

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6000578号
(P6000578)

(45) 発行日 平成28年9月28日(2016.9.28)

(24) 登録日 平成28年9月9日(2016.9.9)

(51) Int.Cl.

F I

G O 1 B 11/24 (2006.01)

G O 1 B 11/24

Z

請求項の数 9 (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2012-52423 (P2012-52423)
(22) 出願日 平成24年3月9日(2012.3.9)
(65) 公開番号 特開2013-186018 (P2013-186018A)
(43) 公開日 平成25年9月19日(2013.9.19)
審査請求日 平成27年1月13日(2015.1.13)

(73) 特許権者 000001007
キヤノン株式会社
東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(74) 代理人 100110412
弁理士 藤元 亮輔
(74) 代理人 100104628
弁理士 水本 敦也
(74) 代理人 100121614
弁理士 平山 倫也
(72) 発明者 前田 義紀
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 神谷 健一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 非球面計測方法、非球面計測装置、光学素子加工装置および光学素子の製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光源からの光を、照明光学系を通して球面波である照明光として非球面である被検面に照射し、該被検面での反射光を結像光学系を通して検出光として受光センサに導き、該受光センサからの出力を用いて前記被検面の形状を計測する非球面計測方法であって、

前記結像光学系によって前記受光センサに対して共役な関係にあるセンサ共役面の光軸上の位置に前記被検面を配置し、

前記受光センサを物体面としたときの前記結像光学系の射出瞳を、前記光軸上における前記照明光の集光位置に形成し、

前記センサ共役面、前記照明光の波面および前記被検面のすべてを、光軸方向における同じ側に向かう凸面および凹面のうち一方に揃えることを特徴とする非球面計測方法。

【請求項 2】

前記照明光の波面に、前記検出光のうち前記被検面上の反射点で反射した反射光線であって、前記光軸に対してなす角が前記結像光学系の被検面側の周辺光線における前記反射光線と前記センサ共役面との交点を通る周辺光線のうち前記光軸に対してなす角の絶対値が最小値となる周辺光線よりも大きい反射光線の前記なす角の絶対値が、前記交点を通る前記周辺光線のうち前記なす角の絶対値が最大値となる周辺光線よりも小さくなる曲率を与え、前記射出瞳の位置を、前記反射光線の前記なす角の絶対値が前記最大値より小さくなる位置とし、前記センサ共役面に、前記検出光が前記センサ共役面上で交わらない曲率と位置を与えることを特徴とする請求項 1 に記載の非球面計測方法。

10

20

【請求項 3】

前記被検面が前記凸面である場合に、前記結像光学系のペッツバル和の符号を負とすることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の非球面計測方法。

【請求項 4】

前記被検面が前記凹面である場合に、前記結像光学系のペッツバル和の符号を正とすることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の非球面計測方法。

【請求項 5】

前記受光センサにより前記検出光の光線角度分布を計測し、
該検出光の光線角度分布を、光線位置変換と光線角度変換と光線追跡演算とによって前記被検面上での光線角度分布に変換し、

10

該被検面上での光線角度分布から前記被検面の形状を算出することを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載の非球面計測方法。

【請求項 6】

光源からの光を、球面波である照明光として非球面である被検面に照射する照明光学系と、該被検面での反射光を検出光として受光センサに導く結像光学系とを有し、前記受光センサからの出力を用いて前記被検面の形状を計測する非球面計測装置であって、

前記結像光学系によって前記受光センサに対して共役な関係にあるセンサ共役面の光軸上の位置に前記被検面が配置され、

前記受光センサを物体面としたときの前記結像光学系の射出瞳が、前記光軸上における前記照明光の集光位置に形成され、

20

前記センサ共役面、前記照明光の波面および前記被検面のすべてが、光軸方向における同じ側に向かう凸面および凹面のうち一方に揃っていることを特徴とする非球面計測装置。

【請求項 7】

前記照明光の波面に、前記検出光のうち前記被検面上の反射点で反射した反射光線であって、前記光軸に対してなす角が前記結像光学系の被検面側の周辺光線における前記反射光線と前記センサ共役面との交点を通る周辺光線のうち前記光軸に対してなす角の絶対値が最小値となる周辺光線よりも大きい反射光線の前記なす角の絶対値が、前記交点を通る前記周辺光線のうち前記なす角の絶対値が最大値となる周辺光線よりも小さくなる曲率を与え、前記射出瞳の位置を、前記反射光線の前記なす角の絶対値が前記最大値より小さくなる位置とし、前記センサ共役面に、前記検出光が前記センサ共役面上で交わらない曲率と位置を与えることを特徴とする請求項 6 に記載の非球面計測装置。

30

【請求項 8】

光学素子を加工する加工部と、

請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載の非球面計測方法により前記光学素子における前記被検面の形状を計測する計測部とを有することを特徴する光学素子加工装置。

【請求項 9】

請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載の非球面計測方法により光学素子における被検面の形状を計測する計測ステップと、

前記計測ステップで得られた前記被検面の形状の計測データに基づいて、前記被検面の形状を加工する加工ステップと、を有することを特徴とする光学素子の製造方法。

40

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、非球面を有した光学素子（例えば、非球面レンズ）の面形状の計測技術に関する。

【背景技術】**【0002】**

レンズやミラー等の光学素子の非球面形状の計測には、高精度かつ高スループットであることが求められる。高スループットな非球面形状の計測とは、非球面を一括で計測可能

50

であることを意味するが、このような非球面計測を行う装置としては、特許文献 1 にて開示されているようなヌルレンズを用いた干渉計が知られている。この干渉計は、フィゾー干渉計等にヌルレンズを設けて被検面の設計形状に対応した波面を有する参照光（照明光）を被検面に照射する。そして、被検面からの反射光（検出光）と参照光とを干渉させて該検出光と該参照光との波面の差を計測することで、被検面の形状を求める。

【 0 0 0 3 】

また、ヌルレンズを使用しない非球面計測装置として、特許文献 2 には、センサ受光部に計測波面のダイナミックレンジが大きいシャック・ハルトマンセンサを用いた計測装置が開示されている。この計測装置では、照明光学系を介して被検面に球面波を照射する。被検面は非球面であるので、被検面のある場所では照明光が被検面に対して垂直に照射されず、反射光の光線角度は入射光（照明光）の光線角度と異なる。したがって、反射光はセンサ受光部で平行光にはならず、平面波面から大きくずれた波面を持つ。この波面を検出することで、被検面の形状を算出することができる。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 0 4 】

【特許文献 1】特開平 0 9 - 3 2 9 4 2 7 号公報

【特許文献 2】特開 2 0 0 3 - 0 5 0 1 0 9 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

20

【 0 0 0 5 】

しかしながら、ヌルレンズを使用すると、計測精度がヌルレンズの製作精度に依存するため、ヌルレンズの製作に多大な時間と費用が必要になる。また、被検面の形状ごとに異なるヌルレンズを用意しなければならない。

【 0 0 0 6 】

一方、ヌルレンズを使用しない場合は、被検面を照明する照明光の波面の曲率と被検面の曲率とが一致しない。このため、被検面上の異なる位置からの反射光がセンサ受光部上の同一点に集光し、センサ受光部への入射光線から被検面上の位置が特定できない。また、センサ受光部への入射光線が計測可能な最大角度を超えてしまう。

【 0 0 0 7 】

30

これらを回避するため、特許文献 2 では、照明光の波面の曲率と被検面の曲率とが互いに近づくように、被検面を光軸方向に移動させる。しかし、径方向で曲率の変化が大きい被検面を計測すると、被検面のある位置の曲率に照明光の波面の曲率を合わせても、被検面の他の位置の曲率が照明光の波面の曲率と大きく乖離してしまう。この結果、上述した問題を十分に解決することができない。

【 0 0 0 8 】

本発明は、径方向で曲率の変化が大きい非球面や互いに曲率が異なる複数の非球面の形状を、同一の光学系を用いて一括して計測可能な非球面計測方法および非球面計測装置を提供する。

【課題を解決するための手段】

40

【 0 0 0 9 】

本発明の一側面としての非球面計測方法は、光源からの光を、照明光学系を通して球面波である照明光として非球面である被検面に照射し、該被検面での反射光を結像光学系を通して検出光として受光センサに導き、該受光センサからの出力を用いて被検面の形状を計測する方法である。該方法は、結像光学系によって受光センサに対して共役な関係にあるセンサ共役面の光軸上の位置に被検面を配置し、受光センサを物体面としたときの結像光学系の射出瞳を、光軸上における照明光の集光位置に形成し、センサ共役面、照明光の波面および被検面のすべてを、光軸方向における同じ側に向かう凸面および凹面のうち一方に揃えることを特徴とする。

【 0 0 1 0 】

50

また、本発明の他の一側面としての非球面計測装置は、光源からの光を、球面波である照明光として非球面である被検面に照射する照明光学系と、該被検面での反射光を検出光として受光センサに導く結像光学系とを有し、受光センサからの出力を用いて被検面の形状を計測する。該装置は、結像光学系によって受光センサに対して共役な関係にあるセンサ共役面の光軸上の位置に被検面が配置され、受光センサを物体面としたときの結像光学系の射出瞳が、光軸上における照明光の集光位置に形成され、センサ共役面、照明光の波面および被検面のすべてが、光軸方向における同じ側に向かう凸面および凹面のうち一方に揃っていることを特徴とする。

【 0 0 1 1 】

なお、光学素子を加工する加工部と、上記非球面計測方法により光学素子における被検面の形状を計測する計測部とを有する光学素子加工装置、さらに上記非球面計測方法を用いた光学素子の製造方法も、本発明の他の一側面を構成する。

10

【発明の効果】

【 0 0 1 2 】

本発明によれば、径方向における曲率の変化が大きい非球面の形状を一括で計測することができる。つまりは、1つの光学系で様々な非球面形状を有する非球面の計測を行うことができる。この結果、非球面計測の高スループット化や低コスト化が可能となる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 3 】

20

【図 1】本発明の実施例 1 である非球面計測装置の構成を示す図。

【図 2】上記計測装置において被検面に照明光を照射したときの反射光の角度を示す図。

【図 3】上記計測装置において結像光学系と被検面からの反射光との関係を示す図。

【図 4】上記計測装置においてセンサで計測可能な光線の軌跡を示す図。

【図 5】実施例（数値例）の構成を示す側面図。

【図 6】上記計測装置においてセンサで得られた計測データから被検面の形状を計算する手順を示す図。

【図 7】本発明の実施例 2 である光学素子加工装置の構成を示す概略図。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 4 】

30

以下、本発明の実施例について図面を参照しながら説明する。

【実施例 1】

【 0 0 1 5 】

図 1 には、本発明の実施例 1 である非球面計測方法を行う非球面計測装置の構成を示している。以下の説明においては、図 1 中に示した $x y z$ 直交座標系を用いて各記号の定義や光学系内の位置を説明する。 z 軸が該計測装置の光学系の光軸に相当し、以下の説明では光軸 $A \times L$ と記す。また、光軸 $A \times L$ が延びる方向を光軸方向という。

【 0 0 1 6 】

光源 1 からの光は、集光レンズ 2 によってピンホール 3 に向けて集光され、ピンホール 3 を通過してハーフミラー 4 に入射する。ハーフミラー 4 で反射した光は、照明光学系 5 を通過することで負の曲率を持つ球面波である照明光 1 2 となり、様々な曲率を持つ非球面かつ凸面としての被検面 9, 10, 11 に照射される。図 1 では、被検面 9, 10, 11 がまとめて示されているが、実際の計測時にはこれらのうち 1 つのみが装置に配置される。このとき、被検面 9, 10, 11 は、それらの頂点が光軸 $A \times L$ 上の同一点に位置するように配置される。図では、照明光学系 5 をまとめて示しているが、実際には複数のレンズ等の光学素子により構成されている。このことは、後述する投影光学系 6 についても同じである。

40

【 0 0 1 7 】

点線 1 3 は被検面 9 に対して照明光 1 2 の光線としてある入射角で入射し、該被検面 9 で反射した光線を示している。同様に、点線 1 4 は被検面 10 に対して照明光 1 2 の光線

50

として上記入射角で入射し、該被検面 10 で反射した光線を示し、点線 15 は被検面 11 に対して照明光 12 の光線として上記入射角で入射し、該被検面 11 で反射した光線を示している。また、点線 17, 18, 19 はそれぞれ、照明光 12 の光線とは異なる入射角で被検面 9, 10, 11 に入射した照明光 16 の光線であって、該被検面 9, 10, 11 で反射した光線を示す。

【0018】

被検面からの反射光（検出光）は、照明光学系 5 を通って集光されてハーフミラー 4 を透過し、投影光学系 6 に入射する。そして、該反射光は投影光学系 6 により集光されながらセンサ 8 に入射する。センサ 8 は、本実施例では、シャック・ハルトマンセンサを用いている。シャック・ハルトマンセンサは、入射光の波面を 2 次元配列されたマイクロレンズ（マイクロレンズアレイ）で分割して CCD 等の撮像素子に投影することで波面を計測できる受光センサである。ただし、シャック・ハルトマンセンサに代えて、Talbot 干渉計やシアリング干渉計等の波面を計測可能な受光センサを用いてもよい。

【0019】

ここで、被検面で反射した光線がセンサ 8 上で重なることなく波面をセンサ 8 により計測する条件について説明する。

【0020】

上述したように、被検面で反射した光は、照明光学系 5 と投影光学系 6 とで構成される光学系 7 を通ってセンサ 8 に入射する。そこで、光学系 7 をセンサ 8 を物体面とする結像光学系とし、該結像光学系 7 によってセンサ 8 と共役な関係にある共役面（像面湾曲による曲率を有する：以下、センサ共役面という）を、被検面上の異なる 2 点で反射した光線が交わる位置よりも被検面側に形成する。これにより、光線の重なりが生じていない波面をセンサ 8 上に結像させる。例えば本実施例では、光軸 AXL 上の被検面と同じ位置にセンサ共役面を形成することで、センサ 8 の位置と被検面の位置との関係が一对一の対応関係となり、被検面で反射した光線を重なることなくセンサ 8 により検出できる。したがって、結像光学系 7 のベッツパウル和の符号を負とし、センサ共役面の光軸 AXL 上の位置に被検面を配置する。

【0021】

なお、「光軸 AXL 上の被検面と同じ位置にセンサ共役面を形成する」および「センサ共役面の光軸上の位置に被検面を配置する」とは、完全にそれらの位置が一致する場合だけでなく、光学的に（もしくは波面の計測上）同じ位置にあるとみなせる場合を含む。また、センサ共役面は、像面湾曲により曲率を有する。

【0022】

次に、被検面からの反射光である検出光が光学系でけられることを避けるための条件について説明する。これは、センサ共役面において、被検面で反射した光線の角度が、結像光学系 7 の上側と下側の周辺光線の角度内に入るという条件である。この条件を満たすために、結像光学系 7 は、センサ 8 を物体面としたときの結像光学系 7 の射出瞳を、照明光（球面波）の集光位置に形成する。

【0023】

なお、「射出瞳を検出波面の集光位置に形成する」とは、完全にそれらの位置が一致する場合だけでなく、光学的に（もしくは波面の計測上）同じ位置にあるとみなせる場合（集光位置近傍）を含む。

【0024】

さらに、後述する式（8）についての説明からも分かるように、センサ共役面、照明波面および被検面のすべてを、光軸方向のうち同じ側（図 1 中の +z 方向）に向かう凸面にする（凸面および凹面のうち一方に揃える）必要がある。言い換えれば、センサ共役面の曲率の符号、照明波面の曲率の符号および被検面の曲率の符号をすべて同じにする必要がある。なお、被検面が凹面である場合は、センサ共役面、照明波面および被検面のすべてを、光軸方向のうち同じ側（-z 方向）に向かう凹面にすれば（揃えれば）よい。

【0025】

これらの条件が満たされることで、反射光線（検出光）13, 14, 15はセンサ8上の点20に向かって集光し、反射光線（検出光）17, 18, 19はセンサ8上の点21に向かって集光する。したがって、同一の被検面で反射した光線を、センサ8上で重なりを生じさせることなく検出（計測）することができる。

【0026】

また、結像光学系7において、センサ8を物体面としたときの最大物体高は、センサ8の大きさより小さいか同じである。したがって、結像光学系7の倍率は、被検面の計測領域を最大物体高で除した値より大きい。

【0027】

さらに、結像光学系7においてセンサ側主光線の角度を変化させることで、センサ8に入射する周辺光線の角度が変化する。このため、結像光学系7におけるセンサ側主光線の角度は、センサ8に入射する周辺光線の角度が該センサ8の計測可能な最大角度を超えないように設定されている。

【0028】

このような結像光学系7を用いることで、様々な曲率を持つ被検面9, 10, 11を計測する場合でも、各被検面における互いに異なる2点に照明光12, 16としてそれぞれ入射した光線の該2点での反射光線がセンサ8上の同一点に集光することはない。言い換えれば、径方向で曲率の変化が大きい被検面でも、該被検面からの検出光の波面、つまりは該被検面の形状を一括して計測することができる。さらに、センサ8に入射する光線角度も、センサ8の計測限界を超えることはない。

【0029】

以上、本実施例の計測装置の概要について説明したが、以下、計測対象である非球面としての被検面（以下、被検非球面という）の形状と結像光学系7のパラメータ（設計値）との関係について、図2および図3を用いて説明する。

【0030】

図2には、以下の式(1)で表される被検非球面22と、式(2)で示される照明光12の波面（以下、照明波面という）23を示している。照明波面23は球面であり、被検非球面22と頂点が光軸AXL上で一致している。

【0031】

【数1】

$$Z(h) = \frac{h^2}{r_0(1 + \sqrt{1 - \frac{(1+K)h^2}{r_0^2}})} + A_1h + A_2h^2 + A_3h^3 + A_4h^4 + A_5h^5 + A_6h^6 + \dots \quad (1)$$

【0032】

【数2】

$$I(h) = \sqrt{Ri^2 - h^2} + Ri \quad (2)$$

【0033】

ここで、式(1)と式(2)中のhは、式(3)で表される。

【0034】

【数3】

$$h^2 = x^2 + y^2 \quad (3)$$

【0035】

式(3)において、xとyは平面であるxy面において光軸AXLの位置を原点とした場合の被検非球面22もしくは照明波面23上の点のx座標とy座標である。式(1)において、Z(h)は、被検非球面22のxy面からのサグ(sag)量、すなわちxy面に非球面の頂点が接した場合におけるxy面から非球面までの距離である。r0は面頂点における曲率半径であり、Kはコーニック定数であり、Anはn次のhの係数である。Z(

10

20

30

40

50

h) は設計上の非球面形状であり、計測対象となる非球面形状は加工誤差分だけ係数が異なる。I (h) は照明波面 23 の x y 面からのサグ量であり、R_i は照明波面 23 の曲率半径である。

【0036】

照明波面 23 を形成する光線のうちの 1 本である照明光 12 (以下、照明光線ともいう) の光軸 AXL からの距離を h₁ とし、該照明光線と被検非球面 22 との交点の光軸 AXL からの距離を h₂ とする。このとき、照明光線の被検非球面 22 への入射角は、照明波面を微分して逆正接をとった関数に h₁ を代入した

$$\arctan\{dI/dh(h_1)\}$$

となる。

10

【0037】

上記照明光線が被検非球面 22 で反射した光線である反射光線 24 の光軸 AXL に対する角度は、被検非球面 22 の法線の光軸 AXL に対する角度である

$$\arctan\{dZ/dh(h_2)\}$$

を用いて、式 (4) のように表される。

【0038】

【数 4】

$$\alpha = 2\arctan\left\{\frac{dZ}{dh}(h_2)\right\} - \arctan\left\{\frac{dI}{dh}(h_1)\right\} \quad (4)$$

20

【0039】

図 3 には、瞳結像レンズとして構成されている結像光学系 7 において、センサ共役面 25 と被検非球面 22 とを示している。ここで、d は被検非球面 22 とセンサ共役面 25 との間の光軸 AXL 上での間隔であるが、本実施例では d = 0 である。また、センサ共役面 25 の x y 面からのサグ量 C (h) は、センサ共役面 25 の曲率半径 R_c を用いて、式 (5) のように表される。

【0040】

【数 5】

$$C(h) = \sqrt{R_c^2 - h^2} + R_c \quad (5)$$

30

【0041】

ここで、センサ 8 上での光線の重なりを避けるためのセンサ共役面 25 の曲率半径 R_c の条件について説明する。まず、反射光線 24 とセンサ共役面 25 との交点を算出する。反射光線 24 上の点の x y 面からの距離 A (h) は、h₂、Z (h₂) および反射光線 24 の角度 (式 (4)) を用いて、式 (6) のように表される。

【0042】

【数 6】

$$A(h) = \frac{h}{\tan\left[2\arctan\left\{\frac{dZ}{dh}(h_2)\right\} - \arctan\left\{\frac{dI}{dh}(h_1)\right\}\right]} + Z(h_2) + \frac{h_2}{\tan\left[2\arctan\left\{\frac{dZ}{dh}(h_2)\right\} - \arctan\left\{\frac{dI}{dh}(h_1)\right\}\right]} \quad (6)$$

40

【0043】

このため、反射光線 24 とセンサ共役面 25 との交点 h₃ は、C (h₃) = A (h₃) を h₃ について解いた式 (7) となる。

【0044】

【数 7】

$$h3(h2) = \frac{1}{(\alpha^2 + 1)} \left\{ -\alpha(Rc - \beta) - \alpha \sqrt{Rc^2 - \alpha^2 \beta^2 + 2Rc\alpha^2 \beta} \right\} \quad (7)$$

$$\alpha = \tan \left[2 \operatorname{atan} \left\{ \frac{dZ}{dh} (h2) \right\} - \operatorname{atan} \left\{ \frac{dI}{dh} (h1) \right\} \right] \quad \beta = Z(h2) + \frac{h2}{\alpha}$$

【 0 0 4 5 】

式(7)は $h2$ の関数となっている。ここで、センサ8上で光線が重ならない条件は、前述したように、被検面から反射した光線がセンサ共役面25上で交わらない(センサ共役面が、該反射光線がセンサ共役面25上で交わらない曲率と位置を有する)というものである。この条件は、 $h2$ を0から光線有効径まで変化させたときに、式(7)を $h2$ で微分した値が常に正となることと同じである。つまり、式(8)を満足するように Rc を決定すれば、センサ8上で反射光線が重なることはない。

10

【 0 0 4 6 】

【数 8】

$$\frac{dh3(h2)}{dh2} > 0 \quad (8)$$

【 0 0 4 7 】

次に、結像光学系7において、被検面22上の点 $h2$ からの反射光線24をセンサ8により計測する条件を、図3を用いて説明する。

20

【 0 0 4 8 】

図3に示すように、結像光学系7の最終レンズ面とセンサ共役面との間の光軸 AXL 上での距離を Bf とする。また、センサ8を物体面としたときの結像光学系7の最終レンズ面と射出瞳との間の光軸 AXL 上での距離を Ep とする。さらに、結像光学系7のセンサ側の開口数を NAo とし、センサ共役面側の開口数を NAi とする。また、センサ8を物体面とした場合の結像光学系7の倍率を M とする。

【 0 0 4 9 】

まず、結像光学系7のセンサ側の主光線と開口数の条件について説明する。図4に示すように、センサ8上の点26にて計測可能な光線の軌跡27は、頂点がセンサ8上の点26に位置し、底面が xy 面に平行で、高さ方向が光軸(AXL)と平行な円錐内に分布する。このため、結像光学系7は、入射瞳の位置が無遠にあり、周辺光線の角度がセンサ8の計測可能な最大角度に一致するように構成される。言い換えれば、センサ側主光線をテレセントリックとし、結像光学系7のセンサ側開口数を、センサ8の計測可能な最大角度の正弦をとった値とする。これにより、結像光学系7は、瞳を通過する光線のすべてをセンサ8上に計測可能に導くことができる、センサ8のダイナミックレンジに適応した光学系となっている。

30

【 0 0 5 0 】

次に、結像光学系7の射出瞳とバックフォーカスおよびセンサ共役面の条件について、図3を用いて説明する。結像光学系7において、光軸 AXL から高さ $h3$ の周辺光線のうち、実線で示す主光線よりも $-x$ 側(光軸側)の周辺光線28の光軸 AXL からのあおり角は、該主光線の光軸 AXL に対する角度の絶対値からセンサ共役面25の開口数の逆正弦を減じた角度である。すなわち、式(9)のように表される。

40

【 0 0 5 1 】

【数 9】

$$\left| \operatorname{atan} \left(\frac{h3}{Ep - Bf - C(h3)} \right) \right| - \operatorname{asin}(NAi) \quad (9)$$

【 0 0 5 2 】

また、主光線よりも $+x$ 側(光軸とは反対側)の周辺光線29の光軸 AXL からのあおり角は、該主光線の光軸 AXL に対する角度の絶対値にセンサ共役面25の開口数の逆正弦を加えた角度である。すなわち、式(10)のように表される。

50

【 0 0 5 3 】

【 数 1 0 】

$$\left| \operatorname{atan}\left(\frac{h3}{E_p - B_f - C(h3)}\right) \right| + \operatorname{asin}(NA_i) \quad (10)$$

【 0 0 5 4 】

被検面 2 2 上の点 h 2 からの反射光線 2 4 をセンサ 8 により計測する条件は、反射光線 2 4 の光軸 A X L に対するあおり角である式 (4) の絶対値が、周辺光線 2 8 の光軸 A X L に対するあおり角である式 (9) の絶対値より大きい必要がある。さらに、式 (4) の絶対値が、周辺光線 2 9 の光軸 A X L に対するあおり角である式 (1 0) の絶対値 (の最大値) より小さい必要がある。つまり、照明波面の曲率および結像光学系 7 の射出瞳の位置を、以下の式 (1 1) を満たすように設定することが、反射光線 2 4 をセンサ 8 により計測する条件となる。

10

【 0 0 5 5 】

【 数 1 1 】

$$\left| \operatorname{atan}\left(\frac{h3}{E_p - B_f - C(h3)}\right) \right| - \operatorname{asin}(NA_i) < \left| 2 \operatorname{atan}\left\{\frac{dZ}{dh}(h2)\right\} - \operatorname{atan}\left\{\frac{dl}{dh}(h1)\right\} \right| \\ < \left| \operatorname{atan}\left(\frac{h3}{E_p - B_f - C(h3)}\right) \right| + \operatorname{asin}(NA_i) \quad (11)$$

【 0 0 5 6 】

20

ここで、センサ共役面 2 5 の開口数 NA_i を、結像光学系 7 のセンサ側開口数 NA_o と倍率 M とを用いて近似的に $NA_i = \sin(\operatorname{asin}(NA_o) / M)$ とする。これを式 (1 1) に代入したものが式 (1 2) であり、センサ 8 の最大計測角である $\operatorname{asin}(NA_o)$ を式内に反映して、光学系の条件の算出をより簡単に行うことができる。

【 0 0 5 7 】

【 数 1 2 】

$$\left| \operatorname{atan}\left(\frac{h3}{E_p - B_f - C(h3)}\right) \right| - \frac{\operatorname{asin}(NA_o)}{M} < \left| 2 \operatorname{atan}\left\{\frac{dZ}{dh}(h2)\right\} - \operatorname{atan}\left\{\frac{dl}{dh}(h1)\right\} \right| \\ < \left| \operatorname{atan}\left(\frac{h3}{E_p - B_f - C(h3)}\right) \right| + \frac{\operatorname{asin}(NA_o)}{M} \quad (12)$$

30

【 0 0 5 8 】

式 (1) に示した非球面からの反射光を計測するためには、0 から光線有効径までの全ての h 2 の値において式 (1 1) もしくは式 (1 2) が成り立つことが条件である。以上より、計測対象の非球面の形状から、式 (8) と式 (1 1) もしくは式 (8) と式 (1 2) を用いて、光学系が満たすべき条件を算出する。逆に、光学系の条件を決めれば、式 (8) と式 (1 1) もしくは式 (8) と式 (1 2) を用いて、計測可能な非球面の形状を算出することも可能である。

【 0 0 5 9 】

以下、具体的な実施例 (数値例) として、表 1 に示した非球面係数で与えられる被検非球面を計測可能な結像光学系 7 (照明光学系 5 および投影光学系 6) の条件を式 (8) と式 (1 2) を用いて算出した結果を示す。表 1 に示す非球面係数は、式 (1) で定義されたものである。なお、E - X は $\times 10^{-X}$ を示す。

40

【 0 0 6 0 】

【表 1】

r0	-300
K	-1
A4	1.000000E-07
A6	3.500000E-11
A8	3.000000E-15
有効径[mm]	80

【 0 0 6 1 】

まず、センサ 8 のスペックを決定すると、光学系の条件の一部が決まる。ここでは、センサ 8 として、受光面 (CCD 面) のサイズが 30 mm × 30 mm で、最大計測角度が 10° というスペックを有するシャック・ハルトマンセンサを用いる。そのため、結像光学系 7 の物体面はシャック・ハルトマンセンサの受光面 (CCD 面) となり、センサ側 NA は $\sin 10^\circ$ となる。また、倍率 M は、被検非球面の有効径である 80 mm を 30 mm で除した 2.7 以上必要となる。そこで本実施例では、倍率 M を 4 に設定する。

10

【 0 0 6 2 】

さらに、非球面を計測装置に設置するときのスペースを確保するため、結像光学系 7 のバックフォーカス Bf を -100 mm する。また、計測では、センサ共役面 25 と被検非球面の頂点を光軸 AXL 上で一致させる。

【 0 0 6 3 】

以上のことから計測装置の制約から求められる条件が決定される。次に、これらの条件下で、照明波面 23 の曲率半径 Ri、センサ共役面 25 の曲率半径 Rc および結像光学系 7 の射出瞳の位置 (結像光学系 7 の最終レンズ面と射出瞳との間の光軸 AXL 上での距離) Ep を、式 (12) を用いて決定する。

20

【 0 0 6 4 】

まず、照明波面 23 の曲率半径 Ri を -300 mm, -350 mm, -400 mm と変化させる。そして、これらの曲率半径 Ri において、h1 を 5 mm から 5 mm 間隔で 40 mm まで変化させ、センサ共役面 25 の曲率半径 Rc を -300 mm, -400 mm, -500 mm と変化させたときの射出瞳の位置 Ep を計算する。

表 2 にその計算結果を示す。

30

【 0 0 6 5 】

【表 2】

Ri=-300		Rc					
		-300		-400		-500	
		Ep_min	Ep_max	Ep_min	Ep_max	Ep_min	Ep_max
h1	5	84.6	-183.0	84.6	-183.0	84.6	-183.0
	10	794.8	-231.3	795.0	-231.3	795.1	-231.3
	15	-4728.1	-265.6	-4729.3	-265.6	-4730.1	-265.6
	20	-1433.1	-295.5	-1433.6	-295.4	-1433.9	-295.4
	25	-1216.0	-328.0	-1216.5	-327.9	-1216.8	-327.8
	30	-1408.9	-372.5	-1409.6	-372.3	-1410.1	-372.2
	35	-2815.3	-450.0	-2817.0	-449.7	-2818.1	-449.6
	40	2988.1	-638.7	2990.3	-638.3	2991.7	-638.1
Ri=-350		Rc					
		-300		-400		-500	
		Ep_min	Ep_max	Ep_min	Ep_max	Ep_min	Ep_max
h1	5	102.4	-179.8	102.5	-179.8	102.5	-179.8
	10	1461.5	-223.6	1461.7	-223.5	1461.9	-223.5
	15	-1542.0	-253.5	-1542.4	-253.4	-1542.6	-253.4
	20	-914.3	-278.8	-914.6	-278.7	-914.8	-278.7
	25	-827.6	-305.5	-827.9	-305.4	-828.1	-305.4
	30	-904.8	-341.0	-905.3	-340.9	-905.5	-340.8
	35	-1281.8	-400.0	-1282.6	-399.8	-1283.1	-399.7
	40	-6682.2	-529.7	-6687.0	-529.4	-6689.9	-529.2
Ri=-400		Rc					
		-300		-400		-500	
		Ep_min	Ep_max	Ep_min	Ep_max	Ep_min	Ep_max
h1	5	118.2	-177.6	118.3	-177.6	118.3	-177.6
	10	3435.2	-218.3	3435.8	-218.3	3436.2	-218.3
	15	-1051.4	-245.5	-1051.6	-245.4	-1051.8	-245.4
	20	-730.6	-268.0	-730.8	-267.9	-731.0	-267.9
	25	-677.3	-291.4	-677.5	-291.3	-677.7	-291.2
	30	-724.9	-321.8	-725.2	-321.7	-725.4	-321.6
	35	-931.0	-370.9	-931.5	-370.7	-931.9	-370.6
	40	-2069.9	-473.0	-2071.3	-472.7	-2072.2	-472.5

【0066】

表 2 に示した結果より、表 1 の非球面係数を有する被検非球面を計測するには、以下の
ように光学系を製作（設計）することが必要となる。例えば、照明波面 23 の曲率半径 R
i を - 350 mm とし、センサ共役面 25 の曲率半径 R c を - 500 mm とした場合に、
射出瞳を E p が - 828 . 1 mm から - 529 . 2 mm となる範囲となるように位置を決
定する。

【0067】

そこで、光源 1 の波長を 632 . 8 nm とし、照明波面 23 の曲率半径 R i を - 350
mm とし、センサ共役面 25 の曲率半径 R c を - 500 mm とし、射出瞳の位置 E p を 6
00 mm という条件で光学系を製作する。

【0068】

上記の条件の光学系において、センサ共役面 25 上の光線の位置 h 3 を計算すると、h
2 の増加とともに h 3 は増加する。このため、センサ共役面 25 の曲率半径 R c を - 50
0 mm とすれば、式（8）を満たしており、センサ 8 上で光線の重なりが生ずることなく
被検非球面からの反射光の波面を計測できる。

【0069】

10

20

30

40

50

そこで、上記条件に従った光学系のパラメータを表 3 に、また装置の構成を図 5 にそれぞれ示す。

【 0 0 7 0 】

【 表 3 】

レンズ面の曲率半径[mm]		レンズ面間距離[mm]		屈折率	
センサ共役面	-500.000	d1	100.000		
r1	-1122.071	d2	17.000	n1	1.514621
r2	648.604	d3	15.834		
r3	-866.690	d4	23.000	n2	1.514621
r4	-307.148	d5	3.501		
r5	520.681	d6	30.000	n3	1.514621
r6	-468.085	d7	2.000		
r7	429.008	d8	23.000	n4	1.514621
r8	無限	d9	363.838		
r9	無限	d10	100.000	n5	1.515089
r10	無限	d11	2.000		
r11	121.125	d12	15.000	n6	1.829396
r12	291.152	d13	34.611		
r13	-232.929	d14	5.000	n7	1.514621
r14	57.086	d15	45.997		
r15	-46.679	d16	8.000	n8	1.514621
r16	-385.756	d17	27.687		
r17	-314.744	d18	22.000	n9	1.829396
r18	-91.756	d19	8.830		
r19	-7037.486	d20	15.000	n10	1.829396
r20	-271.235	d21	2.000		
r21	301.053	d22	15.000	n11	1.829396
r22	3107.757	d23	108.394		
r23	100.082	d24	15.000	n12	1.829396
r24	143.091	d25	97.308		
センサ面	無限				
		d26	276.822		

【 0 0 7 1 】

図 5 の下側には、ピンホール 3 を通過し、ハーフミラー 4 で反射された光を被検非球面 2 2 に導く照明光学系 3 0 を示している。照明光学系 3 0 は、発散光を収斂光に変換するための正レンズ群と、該正レンズ群で発生する収差を補正するための負レンズとにより構成されている。また、各レンズのパワーや厚さおよびレンズ間の空気間隔は、被検非球面 2 2 の位置で照明波面の曲率半径が - 3 5 0 mm となるように設定されている。

【 0 0 7 2 】

図 5 の上側には、被検非球面 2 2 で反射した光をセンサ 8 に導く結像光学系 3 3 (照明光学系 3 0 および投影光学系 3 1) を示している。結像光学系 3 3 の特徴としては、センサ共役面 3 2 の曲率半径が - 5 0 0 mm の球面であることである。このため、前述したよ

うにペッツバル和を負にするには、強い負のパワーを持ったレンズを配置する必要がある。

【0073】

結像光学系33のうちハーフミラー4と被検非球面22との間のレンズは、照明光学系30と同じであり、射出瞳の位置Epを-600mmとするためのフィールドレンズの役割も果たしている。このため、結像光学系33のうちハーフミラー4と被検非球面22との間に強いパワーを持つ負レンズを配置することは困難である。

そこで、結像光学系33は、その瞳をハーフミラー4とセンサ8との間に配置するようなパワー配置を有する。これにより、瞳を挟んで対称に負レンズを配置して、強いパワーを持つ負レンズで発生するコマ収差を除去できる。さらに、負レンズには屈折率が低い硝材、正レンズには屈折率が高い硝材を用いることで、負レンズのパワーの緩和を図ることができる。

【0074】

図5および表3に示した光学系を用いれば、表1の非球面係数を有する被検非球面を一括して計測することが可能である。また、計測対象である被検非球面が複数ある場合は、実施例にて説明した計算を該複数の被検非球面に対して行い、その全てを満足するような条件を用いて光学系を製作すればよい。

【0075】

以下、センサ8を用いた計測により得られたデータから被検非球面の形状を算出する手順を、図6を用いて説明する。

【0076】

本実施例では、センサ8としてシャック・ハルトマンセンサを用いているため、センサ8に入射した光線の角度分布（以下、光線角度分布という）をデータとして得る（ステップS1）。そして、センサ8で計測した光線角度分布は、光線位置変換（ステップS2）と光線角度変換（ステップS3）によって、センサ共役面上での光線角度分布に変換される。ここで、光線位置変換とは、センサ面の位置座標をセンサ共役面上の位置座標に変換することである。具体的には、センサ面の位置座標を結像光学系の近軸倍率Mと横収差およびディストーションの情報を用いて収差を考慮して設定した倍率で乗算して、センサ共役面上での位置座標を計算する。また、光線角度変換とは、センサ面での光線角度をセンサ共役面での光線角度に変換することである。具体的には、センサ8で計測した光線角度を、光学系の収差を考慮した角度倍率で除算することで計算する。

【0077】

そして、センサ共役面から被検非球面22まで光線追跡演算を行うことで、被検非球面22で反射した光の光線角度分布を得る（ステップS4）。最後に、被検非球面上の反射光の光線角度分布と照明光の光線角度分布とから被検非球面の面傾斜を計算し、これを積分することで、被検非球面の形状を算出することができる（ステップS5）。

【0078】

本実施例では、形状が既知である（計測された）被検面である基準面と形状が未知である被検面とを計測し、両計測データに対して図6に示した手順で計算を行う。そして、算出した2つの面形状の差を計算することで、算出された被検面の面形状に含まれる光学系の各種誤差に起因して発生した誤差成分を除去し、面計測精度の高精度化を図る。

【0079】

なお、上記実施例では、被検物（被検面）として非球面レンズを用いる場合について説明したが、他の被検物を計測対象とすることもできる。例えば、鋳型であってもよいし、前述したように凹面として形成された被検非球面でもよい。被検非球面が凹面の場合は、結像光学系のペッツバル和の符号を正とする。

【0080】

また、実施例では、結像光学系の倍率Mを4とした場合について説明したが、径方向での曲率変化がより大きい被検非球面を計測するには結像光学系の倍率をより低くした方が有利である。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 1 】

さらに、複数の被検面を計測する場合は、センサ共役面と被検面との間の距離を、被検面ごとに变化させて光学系に必要な条件を算出してもよい。

【実施例 2】

【 0 0 8 2 】

図 7 には、本発明の実施例 2 として、実施例 1 にて説明した非球面計測装置 1 0 0 を用いた光学素子加工装置 2 0 0 の構成を示している。

【 0 0 8 3 】

図 7 において、5 0 は被検レンズの材料（素材）であり、2 0 1 は該材料 5 0 に対して切削、研磨等の加工を行って光学素子としての被検レンズを製造する加工部である。被検レンズは非球面である被検面 9 ~ 1 1 のうちいずれかを有する。

10

【 0 0 8 4 】

加工部 2 0 1 で加工された被検レンズの被検面の面形状は、計測部としての非球面計測装置 1 0 0 において、実施例 1 にて説明した非球面計測方法を用いて計測される。そして、実施例 1 でも説明したように、計測装置 1 0 0 は、被検面を目標の面形状に仕上げるために、被検面の面形状の計測データと目標データとの差に基づいて被検面に対する修正加工量を計算し、これを加工部 2 0 1 に出力する。これにより、加工部 2 0 1 による被検面に対する修正加工が行われ、目標の面形状に至った被検面を有する被検レンズが完成する。

【 0 0 8 5 】

20

以上説明した各実施例は代表的な例にすぎず、本発明の実施に際しては、各実施例に対して種々の変形や変更が可能である。

【産業上の利用可能性】

【 0 0 8 6 】

非球面形状を高速、高精度に計測できる計測装置を提供できる。

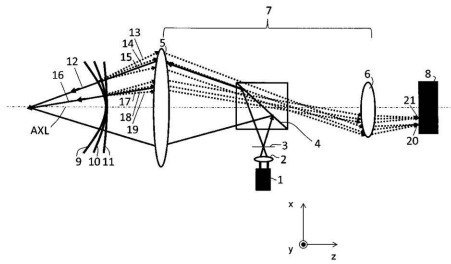
【符号の説明】

【 0 0 8 7 】

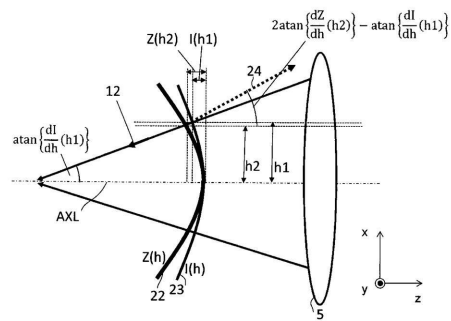
- 1 光源
- 5 照明光学系
- 7 結像光学系
- 8 センサ
- 9 , 1 0 , 1 1 被検面
- 1 2 , 1 6 照明光
- 1 3 , 1 4 , 1 5 , 1 7 , 1 8 , 1 9 反射光
- 2 5 センサ共役面

30

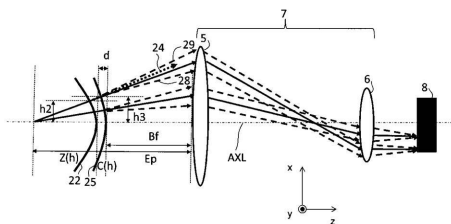
【図 1】



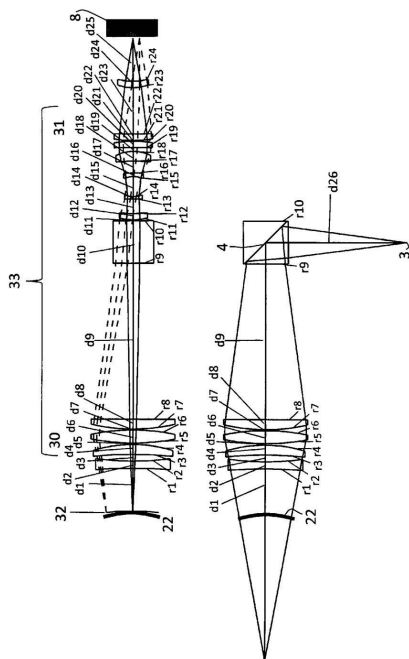
【図 2】



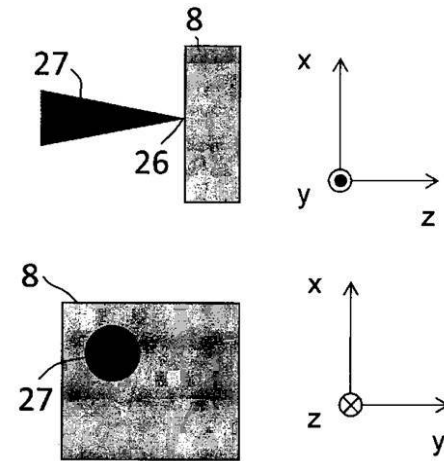
【図 3】



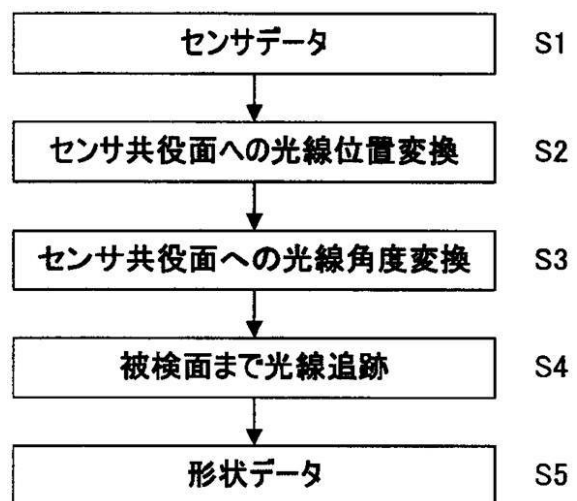
【図 5】



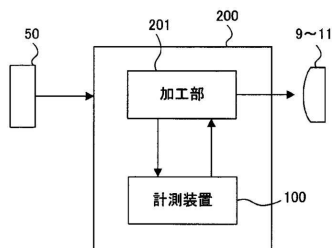
【図 4】



【図 6】



【図 7】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2003-050109(JP,A)
特開平01-291105(JP,A)
特開平11-314184(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01B11/00-11/30
G01M11/00-11/08