる干渉成分を抽出することにより3つの物体光による干渉像を分離する分離手段と、
  - e) 各干渉像より、各物体光の照射方向に応じた方向の計測物体の変位分布を計測する変位計測手段と
- を備える。

20

【0016】

更に、3次元変位ひずみ計測装置とするため、2次元撮像素子の各画素毎に、該画素及び周辺画素の位置とそれら画素について計測された変位とに基づきひずみを算出するひずみ算出手段を設けてもよい。

30

【0017】

なお、上記方法・装置では物体光・参照光を3つの異なる方向から照射するとしたが、本発明の原理より、これを2方向を含む複数の方向の場合に一般化することはもちろん可能である。

【発明の効果】

【0018】

本発明に係る3次元物体変位・ひずみ計測方法では、3つの異なる方向から物体に光を照射し、フーリエ変換位相シフト法を用いてそれら3つの光の位相解析を一挙に行うことにより、3方向からの光を同時に解析し、3次元の変位を一挙に計測することができる。すなわち、3光束の照射方向をシャッターにより切り替える必要がないため、特許文献2に記載の方法よりも短時間で計測を行うことができる。また、シャッター機構（照射光の切り替え機構）が不要であることから、装置を小型化することもできる。なお、解析に際しては、光源の座標など、実測し難いパラメータを使う必要がないため、計測精度が向上する。

40

【0019】

また、この方法に、基準面を用いて画素ごとに感度ベクトルを3方向の変位量に変換するキャリブレーションを行う手法を組み合わせることで、変位の実際の値（絶対値）を瞬時に得ることができる。さらに、この変位計測手法によって得られた変位分布からひずみ

50

分布を算出することもできる。

【0020】

本発明に係る3次元変位・ひずみ計測方法及び装置は、鋼構造物、コンクリート構造物、樹脂・セラミック構造物等の構造物の欠陥検査や、産業現場などにおいて、立体物の3次元変位やひずみの分布を高精度に計測することに用いることができる。また、マイクロマシンの材料試験や特性評価試験にも用いることができる。更に、非接触で物体の形状や変形、応力、歪み等の計測を全視野で行うことができるという特長より、情報通信、医療等の種々の分野にも利用することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0021】

以下、本発明の実施の形態を順を追って説明する。

(1) フーリエ変換位相シフト法を用いた多光束同時解析法の原理

フーリエ変換位相シフト法は位相解析に非常に有効な手法であり、従来の位相シフト法と異なり複数枚の画像から位相を解析することができる。3光束を用いた変位計測を例に挙げると、物体に照射する3光束には3つの波長が等しいレーザを用いる。波長を等しくする理由は、位相シフトデジタルホログラフィにおける再生範囲が波長に左右されるためである。

【0022】

物体に3つの異なる方向から物体光を照射し、物体で反射された物体光と3つの参照光の3種類の干渉縞を同時にCCDで撮影する。ここで、3つの参照光の位相シフト量を変化させて干渉像を撮影する。例えば、図1(a)に示すように、所定時間内に7枚の干渉像を撮影するものとし、その間の各参照光の位相シフト量をそれぞれ2、4、6とする。図1(b)の左側に示すように、位相シフト量が2のものは周波数成分が1の部分抽出し、その実部と虚部の逆正接を求めることで位相を求めることができる。全画素に対して同様の計算を行うことで位相分布を求めることができる。位相シフト量が4、6のものも同様に、図1(b)の中央及び右側に示すように、周波数成分が2、3の部分抽出して計算することで位相分布を求めることができる。このように、3つの干渉縞を同時に撮影しても、位相シフト量と抽出する周波数成分を変えることで、図1(c)に示すように、位相シフト量が2、4、6のものがそれぞれ周波数成分1、2、3の部分に現れるため、それぞれの成分を抽出することで3光束の解析を同時に行うことができる。

【0023】

(2) 感度ベクトルを用いた3次元変位計測原理

計測物体にある角度から光を照射したときの光源と物体と観測面の位置関係を図2に示す。物体上の或る点Pに入射角 $\theta$ で光を照射したとき、観測場所によって物体からの反射光の強度に違いが生じる。点Pからの反射光の方向毎の強度を表す感度ベクトル $e$ は、物体の変位ベクトル $d$ とその変位によって生じるCCDカメラへの入射光の位相変化 $\Delta\phi$ を用いると、式(1)のように表すことができる。

【数1】

$$\Delta\phi = e \cdot d \quad (1)$$

1方向からの入射光に対して、変位ベクトルと感度ベクトルともにx、y、z方向に成分を持っているため、式(1)のベクトル演算を成分式で表すと、

【数2】

$$\Delta\phi = \begin{bmatrix} e_x & e_y & e_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = e_x d_x + e_y d_y + e_z d_z \quad (2)$$

となる。3方向から光を照射すると、それぞれの入射光に対する感度ベクトル成分のパラメータが増える。このことから、式(2)は式(3)のように表すことができる。

10

20

30

40

50

【数3】

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \\ e_{3x} & e_{3y} & e_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、添え字の1、2、3は3つの入射光を意味する。式(3)から

【数4】

$$S = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \\ e_{3x} & e_{3y} & e_{3z} \end{bmatrix} \quad (4) \quad 10$$

とおき、Sの逆行列 $S^{-1}$ を求めてそれを位相差ベクトル  $\begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{bmatrix}$  にかけることで変位ベクトル $d$ を求めることができる。

【数5】

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} f_{1x} & f_{2x} & f_{3x} \\ f_{1y} & f_{2y} & f_{3y} \\ f_{1z} & f_{2z} & f_{3z} \end{bmatrix} \quad (5) \quad 20$$

【数6】

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = S^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

上式から、3つの入射光を用いることで、それぞれの入射光に応じた感度ベクトル方向の変位成分を表す位相差を得ることができ、上式を用いることによりx、y、z方向の変位成分をそれぞれ求めることができる。

30

【0024】

(3) 基準面を用いたキャリブレーション手法の原理

上記方法によりx、y、z方向の変位成分を求めることができるが、これらは未だ具体的な数値(絶対値)として求めることはできない。絶対値を求めるためには、上記方法を実際に変位する物体に適用し、その変位量と位相差との関係を求めておいて、校正を行わなければならない。

【0025】

そこで、基準面を用いた校正手法の手順について述べる。校正に用いる基準面は3軸PZTステージに取り付けることでそれぞれx、y、z方向に動かすことができる。

40

校正に用いる光学系の一例を図3に示す。この光学系では、上記の通り、3つの物体光と、3つの参照光を生成し、参照光に互いに異なる位相シフトを設けて干渉像を撮影する。

【0026】

まず、次の手順により、位相 - 変位変換テーブルを作成する。

1) 図4に示すように、光源1から基準面に光を照射し、基準面をx方向に  $x_1$  だけ移動させ、その移動によって生じる位相差分布  $\phi_{1x}$  を求める。

2)  $x_1$  と  $\phi_{1x}$  から、光源1の感度ベクトル $e$ のx方向の成分 $e_{1x}$ を求める。

3) 同様にy方向、z方向に  $y_1$ 、 $z_1$  だけ移動させ、その移動によって生じる位相差分

50

布  $e_{1y}$ 、 $e_{1z}$  を求め、光源1の感度ベクトル  $e$  の  $y$  方向成分、 $z$  方向成分  $e_{1y}$ 、 $e_{1z}$  をそれぞれ求める。

4) 光源2と光源3から照射する光に対しても、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向にそれぞれ  $x_2$ 、 $y_2$ 、 $z_2$ 、 $x_3$ 、 $y_3$ 、 $z_3$  移動させ、その移動によって生じる位相差分布  $f_{2x}$ 、 $f_{2y}$ 、 $f_{2z}$ 、 $f_{3x}$ 、 $f_{3y}$ 、 $f_{3z}$  をそれぞれ求める。

5) 2)と同様に、光源2、3の感度ベクトル  $e$  の  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向成分  $e_{2x}$ 、 $e_{2y}$ 、 $e_{2z}$ 、 $e_{3x}$ 、 $e_{3y}$ 、 $e_{3z}$  をそれぞれ求める。

6) 1)～5)を複数回繰り返し、結果を平均することで、感度ベクトル成分の信頼度を高める。なお、精度よりも時間が優先される場合は、この行程を省略することも可能である。

7) 得られた感度ベクトル成分  $e_{1x}$ 、 $e_{1y}$ 、 $e_{1z}$ 、 $e_{2x}$ 、 $e_{2y}$ 、 $e_{2z}$ 、 $e_{3x}$ 、 $e_{3y}$ 、 $e_{3z}$  より式(4)の行列  $S$  を作成し、その逆行列  $S^{-1}$  を演算して各成分  $f_{1x}$ 、 $f_{1y}$ 、 $f_{1z}$ 、 $f_{2x}$ 、 $f_{2y}$ 、 $f_{2z}$ 、 $f_{3x}$ 、 $f_{3y}$ 、 $f_{3z}$  の値を求める。

【0027】

以上の行程を各画素について行うことで、各画素毎に逆行列  $S^{-1}$  を得ることができる。さらに、逆行列  $S^{-1}$  の各成分のノイズを除去するために、 $f_{1x}$ 、 $f_{1y}$ 、 $f_{1z}$ 、 $f_{2x}$ 、 $f_{2y}$ 、 $f_{2z}$ 、 $f_{3x}$ 、 $f_{3y}$ 、 $f_{3z}$  の値を必要に応じて平滑化する。位相 - 変位変換テーブルは、各画素ごとに  $f_{1x}$ 、 $f_{1y}$ 、 $f_{1z}$ 、 $f_{2x}$ 、 $f_{2y}$ 、 $f_{2z}$ 、 $f_{3x}$ 、 $f_{3y}$ 、 $f_{3z}$  の値を持つテーブルである。

【0028】

次に、位相 - 変位変換テーブルを用いて計測対象物の変位分布計測を次の手順で行う。

8) 校正実験の基準面の位置に計測物体を置き、各光源から照射する光で基準となる画像(変位前)と物体に力が加わった画像(変位後)を順に撮影する。

9) 計測物体の変形によって生じた位相差分布  $f_{1x}$ 、 $f_{1y}$ 、 $f_{1z}$  と、校正実験で求めた位相 - 変位変換テーブルの各成分より、計測物体の  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向の変位ベクトル成分を求めることができる。

【0029】

(4) 変位分布を用いたひずみ分布算出原理

次に、変位分布からひずみ分布を算出する方法を示す。

1) 縦の画素  $i$  と横の画素  $j$  と  $x$  方向の変位  $d_x$  による図5のような3次元座標を考える。この3次元座標において、検出する画素とその画素を中心とする周囲の画素について平面近似を行う。この平面は、式(7)のようにパラメータ  $a_x$ 、 $b_x$ 、 $c_x$  を用いて表すことができる。

【数7】

$$d_x = a_x i + b_x j + c_x \quad (7)$$

この式について最小2乗法を行うことで  $a_x$ 、 $b_x$ 、 $c_x$  を求める。 $i$  方向、 $j$  方向の傾きはそれぞれ、式(8)、(9)のようになる。

【数8】

$$\frac{\partial d_x}{\partial i} = a_x \quad (8)$$

【数9】

$$\frac{\partial d_x}{\partial j} = b_x \quad (9)$$

【0030】

2)  $d_x$  と同様に、 $y$  方向の変位  $d_y$  についても図5のような3次元座標を考え、 $i$  方向、 $j$  方向の傾きを検出する。近似した平面、 $i$  方向、 $j$  方向の傾きはそれぞれ、式(10)、(11)、(12)のようになる。

10

20

30

40

【数 1 0】

$$d_y = a_y i + b_y j + c_y \quad (10)$$

【数 1 1】

$$\frac{\partial d_y}{\partial i} = a_y \quad (11)$$

【数 1 2】

$$\frac{\partial d_y}{\partial j} = b_y \quad (12)$$

10

【0 0 3 1】

3) 再生面におけるi方向、j方向の1画素の幅  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ はそれぞれ、

【数 1 3】

$$\Delta x = \frac{\lambda R}{w \Delta X} \quad (13)$$

【数 1 4】

$$\Delta y = \frac{\lambda R}{h \Delta Y} \quad (14)$$

20

となる。ここで、 $\lambda$ は光源の波長、 $R$ は物体とCCDカメラとの光学的距離(再生距離)、 $w$ はカメラのi方向の画素数、 $h$ はカメラのj方向の画素数、 $\Delta X$ はカメラの1画素のi方向のサイズ、 $\Delta Y$ はカメラの1画素のj方向のサイズである。ここからx方向の垂直ひずみは、

【数 1 5】

$$\varepsilon_x = \frac{\partial d_x}{\Delta x} = a_x \frac{w \Delta X}{\lambda R} \quad (15)$$

30

となる。同様にy方向の垂直ひずみは、

【数 1 6】

$$\varepsilon_y = \frac{\partial d_y}{\Delta y} = b_y \frac{h \Delta Y}{\lambda R} \quad (16)$$

となる。またせん断ひずみ  $\gamma_{xy}$ は、

【数 1 7】

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial d_y}{\Delta x} + \frac{\partial d_x}{\Delta y} = \frac{a_y w \Delta X}{\lambda R} + \frac{b_x h \Delta Y}{\lambda R} \quad (17)$$

40

となる。

【0 0 3 2】

(5) 感度ベクトルを用いたひずみ計測原理

式(5)、(6)より、 $x$ 、 $y$ 方向の変位は、

【数 1 8】

$$d_x = f_{1x} \Delta \phi_1 + f_{2x} \Delta \phi_2 + f_{3x} \Delta \phi_3 \quad (18)$$



【数 1 9】

$$d_y = f_{1y}\Delta\phi_1 + f_{2y}\Delta\phi_2 + f_{3y}\Delta\phi_3 \quad (19)$$

となる。式(18)、(19)を偏微分すると引張ひずみ  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、せん断ひずみ  $\gamma_{xy}$ は、

【数 2 0】

$$\varepsilon_x = \frac{\partial d_x}{\partial x} = f_{1x} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial x} + f_{2x} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial x} + f_{3x} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial x} \quad (20)$$

【数 2 1】

$$\varepsilon_y = \frac{\partial d_y}{\partial y} = f_{1y} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial y} + f_{2y} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial y} + f_{3y} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial y} \quad (21)$$

【数 2 2】

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} = \frac{\partial d_x}{\partial y} + \frac{\partial d_y}{\partial x} = & f_{1x} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial y} + f_{2x} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial y} + f_{3x} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial y} \\ & + f_{1y} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial x} + f_{2y} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial x} + f_{3y} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial x} \quad (22) \end{aligned}$$

となる。ここで、 $f_{1x}$ 、 $f_{2x}$ 、 $f_{3x}$ 、 $f_{1y}$ 、 $f_{2y}$ 、 $f_{3y}$ は  $f_{1x}$  ~  $f_{3y}$ に(4)のひずみ算出原理を適用して求めた傾き分布を表している。

【0 0 3 3】

しかし、位相差分布はラッピングされた分布(すなわち、位相差が  $-\pi$  から  $+\pi$  の間になるように  $2n\pi$  ( $n$ は整数)を加算された位相差の分布)であるため、位相の切れ目の部分では位相接続を行わないと傾き分布を検出することはできない。そこで、基準となる位相を決め、図 6 (a)のようにその画素を基準とし平滑化差分に用いる画素の位相差  $\Delta\phi_0$  を  $\Delta\phi_0$  移動し、図 6 (b)のようにラッピングすることで(すなわち、位相差が  $-\pi$  から  $+\pi$  の間になるように  $2n\pi$  ( $n$ は整数)を加算することで)傾きの検出を可能にする。

式(20)~(22)を用いることで、変位分布を算出するのに必要な位相接続などの処理を必要とせず、位相差分布から直接ひずみ分布を検出することができる。

【実施例】

【0 0 3 4】

本発明の作用(作動)を実施例により具体的に説明する。

(1) 3次元変位計測装置

レーザ3台を光源とし、それぞれを物体光と参照光に分ける。物体光は球面波とし物体に3方向から光を照射する。参照光は平行光とし位相シフト装置を通してカメラで撮影する。解析手順の概要を図 7 に示す。

【0 0 3 5】

(2) 3光束同時解析実験

(i) 図 3 に示す光学系を用いて3つの物体光と参照光を同時にカメラで記録する。計測物体には回転ステージに取り付けた平板を用いた。回転前の状態を変位前として、物体光と参照光の干渉縞を記録する。次に回転ステージによって変位を与え、変位後の状態を記録する。

【0 0 3 6】

(ii) フーリエ変換位相シフト法によって各光束を分離解析する。得られた3種の周波数成分のそれぞれの再生像および変位量を表す位相分布を図 8 に示す。図 8 の位相分布には、位相の切れ目である不連続線が表れている。全体の位相分布を求めるには位相が連続でなければならないので、前記方法により位相接続をおこなう。位相接続によって得られた位相分布を図 9 に示す。この位相差分布では、位相差平均化手法を用いた16分割処理によ

10

20

30

40

50

ってスペックルノイズの影響を軽減している（特許文献1）。

【0037】

(3) 基準面を用いた校正実験

(i) 図3に示す光学系を用いて、3つの物体光と参照光を同時にカメラで記録する。計測物体には基準面を取り付けた3軸PZTステージを用いた。まず、変位前の計測物体における物体光と参照光の干渉縞を記録する。次に、3軸PZTステージによって各方向に100 nmずつ変位を与え、変位後の状態を記録する。

【0038】

(ii) フーリエ変換位相シフト法によって各光束を分離解析し、得られた位相差分布と3軸PZTステージの変位量から感度ベクトル成分を求める。そして、各感度ベクトル成分から位相 - 変位変換テーブルを作成する。位相差分布には位相差平均化手法を用いた16分割処理によってスペックルノイズの影響を軽減した。

10

【0039】

(4) 3次元変位計測実験

(i) (2)で求めた位相接続後の位相分布と(3)で求めた位相 - 変位変換テーブルからx、y、z方向の相対変位分布を求める。各方向の相対変位分布を図10に示す。

【0040】

(5) ひずみ分布検出

(i) 面内変位計測光学系から得た位相差分布を図11に示す。これは片持ち梁に変形を加えたときのx方向(図の横方向)の位相差分布である。本分布からx方向のひずみ分布を算出したものを図12に示す。

20

【図面の簡単な説明】

【0041】

【図1】 フーリエ変換を用いて干渉像を分離する方法を説明するための図

【図2】 光源と、変位する計測物体と、観測装置の位置関係を示す図

【図3】 参照光位相シフトによる干渉像撮影光学系の光路図

【図4】 基準面を用いた校正の方法を示す位置関係図

【図5】 ひずみ計測の原理を説明するための画素平面 + 変位の3次元座標図

【図6】 位相の切れ目における接続処理を説明するための図

【図7】 3次元変位計測の解析手順を説明するための図

30

【図8】 各周波数成分の再生像と位相分布の図

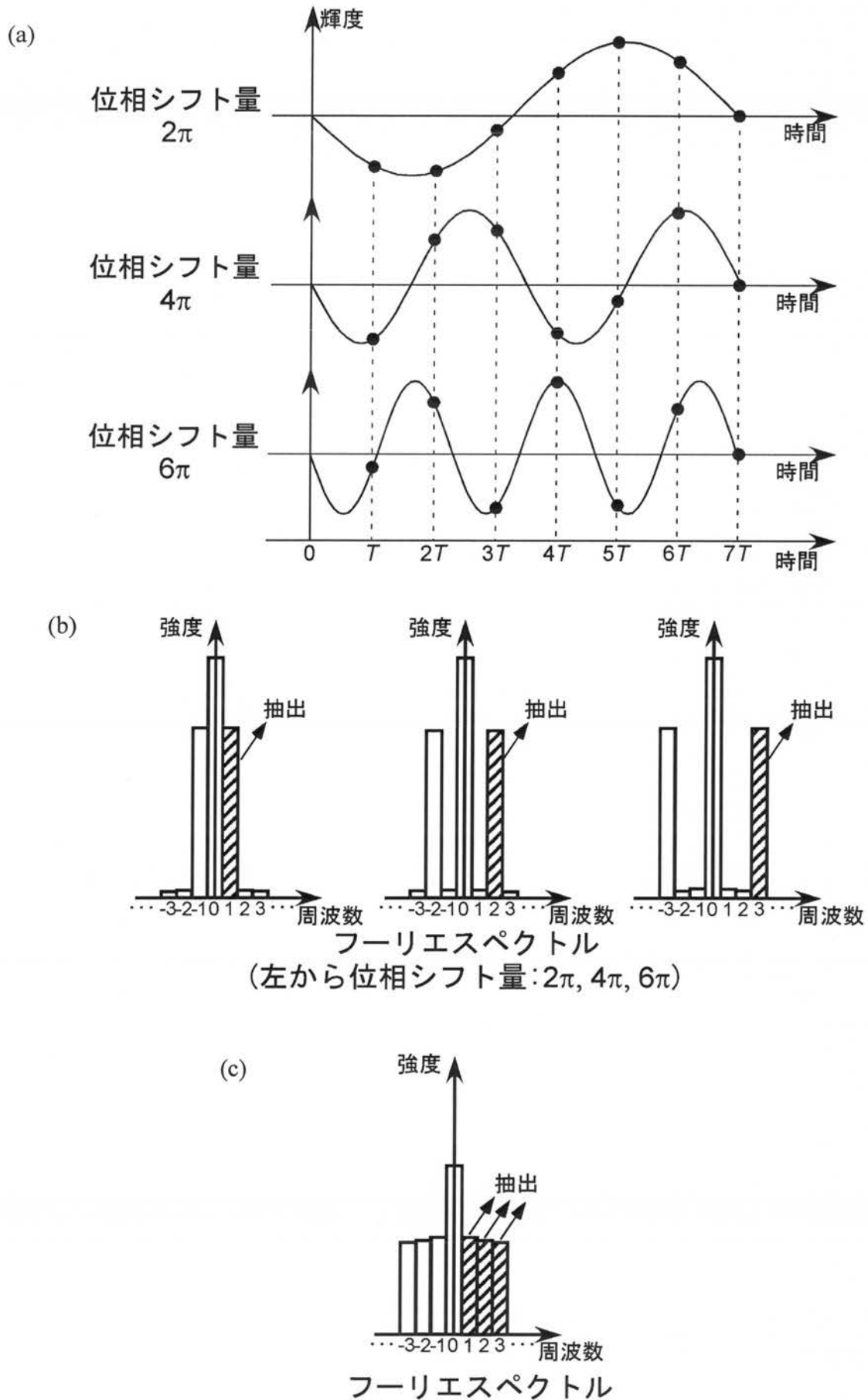
【図9】 各周波数成分の位相接続後の位相分布図

【図10】 xyz各方向の相対変位分布図

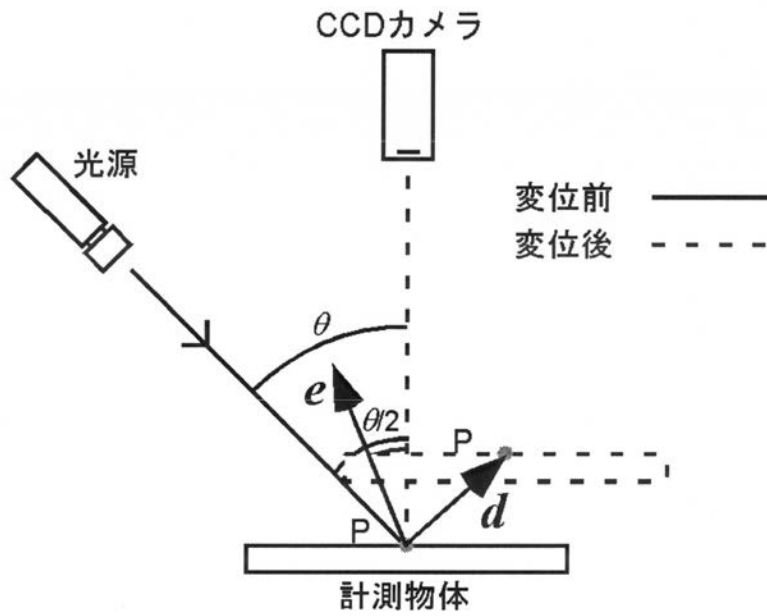
【図11】 計測された位相差分布図の一例

【図12】 計測されたひずみ分布図の一例

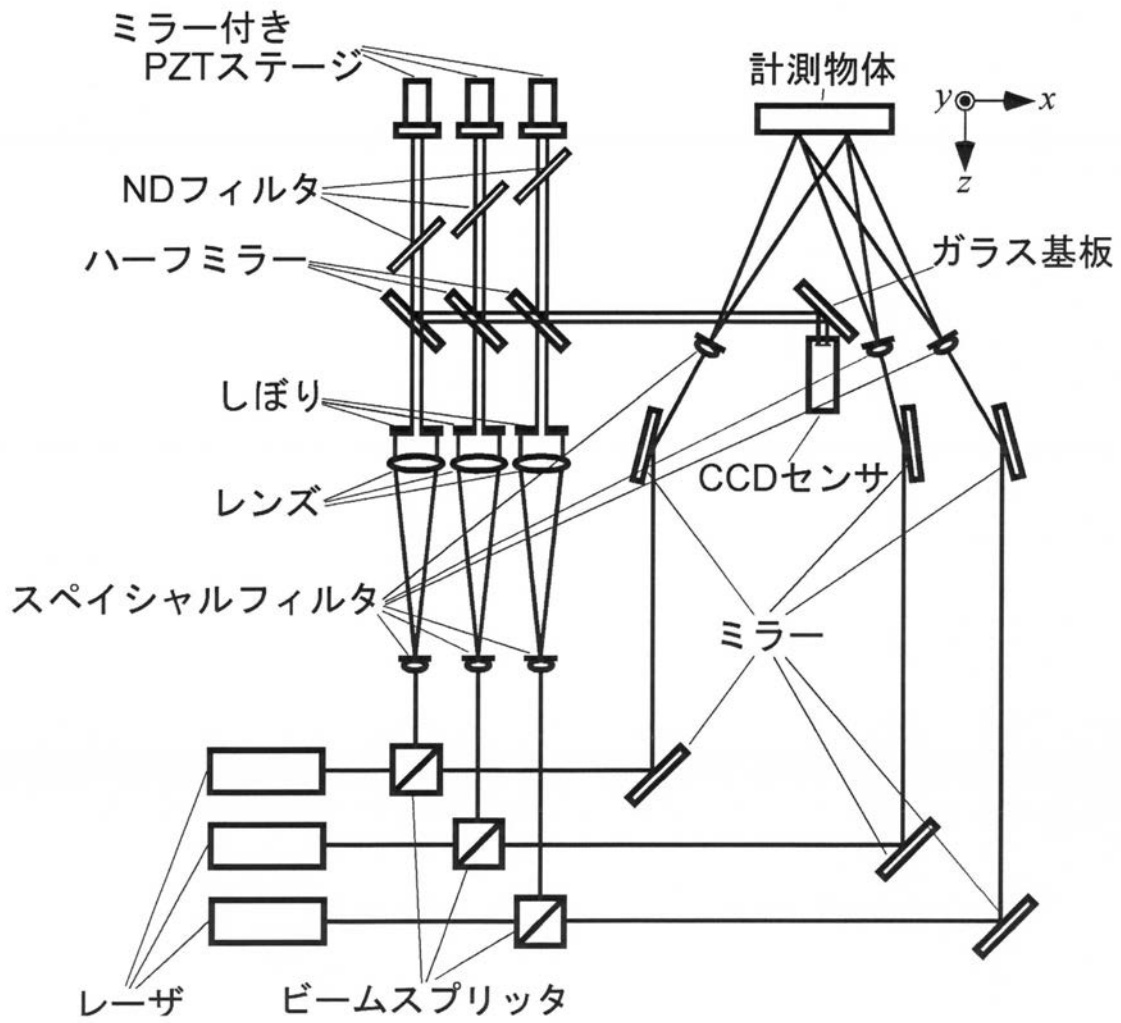
【図1】



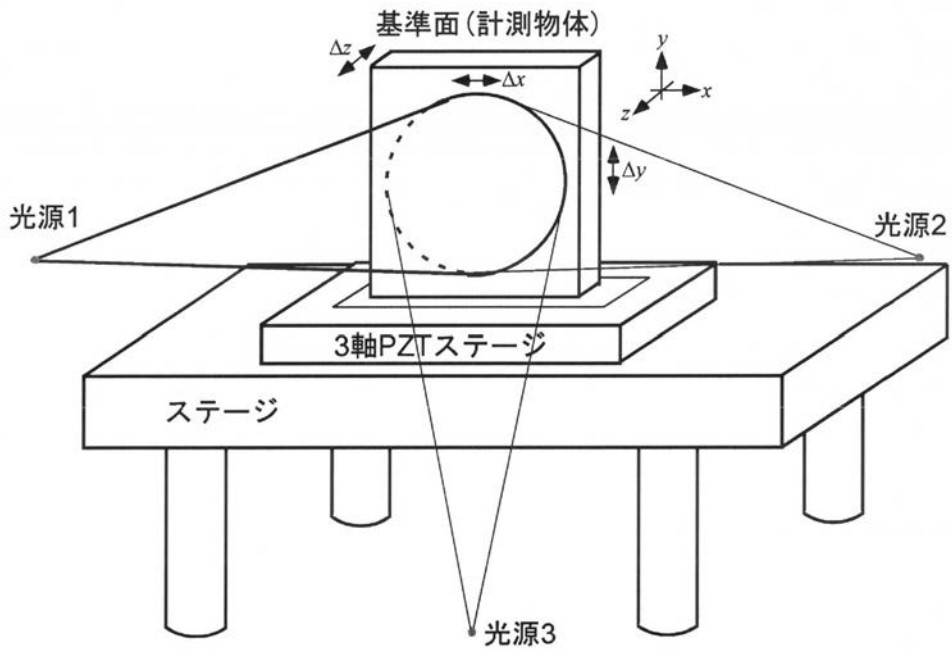
【図2】



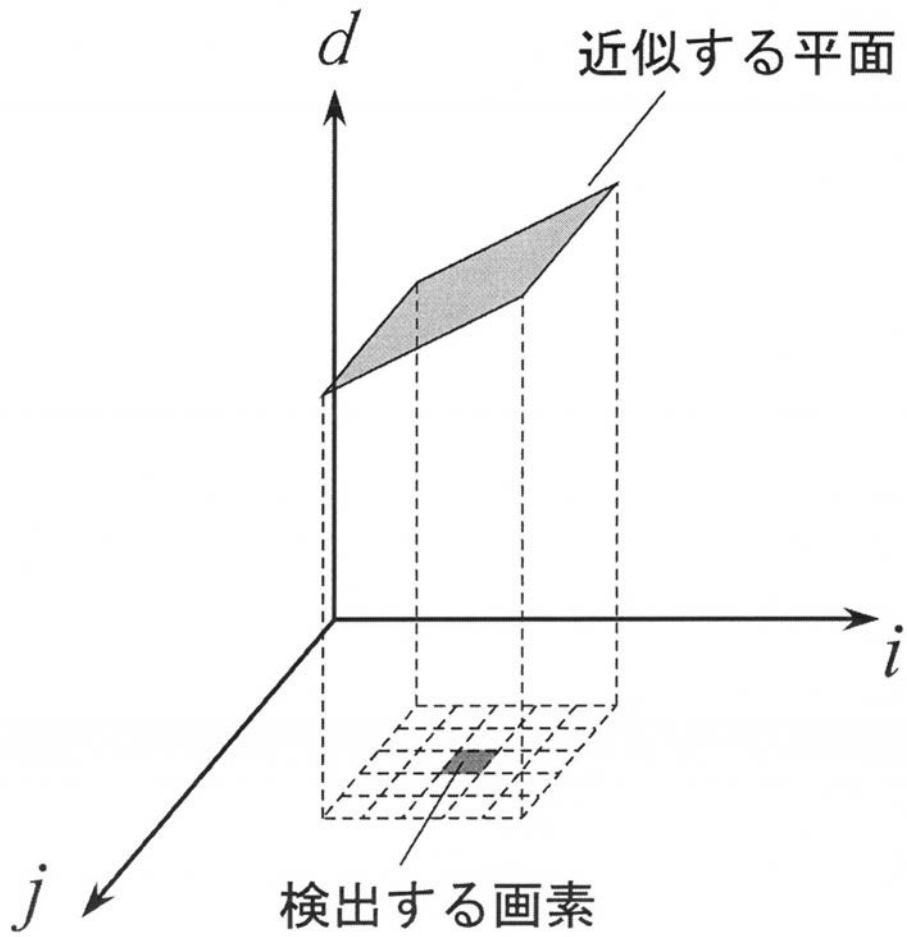
【図3】



【図4】

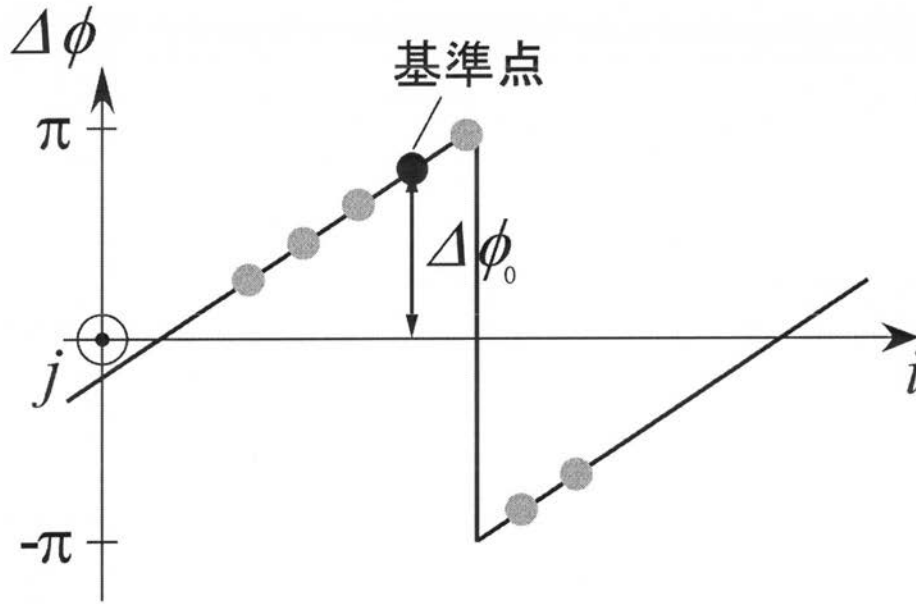


【図5】

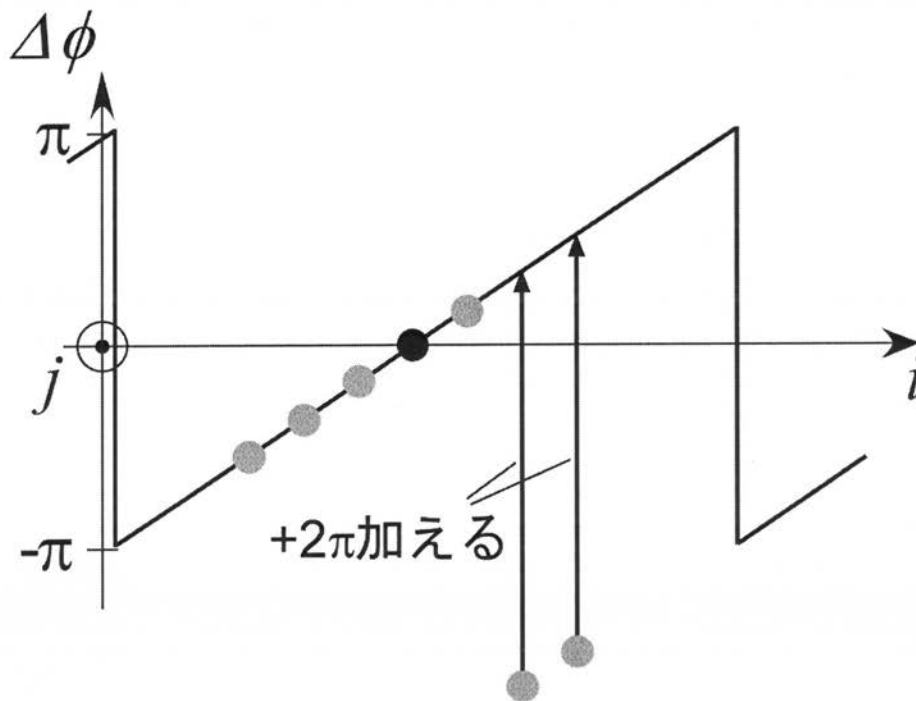


【図6】

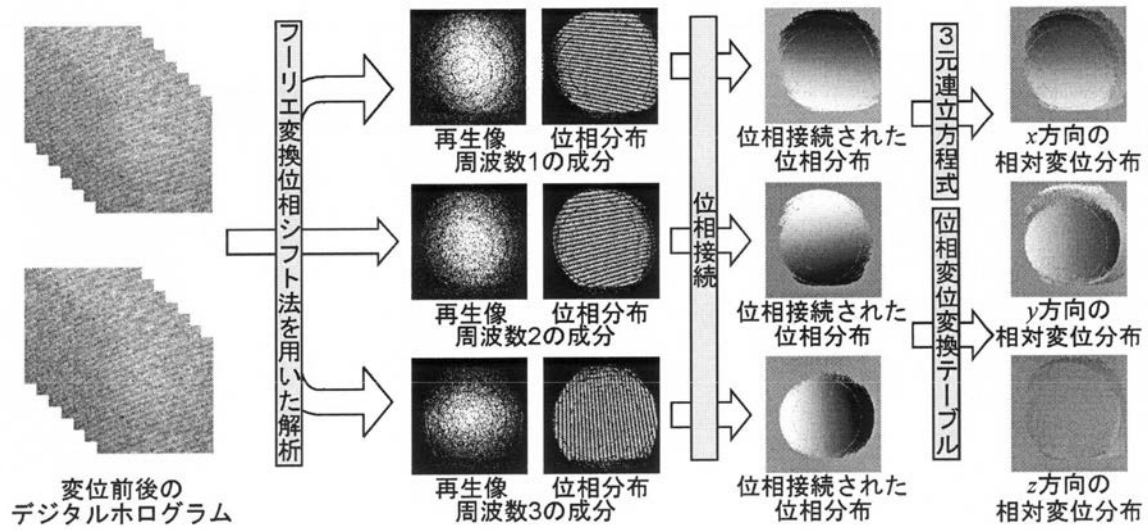
(a)



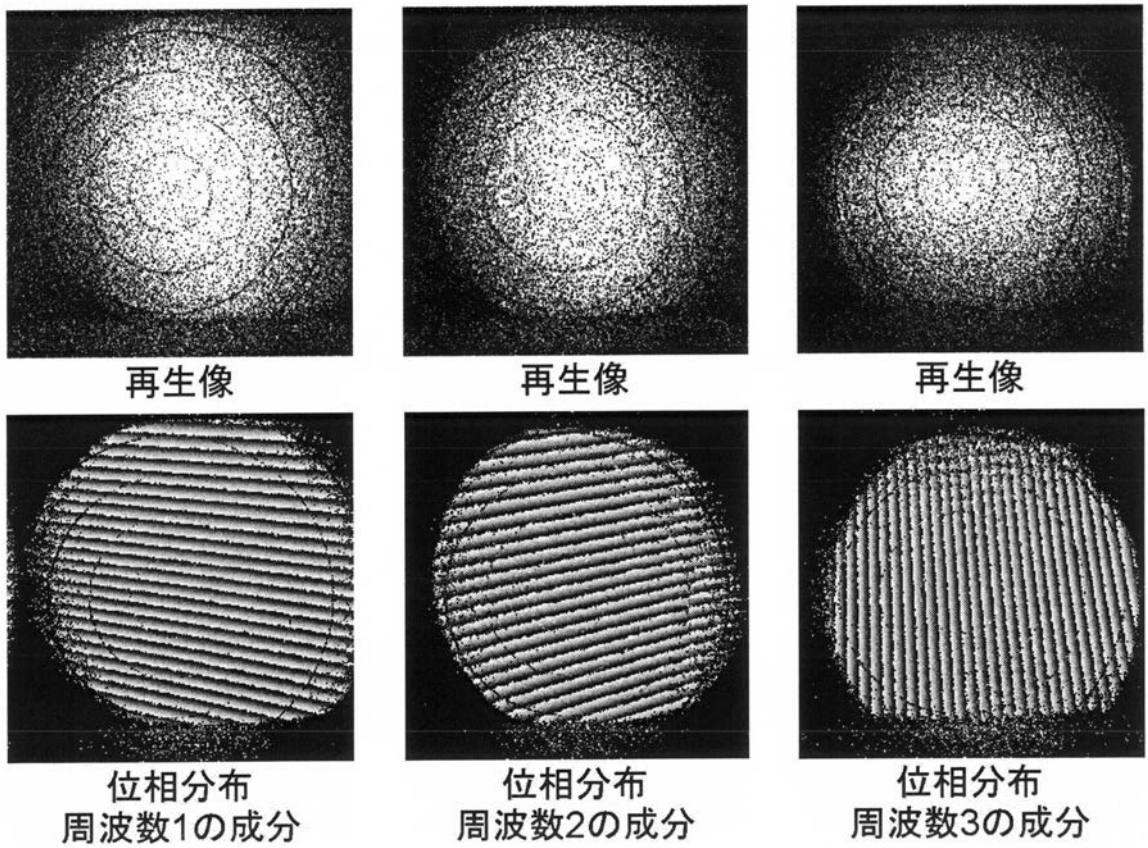
(b)



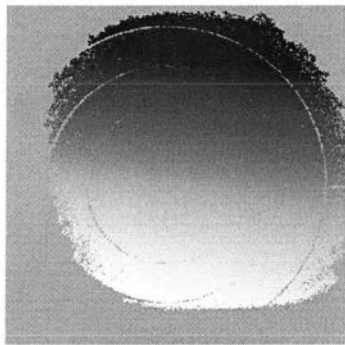
【図7】



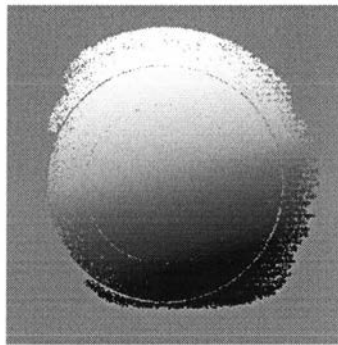
【図8】



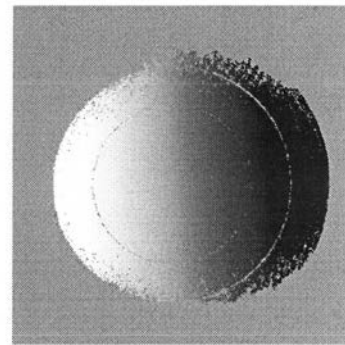
【図9】



周波数1の成分

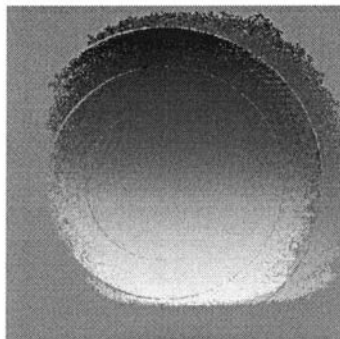


周波数2の成分

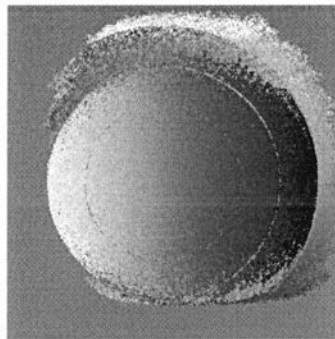


周波数3の成分

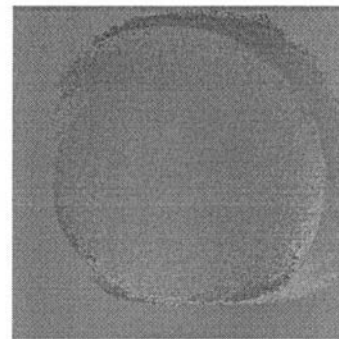
【図10】



x方向

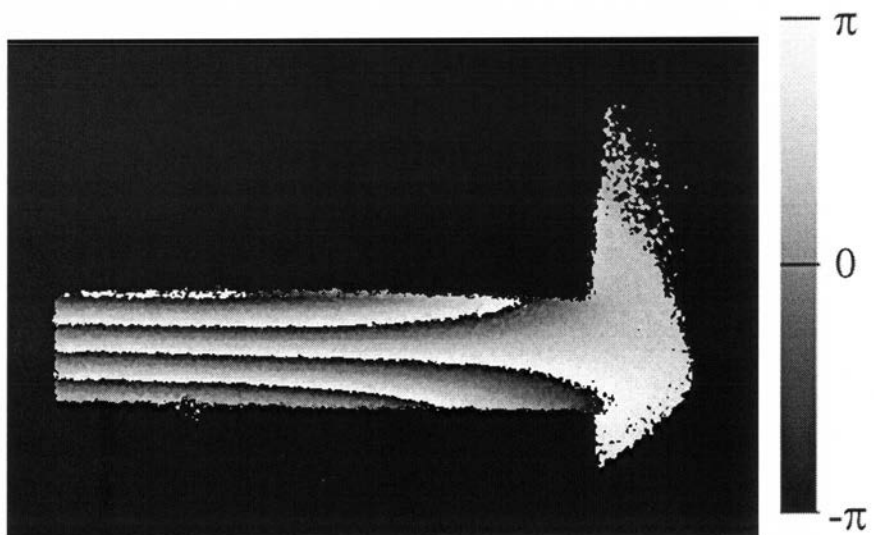


y方向



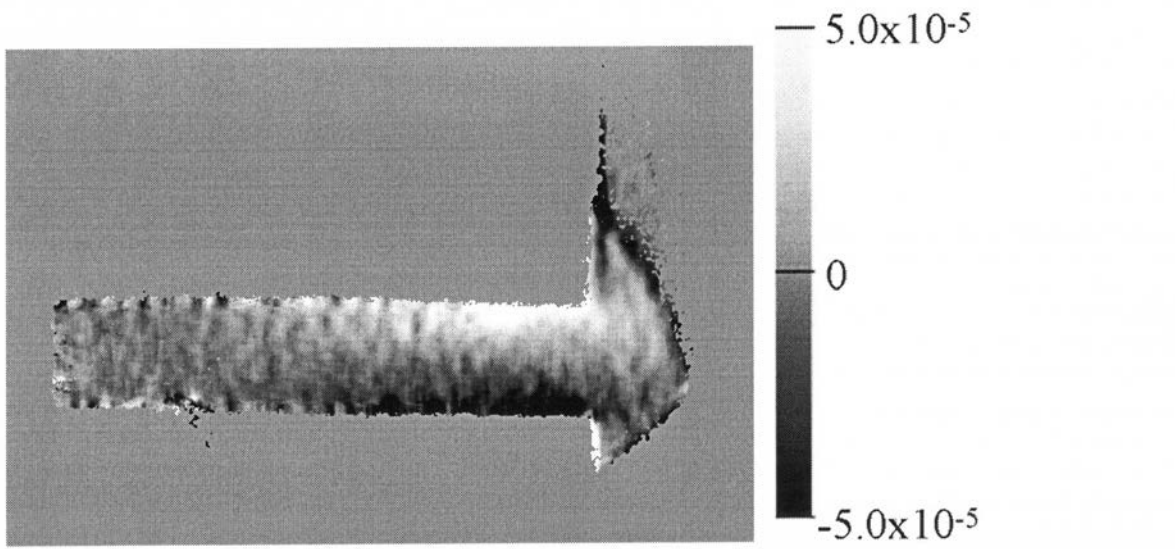
z方向

【図11】





【図 12】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 松井 徹  
和歌山市栄谷930番地 和歌山大学システム工学部内
- (72)発明者 岡澤 俊介  
和歌山市栄谷930番地 和歌山大学大学院システム工学研究科内
- (72)発明者 喜多 俊行  
和歌山市栄谷930番地 和歌山大学大学院システム工学研究科内

審査官 櫻井 仁

- (56)参考文献 特開昭60-227102(JP,A)  
特表2005-534923(JP,A)  
特開平06-300522(JP,A)  
特開2005-265441(JP,A)  
特開昭58-223002(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B 11/00~11/30  
G01B 9/021~9/029