

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2014-178233

(P2014-178233A)

(43) 公開日 平成26年9月25日(2014.9.25)

(51) Int.Cl. F I テーマコード (参考)  
**GO 1 B 11/25 (2006.01)** GO 1 B 11/25 H 2 F 0 6 5  
**GO 1 B 11/24 (2006.01)** GO 1 B 11/24 K

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2013-52891 (P2013-52891)  
 (22) 出願日 平成25年3月15日 (2013.3.15)

(71) 出願人 000006666  
 アズビル株式会社  
 東京都千代田区丸の内2丁目7番3号  
 (74) 代理人 100079108  
 弁理士 稲葉 良幸  
 (74) 代理人 100109346  
 弁理士 大貫 敏史  
 (74) 代理人 100117189  
 弁理士 江口 昭彦  
 (74) 代理人 100134120  
 弁理士 内藤 和彦  
 (72) 発明者 井上 和久  
 東京都千代田区丸の内2丁目7番3号 アズビル株式会社内

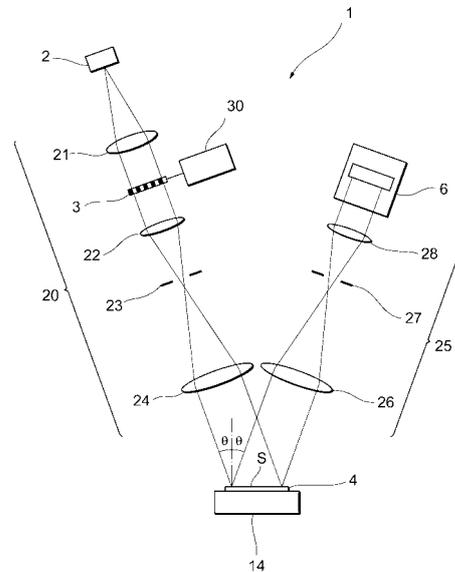
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 形状測定装置及び形状測定方法

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】簡単な装置構成でありながら、広い高さ範囲を高い精度で測定することが可能な形状測定装置、及び形状測定方法を提供する。

【解決手段】形状計測装置1は、被測定物4の表面Sに照射する光を発生させる光源2と、表面Sに格子パターンが投影されるよう、光源2と被測定物4との間に配置される格子3と、投影された格子パターンが変化するように、格子3を所定方向に移動させる格子移動手段(格子駆動装置30)と、上記所定方向に対する格子3の角度が変化するように、格子3を回転させる格子回転手段(格子駆動装置30)と、を備えている。格子3の角度を第一角度 $\theta$ とした状態において投影された格子パターンの位相分布である位相分布  $1(x, y)$  と、格子3の角度を第二角度とした状態において投影された格子パターンの位相分布である位相分布  $2(x, y)$  と、に基づいて、表面Sの高さ分布  $H(x, y)$  を算出する。



【選択図】 図1

**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

物体の表面に投影された格子パターンに基づいて、当該物体の表面形状を計測する形状測定装置において、

物体の表面に照射する光を発生させる光源と、

前記物体の表面に格子パターンが投影されるよう、前記光源と前記物体との間に配置される格子と、

投影された前記格子パターンが変化するように、前記格子を所定方向に移動させる格子移動手段と、

前記所定方向に対する前記格子の角度が変化するように、前記格子を回転させる格子回転手段と、を備え、

前記所定方向に対する前記格子の角度を第一角度とした状態において投影された前記格子パターンの位相分布である第一位相分布と、

前記所定方向に対する前記格子の角度を第二角度とした状態において投影された前記格子パターンの位相分布である第二位相分布と、

に基づいて、前記物体の表面における高さの分布を算出することを特徴とする形状測定装置。

10

**【請求項 2】**

前記第一位相分布と前記第二位相分布との差である位相差分布を算出する位相差算出部と、

前記位相差分布が所定範囲において連続となるように、前記位相差分布に対して連続化処理を行う第一処理部と、

を更に備えたことを特徴とする、請求項 1 に記載の形状測定装置。

20

**【請求項 3】**

前記連続化処理が施された後の前記位相差分布に基づいて、前記第一位相分布に対して位相接続処理を行う第二処理部を更に備えたことを特徴とする、請求項 2 に記載の形状測定装置。

**【請求項 4】**

物体の表面に照射する光を発生させる光源と、

前記物体の表面に格子パターンが投影されるよう、前記光源と前記物体との間に配置される格子と、

投影された前記格子パターンが変化するように、前記格子を所定方向に移動させる格子移動手段と、

を備えた形状測定装置により、前記物体の表面形状を計測する形状測定方法であって、

前記所定方向に対する前記格子の角度が第一角度である状態において投影された前記格子パターンの位相分布である第一位相分布、を取得する第一取得工程と、

前記所定方向に対する前記格子の角度を、前記第一角度から第二角度に変更する角度変換工程と、

前記所定方向に対する前記格子の角度が第二角度である状態において投影された前記格子パターンの位相分布である第二位相分布、を取得する第二取得工程と、

前記第一位相分布と前記第二位相分布とに基づいて、前記物体の表面における高さの分布を算出する形状算出工程と、

を備えたことを特徴とする形状測定方法。

30

40

**【請求項 5】**

前記第一位相分布と前記第二位相分布との差である位相差分布を算出する位相差算出工程と、

前記位相差分布が所定範囲において連続となるように、前記位相差分布に対して連続化処理を行う第一処理工程と、

を更に備えたことを特徴とする、請求項 4 に記載の形状測定方法。

**【請求項 6】**

50

前記連続化処理が施された後の前記位相差分布に基づいて、前記第一位相分布に対して位相接続処理を行う第二処理工程を更に備えたことを特徴とする、請求項5に記載の形状測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、物体の表面に投影された格子パターンに基づいて、当該物体の表面形状を計測する形状測定装置、及び形状測定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

物体の表面形状、すなわち、当該表面における高さの分布を非接触で測定するための方法の一つとして、格子パターン投影法が知られている。格子パターン投影法は、測定対象である物体の表面に格子パターンを投影し、投影された格子パターンの変形に基づいて表面形状を算出するものである。格子パターンの投影は、光源と物体との間に格子を配置し、当該格子を通じて物体の表面に光を照射することによって行われる。

【0003】

格子パターンの変形に基づいて表面形状を算出する際には、所謂位相シフト法が用いられる。位相シフト法は、物体の表面に投影され変形した格子パターンを、格子の位置（位相）を互いに異ならせた状態で複数取得し、取得された複数の格子パターンに基づいて、変形した格子パターンの位相分布を算出するものである。当該位相分布を高さの分布に変換することにより、物体の表面形状が算出される。

【0004】

ところで、物体表面の高さは様々な値となりうるのに対し、格子パターンの位相は - から + の限られた範囲内で周期的に変化する値となる。すなわち、物体表面の高さと格子パターンの位相とは一対一に対応しない。このため、格子パターンの位相分布を高さの分布に変換すると、位相の上限（+）及び下限（-）において高さが不連続に変化する、所謂「位相飛び」と称される誤変換が生じてしまう。

【0005】

従って、上記位相飛びを伴って得られた高さ分布を本来の（滑らかに接続された）高さ分布に変換するために、所謂「位相接続」を行う必要がある。例えば、下記特許文献1には、ピッチが互いに異なる二つの格子を用いることによって二つの位相分布を算出し、これらに基づいて位相接続を行う方法が記載されている。当該方法によれば、位相飛びが生じることなく正しく算出することのできる高さの範囲を、単一の格子を用いる場合に比べて広くすることが可能である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特開2006-064590号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、上記特許文献1に記載の方法は、ピッチが互いに異なる二つの格子を用いるものであるから、用いられる形状測定装置の構成が複雑なものになってしまう。また、二つの格子がそれぞれ有するピッチの誤差が重畳される可能性や、使用する格子を切り換えるための駆動（位置決め）において更に誤差が生じる可能性があり、これらにより精度の高い形状測定を行うことが困難になってしまう場合がある。

【0008】

本発明はこのような課題に鑑みてなされたものであり、その目的は、簡単な装置構成でありながら、広い高さ範囲を高い精度で測定することが可能な形状測定装置、及び形状測定方法を提供することにある。

10

20

30

40

50

## 【課題を解決するための手段】

## 【0009】

上記課題を解決するために、本発明に係る形状測定装置は、物体の表面に投影された格子パターンに基づいて、当該物体の表面形状を計測する形状測定装置において、物体の表面に照射する光を発生させる光源と、前記物体の表面に格子パターンが投影されるよう、前記光源と前記物体との間に配置される格子と、投影された前記格子パターンが変化するように、前記格子を所定方向に移動させる格子移動手段と、前記所定方向に対する前記格子の角度が変化するように、前記格子を回転させる格子回転手段と、を備え、前記所定方向に対する前記格子の角度を第一角度とした状態において投影された前記格子パターンの位相分布である第一位相分布と、前記所定方向に対する前記格子の角度を第二角度とした状態において投影された前記格子パターンの位相分布である第二位相分布と、に基づいて、前記物体の表面における高さの分布を算出することを特徴としている。

10

## 【0010】

本発明に係る形状測定装置は、格子移動手段と、格子回転手段とを備えている。格子移動手段は、物体の表面に投影された格子パターンが変化するように、格子を所定方向に移動させるものである。物体の表面に投影され変形した格子パターンの位相を格子移動手段によって変化させることで、位相シフト法を用いた位相分布の算出を行うことができる。

## 【0011】

格子回転手段は、上記所定方向（格子移動手段による格子の移動方向）に対する格子の角度が変化するように、格子を回転させるものである。このように格子を回転させると、格子の移動方向に沿って見た場合の格子パターンのピッチを変化させることができる。

20

## 【0012】

本発明では、上記所定方向に対する格子の角度を第一角度とした状態において投影された格子パターンの位相分布である第一位相分布と、上記所定方向に対する格子の角度を第二角度とした状態において投影された格子パターンの位相分布である第二位相分布と、に基づいて、物体の表面における高さの分布を算出する。これら二つの位相分布は、互いに異なるピッチを有する二つの格子を用いることによりそれぞれ取得された、二つの位相分布と同視することができる。

## 【0013】

このため、第一位相分布及び第二位相分布に基づいて、例えば従来と同様の算出方法による位相接続を行うことができる。一方、形状測定装置に実際に搭載される格子は一つであるから、従来に比べて装置構成を簡単なものとすることができる。また、格子を複数用いることによる誤差の重畳を生じることなく、広い高さ範囲を高い精度で測定することが可能である。

30

## 【0014】

また本発明に係る形状測定装置では、前記第一位相分布と前記第二位相分布との差である位相差分布を算出する位相差算出部と、前記位相差分布が所定範囲において連続となるように、前記位相差分布に対して連続化処理を行う第一処理部と、を更に備えたことも好ましい。

## 【0015】

この好ましい態様では、第一位相分布と第二位相分布との差である位相差分布を算出する位相差算出部を備えている。また、当該位相差分布が所定範囲において連続となるように、位相差分布に対して連続化処理を行う第一処理部を更に備えている。

40

## 【0016】

位相差算出部で算出される位相差分布は、物体表面の高さに対して略比例するような分布となるが、当該分布は位相飛びに起因して所々不連続な分布となる。すなわち、位相差の大きさが上記比例関係から不連続に外れるような高さが存在する。しかし、物体表面の高さに比例する位相差が - から + までとなるような範囲に限ってみれば、当該範囲における不連続分布の修正（連続化処理）は容易に行うことができる。具体的には、位相差の大きさが上記比例関係から不連続に外れ、 - から + までの範囲外となるような高さ

50

においては、位相差に対して2 を加えるか差し引くかのいずれかにより、容易に不連続分布の修正を行うことができる。

【0017】

第一処理部は、このような方法で連続化処理を行うものであって、位相差分布を所定範囲において連続となるように変換する。連続化処理が施された後の位相差分布は、所定範囲において物体表面の高さに対して比例する分布となる。

【0018】

従って、当該所定範囲においては、位相差と物体表面の高さとを一対一に対応させることができる。位相差分布が - から + までとなるような物体表面の高さの範囲は、第一位相分布又は第二位相分布が - から + までとなるような物体表面の高さの範囲よりも広い。すなわち、位相飛びが生じることなく正しい高さが算出される範囲を、単一の格子を用いる場合に比べて広くすることができる。

【0019】

また本発明に係る形状測定装置では、前記連続化処理が施された後の前記位相差分布に基づいて、前記第一位相分布に対して位相接続処理を行う第二処理部を更に備えたことも好ましい。

【0020】

連続化処理が施された後の位相差分布に基づいて物体表面の高さ分布を算出するには、位相差と物体表面の高さとを直接対応させることにより算出することも可能である。しかし、第一位相分布と第二位相分布とから算出される位相差には、格子のピッチが設計値からばらつくことによる誤差や、格子回転手段による回転角度の誤差等、第一位相分布と第二位相分布とがそれぞれ含んでいる誤差の両方が含まれてしまう可能性がある。従って、算出される高さ分布に含まれる誤差を小さくするには、第一位相分布のみに対して位相接続処理を行い、これを高さ分布に変換することが望ましい。

【0021】

この好ましい態様では、第一処理部によって連続化処理が施された後の位相差分布に基づいて、第一位相分布に対して位相接続処理を行う第二処理部を更に備えている。算出される高さ分布には第一位相分布の誤差のみが含まれることとなるため、誤差を小さくすることができる。

【0022】

上記課題を解決するために、本発明に係る形状測定方法は、物体の表面に照射する光を発生させる光源と、前記物体の表面に格子パターンが投影されるよう、前記光源と前記物体との間に配置される格子と、投影された前記格子パターンが変化するように、前記格子を所定方向に移動させる格子移動手段と、を備えた形状測定装置により、前記物体の表面形状を計測する形状測定方法であって、前記所定方向に対する前記格子の角度が第一角度である状態において投影された前記格子パターンの位相分布である第一位相分布、を取得する第一取得工程と、前記所定方向に対する前記格子の角度を、前記第一角度から第二角度に変更する角度変換工程と、前記所定方向に対する前記格子の角度が第二角度である状態において投影された前記格子パターンの位相分布である第二位相分布、を取得する第二取得工程と、前記第一位相分布と前記第二位相分布とに基づいて、前記物体の表面における高さの分布を算出する形状算出工程と、を備えたことを特徴としている。

【0023】

また本発明に係る形状測定方法では、前記第一位相分布と前記第二位相分布との差である位相差分布を算出する位相差算出工程と、前記位相差分布が所定範囲において連続となるように、前記位相差分布に対して連続化処理を行う第一処理工程と、を更に備えたことも好ましい。

【0024】

また本発明に係る形状測定方法では、前記連続化処理が施された後の前記位相差分布に基づいて、前記第一位相分布に対して位相接続処理を行う第二処理工程を更に備えたことも好ましい。

10

20

30

40

50

## 【発明の効果】

## 【0025】

本発明によれば、簡単な装置構成でありながら、広い高さ範囲を高い精度で測定することが可能な形状測定装置、及び形状測定方法を提供することができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0026】

【図1】本発明の実施形態に係る形状計測装置の構成を模式的に示す図である。

【図2】図1に示した形状計測装置に含まれる格子の構成を模式的に示す図である。

【図3】図1に示した形状計測装置に含まれる格子駆動装置の構成を模式的に示す図である。

10

【図4】図1に示した形状計測装置に含まれる演算処理装置の構成を示すブロック図である。

【図5】本発明の実施形態に係る形状計測方法の一例を示すフローチャートである。

【図6】本発明の実施形態に係る形状計測方法の一例を示すフローチャートである。

【図7】物体表面の高さと、形状計測装置により測定された位相との関係を示すグラフである。

【図8】物体表面の高さと、算出された位相差との関係を示すグラフである。

【図9】物体表面の高さと、第一の補正が施された位相差との関係を示すグラフである。

【図10】物体表面の高さと、第二の補正が施された位相差との関係、及び、物体表面の高さと、形状計測装置により測定された位相との関係を、重ねて示すグラフである。

20

【図11】物体表面の高さと、第二の補正が施された位相差との関係、及び、物体表面の高さと、形状計測装置により測定された位相との関係を、重ねて示すグラフである。

【図12】物体表面の高さと、位相接続された位相との関係を示すグラフである。

【図13】第二の補正が施された位相差から、形状計測装置により測定された位相を差し引いた値の、頻度分布を示すグラフである。

## 【発明を実施するための形態】

## 【0027】

以下、添付図面を参照しながら本発明の実施の形態について説明する。説明の理解を容易にするため、各図面において同一の構成要素に対しては可能な限り同一の符号を付して、重複する説明は省略する。

30

## 【0028】

図1は、本実施形態に係る形状計測装置1の構成を模式的に示す図である。形状計測装置1は、ステージ14に載置された被測定物4の表面形状（表面Sの高さ分布）を測定するための装置である。具体的には、被測定物4の表面Sに格子パターンを投影し、投影された格子パターンの変形に基づいて表面Sの高さ分布を算出する装置である。図1に示したように、形状計測装置1は、光源2と、格子3と、格子駆動装置30と、イメージセンサ6とを備えている。

## 【0029】

光源2は、被測定物4の表面Sに照射する光を発生させるものである。光源2としては、蛍光放電管、低圧水銀灯、キセノンランプ、半導体レーザ、及び発光ダイオード(LED)等を用いることができる。

40

## 【0030】

格子3は、光源2と表面Sとの間に配置されている。格子3は、光源2からの光の一部を透過させ、一部を遮光することにより、表面Sに格子パターンを投影するよう配置されている。図2は、格子3の構成を模式的に示す図である。図2に示したように、格子3は、直線状に形成された複数の透光部3Aと、直線状に形成された遮光部3Bとが、平面内で交互に並ぶように配置されている。尚、当該平面を、以下では「格子面」とも称する。また、格子面において透光部3Aと遮光部3Bとが交互に並ぶ方向（図2では矢印AR1で示した方向）を、以下では「周期方向」とも称する。格子3は、光源2から表面Sに到達する光の経路に対して、格子面が略垂直となるように配置されている。

50

## 【0031】

透光部3Aの幅と遮光部3Bの幅とは全て同一である。すなわち、格子3の格子面には、透光部3Aと遮光部3Bとが、格子ピッチP1で周期的に並んでいる。尚、格子ピッチP1は、一つの透光部3Aの幅と一つの遮光部3Bの幅との和に等しい。尚、図2等においては、説明のために格子ピッチP1を大きく描いているが、実際の格子ピッチP1は100 $\mu$ m程度の微小なピッチとなっている。

## 【0032】

図1に戻って説明を続ける。格子駆動装置30は、格子3を移動及び回転させる装置である。格子駆動装置30は、格子3を格子面に沿って周期方向に移動させることができる。また、格子駆動装置30は、格子3を格子面に沿って回転させることができる。格子駆動装置30の具体的な構成や、格子駆動装置30による格子3の具体的な動きについては、後に詳しく説明する。

10

## 【0033】

イメージセンサ6は、光源2から照射され表面Sで反射された光を受光するように配置されたCCD素子である。イメージセンサ6により、表面Sに投影され変形した格子パターン(以下、「変形格子パターン」とも称する)を取得することができる。

## 【0034】

イメージセンサ6には、図4に示すように演算処理装置300が接続されている。演算処理装置300は、RAM等の記憶装置やCPU等を備えたコンピュータ装置である。イメージセンサ6が取得した変形格子パターンは、光強度分布として演算処理装置300の記録部301(例えばハードディスク)に記録される。尚、記録部301には、複数の変形格子パターン(光強度分布)を記録することができる。

20

## 【0035】

演算処理装置300は、記録部301に記録された変形格子パターンに基づいて種々の演算処理を行う。演算処理装置300は、それぞれの演算処理を行う部分として位相算出部302、位相接続部303、高さ算出部304を備えている。また、演算処理装置300は、格子駆動装置30の動作等を制御するための制御部305をも備えている。尚、演算処理装置300におけるこのような区分は概念的なものであって、位相算出部302等は同一のCPUで実行される複数のプログラムであってもよい。位相算出部302等における具体的な演算方法については、後に説明する。

30

## 【0036】

形状計測装置1は、表面Sに変形格子パターンを結像させるために配置された一群の光学素子である投光光学系20と、変形格子パターンをイメージセンサ6に結像させるために配置された一群の光学素子である受光光学系25とを備えている。

## 【0037】

投光光学系20は、照明レンズ21と、集光レンズ22と、開口絞り23と、投影レンズ24とを備えている。これらは、ケラー照明を用いた投影光学系を構成しており、ステージ14の載置面には光がムラ無く到達する。照明レンズ21は、光源2の任意の1点から放射された光を平行光にするものである。格子3は、照明レンズ21を透過して平面波となった光により照明されることとなる。

40

## 【0038】

集光レンズ22は、格子3を透過した光を集光するものである。集光レンズ22により集光された光は、開口絞り23を通過して投影レンズ24に到達する。開口絞り23は集光レンズ22の後焦点面に配置されている。

## 【0039】

投影レンズ24は、格子3の像を表面Sに結像させるために配置されたレンズであって、開口絞り23を透過した光を平行光にして表面Sに入射させる。照明レンズ21の光軸、集光レンズ22の光軸、及び投影レンズ24の光軸は一致しており、ステージ14の載置面に対して斜めとなっている。投影レンズ24を透過した光は、ステージ14に載置された被測定物4の表面Sに入射角 $\theta$ で入射する。集光レンズ22、開口絞り23、及び投

50

影レンズ 24 は、両側テレセントリックレンズを構成している。この両側テレセントリックレンズの横倍率を  $M$  とすると、表面  $S$  が平坦な場合、格子 3 の投影像のピッチ  $P_2$  (変形格子パターンのピッチ) は、格子ピッチ  $P_1$  の  $M / \cos$  倍となる。

【0040】

受光光学系 25 は、集光レンズ 26 と、開口絞り 27 と、撮像レンズ 28 とを備えている。集光レンズ 26 は、表面  $S$  で反射された光を集光するものである。集光レンズ 26 により集光された光は、開口絞り 27 を通って撮像レンズ 28 に到達する。開口絞り 27 は集光レンズ 26 の後焦点面に配置されている。

【0041】

撮像レンズ 28 は、変形格子パターンの像をイメージセンサ 6 に結像させるために配置されたレンズであって、開口絞り 27 を透過した光を平行光にしてイメージセンサ 6 に入射させる。集光レンズ 26、開口絞り 27、及び撮像レンズ 28 は、両側テレセントリックレンズを構成している。イメージセンサ 6 は、この両側テレセントリックレンズの結像点に配置されている。

10

【0042】

集光レンズ 26 の光軸及び撮像レンズ 28 の光軸は互いに一致しており、ステージ 14 の搭置面に対して斜めとなっている。これらの光軸は、表面  $S$  において反射角  $\theta$  で反射された光の経路に沿うように配置されている。すなわち、投影レンズ 24 の光軸と、集光レンズ 26 の光軸とは同一平面上に存在しており、ステージ 14 上で交差している。

【0043】

格子駆動装置 30 の具体的な構成について、図 3 を参照しながら説明する。図 3 は、格子駆動装置 30 の構成を模式的に示す図である。図 3 に示したように、格子駆動装置 30 は、ステージ 31 と、雄螺子シャフト 34 と、モータ 35 とを備えている。

20

【0044】

ステージ 31 は後述するモータ 35 の駆動によって直線方向 (図 3 において矢印  $AR_2$  で示した方向) に沿って移動可能な略直形状のステージである。ステージ 31 の移動はガイド軸 36 によって案内される。

【0045】

ステージ 31 の上面には格子 3 が固定されており、格子 3 はステージ 31 と共に移動する。格子 3 は、その格子面がステージ 31 の移動方向に沿うように固定されており、図 3 (A) のようにステージ 31 がモータ 35 に比較的近い位置にある状態においては、格子 3 の周期方向がステージ 31 の移動方向と一致している。ステージ 31 には、内面に雌螺子加工が施された貫通孔が形成されている。当該貫通孔は、その中心軸がステージ 31 の移動方向に沿っている。

30

【0046】

雄螺子シャフト 34 は、ステージ 31 の貫通孔に挿入されたシャフトである。雄螺子シャフト 34 の外側面には雄螺子加工が施されており、ステージ 31 の貫通孔に形成された雌螺子と螺合している。このため、雄螺子シャフト 34 がその中心軸回りに回転すると、ステージ 31 は当該中心軸に沿った方向に移動する。

【0047】

モータ 35 は、雄螺子シャフト 34 の一端 (図 3 では右端) に接続された回転モータであって、雄螺子シャフト 34 をその中心軸回りに回転させる。当該回転の回転速度や回転量等は演算処理装置 300 の制御部 305 によって制御される。

40

【0048】

ステージ 31 の上面には固定支柱 32 が固定されており、格子 3 は、当該固定支柱 32 の上端近傍において回動可能な状態で固定されている。すなわち、固定支柱 32 の上端近傍 (符号 33) と格子 3 の隅部 (上端近傍の隅部) とが固定されており、格子 3 は、当該固定部分を中心として、格子面に沿って回動可能となっている。

【0049】

格子 3 の上方には上部ストッパ 38 が配置されており、格子 3 の回動範囲を規制してい

50

る。上部ストッパ 38 は、雄螺子シャフト 34 を挟んでモータ 35 とは反対側の位置に配置された支柱 37 により支えられている。図 3 (A) に示した状態、すなわち、格子 3 の周期方向が雄螺子シャフト 34 の中心軸と平行な状態においては、図示しないストッパによって、格子 3 はこれ以上時計回り方向に回動することができなくなっている。一方、図 3 (B) に示した状態、すなわち、図 3 (A) の状態から格子 3 が反時計回りに回動し、その上端部分が上部ストッパ 38 に下方から当接した状態においては、格子 3 はこれ以上反時計回り方向に回動することができなくなっている。

【0050】

支柱 37 と格子 3 との間には弦巻ばね 39 が配置されている。弦巻ばね 39 は、その一端が支柱 37 に固定されており、他端が格子 3 の下端部近傍に固定されている。弦巻ばね 39 は、ステージ 31 の位置によってその長さを変化させ、当該長さに応じて格子 3 に力を加える。当該力の方向は、雄螺子シャフト 34 の中心軸に沿った方向である。また、格子 3 のうち当該力が加えられる位置（弦巻ばね 39 の他端が接続されている位置）は、格子 3 の回動中心（符号 33）よりも下方である。

10

【0051】

図 3 (A) のようにステージ 31 がモータ 35 に比較的近い位置にある状態においては、弦巻ばね 39 はその自然長よりも長くなっている。従って、格子 3 は弦巻ばね 39 によって時計回りに回動するような力を受けており、図示しないストッパに押しつけられて回動が規制された状態となっている。当該位置の近傍でステージ 31 が移動しても、格子 3 は回動することなく、格子 3 の周期方向がステージ 31 の移動方向と一致した状態のまま移動する。このとき、ステージ 31 の移動方向に対して格子 3 の周期方向がなす角度は 0（第一角度）である。

20

【0052】

一方、図 3 (B) のようにステージ 31 がモータ 35 から比較的遠い位置にある状態においては、弦巻ばね 39 はその自然長よりも短くなっている。従って、格子 3 は弦巻ばね 39 によって反時計回りに回動するような力を受けており、上部ストッパ 38 に下方から押しつけられて回動が規制された状態となっている。当該位置の近傍でステージ 31 が移動しても、格子 3 は回動することなく、格子 3 の周期方向がステージ 31 の移動方向に対して傾斜した状態のまま移動する。このとき、ステージ 31 の移動方向に対して格子 3 の周期方向がなす角度は（第二角度）である。

30

【0053】

以上のように、格子駆動装置 30 は、格子 3 を所定方向（雄螺子シャフト 34 の中心軸に沿った方向）に沿って移動させることができる。このとき、格子 3 はその周期方向と移動方向とのなす角度が 0（第一角度）の状態でも移動するが、もしくはその周期方向と移動方向とのなす角度が（第二角度）の状態でも移動する。

【0054】

尚、図 3 に示したのは格子駆動装置 30 の構成の一例であって、他の構成としてもよいことは言うまでもない。格子駆動装置 30 は、格子 3 をその格子面に沿って所定方向に移動させることと、格子 3 をその格子面に沿って所定角度だけ回動させた状態で、上記所定方向に移動させることができればよい。例えば、格子 3 を移動させるためのモータと、格子 3 を回動させるためのモータとを、それぞれ個別に備えた構成としてもよい。

40

【0055】

以上のような構成の形状計測装置 1 を用いて、被測定物 4 の表面形状（表面 S の高さ分布）を測定する方法について説明する。図 5 及び図 6 は、形状計測装置 1 を用いた形状計測方法の一例を示すフローチャートである。

【0056】

最初のステップ S100 では、図 1 に示すように、被測定物 4 をステージ 14 の載置面上に載置する。ステージ 14 は、被測定物 4 の位置を微調整するような駆動機構を備えていてもよい。

【0057】

50

格子駆動装置 30 により、格子 3 を所定の初期位置に移動しておく。当該初期位置においては、ステージ 31 の移動方向に対して格子 3 の周期方向がなす角度が 0 (第一角度) となっている。ステップ S 100 が完了した時点においては、格子 3 は、その格子面に沿って且つ雄螺子シャフト 34 の中心軸に沿った方向に向けて、移動することが可能な状態となっている。格子 3 の周期方向は、当該移動方向と一致している。以下に説明するステップ S 101 からステップ S 106 においては、格子 3 は回転することなく移動する。

【0058】

ステップ S 100 に続くステップ S 101 では、演算処理装置 300 において、自然数をとる変数  $m$  に 1 が割り当てられる。変数  $m$  は、位相シフト法を行うために取得された変形格子パターンを記録しておくための変数である。

10

【0059】

続くステップ S 102 では、光源 2 を発光させた状態で、被測定物 4 の表面 S に格子パターンを投影する。表面 S には、その形状に応じた変形格子パターンが現れる。当該変形格子パターンは、反射光としてイメージセンサ 6 に入射する。

【0060】

ステップ S 103 では、イメージセンサ 6 で撮像された変形格子パターンの画像を、CCD 素子に入射した光強度分布  $I_{11}(x, y)$  として記録部 301 に記録する。 $x$ 、 $y$  は、イメージセンサ 6 の受光面における位置を示す座標であって、表面 S における位置を示す座標と一対一で対応する。本実施形態では、格子 3 の移動方向に対応する方向に沿って受光面上に  $x$  座標軸を配置している。また、受光面上において当該  $x$  座標軸と直交するように  $y$  座標軸を配置している。

20

【0061】

イメージセンサ 6 による撮像は、格子駆動装置 30 により格子 3 を移動させながら行う。すなわち、格子 3 をその格子ピッチ  $P_1$  の  $1/2$  だけ一定速度で周期方向に移動させる間、それに伴って移動する変形格子パターンを連続的に撮像する。イメージセンサ 6 の CCD 素子に対し入射する光の強度が時間積分される結果、記録部 301 に記録される光強度分布  $I_{11}(x, y)$  は、以下の式 (1) で示されるような余弦波状の分布となる。

【数 1】

$$I_{11}(x, y) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{P_2} + \phi_1(x, y)\right) + B_1 \cdots (1)$$

30

【0062】

ここで、 $A_1$ 、 $B_1$  は定数であり、 $A_1$  は振幅を、 $B_1$  はバイアス項を示す。 $P_2$  は、表面 S が平坦面 (全ての座標において高さが等しい面) である場合における、変形格子パターンのピッチである。 $A_1$  の値は集光レンズ 22、投影レンズ 24、及び集光レンズ 26 等のレンズ特性、並びに光源 2 が発する光の光強度、表面 S の反射率、及びイメージセンサ 6 の感度によって定まる。 $B_1$  の値は、レンズ特性、表面 S の反射率、光源 2 が発する光の光強度、及びイメージセンサ 6 の感度の他に、迷光等の要因によって定まる。 $\phi_1(x, y)$  は位相分布であって、表面 S に投影された格子パターンが変形することに伴う、位相の変化量の分布に相当するものである。

40

【0063】

ステップ S 103 に続くステップ S 104 では、演算処理装置 300 において変数  $m$  の値が 4 以上であるか否かが判断される。変数  $m$  の値が 4 未満の場合は、位相シフト法を行うために取得された変形格子パターンの数が 4 に満たないということであり、ステップ S 105 に進む。

【0064】

この時点においては、格子 3 は、光強度分布  $I_{11}(x, y)$  の取得開始時における位置から格子ピッチ  $P_1$  の  $1/2$  だけ移動している。ステップ S 105 では、イメージセンサ 6 による光強度分布の記録を停止した状態で、格子 3 を更に格子ピッチ  $P_1$  の  $3/4$  だけ移動させる。尚、このような移動に替えて、格子 3 を格子ピッチ  $P_1$  の  $1/4$  だけ逆方向

50

に移動させてもよい。いずれの場合であっても、表面 S に投影された変形格子パターンの位相は、光強度分布  $I_{11}(x, y)$  の取得開始時における位相から x 方向に  $\pi/2$  だけ進んだ状態となる。

【0065】

続くステップ S 106 では、演算処理装置 300 において変数 m の値に 1 が加算され、ステップ S 102 及びステップ S 103 が実行される。ステップ S 103 においては、イメージセンサ 6 で撮像された変形格子パターンの画像が再び記録されるが、記録開始時点における変形格子パターンの位相が上記のように x 方向に  $\pi/2$  だけ進んでいるため、記録部 301 に記録される光強度分布  $I_{12}(x, y)$  は、以下の式 (2) で示されるような余弦波状の分布となる。

【数 2】

$$I_{12}(x, y) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{P2} + \phi_1(x, y) + \frac{\pi}{2}\right) + B_1 \cdots (2)$$

【0066】

以降は、変数 m の値が 4 となるまでステップ S 102、ステップ S 103、ステップ S 105、ステップ S 106 が繰り返される。その結果、下記の式 (3) で示される光強度分布  $I_{13}(x, y)$ 、及び式 (4) で示される光強度分布  $I_{14}(x, y)$  が記録部 301 に記録される。

【数 3】

$$I_{13}(x, y) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{P2} + \phi_1(x, y) + \pi\right) + B_1 \cdots (3)$$

【数 4】

$$I_{14}(x, y) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{P2} + \phi_1(x, y) + \frac{3\pi}{2}\right) + B_1 \cdots (4)$$

【0067】

ステップ S 104 で変数 m の値が 4 の場合は、位相シフト法を行うために必要な 4 つの光強度分布  $I_{11}(x, y)$ 、 $I_{12}(x, y)$ 、 $I_{13}(x, y)$ 、 $I_{14}(x, y)$  が全て取得されたということであり、ステップ S 200 に進む。

【0068】

ステップ S 200 では、格子駆動装置 30 による格子 3 の回動が行われる。格子駆動装置 30 は、ステージ 31 をモータ 35 から遠ざかる方向に移動させることにより、格子 3 を上部ストッパ 38 に下方から押しつけた状態とする。図 3 を参照しながら説明したように、このとき、ステージ 31 の移動方向に対して格子 3 の周期方向がなす角度は、第二角度  $\theta$  となっている。ステップ S 200 が完了した時点においては、格子 3 は、その格子面に沿って且つ雄螺子シャフト 34 の中心軸に沿った方向に向けて、移動することが可能な状態となっている。格子 3 の周期方向は、当該移動方向に対して第二角度  $\theta$  で傾斜している。

【0069】

以下に説明するステップ S 201 からステップ S 206 においては、格子 3 は回動することなく移動する。すなわち、格子 3 は図 3 (B) に示した状態から更にモータ 35 から遠ざかる方向に移動するため、格子 3 の周期方向は、当該移動方向に対して常に第二角度  $\theta$  で傾斜した状態で維持される。

【0070】

ステップ S 200 に続くステップ S 201 では、演算処理装置 300 において、自然数をとる変数 k に 1 が割り当てられる。変数 k は、位相シフト法を行うために取得された変形格子パターンの数を記録しておくための変数である。

【0071】

10

20

30

40

50

続くステップ S 2 0 2 では、光源 2 を発光させた状態で、被測定物 4 の表面 S に格子パターンを投影する。表面 S には、その形状に応じた変形格子パターンが現れる。当該変形格子パターンは、反射光としてイメージセンサ 6 に入射する。

【 0 0 7 2 】

ここで、仮に表面 S が平坦であるとすれば、表面 S に投影される格子パターンの実際のピッチは P 2 となる。しかし、ステップ S 2 0 0 で格子 3 が回動したことに伴って、表面 S に投影された格子パターンも第二角度 だけ回動した状態となっていることに鑑みれば、格子パターンの移動方向に沿って見た場合のピッチ（高さ計測に関わる有効ピッチということもできる）を  $P 2 / \cos$  とみることができる。

【 0 0 7 3 】

ステップ S 2 0 3 では、ステップ S 2 0 1 の場合と同様に、イメージセンサ 6 で撮像された変形格子パターンの画像を、CCD 素子に入射した光強度分布  $I_{21}(x, y)$  として記録部 3 0 1 に記録する。

【 0 0 7 4 】

イメージセンサ 6 による撮像は、格子駆動装置 3 0 により格子 3 を移動させながら行う。すなわち、格子 3 を  $P 1 / \cos$  の  $1 / 2$  だけ一定速度で移動させる間、それに伴って移動する変形格子パターンを連続的に撮像する。イメージセンサ 6 の CCD 素子に対し入射する光の強度が時間積分される結果、記録部 3 0 1 に記録される光強度分布  $I_{21}(x, y)$  は、以下の式 ( 5 ) で示されるような余弦波状の分布となる。

【 数 5 】

$$I_{21}(x, y) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi x \cos \omega}{P2} + \frac{2\pi y \sin \omega}{P2} + \phi_2(x, y)\right) + B_1 \cdots (5)$$

【 0 0 7 5 】

$I_{21}(x, y)$  と同様に、 $I_{22}(x, y)$  は位相分布であって、表面 S に投影された格子パターンが変形することに伴う、位相の変化量の分布に相当するものである。

【 0 0 7 6 】

ステップ S 2 0 3 に続くステップ S 2 0 4 では、演算処理装置 3 0 0 において変数 k の値が 4 以上であるか否かが判断される。変数 k の値が 4 未満の場合は、位相シフト法を行うために取得された変形格子パターンの数が 4 に満たないということであり、ステップ S 2 0 5 に進む。

【 0 0 7 7 】

この時点においては、格子 3 は、光強度分布  $I_{21}(x, y)$  の取得開始時における位置から  $P 1 / \cos$  の  $1 / 2$  だけ移動している。ステップ S 2 0 5 では、イメージセンサ 6 による光強度分布の記録を停止した状態で、格子 3 を更に  $P 1 / \cos$  の  $3 / 4$  だけ移動させる。尚、このような移動に替えて、格子 3 を  $P 1 / \cos$  の  $1 / 4$  だけ逆方向に移動させてもよい。いずれの場合であっても、表面 S に投影された変形格子パターンの位相は、光強度分布  $I_{21}(x, y)$  の取得開始時における位相から x 方向に  $1 / 2$  だけ進んだ状態となる。

【 0 0 7 8 】

続くステップ S 2 0 6 では、演算処理装置 3 0 0 において変数 k の値に 1 が加算され、ステップ S 2 0 2 及びステップ S 2 0 3 が実行される。ステップ S 2 0 3 においては、イメージセンサ 6 で撮像された変形格子パターンの画像が再び記録されるが、記録開始時点における変形格子パターンの位相が上記のように x 方向に  $1 / 2$  だけ進んでいるため、記録部 3 0 1 に記録される光強度分布  $I_{22}(x, y)$  は、以下の式 ( 6 ) で示されるような余弦波状の分布となる。

【 数 6 】

$$I_{22}(x, y) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi x \cos \omega}{P2} + \frac{2\pi y \sin \omega}{P2} + \phi_2(x, y) + \frac{\pi}{2}\right) + B_1 \cdots (6)$$

10

20

30

40

50

## 【 0 0 7 9 】

以降は、変数  $k$  の値が 4 となるまでステップ S 2 0 2、ステップ S 2 0 3、ステップ S 2 0 5、ステップ S 2 0 6 が繰り返される。その結果、下記の式 (7) で示される光強度分布  $I_{23}(x, y)$ 、及び式 (8) で示される光強度分布  $I_{24}(x, y)$  が記録部 3 0 1 に記録される。

## 【 数 7 】

$$I_{23}(x, y) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi x \cos \omega}{P2} + \frac{2\pi y \sin \omega}{P2} + \phi_2(x, y) + \pi\right) + B_1 \cdots (7)$$

## 【 数 8 】

$$I_{24}(x, y) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi x \cos \omega}{P2} + \frac{2\pi y \sin \omega}{P2} + \phi_2(x, y) + \frac{3\pi}{2}\right) + B_1 \cdots (8)$$

10

## 【 0 0 8 0 】

ステップ S 2 0 4 で変数  $k$  の値が 4 の場合は、位相シフト法を行うために必要な 4 つの光強度分布  $I_{21}(x, y)$ 、 $I_{22}(x, y)$ 、 $I_{23}(x, y)$ 、 $I_{24}(x, y)$  が全て取得されたということであり、図 6 のステップ S 3 0 1 に進む。

## 【 0 0 8 1 】

ステップ S 3 0 1 では、記録部 3 0 1 に記録された複数の光強度分布のうち、光強度分布  $I_{11}(x, y)$ 、 $I_{12}(x, y)$ 、 $I_{13}(x, y)$ 、 $I_{14}(x, y)$  が読み出される。位相算出部 3 0 2 では、下記の式 (9) によって位相分布 (第一位相分布)  $\phi_{11}(x, y)$  が算出される。

20

## 【 数 9 】

$$\phi_{11}(x, y) = \phi_1 + \frac{2\pi x}{P2} = \arctan\left\{\frac{I_{14}(x, y) - I_{12}(x, y)}{I_{11}(x, y) - I_{13}(x, y)}\right\} \cdots (9)$$

## 【 0 0 8 2 】

位相分布  $\phi_{11}(x, y)$  で表わされる各点の位相  $\phi_{11}$  は、それぞれが  $-$  から  $+$  の範囲となっている。すなわち、表面 S の任意の点における高さは様々な値となりうるのに対し、当該高さに対応する位相  $\phi_{11}$  は  $-$  から  $+$  の限られた範囲内で周期的に変化する値となる。

30

## 【 0 0 8 3 】

図 7 は、座標 (0, 0) に対応する点における、表面 S の高さ  $h_1$  と位相  $\phi_{11}$  との関係を示すグラフである。図 7 に示したように、表面 S の高さが増加すると、位相  $\phi_{11}$  は  $+$  まで増加した直後、 $-$  に不連続に折り返されることとなる。位相  $\phi_{11}$  の一周期 ( $-$  から  $+$  まで) に相当する表面 S の高さ範囲  $\Delta h_1$  は、下記の式 (10) で表わされる。

## 【 数 1 0 】

$$\Delta h_1 = \frac{P2}{2 \tan \theta} \cdots (10)$$

40

## 【 0 0 8 4 】

表面 S の高さが上記のような高さ範囲  $\Delta h_1$  に収まるのであれば、高さ  $h_1$  と位相  $\phi_{11}$  とは 1:1 に対応する。従って、この場合には位相  $\phi_{11}$  に基づいて表面 S の高さを正確に求めることができる。表面 S の高さ分布  $H(x, y)$  を算出するには、先ず、下記の式 (11) によって位相分布  $\phi_{11}(x, y)$  を算出する。算出された位相分布  $\phi_{11}(x, y)$  は、記録部 3 0 1 に記録される。尚、式 (11) における  $N$  は、各座標 (x, y) について、位相分布  $\phi_{11}(x, y)$  の値の絶対値が  $2\pi$  を超えないように適宜設定される整数である。

【数 1 1】

$$\phi_1 = \phi_{11}(x, y) - \frac{2\pi x}{P2} + 2\pi N \cdots (11)$$

【0085】

ステップ S 3 0 1 に続くステップ S 3 0 2 では、記録部 3 0 1 に記録された複数の光強度分布のうち、光強度分布  $I_{21}(x, y)$ 、 $I_{22}(x, y)$ 、 $I_{23}(x, y)$ 、 $I_{24}(x, y)$  が読み出される。位相算出部 3 0 2 では、下記の式 (12) によって位相分布 (第二位相分布)  $\phi_2(x, y)$  が算出される。

【数 1 2】

$$\phi_{21}(x, y) = \phi_2 + \frac{2\pi x \cdot \cos \omega}{P2} + \frac{2\pi y \cdot \cos \omega}{P2} = \arctan \left\{ \frac{I_{24}(x, y) - I_{22}(x, y)}{I_{21}(x, y) - I_{23}(x, y)} \right\} \cdots (12)$$

【0086】

位相  $\phi_{11}$  の場合と同様に、位相分布  $\phi_{21}(x, y)$  で表わされる各点の位相  $\phi_{21}$  は、それぞれが - から + の範囲となっている。すなわち、表面 S の任意の点における高さは様々な値となりうるのに対し、当該高さに対応する位相  $\phi_{21}$  は - から + の限られた範囲内で周期的に変化する値となる。図 7 に示したように、座標 (0, 0) に対応する点における表面 S の任意の点における高さが増加すると、位相  $\phi_{21}$  は まで増加した直後、 - に不連続に折り返されることとなる。位相  $\phi_{21}$  の一周期 ( - から + まで) に相当する表面 S の高さ範囲  $h_2$  は、下記の式 (13) で表わされる。式 (13) で明らかのように、高さ範囲  $h_2$  は高さ範囲  $h_1$  よりも僅かに大きな値となる。

【数 1 3】

$$\Delta h_2 = \frac{P2}{2 \tan \theta \cos \omega} \cdots (13)$$

【0087】

$\phi_1$  の場合と同様に、下記の式 (14) によって位相分布  $\phi_2(x, y)$  を算出する。算出された位相分布  $\phi_2(x, y)$  は、記録部 3 0 1 に記録される。尚、式 (14) における N は、各座標 (x, y) について、位相分布  $\phi_2(x, y)$  の値の絶対値が 2 を超えないように適宜設定される整数である。

【数 1 4】

$$\phi_2(x, y) = \phi_{21} - \frac{2\pi x \cdot \cos \omega}{P2} - \frac{2\pi y \cdot \cos \omega}{P2} + 2\pi N \cdots (14)$$

【0088】

ステップ S 3 0 2 に続くステップ S 3 0 3 では、記録部 3 0 1 に記録された位相分布  $\phi_1(x, y)$  及び位相分布  $\phi_2(x, y)$  が読み出される。位相接続部 3 0 3 では、下記の式 (15) によって、位相分布  $\phi_1(x, y)$  と位相分布  $\phi_2(x, y)$  との差として位相差分布  $\phi_D(x, y)$  が算出される。位相差分布  $\phi_D(x, y)$  とは、任意の点 (x, y) における位相  $\phi_1$  と位相  $\phi_2$  との差 (位相差) を示すものである。

【数 1 5】

$$\phi_D(x, y) = \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) \cdots (15)$$

【0089】

図 8 は、表面 S の高さ と位相差  $\phi_D$  との関係を示すグラフである。図 8 に示したように、位相差  $\phi_D$  も、表面 S の高さに対して不連続となっている。そこで、ステップ S 3 0 4 では、位相差  $\phi_D$  に対して第一の補正 (連続化処理) を施し、所定の範囲において連続なものとなるように位相差  $\phi_D$  を変換する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 9 0 】

具体的には、位相接続部 3 0 3 において、位相差  $\phi_D$  の値が  $-\pi$  より小さい場合には当該値に  $2\pi$  を加算する。また、位相差  $\phi_D$  の値が  $\pi$  より大きい場合には当該値から  $2\pi$  を減算する。このような加減算を行うことによって、位相差分布  $\phi_D(x, y)$  を位相差分布  $\phi_{CD1}(x, y)$  に変換する。

## 【 数 1 6 】

$$\phi_{CD1}(x, y) = \phi_D(x, y) + 2\pi \quad [\phi_D(x, y) < -\pi] \cdots (16)$$

## 【 数 1 7 】

$$\phi_{CD1}(x, y) = \phi_D(x, y) - 2\pi \quad [\phi_D(x, y) > \pi] \cdots (17)$$

10

## 【 0 0 9 1 】

図 9 は、表面 S の高さ  $h$  と位相差  $\phi_{CD1}$  との関係を示すグラフである。図 9 に示したように、位相差  $\phi_{CD1}$  は、表面 S の高さに対して所定範囲（位相差  $\phi_{CD1}$  が  $-\pi$  から  $\pi$  までの範囲）において連続となっている。また、位相  $\phi_{CD1}$  の一周期（ $-\pi$  から  $\pi$  まで）に相当する表面 S の高さ範囲  $h_{12}$  は、高さ範囲  $h_1$  及び範囲  $h_2$  を用いて下記の式（18）で表わされる。

## 【 数 1 8 】

$$\Delta h_{12} = \frac{\Delta h_1 \Delta h_2}{\Delta h_2 - \Delta h_1} \cdots (18)$$

20

## 【 0 0 9 2 】

位相接続部 3 0 3 においては更に、位相差  $\phi_{CD1}$  に対して第二の補正を施し、表面 S の高さに対する傾きが位相  $\phi_1$  の傾き（図 7）と等しくなるよう、位相差  $\phi_{CD1}$  を変換する（ステップ S 3 0 5）。具体的には、位相差  $\phi_{CD1}$  の値に  $(h_{12} / h_1)$  を掛けることによって、位相差分布  $\phi_{CD1}(x, y)$  を位相差分布  $\phi_{CD2}(x, y)$  に変換する。

## 【 数 1 9 】

$$\phi_{CD2}(x, y) = \phi_{CD1}(x, y) \times \frac{\Delta h_{12}}{\Delta h_1} \cdots (19)$$

30

## 【 0 0 9 3 】

図 10 は、 $h_{12} / h_1$  の値が 4 である場合の、表面 S の高さ  $h$  と位相差  $\phi_{CD1}$  との関係を示すグラフである。同図には、表面 S の高さ  $h$  と位相  $\phi_1$  との関係を重ねて示している。図 10 に示したように、位相差  $\phi_{CD2}$  が取り得る値の範囲は  $-\pi$  から  $\pi$  の範囲となっており、この範囲で連続となっている。また、 $-\pi$  から  $\pi$  の範囲においては、位相差分布  $\phi_{CD2}(x, y)$  と位相分布  $\phi_1(x, y)$  とが略一致している。

## 【 0 0 9 4 】

位相接続部 3 0 3 においては更に、イメージセンサ 6 の受光面における座標毎（表面 S における座標毎）に、位相差  $\phi_{CD2}$  と位相  $\phi_1$  との差を算出し、これを  $2\pi$  で除した値に最も近い整数  $n$  を算出する。

## 【 数 2 0 】

$$n \approx \frac{\phi_{CD2}(x, y) - \phi_1(x, y)}{2\pi} \cdots (20)$$

40

## 【 0 0 9 5 】

尚、式（20）の右辺は理論的には必ず整数となるはずであるが、計測誤差によって整数とはならない場合がある。このため、右辺を四捨五入することによって、右辺の値に最も近い整数  $n$  を算出する。このように算出される整数  $n$  が、位相飛びの次数を示す値となる（ステップ S 3 0 6）。

## 【 0 0 9 6 】

50

図 1 1 は、表面 S の高さ、位相差  $\phi_{CD2}$  と位相  $\phi_1$  との差との関係を、図 1 0 のグラフに重ねて示したグラフである。図 1 1 のように、位相差  $\phi_{CD2}$  と位相  $\phi_1$  との差は階段状のグラフとなっており、その段数が上記整数 n に該当する。

【 0 0 9 7 】

続くステップ S 3 0 7 において、位相接続部 3 0 3 は、イメージセンサ 6 の受光面における総ての座標に対し、整数 n を用いて位相  $\phi_1$  を位相接続する。具体的には、各座標において、位相  $\phi_1$  に対して  $2n$  を加算することで、位相接続後の位相  $\phi_{1C}$  を算出する。

【 数 2 1 】

$$\phi_{1C} = \phi_1 + 2n\pi \cdots (21)$$

10

【 0 0 9 8 】

図 1 2 は、表面 S の高さ、位相差  $\phi_{1C}$  との関係を示すグラフである。図 1 2 に示したように、位相差  $\phi_{1C}$  は、表面 S の高さに対して広い範囲（位相差  $\phi_{1C}$  が - 4 から + 4 までの範囲）において連続となっている。また、位相差  $\phi_{1C}$  の一周期（ - 4 から + 4 まで）に相当する表面 S の高さ範囲  $h_{12}$  は、位相  $\phi_1$  の一周期（ - から + まで）に相当する表面 S の高さ範囲  $h_1$  よりも広い。

【 0 0 9 9 】

ステップ S 3 0 7 に続くステップ S 3 0 8 において、高さ算出部 3 0 4 は、位相接続後の位相  $\phi_{1C}$  の分布、すなわち位相分布  $\phi_{1C}(x, y)$  に基づいて、表面 S の高さ分布  $H(x, y)$  を算出する。高さが  $h_1$  の時に位相  $\phi_1$  が  $2$  となることに鑑みれば、高さ分布  $H(x, y)$  は下記の式 ( 2 2 ) により算出される。

20

【 数 2 2 】

$$H(x, y) = \phi_{1C}(x, y) \times \frac{\Delta h_1}{2\pi} \cdots (22)$$

【 0 1 0 0 】

以上のように、本実施形態に係る形状計測装置 1 では、ステージ 3 1 の移動方向に対する格子 3 の角度を 0（第一角度）とした状態において投影された格子パターンの位相分布  $\phi_1(x, y)$ （第一位相分布）と、同方向に対する格子 3 の角度を（第二角度）とした状態において投影された格子パターンの位相分布  $\phi_2(x, y)$ （第二位相分布）と、に基づいて、被測定物 4 の表面 S における高さの分布を算出する。これら二つの位相分布は、互いに異なるピッチを有する二つの格子を用いることによりそれぞれ取得された、二つの位相分布と同視することができる。

30

【 0 1 0 1 】

このため、位相分布  $\phi_1(x, y)$  及び位相分布  $\phi_2(x, y)$  に基づいて位相接続を行い、表面 S の高さ分布  $H(x, y)$  を算出する。一方、形状測定装置に実際に搭載される格子 3 は一つであるから、従来に比べて装置構成を簡単なものとなっている。

【 0 1 0 2 】

また、形状計測装置 1 では、位相接続部 3 0 3 において、位相分布  $\phi_1(x, y)$  と位相分布  $\phi_2(x, y)$  との差である位相差分布  $\phi_D(x, y)$  を算出する。更に、位相接続部 3 0 3 においては、位相差分布  $\phi_D(x, y)$  が所定範囲において連続となるように、位相差分布  $\phi_D(x, y)$  に対して第一の補正（連続化処理）を施している。連続化処理が施された後の位相差分布  $\phi_{CD1}(x, y)$  は、所定範囲において物体表面の高さに対して比例する分布となる。

40

【 0 1 0 3 】

従って、当該所定範囲においては、位相差  $\phi_{CD1}$  と表面 S の高さとを一对一に対応させることができる。位相差分布  $\phi_{CD1}(x, y)$  が - から + までとなるような表面 S の高さの範囲（  $h_{12}$  ）は、位相分布  $\phi_1(x, y)$  又は位相分布  $\phi_2(x, y)$  が - から + までとなるような表面 S の高さの範囲（  $h_1$ 、  $h_2$  ）よりも広い。すなわち、位相飛びが生じることなく正しい高さが算出される範囲を、単一の格子を用いる場合に比べて

50

広くしている。

【0104】

また、形状計測装置1では、第一の補正（連続化処理）が施された位相差分布  $_{CD1}(x, y)$  に基づいて、位相接続部303において、位相分布  $_1(x, y)$  に対して位相接続処理を行う。具体的には、位相差分布  $_{CD1}(x, y)$  に対し第二の補正を施して得られた位相差分布  $_{CD2}(x, y)$  に基づいて、位相飛びの次数を示す整数  $n$  を算出し、当該整数  $n$  を用いて位相接続を行う。

【0105】

ここで、位相差分布  $_{CD2}(x, y)$  に基づいて表面Sの高さ分布を算出するには、位相差  $_{CD2}$  と表面Sの高さとを直接対応させることにより算出することも可能である。しかし、位相分布  $_1(x, y)$  と位相分布  $_2(x, y)$  とから算出される位相差  $_{CD2}$  には、格子ピッチ  $P1$  が設計値からばらつくことによる誤差や、格子駆動装置30による回転角度の誤差等、位相分布  $_1(x, y)$  と位相分布  $_2(x, y)$  とがそれぞれ含んでいる誤差の両方が含まれてしまう可能性がある。

10

【0106】

そこで、本実施態様では、位相差分布  $_{CD2}(x, y)$  に基づいて表面Sの高さを直接算出するのではなく、位相分布  $_1(x, y)$  に対して位相接続処理を行い、これに基づいて表面Sの高さを算出している。算出される高さ分布  $H(x, y)$  には位相分布  $_1(x, y)$  の誤差のみが含まれることとなるため、誤差を小さくすることができる。

【0107】

尚、本実施形態においては、図10に示したように、表面Sの高さが0の時ににおける位相  $_1$  と位相  $_2$  とが、いずれも0で一致するものとして説明した。しかしながら、実際の測定においては、格子駆動装置30による格子3の位置決め精度が悪い等の理由によって、表面Sの高さが0の時ににおける位相  $_1$  又は位相  $_2$  が0からずれてしまう場合も生じ得る。すなわち、位相  $_1$  と位相  $_2$  との初期位相がずれてしまう場合が生じ得る。

20

【0108】

このような初期位相のずれを補正するには、位相差  $_{CD2}$  から位相  $_1$  を差し引いた値の分布を算出し、最も高い頻度で現れる値が  $2n$  からどの程度ずれるかを調べればよい。

【0109】

図13は、位相差  $_{CD2}$  から位相  $_1$  を差し引いた値の頻度分布を示すグラフである。位相  $_1$  と位相  $_2$  との初期位相にずれが無い場合には、図13(A)に示したように、 $2n$  を中心とする分布となる。一方、位相  $_1$  と位相  $_2$  との初期位相がずれてしまった場合には、図13(B)に示したように、分布の中心は  $2n$  からずれた値となる。

30

【0110】

そこで、イメージセンサ6の受光面における全ての座標について、位相  $_2$  から上記ずれ量を差し引くことにより、初期位相のずれを補正することができる。図13(B)に示した例においては、全ての位相  $_2$  から  $/2$  を差し引けばよい。

【0111】

以上、具体例を参照しつつ本発明の実施の形態について説明した。しかし、本発明はこれらの具体例に限定されるものではない。すなわち、これら具体例に、当業者が適宜設計変更を加えたものも、本発明の特徴を備えている限り、本発明の範囲に包含される。例えば、前述した各具体例が備える各要素およびその配置、材料、条件、形状、サイズなどは、例示したものに限定されるわけではなく適宜変更することができる。また、前述した各実施の形態が備える各要素は、技術的に可能な限りにおいて組み合わせることができ、これらを組み合わせたものも本発明の特徴を含む限り本発明の範囲に包含される。

40

【符号の説明】

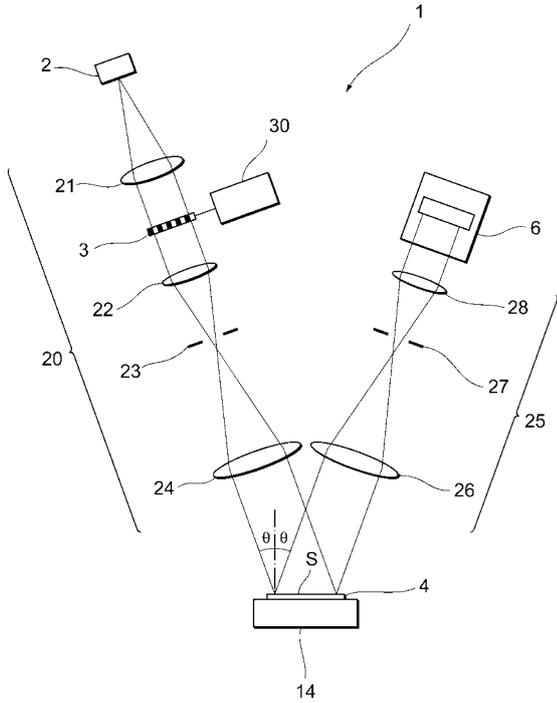
【0112】

- 1：形状計測装置
- 2：光源
- 3：格子

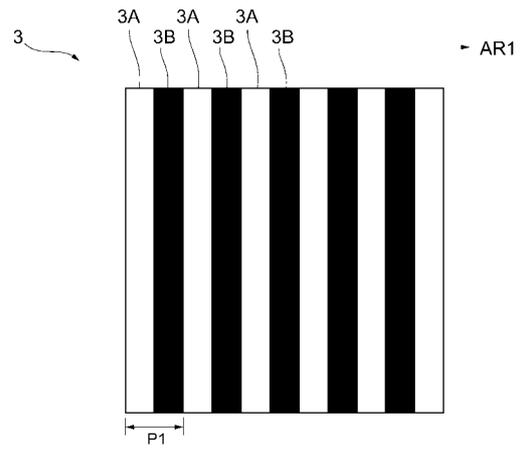
50

3 A : 透光部	
3 B : 遮光部	
4 : 被測定物	
6 : イメージセンサ	
1 4 : ステージ	
2 0 : 投光光学系	
2 1 : 照明レンズ	
2 2 : 集光レンズ	
2 4 : 投影レンズ	
2 5 : 受光光学系	10
2 6 : 集光レンズ	
2 8 : 撮像レンズ	
3 0 : 格子駆動装置	
3 1 : ステージ	
3 2 : 固定支柱	
3 4 : 雄螺子シャフト	
3 5 : モータ	
3 6 : ガイド軸	
3 7 : 支柱	
3 8 : 上部ストッパ	20
3 0 0 : 演算処理装置	
3 0 1 : 記録部	
3 0 2 : 位相算出部	
3 0 3 : 位相接続部	
3 0 4 : 高さ算出部	
3 0 5 : 制御部	
S : 表面	

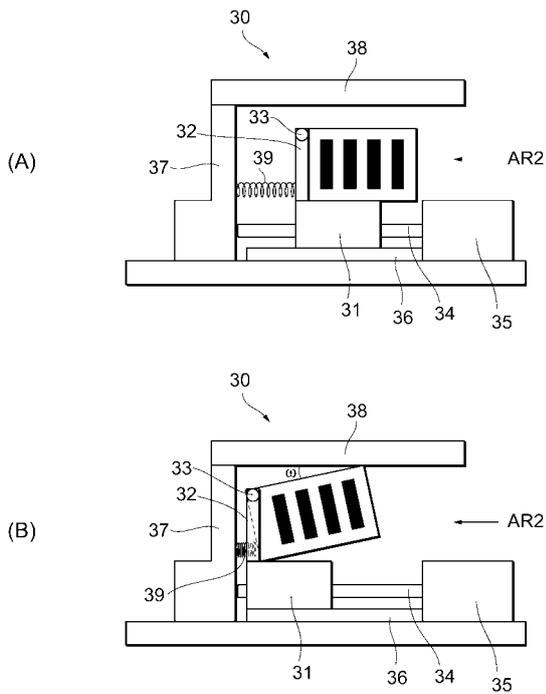
【 図 1 】



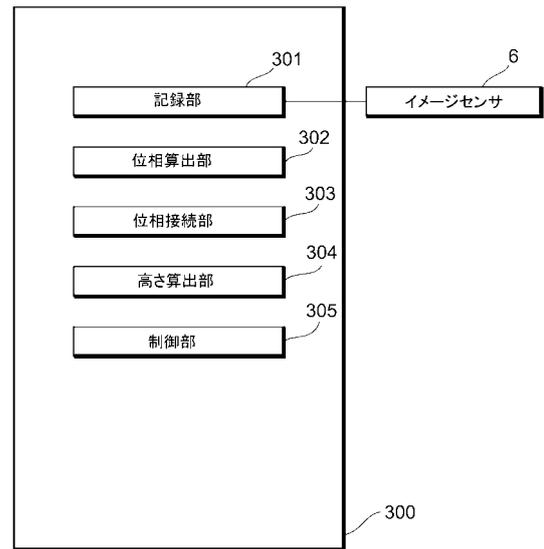
【 図 2 】



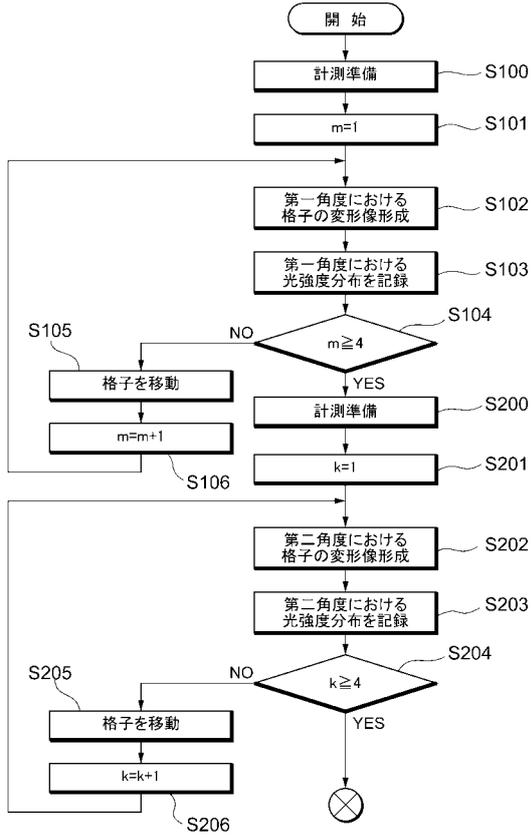
【 図 3 】



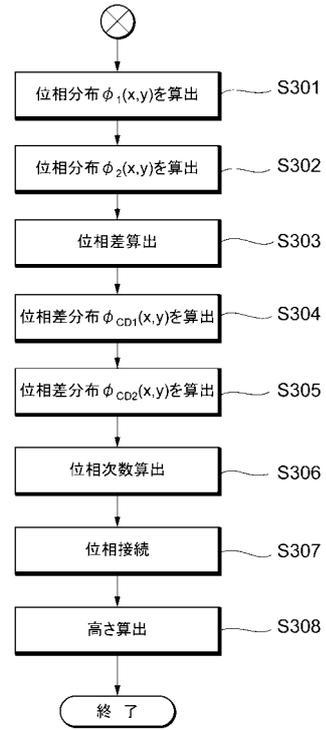
【 図 4 】



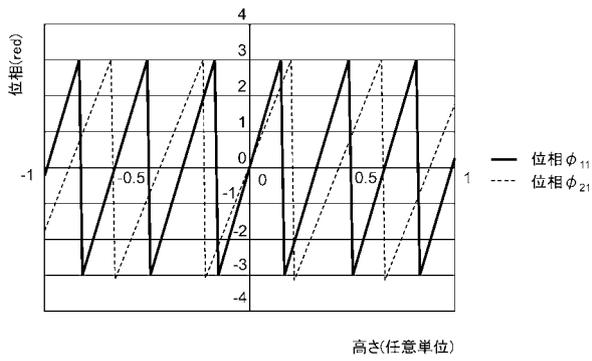
【 図 5 】



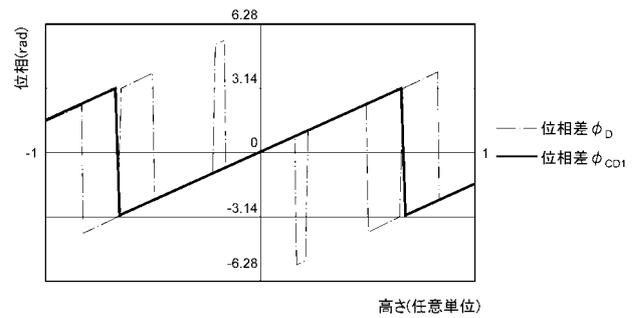
【 図 6 】



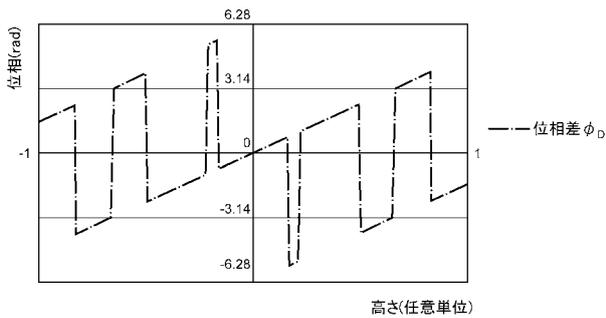
【 図 7 】



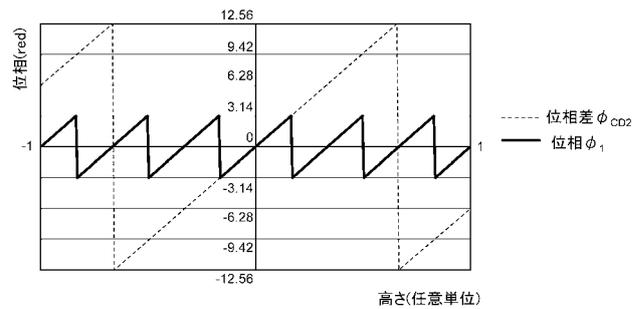
【 図 9 】



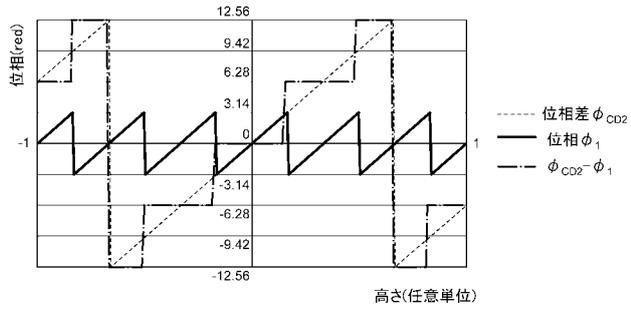
【 図 8 】



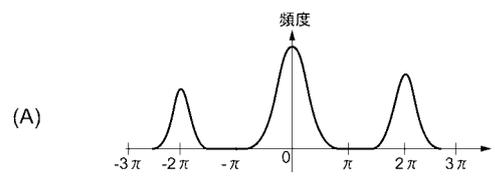
【 図 10 】



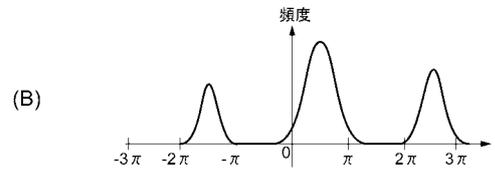
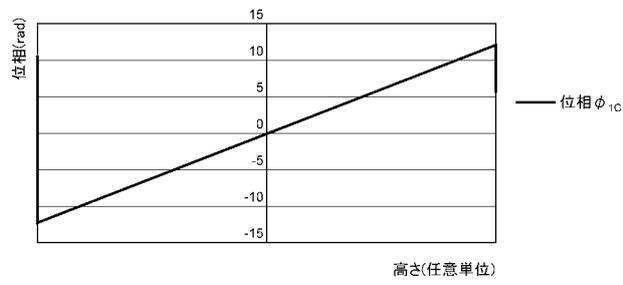
【 図 1 1 】



【 図 1 3 】



【 図 1 2 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 藤原 久利

東京都千代田区丸の内2丁目7番3号 アズビル株式会社内

Fターム(参考) 2F065 AA24 AA53 BB05 DD03 DD11 FF01 FF02 FF04 FF09 GG03  
GG06 GG07 HH03 HH06 HH12 JJ03 JJ08 JJ19 JJ26 LL04  
LL30 LL41 LL59 NN05 QQ01 QQ24 QQ31 UU08