

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6420159号
(P6420159)

(45) 発行日 平成30年11月7日(2018.11.7)

(24) 登録日 平成30年10月19日(2018.10.19)

(51) Int. Cl. F I
G O 1 B 11/25 (2006.01) G O 1 B 11/25 H

請求項の数 5 (全 20 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2015-3566 (P2015-3566) (22) 出願日 平成27年1月9日(2015.1.9) (65) 公開番号 特開2016-128785 (P2016-128785A) (43) 公開日 平成28年7月14日(2016.7.14) 審査請求日 平成29年11月21日(2017.11.21)</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 100147485 弁理士 杉村 憲司 (74) 代理人 100165696 弁理士 川原 敬祐 (72) 発明者 藤垣 元治 和歌山県和歌山市栄谷930 (72) 発明者 小浦 洋平 大阪府河内長野市栄町15-17 審査官 小野寺 麻美子</p>
---	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 形状計測装置および形状計測方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

計測対象物体の形状を計測する装置であって、
 前記計測対象物体に所定の形状の格子パターンを投影するための投影用光を発光する複数の光源と、前記投影用光を通過させて前記格子パターンを形成する格子基板とを有する格子パターン投影部と、
 前記格子パターンが投影された前記計測対象物体を撮影する撮影部と、
 撮影された前記計測対象物体の画像に対して位相解析処理を施して前記計測対象物体の形状を求める解析部と、
 を備え、

前記複数の光源は、前記格子基板からの距離が異なる複数の位置の各々に少なくとも1つ配置されていることを特徴とする形状計測装置。

【請求項2】

前記複数の位置の各々に3つ以上の光源が配置されている、請求項1に記載の形状計測装置。

【請求項3】

前記複数の光源から発光される光の波長は前記複数の位置毎に異なる、請求項1または2に記載の形状計測装置。

【請求項4】

前記光源は線状光源である、請求項1～3のいずれか一項に記載の形状計測装置。

【請求項 5】

請求項 1 ~ 4 に記載された形状計測装置を用いて、前記格子基板からの距離が異なる複数の位置毎に、前記光源を点灯して前記格子パターンが投影された計測対象物体を撮影し、次いで撮影された前記計測対象物体の画像に対して位相解析処理を施して位相分布を求め、前記複数の位置毎に得られた位相分布に基づいて前記計測対象物体の形状を求めることを特徴とする形状計測方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、形状計測装置および形状計測方法に関し、より詳細には、計測対象物体の形状を高速かつ高精度、さらには広い計測範囲で計測することができる装置および方法に関するものである。

10

【背景技術】

【0002】

三次元物体の形状を非接触で計測する技術は、商業、工業などの分野を問わず重要性を増しており、既存の装置に組み込むことができる高精度でコンパクトな形状計測装置が求められている。また、医療分野やアパレル業界において人体の三次元形状計測には、精度や利便性の他、体のぶれを無視できるほどの高速性や、体全体を測定できる計測範囲の広さも必要となる。

【0003】

20

三次元物体の三次元形状を計測する手法の 1 つに格子投影法がある。この格子投影法は、計測対象の物体に格子パターンを投影し、投影された格子パターンを撮影して位相解析を行うことにより計測対象物体の形状を求める方法であり、空間分解能と精度の両方がよい手法として知られている。(例えば、特許文献 1 参照)。

【0004】

こうした格子投影法において計測範囲を広げる技術として、特許文献 2 には、ピッチが異なる 2 種類の格子基板を用いて位相解析を行い、得られた位相分布に対して位相接続を行う技術が記載されている。

【0005】

また、非特許文献 1 には、格子基板として液晶パネルを用い、パネル上に表示する格子のピッチを変更して位相解析を行い、得られた位相分布に対して位相接続を行う技術について記載されている。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献 1】特許第 2 9 1 3 0 2 1 号公報

【特許文献 2】特開 2 0 0 2 - 9 0 1 2 6 号公報

【非特許文献】

【0007】

【非特許文献 1】格内敏、岩田耕一、斎藤伸一、坂本亨、「2 ピッチ格子投影による 3 次元形状計測」、精密工学会誌、1992 年、第 58 巻、第 5 号、p. 877 - 882

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかし、特許文献 2 に記載された技術においては、格子ピッチが異なる格子基板を置き換える処理を行うため、格子基板を移動させるために多大な時間を要する。また、格子基板を置き換えるたびに位置ずれが発生するため、計測精度が低下する。

【0009】

また、非特許文献 1 に記載された格子基板として液晶パネルを用いる方法では、表示する格子のピッチを電気信号で切り替えるため、位置ずれによる誤差は発生しない。しかし

50

、液晶パネルは格子を表示する応答速度が遅いため、高速に形状計測を行うことができない。

【0010】

そこで、本発明の目的は、計測対象物体の形状を高速かつ高精度、さらには広い計測範囲で計測することができる装置および方法を提案することにある。

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明者らは、上記課題を解決する方途について鋭意検討した結果、計測対象物体に格子パターンを投影する格子パターン投影部を複数の光源と格子基板とを有するように構成し、かつ上記複数の光源を、格子基板からの距離が異なる複数の位置の各々に少なくとも1つ配置することが極めて有効であることを見出し、本発明を完成させるに至った。

10

【0012】

すなわち、本発明の要旨構成は以下の通りである。

(1) 計測対象物体の形状を計測する装置であって、前記計測対象物体に所定の形状の格子パターンを投影するための投影用光を発光する複数の光源と、前記投影用光を通過させて前記格子パターンを形成する格子基板とを有する格子パターン投影部と、前記格子パターンが投影された前記計測対象物体を撮影する撮影部と、撮影された前記計測対象物体の画像に対して位相解析処理を施して前記計測対象物体の形状を求める解析部とを備え、前記複数の光源は、前記格子基板からの距離が異なる複数の位置の各々に少なくとも1つ配置されていることを特徴とする形状計測装置。

20

【0013】

(2) 前記複数の位置の各々に3つ以上の光源が配置されている、前記(1)に記載の形状計測装置。

【0014】

(3) 前記複数の光源から発光される光の波長は前記複数の位置毎に異なる、前記(1)または(2)に記載の形状計測装置。

【0015】

(4) 前記光源は線状光源である、前記(1)～(3)のいずれか一項に記載の形状計測装置。

【0016】

(5) 前記(1)～(4)に記載された形状計測装置を用いて、前記格子基板からの距離が異なる複数の位置毎に、前記光源を点灯して前記格子パターンが投影された計測対象物体を撮影し、次いで撮影された前記計測対象物体の画像に対して位相解析処理を施して位相分布を求め、前記複数の位置毎に得られた位相分布に基づいて前記計測対象物体の形状を求めることを特徴とする形状計測方法。

30

【発明の効果】

【0017】

本発明によれば、複数の光源と格子基板とを有する格子パターン投影部において、複数の光源を格子基板からの距離が異なる複数の位置の各々に少なくとも1つ配置するように構成したため、計測対象物体の形状を高速かつ高精度、さらには広い計測範囲で計測することができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0018】

【図1】本発明に係る形状計測装置を示す図である。

【図2】投影格子のピッチが1つの場合について計測可能な範囲を示す図である。

【図3】線状光源を有する格子パターン投影部の一例を示す図である。

【図4】(a)下段、および(b)上段に配置された光源を点灯した場合に格子パターン投影部から投影される格子パターンを示す図である。

【図5】上段および下段のそれぞれに3つの線状光源を有する格子パターン投影部の一例を示す図である。

50

【図 6】格子パターンの (a) 輝度分布、および (b) 位相分布を示す図である。

【図 7】位相シフト量と輝度との関係を示す図である。

【図 8】 (a) 光源 A を点灯した場合、および (b) 光源 B を点灯させた場合、に対する光源の点灯位置と投影される格子パターンの関係を示す図である。

【図 9】 (a) 光源 A を点灯した場合、および (b) 光源 B を点灯させた場合、に対してカメラが格子パターンを撮影する様子を示す図である。

【図 10】 (a) 光源 A を点灯した場合、および (b) 光源 B を点灯させた場合、に対して全空間テーブル化手法に基づいてテーブルを作製する様子を示す図である。

【図 11】 (a) 光源 A を点灯した場合、および (b) 光源 B を点灯させた場合、に対する位相値と z 座標との対応テーブルを示す図である。

10

【図 12】 (a) x 座標、および (b) y 座標に対する位相値と座標との対応テーブルを示す図である。

【図 13】 (a) 光源 A を点灯した場合、および (b) 光源 B を点灯させた場合、に対して格子パターンが投影された計測対象物体をカメラが撮影する様子を示す図である。

【図 14】 (a) 光源 A を点灯した場合、および (b) 光源 B を点灯させた場合、に対するテーブルを用いて計測対象物体上の点の z 座標を求める原理を示す図である。

【図 15】実施例として作製した形状計測装置を示す図である。

【図 16】実施例として作製した形状計測装置の側面図である。

【図 17】キャリブレーションの様子を示す図である。

【図 18】光源 A を点灯した場合に対してキャリブレーションにより得られたテーブルを示す図である。

20

【図 19】光源 B を点灯した場合に対してキャリブレーションにより得られたテーブルを示す図である。

【図 20】計測対象物体の寸法を示す図である。

【図 21】形状計測装置と計測対象物体との位置関係を示す図である。

【図 22】光源 A を点灯した場合に対する格子パターンが投影された計測対象物体の画像を示す図である。

【図 23】光源 B を点灯した場合に対する格子パターンが投影された計測対象物体の画像を示す図である。

【図 24】光源 A を点灯した場合に対する格子パターンの位相分布を示す図である。

30

【図 25】光源 B を点灯した場合に対する格子パターンの位相分布を示す図である。

【図 26】光源 A を点灯した場合に対する z 座標の候補値を示す図である。

【図 27】光源 B を点灯した場合に対する z 座標の候補値を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 9 】

(形状計測装置)

以下、図面を参照して本発明の実施形態について説明する。図 1 は、本発明に係る形状計測装置を示している。この図における形状計測装置 1 は、計測対象物体 O に所定の形状の格子パターンを投影するための投影用光を発光する複数の光源 1 1 a と、投影用光を通過させて格子パターンを形成する格子基板 1 1 b とを有する格子パターン投影部 1 1 と、格子パターンが投影された計測対象物体 O を撮影する撮影部 1 2 と、撮影された計測対象物体 O の画像に対して位相解析処理を施して計測対象物体 O の形状を求める解析部 1 3 とを備える。ここで、複数の光源 1 1 a は、格子基板 1 1 b からの距離が異なる複数の位置の各々に少なくとも 1 つ配置されていることが肝要である。

40

【 0 0 2 0 】

上述のように、特許文献 2 および非特許文献 1 に記載された技術においては、計測可能な範囲を拡大することはできるが、そのために、形状計測の高速性や精度が犠牲になる問題があった。この点、本発明においては、複数の光源 1 1 a が、格子基板 1 1 b からの距離が異なる複数の位置の各々に少なくとも 1 つ配置されており、点灯させる光源を切り替えることによって、計測対象物体 O に投影する格子のピッチを瞬時に変更することができ

50

る。また、格子基板 1 1 b を移動させないため、位置ずれによる誤差が発生せず、計測対象物体 O の形状を高精度に計測することができる。

【 0 0 2 1 】

また、図 2 に示すように、投影格子のピッチが 1 つの場合は、位相が 1 周期分だけ変化する範囲（例えば、図 2 の D_1 で示す範囲）が基本的な計測可能な範囲となる。領域 D_2 および D_3 を計測範囲とする場合や、領域 $D_1 \sim D_3$ を計測範囲とする場合等には、領域 D_1 と同じ位相値となる点が領域 D_2 や領域 D_3 において存在するため、位相値だけでは、どの領域の点であるか区別できない。どの領域の点であるか区別できる場合には、計測範囲を拡大することが可能となる。この点、本発明においては、後述するように、位相が複数周期分変化する範囲を計測範囲とした場合でも、どの領域の点であるか区別することができるため、計測範囲を拡大することができるのである。以下、形状計測装置 1 の各構成について説明する。

10

【 0 0 2 2 】

複数の光源 1 1 a は、計測対象物体 O に所定の形状の格子パターンを投影するための投影用光を発光する。この光源 1 1 a としては、点光源または線状光源等を用いることができる。中でも、光源の光量を増加させて S / N 比を高めることができ、計測精度を向上させることができることから、線状光源を用いることが好ましい。光源として線状光源を用いる場合には、点光源を直線上に並べて線状光源を構成してもよい。光源として線状光源を用いる場合、その延在方向が格子基板 1 1 b の格子線と平行になるように配置する。

【 0 0 2 3 】

20

図 3 は、線状光源を有する格子パターン投影部 1 1 の一例を示しており、(a) は側面図を、(b) は斜視図をそれぞれ示している。図 3 に示した格子パターン投影部 1 1 は、段差を有する部材 1 1 d の格子基板 1 1 b 側の表面に、光源 1 1 a を有する光源基板 1 1 c が配置された構成を有している。

【 0 0 2 4 】

図 4 (a) は、部材 1 1 d の下段に配置された光源 1 1 a のみを点灯し、上段に配置された光源 1 1 a を非点灯とした場合に格子パターン投影部 1 1 から投影される格子パターンを示している。一方、図 4 (b) は、部材 1 1 d の上段に配置された光源 1 1 a のみを点灯し、下段に配置された光源 1 1 a を非点灯とした場合に格子パターン投影部 1 1 から投影される格子パターンを示している。

30

【 0 0 2 5 】

図 4 (a) および (b) から明らかなように、図 3 に示した構成においては、光源 1 1 a と格子基板 1 1 b との間の距離は、部材 1 1 d の上段に配置された光源 1 1 a の場合の方が大きい。そのため、上段の光源 1 1 a を点灯させた際に形成される格子パターンのピッチ p は、下段に配置された光源 1 1 a を点灯させた場合よりも小さくなる。

【 0 0 2 6 】

このように、部材 1 1 d の上段に配置された光源 1 1 a を点灯させるか、下段に配置された光源 1 1 b を点灯されるかによって、計測対象物体 O に投影される格子パターンのピッチ p が異なる。そして、この格子パターンにピッチ p の変更は、点灯させる光源 1 1 a を上段（下段）から下段（上段）に切り替えるだけで済むため、格子のピッチ p の変更を高速かつ位置ずれによる誤差なく行うことができる。

40

【 0 0 2 7 】

なお、図 3 に示した格子パターン投影部 1 1 はあくまで一例であり、格子基板 1 1 b からの距離が異なる複数の位置の各々に少なくとも 1 つの光源 1 1 a が配置され、計測対象物体 O に投影される格子のピッチ p を変更できれば何ら限定されず、様々な変更を施すことができる。例えば、図 3 においては、部材 1 1 d は 2 段構造を有しているが、3 段以上の構造とすることができる。また、図 2 においては部材 1 1 d が上段と下段とで別々の部材で構成されているが、これらの部材を一体で構成してもよい。さらに、光源 1 1 a は、光源基板 1 1 c 上に配することなく、部材 1 1 d の格子基板 1 1 b 側の表面に直接配置してもよい。

50

【 0 0 2 8 】

また、図 3 においては、上下段、すなわち格子基板 1 1 b からの距離が異なる複数の位置の各々に 1 つの光源 1 1 a が配置されているが、図 5 (a) に示すように、上下段の各々に 3 つ以上の光源 1 1 a を配置することが好ましい。これにより、後述する位相シフト法を用いて高速に位相解析を行うことができる。各段に 3 つ以上の光源 1 1 a を配置する場合には、各光源の延在方向が平行になるように配置する。また、各位置に配置される光源 1 1 a の数は、同一にすることが好ましい。

【 0 0 2 9 】

また、図 5 (b) に示すように、複数の光源 1 1 a を 1 枚のパネルに取り付け、そのパネルを格子基板に対して傾けて配置することによって、複数の光源 1 1 a と格子基板 1 1 b との間の距離が異なるようにするように配置してもよい。図 5 (b) の場合、光源の A 組を用いるとピッチの小さい格子を投影することになり、B 組を用いるとピッチの大きな格子を投影することができる。同じ組の中でも格子基板との距離が異なり、投影されるピッチが異なることになるが、その差が小さい範囲では実用上は問題なく使用することができる。

【 0 0 3 0 】

なお、図 5 (b) に示した光源 1 1 a の場合、パネルにおいて同時に点灯させる光源 1 1 a を 1 つの組と考え、各組に含まれる光源 1 1 a の格子基板 1 1 b からの距離の平均値を、格子基板 1 1 b からの光源 1 1 a の距離と考える。

【 0 0 3 1 】

さらに、複数の光源 1 1 a から発光される光の波長（すなわち、色）は、格子基板 1 b からの距離が異なる複数の位置毎に異なることが好ましい。すなわち、図 3 に示した構成において、上段と下段とで光源 1 1 a から発光させる投影用光の色を変えることが好ましい。これにより、格子基板 1 b からの距離が異なる位置に配置された光源 1 1 a を同時に点灯させた状態で計測対象物体 O に投影された異なる色の格子パターンを撮影し、位相解析を色毎に行って位相値を求めることができるため、計測対象物体 O の形状を計測する時間を短縮することができる。

【 0 0 3 2 】

複数の光源 1 1 a から発光される光の波長を、格子基板 1 b からの距離が異なる複数の位置毎に変え、かつ格子基板 1 1 b からの距離が異なる複数の位置の各々に 3 以上の光源 1 1 a を配置する場合には、例えば、各位置に配置される光源 1 1 a の数を同一にし、各位置にて 1 つずつ光源 1 1 a を同時に点灯して計測対象物体 O 上に異なる色の格子パターンを投影して画像を撮影するようにすればよい。

【 0 0 3 3 】

格子基板 1 1 b は、複数の光源 1 1 a から発光された投影用光を通過させて計測対象物体 O に所定の格子パターンを投影するための基板である。格子基板 1 1 b は、例えばガラス基板上にクロム蒸着してロンキールーリングと呼ばれる格子縞を描いたものとしてすることができる。

【 0 0 3 4 】

上記複数の光源 1 1 a と格子基板 1 1 b との位置関係は、光源 1 1 a が線状光源の場合には、各光源 1 1 a の線状光源の延在方向が格子基板 1 1 b の格子線と平行になるように配置する。

【 0 0 3 5 】

撮影部 1 2 は、格子パターン投影部 1 1 により格子パターンが投影された計測対象物体 O を撮影する。この撮影部 1 2 としては、例えば CCD カメラや CMOS カメラを使用することができる。撮影された計測対象物体 O の画像は解析部 1 3 に出力される。

【 0 0 3 6 】

解析部 1 3 は、撮影された計測対象物体 O の画像に対して位相解析処理を施して計測対象物体 O の形状を求める。また、解析部 5 は、光源 1 1 a のいずれか 1 つのみが投影用光を発光するように格子パターン投影部 1 1 を制御する発光制御信号を生成して格子パター

10

20

30

40

50

ン投影部 1 1 に送信したり、格子パターンが投影された計測対象物体 O を撮影するように撮影部 1 2 を制御する撮影制御信号を生成して撮影部 1 2 に送信したりする。解析部 1 3 としては、例えばパーソナルコンピュータ (P C) を使用することができる。

【 0 0 3 7 】

撮影部 1 2 により撮影された計測対象物体 O の画像に対して位相解析処理を施すことにより、各画素に対して位相値を求めることができる。本発明において、位相解析処理を行うための具体的方法は特に限定されない。例えば、フーリエ変換法や空間的編解析法、重み付け位相解析法などを用いて求めることができる。また、格子基板 1 1 b からの距離が異なる複数の位置の各々に 3 つ以上の光源が配置されている場合には、位相シフト法を用いて高速に位相値を求めることができる。ここで、位相シフト法を用いて位相値を画素毎に求める方法について説明する。

10

【 0 0 3 8 】

図 6 は、計測対象物体 O に投影される格子パターンの輝度分布と位相分布の関係を表す図である。図 6 (a) は、格子パターンの輝度分布を表し、図 6 (b) は、格子パターンの位相分布をそれぞれ表す。また、図 7 は、位相シフト量と輝度との関係を示す図である。一般に、格子パターンや干渉縞の輝度値 $I(x, y)$ は、図 7 (a) に示すように、空間 (x, y) 上に余弦波状に分布している。これを式で表すと、式 (1) のようになる。

【 数 1 】

$$I(x, y) = a(x, y) \cos(\theta(x, y)) + b(x, y) \quad (1)$$

20

ここで、点 (x, y) は、撮影された画像内の一点であり、 $a(x, y)$ および $b(x, y)$ は、それぞれ輝度振幅と背景輝度を表し、 $\theta(x, y)$ は、格子の位相値を表す。格子が撮影された画像 (以下、「格子画像」と称する) の場合、位相は実数全体で表すことができるが、0 から 2 までの 2 周期の繰り返しと見ることにもできる。図 6 (b) は、 $\theta(x, y)$ の分布を 0 から 2 までの繰り返しとして表現したものである。

【 0 0 3 9 】

位相シフト法は、格子の位相を 1 周期分だけ変化させながら複数枚の格子画像を撮影し、得られた複数の画像から位相分布を求める手法である。全ての画素において、輝度は 1 周期分変化するため、その輝度変化から画素毎に独立して、周囲の画素の輝度変化の情報を使わずに位相値を求めることができる。そのため、段差や不連続な部分を有する物体の形状計測に有効な手法である。ここでは、最も一般的に用いられている、 $\pi/2$ ずつ位相シフトされた 4 つの輝度値から位相値を求める場合 (すなわち、位相シフト回数が 4 回の場合) を例に、位相シフト法の原理について説明する。

30

【 0 0 4 0 】

式 (1) で示した格子パターンの輝度分布の式に、位相シフト量 α を追加すると、下記の式 (2) となる。

【 数 2 】

$$I(x, y, \alpha) = a(x, y) \cos(\theta(x, y) + \alpha) + b(x, y) \quad (2)$$

【 0 0 4 1 】

図 7 に、初期位相 θ_0 を有する点 (画素) における位相シフト量 α と輝度変化の関係を示す。初期位相とは、位相シフト量が 0 の時の格子の位相を意味している。位相シフト量が 0 から $\pi/2$ ずつ変化した場合の輝度をそれぞれ I_0, I_1, I_2 および I_3 とすると、これらは、それぞれ式 (3) ~ (6) のように表すことができる。尚、以下の式では (x, y) の表記を省略する。

40

【 数 3 】

$$I_0(x, y) = a \cos \theta + b \quad (3)$$

【数 4】

$$I_1(x, y) = a \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) + b \quad (4)$$

【数 5】

$$I_2(x, y) = a \cos(\theta + \pi) + b \quad (5)$$

【数 6】

$$I_3(x, y) = a \cos\left(\theta + \frac{3\pi}{2}\right) + b \quad (6)$$

10

【0042】

これらの式から、以下の式(7)および(8)が得られる。

【数 7】

$$I_2 - I_0 = -2a \cos \theta \quad (7)$$

【数 8】

$$I_3 - I_1 = 2a \sin \theta \quad (8)$$

さらに、式(7)および(8)から、下記の式(9)が導かれ、この関係式より、ある画素(x, y)に対する位相値を求めることができる。すなわち、位相シフト量が0、 $\pi/2$ 、および $3\pi/2$ の場合の輝度、 I_0 、 I_1 、 I_2 および I_3 が得られれば、この画素に対する位相値が求まるのである。 20

【数 9】

$$\frac{I_3 - I_1}{I_2 - I_0} = -\tan \theta \quad (9)$$

【0043】

ここで、位相シフトの回数(即ち、0から2までの刻み数)を多くすることにより、カメラのランダムノイズの影響を低減することができる。位相シフト回数をN、位相シフト量が $2k/N$ の時の輝度を I_k とすると、下記の式(10)が導かれ、この関係式より $\tan \theta$ 、すなわち位相値を求めることができる。 30

【数 10】

$$\frac{\sum_{k=0}^{N-1} I_k \sin\left(k \frac{2\pi}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} I_k \cos\left(k \frac{2\pi}{N}\right)} = -\tan \theta \quad (10)$$

こうして、位相シフト法により、画像上の各画素に対する位相値を求めることができる。 40

【0044】

上述のようにして各画素に対して求められた位相値から、計測対象物体Oの表面上の点の空間座標(x, y, z)を求めて、計測対象物体Oの形状を求めることができる。図8は、格子基板11bとしての投影格子パネルからの距離が異なる2つの位置に配置された2つの光源Aおよび光源Bを用いることにより、ピッチが異なる格子パターンを投影する様子を示している。ここで、位置Aに配置された光源11aを光源Aと呼び、位置Bに設置された光源11aを光源Bと呼ぶことにする。また、光源Aよりも光源Bの方が投影格子パネルに近い位置に設置されているものとする。さらに、それぞれの光源11aから出ている実線は、投影格子の明線の中央を表している。投影格子の明暗の変化を余弦波と見なして位相を定義すると、この実線は、投影格子の位相が0となる位置を表すことになる 50

。光源 B の方が格子基板 1 1 b に近いために、光源 A を点灯させた場合よりも、光源 B を点灯させた場合の方が投影される格子パターンのピッチが大きくなる。

【 0 0 4 5 】

光源と投影格子パネルとの間の距離を a 、投影格子パネルと計測対象物体 O までの距離を b 、投影格子パネル上での格子ピッチを p_0 としたとき、計測対象物体 O 上に投影される格子のピッチ p は次式のようになる。

【 数 1 1 】

$$p = \frac{a+b}{a} \cdot p_0 \quad (11)$$

10

この式 (1 1) から、光源 1 1 a と格子基板 1 1 b との間の距離 a を小さくすることにより、投影格子のピッチを大きくできることが分かる。図 8 に示すように、光源 A と投影格子パネルとの間の距離を a_A 、光源 B と投影格子パネルとの間の距離を a_B とし、投影格子パネルと $z = z_0$ との間の距離を b 、投影格子パネルにおける格子のピッチを p_0 とすると、 $z = z_0$ の位置における投影される格子のピッチは、光源 A と光源 B の場合は、下記の式にそれぞれ示す p_A および p_B となる。

【 数 1 2 】

$$p_A = \frac{a_A+b}{a_A} \cdot p_0 \quad (12)$$

20

【 数 1 3 】

$$p_B = \frac{a_B+b}{a_B} \cdot p_0 \quad (13)$$

【 0 0 4 6 】

図 9 に、光源 1 1 a とは異なる位置に、撮影部 1 2 としてのカメラを設置した様子を示す。カメラで撮影する画像内のある 1 画素に注目すると、その画素は、図の実線 L 上を撮影していることになる。この実線 L は、投影されている格子パターンを斜めに横切る直線となっている。直線 L 上では、 z 座標が大きくなるに従って、位相は徐々に変化することになる。

30

【 0 0 4 7 】

そこで、図 1 0 に示すように、基準面 (基準となる平板) を用意して、 z 軸に垂直になるように、カメラの視野内に設置する。その基準面を $z = z_0$ から $z = z_{N-1}$ まで順に N 回だけ平行移動させながら投影格子の位相値を取得する。取得した位相値は、図 1 1 に示すように、位相値に対する z 座標のテーブルとして記録する。これをキャリブレーションという。このとき、位相が 1 周期変わるごとに、別のテーブルとして記録する。図 1 1 においては、光源 A を点灯させた場合はテーブル $A_{z,1}$ 、 $A_{z,2}$ 、 $A_{z,3}$ 、 $A_{z,4}$ となり、光源 B を点灯させた場合には、テーブル $B_{z,1}$ 、 $B_{z,2}$ 、 $B_{z,3}$ となる。このような手順により、画素毎に光源 A を点灯させた場合と光源 B を点灯させた場合のテーブルをそれぞれ作成する。

40

【 0 0 4 8 】

このときに、基準面を移動させた位置 z_i の間の位置においては、近傍の基準面の z 座標とそのときの位相の値から補間処理を行うことにより、基準面の位置だけでなく、基準面間の位置を含めた $z = z_0$ から $z = z_{N-1}$ までの全ての位置において、テーブルの要素を得ることができる。このようにして、図 1 1 に示す黒点の位置だけでなく、さらに細かく位相 に対する z 座標のテーブルを作成する。

【 0 0 4 9 】

なお、このときに用いる基準面の表面に 2 次元格子のように、 x 座標と y 座標を読み取ることができるパターンを取り付けておいたり、基準面表面に表示できるようにしたりすることにより、直線 L 上の点における x 座標と y 座標を読み取ることができる。上述のよ

50

うに、位相と z 座標の対応関係が既に得られているため、それを元にして、位相値に対する x 座標のテーブルや、位相値に対する y 座標のテーブルを作成することも容易に行うことができる。このようにして作成した位相値と x 座標、および位相値と y 座標の対応テーブル（光源 A を点灯させた場合）の例をそれぞれ図 1 2 (a) および (b) に示す。この場合にも、 z 座標のテーブルと同様に、位相が 1 周期変わるとに、別のテーブルとして記録する。図 1 2 (a) および (b) においては、 x 座標の場合はテーブル $A_{x,1}$ 、 $A_{x,2}$ 、 $A_{x,3}$ 、 $A_{x,4}$ となり、 y 座標の場合はテーブル $A_{y,1}$ 、 $A_{y,2}$ 、 $A_{y,3}$ 、 $A_{y,4}$ となる。

【 0 0 5 0 】

次に、計測対象物体 O を z_0 から z_{N-1} の領域に設置する。図 1 3 に物体に格子を投影した様子を示す。カメラの注目画素が撮影する視線 L が撮影する物体上の点を点 P とする。このときの点 P の z 座標を z_p とする。光源 A と光源 B を点灯させた場合に得られる点 P の位相をそれぞれ θ_A と θ_B とする。

10

【 0 0 5 1 】

上記の方法で作成した位相値に対する z 座標のテーブルを図 1 4 に示す。光源 A を点灯させた場合には、位相 θ_A に対する z 座標の値は、テーブル $A_{z,1}$ 、 $A_{z,2}$ 、 $A_{z,3}$ 、 $A_{z,4}$ より、それぞれ z_{A1} 、 z_{A2} 、 z_{A3} 、 z_{A4} となる。同様に、光源 B を点灯させた場合には、位相 θ_B に対する z 座標の値は、テーブル $B_{z,1}$ 、 $B_{z,2}$ 、 $B_{z,3}$ よりそれぞれ z_{B1} 、 z_{B2} 、 z_{B3} となる。このように、光源 A と光源 B を点灯させた場合のそれぞれに対して、テーブルの個数だけ z 座標の候補値が得られることになる。

【 0 0 5 2 】

20

得られた複数の z 座標の候補値間の距離 d_{nm} を次式のように求める。

【 数 1 4 】

$$d_{nm} = |z_{An} - z_{Bm}| \quad (14)$$

ここで、 n および m は、それぞれ光源 A と光源 B を点灯させた場合のテーブルの番号 ($A_{z,n}$ 、 $B_{z,m}$ の添字部分) を示す。

【 0 0 5 3 】

光源 A と光源 B のどちらを点灯させた場合であっても、点 P は計測対象物体 O 上の同じ位置の点であるため、点 P の z 座標は同一である。したがって、候補値間の距離 d_{nm} が 0 となる n と m の組み合わせを探すことにより、複数の z 座標の候補値の中から、点 P の z 座標を見つけることができる。しかし、得られる位相値は、カメラが有するランダムノイズなどの影響によって多少のばらつきを生じるため、一般には一致しない。そのため、候補値間の距離 d_{nm} が 0 となる場合ではなく、最小となる場合の n と m の組み合わせを探すことが有効である。なお、この手法において計測可能な範囲は、候補点が 1 個に決まる範囲である。

30

【 0 0 5 4 】

このようにして、光源 A と光源 B を点灯させた場合のそれぞれの候補 z_{An} と z_{Bm} が得られることになる。これらのうちのどちらか、またはそれらの平均値、または点 P における投影格子の強度や位相シフト時の振幅などを用いた重み付け平均値を点 P の z 座標の計測結果とする。例えば、図 1 4 に示した例の場合には、 d_{32} が最も小さいことから、点 P の z 座標の候補は、それぞれ z_{A3} と z_{B2} になる。よって、例えばそれらの平均値 $z = (z_{A3} + z_{B2}) / 2$) として、点 P の z 座標を求めることができる。平均値や重み付け平均値を算出することでノイズを低減することができる。

40

【 0 0 5 5 】

点 P の x 座標と y 座標を求める場合は、 z 座標を求める際に得られた n の値を用いて、テーブル $A_{x,n}$ と $A_{y,n}$ を参照することで容易に求めることができる。例えば、図 1 1 (a) および (b) においては、 x_{A3} および y_{A3} が点 P の x 座標と y 座標となる。 x 座標と y 座標においても、光源 B に対するテーブルを作成しておくことにより、平均値や重み付け平均値を算出して、 z 座標の場合と同様にノイズを低減することができる。

【 0 0 5 6 】

50

以上の処理をカメラで撮影する画素毎に行うことにより、計測対象物体Oの表面全体の座標分布を得て形状を求めることができる。

【0057】

上述の座標を決定する説明は、光源が格子基板からの距離が異なる2つの位置に配置された場合について行ったが、光源が格子基板からの距離が異なる3つ以上の位置に配置されている場合も同様に行うことができる。具体的には、光源毎に位相値と座標との間の対応テーブルを作成し、求められた位相値に対応する座標の候補値を光源毎に求め、候補値間の差が最小となるような座標を見つけ、例えば候補値の平均値を求めるべき座標とすればよい。

【0058】

(形状計測方法)

次に、本発明に係る形状計測方法について説明する。本発明に係る形状計測方法は、上述した本発明に係る形状計測装置1を用いて、格子基板11bからの距離が異なる複数の位置毎に、光源11aを点灯して格子パターンが投影された計測対象物体Oを撮影し、次いで撮影された計測対象物体Oの画像に対して位相解析処理を施して位相分布を求め、複数の位置毎に得られた位相分布に基づいて計測対象物体の形状を求める。これにより、高速かつ高精度に、さらには広い計測範囲で計測対象物体の形状を計測することができる。

【実施例】

【0059】

<形状計測装置>

以下、本発明の実施例について説明する。

図15に示すような本発明に係る形状計測装置を作製した。この装置は、線状のLEDデバイスを用いた光源および格子基板としての投影格子パネルで構成される格子パターン投影部と、CMOSカメラからなる撮影部とを備えている。また、図には示されていないが、解析部としてのPCも備えている。格子パターン投影部の側面図を図16に示す。線状LEDデバイスは、線状LEDが0.42mm間隔で5列配置されており、任意の1列を点灯することができるように構成されている。これにより、5回の位相シフトが可能となっている。

【0060】

光源は、投影格子パネルからの距離が異なる位置Aと位置Bに上記5つの線状LEDがそれぞれ配置されており、各線状LEDを独立に点灯させることができる。投影格子パネルは、ガラス平板に格子状のパターンを持つ金属膜が取り付けられたものである。CMOSカメラは、その光軸が投影格子パネルの法線方向に対して15度傾くように配置されている。また、格子線の向きは各線状LEDの延在方向と一致している。投影格子パネルから光源Aと光源Bまでの距離は、それぞれ20mmと17mmとした。これにより、計測対象物体上に投影される格子ピッチは、光源Aを点灯させた場合よりも光源Bを点灯させた場合の方が大きくなる。

【0061】

<キャリブレーション>

図17にキャリブレーションの様子を示す。基準面は、その法線がz方向を向き、z軸方向に平行移動するようにステージ上に取り付けられている。ステージによって、基準面の位置を $z_0 = 0$ mmから $z_{N-1} = 70$ mmまで、0.2mmずつ移動させた。

【0062】

それぞれに位置において、光源Aおよび光源Bを用いて、5つの線状LEDを順次点灯させて投影格子の位相シフトを行い、それぞれの位置における基準面上の位相値を取得した。その際、カメラが有するランダムノイズの影響を小さくするために、同じ点灯位置において9枚の画像を撮影し、その平均化を行うことにより1枚の平均画像を生成した。生成された平均画像を用いて、位相シフト法の計算を行うことにより、撮影された画像の1画素ごとの位相値を算出した。この処理を光源Aおよび光源Bについて、それぞれ行った。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 3 】

このようにして求めた画像の中央の1画素における位相値とz座標との関係を図18および図19に示す。このとき、 $z = 0 \text{ mm}$ から開始して、位相が2π変化するごとに別のテーブルとして記録した。図18は、光源Aを点灯させた場合に対するものであり、テーブル $A_{z,1}$ 、 $A_{z,2}$ 、 $A_{z,3}$ ・・・ $A_{z,15}$ のようになる。一方、図19は、光源Bを点灯させた場合に対するものであり、テーブル $B_{z,1}$ 、 $B_{z,2}$ 、 $B_{z,3}$ ・・・ $B_{z,13}$ のようになる。このような手順により、画素毎に光源Aを点灯させた場合と光源Bを点灯させた場合のテーブルをそれぞれ作成した。その際、基準面間の位置においては、近傍の基準面のz座標とそのときの位相値から補間処理を行うことにより、図18と図19に示す黒点の位置だけでなく、黒点間の位置についてもさらに細かく位相値に対するz座標のテーブルを作成した。

10

【 0 0 6 4 】

図20に、計測対象物体の寸法を示す。また、図21に形状計測装置と計測対象物体の位置関係を示す。このような位置関係において、光源Aおよび光源Bの一方を点灯させた場合の格子パターンが投影された計測対象物体の画像を図22および図23にそれぞれ示す。また、図24と図25に光源Aと光源Bの一方を点灯させた場合の格子パターンが投影された計測対象物体の位相分布をそれぞれ示す。

【 0 0 6 5 】

位相シフト法により求められた、図24と図25で得られた画像の中心点(画素)における位相値 ϕ_A と ϕ_B は、それぞれ、5.75ラジアンと4.31ラジアンであった。図18と図19に示した位相値とz座標との関係より、上記位相値に対するz座標の複数の候補値が、図26および図27に示すようにそれぞれ得られる。求めた候補値を表1と表2にそれぞれに示す。こうして得られた複数のz座標の候補値間の距離 d_{nm} の中で最小となるのは、 $n = 8$ かつ $m = 7$ の場合であり、その場合、 $z_{A8} = 47.51$ と $z_{B7} = 47.52$ となる。これらの平均値は、47.515 mmとなり、この平均値を上記画像の中心点に対応する計測対象物体上の点のz座標とすることができる。また、 $n = 8$ のx座標とy座標に関するテーブル $A_{x,8}$ および $A_{y,8}$ を用いることにより、上記計測対象物体上の点のx座標およびy座標も求めることができる。

20

【 0 0 6 6 】

以上の処理を全ての画素に対して行い、図20に示した計測対象物体の形状を計測した。

30

【 0 0 6 7 】

【表1】

テーブル	候補値 [mm]
$A_{z,1}$	$z_{A1}=4.58$
$A_{z,2}$	$z_{A2}=12.86$
$A_{z,3}$	$z_{A3}=20.21$
$A_{z,4}$	$z_{A4}=26.78$
$A_{z,5}$	$z_{A5}=32.72$
$A_{z,6}$	$z_{A6}=38.11$
$A_{z,7}$	$z_{A7}=43.02$
$A_{z,8}$	$z_{A8}=47.51$
$A_{z,9}$	$z_{A9}=51.62$
$A_{z,10}$	$z_{A10}=55.41$
$A_{z,11}$	$z_{A11}=58.92$
$A_{z,12}$	$z_{A12}=62.15$
$A_{z,13}$	$z_{A13}=65.17$
$A_{z,14}$	$z_{A14}=67.97$

40

50

【 0 0 6 8 】

【 表 2 】

テーブル	候補値 [mm]
$B_{z,1}$	$z_{B1}=6.49$
$B_{z,2}$	$z_{B2}=15.57$
$B_{z,3}$	$z_{B3}=23.58$
$B_{z,4}$	$z_{B4}=30.54$
$B_{z,5}$	$z_{B5}=36.84$
$B_{z,6}$	$z_{B6}=42.45$
$B_{z,7}$	$z_{B7}=47.52$
$B_{z,8}$	$z_{B8}=52.09$
$B_{z,9}$	$z_{B9}=56.25$
$B_{z,10}$	$z_{B10}=60.08$
$B_{z,11}$	$z_{B11}=63.56$
$B_{z,12}$	$z_{B12}=66.76$
$B_{z,13}$	$z_{B13}=69.72$

10

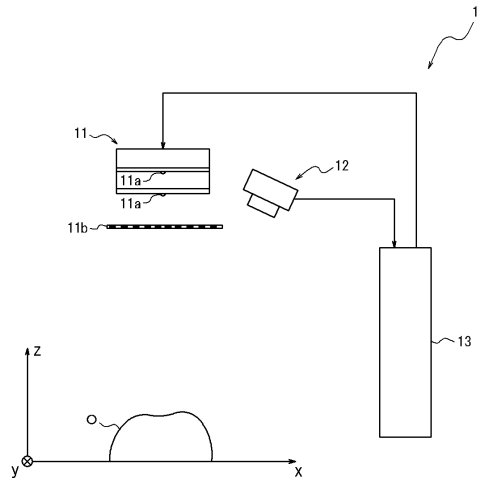
【 符号の説明 】

【 0 0 6 9 】

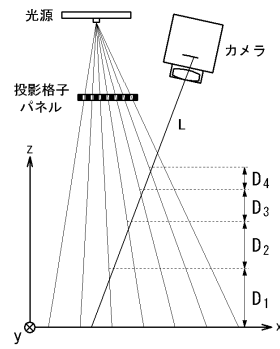
20

- 1 形状計測装置
- 1 1 格子パターン投影部
- 1 1 a 光源
- 1 1 b 格子基板
- 1 1 c 光源基板
- 1 1 d 部材
- 1 2 撮影部
- 1 3 解析部

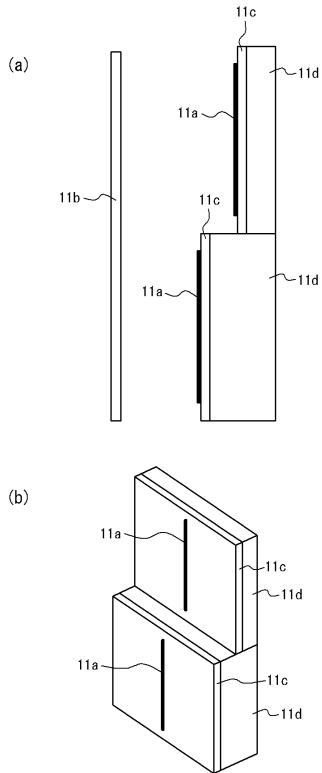
【図1】



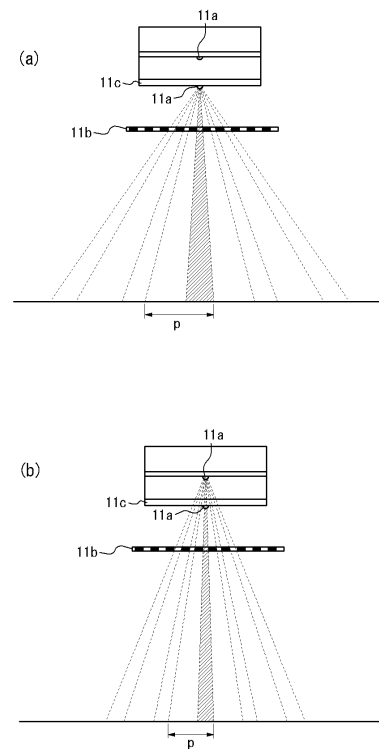
【図2】



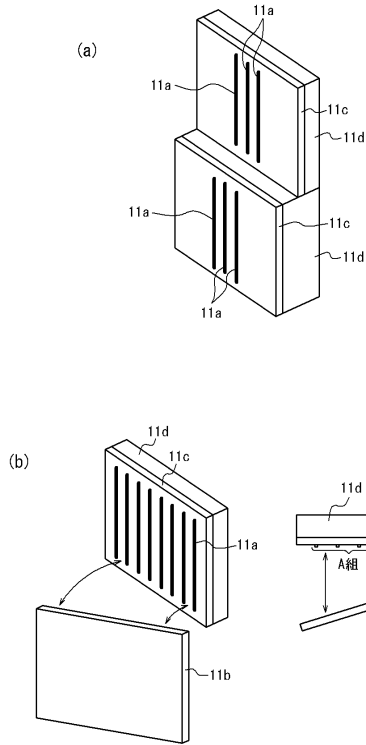
【図3】



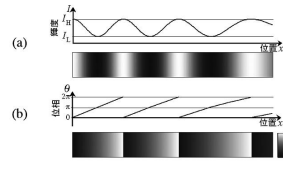
【図4】



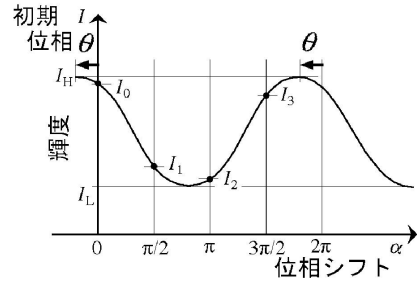
【図5】



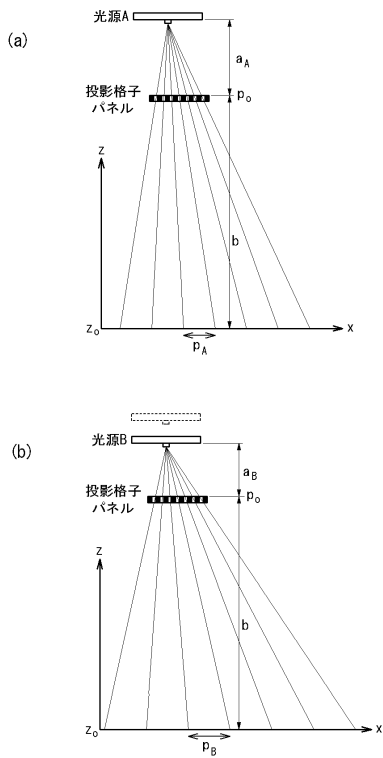
【図6】



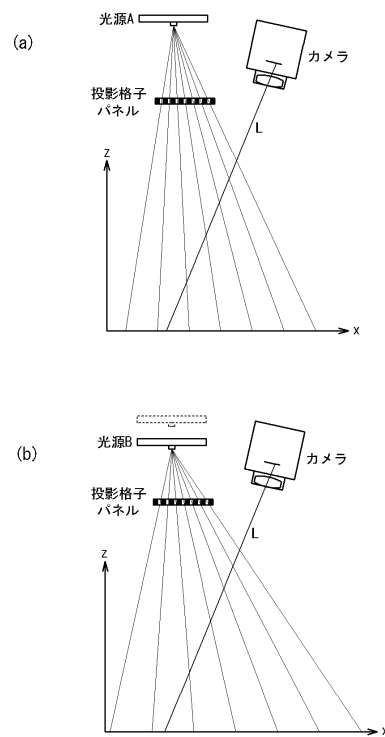
【図7】



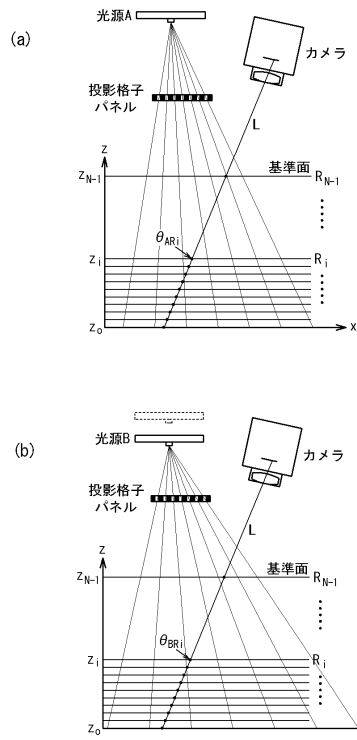
【図8】



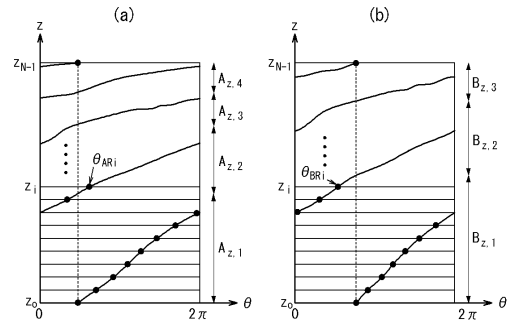
【図9】



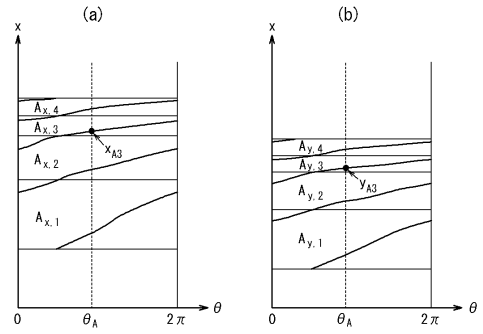
【 図 1 0 】



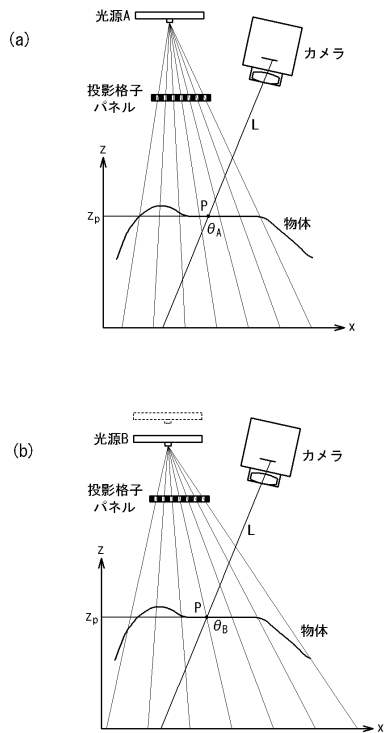
【 図 1 1 】



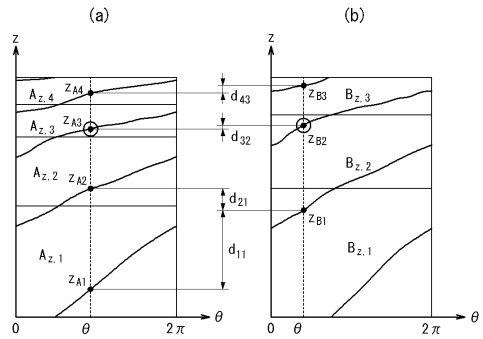
【 図 1 2 】



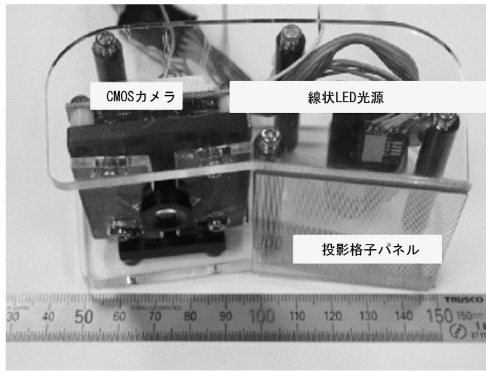
【 図 1 3 】



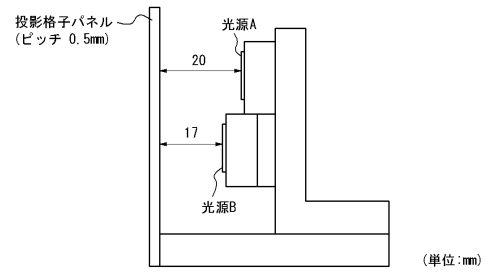
【 図 1 4 】



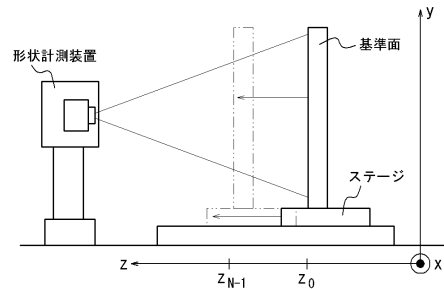
【図15】



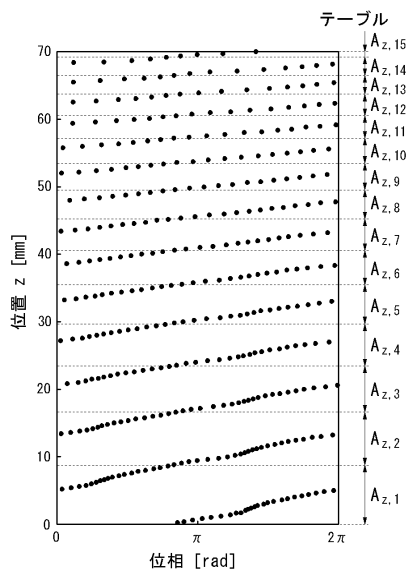
【図16】



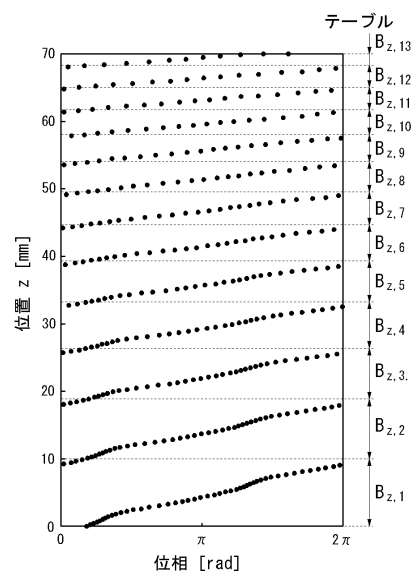
【図17】



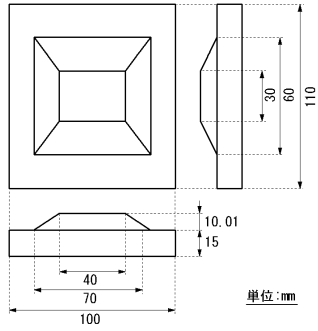
【図18】



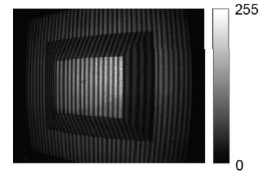
【図19】



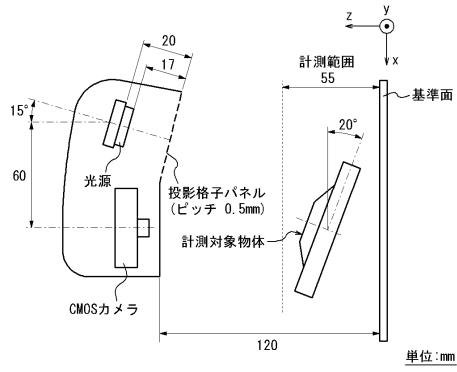
【図 20】



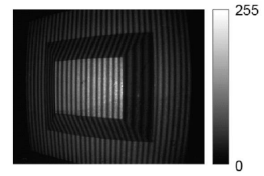
【図 22】



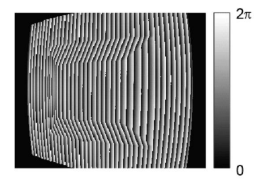
【図 21】



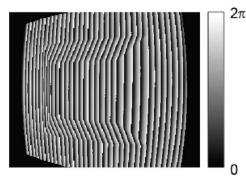
【図 23】



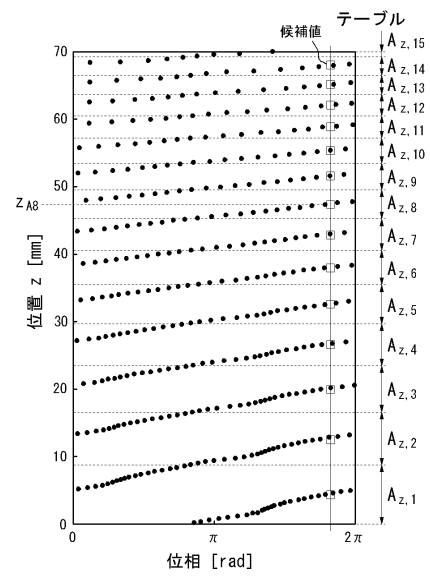
【図 24】



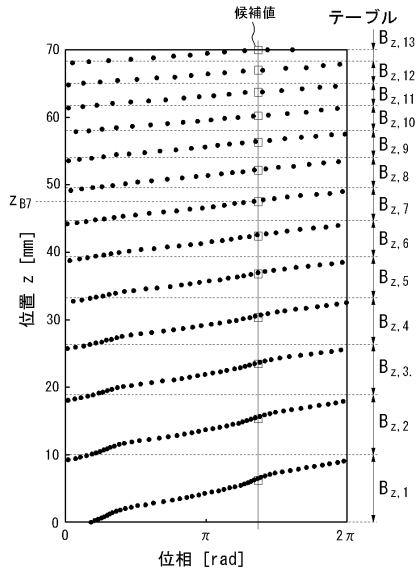
【図 25】



【図 26】



【図 27】



フロントページの続き

特許法第30条第2項適用 1.平成26年7月12日発行 第19回知能メカトロニクス ワークショップ
講演論文集 2.平成26年10月9日開催 Photonics Asia, Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications III
発表時に使用した資料・要約 3.平成26年11月15日開催 The International Conference on Experimental Mechanics (icEM2014) 発表時に
使用した資料・要約

(56)参考文献 特開昭58-26206(JP,A)
特開2012-237613(JP,A)
特開2012-150018(JP,A)
特開2003-42734(JP,A)
特開2013-79869(JP,A)
米国特許出願公開第2014/0276097(US,A1)
米国特許第5636025(US,A)
国際公開第2013/156576(WO,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B 11/00 - G01B 11/30