

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5825622号
(P5825622)

(45) 発行日 平成27年12月2日(2015.12.2)

(24) 登録日 平成27年10月23日(2015.10.23)

(51) Int.Cl. F I
G O 1 B 11/16 (2006.01) G O 1 B 11/16 G

請求項の数 10 (全 14 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2011-86797 (P2011-86797) (22) 出願日 平成23年4月8日(2011.4.8) (65) 公開番号 特開2012-220349 (P2012-220349A) (43) 公開日 平成24年11月12日(2012.11.12) 審査請求日 平成26年3月26日(2014.3.26)</p> <p>特許法第30条第1項適用 平成22年10月9~11日 日本機械学会M&M2010材料力学カンファレンスで発表, 平成23年2月16日 国立大学法人和歌山大学大学院の平成22年度知的計測クラス修士論文発表会で発表</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 (72) 発明者 藤垣 元治 和歌山県和歌山市栄谷930 (72) 発明者 西谷 陸 和歌山県和歌山市栄谷263-12 リカ ハウス2-1 (72) 発明者 森本 吉春 大阪府泉佐野市羽倉崎2-1-4-804</p> <p>審査官 岸 智史</p>
--	---

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 変位・ひずみ分布計測光学系と計測手法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

1台または複数の撮像素子を用いて複数の方向からホログラムを撮影するデジタルホログラフィに用いる光学系であって、

1つのレーザー光源から照射された光を、物体に照射する物体光と、前記撮像素子へ照射する参照光に分離するための手段と、

計測対象物を置く場所に、計測対象物の代わりに設置された、特定のパターンを持つ基準面、

とを備える変位・ひずみ分布計測光学系。

【請求項2】

鏡面に計測対象物が写り込むように、計測対象物の近傍に1枚または複数枚の鏡を設置することを特徴とする、請求項1に記載の変位・ひずみ分布計測光学系。

【請求項3】

前記基準面は、複数方向にそれぞれ微小移動できるステージに取り付けられていることを特徴とする、請求項1に記載の変位・ひずみ分布計測光学系。

【請求項4】

前記基準面の格子パターンが格子模様であることを特徴とする、請求項1、2または3に記載の変位・ひずみ分布計測光学系。

【請求項5】

前記基準面の格子パターンが、2次元であることを特徴とする、請求項1、2または3

に記載の変位・ひずみ分布計測光学系。

【請求項 6】

前記基準面は、ステージに取り付けられており、移動することができることを特徴とする、請求項 1 乃至 5 に記載の変位・ひずみ分布計測光学系。

【請求項 7】

請求項 1 または 2 に記載の変位・ひずみ分布計測光学系を用いた変位・ひずみ分布計測手法であって、撮像素子で得られたホログラムから、基準面上の同一の部分が再生された点を各再生像において検出することで、各再生像における画素毎の対応付けを行う変位・ひずみ分布計測手法。

【請求項 8】

対応付けを行う際に、基準面の格子パターンの位相を用いることを特徴とする、請求項 7 に記載の変位・ひずみ分布計測手法

【請求項 9】

対応付けを行う際に、基準面のランダムなパターンによる対応点の検出手法を用いることを特徴とする、請求項 7 に記載の変位・ひずみ分布計測手法。

【請求項 10】

基準面をステージによって複数の位置に移動させ、移動させた各位置で撮影されたホログラムから得られた複数の再生像を用いて、位相シフト法によって算出された位相分布を用いることで、基準面上の同一の部分が再生された点を検出することを特徴とする、請求項 7 に記載の変位・ひずみ分布計測手法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、物体の変位分布やひずみ分布計測で使用する光学系とその計測手法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

現在、構造物の変位やひずみ分布計測をすることは、多くの産業分野における重要な課題である、特に橋梁などインフラ構造物の欠陥検査を効率よく行うことは重要であり、高速で効率のよい変位・ひずみ分布計測が必要とされている。

【0003】

特許文献 1 には、複数台の撮像素子を備えて物体光を 1 つにし、物体光と参照光を平行に入射しない構成で、位相シフト回数の低減やシャッター切り替え工程の省略で計測を高速に行うことが記載されている。

【0004】

また、特許文献 2 には、(a) 3 つの異方向から計測物体に物体光を照射し、(b) 物体光と同一波長の 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で 3 つの物体光による干渉縞を分離し、(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で物体の 3 次元変位を計測することが記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献 1】特開 2011-059017 号公報

【特許文献 2】特開 2007-240465 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら特許文献 1 では、カメラの配置が互いに平行でなくてはならず、配置に制

10

20

30

40

50

約があることと、得られる干渉縞の強度が低いため、計測精度が落ちるという2点の問題がある。

【0007】

さらに特許文献2では、物体光を3方向から入射する必要があり、それぞれの物体光ごとに位相シフト機構を取り付ける必要があるため、高価になるという問題もあった。

【0008】

本発明は、上記問題点を解決するために、安価で小型の変位・ひずみ分布計測光学系と計測手法を提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0009】

発明者らは、上記問題を解決するために、鋭意検討した。その結果、複数の撮像素子を使用することで三次元の変位・ひずみ分布計測ができることを見出した。さらに、鏡を用いることで、通常では計測できない計測対象物の裏側まで計測ができ、1台の撮像素子で2台分の計測ができることを見出した。

【0010】

即ち、本発明の変位・ひずみ分布計測光学系は、1台または複数の撮像素子を用いて複数の方向からホログラムを撮影するデジタルホログラフィに用いる光学系であって、1つのレーザー光源から照射された光を、物体に照射する物体光と、前記撮像素子へ照射する参照光に分離するための手段と、計測対象物を置く場所に、計測対象物の代わりに設置された、特定のパターンを持つ基準面、とを備えることを特徴とするものである。

【0011】

また、本発明における変位・ひずみ分布計測光学系は、鏡面に計測対象物が写り込むように、計測対象物の近傍に1枚または複数枚の鏡を設置することを特徴とするものである。

【0012】

また、本発明における変位・ひずみ分布計測光学系は、前記基準面は、複数方向にそれぞれ微小移動できるステージに取り付けられていることを特徴とするものである。

【0013】

また、本発明における変位・ひずみ分布計測光学系は、前記基準面の格子パターンが格子模様であることを特徴とするものである。

【0014】

また、本発明における変位・ひずみ分布計測光学系は、前記基準面の格子パターンが、2次元であることを特徴とするものである。

【0015】

また、本発明における変位・ひずみ分布計測光学系は、前記基準面は、ステージに取り付けられており、移動することができることを特徴とするものである。

【0016】

また、本発明における変位・ひずみ分布計測光学系を用いた変位・ひずみ分布計測手法は、前記撮像素子で得られたホログラムから、基準面上の同一の部分が再生された点を各再生像において検出することで、各再生像における画素毎の対応付けを行うことを特徴とするものである。

【0017】

また、本発明における変位・ひずみ分布計測手法は、対応付けを行う際に、基準面の格子パターンの位相を用いることを特徴とするものである。

【0018】

また、本発明における変位・ひずみ分布計測手法は、対応付けを行う際に、基準面のランダムなパターンによる対応点の検出手法を用いることを特徴とするものである。

【0019】

また、本発明における変位・ひずみ分布計測手法は、基準面をステージによって複数の位置に移動させ、移動させた各位置で撮影されたホログラムから得られた複数の再生像を

10

20

30

40

50

用いて、位相シフト法によって算出された位相分布を用いることで、基準面上の同一の部分が再生された点を検出することを特徴とするものである。

【発明の効果】

【0020】

本発明によれば、複数の撮像素子を使用することで、光学素子の数を減らし、2次元の変位・ひずみ分布計測を行うことができる装置を小型にすることができる。さらに、計測対象物の近傍に鏡を設置することにより、撮像素子の数を減らし、さらに小型の装置とすることができる。

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】本発明の一実施例を示す変位・ひずみ分布計測光学系の平面図であり、光学系内を通る参照光と物体光の光路を表す。

【図2】本発明における基準面計測時の撮像素子と物体光の光路を表す。

【図3】撮像素子で撮影した2次元格子のホログラム再生像を表す。

【図4】2次元格子を表示した状態の基準面の拡大図を表す。

【図5】本発明における物体計測時の撮像素子と物体光の光路を表す。

【図6】本発明の実施例を表す平面図であり、参照光と物体光の光路を表す。

【図7】格子プレートを表す。

【図8】本発明の実施例を示す鏡を用いた場合の平面図であり、参照光と物体光の光路を表す。

【図9】実像と鏡像の基準面撮影時の位相分布を表す。

【図10】基準面撮影時の位相解析した時の位相分布を表す。

【図11】位相解析された位相分布を位相接続した画像を表し、点Aと点Bは同一点である。

【図12】計測に用いた試料を表す。

【図13】計測された画像の実像と鏡像を表し、点Aと点Bは同一点である。

【図14】計測された実像と鏡像の変位分布を表し、点Aと点Bは同一点である。

【図15】計測試料の変位分布を表す。

【発明を実施するための形態】

【0022】

以下、本発明について図面を用いて説明する。

【0023】

図1は、本発明の変位・ひずみ分布計測光学系の一実施例を表す平面図である。変位・ひずみ分布計測光学系1は、計測用レーザー光源2と、スペイシャルフィルタ3と、レンズ4a・4bと、ビームスプリッタ5a～5cと、光学素子6a～6gと、撮像素子7a～7cと、NDフィルタ8a～8cと、鏡9と、PZTステージ10と、を備えている。

【0024】

計測用レーザー光源2は、物体光と参照光の光源であり、例えば波長632.8nm、出力7mWのHe-Neレーザー光源を用いることができる。

【0025】

計測用レーザー光源2から照射された光は、レンズ4aによって集光された後、スペイシャルフィルタ3によって不規則な変動の成分が取り除かれる。

【0026】

レンズ4bは、スペイシャルフィルタ3から出力された光を平行光として出力する。

【0027】

ビームスプリッタ5aは、レンズ4bから出力された光を、物体光と参照光に分ける。分けられた参照光は、光学素子6aを透過し、PZTステージ10に取り付けられている鏡9に入射し反射する。反射された参照光は、再度光学素子6aに入射し、ビームスプリッタ5bの方向に反射する。ビームスプリッタ5b・5cは光学素子6aの方向から入射

10

20

30

40

50

してきた参照光をさらにもう1筋の参照光に分ける。P Z Tステージ10は、光学素子6aを透過してきた参照光の光路長を変化させることで、位相シフトを行う。また、所定量の位相シフト時に撮像素子7a~7cによって撮影される。

【0028】

光学素子6b・6d・6fは、ビームスプリッタ5b・5cによって分けられた参照光を反射させる。また、光学素子6c・6e・6gは、撮像素子7a~7cへ参照光を入射させる。光学素子としては、例えばハーフミラーを用いることができる。

【0029】

撮像素子7a~7cは、ビームスプリッタ5a~5cと光学素子6a~6gを経て入射した参照光を撮影する。また、参照光と、計測対象物Oに照射し反射された物体光とで構成される干渉縞を、ホログラムとして撮影する。

10

【0030】

NDフィルタ8a~8cは、物体光と参照光の明るさが同じ程度になるように、参照光の明るさを調整する。

【0031】

図2は、基準面計測時の撮像素子と物体光の光路を表し、図4は2次元格子パターンが貼り付けられている基準面の拡大図である。この基準面は、x、y、z方向にそれぞれ微小に移動するステージ(例えばピエゾステージ等)に取り付けられている。ビームスプリッタ5aを透過した物体光は、まっすぐ基準面11に入射する。

【0032】

20

基準面11は、x、y方向にそれぞれ移動するステージに取り付けられている。基準面には、特定のパターンを使用したり、図7に示すような1次元の格子、または2次元の格子を用いることができる。格子パターンを用いる場合には、上記のステージによって格子の位相シフトを行い、位相シフト法によって格子の位相分布を求め、そこから対応点を求めることができる。また、ランダムなパターンを投影する時には、例えば、デジタル画像相関法などで対応点を見つけることができる。

【0033】

(空間座標分布の測定)

ここで、変位・ひずみ分布を求めるための実像と鏡像の対応点を、それぞれの象の空間座標分布から求める原理を、鏡を用いた場合で説明する。

30

【0034】

i, jを再生された画像上での座標、xを実際の基準面上でのx方向の空間座標とする。正弦波格子を張り付けた基準面の再生強度分布は、格子の位相を $2\pi/N$ ずつシフトさせながらN枚得られる。ここで α_n は、式(1)のように基準面の格子の位相シフト量を表す。

(1)

$$\alpha_n = 2\pi n / N \quad (n=0,1,2,\dots,N-1)$$

【0035】

40

これらの強度分布に対して位相シフト法を用いると、基準面の格子の初期位相(i, j)は、式(2)のようになる。ここで、(i, j, α_n)は、位相シフト量 α_n の場合の画面上での座標(i, j)における再生像の強度を表す。

(2)

$$\tan\theta(i, j) = -\frac{\sum_{n=0}^{N-1} a(i, j, \alpha_n) \sin \alpha_n}{\sum_{n=0}^{N-1} a(i, j, \alpha_n) \cos \alpha_n}$$

50

この式(2)より得られた位相 (i, j) を位相接続し、位相接続された位相 (i, j) を求め、格子周期 p を用いることで空間座標分布 $x(i, j)$ が、式(3)に示すように求められる。

(3)

$$x(i, j) = \frac{p}{2\pi} \phi(i, j)$$

10

この空間座標分布に基づいて、実像と鏡像間の点の対応付け、およびひずみ算出時の微分を行う。

【0036】

物体へ入射する物体光の光軸に対して、角度 k の方向に撮像素子を配置し、実像および鏡像の変位前後のホログラムを記録する。ホログラムの再生像のうち、実像の変位前後の位相差を Df_1 、鏡像の変位前後の位相差を Df_2 とすると、物体の x 方向変位 d_x および z 方向変位 d_z は、式(4)と(5)で表される。

(4)

$$d_x = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2}{\sin k}$$

20

(5)

$$d_z = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\Delta\phi_1 + \Delta\phi_2}{\cos k + 1}$$

30

【0037】

また x 方向変位 d_x を x 方向空間座標分布によって微分することで、物体の x 方向のひずみ ϵ_x は、式(6)から求められる。

(6)

$$\epsilon_x = \frac{\partial d_x}{\partial x} = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial x} - \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial x}}{\sin k}$$

40

【0038】

図3は、撮像素子7a、7b、7cで撮影した2次元格子のホログラムの再生像を表し、再生像1は撮像素子7a、再生像2は撮像素子7b、再生像3は撮像素子7cで撮影したものである。それぞれの再生像ごとに求めた、 x 方向の格子の位相接続後の位相分布と y 方向の格子の位相接続後の位相分布を矢印の下に示す。それぞれの図には、基準面11上の任意の1点Pが再生像と位相分布上に存在する位置が図示されている。再生像1と2、3において、 x 方向の位相と y 方向の位相が共に同一の点は、基準面11上における同一点である。そのため、 x 方向の位相と y 方向の位相が得られることによって、各再生像での対応関係が各画素ごとに得られることになる。図中の点Pは、 x 方向と y 方向ともに同一の位相値となっている。なお、図3においては、点Pが格子線上にあるように描かれているが

50

、点Pが格子線上になくても同様のことが言える。

【0039】

図4は、x、y、zの各方向に微小に移動できるステージの上に取り付けられている基準面11を示す。基準面をx、y、zの各方向に所定の量だけ微小に移動させ、その移動前後において、撮像素子7a、7b、7cで撮影した2次元格子のホログラムの再生像とその位相分布を求める。移動前後における各画素の位相差を求めると、微小量の移動に対する位相差の値が得られることになる。すなわち各撮像素子の再生像の1画素ごとに、基準面の変位量に応じた位相差を得ることができる。

【0040】

特開2007-240465において開示されているように、変位の3方向成分を得るためには、独立した3方向の感度ベクトルを得ておけばよい。感度ベクトルは、物体光の入射方向と撮影方向から決まるベクトルであるため、それぞれ異なる位置に配置された撮像素子7a、7b、7cによって、3個の感度ベクトルが得られることになる。この3個の感度ベクトルが一次独立となっている場合には、得られた感度ベクトルを用いて、物体上の1点に対応するそれぞれの撮像素子を用いて得られた再生像上の点の位相差から、その1点のx方向とy方向、z方向の変位をそれぞれ求めることができる。図4に示すように、x、y、zの各方向に微小に移動できるステージの上に取り付けることで、特開2007-240465において開示されている校正方法を適用することができる。このような構成にすることによって、基準面11をx、y、z各方向に微小量ずつ変位させることで、基準面の全ての位置において、感度ベクトルを求めることが可能となる。そのようにして得られた感度ベクトルから、計測対象の表面上の任意の点におけるx、y、z各方向の変位成分を求めることが可能となる。

【0041】

さらに、本手法の場合は、再生像の対応点を見つけるために用いる基準面と感度ベクトルを求めるために用いる基準面が同一であるために、それらの位置ずれがまったく発生しないという効果がある。

【0042】

図5は、基準面11を計測物体に置き換えたものを表す。ビームスプリッタ5aを透過した物体光は、計測物体に到達し、分散される。分散した物体光は、撮像素子7a~7cに入射し、参照光とともに干渉縞を形成し、ホログラムとして撮影される。

【0043】

図6は、撮像素子を2台使用した場合の光学系平面図であり、図8は計測対象物の前に鏡を用いて撮像素子を1台使用した場合の光学系平面図である。基本的な計測方法は、撮像素子を3台使用した場合と同じであるが、図8の場合は、鏡を設置しているので、鏡も撮影される。このことで、撮像素子を2台使用した場合と同じ状態になる。

【0044】

図9は、ある位相を撮影した実像と鏡像の画像である。参照光の光路長を変化させることで位相をシフトさせる。この位相の変化を複数回撮像素子で撮影することで、図10のような位相分布を得ることができる。この位相分布を位相解析（例えば位相シフト法等）すると図11のような位相分布図が得られる。

【0045】

図12のような亀裂の入った橋梁にPZTアクチュエーター50で加えた状態を、図8の光学系で計測を行うと、図13のように位相分布が得られる。この位相分布を解析すると図14のような結果が得られる。実像と鏡像の2つを合成すると、図15のような変位・ひずみ分布が分かる。

【0046】

以上、具体例を挙げて本発明を詳細に説明してきたが、本発明の特許請求の範囲から逸脱しない限りにおいて、あらゆる変形や変更が可能であることは当業者に明らかである。例えば、撮像素子の台数を増やすことで、より高精度な変位・ひずみ分布を計測を行うことも可能である。したがって、本発明は上記の実施形態に限定されるものではない。

10

20

30

40

50

【符号の説明】

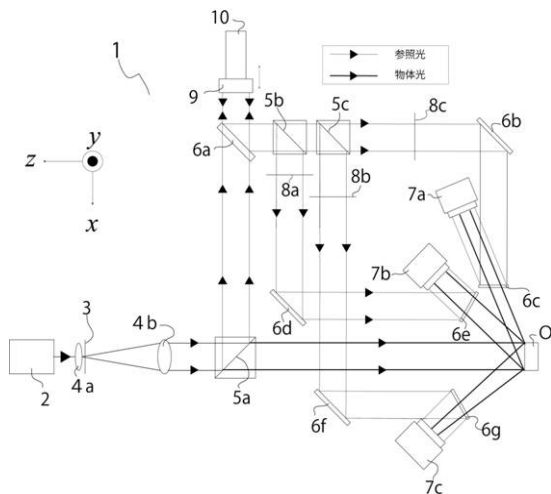
【0047】

- 1、21、31 光学系
 2、22、32 計測用レーザー光源
 3、23、33 スペシャルフィルタ
 4a～4b、24a～24b、34a～34b レンズ
 5a～5c、25a～25b、35 ビームスプリッタ
 6a～6g、26a～26e、36a～36b 光学素子
 7a～7c、27a～27b、37 撮像素子
 8a～8c、28a～28b、38 NDフィルタ
 9、29、39a～39b 鏡
 10、30、41 PZTステージ
 11 基準面
 12 微小変位ステージ
 40 絞り
 50 PZTアクチュエーター
 m36c 第3光学素子(鏡像)
 m37 撮像素子(鏡像)
 O 計測対象物
 O' 計測対象物(鏡像)

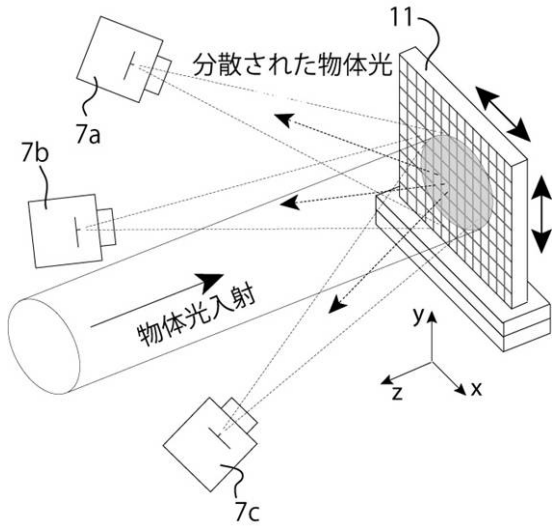
10

20

【図1】



【図2】

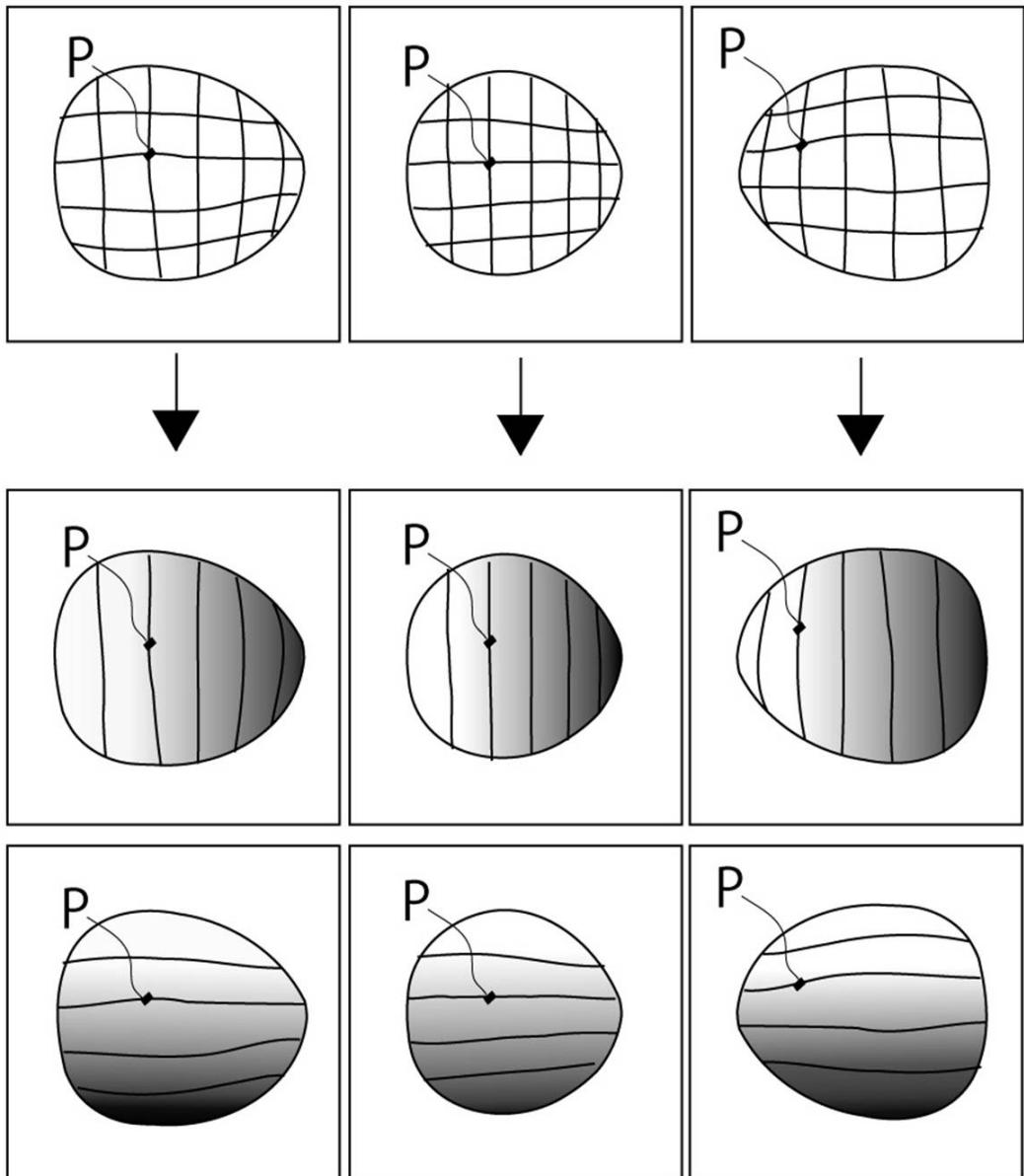


【図3】

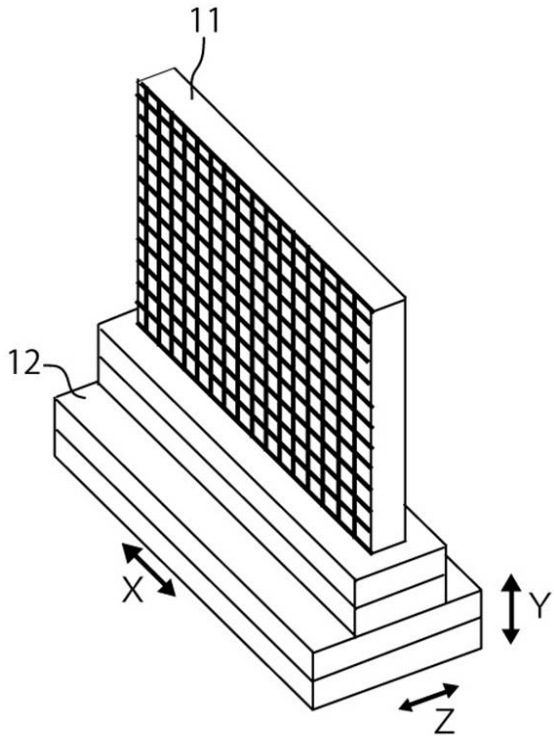
再生像 1

再生像 2

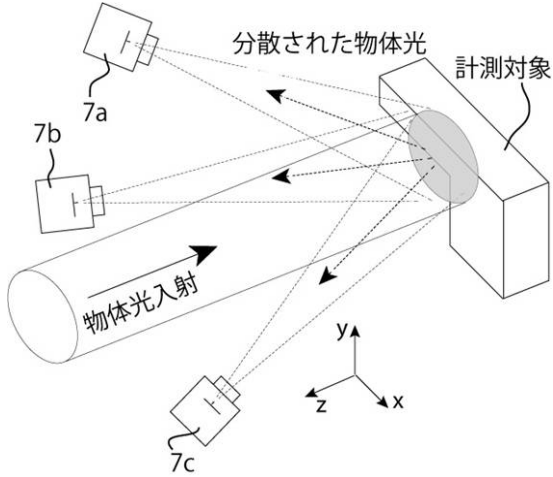
再生像 3



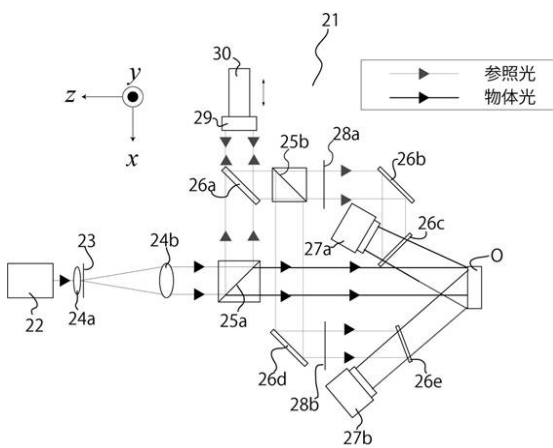
【図4】



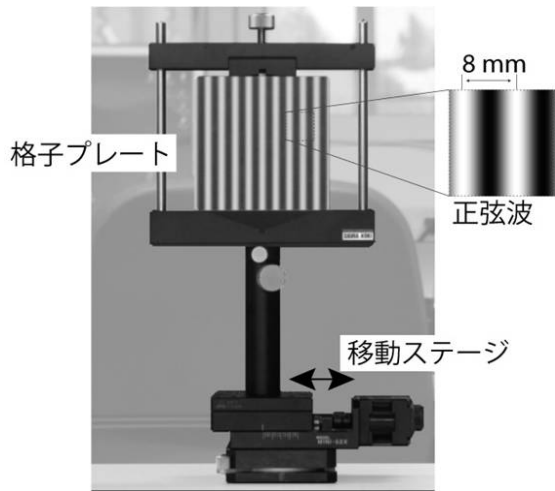
【図5】



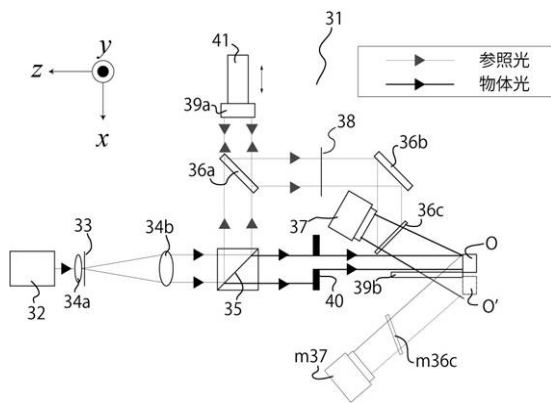
【図6】



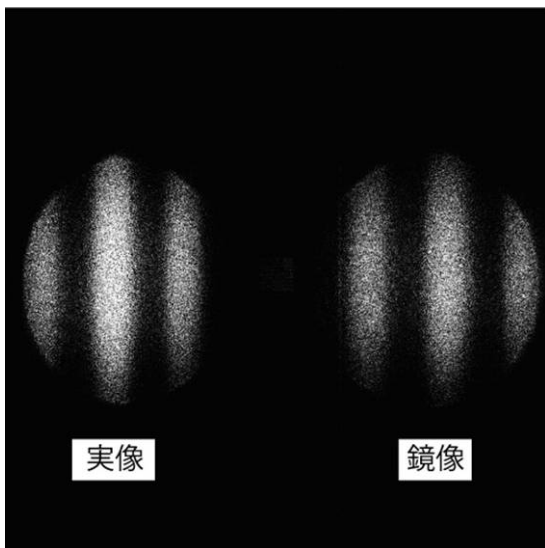
【図7】



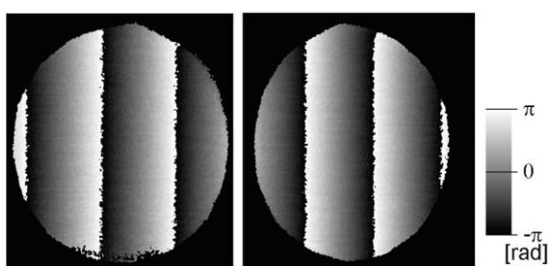
【図8】



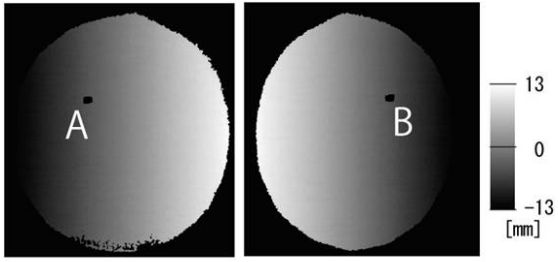
【図9】



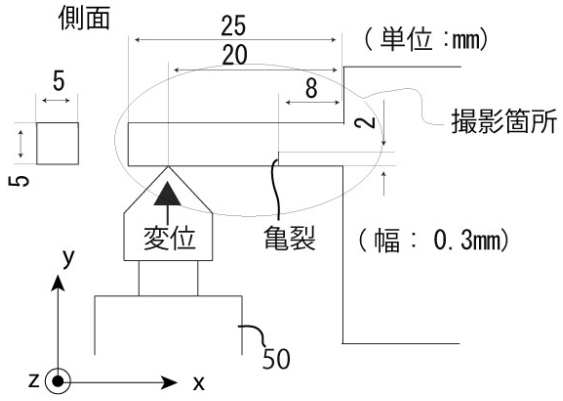
【図10】



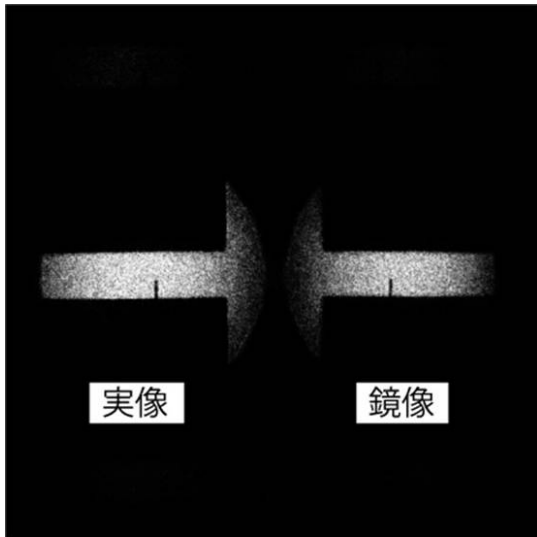
【図 1 1】



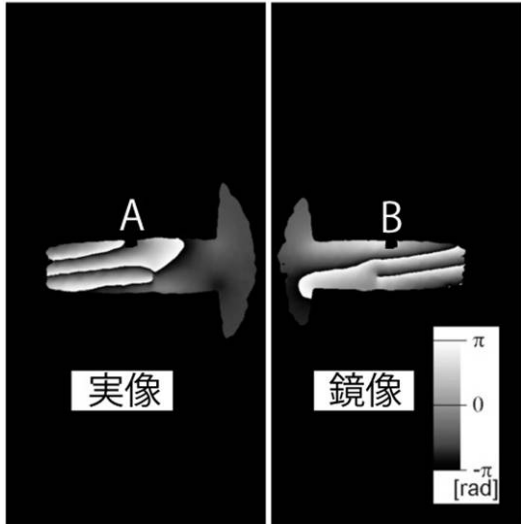
【図 1 2】



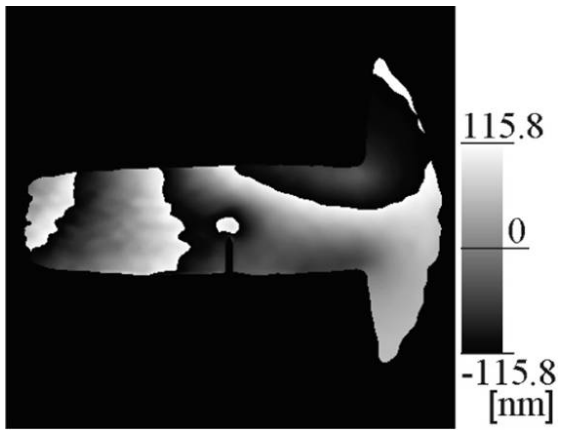
【図 1 3】



【 図 1 4 】



【 図 1 5 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2011-059017(JP,A)
特開2007-240465(JP,A)
特開2006-329975(JP,A)
特開2001-108422(JP,A)
特開2007-113974(JP,A)
米国特許第06268923(US,B1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B 9/00 - 11/30