

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5657276号
(P5657276)

(45) 発行日 平成27年1月21日(2015.1.21)

(24) 登録日 平成26年12月5日(2014.12.5)

(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 6 (全 30 頁)

(21) 出願番号	特願2010-112673 (P2010-112673)	(73) 特許権者	509347239
(22) 出願日	平成22年5月14日 (2010.5.14)		一般社団法人モアレ研究所
(65) 公開番号	特開2011-242178 (P2011-242178A)		大阪府泉佐野市羽倉崎2丁目1-4-804
(43) 公開日	平成23年12月1日 (2011.12.1)	(74) 代理人	100147485
審査請求日	平成25年4月15日 (2013.4.15)		弁理士 杉村 憲司
特許法第30条第1項適用 1. 平成22年3月15日神戸大学において開催された社団法人日本機械学会主催の関西学生会 学生員卒業研究発表講演会で発表 2. 平成22年3月1日和歌山大学において開催された和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科2009年度(平成21年度)卒業研究発表会で発表		(74) 代理人	100143568
			弁理士 英 貢
		(72) 発明者	藤垣 元治
			和歌山県和歌山市栄谷930
		(72) 発明者	森本 吉春
			大阪府泉佐野市羽倉崎2丁目1番4-804号
		(72) 発明者	征谷 明大
			和歌山県和歌山市栄谷930

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 形状計測装置及び形状計測方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

計測対象の形状を計測する形状計測装置であって、

所定の形状の格子模様を投影するための投影用光を発光する一列に並んだ3以上の所定の数の光源と、前記投影用光を通過させて前記格子模様を形成する格子模様プレートとを有する投影装置と、

前記格子模様が投影される基準面を有する基準平板と、

前記基準平板を該基準平板の法線方向に所定量ずつ平行移動させる移動ステージと、

前記基準平板に対して投影装置側に設けられ、前記平行移動の各位置において、前記所定の数の光源の各々に対して、前記投影装置により前記基準面に投影された前記格子模様の基準用画像と、前記計測対象に投影された前記格子模様の計測用画像とを撮影する撮影装置と、

前記平行移動の各位置において撮影された前記基準用画像の各画素に対して位相解析を行って前記格子模様の位相と前記基準平板の法線方向の位置との相関を求め、該相関において前記位相と前記基準平板の法線方向の位置が1対1に対応する前記基準平板の法線方向の位置範囲を特定して位相と空間座標とを1対1に対応づけるテーブルを作成するとともに、該テーブルと前記計測用画像とから前記特定された前記基準平板の法線方向の位置範囲に配置された前記計測対象の空間座標を求めることにより前記計測対象の形状を決定する解析装置と、

を備えることを特徴とする形状計測装置。

【請求項 2】

計測対象の形状を計測する形状計測装置であって、

所定の形状の格子模様を投影するための投影用光を発光する一列に並んだ5以上の所定の数の光源と、該所定の数の光源から4以上の光源を選択する光源選択手段と、該光源選択手段により選択された光源から発光された投影用光を通過させて前記格子模様を形成する格子模様プレートとを有する投影装置と、

前記格子模様が投影される基準面を有する基準平板と、

前記基準平板を該基準平板の法線方向に所定量ずつ平行移動させる移動ステージと、

前記基準平板に対して投影装置側に設けられ、前記平行移動の各位置において、前記所定の数の光源の各々に対して、前記投影装置により前記基準面に投影された前記格子模様の基準用画像と、前記計測対象に投影された前記格子模様の計測用画像とを撮影する撮影装置と、

前記平行移動の各位置において撮影された前記基準用画像の各画素に対して位相解析を行って前記格子模様の位相と前記基準平板の法線方向の位置との相関を求め、該相関において前記位相と前記基準平板の法線方向の位置が1対1に対応する前記基準平板の法線方向の位置範囲を特定して位相と空間座標とを1対1に対応づけるテーブルを作成するとともに、該テーブルと前記計測用画像とから前記計測対象の空間座標を求めることにより前記計測対象の形状を決定する解析装置と、
を備えることを特徴とする形状計測装置。

【請求項 3】

計測対象の形状を計測する形状計測装置であって、

所定の形状の格子模様を投影するための投影用光を発光する一列に並んだ4以上の所定の数の光源と、該所定の数の光源を該光源が並ぶ方向に所定の距離だけ移動させる光源移動手段と、該光源移動手段により移動された各位置において前記所定の数の光源から発光された投影用光を通過させて前記格子模様を形成する格子模様プレートとを有する投影装置と、

前記格子模様が投影される基準面を有する基準平板と、

前記基準平板を該基準平板の法線方向に所定量ずつ平行移動させる移動ステージと、

前記基準平板に対して投影装置側に設けられ、前記平行移動の各位置において、前記所定の数の光源の各々に対して、前記投影装置により前記基準面に投影された前記格子模様の基準用画像と、前記計測対象に投影された前記格子模様の計測用画像とを撮影する撮影装置と、

前記平行移動の各位置において撮影された前記基準用画像の各画素に対して位相解析を行って前記格子模様の位相と前記基準平板の法線方向の位置との相関を求め、該相関において前記位相と前記基準平板の法線方向の位置が1対1に対応する前記基準平板の法線方向の位置範囲を特定して位相と空間座標とを1対1に対応づけるテーブルを作成するとともに、該テーブルと前記計測用画像とから前記計測対象の空間座標を求めることにより前記計測対象の形状を決定する解析装置と、
を備えることを特徴とする形状計測装置。

【請求項 4】

前記光源は線状であることを特徴とする、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】

前記投影装置は、前記所定の数の光源の各々に対して発光された光を絞って通過させるピンホールを有するピンホール板を更に備えることを特徴とする、請求項1～4のいずれか一項に記載の形状計測装置。

【請求項 6】

所定の形状の格子模様を投影するための投影用光を発光する一列に並んだ3以上の所定の数の光源を有する形状計測装置により計測対象の形状を計測する形状計測方法であって

、

10

20

30

40

50

所定の形状模様が投影される基準面を有する基準平板を該基準平板の法線方向に所定量ずつ平行移動させるステップと、

前記平行移動の各位置において、前記所定の数の光源を切り替えることにより位相シフトを行いながら前記基準面に投影された前記格子模様の基準用画像を撮影するステップと、

撮影された前記基準用画像の各画素に対して位相解析を行って前記格子模様の位相と前記基準平板の法線方向の位置との相関を求め、該相関において前記位相と前記基準平板の法線方向の位置が1対1に対応する前記基準平板の法線方向の位置範囲を特定して位相と空間座標とを1対1に対応づけるテーブルを作成するステップと、

前記計測対象に投影された前記格子模様の計測用画像を撮影するステップと、

該テーブルと前記計測用画像とから前記特定された前記基準平板の法線方向の位置範囲に配置された前記計測対象の空間座標を求めて前記計測対象の形状を決定するステップと

を含む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、形状計測装置及び形状計測方法に関し、特に複数の光源を用いた高速かつ小型化された形状計測装置及びその形状計測方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

従来、物体や人体等の測定対象の形状を非接触かつ3次元的に計測する方法として、位相シフト法を用いた方法がある。位相シフト法は、格子模様画像や干渉縞画像を位相を変化させながら1台の撮影装置で順次撮影し、これら位相を変化させた複数枚の格子画像や干渉縞画像に基づいて格子模様の位相分布を求めるものである。

【0003】

これまでに、位相シフト法を用いた様々な方法が提案されてきた。例えば、特許文献1は、カメラを用いた形状計測装置において、カメラまたはプロジェクタのレンズ収差の影響を受けない高精度な形状計測を行うことを目的としており、格子模様が描かれた基準平板の画像からカメラまたはプロジェクタのレンズ中心座標を算出するのではなく、基準面に固定された2次元格子から、カメラの画素毎の視線が通る光路と、プロジェクタから投影される光の光路とをそれぞれ全て求めて、それら光路の交点として空間座標を算出する形状計測方法及び装置を開示している。

【0004】

また、特許文献2は、基準平板をその法線方向に微小量ずつ平行移動させたときの多数の基準面を2次元パターンの形成や、空間を分割して数値化できるパターンの投影に利用することにより、投影するパターンの輝度分布が余弦波状でなくても、投影するパターンのピッチが不等間隔であっても、精度良く形状計測を行うことができる方法を開示している。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特許第2913021号公報

【特許文献2】特開2008-281491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に記載の方法では、位相シフトを行うために格子基板を移動機構上に設けて格子基板を機械的に移動させるため、計測処理の高速化の点について改善の余地を有していた。また移動機構を設ける必要があるため、形状計測装置の小型化も困

10

20

30

40

50

難である。

【 0 0 0 7 】

また、特許文献2の方法は、液晶プロジェクタにより格子を投影して位相シフトを行うため、位相シフトに要する時間は液晶の応答速度により限定されてしまい、形状計測処理の高速化についての問題を残したままになっていた。また、格子模様の投影のために結像レンズが必要となるため、形状計測装置の小型化も困難である。

【 0 0 0 8 】

そこで、本発明は上記課題を鑑みてなされたものであり、測定対象の形状を高速に計測する小型化された形状計測装置及びその形状計測方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

10

【 0 0 0 9 】

発明者らは、上記課題を解決するための方途を鋭意究明した結果、一列に並んだ複数の光源を設け、光源を順次切り替えて投影された格子模様画像を撮影することが位相シフトを高速に行うことに対して有効であり、形状計測処理の高速化、更には形状計測装置の小型化にも繋がることを見出し、本発明を完成するに至った。

【 0 0 1 0 】

即ち、本発明の形状計測装置は、計測対象の形状を計測する形状計測装置であって、所定の形状の格子模様を投影するための投影用光を発光する一列に並んだ3以上の所定の数の光源と、前記投影用光を通過させて前記格子模様を形成する格子模様プレートとを有する投影装置と、前記格子模様が投影される基準面を有する基準平板と、前記基準平板を該基準平板の法線方向に所定量ずつ平行移動させる移動ステージと、前記基準平板に対して投影装置側に設けられ、前記平行移動の各位置において、前記所定の数の光源の各々に対して、前記投影装置により前記基準面に投影された前記格子模様の基準用画像と、前記計測対象に投影された前記格子模様の計測用画像とを撮影する撮影装置と、前記平行移動の各位置において撮影された前記基準用画像の各画素に対して位相解析を行って前記格子模様の位相と前記基準平板の法線方向の位置との相関を求め、該相関において前記位相と前記基準平板の法線方向の位置が1対1に対応する前記基準平板の法線方向の位置範囲を特定して位相と空間座標とを1対1に対応づけるテーブルを作成するとともに、該テーブルと前記計測用画像とから前記特定された前記基準平板の法線方向の位置範囲に配置された前記計測対象の空間座標を求めることにより前記計測対象の形状を決定する解析装置とを備えることを特徴とするものである。

20

30

【 0 0 1 1 】

また、本発明の形状計測装置は、計測対象の形状を計測する形状計測装置であって、所定の形状の格子模様を投影するための投影用光を発光する一列に並んだ5以上の所定の数の光源と、該所定の数の光源から4以上の光源を選択する光源選択手段と、該光源選択手段により選択された光源から発光された投影用光を通過させて前記格子模様を形成する格子模様プレートとを有する投影装置と、前記格子模様が投影される基準面を有する基準平板と、前記基準平板を該基準平板の法線方向に所定量ずつ平行移動させる移動ステージと、前記基準平板に対して投影装置側に設けられ、前記平行移動の各位置において、前記所定の数の光源の各々に対して、前記投影装置により前記基準面に投影された前記格子模様の基準用画像と、前記計測対象に投影された前記格子模様の計測用画像とを撮影する撮影装置と、前記平行移動の各位置において撮影された前記基準用画像の各画素に対して位相解析を行って前記格子模様の位相と前記基準平板の法線方向の位置との相関を求め、該相関において前記位相と前記基準平板の法線方向の位置が1対1に対応する前記基準平板の法線方向の位置範囲を特定して位相と空間座標とを1対1に対応づけるテーブルを作成するとともに、該テーブルと前記計測用画像とから前記計測対象の空間座標を求めることにより前記計測対象の形状を決定する解析装置とを備えることを特徴とするものである。

40

【 0 0 1 2 】

また、本発明の形状計測装置は、計測対象の形状を計測する形状計測装置であって、所定の形状の格子模様を投影するための投影用光を発光する一列に並んだ4以上の所定の数

50

の光源と、該所定の数の光源を該光源が並ぶ方向に所定の距離だけ移動させる光源移動手段と、該光源移動手段により移動された各位置において前記所定の数の光源から発光された投影用光を通過させて前記格子模様を形成する格子模様プレートとを有する投影装置と、前記格子模様が投影される基準面を有する基準平板と、前記基準平板を該基準平板の法線方向に所定量ずつ平行移動させる移動ステージと、前記基準平板に対して投影装置側に設けられ、前記平行移動の各位置において、前記所定の数の光源の各々に対して、前記投影装置により前記基準面に投影された前記格子模様の基準用画像と、前記計測対象に投影された前記格子模様の計測用画像とを撮影する撮影装置と、前記平行移動の各位置において撮影された前記基準用画像の各画素に対して位相解析を行って前記格子模様の位相と前記基準平板の法線方向の位置との相関を求め、該相関において前記位相と前記基準平板の法線方向の位置が 1 対 1 に対応する前記基準平板の法線方向の位置範囲を特定して位相と空間座標とを 1 対 1 に対応づけるテーブルを作成するとともに、該テーブルと前記計測用画像とから前記計測対象の空間座標を求めることにより前記計測対象の形状を決定する解析装置とを備えることを特徴とするものである。

10

【0013】

また、本発明の形状計測装置において、前記光源は線状であることを特徴とするものである。

【0014】

また、本発明の形状計測装置において、前記投影装置は、前記所定の数の光源の各々に対して発光された光を絞って通過させるピンホールを有するピンホール板を更に備えることを特徴とするものである。

20

【0015】

また、本発明の形状計測方法は、所定の形状の格子模様を投影するための投影用光を発光する一列に並んだ 3 以上の所定の数の光源を有する形状計測装置により計測対象の形状を計測する形状計測方法であって、所定の形状模様が投影される基準面を有する基準平板を該基準平板の法線方向に所定量ずつ平行移動させるステップと、前記平行移動の各位置において、前記光源を切り替えることにより位相シフトを行いながら前記基準面に投影された前記格子模様の基準用画像を撮影するステップと、撮影された前記基準用画像の各画素に対して位相解析を行って前記格子模様の位相と前記基準平板の法線方向の位置との相関を求め、該相関において前記位相と前記基準平板の法線方向の位置が 1 対 1 に対応する前記基準平板の法線方向の位置範囲を特定して位相と空間座標とを 1 対 1 に対応づけるテーブルを作成するステップと、前記計測対象に投影された前記格子模様の計測用画像を撮影するステップと、該テーブルと前記計測用画像とから前記特定された前記基準平板の法線方向の位置範囲に配置された前記計測対象の空間座標を求めて前記計測対象の形状を決定するステップとを含むことを特徴とするものである。

30

【発明の効果】

【0016】

本発明によれば、複数用意した光源を順次切り替えることにより位相シフトを高速に行うことができるため、高速かつ小型化された形状計測装置及び形状計測方法を提供することができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図 1】本発明の第 1 の実施形態による形状計測装置の構成を示す図である。

【図 2】液晶プロジェクタを使用した従来の形状計測装置の構成を示す図である。

【図 3】基準面撮影で得られた位相と z 座標との関係を示す図である。

【図 4】テーブル要素の作成方法を説明する図である。

【図 5】光源の間隔 l と格子の 1 周期の長さ p が同一の場合における基準面の撮影の様子を示す図である。

【図 6】光源の間隔 l と格子の 1 周期の長さ p が同一の場合における基準面の撮影の様子

50

を示す図である。

【図 7】カメラの x 座標 $x_c = 3l$ 、 $l = p$ の場合に対する位相と z 座標との関係を示す図である。

【図 8】カメラの x 座標 $x_c = 5l$ 、 $l = p$ の場合に対する位相と z 座標との関係を示す図である。

【図 9】カメラの x 座標 $x_c = 12l$ 、 $l = p$ の場合に対する位相と z 座標との関係を示す図である。

【図 10】光源の間隔 l と格子の 1 周期の長さ p がそれぞれ任意に設定された場合における基準面の撮影の様子を示す図である。

【図 11】光源の間隔 l と格子の 1 周期の長さ p がそれぞれ任意に設定された場合における基準面の撮影の様子を示す図である。

【図 12】カメラの x 座標 $x_c = 3l$ 、 $l = p$ の場合に対する位相と z 座標との関係を示す図である。

【図 13】カメラの x 座標 $x_c = 3l$ 、 $l = 5p$ の場合に対する位相と z 座標との関係を示す図である。

【図 14】カメラの x 座標 $x_c = 3l$ 、 $l = 10p$ の場合に対する位相と z 座標との関係を示す図である。

【図 15】本発明の形状計測方法のフローチャートを示す図である。

【図 16】 640×480 画素画像内の $i = 345$ 、 $j = 243$ に位置する画素における位相と z 座標との関係を示す図である。

【図 17】(a) ~ (c) は、それぞれ (a) 格子投影画像、(b) 位相分布画像、及び (c) z 座標分布画像である。

【図 18】基準面を再度撮影して得られた 640×480 画素画像における画素の横方向の位置 i と z 座標の関係を示す図である。

【図 19】全空間テーブル法のテーブル作成時に撮影された画像から得られた 640×480 画素画像における画素の横方向の位置 i と z 座標の関係を示す図である。

【図 20】(a) 及び (b) は、計測試料のそれぞれ (a) 写真、及び (b) 寸法図である。

【図 21】(a) ~ (c) は、計測試料の (a) 格子投影画像、(b) 位相分布画像、及び (c) z 座標分布画像である。

【図 22】本発明の第 2 の実施形態による形状計測装置に用いるライン状光源を示す図である。

【図 23】4 個の光源 0 ~ 3 の内の光源 0 による投影される格子パターンを示す図である。

【図 24】4 個の光源の各点光源によって投影される格子パターンを示す図である。

【図 25】図 24 の点 P における輝度変化の様子を示す図である。

【図 26】4 個の光源 2 ~ 5 の内の光源 2 による投影される格子パターンを示す図である。

【図 27】6 個の光源 0 ~ 5 の内の光源 0 および 2 による投影される格子パターンを示す図である。

【図 28】(a) 光源 0、および (b) 光源 2 により投影される格子パターンを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

ここで、本発明の実施形態について図面を参照して詳細に説明する。

[第 1 の実施形態]

まず、本発明の第 1 の実施形態の形状計測装置について説明する。図 1 に示す形状計測装置 100 は、投影装置 1 と、基準平板 2 と、移動ステージ 3 と、撮影装置 4 と、解析装置 5 とを備える。投影装置 1 は、3 以上の所定の数の光源 $11-1 \sim 11-N$ と、ピンホール板 12 と、格子模様プレート 13 とを有する。また、基準平板 2 は、投影装置 1 (撮

10

20

30

40

50

影装置 4) と同じ側に格子模様を投影するための基準面 2 1 を有する。

【 0 0 1 9 】

投影装置 1 は、計測対象 6 の形状を計測するための所定の格子模様を投影する。投影装置 1 は、一列に配置された所定の数の光源 1 1 - 1 ~ 1 1 - N を有しており、所定の格子模様を投影するための投影用光を発光する。投影装置 1 は、解析装置 5 から発光制御信号を受信して、光源 1 1 - 1 ~ 1 1 - N のいずれか 1 つのみが投影用光を発光するように制御する。光源の数 N は、位相シフト法による位相解析の要件から 3 以上とする。光源としては、例えば発光ダイオード (LED) を使用することができる。これらの光源 1 1 - 1 ~ 1 1 - N は一列に配置されており、光源間の間隔を全て等しく設定することも、それぞれの間隔を任意に設定することもできる。また、光源 1 1 - 1 ~ 1 1 - N から発光される投影用光の波長 (即ち色) は任意に設定できるが、一般に対象物の反射率が波長に対して一様ではない (即ち、表面に色を有している) ため、全ての光源が同一の波長の投影用光を発光することが好ましい。

10

【 0 0 2 0 】

ピンホール板 1 2 は、光源の数と同数のピンホールを有しており、各ピンホールは各光源に隣接するように配置されており、光源の各々から発光された投影用光を絞り、点光源として通過させる。ピンホールの径の大きさは特に限定されないが、投影装置 1 における 1 1 - 1 ~ 1 1 - N の各光源から発光された光が点光源としてピンホールを通過するように適切に設定する。好ましくは 0 . 5 mm とする。

【 0 0 2 1 】

格子模様プレート 1 3 は、ピンホール板 1 2 を通過した投影用光を通過させて基準平板 2 に所定の格子模様を投影する。格子模様プレート 1 3 は、例えばガラス基板上にクロム蒸着してロンキールリングと呼ばれる格子縞を描いたものとして行うことができる。格子模様の方向 (平行な格子が伸びる方向) は、光源 1 1 - 1 ~ 1 1 - N が並ぶ方向と垂直になるように構成する。

20

【 0 0 2 2 】

基準平板 2 は、移動ステージ 3 上に設置されており、図 1 に示す x y 平面と平行となるように構成されている。格子模様プレート 1 3 を通過した格子模様は、基準平板 2 の投影装置 1 側の面である基準面 2 1 に投影される。

【 0 0 2 3 】

移動ステージ 3 は、解析装置 5 からステージ制御信号を受信して、基準平板 2 を基準平板 2 の法線方向 (z 方向) に所定の微小量ずつ平行移動させる。移動ステージ 3 としては、例えば直動ステージを使用することができる。

30

【 0 0 2 4 】

撮影装置 4 は、基準平板 2 に対して投影装置 1 側に設けられており、全空間テーブル化手法におけるテーブルを作成する際には、基準平板 2 の平行移動の各位置において、光源 1 1 - 1 ~ 1 1 - N の各々に対して、投影装置 1 により基準面 2 1 に投影された格子模様の基準用画像を撮影する。また、計測対象 6 の形状を計測する際には、計測対象 6 に投影された格子模様の計測用画像を撮影する。撮影装置 4 としては、例えば CCD カメラを使用することができる。撮影された基準用画像及び計測用画像は解析装置 5 に出力される。

40

【 0 0 2 5 】

解析装置 5 は、基準平板 2 の平行移動の各位置において、撮影された基準用画像の各画素に対して、格子模様の位相と空間座標とを 1 対 1 に対応づけるテーブルを作成して記憶装置 (図示せず) に格納する。作成されたテーブルと計測用画像とから計測対象 6 の空間座標を求めることにより計測対象 6 の形状を決定する。また、解析装置 5 は、光源 1 1 - 1 ~ 1 1 - N のいずれか 1 つのみが投影用光を発光するように投影装置 1 を制御する発光制御信号や、所定量だけ平行移動するように移動ステージ 3 へのステージ制御信号を生成する。これらを所定のタイミングに合わせて投影装置 1 及び移動ステージ 3 に出力して撮影装置 4 により基準面 2 1 に投影された格子模様を撮影する。解析装置 5 としては、例えばパーソナルコンピュータ (PC) を使用することができる。

50

【0026】

このような形状計測装置100を使用することにより、投影装置1における光源11-1~11-Nを順次切り替えて位相シフトを高速に行うことができるため、測定対象6の形状を高速に計測することができる。また、光源11-1~11-NとしてLEDを使用でき、結像レンズを使用しないため、形状計測装置100を安価に小型化することができる。更に、機械的に動作する構成が少ないため、故障しにくい形状計測装置100を提供することができる。

【0027】

次に、形状計測装置100の動作について、本発明の形状計測方法の原理とともに説明する。ここで、本発明の形状計測方法において使用する位相シフト法について説明する。

10

【0028】

[位相シフト法]

位相シフト法とは、格子の位相を1周期の範囲でシフトさせながら、複数枚の格子模様画像(基準用画像)を撮影し、得られた基準用画像から格子模様の位相分布を求める位相解析手法である。全ての画素において輝度が1周期分変化するため、各点ごとに独立して輝度変化から位相値を求めることができる。つまり、周囲の画素の輝度変化に関わらず解析することができる。そのため、段差や不連続な箇所がある計測対象の形状計測に有効な手法である。

【0029】

画素の位置を (x, y) とすると、格子模様の輝度値 $I(x, y)$ は、一般に以下の式(1)で表される。

20

【数1】

$$I(x, y) = I_{\alpha}(x, y) \cos(\theta(x, y)) + I_b(x, y) \quad (1)$$

ここで、 $I(x, y)$ は格子模様の振幅、 $I_b(x, y)$ は背景輝度、 $\theta(x, y)$ は初期位相である。この輝度値の位相がシフトされるため、位相シフト量を α とすると、輝度分布は以下の式(2)で表される。

【0030】

【数2】

$$I(x, y) = I_{\alpha}(x, y) \cos(\theta(x, y) + \alpha) + I_b(x, y) \quad (2)$$

30

以下に、3枚の基準用画像を位相シフト法に適用する場合(即ち、位相シフトを3回行う場合)について説明する。この場合、3枚の画像の α の値は1周期を3分割した値となるので、それぞれ $0, 2\pi/3, 4\pi/3$ となる。この場合に対する輝度値をそれぞれ $I_0(x, y), I_1(x, y)$ 及び $I_2(x, y)$ とすると、これらはそれぞれ以下の式(3)~(5)で表される。

【0031】

【数3】

$$I_0(x, y) = I_{\alpha}(x, y) \cos\{\theta(x, y)\} + I_b(x, y) \quad (3)$$

40

【数4】

$$I_1(x, y) = I_{\alpha}(x, y) \cos\left\{\theta(x, y) + \frac{2\pi}{3}\right\} + I_b(x, y) \quad (4)$$

【数5】

$$I_2(x, y) = I_{\alpha}(x, y) \cos\left\{\theta(x, y) + \frac{4\pi}{3}\right\} + I_b(x, y) \quad (5)$$

この関係式から格子模様の位相値 $\theta(x, y)$ は、以下の式(6)から求めることができる。

50

【0032】

【数6】

$$\tan\theta(x,y) = \frac{\sqrt{3}(I_1(x,y) - I_2(x,y))}{2I_0(x,y) - I_1(x,y) - I_2(x,y)} \quad (6)$$

【0033】

こうして、式(6)を用いることにより、画素の位置(x, y)における3枚の画像から得られた輝度値 $I_0(x, y)$ 、 $I_1(x, y)$ 及び $I_2(x, y)$ から、撮影された格子模様の位相値(x, y)を求めることができる。

【0034】

本発明では、全空間テーブル化手法を用いて、上述のように求められた位相値から計測対象の空間座標を求める。以下、全空間テーブル化手法について説明する。

【0035】

[全空間テーブル化手法]

まず、図2に示すように、投影装置(液晶プロジェクタ)1により基準面21に格子模様を投影し、撮影装置(CCDカメラ)4により撮影する。この処理を投影された格子模様の位相をx軸方向に2/3ずつ変化させて計3回繰り返す。続いて、得られた3枚の画像に上述の位相シフト法を適用して位相分布を求める。

【0036】

次に、基準平板2(即ち基準面21)の位置をzずつ移動させ、同様に位相分布を求める。この時、基準面21のz座標が小さい方から $0, z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_{n-1}$ とする。ここでnは基準面21を移動させた回数である。基準面21の移動と撮影をn-1回繰り返すことにより $0 \sim z_{n-1}$ の範囲においてn個の位相分布が得られる。

【0037】

以上の作業により、図3に示すような各画素におけるz座標と位相の対応関係が得られる。本発明においては、図3に示すように、位相が2以上変化した場合には、位相の変化が2を超えない範囲におけるk個の要素を用いてテーブルを作成する。本発明においては、撮影装置4の画素毎に、基準面21に投影された格子模様の位相と計測対象6の形状を特定するための3次元座標とを対応付けすることを「校正(キャリブレーション)」と呼ぶ。

【0038】

上述の校正により得られたz座標と位相の対応関係から、図4に示すような、 $0 \sim 2$ の位相に対する位相とz座標の対応テーブルが得られる。テーブル要素には $0, 1, 2, \dots, j, \dots, k-1$ と番号を付け、それぞれの位相値を $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_j, \dots, \theta_{k-1}$ とする。ここで、kはテーブルの要素数である。テーブルの間隔は2をkで割った値となり、一定の間隔となっている。図4における θ_j のように基準面と基準面との間のテーブル要素は、隣り合うテーブル要素を直線近似することにより求める。また、 θ_0 のように位相が不連続で隣り合う要素が存在しない場合には、位相値が2に最も近いテーブル要素の位相から2を引いた要素を一時的要素として用いて直線近似することにより求める。

【0039】

こうして、測定対象6の形状を計測するための格子模様の位相と空間座標を対応づけるテーブルを作成することができる。得られたテーブルを使用することにより、測定対象6の形状計測を行うことができる。次に測定対象6の計測処理について説明する。

【0040】

測定対象6の形状計測は、まず投影装置1により計測対象6に格子模様を投影し、計測対象6へ投影した格子模様の位相を基準面21の場合と同様に求める。得られた格子模様の位相を割った商が参照すべきテーブルの番号であり、このテーブルを参照することにより計測対象6のz座標分布を求めることができる。

【0041】

10

20

30

40

50

xおよびy座標については、基準面に2次元格子を描いておくか、投影手段により投影し、その2次元格子のx方向およびy方向の位相値をそれぞれ求め、更に位相接続を行うことにより、各点におけるx座標およびy座標をそれぞれ得ることができる(例えば、特許第3281918号公報参照)。

【0042】

2次元格子パターンからx方向およびy方向の位相値を得る手法の1つにフーリエ変換格子法がある。また、基準面として表面に光拡散板を貼り付けた液晶パネルを用いることで、格子パターンを基準面上に表示することができ、格子パターンを撮影した画像から位相シフト法によって位相分布を求める手法もある。なお、位相シフト法以外の格子の位相を求める方法としては、フーリエ変換縞パターン解析法(M. Takeda and K. Mutoh, Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes, Applied Optics, 1983, Vol. 22, No. 24, pp. 3977-3982を参照)がある。

【0043】

こうして、基準面21の各位置毎に、投影格子の位相値に対する3次元座標(x, y, z座標)がそれぞれ画素毎に得られることになる。投影格子の位相値は、基準面の位置でしか得られないが、必要に応じて基準面の間隔を小さくして、その間を補間することで、全ての位相に対する3次元座標を精度良く求めることができる。このような全空間テーブル化手法により、投影された格子模様が余弦波にならないことによる計算誤差や、撮影装置4のレンズの歪曲収差の影響による誤差を回避できる。更に、テーブル参照を行うため画素毎の3次元座標の計算が不要であり、その参照も除算を1度行うだけで済むため、形状計測の解析に要する時間を大幅に短縮することができる。

【0044】

[複数の光源を用いた形状計測]

本発明においては、一列に配置された3以上の所定の数の光源11-1~11-Nを用いて位相シフトするため、輝度分布の計算方法は上述の場合とは多少異なる。ここでは光源を3個用いた場合を例に説明する。

【0045】

(光源の間隔と格子の1周期の長さが同じ値の場合)

まず、光源の間隔と格子の1周期の長さが同じ値の場合について考える。この場合における格子模様の撮影の概略図を図5及び図6に示す。これらの図に示すように、z軸に垂直な基準面21を考える。3個の光源を用いた場合、基準面21を平行移動させると、基準面21の移動の前後で投影された格子模様の位相が変化する。今、各光源を S_1 、 S_2 及び S_3 とし、光源11-1の座標を(0, y, 0)とする。座標(x, y, z)での投影された格子模様の輝度値をそれぞれ $I_1(x, y, z)$ 、 $I_2(x, y, z)$ 及び $I_3(x, y, z)$ 、また投影された格子模様の位相をそれぞれ $\theta_1(x, y, z)$ 、 $\theta_2(x, y, z)$ 及び $\theta_3(x, y, z)$ とする。式(1)から $I_1(x, y, z)$ 、 $I_2(x, y, z)$ 及び $I_3(x, y, z)$ はそれぞれ式(7)~(9)で表される。ただし、投影格子の輝度分布は余弦波状であるとする。

【数7】

$$I_1(x, y, z) = I_\alpha(x, y, z) \cos\{\theta_1(x, y, z)\} + I_b(x, y, z) \quad (7)$$

【数8】

$$I_2(x, y, z) = I_\alpha(x, y, z) \cos\{\theta_2(x, y, z)\} + I_b(x, y, z) \quad (8)$$

【数9】

$$I_3(x, y, z) = I_\alpha(x, y, z) \cos\{\theta_3(x, y, z)\} + I_b(x, y, z) \quad (9)$$

【0046】

10

20

30

40

50

ここで、光源の間隔を l 、格子の1周期の長さを p 、光源と格子の距離を d とする。また、 x 座標が $0, 1, 2l$ の時の格子の位相を ϕ_1, ϕ_2 及び ϕ_3 とする。今、 $\theta_1(x, y, z)$ (0, y, d) を 0 とすると $\theta_1(x, y, z)$, $\theta_2(x, y, z)$ 及び $\theta_3(x, y, z)$ は図6から式(10)~(12)で表される。また、図6から ϕ_1, ϕ_2 及び ϕ_3 は式(13)~(15)で表される。

【0047】

【数10】

$$\theta_1(x, y, z) = 2\pi \frac{d}{pz} x + \phi_1 \quad (10)$$

10

【数11】

$$\theta_2(x, y, z) = 2\pi \frac{d}{pz} (x-l) + \phi_2 \quad (11)$$

【数12】

$$\theta_3(x, y, z) = 2\pi \frac{d}{pz} (x-2l) + \phi_3 \quad (12)$$

【0048】

【数13】

$$\phi_1 = 0 \quad (13)$$

20

【数14】

$$\phi_2 = 2\pi \frac{l}{p} \quad (14)$$

【数15】

$$\phi_3 = 2\pi \frac{2l}{p} \quad (15)$$

30

【0049】

ここで、 $p = l$ であるため、式(10)~(15)より $\theta_1(x, y, z)$, $\theta_2(x, y, z)$ 及び $\theta_3(x, y, z)$ はそれぞれ式(16)~(18)となる。

【数16】

$$\theta_1(x, y, z) = 2\pi \frac{d}{lz} x \quad (16)$$

【数17】

$$\theta_2(x, y, z) = 2\pi \frac{d}{lz} (x-l) + 2\pi \quad (17)$$

40

【数18】

$$\theta_3(x, y, z) = 2\pi \frac{d}{lz} (x-2l) + 4\pi \quad (18)$$

【0050】

これらの式から求めた $I_1(x, y, z)$, $I_2(x, y, z)$ 及び $I_3(x, y, z)$ を式(6)に代入することにより格子模様の位相値 $\theta(x, y, z)$ を求めることができる。

【0051】

50

ここで、撮影装置4のレンズの位置を $(x_c, y, 0)$ とする。 x_c を $3l, 7l, 12l$ とした時の (x, y, z) と z の関係を図7～図9にそれぞれ示す。これらの図において、位相の変化が単調増加、あるいは単調減少となっている z の範囲で計測が可能である。例えば図8の場合 $4d$ から $6d$ の範囲は z に対してが単調増加であり、1対1に対応しているため計測可能な領域となる。そこで校正により格子模様の位相値と $4d \sim 6d$ の範囲を対応づけることにより、位相値から $4d \sim 6d$ の範囲にある z 座標を求めることが可能になる。また、 x_c の値を大きくすると撮影装置4から近い範囲では計測可能な領域は狭くなるが、撮影装置4から遠い範囲においても位相の変化量が大きくなるので計測は可能となる。

【0052】

10

このように、3個の光源を使用した場合にも、校正により格子模様の位相 (x, y, z) と z 座標とを対応づけることができ、計測対象6の形状を計測することが可能となる。上述のように、全空間テーブル化手法により、得られた位相 (x, y, z) から測定対象6の空間座標を求めることができる。

【0053】

(光源の間隔と格子の1周期の長さがそれぞれ任意である場合)

次に、光源の間隔と格子の1周期の長さが同一ではなくそれぞれ任意の値の場合について考える。この場合に対する格子模様の撮影の概略図を図10及び11に示す。この場合の $\theta_1(x, y, z)$ 、 $\theta_2(x, y, z)$ 及び $\theta_3(x, y, z)$ はそれぞれ式(19)～(21)から求められる。

20

【0054】

【数19】

$$\theta_1(x, y, z) = 2\pi \frac{d}{lz} x \quad (19)$$

【数20】

$$\theta_2(x, y, z) = 2\pi \frac{d}{lz} (x-l) + 2\pi \quad (20)$$

【数21】

$$\theta_3(x, y, z) = 2\pi \frac{d}{lz} (x-2l) + 4\pi \quad (21)$$

30

【0055】

ここで、撮影装置4の位置を $(3l, y, 0)$ とすると、 $l = p, 5p, 10p$ の場合の (x, y, z) と z 座標の関係をそれぞれ図12～14に示す。これらの図から、 l の値を p の値に比べて大きくすると、撮影装置4から近い範囲においては計測可能な領域は狭くなるが、撮影装置4から離れた領域においても位相の変化量が大きくなるため計測可能となる。

【0056】

このように、光源の間隔と格子の1周期の長さが同一ではない場合についても、格子模様の位相 (x, y, z) と z 座標とを対応づけることができ、計測対象6の形状を計測することが可能となる。上述のように、全空間テーブル化手法により、得られた位相 (x, y, z) から測定対象6の空間座標を求めることができる。

40

【0057】

以上の形状計測装置100の動作のフローチャートを図15に示す。

【0058】

[変位計測方法]

まず、ステップS1にて、移動ステージ3により、基準平板2(即ち基準面21)を所定の位置に移動させる。

【0059】

50

次に、ステップS 2にて、投影用光を発光する光源1 1 - 1 ~ 1 1 - Nを切り替えて位相シフトしながら、撮影装置4により複数枚の格子模様画像（基準用画像）を撮影し、得られた画像を解析装置5に出力する。

【0060】

続く、ステップS 3にて、解析装置5により、撮影された複数枚の基準用画像から格子模様の位相分布を求めるとともに、基準面2 1に形成された2次元格子のx方向およびy方向の位相値をそれぞれ求め、さらに位相接続を行うことにより、各点におけるx座標およびy座標も求めて格納する。

【0061】

基準格子2（即ち基準面2 1）を所定の移動量だけ平行移動させて、ステップS 1 ~ S 3の処理を所定の回数だけ繰り返す。

10

【0062】

ステップS 4にて、解析装置5により、格子模様の位相と空間座標とを対応付けして、撮影装置4の各画素に対して形状計測に必要なテーブルが作成される。

【0063】

ステップS 5にて、テーブルの作成を終了するか否かの判断をし、テーブル作成を続ける場合にはステップS 1に、終了する場合にはステップS 6に進む。

【0064】

続いて、計測対象6の形状を計測する。まず、ステップS 6にて、基準平板2を計測の障害にならない位置まで後退させて、計測対象6を適切な位置に配置する。

20

【0065】

次に、ステップS 7にて、撮影装置4により、投影用光を発光する光源1 1 - 1 ~ 1 1 - Nを切り替えて位相シフトしながら、複数枚の計測対象6に投影された格子模様画像（計測用画像）を撮影し、得られた計測用画像を解析装置5に出力する。

【0066】

続くステップS 8にて、解析装置5により、ステップS 4にて作成されたテーブルと計測用画像の各画素の位相とから計測対象6の空間座標を求める。

【0067】

このように、投影装置1における光源1 1 - 1 ~ 1 1 - Nを順次切り替えることにより位相シフトを高速に行うことができ、測定対象6の形状を高速に計測することができる。

30

【0068】

[形状計測結果]

図1に示す形状計測装置100を使用して計測対象6の形状を計測した。そのために、まず投影装置1により基準面2 1に投影された格子模様の画像（基準用画像）を撮影装置4により撮影して全空間テーブル化手法において使用するテーブルを作成した。その際の条件は以下の通りである。

- 1．LED光源の間隔： $l = 20 \text{ mm}$
- 2．投影装置1と格子模様プレート1 3との距離： $d = 30 \text{ mm}$
- 3．撮影装置4（CCDカメラ）と基準平板2との距離： 200 mm
- 4．基準平板2の移動間隔： 0.25 mm
- 5．基準平板2を撮影した枚数： 61 枚
- 6．基準平板2のz方向の移動範囲： 15 mm
- 7．作成したテーブルの要素数： 300

40

【0069】

ここで、作成したテーブルと、その作成に用いた 640×480 画素の画像（画像内の画素の座標を、画像の角を原点として横方向*i*、縦方向*j*で表す）の中央付近の画素（ $i = 345$ 、 $j = 243$ ）を抽出し、抽出した画素に対する位相とz座標の関係を調べると図16のようになる。このように、抽出された画素に対して位相が求めれば、z座標を決定することができる。

【0070】

50

計測対象 6 の形状を計測する前に、形状計測装置 100 により、どの程度の精度で測定対象 6 の形状を計測することができるかを調べた。そのために、基準平板 2 の画像を再度撮影して基準平板 2 の z 座標を求めた。その際、基準平板 2 の z 方向の位置は $z = 2.5 \text{ mm}$ 、 5.0 mm 、 7.5 mm 、 10.0 mm 及び 12.5 mm とした。図 17 は、基準平板 2 の z 方向の位置が $z = 7.5 \text{ mm}$ の場合に対する基準平板 2 の (a) 格子投影画像、(b) 位相分布画像、及び (c) z 座標分布画像をそれぞれ示している。図 18 は、図 17 (c) の任意の横 1 ラインの z 座標を抜き出したものである。また、テーブル作成時に撮影された基準用画像から求めた z 座標分布から、任意の横 1 ラインを抜き出したものを図 19 に示す。得られた z 座標の平均値と理想値との誤差、及び標準偏差の関係を表 1 に示す。このように、作成されたテーブルを参照することにより、位相シフト法により求められた位相から、z 座標を非常に小さな誤差及び標準偏差で求められることが分かった。

【0071】

【表 1】

計測した基準面 21 の位置 [mm]	平均 [mm]	誤差 [mm]	標準偏差 [mm]
基準面 21 の撮影を再度行って求めた z 座標分布			
2.50	2.523	0.023	0.334
5.00	4.931	-0.069	0.205
7.50	7.493	-0.007	0.159
10.00	9.890	-0.110	0.160
12.50	12.367	-0.133	0.167
テーブル作成時の基準用画像から求めた z 座標分布			
2.50	2.483	-0.017	0.115
5.00	4.979	-0.021	0.033
7.50	7.469	-0.031	0.024
10.00	9.959	-0.041	0.029
12.50	12.450	-0.050	0.021

【0072】

そこで、計測対象 (計測試料) 6 の形状を計測した。計測試料 6 は、その中央部に 1.00 mm の段差を 3 段有し、また光沢のある金属物体を使用した。使用した計測試料 6 の写真及び寸法図を図 20 に示す。

【0073】

計測試料 6 の形状計測により得られた投影された格子模様画像、位相分布画像及び z 座標分布画像を図 21 (a) ~ (c) にそれぞれ示す。図 21 (c) で示した領域 A ~ D の段の実測値、平均値、A の段との段差及び実測値との誤差を表 2 に示す。尚、表 2 に示す実測値とは、レーザ変位計により測定された値である。このように、本発明の形状計測装置 100 により、最大約 0.05 mm の小さな誤差で計測試料 6 の形状を計測できた。

【0074】

【表 2】

領域	実測値 [mm]	平均値 [mm]	A との段差 [mm]	誤差 [mm]
A	0.000	4.473	0.000	0.000
B	0.998	5.423	0.950	-0.048
C	1.996	6.456	1.983	-0.013
D	2.995	7.423	2.950	-0.045

【0075】

[第 2 の実施形態]

第1の実施形態においては、投影装置1に含まれる光源として、例えばLEDからなる光源11-1~11-N及びピンホール板12を用いて点光源として構成したが、図22に示すような複数のライン状の光源31-1~31-Nを使用することもできる。この場合にも、ラインの数は、第1の実施形態の場合と同様に3以上とする。また、各ライン間の間隔を全て等しく設定することも、それぞれの間隔を任意に設定することもできる。

【0076】

ライン31-1~31-Nは、解析装置5により、そのいずれか1つのみが投影用光を発光するように制御される。また、光源31-1~31-Nから発光される投影用光の波長(即ち色)は任意に設定できるが、全ての光源が同一の波長の投影用光を発光することが好ましい。このようなライン状の光源を使用することにより、点光源を使用した場合と比較して、基準面21に投影された格子模様の輝度が高くなり、また光源が伸びる方向において一定となる。また、点光源では光源間隔を狭くするのは限界があるが、ライン状の場合にはそれが容易であり、位相シフトの数も増加させて計測精度を向上させることもできる。

10

【0077】

[第3の実施形態]

第1及び第2の実施形態においては、例えば図8(a)に示すように、位相値が0~2の範囲内にあるz座標と位相値との関係が得られ、校正により格子模様の位相値と4d~6dの範囲を対応づけることにより、位相値から4d~6dの範囲に設置された計測対象の形状(z座標)を求めることができる。しかしながら、設置された計測対象のz座標が4d~6dの範囲にない場合には、位相が求められた場合にも対応するz座標を得ることができない。つまり、計測可能なz座標の範囲が4d~6dに制限されてしまう。そこで、第3の実施形態は、計測可能なz座標の範囲を拡大する方途を提供する。即ち、等間隔に配置された少なくとも5以上の光源を用意し、そのうち連続する4つの光源を用いて4回以上の位相シフトを連続する光源の位置をずらして2回行い、それぞれについて得られた格子模様の位相値とz座標との関係から位相接続することが可能となり、計測可能なz座標の範囲を拡大することができる。以下に光源を6個使用した場合を例に説明する。

20

【0078】

位相シフト回数が4回以上あれば、位相シフト量が分からなくとも初期位相が求まる。つまり、1周期を整数で等分するのではなくても、位相シフト量がコンスタントのとき、光源0から作られる光の位相値が求まる(例えば、喜多俊行、藤垣元治、松井徹、森本吉春、「光学的縞画像解析における等速位相シフト法による位相解析」、日本実験力学会2005年度年次講演会講演論文集、pp.204-207を参照)。

30

【0079】

ここで、図23に示すように、光源0からx方向に合計4つの光源が等間隔で一列に並んでいるとする。また、カメラのある1画素が、図中x=8付近の縦線上を撮影するとする。この場合、光源0によって投影される格子パターンの縦線上における位相値は図28(a)のようになる。

【0080】

図24に、それぞれの点光源によって投影される格子パターンを重ねたものを示す。図25は、図24の点Pにおける輝度変化の様子を示している。点Pにおける輝度は、点灯する光源を光源0から光源3まで順番に変えた場合に、図26に示すような輝度の変化となる。図25において、光源nによって投影される格子パターンを撮影したときの輝度を I_n とする。図25において、 $I_{n+1} - I_n =$ となる。

40

【0081】

図26に示すように、光源2から右方向に合計4つの光源が並んでいる場合、光源2によって投影される格子パターンの縦線上における位相値は図28(b)のようになる。また、光源0と光源2によってそれぞれ投影される格子パターンは図27のようになる。図28に示すように、撮影が光源0から始まる場合と光源2から始まる場合で、異なる位相とz座標の対応関係が得られるため、位相接続が可能となる。

50

【 0 0 8 2 】

具体的には、光源 0、光源 1、光源 2 および光源 3 の光源が並んでいるときの光源 0 によって投影される格子パターンの縦線上における位相値を a とし、光源 2、光源 3、光源 4 および光源 5 の光源が並んでいるときの光源 2 によって投影される格子パターンの縦線上における位相値を b とするとき、 a および b と対応する z 座標は複数ある。このとき、 a に対応する z 座標と b に対応する z 座標が一致する場所が、求める z 座標となる。こうして位相値と z 座標との関係について位相接続できるため、計測可能な z 座標の範囲を大きく拡大することができる。従って、上述の全空間テーブル化手法により、位相接続された位相と z 座標との関係を予め用意しておくことにより、より広い z 座標の範囲において、位相値から計測対象の z 座標を求めて計測対象の形状を計測することができる。

10

【 0 0 8 3 】

尚、5 個以上の光源を等間隔で一列に並べる際に、一列に並ぶ 4 つ以上の光源を複数用意して一列に並べるように構成しても良いことは言うまでもない。また、一列に並ぶ 4 つ以上の光源を使用して 4 回以上の位相シフトさせた後に、4 つ以上の光源を光源が並ぶ方向に対して平行に光源を物理的に移動させる手段により、4 つ以上の光源を所定の距離だけ移動させた後に、再び 4 回以上の位相シフトを行うようにすることもできる。

【 産業上の利用可能性 】

【 0 0 8 4 】

本発明によれば、複数用意した光源を順次切り替えることにより位相シフトを高速に行うことができ、計測対象の形状を高速に計測できるため、電子部品の検査、人体計測、医療用計測、及び小型生物の立体観察や立体計測等に有用である。

20

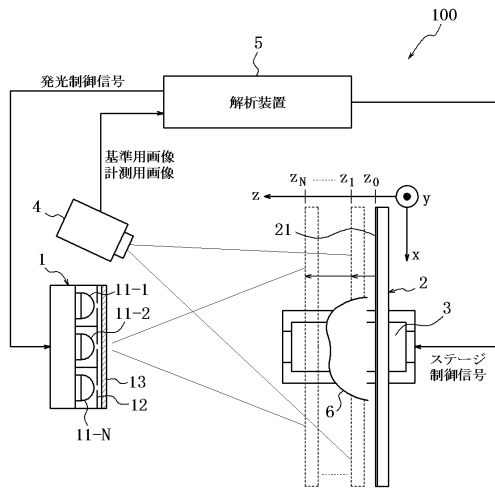
【 符号の説明 】

【 0 0 8 5 】

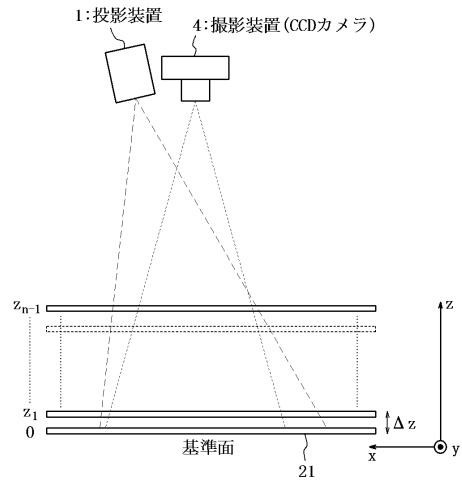
- 1 投影装置
- 2 基準平板
- 3 移動ステージ
- 4 撮影装置
- 5 解析装置
- 6 計測対象
- 1 1 - 1 ~ 1 1 - N 光源
- 1 2 ピンホール板
- 1 3 格子模様プレート
- 2 1 基準面
- 3 1 - 1 ~ 3 1 - N ライン状光源
- 1 0 0 形状計測装置

30

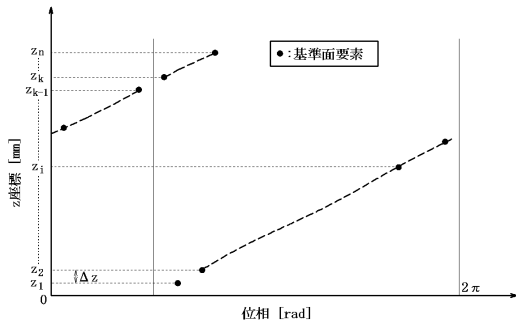
【図1】



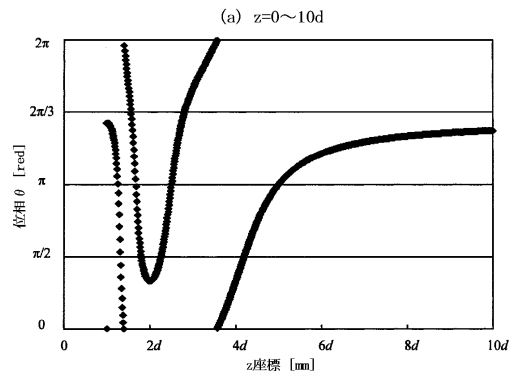
【図2】



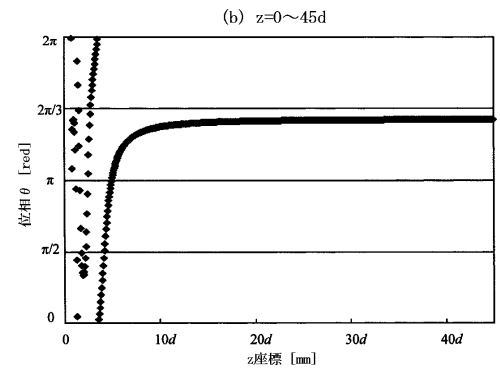
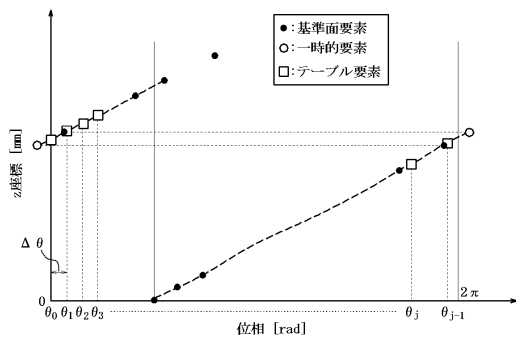
【図3】



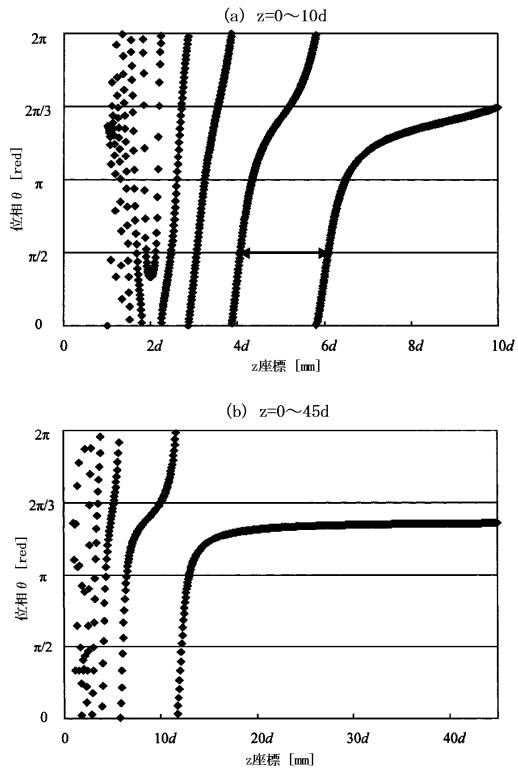
【図7】



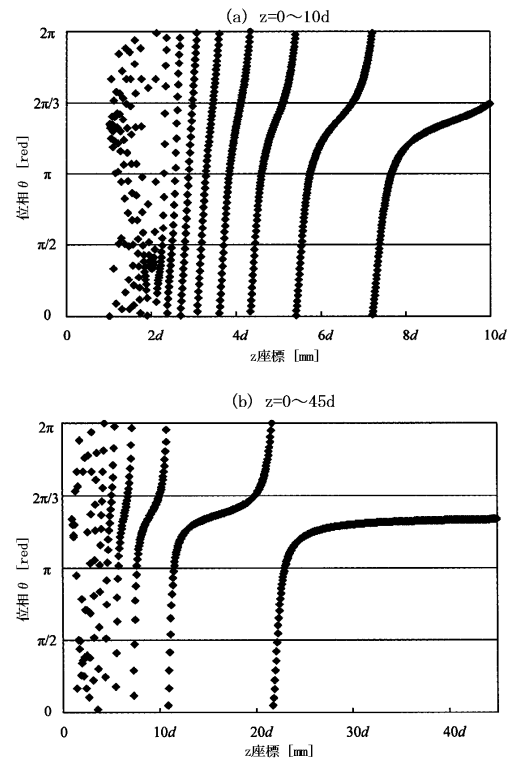
【図4】



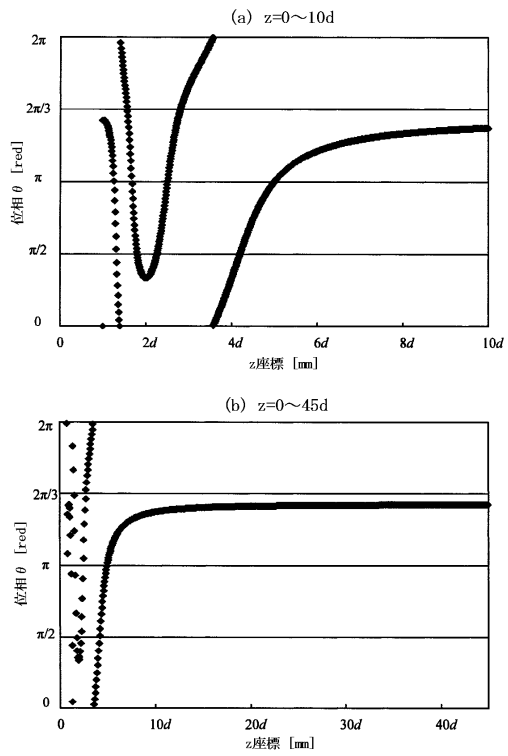
【 図 8 】



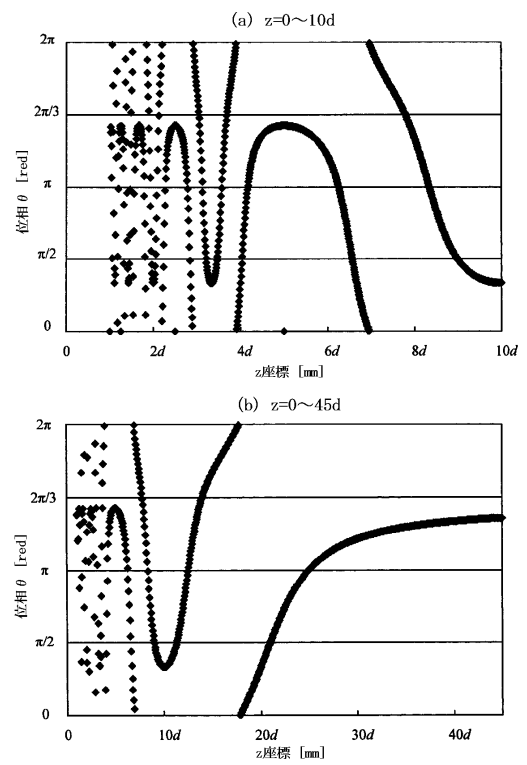
【 図 9 】



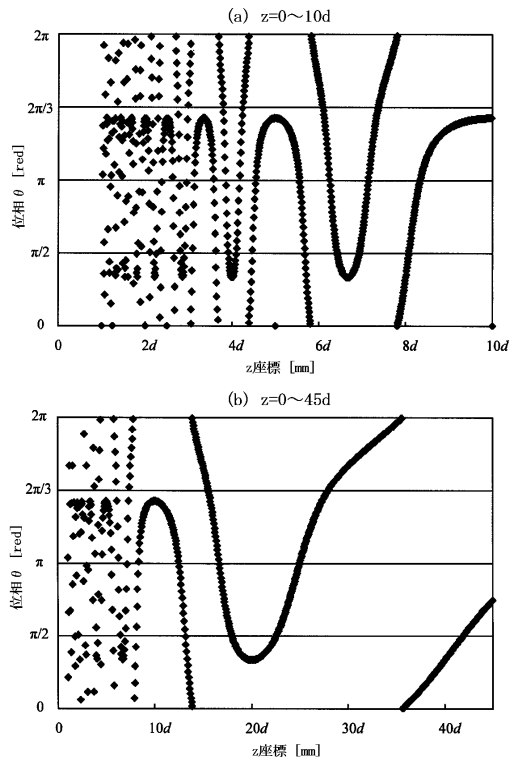
【 図 1 2 】



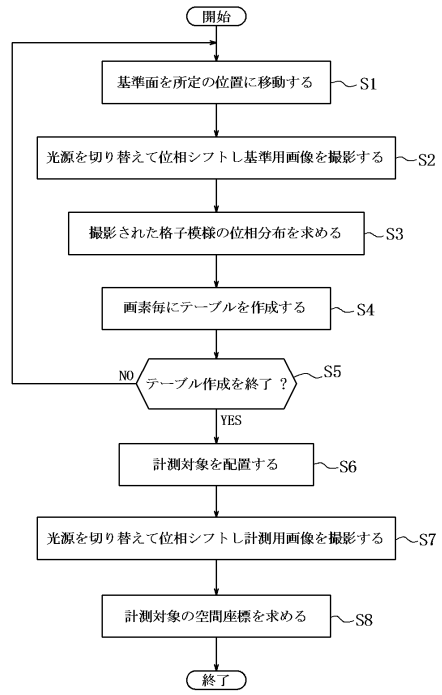
【 図 1 3 】



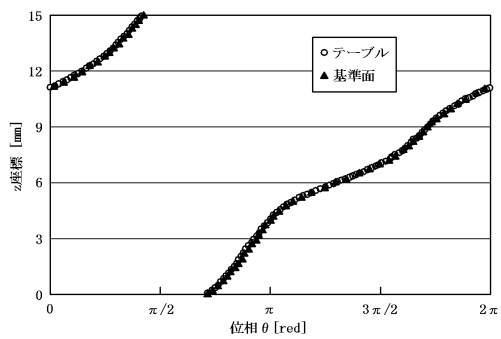
【図14】



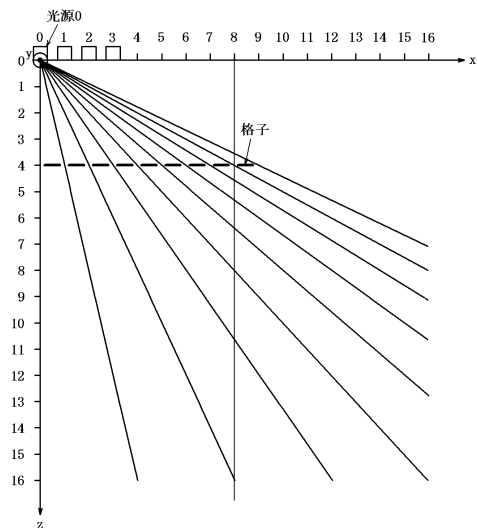
【図15】



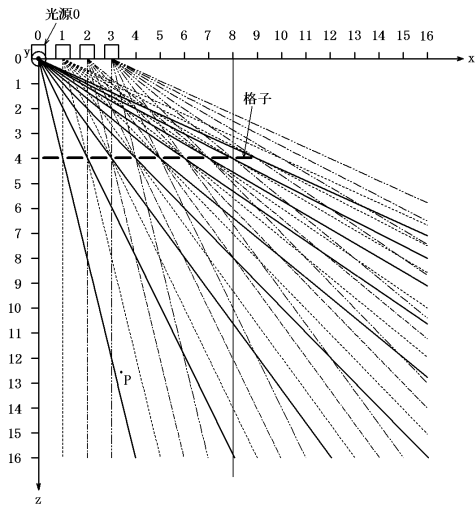
【図16】



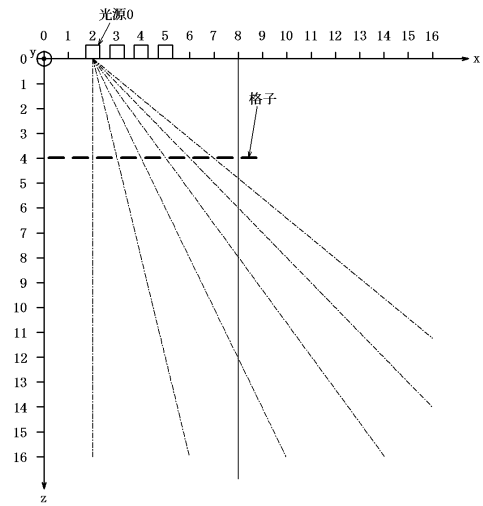
【図23】



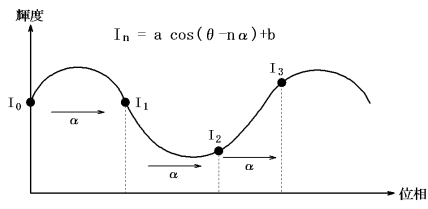
【 図 2 4 】



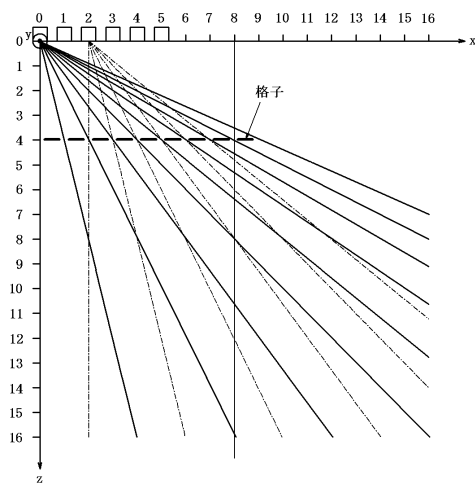
【 図 2 6 】



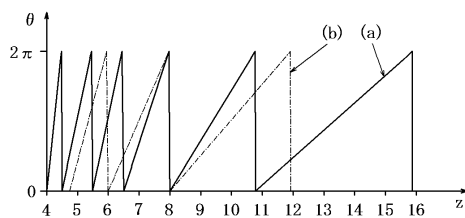
【 図 2 5 】



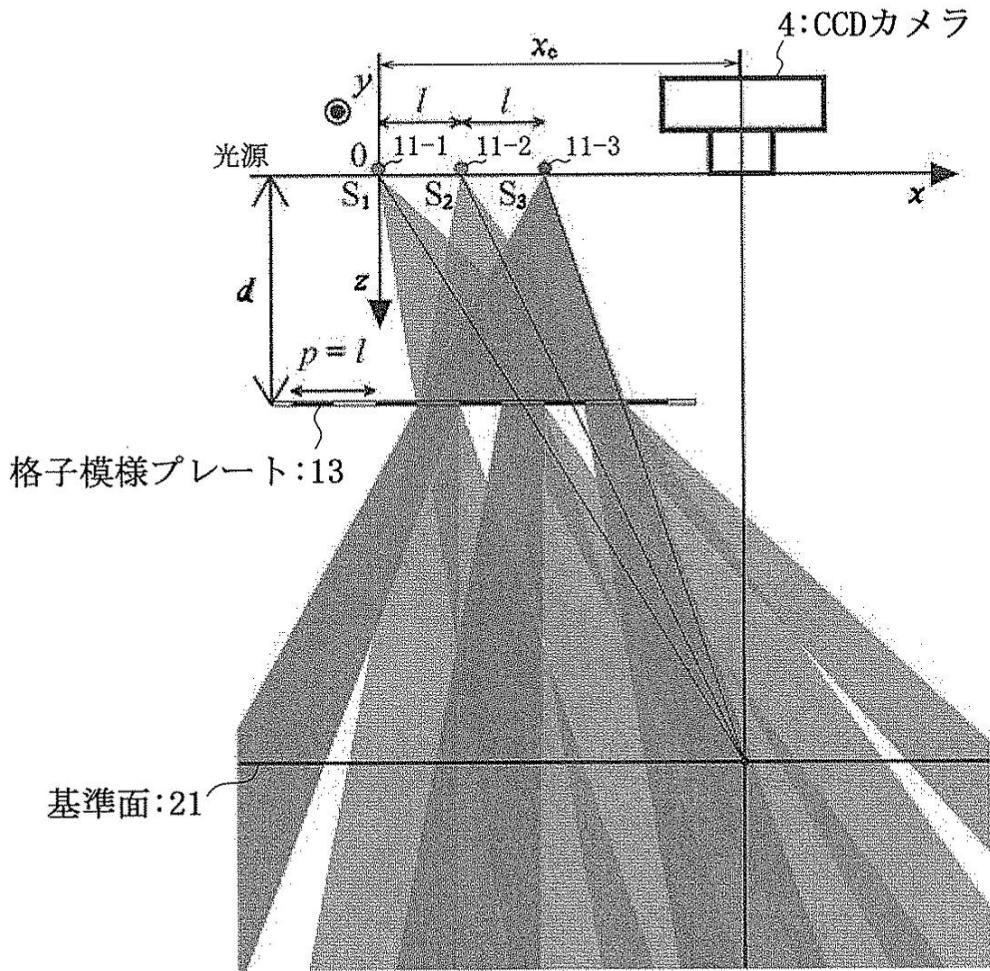
【 図 2 7 】



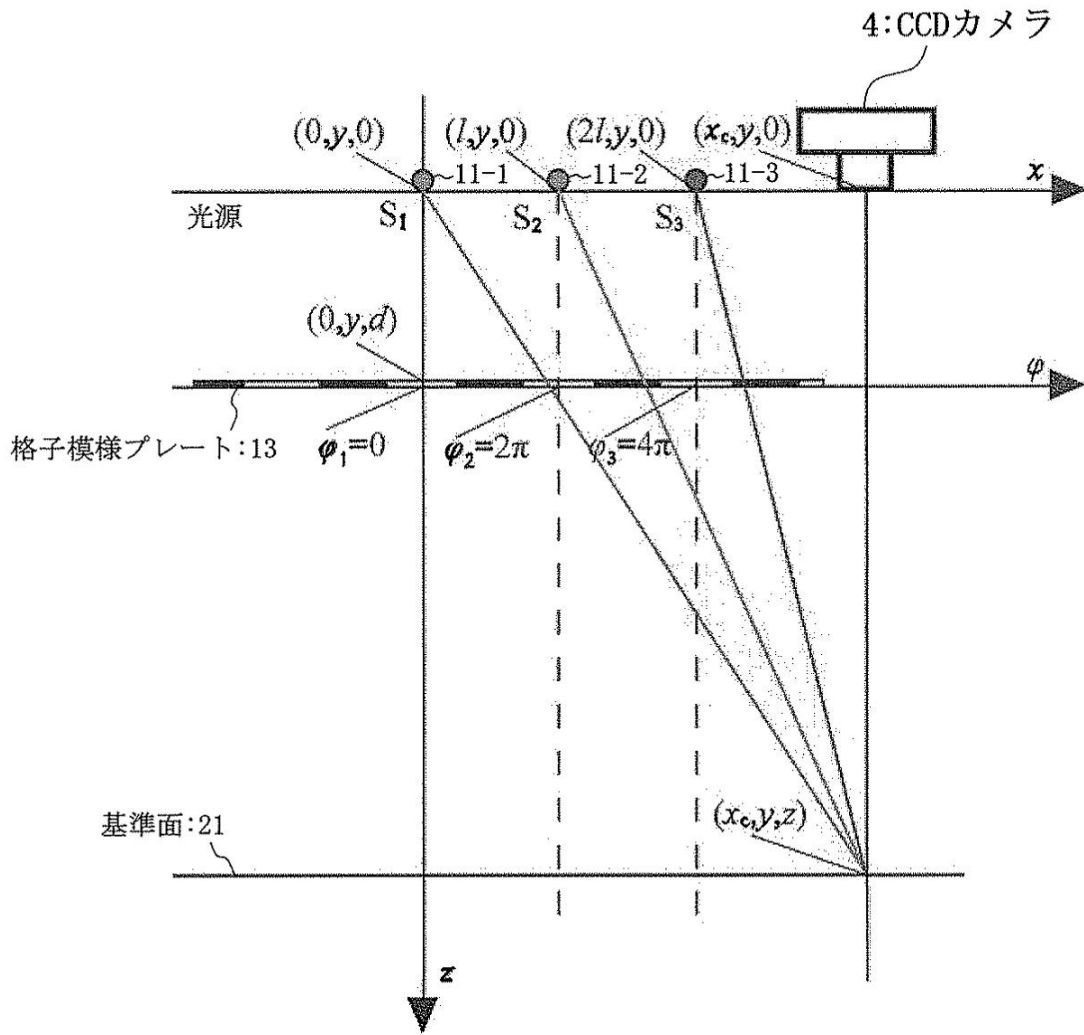
【 図 2 8 】



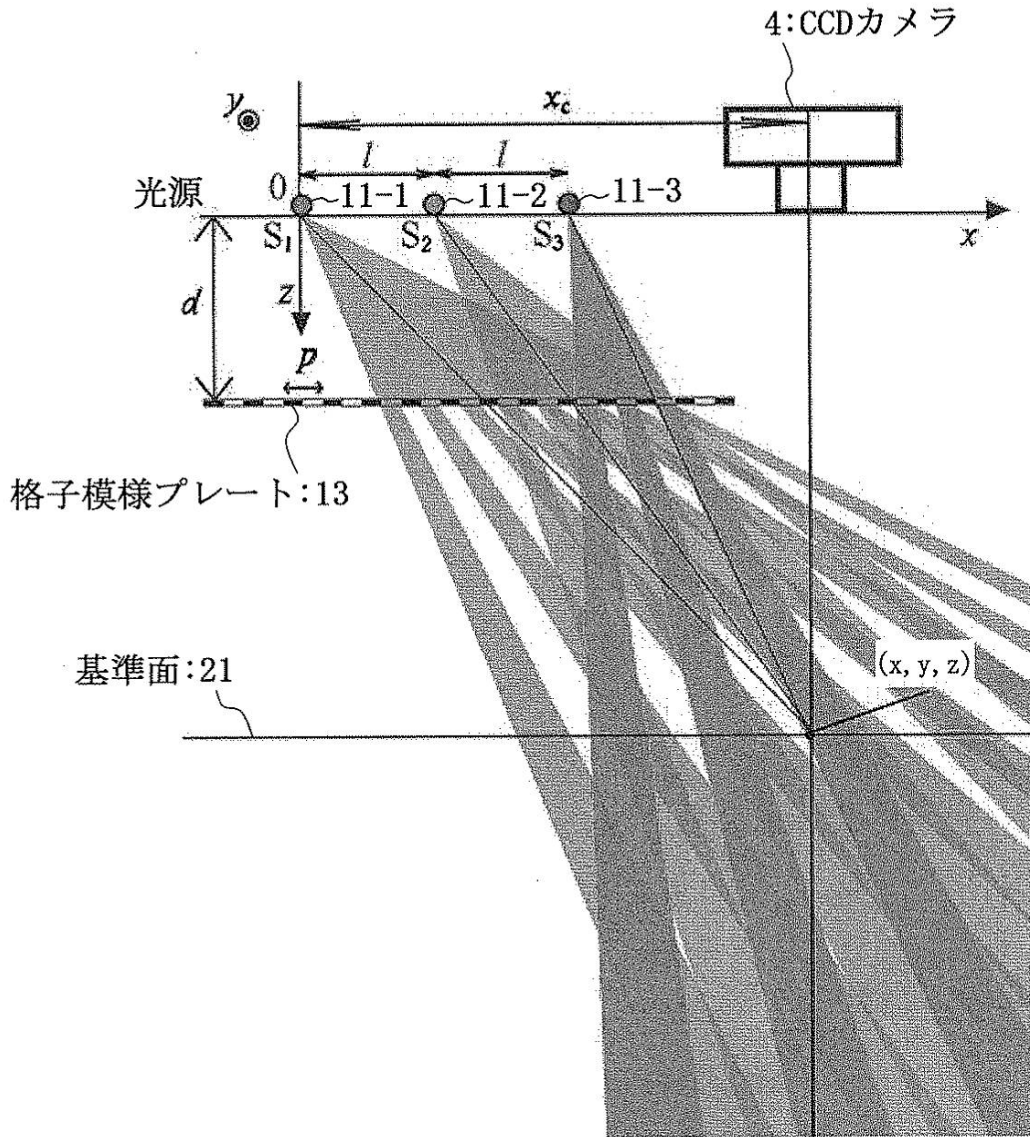
【図5】



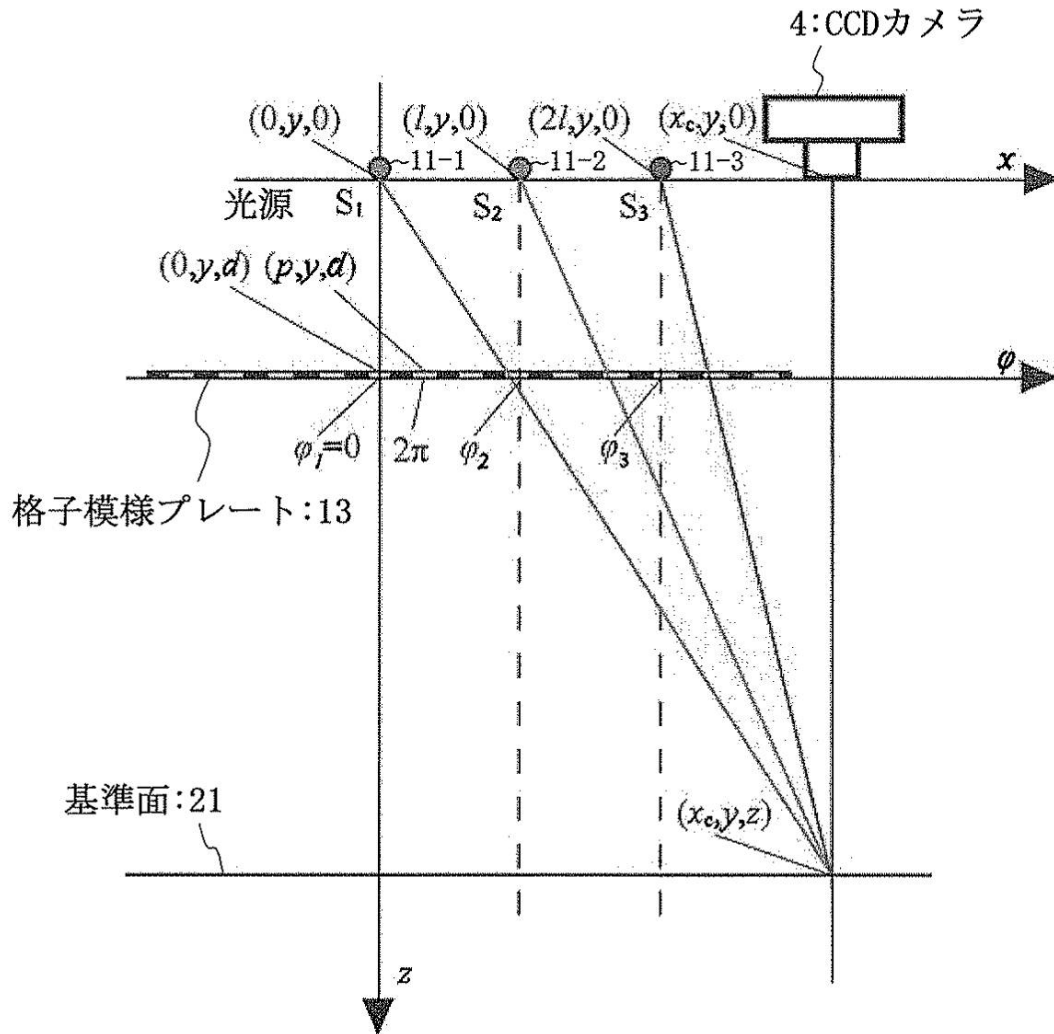
【図6】



【図10】

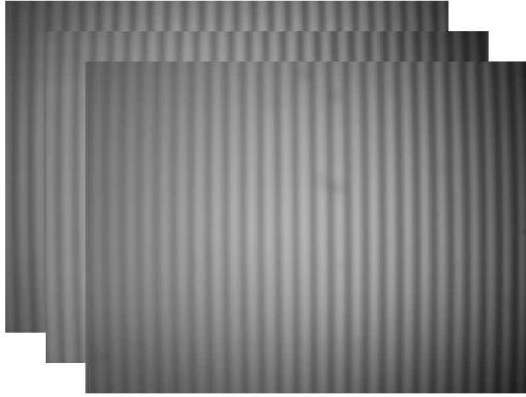


【図11】

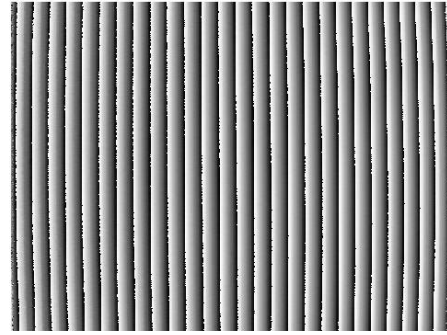


【図 17】

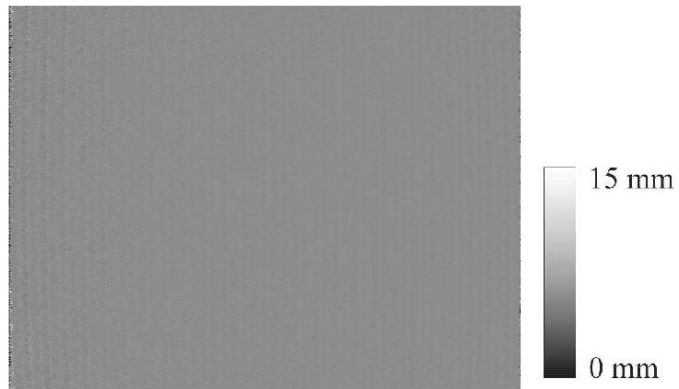
(a)
格子投影画像



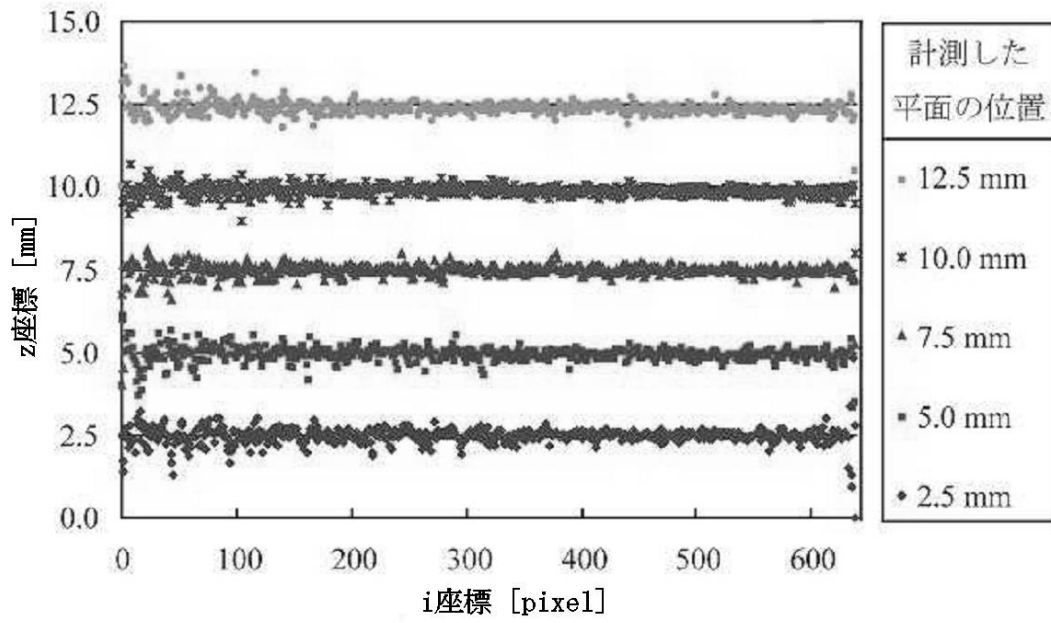
(b)
位相分布画像



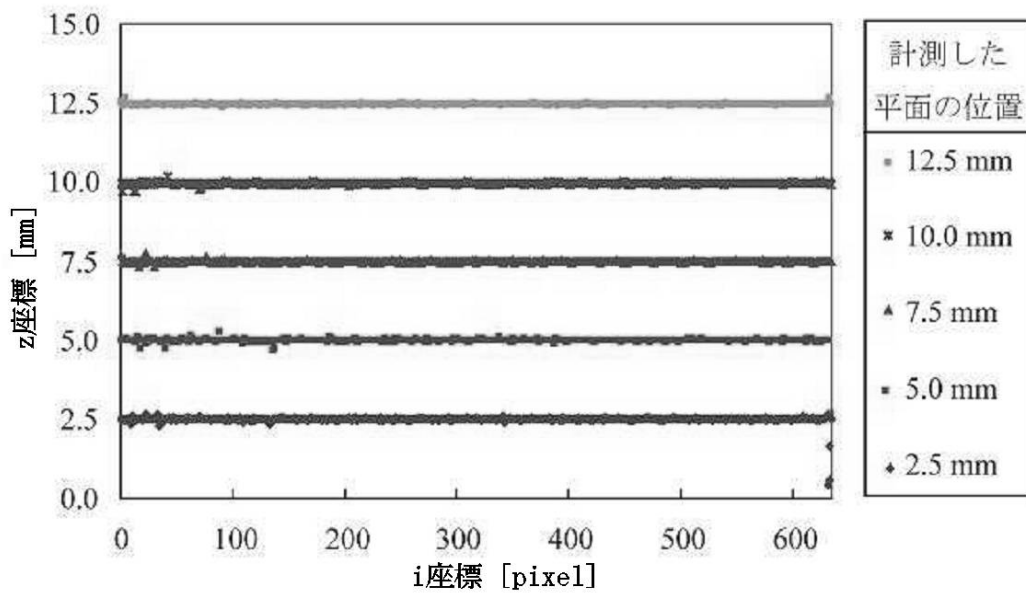
(c)
z座標分布画像



【 図 1 8 】

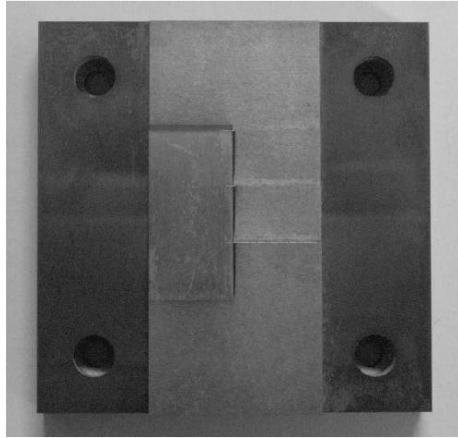


【 図 1 9 】

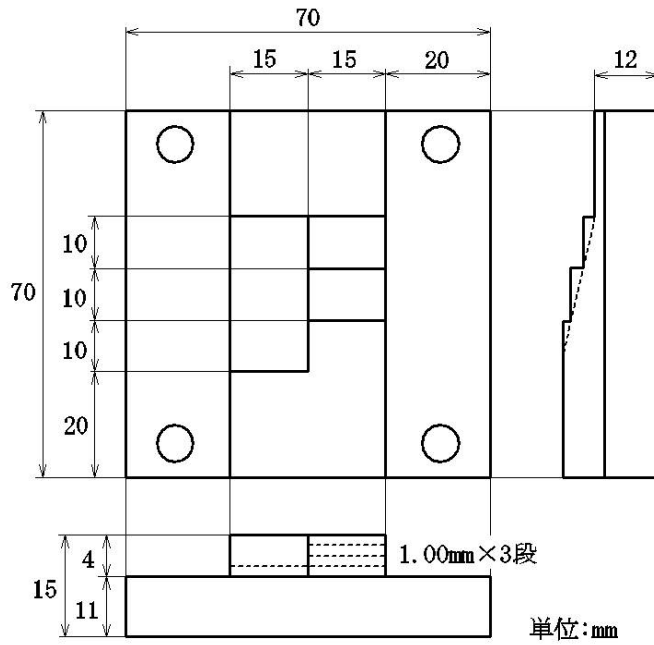


【 図 2 0 】

(a)

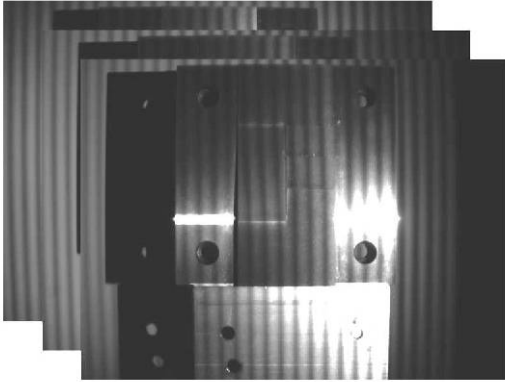


(b)

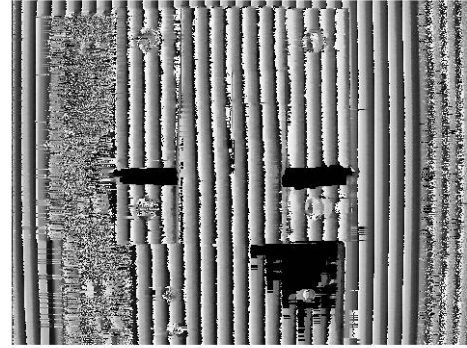


【図 2 1】

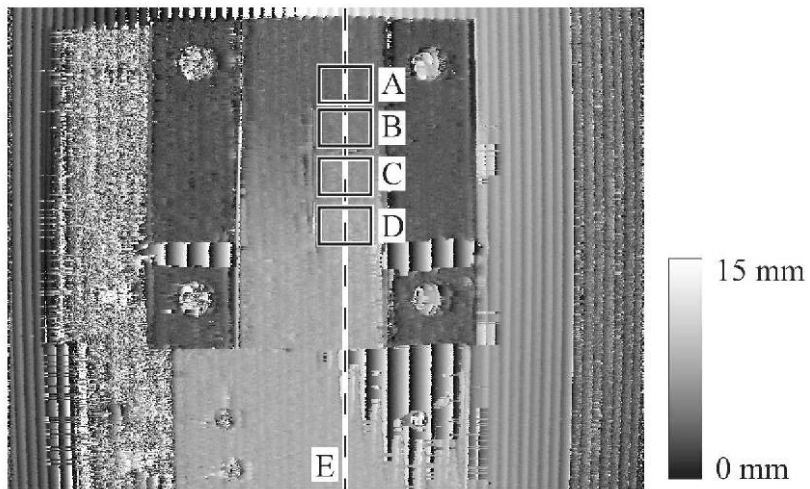
(a)
格子投影画像



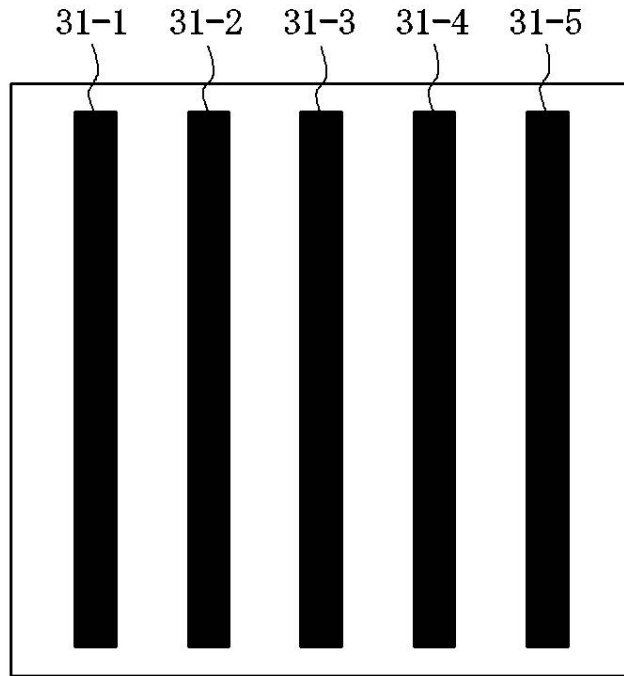
(b)
位相分布画像



(c)
z座標分布画像



【 図 2 2 】



フロントページの続き

(72)発明者 網野 祐輝

和歌山県和歌山市西庄205-30

審査官 須中 栄治

(56)参考文献 特開2008-281491(JP,A)

特開2004-053532(JP,A)

特開2000-292131(JP,A)

特開2009-097941(JP,A)

特表2010-537183(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01B11/00-11/30