

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第5486379号
(P5486379)

(45) 発行日 平成26年5月7日 (2014.5.7)

(24) 登録日 平成26年2月28日 (2014.2.28)

(51) Int.Cl.

F I

GO 1 B 11/24 (2006.01)

GO 1 B 11/24 (2006.01)

GO 1 B 11/24 D

GO 1 B 11/24 A

GO 1 B 11/26 Z

請求項の数 8 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2010-83402 (P2010-83402)	(73) 特許権者	000001007
(22) 出願日	平成22年3月31日 (2010.3.31)		キヤノン株式会社
(65) 公開番号	特開2011-95241 (P2011-95241A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43) 公開日	平成23年5月12日 (2011.5.12)	(74) 代理人	100076428
審査請求日	平成25年3月26日 (2013.3.26)		弁理士 大塚 康德
(31) 優先権主張番号	特願2009-229993 (P2009-229993)	(74) 代理人	100112508
(32) 優先日	平成21年10月1日 (2009.10.1)		弁理士 高柳 司郎
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(74) 代理人	100115071
			弁理士 大塚 康弘
		(74) 代理人	100116894
			弁理士 木村 秀二
		(74) 代理人	100130409
			弁理士 下山 治
		(74) 代理人	100134175
			弁理士 永川 行光

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 面形状計測装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

被検面の形状を計測する面形状計測装置であって、
基準点を通過するように放射されて前記被検面で反射され前記基準点を通過して戻ってくる被検光を検出することによって、前記基準点と前記被検面上の点との間の距離を計測する計測ヘッドと、
前記基準点を移動するように前記計測ヘッドを走査する走査機構と、
前記計測ヘッドを使った計測により得られた前記距離と前記基準点の座標とに基づいて前記被検面上の点から前記基準点への法線の方位を計算し、前記距離と前記方位とに基づいて前記被検面の形状を計算する処理部とを備え、
前記処理部は、
走査経路に沿って前記計測ヘッドを走査しながら第1の被検面を計測して得られた前記第1の被検面の形状を用いて、前記基準点の座標を校正し、
前記第1の被検面を計測するための前記走査経路と同一の経路に沿って前記計測ヘッドを走査しながら前記第1の被検面とは異なる第2の被検面を計測して得られた前記第2の被検面の形状を、校正された基準点の座標に基づいて補正する、
ことを特徴とする面形状計測装置。

【請求項 2】

前記計測ヘッドは、前記基準点を通過するように放射され前記被検面で反射され前記基準点を通過して戻ってくる被検光と参照光との干渉波を検出することによって前記距離を計測

する、

ことを特徴とする請求項 1 に記載の面形状計測装置。

【請求項 3】

被検面の形状を計測する面形状計測装置であって、

基準点を通過するように放射されて前記被検面で反射され前記基準点を通って戻ってくる被検光を検出することによって、前記被検面上の点から前記基準点への法線の方位を計測する計測ヘッドと、

前記基準点を移動するように前記計測ヘッドを走査する走査機構と、

前記計測ヘッドを使った計測により得られた前記方位と前記基準点の座標とに基づいて前記基準点と前記被検面上の点との間の距離を計算し、前記距離と前記方位とに基づいて前記被検面の形状を計算する処理部とを備え、

10

前記処理部は、

走査経路に沿って前記計測ヘッドを走査しながら第 1 の被検面を計測して得られた前記第 1 の被検面の形状を用いて、前記基準点の座標を校正し、

前記第 1 の被検面を計測するための前記走査経路と同一の経路に沿って前記計測ヘッドを走査しながら前記第 1 の被検面とは異なる第 2 の被検面を計測して得られた前記第 2 の被検面の形状を、校正された基準点の座標に基づいて補正する、

ことを特徴とする面形状計測装置。

【請求項 4】

前記計測ヘッドは、光スポット位置センサーを含み、前記基準点を通過するように放射され被検面で反射され前記基準点を通って戻ってくる被検光が前記光スポット位置センサーに入射する位置を検出することによって前記方位を計測する

20

ことを特徴とする請求項 3 に記載の面形状計測装置。

【請求項 5】

前記走査機構は、前記基準点が前記走査経路に沿って移動するように前記計測ヘッドを走査する、

ことを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項に記載の面形状計測装置。

【請求項 6】

前記処理部は、前記走査機構が前記基準点が前記走査経路に沿って移動するように前記計測ヘッドを走査したときに生じる前記走査経路に対する前記基準点のオフセット値を計算し、該オフセット値により前記走査経路の座標を補正することによって、前記基準点の校正された座標を決定する、

30

ことを特徴とする請求項 5 に記載の面形状計測装置。

【請求項 7】

前記計測ヘッドは、前記基準点から前記基準点を中心とする球面波を放射する、

ことを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の面形状計測装置。

【請求項 8】

前記計測ヘッドは、球面波の一部に相当する光束を、前記基準点を通過して前記被検面で反射されて前記基準点に戻ってくるように放射することを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の面形状計測装置。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、被検面の形状を計測する面形状計測装置に関する。

【背景技術】

【0002】

球面レンズあるいは非球面レンズなどの面形状を計測する代表的な方法として、プローブにより被検面をならい走査する方法が知られている。典型的な方法は、X 軸ステージと Y 軸ステージと Z 軸ステージとを有する 3 軸直交ステージに取り付けられたプローブを、プローブと被検面との距離が一定となるように走査する。この走査面におけるプローブの

50

位置をレーザー測長器などで逐次測定することにより、被検面形状を3次元座標点群として求めることができる。

【0003】

プローブを用いて被検面をならい走査して形状を測定する方法においては、測定精度を保証するために座標系の校正が重要な課題となっている。座標系の校正の方法としては、基準部材を計測して得られる計測データと基準データとを比較し、その差を最小にする方法が一般的である。特許文献1には、基準球面を基準部材として用いて座標系を校正する方法が開示されている。この方法では、座標系の直交度が正確ではない場合に球面が楕円面として測定されることを利用し、測定された楕円面が球面になるように座標系の直交度誤差を校正する。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特許第3474448号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

基準部材を用いて座標系を校正する方法においては、被検面の形状と基準部材の形状との差が大きくなると、計測精度が低下するという課題がある。これは、プローブを被検面に対してならい走査するため、基準部材を計測するときのプローブの移動領域と被検面を計測するときのプローブの移動領域とが異なるためである。一般に、形状計測機の計測可能領域内における部分的な領域間での座標系の直交度はサブppmのオーダーで異なる。このため、プローブの移動領域が異なることによって形状としてはサブミクロンからナノオーダーの形状誤差となり、高精度な形状計測においては無視できないものとなる。

20

【0006】

本発明は、上記の課題認識を契機としてなされたものであり、高精度な面形状計測に有利な面形状計測装置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】

【0007】

本発明の1つの側面は、被検面の形状を計測する面形状計測装置であって、基準点を通過するように放射されて前記被検面で反射され前記基準点を通じて戻ってくる被検光を検出することによって、前記基準点と前記被検面上の点との間の距離を計測する計測ヘッドと、前記基準点を移動するように前記計測ヘッドを走査する走査機構と、前記計測ヘッドを使った計測により得られた前記距離と前記基準点の座標とに基づいて前記被検面上の点から前記基準点への法線の方位を計算し、前記距離と前記方位とに基づいて前記被検面の形状を計算する処理部とを備え、前記処理部は、走査経路に沿って前記計測ヘッドを走査しながら第1の被検面を計測して得られた前記第1の被検面の形状を用いて、前記基準点の座標を校正し、前記第1の被検面を計測するための前記走査経路と同一の経路に沿って前記計測ヘッドを走査しながら前記第1の被検面とは異なる第2の被検面を計測して得られた前記第2の被検面の形状を、校正された基準点の座標に基づいて補正する。

30

40

【発明の効果】

【0008】

本発明によれば、高精度な面形状計測に有利な面形状計測装置が提供される。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】本発明の実施形態の面形状計測装置の概略構成を示す図である。

【図2】本発明の実施形態における計測ヘッドの構成を概略的に示す図である。

【図3】本発明の実施形態の面形状計測装置の概略構成を示す図である。

【図4】走査経路の一例を示す図である。

【図5】走査経路の他の例を示す図である。

50

【図 6】計測ヘッドの原点を決定する方法を説明する図である。

【図 7】計測ヘッドからの距離を算出する基準を決定する方法を説明する図である。

【図 8】本発明の他の実施形態を示す模式図である。

【図 9】校正と補正の手順を示すフローチャートである。

【図 10】本発明の一実施形態における計測ヘッドの構成を概略的に示す図である。

【図 11】計測ヘッドと被検面距離の初期値を決定する方法を説明する図である。

【図 12】アブソリュートに測長計測する構成の例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

本発明に係る面形状計測装置は、例えば、カメラ（ビデオカメラを含む）、複写機、望遠鏡、露光装置などに用いられるレンズ、ミラー、金型などの滑らかに連続した物体の面形状を計測するために好適である。

【0011】

まず、本発明に係る面形状計測装置の基本原理について説明する。図 3 に関連するパラメーターを示す。面形状計測装置は、被検面 10 の面形状を計測するための計測ヘッド 110 を有する。点 $F(s, t, u)$ は、計測ヘッド 110 から放射される球面波の中心、すなわち基準点の座標である。点 $C(x, y, z)$ は、点 $F(s, t, u)$ を中心とする球面波が被検面 10 において正反射する点の座標である。 q は、点 $C(x, y, z)$ と点 $F(s, t, u)$ との間の距離である。 $n = (\quad, \quad, \quad)$ は、被検面 10 の点 $C(x, y, z)$ における単位法線ベクトルである。面形状計測装置は、計測ヘッド 110 を走査しながら点 $F(s, t, u)$ の座標と距離 q を計測し、その結果から被検面 10 上の点 $C(x, y, z)$ の座標群、即ち、面形状を決定する。

【0012】

点 $C(x, y, z)$ は、点 $F(s, t, u)$ を中心とする半径 q の球面上にあるから、式 (1) が成り立つ。

$$(x - s)^2 + (y - t)^2 + (z - u)^2 = q^2 \quad \dots (1)$$

ここで、式 (1) の両辺を、 s, t, u で偏微分すると、式 (2) が得られる。

$$x = s - q \cdot q / s$$

$$y = t - q \cdot q / t$$

$$z = u - q \cdot q / u \quad \dots (2)$$

したがって、計測ヘッド 110 の基準点位置 $F(s, t, u)$ と点 $F(s, t, u)$ から被検面 10 までの距離 q とを計測することにより、式 (2) に従って被検面 10 上の点の座標群、即ち被検面 10 の面形状を求めることができる。これを基本原理としている。

【0013】

単位法線ベクトルの性質により、 $\quad = q / s$ 、 $\quad = q / t$ 、 $\quad = q / u$ であるから、式 (2) は、式 (3)、(4) のようにベクトル形式で表現することができる。

$$(x \ y \ z) = (s \ t \ u) - q (\quad) \quad \dots (3)$$

$$(\quad) = (q / s \ q / t \ q / u) \quad \dots (4)$$

式 (4) を使うことにより、計測ヘッド 110 の基準点位置 $F(s, t, u)$ と、点 F から被検面 10 までの垂直距離 q とから、単位法線ベクトル (\quad) が得られ、それを式 (3) に代入することにより、被検面形状 $(x \ y \ z)$ が得られる。以上が基本原理である。

【0014】

一方、式 (4) は、計測ヘッド 110 の基準点位置 $F(s, t, u)$ と、被検面から基準点 F へ向けての単位法線ベクトル (\quad) により、垂直距離 q が得られ、それを式 (3) に代入することによっても形状が得られることを示している。

【0015】

したがって、実施形態 2 において説明するように、計測ヘッドは基準点位置 $F(s, t, u)$ と、被検面から基準点 F へ向けての単位法線ベクトル (\quad) を計測するようにしてもよい。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 6 】

また、離散的な計測データの処理においては、偏分は差分として扱われるので、式（ 4 ）と等価な差分形式である式（ 5 ）を適用する。

【 0 0 1 7 】

【 数 5 】

$$(\Delta s \quad \Delta t \quad \Delta u) \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \Delta q$$

10

・ ・ ・ （ 5 ）

【 0 0 1 8 】

（ 第 1 実施形態 ）

図 1 は、本発明の第 1 実施形態の面形状計測装置の概略構成を示す図である。図 1（ a ）は正面図、図 1（ b ）は側面図である。ここでは、図 1 に示すように x y z 座標系が定義されている。面形状計測装置は、ベース定盤 1 0 1 と、ベース定盤 1 0 1 によって支持された基準フレーム 1 0 2 と、ベース定盤 1 0 1 によって支持されたワークホルダー 1 0 6 と、計測ヘッド 1 1 0 とを備えている。ワークホルダー 1 0 6 によって被検面 1 0 を有する被検物が保持されている。面形状計測装置は、計測ヘッド 1 1 0 の x 位置を計測するための基準平面ミラー 1 0 3、計測ヘッド 1 1 0 の y 位置を計測するための基準平面ミラー 1 0 4、計測ヘッド 1 1 0 の z 位置を計測するための基準平面ミラー 1 0 5 を備えている。これらは基準フレーム 1 0 2 に取り付けられている。

20

【 0 0 1 9 】

面形状計測装置は、更に、計測ヘッド 1 1 0 を走査する走査機構として、Xスライド 1 0 7、Yスライド 1 0 8、Zスライド 1 0 9 を含む X Y Z ステージ機構を備えている。計測ヘッド 1 1 0 は、Zスライド 1 0 9 に搭載され、Zスライド 1 0 9 は、Xスライド 1 0 7 に搭載され、不図示の駆動機構により z 軸方向に駆動される。Xスライド 1 0 7 は、Yスライド 1 0 8 に搭載されており、不図示の駆動機構により x 軸方向に駆動される。Yスライド 1 0 8 は、ベース定盤 1 0 1 に搭載されており、不図示の駆動機構により y 軸方向に駆動される。これにより、計測ヘッド 1 1 0 と被検面 1 0 とは 3 次元的に相対的な位置関係を変更可能な構成を有する。

30

【 0 0 2 0 】

ヘテロダイン干渉測長のための 2 周波数発振レーザー 1 から射出されたレーザー光束は、偏波面保存ファイバー 2 により、ファイバー入力コリメーター 3 に導光される。コリメーター 3 より出射されたレーザー光束は、Yスライド 1 0 8 に取り付けられたミラー 1 1 1 で反射される。その後、該レーザー光束は、Xスライド 1 0 7 上に取り付けられた無偏光ビームスプリッター 1 1 2 および反射プリズム 1 1 3、Zスライド 1 0 9 上に取り付けられた無偏光ビームスプリッター 1 1 4 とにより、レーザー干渉計 1 1 5、1 1 6、1 1 7 へ導光される。ここで、レーザー干渉計 1 1 5、1 1 6、1 1 7 は、それぞれ、x 位置、y 位置、z 位置の計測用の干渉計である。レーザー干渉計 1 1 5、1 1 6、1 1 7 で得られる干渉信号は、不図示の光ファイバーを通して信号処理ユニット 7 に提供される。Xスライド 1 0 7、Yスライド 1 0 8、Zスライド 1 0 9 は、X Y Z ステージ制御ユニット 8 によって制御される。

40

【 0 0 2 1 】

コンピューター（処理部）9 は、計測ヘッド 1 1 0 の走査経路を設定する機能、計測データ群を取得する機能、被検面 1 0 の面形状を 3 次元座標群として求める機能、走査経路の座標を校正する機能、被検面 1 0 の面形状の計測結果を補正する機能を含む。コンピューター 9 は走査経路を表す座標群を生成し、X Y Z ステージ機構の制御ユニット 8 は、その座標群に基づいて、X Y Z ステージ機構における不図示の駆動機構を制御して計測ヘッ

50

ド 1 1 0 を走査経路に沿って走査する。コンピュータ 9 は、信号処理ユニット 7 を介して走査経路における計測ヘッド 1 1 0 からの距離情報 q とレーザー干渉計 1 1 5、1 1 6、1 1 7 からの計測ヘッド 1 1 0 の位置情報とを計測データ群として取得する。コンピュータ 9 は、これらの計測データ群を演算処理して、被検面 1 0 の面形状を 3 次元座標群として求めたり、走査経路の座標を校正したり、被検面 1 0 の面形状の計測結果を補正したりする。

【 0 0 2 2 】

面形状計測装置は、当該面形状計測装置の $x y z$ 座標系の原点を定める原点ユニット 1 2 1 を備えている。原点ユニット 1 2 1 は、その内部に不図示の凹球面を有し、その球面の曲率中心が面形状計測装置の $x y z$ 座標系の原点とされている。

10

【 0 0 2 3 】

レーザーユニット 4 は、計測ヘッド 1 1 0 に光束を提供する光源である。レーザーユニット 4 は、ヘテロダイン干渉測長のための 2 つの光束（これらは、偏光方向が互いに直交し、周波数が互いに僅かに異なる）を同一光路上に出射して計測ヘッド 1 1 0 に提供する。レーザーユニット 4 はまた、計測ヘッド 1 1 0 に提供する 2 つの光束の周波数差によるビートを含む基準ビート信号を生成し、信号処理ユニット 7 に提供する。レーザーユニット 4 から発したレーザー光が、偏波面保存ファイバー 5、ファイバー入力コリメーター 6、ミラー 1 1 8、ミラー 1 1 9、ミラー 1 2 0 を介して、図 2 に示された計測ヘッド 1 1 0 のビームエキスパンダ 2 0 1 に導かれる。

【 0 0 2 4 】

20

図 2 を参照しながら計測ヘッド 1 1 0 について説明する。計測ヘッド 1 1 0 は、トワイマングリーン型の干渉計を構成している。照明光学系は、ビームエキスパンダ 2 0 1、偏光ビームスプリッタ 2 0 2、 $\lambda/4$ 板 2 0 9、および対物レンズ 2 1 0 によって構成されている。受光光学系は、対物レンズ 2 1 0、 $\lambda/4$ 板 2 0 9、偏光ビームスプリッタ 2 0 2、集光レンズ 2 0 5、および遮蔽部材 2 0 7 により構成されている。ビームエキスパンダ 2 0 1 から出射された光束は、偏光ビームスプリッタ 2 0 2 により、S 成分が透過し、P 成分が反射し、互い直交する偏光方向をもつ直線偏光に分れる。透過した光束は、参照面 2 0 4 側へ進み、反射した光束は被検面 1 0 側へ進む。参照面 2 0 4 へ進んだ光束は、 $\lambda/4$ 板 2 0 3 で円偏光に変換されて参照面 2 0 4 で正反射され、再び $\lambda/4$ 板 2 0 3 を透過して直線偏光に変換されて偏光ビームスプリッタ 2 0 2 に戻る。こんどは、偏光ビームスプリッタ 2 0 2 に対して S 成分の直線偏光となっているので、反射して集光レンズ 2 0 5 側へ進む。

30

【 0 0 2 5 】

一方、被検面 1 0 側へ進んだ光束は、 $\lambda/4$ 板 2 0 9 で円偏光に変換されて対物レンズ 2 1 0 に入射する。この光束は、対物レンズ 2 1 0 の集光点 2 1 1（点 F）を曲率中心とする球面波に変換され被検面 1 0 で反射される。被検面 1 0 で反射した光のうち、ほぼ正反射した光束 2 1 2 は、被検光として対物レンズ 2 1 0 を戻り、 $\lambda/4$ 板 2 0 9 へ戻る。こんどは、偏光ビームスプリッタ 2 0 2 に対して P 成分の直線偏光となっているので、透過して集光レンズ 2 0 5 側へ進む。参照面 2 0 4 で反射された光（参照光）と被検面 1 0 で反射された光（被検光）は干渉波となり、集光レンズ 2 0 5 により干渉信号検出ユニット 2 0 8 に至り、計測ビート信号が検出される。この計測ビート信号は、ケーブル 2 1 3 を介して、信号処理ユニット 7 に提供される。信号処理ユニット 7 において、レーザーユニット 4 から提供される参照ビート信号と信号検出ユニット 2 0 8 から提供される計測ビート信号との周波数差を積分することにより、参照面 2 0 4 と被検面 1 0 との間の光路長の変化が検出される。

40

【 0 0 2 6 】

図 2 において、集光レンズ 2 0 5 の集光点 2 0 6 は、対物レンズ 2 1 0 の集光点 2 1 1（点 F）と共役な関係を有する。遮蔽部材 2 0 7 は、集光レンズ 2 0 5 の集光点 2 0 6 およびその近傍に集光してきた光束のみを通過させる。これにより、被検面 1 0 において反射された光束のうち正反射された光束 2 1 2 のみが干渉信号検出ユニット 2 0 8 に入射す

50

る。したがって、信号処理ユニット7において検出される参照面204と被検面10との間の光路長の変化は、集光点211と被検面10における光束を正反射する部分との間の光路長の変化と等価である。これにより、集光点211と被検面10における光束を正反射する部分との間の距離を検出することができる。

【0027】

ただし、被検面10の形状によっては、光路長の変化を正しく得られない場合がある。例えば、被検面10が広い領域で共通の曲率中心を持ち、走査経路において被検面10の曲率中心位置と基準点Fが一致する場合である。この場合、被検面10の広い領域からの反射光が曲率中心の近傍にしか戻らない状態となるので、わずかの走査でも干渉信号が得られなくなるためである。例えば、被検面10が球面の場合に起こりうる。このような場合は、走査経路を被検面の曲率中心から十分に離れたものとすることによって、光路長の変化を正しく得ることができる。したがって、被検面10の形状の計測が可能となる。

10

【0028】

また、被検面10が交差する2以上の法線を持ち、走査経路において被検面10の2以上の法線の交点と基準点Fが一致する場合においても光路長の変化を正しく得ることができない。複数の異なる領域からの反射光による干渉が起きるためである。このような場合においても、走査経路を被検面の2以上の法線の交点から十分に離れたものとするにより、光路長の変化を正しく得ることができる。したがって、被検面10の形状の計測が可能となる。

【0029】

20

次に、上記の構成における面形状の計測手順とアルゴリズムを説明する。前述のとおり、点F(s, t, u)は、計測ヘッド110から放射される球面波の中心(基準点)の座標である。点C(x, y, z)は、点F(s, t, u)を中心とする球面波が被検面10において正反射する点の座標である。qは、点C(x, y, z)と点F(s, t, u)との距離である。n(, ,)は、被検面10の点C(x, y, z)における単位法線ベクトルである。

【0030】

点F(s, t, u)の座標は、詳細は後述されるが、レーザー干渉計115、116、117を使って計測される。点C(x, y, z)と点F(s, t, u)との距離qは、詳細は後述されるが、計測ヘッド110を使って計測される。前述のとおり、被検面10上の点C(x, y, z)は、式(3)、(4)、(5)のように表現することができる。計測ヘッド110を走査経路に沿って走査しながらレーザー干渉計115、116、117によって点Fの位置を計測するとともに計測ヘッド110によって距離qを計測し、式(3)、(4)、(5)に従って、被検面10上の点Cの座標群を求めることができる。求めた被検面10上の点Cの座標群は、面形状に相当する。

30

【0031】

図4、図5は走査経路を例示している。図4は、走査経路が平面上にある例を示している。図4に示す例では、計測ヘッド110の基準点F(s, t, u)が走査経路である平面301に沿って移動するように計測ヘッド110が走査される。図5は、走査経路が球面上にある例を示している。図5に示す例では、計測ヘッド110の基準点Fが走査経路である球面302に沿って移動するように計測ヘッド110が走査される。その他、走査経路は、被検面10の形状に応じて任意に決定されうる。

40

【0032】

計測ヘッド110を走査経路に沿って走査しながら、レーザー干渉計115、116、117によって点F(s, t, u)の位置を計測するとともに計測ヘッド110によって距離qを計測することによって、次のような計測データ群が得られる。なお、添え字として付された1、2、・・・、j、・・・、Nは、データの番号を意味する。

(s₁, t₁, u₁), q₁
(s₂, t₂, u₂), q₂
.

50

・
 $(s_j, t_j, u_j), q_j$ ・
 ・

$(s_N, t_N, u_N), q_N$

このデータ群のうち、 j 番目の計測点における単位法線ベクトル $n_j = (n_{j1}, n_{j2}, n_{j3})$ を、次のようにして求めることができる。

【0033】

j 番目の点の近傍に位置する計測点として、 j 番目の計測点を含めて $(k+1)$ 個の計測点を選ぶ。このとき、 $(k+1)$ 個の計測点のうち少なくとも3点は同一直線上には並ばないように選ぶ。選んだ各計測点において、前述の式(5)の関係を適用して次の連立方程式が得られる。

10

【0034】

【数6】

$$\begin{pmatrix} \Delta s_{j1} & \Delta t_{j1} & \Delta u_{j1} \\ \Delta s_{j2} & \Delta t_{j2} & \Delta u_{j2} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \Delta s_{jk} & \Delta t_{jk} & \Delta u_{jk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_j \\ \beta_j \\ \gamma_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta q_{j1} \\ \Delta q_{j2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta q_{jk} \end{pmatrix}$$

20

・・・(6)

ただし、

$$(s_{jm}, t_{jm}, u_{jm}) = (s_{jm}, t_{jm}, u_{jm}) - (s_j, t_j, u_j)$$

$$q_{jm} = q_{jm} - q_j$$

(s_{jm}, t_{jm}, u_{jm}) : j 番目の計測点の近傍に位置する計測点、 q_{jm} : j 番目の計測点の近傍に位置する計測点における点Cと点Fとの距離

30

$m = 1, 2, \dots, k$

である。

【0035】

また、単位法線ベクトルの性質から、

$$n_{j1}^2 + n_{j2}^2 + n_{j3}^2 = 1 \quad \dots (7)$$

である。

【0036】

式(6)は、前記計測点の選び方により、2以上の独立な行を含む。したがって、式(7)の条件のもとに式(6)へ最小二乗法を適用して、 j 番目の計測点における単位法線ベクトル $n_j = (n_{j1}, n_{j2}, n_{j3})$ を決定することができる。この結果を式(3)に適用することにより、 j 番目の計測点における被検面10の座標 $C_j(x_j, y_j, z_j)$ が次のように定まる。

40

$$(x_j, y_j, z_j) = (s_j, t_j, u_j) - q_j (n_{j1}, n_{j2}, n_{j3}) \quad \dots (8)$$

これを各計測点について行うことにより、被検面10の面形状を表す座標点の集合を式(9)のように決定することができる。

$$(x_1, y_1, z_1)$$

$$(x_2, y_2, z_2)$$

・

・

50

(x_j, y_j, z_j)
 \cdot
 \cdot
 (x_N, y_N, z_N)
 $\cdot \cdot \cdot (9)$

【0037】

ここで、レーザー干渉計115、116、117によって、計測ヘッド110の基準点 $F(s, t, u)$ を計測する方法について説明する。通常、レーザー干渉計は、インクリメンタル型の測長計であるから、原点からの変位量を検出することにより位置を計測する。この実施形態では、原点を提供する構成として原点ユニット121が使用される。原点

10

【0038】

図6を参照してより詳細に説明すると、原点ユニット121に備えられている凹球面122の曲率中心が面形状計測装置の原点123である。この原点123と計測ヘッド110から放射される球面波の中心Fとが一致したとき、凹球面122で反射された光束が全て計測ヘッド110に戻るので、信号処理ユニット7に提供される計測ビート信号の振幅は最も強いものとなる。計測ビート信号の振幅が最大になる位置をもって、原点ユニット121により提供される面形状計測装置の原点と計測ヘッド110から放射される球面波

20

【0039】

次に、計測ヘッド110によって、計測ヘッド110から放射される球面波の中心点Fと該球面波が被検面10において正反射する点Cとの距離qを計測する方法を説明する。計測ヘッド110も、インクリメンタル型の測長計を構成している。そこで、計測ヘッド110から放射される球面波の中心点Fと該球面波が被検面10において正反射する点Cとの距離が分かっている状態で計測ヘッド110から提供される値が基準とされる。そして、その値からの変化量を変位量に換算することにより距離qを計測することができる。図7(a)、(b)を参照してより詳細に説明する。図7(a)は、計測ヘッド110から放射される球面波の中心点Fが被検面10上の点と一致するように計測ヘッド110を位置決めした状態を示している。このとき、距離qはゼロである。また、この場合において計測ヘッド110から放射される球面波は、頂点反射の状態(いわゆるキャッツアイの状態)で、被検面10により反射されるので、計測ヘッド110に戻る光束が最も多い。したがって、信号処理ユニット7に提供される計測ビート信号の振幅は最も強いものとなる。計測ビート信号の振幅が最大になるときの計測値を、計測ヘッド110から放射される球面波の中心点Fと該球面波が被検面10において正反射する点Cとの距離qの基準値 Q_0 を決定することができる。図7(b)は、図7(a)の状態から、計測ヘッド110を走査して、他の位置へ移動させた状態を示している。前述の如く、計測ヘッド110は、集光点211すなわち点Fと被検面10で正反射する部分Cとの間の光路長の変化を計測する構成を有する。したがって、このときの読み値をQとすると、求める距離qは、式(10)で表される。

30

40

$$q = Q - Q_0 \quad \cdot \cdot \cdot (10)$$

以上のように、計測ヘッド110を走査しながら、計測ヘッド110の基準点Fの位置と、基準点Fから被検面10までの垂直距離qとを計測することにより、被検面10の面形状を計測することができる。

【0040】

次に、基準部材の基準面の形状計測による座標の校正とそれに基づく被検面計測データの補正について例示的に説明する。図9は、校正と補正の手順を示すフローチャートである。工程501において、コンピューター(処理部)9は走査経路を設定する。走査経路

50

は、計測ヘッド 110 の基準点 F の軌跡であり、走査経路上の 3 次元の座標列として式 (11) のように表される。

$$(s_j, t_j, u_j), j = 1, 2, \dots, N \dots (11)$$

後述の工程 503 および工程 506 では、XYZ ステージ制御ユニット 8 は、式 (11) に示される座標列 (s_j, t_j, u_j) を目標座標列 (指令値) とする。そして、XYZ ステージ制御ユニット 8 は、計測ヘッド 110 の基準点 F (s, t, u) が座標列 (s_j, t_j, u_j) で与えられる走査経路を走査するように XYZ ステージ機構を制御する。ここで、式 (11) で与えられる走査経路は、基準部材の計測および被検面 10 の計測において共通に使用される。また、走査経路上における計測点も、基準部材の計測および被検面 10 の計測において共通に使用される。共通して使用できる計測点がない計測点に対しては、周辺の計測点から内挿により計測点を生成し、共通して使用する計測点とすることができる。

【0041】

工程 502 において、基準面を有する基準部材が面形状計測装置のワークホルダー 106 にセットされる。工程 503 では、式 (11) で与えられる走査経路に従って計測ヘッド 110 が走査されながら、信号処理ユニット 7 により基準部材の基準面の座標を示す形状計測データが逐次生成され、これらが形状計測データ群としてコンピューター 9 に蓄積される。工程 504 では、コンピューター 9 は、基準部材の基準面の形状計測データ群と該基準面の既知の基準形状値とに基づいて、走査経路の座標校正データを生成する。校正データの生成例については後述する。

【0042】

次に工程 505 では、基準部材がワークホルダー 106 から外され、代わりに、被検面 10 を有する被検物がワークホルダー 106 にセットされる。工程 506 では、式 (11) で与えられる走査経路 (即ち、校正時と同一の面) に従って計測ヘッド 110 が走査されながら、信号処理ユニット 7 により被検面 10 の表面の座標を示す形状計測データが逐次生成される。逐次生成された形状計測データは、形状計測データ群としてコンピューター 9 に蓄積される。工程 507 では、コンピューター 9 は、工程 504 において求めた座標校正データを用いて、被検面 10 の形状計測データ群を補正する。補正の例については後述する。工程 508 では、被検面 10 を有する被検物がワークホルダー 106 から外され、必要に応じて、次の被検物がワークホルダー 106 にセットされ、工程 506 にもどり、当該次の被検物について計測がなされる。

【0043】

以上のように、この実施形態によれば、基準部材の計測および被検面 10 の計測において共通の走査経路に従って計測ヘッド 110 が走査されるので、走査経路の違いによる計測誤差が生じず、被検面 10 の面形状を高精度に計測することができる。

【0044】

次に、工程 504 における座標校正データの生成について例示的に説明する。この例では、計測ヘッド 110 の基準点 F (s_j, t_j, u_j) から基準部材までの距離 q_j の計測精度が十分に高いものとして、中心 F (s_j, t_j, u_j) の座標を校正する。 q_j の計測精度は、主に計測ヘッド 110 の波面収差に依存し、一般にサブミクロンからサブナノメートルレベルの精度を達成可能である。

【0045】

工程 504 では、式 (8) に従って、式 (12) で表される基準部材の形状計測データ群が得られる。

【0046】

$$(x_j', y_j', z_j') = (s_j, t_j, u_j) - q_j' \begin{pmatrix} x_j' \\ y_j' \\ z_j' \end{pmatrix} \quad j = 1, 2, \dots, N \dots (12)$$

ここで、 (s_j, t_j, u_j) は、計測ヘッド 110 の基準点座標を示すベクトルであり、走査経路を示す目標座標列 (指令値) である。 q_j' は、距離 q_j の計測値である。

(j', j', j') は、走査経路を示す目標座標列（指令値） (s_j, t_j, u_j) と垂直距離 q_j の計測値 q_j' とに基づいて計算される単位法線ベクトルである。

【0047】

一方、基準部材の形状 (x_j, y_j, z_j) は既知であり、式（8）に従って、走査経路を示す目標座標列（指令値） (s_j, t_j, u_j) とは、式（13）で示される関係を有する。

$$(x_j, y_j, z_j) = (s_j, t_j, u_j) - q_j (j', j', j') \quad j = 1, 2, \dots, N$$

・・・（13）

ここで、 q_j は、走査経路と基準部材の既知の形状とから計算される垂直距離である。

(j', j', j') は、走査経路を示す目標座標列（指令値） (s_j, t_j, u_j) と垂直距離の計算値 q_j とに基づいて計算される単位法線ベクトルである。

【0048】

ここでは、垂直距離 q_j' の計測精度が十分に高いという前提であるから、 (x_j', y_j', z_j') と (x_j, y_j, z_j) との間の差は、走査経路を示す目標座標列（指令値） (s_j, t_j, u_j) と実際の走査経路との差によって引き起こされるものである。したがって、 (s_j, t_j, u_j) として、指令値ではなく実際の位置を使用することによって、面形状を正しく計算することができる。この実際の位置が、計測ヘッド 110 の基準点座標の校正值である。

【0049】

目標座標列（指令値） (s_j, t_j, u_j) に対する実際の位置は次のようにして決定することができる。ここでは、簡単化のために x 成分について説明する。基準部材の表面の座標における x 成分は、式（13）より、式（14）のように表される。

$$x_j = s_j - q_j \cdot j' \quad \dots (14)$$

ここで、球面波の実際の中心座標が指令値 s_j にオフセット値 s_j を加えた座標であるときに、 x_j が x_j' として計測されることができる。オフセット値 s_j による x_j の変化量は、式（15）式のように表すことができる。

【0050】

【数15】

$$\delta x_j = \delta s_j - q_j \delta \alpha_j - \alpha_j \delta q_j$$

$$= \delta s_j - q_j \frac{\partial \alpha_j}{\partial s_j} \delta s_j - \alpha_j \frac{\partial q_j}{\partial s_j} \delta s_j$$

$$= \left(1 - q_j \frac{\partial \alpha_j}{\partial s_j} - \alpha_j \frac{\partial q_j}{\partial s_j} \right) \delta s_j$$

・・・（15）

よって、オフセット値 s_j は、式（15）を変形して、式（16）のように表すことができる。

【0051】

10

20

30

40

【数 1 6】

$$\delta s_j = \frac{x'_j - x_j}{1 - q_j \frac{\partial \alpha_j}{\partial s_j} - \alpha_j \frac{\partial q_j}{\partial s_j}}$$

・・・ (1 6)

他成分についても同様である。計測ヘッド 1 1 0 の基準点座標の指令値 (s_j , t_j , u_j) に対するオフセット (δs_j , δt_j , δu_j) は、式 (1 7) のようになる。

10

【 0 0 5 2】

【数 1 7】

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta s_j = \frac{x'_j - x_j}{1 - q_j \frac{\partial \alpha_j}{\partial s_j} - \alpha_j \frac{\partial q_j}{\partial s_j}} \\ \delta t_j = \frac{y'_j - y_j}{1 - q_j \frac{\partial \alpha_j}{\partial t_j} - \alpha_j \frac{\partial q_j}{\partial t_j}} \\ \delta u_j = \frac{z'_j - z_j}{1 - q_j \frac{\partial \alpha_j}{\partial u_j} - \alpha_j \frac{\partial q_j}{\partial u_j}} \end{array} \right.$$

20

30

$$j = 1, 2, \dots, N$$

・・・ (1 7)

よって、工程 5 0 4 において、計測ヘッド 1 1 0 の基準点座標の校正された座標は、式 (1 8) のように、基準点座標の指令値 (s_j , t_j , u_j) をオフセット (δs_j , δt_j , δu_j) によって補正した座標として与えられる。

($s_j + \delta s_j$, $t_j + \delta t_j$, $u_j + \delta u_j$) $j = 1, 2, \dots, N$

・・・ (1 8)

工程 5 0 7 では、式 (1 8) で示される校正された基準点座標を用いて、前述した形状を求めるアルゴリズムを実行することにより、補正された被検面の形状を得ることができる。

40

【 0 0 5 3】

この実施形態によれば、校正時と計測時とにおいて同一の走査経路に沿って計測ヘッドを走査するので、校正時と計測時とにおいて別個の走査経路に沿って計測ヘッドを走査する構成に比べて高い精度で面形状を計測することができる。

【 0 0 5 4】

(第 2 実施形態)

本実施形態は、計測ヘッド 1 1 0 を、基準点位置 F (s , t , u) と、被検面から基準点 F へ向けての単位法線ベクトル (n_x , n_y , n_z) を計測するようにした場合である。ここ

50

で言及しない事項は、第1実施形態に従いうる。

上記の式(4)は、積分形式で、式(20)として表すことができる。

$$q = q_0 + \left(\frac{ds}{dt} + \frac{dt}{du} + \frac{du}{ds} \right) \cdots (20)$$

ただし、 q_0 は積分定数である。

【0055】

したがって、計測ヘッド110の基準点位置 $F(s, t, u)$ と被検面から基準点 F へ向けての単位法線ベクトル()とから、式(20)により垂直距離 q が得られ、それを式(3)に代入することによって形状が得られることになる。

【0056】

図10を参照しながら計測ヘッド110について説明する。計測ヘッド110は、照明光学系と受光光学系とを含む。照明光学系は、ビームエキスパンダ1201、偏光ビームスプリッタ1202、 $\lambda/4$ 板1209、および対物レンズ1210によって構成されている。受光光学系は、対物レンズ1210、 $\lambda/4$ 板1209、偏光ビームスプリッタ1202、集光レンズ1205、および遮蔽部材1207によって構成されている。ビームエキスパンダ1201から出射された光束は、S偏光であり、偏光ビームスプリッタ1202で反射されて被検面10側へ進む。

【0057】

被検面10側へ進んだ光束は、 $\lambda/4$ 板1209で円偏光に変換されて対物レンズ1210に入射する。この光束は、対物レンズ1210の集光点1211(点 F)を曲率中心とする球面波に変換され被検面10に入射し、被検面10で反射される。被検面10で反射した光のうち、正反射した光束1212は、被検光として対物レンズ1210を戻り、再び $\lambda/4$ 板1209を透過して $\lambda/4$ 板1209によって直線変換される。 $\lambda/4$ 板1209を透過した光束は、偏光ビームスプリッタ1202に対してP偏光の直線偏光となっているので、透過して集光レンズ1205側へ進み位置検出ユニット1208に至る。位置検出ユニット1208は、光スポット位置センサーを含み、被検面10で正反射して計測ヘッド110に戻ってくる光束1212の方位の情報として光スポット位置センサーに入射する光束の位置を示す光束位置信号を検出する。この光束位置信号は、光量を示す情報を含む。検出された光束位置信号は、ケーブル213を介して、信号処理ユニット7に提供される。信号処理ユニット7は、計測ヘッド110から提供される光束位置信号に基づいて、被検面10で正反射して計測ヘッド110に戻ってくる光束1212の方位を示す単位法線ベクトル、即ち被検面10の法線ベクトルを検出する。光スポット位置センサーとしては、2次元フォトセンシティブディテクター(PSD)や、2次元配列画像素子(CCD)などがある。

【0058】

図10において、集光レンズ1205の集光点1206は、対物レンズ1210の集光点1211(点 F)と共役な関係を有する。遮蔽部材1207は、集光レンズ1205の集光点1206およびその近傍に集光してきた光束のみを通過させる。これにより、被検面10において反射された光束のうち正反射された光束1212のみが位置検出ユニット1208に入射する。したがって、この光束位置信号は、被検面10での法線ベクトルを示す情報を含んでいる。

【0059】

ただし、被検面10の形状によっては、光束位置信号は、被検面10の法線ベクトルを示さない場合がある。例えば、被検面10が広い領域で共通の曲率中心を持ち、走査経路においてその曲率中心位置と基準点 F とが一致する場合である。この場合、広い領域からの反射光が信号ユニット208に入射するためである。これは、例えば被検面10が球面の場合に起こりうる。このような場合は、走査経路を被検面10の曲率中心から十分に離れたものとすることによって、光束位置信号が被検面10の法線ベクトルを示す信号とすることができるので、被検面10の形状の計測が可能となる。

【0060】

また、被検面10が交差する2以上の法線を持ち、走査経路において被検面10の2以

10

20

30

40

50

上の法線の交点と基準点Fとが一致する場合も光束位置信号が被検面10の法線ベクトルを示さない。複数の異なる領域からの反射光が信号検出ユニット1208に入射するためである。このような場合も、走査経路を被検面10の2以上の法線の交点から十分に離れたものとするにより、光路長の変化を正しく得ることができる。したがって、被検面10の形状の計測が可能となる。

【0061】

次に、本例における単位法線ベクトルの計算法をより具体的に説明する。位置検出ユニット1208は、被検光束1212のx位置とy位置を検出する。より具体的には、位置検出ユニット1208は、被検光束1212のx位置とy位置を示す光束位置検出信号を発生する。ここで、被検光束1212のx位置、y位置は、それぞれDx、Dyとする。このx位置はx軸に対する方向余弦に比例し、y位置はy軸に対する方向余弦に比例する。この比例係数をKとすると、位置検出ユニット1208で検出される被検光束の位置Dx、Dyは、

$$Dx = K$$

$$Dy = K$$

である。Kは、計測ヘッド110の受光光学系の構成により定められる定数である。この関係と、単位法線ベクトルの性質

$$^2 + ^2 + ^2 = 1$$

より、単位法線ベクトルは、

$$= Dx / K$$

$$= Dy / K$$

$$= (1 - ^2 - ^2)^{1/2}$$

として計算することができる。

【0062】

前述のとおり、点F(s, t, u)は、計測ヘッド110から放射される球面波の中心すなわち基準点の座標である。点C(x, y, z)は、点F(s, t, u)を中心とする球面波が被検面10において正反射する点の座標である。qは、点C(x, y, z)と点F(s, t, u)との距離である。n(, ,)は、被検面10の点C(x, y, z)における単位法線ベクトルである。

【0063】

点F(s, t, u)の座標は、詳細は後述されるが、レーザー干渉計115、116、117を使って計測される。単位法線ベクトルn(, ,)は、計測ヘッド110を使って計測される。前述のとおり、被検面10上の点C(x, y, z)は、式(3)、(4)、(20)のように表現することができる。計測ヘッド110を走査経路に沿って走査しながらレーザー干渉計115、116、117によって点Fの位置を計測するとともに計測ヘッド110によって単位法線ベクトルn(, ,)を計測する。そして、式(3)、(4)、(20)に従って、被検面10上の点Cの座標群、即ち面形状を求めることができる。

【0064】

計測ヘッド110を走査しながら、レーザー干渉計115、116、117によって点F(s, t, u)の位置を計測するとともに計測ヘッド110によって単位法線ベクトルn(, ,)を計測することによって、次のような計測データ群が得られる。なお、添え字として付された1、2、・・・、j、・・・、Nは、データの番号を意味する。

$$(s_1, t_1, u_1), (s_1, t_1, u_1)$$

$$(s_2, t_2, u_2), (s_2, t_2, u_2)$$

・

・

$$(s_j, t_j, u_j), (s_i, t_i, u_i)$$

・

・

10

20

30

40

50

$(s_N, t_N, u_N), (s_N, t_N, u_N)$

このデータ群のうち、 i 番目の計測点における距離 q_j を、次のようにして求めることができる。

【0065】

式(20)により、点 $i = j$ における距離 q_j は、

【0066】

【数21】

$$q_j = q_0 + \sum_{k=2}^i (\alpha_k \Delta s_k + \beta_k \Delta t_k + \gamma_k \Delta u_k) \quad 10$$

・・・(21)

ただし、

$(s_k, t_k, u_k) = (s_k, t_k, u_k) - (s_{k-1}, t_{k-1}, u_{k-1})$

である。積分定数 q_0 を定める方法は後述する。

【0067】

ここで、測定点 j における点 F の位置 (s_j, t_j, u_j) と、単位法線ベクトル (n_j, t_j, u_j) と式(21)により求められた距離 q_j を(3)式に代入する。これにより、 j 番目の計測点における被検面10の座標 $C_j(x_j, y_j, z_j)$ を示す式(22)が得られる。 20

$(x_j, y_j, z_j) = (s_j, t_j, u_j) - q_j(n_j, t_j, u_j) \quad \dots (22)$

これを各計測点について行うことにより、被検面10の面形状を表す座標点の集合を式(23)のように決定することができる。

(x_1, y_1, z_1)

(x_2, y_2, z_2)

・

・

(x_j, y_j, z_j)

・

・

(x_N, y_N, z_N)

・・・(23)

【0068】

ここで、レーザー干渉計115、116、117によって、計測ヘッド110の基準点 $F(s, t, u)$ を計測する方法について説明する。通常、レーザー干渉計は、インクリメンタル型の測長計であるから、原点からの変位量を検出することにより位置を計測する。この実施形態では、原点を提供する構成として原点ユニット121が使用される。原点ユニット121により提供される面形状計測装置の原点に計測ヘッド110が放射する球面波の中心、即ち基準点 F を一致させ、そのときにレーザー干渉計115、116、117によって提供される値を原点に対応する値とする。 40

【0069】

図6を参照してより詳細に説明すると、原点ユニット121に備えられている凹球面122の曲率中心が面形状計測装置の原点123である。この原点123と計測ヘッド110から放射される球面波の中心、即ち基準点 F とが一致したとき、凹球面122で反射された光束が全て計測ヘッド110に戻るため、信号処理ユニット7に提供される光束位置信号が最も強いものとなる。この光量が最大になる位置をもって、原点ユニット121により提供される面形状計測装置の原点と計測ヘッド110の基準点 F とが一致していると判断することができる。このときにレーザー干渉計115、116、117から提供される値を原点に相当する値とする。 50

【 0 0 7 0 】

次に、積分定数 q_0 を定める方法を説明する。第 1 の例において、積分定数 q_0 は、式 (2 0) の積分経路の始点、即ち走査経路の始点における基準点 F と被検面 1 0 との垂直距離として定めることができる。したがって、走査経路の始点における基準点 F と被検面 1 0 との垂直距離を求めることにより、積分定数 q_0 を定めることができる。

【 0 0 7 1 】

図 1 1 (a)、(b) を参照してより具体的な例を説明する。図 1 1 (a) は、走査経路始点における配置を示している。F は基準点、C は基準点 F から放射される球面波が正反射する被検面 1 0 上の点である。図 1 1 (b) は、基準点 F が被検面 1 0 上の点 C と一致するように計測ヘッド 1 1 0 を配置したことを示している。ここで、図 1 1 (b) における点 C は、図 1 1 (a) における点 C と同じ点、即ち走査経路の始点において基準点 F から放射される球面波が正反射する被検面上の点である。図 1 1 (a) に示す状態から図 1 1 (b) に示す状態に、図 1 1 (a) における単位法線ベクトル n の方向に沿って計測ヘッド 1 1 0 を移動したときの移動距離が積分定数 q_0 である。

【 0 0 7 2 】

図 1 1 (b) の位置では、計測ヘッド 1 1 0 から放射される球面波は、頂点反射の状態（いわゆるキャッツアイの状態）で、被検面 1 0 により反射されるので、計測ヘッド 1 1 0 に戻る光束が最も多い。したがって、図 1 1 (a) における単位法線ベクトル n の測定値の方向に沿って計測ヘッド 1 1 0 を移動させるながら、光束位置信号の値が最大になる位置をもって、図 1 1 (b) の位置になったと決定することができる。図 1 1 (a) と図 1 1 (b) における計測ヘッド 1 1 0 の位置に基づいて移動距離、即ち積分定数 q_0 を求めることができる。計測ヘッド 1 1 0 の位置は、前述のように、レーザー干渉計 1 1 5、1 1 6、1 1 7 によって求められる。

【 0 0 7 3 】

第 2 の例において、積分定数 q_0 を次のように定めることができる。(a) 設計形状からの形状誤差が最も小さくなるように定められた積分定数 q_0 と、(b) この積分定数 q_0 および設計形状によって定まる形状からの被検面の誤差と、によって被検面の面形状を表現する方法がある。例えば、球面形状を、(a) 形状誤差が最も小さくなるように定められた半径と、(b) その半径を有する球面からの被検面の誤差（面精度）と、で表現する場合がこれに相当する。

【 0 0 7 4 】

第 2 の例では、次のようにして積分定数 q_0 を求めることができる。積分定数 q_0 をある値 q_0 とすると形状は、式 (2 2) より、

$$(x_{0j} \quad y_{0j} \quad z_{0j}) = (s_j \quad t_j \quad u_j) - (q_0 + q_{0j}) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdots (24)$$

とあらわすことができる。ここで、 $(x_{0j} \quad y_{0j} \quad z_{0j})$ は被検面上の点、 $(s_j \quad t_j \quad u_j)$ は基準点 F の位置座標、 q_{0j} は、積分定数 q_0 をある値 q_0 として式 (2 1) から計算される、基準点 F から被検面までの距離である。

【 0 0 7 5 】

また、設計形状 $(x_j \quad y_j \quad z_j)$ を

$$(x_j \quad y_j \quad z_j) = (s_j \quad t_j \quad u_j) - q_j \begin{pmatrix} j & j & j \end{pmatrix} \cdots (25)$$

とする。ここで、 $(s_j \quad t_j \quad u_j)$ は基準点 F の位置座標で式 (2 4) と同じ値、 q_j は設計形状から計算される、基準点 F から被検面までの距離である。

【 0 0 7 6 】

被検面形状と設計形状上とが最も近い条件は、

【 0 0 7 7 】

【数 2 6】

$$\text{Minimum} \left\{ \sum_{j=1}^N \left\{ (x_{0j} - x_j)^2 + (y_{0j} - y_j)^2 + (z_{0j} - z_j)^2 \right\} \right\}$$

・・・(26)

である。したがって、式(24)、式(25)を式(26)へ代入し、 q_0 について最小二乗法を適用することにより、積分定数 q_0 が求められる。

【0078】

10

以上のように、計測ヘッド110を走査しながら、計測ヘッド110の基準点Fの位置と、単位法線ベクトル()とを計測することにより、被検面10の面形状を計測することができる。

【0079】

(第3実施形態)

垂直距離 q は、例えば、アブソリュート型測長器によって計測されうる。本実施形態は、計測ヘッド110をアブソリュート型測長器とする場合である。なお、ここで言及しない事項は、第1実施形態に従いうる。

特許第2764630号公報にアブソリュート型測長器が開示されている。特許第2764630号公報に開示されたアブソリュート型測長器は、光の干渉縞の干渉次数を特定する機能を有し、これにより物体までの絶対距離を測定する。前記アブソリュート型測長器は、(a)出力光の周波数を所定範囲で連続的に変化させることができる光源と、(b)前記光源の周波数安定化手段とを有する。前記アブソリュート型測長器はまた、(c)前記物体からの反射光と参照光との干渉位相を測定する干渉位相測定手段と、(d)少なくとも一つの長さ基準を具備し該長さ基準を光路差として得られる干渉位相を測定する手段とを有する。前記周波数安定化手段は、光吸収用セルと、光センサと、帰還手段とを具備する。前記光吸収用セルは、特定の周波数域において光吸収のピークを有し、前記光源の出力光を入力とする。前記光センサは、前記光吸収用セルを通過した光の強度を測定する。前記帰還手段は、前記光センサの出力の低下により前記光源の出力光の周波数が前記光吸収用セルの吸収ピークの周波数に達したことを検出し、制御信号を前記光源に帰還させる。前記周波数安定化手段は、前記光源の周波数が前記吸収ピークの周波数と一致すると、前記光源の周波数を前記吸収ピークの周波数に固定する。

20

30

【0080】

本発明の1つの実施形態において、アブソリュート型測長器は、図12に例示される光源ユニット522と、干渉位相測定部と、演算部を含んで構成されうる。光源ユニット522は、図1に示されたレーザーユニット4として使用されうる。光源ユニット522は、光源520と、補正部521とを含みうる。前記干渉位相測定部は、計測ヘッド110で構成されうる。前記演算部は、信号処理ユニット7に組み込まれうる。

【0081】

光源520は、DBRレーザ501と、コリメータレンズ502と、ハーフミラー508、509と、Rbガスセル503と、光センサ(フォトダイオード)505と、光センサ506と、比較器507とを含む。DBRレーザ501は、駆動電流により発振周波数を変化させることができる。光センサ505は、DBRレーザ501の出力光の強度を直接に計測する。光センサ506は、Rbセル503を通過した後のレーザ光の強度を計測する。

40

【0082】

補正部521は、ハーフミラー510、511と、反射ミラー512と、基準長さ L_r を有する基準ギャップ(ゼロデュアー、スーパーインパー等の熱膨脹率の小さな材料で構成されている)513と、光センサ514とを含む。光源520が発生した光束は、ハーフミラー510を介して光源522から射出される。この光束は、偏波面保存ファイバー

50

5、ファイバー入力コリメーター6、ミラー118、ミラー119、ミラー120を介して、図2に例示された計測ヘッド110のビームエキスパンダ201に導かれる。計測ヘッド110は、前記干渉位相計測部として機能し、計測ヘッド110による検出信号は、信号処理ユニット7に提供される。補正部521の光センサー14の検出信号もまた、信号処理ユニット7に提供される。信号処理ユニット7に組み込まれる演算部は、計測ヘッド110からの検出信号と、補正部521の光センサー14からの検出信号を受けて、この検出信号に基づいて距離 q をアブソリュートに計算する。

【0083】

アブソリュート型測長器を用いることによって、被検面が段差や穴などの不連続な面である場合や、被検面上に異物や傷がある場合などのように被検面からの光束が一時的に遮断される場合においても距離 q を計測することができる。したがって、アブソリュート型測長器を用いることによって、被検面からの光束が一時的に遮断される場合においても、被検面の形状の計測が可能である。

【0084】

(第4実施形態)

図8を参照しながら本発明の第4実施形態を説明する。ここで言及しない事項は、第1実施形態、または第2の実施形態、または第3の実施形態に従いうる。第3実施形態は、天体望遠鏡などで使用されうる大口径の凹面非球面ミラーの形状計測に好適である。図8において、401は被検面10の近似球面の一例であり、この例では、近似球面は被検面10の外接円である。近似球面は、内接球面や近軸内接球面などでもよい。点Oは近似球面401の中心、点Fは計測ヘッド110から放射される球面波の中心すなわち基準点、点Cは計測ヘッド110から放射される球面波が被検面10において正反射する点である。402は走査経路であり、計測ヘッド110の基準点は、この走査経路に沿って走査される。図8では、走査経路が xy 平面に平行な平面である例が示されているが、走査経路は平面である必要はない。

【0085】

図8に示すように、被検面10と近似球面401の中心Oとの間に走査経路402を配置することによって、計測ヘッド110を走査する領域を、被検面10より狭くできる。このことにより面形状計測装置を小型化できる。特に、口径が数メートルにおよぶ天体望遠鏡などの大口径非球面の形状計測には有効な構成である。

【0086】

[その他]

なお、以上の実施形態の計測ヘッド110は、球面波を基準点Fから一度に放射していた。しかし、その球面波の一部に相当する細い光束(平面波)を基準点Fから放射し、被検面10上のその球面波が入射する領域をその細い光束で走査するように、計測ヘッド110を構成しても良い。このように計測ヘッド110を構成することで、被検面10上の狭い領域のみで反射された被検光を検出ユニット208で検出することになるため、検出結果に含まれるノイズを低減することが可能となる。

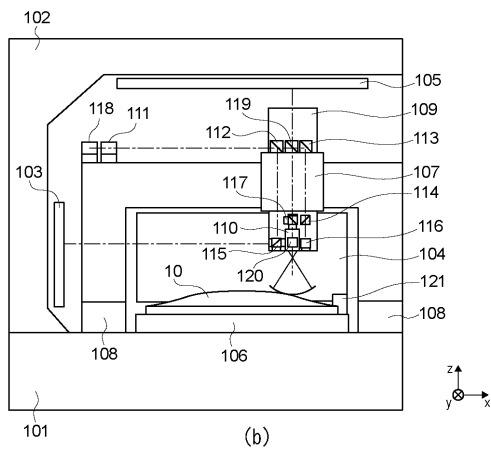
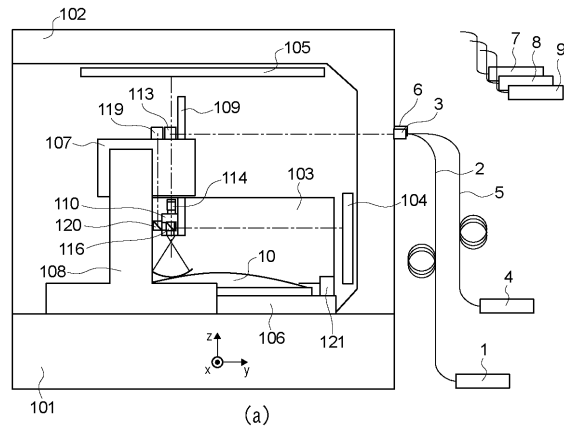
【0087】

また、以上の実施形態では、計測ヘッドで垂直距離 q または単位法線ベクトル()を計測していた。しかし、垂直距離 q および単位法線ベクトル()が計測できるように計測ヘッドを構成し、その計測ヘッドで計測した垂直距離 q および単位法線ベクトル()を式(3)に代入することによって被検面の形状を得ることとしてもよい。

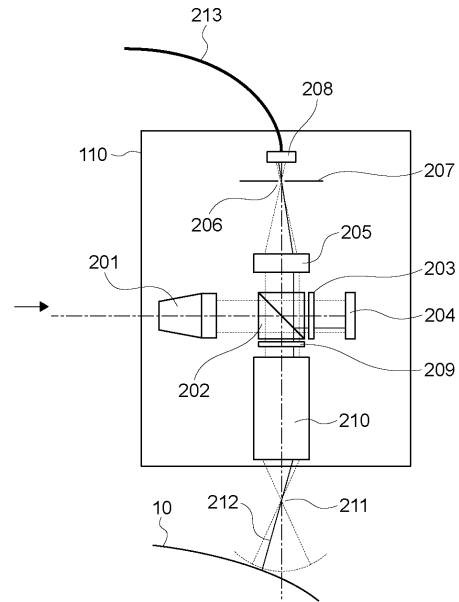
【0088】

以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されず、その要旨の範囲内で種々の変形および変更が可能である。

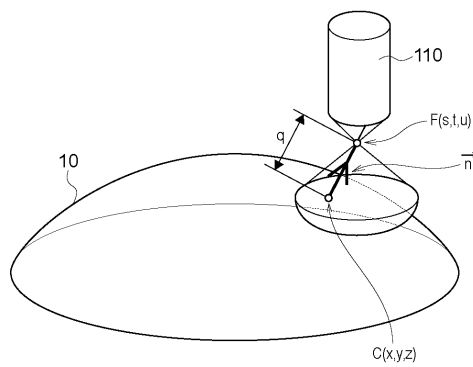
【図 1】



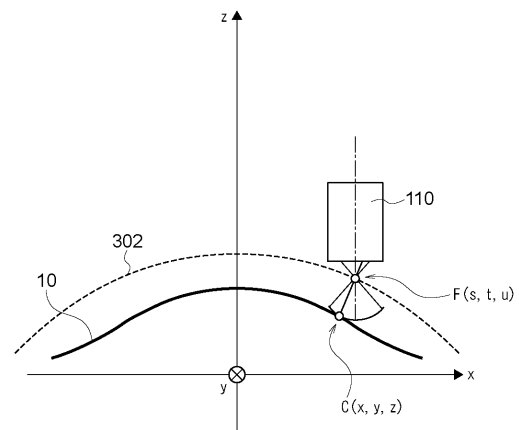
【図 2】



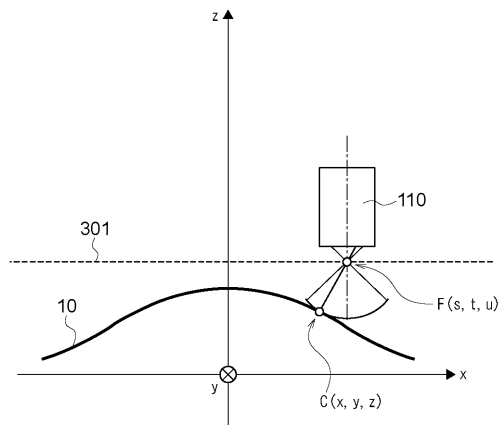
【図 3】



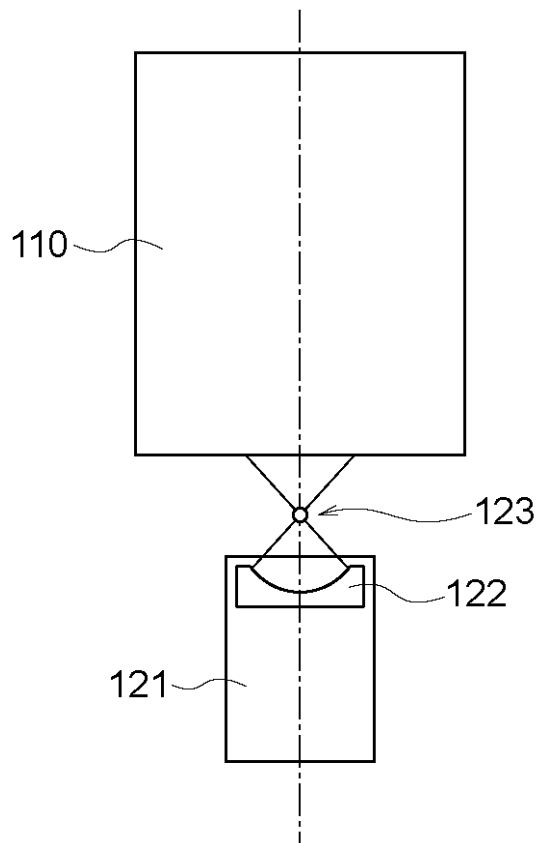
【図 5】



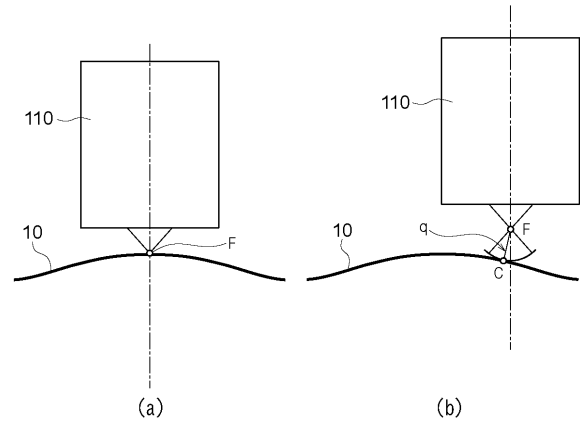
【図 4】



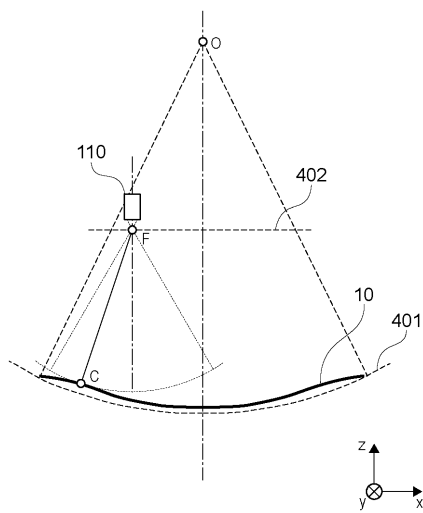
【図 6】



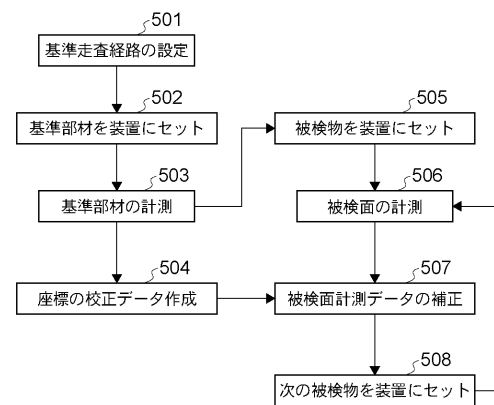
【図 7】



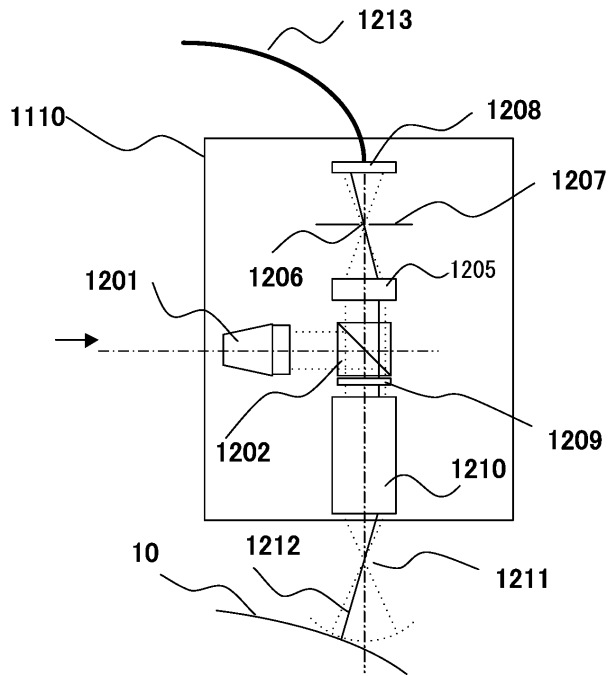
【図 8】



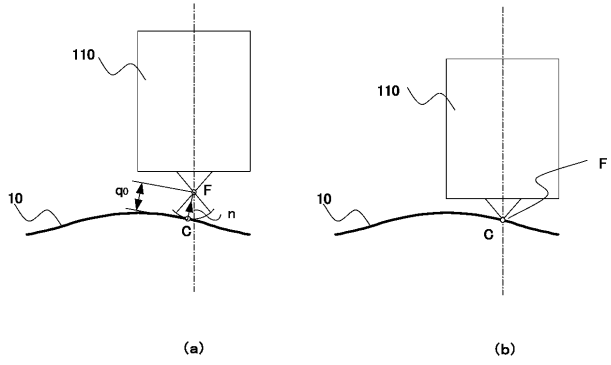
【図 9】



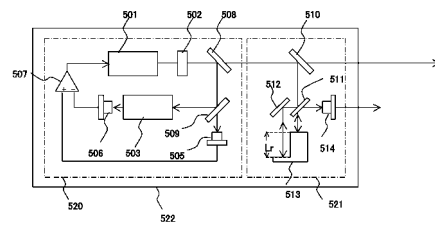
【図10】



【図11】



【図12】



フロントページの続き

(72)発明者 佐藤 隆一
東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内

審査官 うし 田 真悟

(56)参考文献 特開2002-116010(JP,A)
特開2002-148025(JP,A)
特開平08-226814(JP,A)
特表2007-506113(JP,A)
特表2005-505771(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01B 11/00 - 11/30
G01B 5/00 - 5/30
G02B 21/00 - 21/32