

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2016年1月7日(07.01.2016)



(10) 国際公開番号
WO 2016/002272 A1

- (51) 国際特許分類:
G01M 11/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/059056
- (22) 国際出願日: 2015年3月25日(25.03.2015)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2014-137980 2014年7月3日(03.07.2014) JP
- (71) 出願人: オリンパス株式会社 (OLYMPUS CORPORATION) [JP/JP]; 〒1510072 東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目4番2号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 佐藤陽輔 (SATO Yosuke); 〒1510072 東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目4番2号 オリンパス株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 斎藤圭介, 外 (SAITO Keisuke et al.); 〒1010051 東京都千代田区神田神保町1-4-1-3 駿河台下MKビル6階 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA,

BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

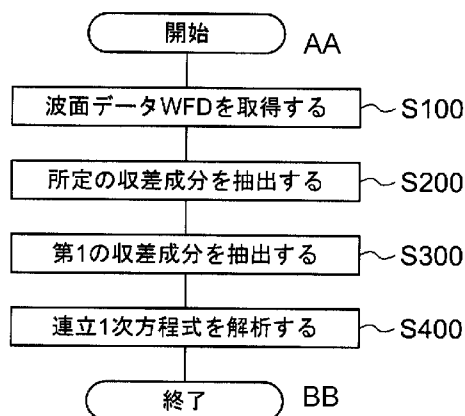
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: ECCENTRICITY AMOUNT MEASUREMENT METHOD AND ECCENTRICITY AMOUNT MEASUREMENT DEVICE

(54) 発明の名称: 偏心量計測方法及び偏心量計測装置



S100 Acquire wavefront data (WFD)
S200 Extract prescribed aberration components
S300 Extract first aberration component
S400 Analyze simultaneous linear equations
AA Start
BB Finish

(57) Abstract: Provided is a method for measuring an eccentricity amount by radiating beams of light into a test optical system disposed on a measurement axis, wherein the method includes: an acquisition step (S100) for acquiring wavefront data on the basis of the beams of light emitted from the test optical system; a first extraction step (S200) for extracting prescribed aberration components from the wavefront data; a second extraction step (S300) for extracting a first aberration component from the prescribed aberration components; and an analysis step (S400) for analyzing simultaneous linear equations with respect to the first aberration component, eccentric aberration sensitivity, and an eccentricity amount. The prescribed aberration components include aberration components generated by eccentricity. The first aberration component is an aberration component, from among the prescribed aberration components, which is proportional to the eccentricity amount multiplied by one. The eccentric aberration sensitivity is aberration sensitivity proportional to the eccentricity amount multiplied by one.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2016/002272 A1



計測軸上に配置された被検光学系に光束を照射して、偏心量を計測する方法であって、被検光学系から出射した光束に基づいて波面データを取得する取得工程 S 1 0 0 と、波面データから所定の収差成分を抽出する第 1 の抽出工程 S 2 0 0 と、所定の収差成分から第 1 の収差成分を抽出する第 2 の抽出工程 S 3 0 0 と、第 1 の収差成分、偏心収差感度及び偏心量についての連立 1 次方程式を解析する解析工程 S 4 0 0 と、を備え、所定の収差成分は、偏心によって生じる収差成分が含まれる収差成分であり、第 1 の収差成分は、所定の収差成分のうちの偏心量の 1 乗に比例する収差成分であり、偏心収差感度は、偏心量の 1 乗に比例する収差感度である。

明 細 書

発明の名称： 偏心量計測方法及び偏心量計測装置

技術分野

[0001] 本発明は、偏心量計測方法及び偏心量計測装置に関する。

背景技術

[0002] レンズでは、レンズの製造の際に様々な誤差が生じることがある。また、光学系は1つのレンズ又は複数のレンズで構成されるが、光学系では、組み立ての際に様々な誤差が生じることがある。

[0003] レンズの製造における誤差としては、レンズ面の偏心がある。また、光学系の組み立てにおける誤差としては、レンズ自体の偏心がある。レンズや光学系で偏心が生じると、レンズの光学性能や光学系の光学性能の低下につながる。また、偏心量が大きくなるほど、光学性能の低下も大きくなる。

[0004] 偏心量を知ることができると、完成したレンズや光学系の合否判定に、その偏心量を利用することができる。ここで、合否判定とは、完成したレンズや光学系が所望の光学性能を有するか否かを判定することである。偏心量が規定値よりも小さい場合は合格となり、大きい場合は不合格になる。

[0005] また、判定の結果が不合格の場合、レンズの製造装置（研磨装置、成形装置）の調整や光学系の組み立て時の調整に、その偏心量の情報を利用することができる。このようなことから、偏心量を計測したいという要望は大きい。

[0006] 偏心量を計測する技術としては、特許文献1に記載された計測技術や、特許文献2に記載された計測技術がある。

先行技術文献

特許文献

[0007] 特許文献1：特許第837190号公報

特許文献2：特許第4260180号公報

[0008] 特許文献1に記載された計測技術は、オートコリメーション法を用いてい

る。オートコリメーション法では、光学系が複数のレンズで構成されている場合であっても、各レンズ面について偏心量を計測することができる。

[0009] 特許文献2に記載された計測技術では、触針式のプローブを用いている。この方法では、プローブをレンズ面に接触させて、レンズ面の形状を計測する。また、プローブで、予め準備しておいた基準部材の形状を計測する。そして、基準部材とレンズ面との相対的な位置ズレを求めることで偏心量を計測している。なお、特許文献2に記載された計測技術では、2つのレンズ面について偏心量を計測することができる。

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0010] オートコリメーション法は、レンズ面が球面であることを前提としている。すなわち、オートコリメーション法は、原理的に非球面の計測に対応していない。そのため、特許文献1に記載された計測技術では、非球面レンズや、非球面レンズが含まれる光学系については偏心量が計測できない。

[0011] この場合、非球面の面頂の付近を球面とみなして、球面と同様の計測を行うことが考えられる。しかしながら、このような計測では、非球面が大きく偏心していると、非球面からの反射光を受光できない状態が生じる。そのため、非球面レンズについては偏心量が計測できない。

[0012] また、特許文献1に記載された計測技術では、指標の像を観察している。この場合、反射光を受光できたとしても、非球面量が大きいと指標の像は大きくボケてしまう。そのため、非球面レンズについては偏心量が計測できない。

[0013] また、特許文献2の計測技術では、レンズ面にプローブを接触させる必要がある。そのため、複数のレンズで構成された光学系では、全てのレンズの偏心量を計測することはできない。

[0014] 例えば、光学系が3つのレンズで構成されている場合、中央のレンズの両側にレンズが存在する。この場合、中央のレンズのレンズ面にプローブを接触させることができない。そのため、中央のレンズでは、レンズ面の形状は

計測できない。また、両側のレンズでは、中央のレンズのレンズ面と対向しているレンズ面の形状は計測できない。

[0015] また、計測では、プローブとレンズ面を相対移動させる。この時の移動速度は低速であるため、計測時間が長くなる。また、基準部材の形状を計測しなくてはならないため、この点でも計測時間が長くなる。

[0016] 本発明は、このような課題に鑑みてなされたものであって、レンズ面の形状や光学系を構成するレンズの数に関係なく、短い時間で偏心量を計測できる偏心量計測方法及び偏心量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

[0017] 上述した課題を解決し、目的を達成するために、本発明の偏心量計測方法は、

計測軸上に配置された被検光学系に光束を照射して、偏心量を計測する方法であって、

被検光学系から出射した光束に基づいて波面データを取得する取得工程と、

波面データから所定の収差成分を抽出する第1の抽出工程と、

所定の収差成分から第1の収差成分を抽出する第2の抽出工程と、

第1の収差成分、偏心収差感度及び偏心量についての連立1次方程式を解析する解析工程と、を備え、

所定の収差成分は、偏心によって生じる収差成分が含まれる収差成分であり、

第1の収差成分は、所定の収差成分のうちの偏心量の1乗に比例する収差成分であり、

偏心収差感度は、偏心量の1乗に比例する収差感度であることを特徴とする。

[0018] また、本発明の偏心量計測装置は、
計測軸の一端に配置された投光系と、
計測軸の他端に配置された受光系と、

被検光学系を保持する保持部材と、
波面計測装置に接続された処理装置と、を備え、
保持部材は、投光系と受光系との間に配置され、
投光系は、被検光学系に光束を照射する位置に設けられ、
処理装置では、取得工程と、第1の抽出工程と、第2の抽出工程と、解析工程が実行され、

取得工程では、被検光学系から出射した光束に基づいて波面データが取得され、

第1の抽出工程では、波面データから所定の収差成分が抽出され、
第2の抽出工程では、所定の収差成分から第1の収差成分が抽出され、
解析工程では、第1の収差成分、偏心収差感度及び偏心量についての連立1次方程式が解析され、

所定の収差成分は、偏心によって生じる収差成分が含まれる収差成分であり、

第1の収差成分は、所定の収差成分のうちの偏心量の1乗に比例する収差成分であり、

偏心収差感度は、偏心量の1乗に比例する収差感度であることを特徴とする。

発明の効果

[0019] 本発明によれば、レンズ面の形状や光学系を構成するレンズの数に関係なく、短い時間で偏心量を計測できる偏心量計測方法及び偏心量計測装置を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0020] [図1]偏心によって収差が発生する様子を示す概念図である。

[図2]偏心自由度を説明する図であって、(a)は球面における偏心自由度を示し、(b)、(c)は非球面における偏心自由度を示している。

[図3]計測系における座標と被検光学系の偏心を示す図であって、(a)は偏心をレンズ面で示した図、(b)は偏心を球心で示した図である。

[図4]本実施形態の計測方法のフローチャートを示す図である。

[図5]本実施形態の計測方法のフローチャートを示す図である。

[図6]光束を被検光学系に照射している様子を示す図であって、(a)は照射位置Pからの照射を示し、(b)は照射位置P'からの照射を示している。

[図7]本実施形態の計測方法のフローチャートを示す図である。

[図8]本実施形態の計測方法のフローチャートを示す図である。

[図9]投光系におけるシステム収差を説明する図であって、(a)はシステム収差が発生していない状態を示し、(b)は投光系においてシステム収差が発生している状態を示す。

[図10]受光系におけるシステム収差を示す図であって、(a)はセンサー部品構成部におけるシステム収差を示し、(b)は波面データ取得部におけるシステム収差を示している。

[図11]システム収差成分を予め求めておく方法を示す図である。

[図12]第1の回転を示す図であって、(a)は第1の回転を行う前の状態を示し、(b)は第1の回転を行った後の状態を示している。

[図13]第1の回転によって球心が変化する様子を示す図であって、(a)は第1の回転前の球心の位置を示し、(b)は第1の回転後の球心の位置を示し、(c)は第1の回転による球心の移動量を示している。

[図14]被検光学系と受光系の間に受光光学系を配置した様子を示す図である。

[図15]第1の回転軸が計測軸に対して偏心している状態を示す図である。

[図16]第1の回転軸と計測軸の相対関係を示す図であって、(a)は計測軸と第1の回転軸が一致している状態を示し、(b)は計測軸に対して第1の回転軸がチルトしている状態を示している。

[図17]計測軸に対して第1の回転軸がブレている状態を示す図である。

[図18]実行例1のフローチャートを示す図である。

[図19]実行例2のフローチャートを示す図である。

[図20]本実施形態の計測方法のフローチャートを示す図である。

[図21]照射位置の移動の様子を示す図であって、(a)は一方の照射位置の移動前の位置を示し、(b)は一方の照射位置の移動後の位置を示し、(c)は他方の照射位置の移動前の位置を示し、(d)は他方の照射位置の移動後の位置を示している。

[図22]本実施形態の計測方法のフローチャートを示す図である。

[図23]照射位置の移動の様子を示す図であって、(a)は一方の照射位置の移動前の位置を示し、(b)は他方の照射位置の移動前の位置を示し、(c)は一方の照射位置の移動後の位置を示し、(d)は他方の照射位置の移動後の位置を示している。

[図24]照射位置の移動の様子を示す図であって、(a)は照射位置の移動方向が一方向の場合を示し、(b)は照射位置の移動方向が二方向の場合を示している。

[図25]照射位置のパターンを示す図であって、(a)は照射位置が二方向の状態を示し、(b)は照射位置が同心円状の状態を示し、(c)は照射位置が格子状の状態を示している。

[図26]光束を被検光学系に照射している様子を示す図であって、(a)は角度 θ での照射を示し、(b)は角度 θ' での照射を示している。

[図27]本実施形態の計測方法のフローチャートを示す図である。

[図28]第2の回転を示す図であって、(a)は第2の回転を行う前の状態を示し、(b)は第2の回転を行った後の状態を示している。

[図29]第2の回転による座標軸の変化を説明するための図であって、(a)は第2の回転を行う前の状態を示し、(b)は第2の回転を行った後の状態を示している。

[図30]第1の回転による球心の移動を示す図であって、(a)は前側計測時での球心の移動を示し、(b)は後ろ側計測時での球心の移動を示している。

[図31]第1の回転と第2の回転による球心の動きを示す図であって、(a)は前側計測時で、第1の回転前の球心の位置を示し、(b)前側計測時で、

第1の回転後の球心の位置を示し、(c)は後ろ側計測時で、第1の回転前の球心の位置を示し、(d)は後ろ側計測時で、第1の回転後の球心の位置を示している。

[図32]偏心収差感度 $B_{2jl}(0x, 0y)$ と $B_{3jl}(0x, 0y)$ において現れる物体高関数を示す図であって、(a)は被検光学系が偏心していない場合を示し、(b)と(c)は、被検光学系が偏心している場合を示している。

[図33]偏心収差感度 $B_{4jl}(0x, 0y)$ において現れる物体高関数を示す図であって、(a)は被検光学系が偏心していない場合を示し、(b)と(c)は、被検光学系が偏心している場合を示している。

[図34]偏心収差感度 $B_{5jl}(0x, 0y)$ と $B_{6jl}(0x, 0y)$ において現れる物体高関数を示す図であって、(a)は被検光学系が偏心していない場合を示し、(b)と(c)は、被検光学系が偏心している場合を示している。

[図35]偏心収差感度 $B_{7jl}(0x, 0y)$ と $B_{8jl}(0x, 0y)$ において現れる物体高関数を示す図であって、(a)は被検光学系が偏心していない場合を示し、(b)と(c)は、被検光学系が偏心している場合を示している。

[図36]実施形態の偏心量計測装置を示す図である。

[図37]S Hセンサーの構造と機能を示す図であって、(a)はS Hセンサーに平面波が入射した場合の様子を示し、(b)はS Hセンサーに非平面波が入射した場合の様子を示している。

[図38]S Hセンサーにおけるシステム収差を示す図であって、(a)は基板が歪んだ場合を示し、(b)は基板が傾いた場合を示し、(c)はレンズピッチに誤差が生じた場合を示し、(d)はレンズごとの焦点距離が異なる場合を示している。

[図39]投光系の変形例であって、(a)は第1の変形例を示し、(b)は第2の変形例を示している。

[図40]保持部材と計測軸の位置関係を示す図であって、(a)は第1の回転軸が計測軸と一致している場合を示し、(b)は第1の回転軸が計測軸と一致していない場合を示している。

[図41]保持部材の変形例を示す図であって、（a）は第1の変形例を示し、（b）は第2の変形例を示している。

[図42]第2の回転を行う様子を示す図であって、（a）は保持部材の移動前の様子を示し、（b）は保持部材の移動後の様子を示している。

[図43]被検光学系が負の屈折力を有する場合の投光系を示す図である。

[図44]受光系の変形例を示す図である。

[図45]偏心量計測装置の第1の変形例を示す図である。

[図46]偏心量計測装置の第2の変形例を示す図である。

[図47]偏心量計測装置の第3の変形例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0021] 実施例の説明に先立ち、本発明のある態様に係る実施形態の作用効果を説明する。なお、本実施形態の作用効果を具体的に説明するに際しては、具体的な例を示して説明することになる。しかし、後述する実施例の場合と同様に、それらの例示される態様はあくまでも本発明に含まれる態様のうちの一部に過ぎず、その態様には数多くのバリエーションが存在する。したがって、本発明は例示される態様に限定されるものではない。

[0022] 本実施形態の偏心量計測方法を説明する前に、（I）偏心によって発生する収差、（II）偏心自由度、（III）計測系における座標、（IV）偏心したレンズ面を透過した後の波面、について説明する。

[0023] （I）偏心によって発生する収差について説明する。図1は、偏心によって収差が発生する様子を示す概念図である。なお、図1は概念図であるため、像IM1、像IM2及び像IM3の位置、像の大きさ及び形状は正確ではない。

[0024] 光学系が偏心すると、偏心によって収差が発生する。光学系が複数のレンズで構成されている場合、1つのレンズ面の偏心によって発生した収差が、他のレンズ面で次々にリレーされて行く。

[0025] 図1に示すように、物点OBの像については、レンズ面LS1によって像IM1が形成され、レンズ面LS2によって像IM2が形成され、レンズ面

L S 3 によって像 I M 3 が形成される。このように、物点 O B の像はレンズ面 L S 1 によって形成され、形成された像がレンズ面 L S 2 及びレンズ面 L S 3 によってリレーされて行く。

[0026] 図 1 では、レンズ面 L S 1、レンズ面 L S 2 及びレンズ面 L S 3 が光軸に対して偏心している。この場合、像 I M 1、像 I M 2 及び像 I M 3 は、光軸上から離れた位置に形成される。

[0027] また、レンズ面 L S 1 の偏心に伴って、像 I M 1 に収差が発生する。この像 I M 1 は、レンズ面 L S 2 の物点に相当する。ここで、レンズ面 L S 2 も偏心しているので、像 I M 2 にも収差が発生する。像 I M 2 での収差は、像 I M 1 における収差にレンズ面 L S 2 の偏心によって発生した収差が加わったものになる。像 I M 3 での収差は、像 I M 2 における収差にレンズ面 L S 3 の偏心によって発生した収差が加わったものになる。

[0028] このように、レンズ面が偏心した状態では、レンズ面 L S 1、レンズ面 L S 2 及びレンズ面 L S 3 の各々で発生した収差が加算されながら、像がリレーされていく。

[0029] (1 1) 偏心自由度について説明する。偏心自由度は、偏心の種類を示すものである。偏心自由度には、大きく分けてシフトとチルトとがある。図 2 は偏心自由度を説明する図であって、(a) は球面における偏心自由度を示し、(b)、(c) は非球面における偏心自由度を示している。

[0030] 図 2 (a) に示すように、球面における偏心は球心の位置で表すことができる。球面における偏心自由度は、幾何学的に、X 方向のシフトと Y 方向のシフトのみである。

[0031] また、球面では、仮に空間上のある点を中心に球面がチルトしたとしても、チルトは、X 方向のシフトや Y 方向のシフト及び Z 方向の面間隔ズレが生じたと考えることができる。よって、球面における偏心自由度は、X 方向のシフトと Y 方向のシフトのみと考えてよい。

[0032] なお、面間隔のズレは製造時にも生じる。製造時の面間隔のズレは、例えば、1 つのレンズでは肉厚の誤差、2 つのレンズではレンズ間隔の誤差にな

る。製造誤差による面間隔のズレと、球面がチルトした時の面間隔のズレとは、現実的には区別できない。

[0033] 一方で、非球面は、図2 (b)、(c) に示すように、非球面面頂と非球面軸を持っている。非球面軸は回転対称な軸である。非球面はこの非球面軸を有するため、非球面の場合は、偏心自由度として、X方向のシフトとY方向のシフトに加えて、A方向のチルトとB方向のチルトがある。X方向のシフトとY方向のシフトは、非球面面頂に関する偏心自由度である。また、A方向のチルトとB方向のチルトは、非球面軸に関する偏心自由度である。

[0034] このように、球面と非球面では、偏心自由度の数が異なる。よって、例えば、1つのレンズの第1面が球面で、第2面が非球面の場合、偏心自由度の数は最大で6になる。

[0035] (I I I) 計測系における座標について説明する。図3は計測系における座標と被検光学系の偏心を示す図であって、(a)は偏心をレンズ面で示した図、(b)は偏心を球心で示した図である。

[0036] 計測系は、投光系と受光系とを有する。図3では、投光系を $0x$ 軸、 $0y$ 軸及び $0z$ 軸で表し、受光系を ρx 軸と ρy 軸とで表している。また、投光系の座標を物体高座標($0x, 0y, 0z$)で表し、受光系の座標を瞳座標($\rho x, \rho y$)で表す。

[0037] 図3 (a) に示すように、被検光学系は、第1レンズ面 $L S_1$ から第 j レンズ面 $L S_j$ までのレンズ面から構成されている。ここでは、これらのレンズ面が $0z$ 軸に対してY方向にシフトしている状況を考える。また、レンズ面はいずれも球面とする。

[0038] 図2 (a) で説明したように、レンズ面が球面の場合、レンズ面の偏心は球心で表すことができる。そこで、図3 (b) では、球心を用いてレンズ面のシフトを表している。図3 (b) において、 $SC_1, SC_2, \dots, SC_j$ は、各レンズ面の球心を表している。また、 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j$ は、各レンズ面のY方向のシフト量を表している。

[0039] (I V) 偏心したレンズ面を透過した後の波面について説明する。ここでは、数式を用いて説明する。

[0040] 図3 (a) に示すように、投光系における物体高座標(0x, 0y)から、被検光学系に対して光束L Bが照射される。なお、光束L Bは0x0y面から照射されている。よって、物体高座標は正確には(0x, 0y, 0)であるが、簡単のために(0x, 0y)とする。

[0041] 被検光学系を透過した光束L B' は受光系に入射する。なお、光束L Bは、本来被検光学系に照射される光束の一部を示したものである。同様に、光束L B' は、本来受光系に入射する光束の一部を示したものである。

[0042] 受光系では、光束L B' に基づいて波面データが取得される。ここで、被検光学系ではレンズ面が偏心しているので、光束L B' の波面は偏心によって生じる波面収差を持つ。そこで、波面データを解析することで、偏心によって生じる波面収差を得ることができる。

[0043] ここで、回転対称な光学系で生じる収差は、偏心量に依存しない項、偏心量の1乗に比例する項、偏心量の2乗に比例する項、偏心量の3乗に比例する項、偏心量の4乗に比例する項・・・というように、多項式を用いて展開することができる（参照：偏心の存在する光学系の3次の収差論、偏心光学系の3次の収差論、共に日本オプトメカトロニクス協会、Image field distribution model of wavefront aberration and models of distortion and field curvature [T. Matsuzawa: J.Opt.Soc.Am.A, 28, No. 2 (2011) 96-110]）。

[0044] ここでは、偏心量に依存する項だけを用いて、波面収差を展開する。この場合、波面収差Wは、例えば以下の式(1)で表すことができる。但し、ここでの波面収差Wは被検光学系に偏心がないときの波面に対する偏差として説明する。

$$\begin{aligned}
 [0045] \quad W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 = \Delta_1 B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 + \Delta_1^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 + \Delta_2 B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 + \Delta_2^2 B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ \cdots \\
 &+ \Delta_j B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_j^2 B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、

Δ_j は第 j 面における $0z$ 軸に対する偏心量、

$B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は、第 j 面における偏心量の 1 乗に比例する偏心収差感度、

$B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は、第 j 面における偏心量の 2 乗に比例する偏心収差感度、

である。

[0046] 式 (1) に示すように、多項式の各項は、偏心量と偏心収差感度の積で表される。なお、式 (1) では、偏心量を Y 方向のシフト量に限定していない。よって、一般的な偏心量という意味で、 δ ではなく Δ で偏心量を表している。

[0047] また、式 (1) では、収差論に基づいて波面収差 W を展開しているが、展開は偏心量の 2 乗に比例する項 (Δ^2 に比例する項) までになっている。一般的に製造誤差で生じる偏心量は小さいため、偏心量の 3 乗以上に比例する項については、各項における収差量は微小と考えられるので、無視することができる。そのため、式 (1) には、偏心量の 3 乗以上に比例する項は含まれていない。

[0048] ここで、式 (1) の右辺の各項を「収差成分」という。また、偏心量 Δ が乗じられている項を「偏心収差成分」という。式 (1) の右辺の各項には偏心量 Δ が乗じられている。よって、式 (1) の右辺の各項は、全て偏心収差成分である。

[0049] 式 (1) の各項の説明を表 1 に示す。

[表1]

項	項の説明
$\Delta_1 B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	第1面における偏心量の1乗に比例する偏心収差成分
$\Delta_1^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	第1面における偏心量の2乗に比例する偏心収差成分
$\Delta_2 B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	第2面における偏心量の1乗に比例する偏心収差成分
$\Delta_2^2 B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	第2面における偏心量の2乗に比例する偏心収差成分
...	...
$\Delta_j B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	第j面における偏心量の1乗に比例する偏心収差成分
$\Delta_j^2 B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	第j面における偏心量の2乗に比例する偏心収差成分

[0050] 表1に示すように、式(1)における偏心収差成分は、偏心量の1乗に比例する偏心収差成分(Δ に比例する項)と、偏心量の2乗に比例する偏心収差成分(Δ^2 に比例する項)と、からなる。また、 $B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は第j面における偏心量の1乗に比例する偏心収差感度、 $B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は第j面における偏心量の2乗に比例する偏心収差感度である。

[0051] 以上のように、波面データを解析することで波面収差が得られる。そして、波面収差は収差成分の多項式で展開することができる。

[0052] 更に、各収差成分における偏心収差感度も、収差論に基づいて多項式で展開できる。例えば、ゼルニケ多項式を用いて展開すると、偏心収差感度 $B_{jl}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は、以下の式(2)で表される。

[0053] $B_{jl}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$

$$\begin{aligned}
 &= 1 \cdot B_{1jl}(0x, 0y) \\
 &+ \rho x \cdot B_{2jl}(0x, 0y) \\
 &+ \rho y \cdot B_{3jl}(0x, 0y) \\
 &+ \{2(\rho x^2 + \rho y^2) - 1\} \cdot B_{4jl}(0x, 0y) \\
 &+ \{\rho x^2 - \rho y^2\} \cdot B_{5jl}(0x, 0y) \\
 &+ 2\rho x \rho y \cdot B_{6jl}(0x, 0y) \\
 &+ \{3(\rho x^2 + \rho y^2)\rho x - 2\rho x\} \cdot B_{7jl}(0x, 0y) \\
 &+ \{3(\rho x^2 + \rho y^2)\rho y - 2\rho y\} \cdot B_{8jl}(0x, 0y) \\
 &+ \{6(\rho x^2 + \rho y^2)^2 - 6(\rho x^2 + \rho y^2) + 1\} \cdot B_{9jl}(0x, 0y) \\
 &+ \dots \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで、

$B_{1jl}(0x, 0y) \sim B_{9jl}(0x, 0y)$ は偏心収差感度、

である。

[0054] なお、偏心収差感度を $B_{zjl}(0x, 0y)$ で表すと、 $B_{zjl}(0x, 0y)$ は、ゼルニケ項の第 Z 項が乗じられた項の偏心収差感度であって、第 j 面における偏心量の 1 乗に比例する偏心収差感度である。

[0055] ゼルニケ項の各項、各項を表す関数及び収差の対応関係を表 2 に示す。表 2 では、ゼルニケ項の第 1 項から第 9 項について、これらの対応関係を示している。

[表2]

ゼルニケ項	関数	収差分類
1 項	1	球面収差 (ピストン)
2 項	ρx	コマ収差 (チルト)
3 項	ρy	コマ収差 (チルト)
4 項	$2(\rho x^2 + \rho y^2) - 1$	球面収差 (フォーカス)
5 項	$\rho x^2 - \rho y^2$	非点収差
6 項	$2\rho x\rho y$	非点収差
7 項	$3(\rho x^2 + \rho y^2)\rho x - 2\rho x$	コマ収差
8 項	$3(\rho x^2 + \rho y^2)\rho y - 2\rho y$	コマ収差
9 項	$6(\rho x^2 + \rho y^2)^2 - 6(\rho x^2 + \rho y^2) + 1$	球面収差
...	...	...

[0056] ゼルニケ項の各項は、瞳座標 ρx と ρy で表される。ここで、 ρx における次数と ρy における次数によって決まる次数を、瞳座標の最大次数とする。この最大次数が偶数次であれば、その項の関数の次数は偶数次である。最大次数が奇数次であれば、その項の関数の次数は奇数次である。例えば、ゼルニケ項の第 2 項では、瞳座標は ρx なので、ゼルニケ項の第 2 項における瞳座標の最大次数は 1 次で奇数次数になる。よって、ゼルニケ項の第 2 項を表す関数は、瞳座標の最大次数が 1 次で奇数次数の関数ということになる。

[0057] また、ゼルニケ項の第 6 項では、瞳座標は $\rho x\rho y$ なので、ゼルニケ項の第 6 項における瞳座標の最大次数は 2 次で偶数次数になる。よって、ゼルニケ項の第 6 項を表す関数は、瞳座標の最大次数が 2 次で偶数次数の関数という

ことになる。

[0058] 第1項から第9項についてまとめた結果を表3に示す。

[表3]

ゼルニケ項	関数	瞳座標最大次数	瞳座標次数
1項	1	0	偶数
2項	ρx	1	奇数
3項	ρy	1	奇数
4項	$2(\rho x^2 + \rho y^2) - 1$	2	偶数
5項	$\rho x^2 - \rho y^2$	2	偶数
6項	$2\rho x\rho y$	2	偶数
7項	$3(\rho x^2 + \rho y^2)\rho x - 2\rho x$	3	奇数
8項	$3(\rho x^2 + \rho y^2)\rho y - 2\rho y$	3	奇数
9項	$6(\rho x^2 + \rho y^2)^2 - 6(\rho x^2 + \rho y^2) + 1$	4	偶数
...	...	...	...

[0059] また、式(2)の第2項は、 $B_{2jl}(0x, 0y)$ に ρx が乗じられた項である。よって、式(2)の第2項は、 $B_{2jl}(0x, 0y)$ に瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた項ということになる。

[0060] また、式(2)の第6項は、 $B_{6jl}(0x, 0y)$ に $\rho x\rho y$ が乗じられた項である。よって、式(2)の第6項は、 $B_{6jl}(0x, 0y)$ に瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた項ということになる。

[0061] 式(2)の各項の説明を表4に示す。

[表4]

項	項の説明
$1 \cdot B_{1jl}(0x, 0y)$	瞳座標偶数次の関数が乗じられた項
$\rho x \cdot B_{2jl}(0x, 0y)$	瞳座標奇数次の関数が乗じられた項
$\rho y \cdot B_{3jl}(0x, 0y)$	瞳座標奇数次の関数が乗じられた項
$\{2(\rho x^2 + \rho y^2) - 1\} \cdot B_{4jl}(0x, 0y)$	瞳座標偶数次の関数が乗じられた項
$\{\rho x^2 - \rho y^2\} \cdot B_{5jl}(0x, 0y)$	瞳座標偶数次の関数が乗じられた項
$2\rho x\rho y \cdot B_{6jl}(0x, 0y)$	瞳座標偶数次の関数が乗じられた項
$\{3(\rho x^2 + \rho y^2)\rho x - 2\rho x\} \cdot B_{7jl}(0x, 0y)$	瞳座標奇数次の関数が乗じられた項
$\{3(\rho x^2 + \rho y^2)\rho y - 2\rho y\} \cdot B_{8jl}(0x, 0y)$	瞳座標奇数次の関数が乗じられた項
$\{6(\rho x^2 + \rho y^2)^2 - 6(\rho x^2 + \rho y^2) + 1\} \cdot B_{9jl}(0x, 0y)$	瞳座標偶数次の関数が乗じられた項
...	

[0062] このように、偏心収差感度 $B_{jl}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ をゼルニケ多項式で展開した場合、多項式の各項は、瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた項と、瞳座標

が偶数次数の関数が乗じられた項と、に分かれる。

[0063] 更に、偏心収差感度 $B_{zjl}(0x, 0y)$ も、多項式で展開することができる。ただし、瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた項と瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた項とで、展開式が異なる。

[0064] 偏心収差感度 $B_{zjl}(0x, 0y)$ における添え字の l が $l = 1$ の場合と $l = 2$ の場合とに分けて説明する。

[0065] $l = 1$ の場合、偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ は、ゼルニケ項の第 z 項が乗じられた項の偏心収差感度であって、第 j 面における偏心量の 1 乗に比例する偏心収差感度を表している。

[0066] 瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ について説明する。この偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ は、ゼルニケ項の第 2 項、第 3 項、第 7 項、第 8 項 $\cdots$ （以下、「ゼルニケ項の第 2 項等」という）が乗じられた項の偏心収差感度である。この偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ ($z=2, 3, 7, 8, \cdots$) は、以下の式(3)で表される。

$$B_{zj1}(0x, 0y) = C_{zj100} + C_{zj120}0x^2 + C_{zj111}0x0y + C_{zj102}0y^2 + \cdots \quad (3)$$

[0067] 式(3)に示すように、偏心量の 1 乗に比例する偏心収差感度では、ゼルニケ項の第 2 項等が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ は、物体高座標に対して偶関数になっている。

[0068] 瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ について説明する。この偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ は、ゼルニケ項の第 1 項、第 4 項、第 5 項、第 6 項、第 9 項 $\cdots$ （「ゼルニケ項の第 4 項等」という）が乗じられた項の偏心収差感度である。この偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ ($z=1, 4, 5, 6, 9, \cdots$) は、以下の式(4)で表される。

$$B_{zj1}(0x, 0y) = C_{zj110}0x + C_{zj101}0y + C_{zj130}0x^3 + C_{zj121}0x^20y + C_{zj112}0x0y^2 + C_{zj103}0y^3 + \cdots \quad (4)$$

[0069] 式(4)に示すように、偏心量の 1 乗に比例する偏心収差感度では、ゼルニケ項の第 4 項等が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ は、物体高座標に

対して奇関数になっている。

[0070] $l = 2$ の場合、偏心収差感度 $B_{zj2}(0x, 0y)$ は、ゼルニケ項の第 z 項が乗じられた項の偏心収差感度であって、第 j 面における偏心量の 2 乗に比例する偏心収差感度を表している。

[0071] 瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ について説明する。この偏心収差感度 $B_{zj2}(0x, 0y)$ は、ゼルニケ項の第 2 項等が乗じられた項の偏心収差感度である。この偏心収差感度 $B_{zj2}(0x, 0y)$ ($z=2, 3, 7, 8 \dots$) は、以下の式 (5) で表される。

$$B_{zj2}(0x, 0y) = C_{zj210}0x + C_{zj201}0y + C_{zj230}0x^3 + C_{zj221}0x^20y \\ + C_{zj212}0x0y^2 + C_{zj203}0y^3 + \dots \quad (5)$$

[0072] 式 (5) に示すように、偏心量の 2 乗に比例する偏心収差感度では、ゼルニケ項の第 2 項等が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj2}(0x, 0y)$ は、物体高座標に対して奇関数になっている。

[0073] 瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ について説明する。この偏心収差感度 $B_{zj2}(0x, 0y)$ は、ゼルニケ項の第 4 項等が乗じられた項の偏心収差感度である。この偏心収差感度 $B_{zj2}(0x, 0y)$ ($z=1, 4, 5, 6, 9 \dots$) は、以下の式 (6) で表される。

$$B_{zj2}(0x, 0y) = C_{zj200} + C_{zj220}0x^2 + C_{zj211}0x0y + C_{zj202}0y^2 + \dots \quad (6)$$

[0074] 式 (6) に示すように、偏心量の 2 乗に比例する偏心収差感度では、ゼルニケ項の第 4 項等が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj2}(0x, 0y)$ は、物体高座標に対して偶関数になっている。

[0075] なお、式 (3) ~ (6) における C は物体高座標、瞳座標及び偏心量に依存しない定数である。また、 C における添え字は、左側から順に、ゼルニケ項の第 z 項、第 j 面、 l の値、物体高座標 $0x$ における次数、物体高座標 $0y$ における次数を表している。

[0076] このように、偏心収差感度 $B_{zjl}(0x, 0y)$ は、条件によって、物体高座標に対して奇関数になる場合と、物体高座標に対して偶関数になる場合とに分かれる

。

[0077] 以上のように、被検光学系においてレンズ面が偏心することで、収差が発生する。発生した収差は、波面収差となって現れる。このように、レンズ面の偏心と収差とは密接に関連している。そして、波面収差は、偏心量と偏心収差感度で表される。そこで、波面収差と偏心収差感度から、偏心量を求めることができる。

[0078] 本実施形態の偏心量計測方法（以下、「本実施形態の計測方法」という）について説明する。

[0079] 本実施形態の偏心量計測方法は、計測軸上に配置された被検光学系に光束を照射して、偏心量を計測する方法であって、被検光学系から出射した光束に基づいて波面データを取得する取得工程と、波面データから所定の収差成分を抽出する第1の抽出工程と、所定の収差成分から第1の収差成分を抽出する第2の抽出工程と、第1の収差成分、偏心収差感度及び偏心量についての連立1次方程式を解析する解析工程と、を備え、所定の収差成分は、偏心によって生じる収差成分が含まれる収差成分であり、第1の収差成分は、所定の収差成分のうちの偏心量の1乗に比例する収差成分であり、偏心収差感度は、偏心量の1乗に比例する収差感度であることを特徴とする。

[0080] 本実施形態の計測方法のフローチャートを図4に示す。本実施形態の計測方法は、計測軸上に配置された被検光学系に光束を照射して、偏心量を計測する方法である。そのために、本実施形態の計測方法は、ステップS100、ステップS200、ステップS300及びステップS400を有する。

[0081] ステップS100は取得工程である。上述のように、被検光学系には光束が照射される。被検光学系に照射された光束は被検光学系を通過して、被検光学系から出射する。ステップS100では、被検光学系から出射した光束に基づいて、波面データWFDを取得する。

[0082] ステップS200は第1の抽出工程である。第1の抽出工程では、波面データWFDから所定の収差成分を抽出する。この所定の収差成分は、偏心によって生じる収差成分が含まれる収差成分である。

[0083] 被検光学系においてレンズ面が偏心した状態（以下、「偏心状態」という）では、被検光学系から出射した光束の波面には、偏心によって生じる波面収差が含まれている。波面データWFDは波面収差そのものを示すデータではないが、波面収差の情報を含んでいる。

[0084] 波面収差は、様々な種類の収差の総和である。ステップS200では、波面データWFDを解析することで、各収差における収差量を求めることができる。この解析では、多項式を用いる。多項式としては、例えば、ゼルニケ多項式がある。

[0085] ゼルニケ多項式を用いて波面収差Wを展開すると、波面収差Wは以下の式（7）で表される。なお、ここでは、ゼルニケ項の第9項までを使って波面収差を展開する。

$$\begin{aligned}
 [0086] \quad & W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = 1 \cdot W_1(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + \rho x \cdot W_2(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + \rho y \cdot W_3(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + \{2(\rho x^2 + \rho y^2) - 1\} \cdot W_4(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + (\rho x^2 - \rho y^2) \cdot W_5(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + 2\rho x \rho y \cdot W_6(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + \{3(\rho x^2 + \rho y^2)\rho x - 2\rho x\} \cdot W_7(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + \{3(\rho x^2 + \rho y^2)\rho y - 2\rho y\} \cdot W_8(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + \{6(\rho x^2 + \rho y^2)^2 - 6(\rho x^2 + \rho y^2) + 1\} \cdot W_9(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = f_1(\rho x, \rho y) \cdot W_1(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + f_2(\rho x, \rho y) \cdot W_2(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + f_3(\rho x, \rho y) \cdot W_3(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + f_4(\rho x, \rho y) \cdot W_4(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + f_5(\rho x, \rho y) \cdot W_5(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + f_6(\rho x, \rho y) \cdot W_6(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & + f_7(\rho x, \rho y) \cdot W_7(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+f_8(\rho x, \rho y) \cdot W_8(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 &+f_9(\rho x, \rho y) \cdot W_9(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \quad (7)
 \end{aligned}$$

ここで、

$W_1 \sim W_9$ は収差成分、

$f_1(\rho x, \rho y) \sim f_9(\rho x, \rho y)$ はゼルニケ項を表す関数、

である。

[0087] ここで、波面データWFDを解析して得た波面収差 W_M は既知である。そこで、式(7)において $W_1 \sim W_9$ を変化させて、波面収差 W と波面収差 W_M との差が最も小さくなる $W_1 \sim W_9$ の組み合わせを求める。

[0088] 一方、上述のように、波面収差 W は式(1)で表すことができる。式(1)を、再度、以下に示す。

$$\begin{aligned}
 &W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 &= \Delta_1 B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_1^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_2 B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_2^2 B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \dots \\
 &+ \Delta_j B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_j^2 B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1)
 \end{aligned}$$

[0089] また、偏心収差感度 $B_{jl}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は、式(2')に示すように展開できる。なお、式(2')では、ゼルニケ項を $f_z(\rho x, \rho y)$ で表している。また、ゼルニケ項の第5項～第8項、及び第10項以上について記載を省略している。

$$\begin{aligned}
 [0090] \quad &B_{jl}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &= f_1(\rho x, \rho y) \cdot B_{1jl}(0x, 0y) + f_2(\rho x, \rho y) \cdot B_{2jl}(0x, 0y) + f_3(\rho x, \rho y) \cdot B_{3jl}(0x, 0y) \\
 &+ f_4(\rho x, \rho y) \cdot B_{4jl}(0x, 0y) + \dots + f_9(\rho x, \rho y) \cdot B_{9jl}(0x, 0y) \quad (2')
 \end{aligned}$$

[0091] 式(2')を式(1)に代入すると、以下の式(1-1)が得られる。

$$\begin{aligned}
 & W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = \Delta_1 \{ f_1(\rho x, \rho y) \cdot B_{111}(0x, 0y) + f_2(\rho x, \rho y) \cdot B_{211}(0x, 0y) + f_3(\rho x, \rho y) \cdot B_{311}(0x, 0y) \\
 & \quad + f_4(\rho x, \rho y) \cdot B_{411}(0x, 0y) + \dots + f_9(\rho x, \rho y) \cdot B_{911}(0x, 0y) \} \\
 & + \Delta_1^2 \{ f_1(\rho x, \rho y) \cdot B_{112}(0x, 0y) + f_2(\rho x, \rho y) \cdot B_{212}(0x, 0y) + f_3(\rho x, \rho y) \cdot B_{312}(0x, 0y) \\
 & \quad + f_4(\rho x, \rho y) \cdot B_{412}(0x, 0y) + \dots + f_9(\rho x, \rho y) \cdot B_{912}(0x, 0y) \} \\
 & + \Delta_2 \{ f_1(\rho x, \rho y) \cdot B_{121}(0x, 0y) + f_2(\rho x, \rho y) \cdot B_{221}(0x, 0y) + f_3(\rho x, \rho y) \cdot B_{321}(0x, 0y) \\
 & \quad + f_4(\rho x, \rho y) \cdot B_{421}(0x, 0y) + \dots + f_9(\rho x, \rho y) \cdot B_{921}(0x, 0y) \} \\
 & + \Delta_2^2 \{ f_1(\rho x, \rho y) \cdot B_{122}(0x, 0y) + f_2(\rho x, \rho y) \cdot B_{222}(0x, 0y) + f_3(\rho x, \rho y) \cdot B_{322}(0x, 0y) \\
 & \quad + f_4(\rho x, \rho y) \cdot B_{422}(0x, 0y) + \dots + f_9(\rho x, \rho y) \cdot B_{922}(0x, 0y) \} \\
 & + \dots \\
 & + \Delta_j \{ f_1(\rho x, \rho y) \cdot B_{1j1}(0x, 0y) + f_2(\rho x, \rho y) \cdot B_{2j1}(0x, 0y) + f_3(\rho x, \rho y) \cdot B_{3j1}(0x, 0y) \\
 & \quad + f_4(\rho x, \rho y) \cdot B_{4j1}(0x, 0y) + \dots + f_9(\rho x, \rho y) \cdot B_{9j1}(0x, 0y) \} \\
 & + \Delta_j^2 \{ f_1(\rho x, \rho y) \cdot B_{1j2}(0x, 0y) + f_2(\rho x, \rho y) \cdot B_{2j2}(0x, 0y) + f_3(\rho x, \rho y) \cdot B_{3j2}(0x, 0y) \\
 & \quad + f_4(\rho x, \rho y) \cdot B_{4j2}(0x, 0y) + \dots + f_9(\rho x, \rho y) \cdot B_{9j2}(0x, 0y) \} \\
 & \quad (1-1)
 \end{aligned}$$

[0092] 式(1-1)において、fの添え字とBの添え字の1番目は、共にゼルニケ項の番号を表している。そこで、ゼルニケ項の番号ごとにまとめると式(1-2)が得られる。

$$\begin{aligned}
 & W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = f_1(\rho x, \rho y) \cdot [\{ \Delta_1 B_{111}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{121}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{1j1}(0x, 0y) \} \\
 & \quad + \{ \Delta_1^2 B_{112}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{122}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j^2 B_{1j2}(0x, 0y) \}]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +f_2(\rho x, \rho y) \cdot [\{\Delta_1 B_{211}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{221}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j B_{2j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{212}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{222}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{2j2}(0x, 0y)\}] \\
& +f_3(\rho x, \rho y) \cdot [\{\Delta_1 B_{311}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{321}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j B_{3j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{312}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{322}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{3j2}(0x, 0y)\}] \\
& +f_4(\rho x, \rho y) \cdot [\{\Delta_1 B_{411}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{421}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j B_{4j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{412}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{422}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{4j2}(0x, 0y)\}] \\
& + \cdots \\
& +f_9(\rho x, \rho y) \cdot [\{\Delta_1 B_{911}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{921}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j B_{9j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{912}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{922}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{9j2}(0x, 0y)\}] \\
& \quad (1-2)
\end{aligned}$$

[0093] 式(7)と式(1-2)から、以下の式(8-1)～(8-9)が得られる。

$$\begin{aligned}
& W_1(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\
& = [\{\Delta_1 B_{111}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{121}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j B_{1j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{112}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{122}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{1j2}(0x, 0y)\}] \quad (8-1) \\
&)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_2(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\
& = [\{\Delta_1 B_{211}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{221}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j B_{2j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{212}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{222}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{2j2}(0x, 0y)\}] \quad (8-2) \\
&)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_3(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\
& = [\{\Delta_1 B_{311}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{321}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j B_{3j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{312}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{322}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{3j2}(0x, 0y)\}] \quad (8-3) \\
&)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_4(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\
& = [\{\Delta_1 B_{411}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{421}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j B_{4j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{412}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{422}(0x, 0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{4j2}(0x, 0y)\}] \quad (8-4) \\
&)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_5(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
& = [\{\Delta_1 B_{511}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{521}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{5j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{512}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{522}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j^2 B_{5j2}(0x, 0y)\}] \quad (8-5) \\
&)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_6(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
& = [\{\Delta_1 B_{611}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{621}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{6j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{612}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{622}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j^2 B_{6j2}(0x, 0y)\}] \quad (8-6) \\
&)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_7(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
& = [\{\Delta_1 B_{711}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{721}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{7j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{712}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{722}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j^2 B_{7j2}(0x, 0y)\}] \quad (8-7) \\
&)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_8(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
& = [\{\Delta_1 B_{811}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{821}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{8j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{812}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{822}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j^2 B_{8j2}(0x, 0y)\}] \quad (8-8) \\
&)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_9(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
& = [\{\Delta_1 B_{911}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{921}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{9j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{912}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{922}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j^2 B_{9j2}(0x, 0y)\}] \quad (8-9) \\
&)
\end{aligned}$$

[0094] ここで、式(8-1)～式(8-9)の右辺は、いずれも、 $\Delta_1 \sim \Delta_j$ を含む項と $\Delta_1^2 \sim \Delta_j^2$ を含む項とからなる。このように、 $W_1 \sim W_9$ は、いずれも偏心量 Δ が乗じられている項を用いて表される。上述のように、偏心量 Δ が乗じられている項は「偏心収差成分」であるから、 $W_1 \sim W_9$ は、いずれも偏心収差成分である。

[0095] また、上述のように、所定の収差成分は、偏心によって生じる収差成分が含まれる収差成分である。 $W_1 \sim W_9$ は、偏心収差成分、すなわち、偏心によって生じる収差成分である。よって、 $W_1 \sim W_9$ は、所定の収差成分ということに

なる。

[0096] このように、波面データWFDを解析して波面収差を求めること、すなわち、 $W_1 \sim W_9$ の組み合わせを求めることで、波面データWFDから所定の収差成分を抽出することができる。

[0097] ステップS300は第2の抽出工程である。第2の抽出工程では、所定の収差成分から第1の収差成分を抽出する。この第1の収差成分は、偏心量の1乗に比例する収差成分である。

[0098] 本実施形態の計測方法では、後述のように、偏心量についての連立1次方程式を作成し、この連立1次方程式を解くことにより偏心量を求める。第1の収差成分は、この連立1次方程式に用いられる。

[0099] 上述のように、 $W_1 \sim W_9$ は所定の収差成分である。ただし、 $W_1 \sim W_9$ はいずれも、偏心量の1乗に比例する収差成分と偏心量の2乗に比例する収差成分とからなる。この場合、偏心量と収差量とは線形関係にはならない。

[0100] そこで、所定の収差成分の中から、偏心量の1乗に比例する収差成分、すなわち、第1の収差成分を抽出する。

[0101] 第1の収差成分は、式(8-1)～(8-9)から偏心量の2乗に比例する収差成分を除いたものになる。よって、第1の収差成分を $W_{11} \sim W_{91}$ とすると、 $W_{11} \sim W_{91}$ は以下の式(9-1)～(9-9)で表される。

$$\begin{aligned} & W_{11}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ & = \Delta_1 B_{111}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{121}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{1j1}(0x, 0y) \end{aligned} \quad (9-1)$$

$$\begin{aligned} & W_{21}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ & = \Delta_1 B_{211}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{221}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{2j1}(0x, 0y) \end{aligned} \quad (9-2)$$

$$\begin{aligned} & W_{31}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ & = \Delta_1 B_{311}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{321}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{3j1}(0x, 0y) \end{aligned} \quad (9-3)$$

$$\begin{aligned} & W_{41}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ & = \Delta_1 B_{411}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{421}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{4j1}(0x, 0y) \end{aligned} \quad (9-4)$$

$$\begin{aligned} & W_{51}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ & = \Delta_1 B_{511}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{521}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{5j1}(0x, 0y) \end{aligned} \quad (9-5)$$

$$W_{61}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ = \Delta_1 B_{611}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{621}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{6j1}(0x, 0y) \quad (9-6)$$

$$W_{71}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ = \Delta_1 B_{711}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{721}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{7j1}(0x, 0y) \quad (9-7)$$

$$W_{81}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ = \Delta_1 B_{811}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{821}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{8j1}(0x, 0y) \quad (9-8)$$

$$W_{91}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ = \Delta_1 B_{911}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{921}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{9j1}(0x, 0y) \quad (9-9)$$

[0102] ここで、式(9-1)～(9-9)の記載を簡略にすると、以下の式(10-1)～(10-9)で表される。

$$W_{11} = \Delta_1 B_{111} + \Delta_2 B_{121} + \dots + \Delta_j B_{1j1} \quad (10-1)$$

$$W_{21} = \Delta_1 B_{211} + \Delta_2 B_{221} + \dots + \Delta_j B_{2j1} \quad (10-2)$$

$$W_{31} = \Delta_1 B_{311} + \Delta_2 B_{321} + \dots + \Delta_j B_{3j1} \quad (10-3)$$

$$W_{41} = \Delta_1 B_{411} + \Delta_2 B_{421} + \dots + \Delta_j B_{4j1} \quad (10-4)$$

$$W_{51} = \Delta_1 B_{511} + \Delta_2 B_{521} + \dots + \Delta_j B_{5j1} \quad (10-5)$$

$$W_{61} = \Delta_1 B_{611} + \Delta_2 B_{621} + \dots + \Delta_j B_{6j1} \quad (10-6)$$

$$W_{71} = \Delta_1 B_{711} + \Delta_2 B_{721} + \dots + \Delta_j B_{7j1} \quad (10-7)$$

$$W_{81} = \Delta_1 B_{811} + \Delta_2 B_{821} + \dots + \Delta_j B_{8j1} \quad (10-8)$$

$$W_{91} = \Delta_1 B_{911} + \Delta_2 B_{921} + \dots + \Delta_j B_{9j1} \quad (10-9)$$

[0103] ステップS400は解析工程である。解析工程では、第1の収差成分、偏心収差感度及び偏心量についての連立1次方程式を解析する。

[0104] 第1の収差成分を抽出すると、偏心量と収差量との関係を線形に扱える。また偏心量と収差量との関係が線形に扱えると、被検光学系の偏心量が製造誤差として大きい場合でも、後述の連立1次方程式を解くことで、高い精度で偏心量を求めることができる。

[0105] 式(10-1)～(10-9)からわかるように、第1の収差成分を抽出すると、連立1次方程式を作成することができる。ここで、式(10-1)～(10-9)の左辺は収差量である。一方、 $\Delta_1 \sim \Delta_j$ の単位は長さまたは角

度である。したがって、式(10-1)～(10-9)が成立するためには、例えば、 B_{111} の単位は「収差量／長さ」または「収差量／角度」になる。

[0106] 「収差量／長さ」は、被検光学系のうちの単面を単位偏心量だけシフトしたときの収差の発生量を表している。また、「収差量／角度」は、被検光学系のうちの単面を単位偏心量だけチルトしたときの収差の発生量を表している。よって、上述のように、 $B_{111} \sim B_{9j1}$ は偏心収差感度を表していることになる。

[0107] この偏心収差感度は、被検光学系を設計した時のデータに基づいて算出できる。そうすると、式(10-1)～(10-9)において、左辺の第1の収差成分、すなわち収差量と、右辺の偏心収差感度とが既知になる。よって、式(10-1)～(10-9)の連立1次方程式を解くことで、偏心量 $\Delta_1 \sim \Delta_j$ を求めることができる。

[0108] なお、第1の収差成分は、偏心量の1乗に比例する量である。よって、偏心収差感度も、偏心量の1乗に比例する収差感度でなければならない。このように、偏心量の1乗に比例する偏心収差感度は、偏心量の1乗に比例する収差成分の単位偏心量あたりの偏心収差の変化である。

[0109] ここで、波面データの取得は、被検光学系から出射する光束を用いて行われる。そのため、被検光学系は、1つのレンズで構成されていても、複数のレンズで構成されていても良い。また、計測できる偏心自由度はシフトとチルトであるため、レンズ面が球面であっても非球面であっても良い。また、レンズ面の偏心を1つ1つ計測しているわけではないので、短時間で計測が行える。

[0110] このように、本実施形態の偏心量計測方法によれば、レンズ面の形状や光学系を構成するレンズの数に関係なく、短い時間で偏心量を計測できる。

[0111] 本実施形態の計測方法について、好ましい実施形態を説明する。

[0112] 本実施形態の計測方法では、取得工程では、2つの照射位置から光束が照射され、2つの照射位置は計測軸に対して対称になっており、第1の抽出工程は、一方の照射位置における波面データと他方の照射位置における波面デ

ータの各々から、所定の収差成分を抽出することが好ましい。

[0113] 本実施形態の計測方法のフローチャートを図5に示す。本実施形態の計測方法では、ステップS100は、ステップS110、ステップS120、ステップS130及びステップS140を有する。また、ステップS200は、ステップS210とステップS220を有する。

[0114] ステップS100は取得工程である。取得工程は、ステップS110、ステップS120、ステップS130及びステップS140を有する。

[0115] 本実施形態の計測方法における取得工程では、2つの照射位置から光束を照射する。ここで、2つの照射位置は異なる。図6は光束を被検光学系に照射している様子を示す図であって、(a)は照射位置Pからの照射を示し、(b)は照射位置P'からの照射を示している。

[0116] ステップS110では、投光系1の照射位置Pに光源を配置する。ここで、照射位置Pの物体高座標は $(0x, 0y, 0)$ である。光源から光束を被検光学系2に照射する。光源から球面波4が出射する。球面波4は被検光学系2に入射する。被検光学系2は0z軸に対して偏心しているため、被検光学系2から非平面波7が出射する。なお、0z軸は計測軸である。

[0117] ステップS120では、波面データWFDを取得する。被検光学系2から出射した非平面波7は、受光系3に入射する。そこで、受光系3で波面データWFDが取得される。

[0118] ステップS130では、投光系1の照射位置P'に光源を配置する。ここで、照射位置P'の物体高座標は $(-0x, -0y, 0)$ である。光源から光束を被検光学系2に照射する。被検光学系2から非平面波7'が出射する。

[0119] ステップS140では、波面データWFD'を取得する。被検光学系2から出射した非平面波7'は受光系3に入射する。そこで、受光系3で波面データWFD'が取得される。

[0120] ここで、照射位置Pと照射位置P'は、計測軸に対しては対称になっている。しかしながら、被検光学系の各レンズ面は計測軸に対して偏心している。そのため、照射位置Pから照射されるビームと照射位置P'から照射され

るビームとで、被検光学系を通る光路が非対称な光路になる。この場合、非平面波 7 と非平面波 7' とで、波面の形状が対称な形状とならない。そのため、波面データ WFD と波面データ WFD' は対称なデータとならない。

[0121] ステップ S200 は第 1 の抽出工程である。ステップ S200 は、ステップ S210 とステップ S220 で構成されている。上述のように、波面データ WFD と波面データ WFD' は対称なデータとならない。

[0122] そこで、ステップ S210 では、照射位置 P における波面データ WFD から、所定の収差成分が抽出される。また、ステップ S220 では、照射位置 P' における波面データ WFD' から、所定の収差成分が抽出される。

[0123] ステップ S300 では、第 1 の収差成分が抽出される。抽出した第 1 の収差成分を用いてステップ S400 を実行する。ステップ S400 において連立 1 次方程式を解くことで、偏心量 $\Delta_1 \sim \Delta_j$ を求めることができる。

[0124] このように、本実施形態の偏心量計測方法によれば、レンズ面の形状や光学系を構成するレンズの数に関係なく、短い時間で偏心量を計測できる。

[0125] また、本実施形態の計測方法では、所定の収差成分は第 2 の収差成分を含んでおり、第 2 の収差成分は、所定の収差成分のうちの偏心量の 2 乗に比例する収差成分であり、物体高座標は照射位置を表す座標であり、所定の関数は第 2 の収差成分を表す関数であって、物体高座標を変数として含んでいる関数であり、第 2 の抽出工程は、第 1 の演算工程と第 2 の演算工程とを有し、第 1 の演算工程では、所定の関数が奇関数の場合に、一方の照射位置における所定の収差成分と、他方の照射位置における所定の収差成分との和をとり、第 2 の演算工程では、所定の関数が偶関数の場合に、一方の照射位置における所定の収差成分と、他方の照射位置における所定の収差成分との差をとることが好ましい。

[0126] 本実施形態の計測方法のフローチャートを図 7 に示す。本実施形態の計測方法では、ステップ S100 は、ステップ S110、ステップ S120、ステップ S130 及びステップ S140 を有する。また、ステップ S200 は、ステップ S210 とステップ S220 を有する。また、ステップ S300

は、ステップS 3 1 0、ステップS 3 2 0及びステップS 3 3 0を有する。
 なお、ステップS 1 0 0とステップS 2 0 0については、詳細な説明を省略する。

[0127] 本実施形態の計測方法でも、計測軸に対して対称な2つの照射位置から、被検光学系に光束を照射する。これにより、波面データW F Dと波面データW F D' とを取得することができる（ステップS 1 0 0）。

[0128] そして、波面データW F Dと波面データW F D' の各々から、所定の収差成分が抽出される（ステップS 2 0 0）。

[0129] ここで、一方の照射位置Pの物体高座標を(0x, 0y)とすると、他方の照射位置P'の物体高座標は(-0x, -0y)になる。なお、光束の照射は0x0y面内(0z=0)で行われる。そのため、物体高座標は0xと0yだけを用いる。

[0130] 波面データW F Dを解析することで、波面収差Wが得られる。この場合、照射位置Pの物体高座標は(0x, 0y)であるので、波面収差Wから抽出した所定の収差成分 $W_1 \sim W_9$ は、上述の式(8-1)～(8-9)で表される。

[0131] また、波面データW F D' を解析することで、波面収差Wの取得が行われる。この場合、照射位置P'の物体高座標は(-0x, -0y)であるので、波面収差Wから抽出した所定の収差成分 $W_1 \sim W_9$ は、以下の式(8-1')～(8-9')で表される。

$$\begin{aligned}
 & [0132] \quad W_1(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = [\{ \Delta_1 B_{111}(-0x, -0y) + \Delta_2 B_{121}(-0x, -0y) + \dots + \Delta_j B_{1j1}(-0x, -0y) \} \\
 & \quad + \{ \Delta_1^2 B_{112}(-0x, -0y) + \Delta_2^2 B_{122}(-0x, -0y) + \dots + \Delta_j^2 B_{1j2}(-0x, -0y) \}] \quad (8-1') \\
 & \quad W_2(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = [\{ \Delta_1 B_{211}(-0x, -0y) + \Delta_2 B_{221}(-0x, -0y) + \dots + \Delta_j B_{2j1}(-0x, -0y) \} \\
 & \quad + \{ \Delta_1^2 B_{212}(-0x, -0y) + \Delta_2^2 B_{222}(-0x, -0y) + \dots + \Delta_j^2 B_{2j2}(-0x, -0y) \}] \quad (8-2') \\
 & \quad W_3(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = [\{ \Delta_1 B_{311}(-0x, -0y) + \Delta_2 B_{321}(-0x, -0y) + \dots + \Delta_j B_{3j1}(-0x, -0y) \}
 \end{aligned}$$

$$+ \{ \Delta_1^2 B_{312}(-0x, -0y) + \Delta_2^2 B_{322}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{3j2}(-0x, -0y) \}] \quad (8-3')$$

$$\begin{aligned} & W_4(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ &= [\{ \Delta_1 B_{411}(-0x, -0y) + \Delta_2 B_{421}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j B_{4j1}(-0x, -0y) \} \\ & \quad + \{ \Delta_1^2 B_{412}(-0x, -0y) + \Delta_2^2 B_{422}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{4j2}(-0x, -0y) \}] \quad (8-4') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & W_5(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ &= [\{ \Delta_1 B_{511}(-0x, -0y) + \Delta_2 B_{521}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j B_{5j1}(-0x, -0y) \} \\ & \quad + \{ \Delta_1^2 B_{512}(-0x, -0y) + \Delta_2^2 B_{522}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{5j2}(-0x, -0y) \}] \quad (8-5') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & W_6(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ &= [\{ \Delta_1 B_{611}(-0x, -0y) + \Delta_2 B_{621}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j B_{6j1}(-0x, -0y) \} \\ & \quad + \{ \Delta_1^2 B_{612}(-0x, -0y) + \Delta_2^2 B_{622}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{6j2}(-0x, -0y) \}] \quad (8-6') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & W_7(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ &= [\{ \Delta_1 B_{711}(-0x, -0y) + \Delta_2 B_{721}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j B_{7j1}(-0x, -0y) \} \\ & \quad + \{ \Delta_1^2 B_{712}(-0x, -0y) + \Delta_2^2 B_{722}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{7j2}(-0x, -0y) \}] \quad (8-7') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & W_8(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ &= [\{ \Delta_1 B_{811}(-0x, -0y) + \Delta_2 B_{821}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j B_{8j1}(-0x, -0y) \} \\ & \quad + \{ \Delta_1^2 B_{812}(-0x, -0y) + \Delta_2^2 B_{822}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{8j2}(-0x, -0y) \}] \quad (8-8') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & W_9(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ &= [\{ \Delta_1 B_{911}(-0x, -0y) + \Delta_2 B_{921}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j B_{9j1}(-0x, -0y) \} \\ & \quad + \{ \Delta_1^2 B_{912}(-0x, -0y) + \Delta_2^2 B_{922}(-0x, -0y) + \cdots + \Delta_j^2 B_{9j2}(-0x, -0y) \}] \quad (8-9') \end{aligned}$$

[0133] このように、本実施形態の計測方法では、所定の収差成分が2つ得られる。そこで、2つの所定の収差成分を用いて、第1の収差成分を抽出する。こ

の抽出はステップS300で行われる。ステップS300は第2の抽出工程である。

[0134] 第2の抽出工程、すなわち第1の収差成分を抽出する工程について説明する。ここでは、以下の所定の収差成分を用いて説明する。

$$W_2(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \text{ と } W_2(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)。$$

$$W_4(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \text{ と } W_4(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)。$$

[0135] $W_2(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)$ と $W_2(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)$ は、それぞれ式(8-2)と式(8-2')で表される。

$$\begin{aligned} & [0136] \quad W_2(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ & = [\{\Delta_1 B_{211}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{221}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{2j1}(0x, 0y)\} \\ & \quad + \{\Delta_1^2 B_{212}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{222}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j^2 B_{2j2}(0x, 0y)\}] \quad (8-2) \\ & \quad W_2(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ & = [\{\Delta_1 B_{211}(-0x, -0y) + \Delta_2 B_{221}(-0x, -0y) + \dots + \Delta_j B_{2j1}(-0x, -0y)\} \\ & \quad + \{\Delta_1^2 B_{212}(-0x, -0y) + \Delta_2^2 B_{222}(-0x, -0y) + \dots + \Delta_j^2 B_{2j2}(-0x, -0y)\}] \quad (8-2') \end{aligned}$$

[0137] 上述のように、 W_2 は、偏心量の1乗に比例する収差成分と偏心量の2乗に比例する収差成分とからなる。ここで、偏心量の1乗に比例する収差成分は第1の収差成分で、偏心量の2乗に比例する収差成分は第2の収差成分である。そこで、第1の収差成分を W_{21} 、第2の収差成分を W_{22} とする。

[0138] 式(8-2)と式(8-2')について、第1の収差成分 W_{21} における各項を表5に示す。なお、簡単のために、 W_{21} は物体高座標のみで表す。

[表5]

(8-2)	$W_{21}(0x, 0y)$	$\Delta_1 B_{211}(0x, 0y)$	$\Delta_2 B_{221}(0x, 0y)$	$\dots$	$\Delta_j B_{2j1}(0x, 0y)$
(8-2')	$W_{21}(-0x, -0y)$	$\Delta_1 B_{211}(-0x, -0y)$	$\Delta_2 B_{221}(-0x, -0y)$	$\dots$	$\Delta_j B_{2j1}(-0x, -0y)$

[0139] また、式(8-2)と式(8-2')について、第2の収差成分 W_{22} における各項を表6に示す。

[表6]

$(8-2)$	$W_{22}(0x, 0y)$	$\Delta_1^2 B_{212}(0x, 0y)$	$\Delta_2^2 B_{222}(0x, 0y)$	$\cdots$	$\Delta_j^2 B_{2j2}(0x, 0y)$
$(8-2')$	$W_{22}(-0x, -0y)$	$\Delta_1^2 B_{212}(-0x, -0y)$	$\Delta_2^2 B_{222}(-0x, -0y)$	$\cdots$	$\Delta_j^2 B_{2j2}(-0x, -0y)$

[0140] 表5における $B_{2j1}(0x, 0y)$ と $B_{2j1}(-0x, -0y)$ は、ゼルニケ項の第2項が乗じられた項の偏心収差感度であって、第j面における偏心量の1乗に比例する偏心収差感度を表している。

[0141] この場合、上述のように、ゼルニケ項の第2項等が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ ($z=2, 3, 7, 8 \cdots$) は、式(3)で表される。式(3)を、再度、以下に示す。

$$B_{zj1}(0x, 0y) = C_{zj100} + C_{zj120} 0x^2 + C_{zj111} 0x 0y + C_{zj102} 0y^2 + \cdots \quad (3)$$

[0142] よって、 $B_{2j1}(0x, 0y)$ と $B_{2j1}(-0x, -0y)$ は、式(3)から以下のように式(3')、(3'')で表される。

$$B_{2j1}(0x, 0y) = C_{2j100} + C_{2j120} 0x^2 + C_{2j111} 0x 0y + C_{2j102} 0y^2 + \cdots \quad (3')$$

$$B_{2j1}(-0x, -0y) = C_{2j100} + C_{2j120} 0x^2 + C_{2j111} 0x 0y + C_{2j102} 0y^2 + \cdots \quad (3'')$$

[0143] その結果、 $B_{2j1}(-0x, -0y) = B_{2j1}(0x, 0y)$ となる。このように、偏心量の1乗に比例する偏心収差感度では、ゼルニケ項の第2項が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{2j1}(0x, 0y)$ は、物体高座標に対して偶関数になっている。

[0144] 一方、表6における $B_{2j2}(0x, 0y)$ と $B_{2j2}(-0x, -0y)$ は、ゼルニケ項の第2項が乗じられた項の偏心収差感度であって、第j面における偏心量の2乗に比例する偏心収差感度を表している。

[0145] この場合、上述のように、ゼルニケ項の第2項等が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj2}(0x, 0y)$ ($z=2, 3, 7, 8 \cdots$) は、式(5)で表される。式(5)を、再度、以下に示す。

$$B_{zj2}(0x, 0y) = C_{zj210} 0x + C_{zj201} 0y + C_{zj230} 0x^3 + C_{zj221} 0x^2 0y \\ + C_{zj212} 0x 0y^2 + C_{zj203} 0y^3 + \cdots \quad (5)$$

[0146] よって、 $B_{2j2}(0x, 0y)$ と $B_{2j2}(-0x, -0y)$ は、式(5)から以下のように式(5')、(5'')で表される。

$$B_{2j2}(0x, 0y) = C_{2j210}0x + C_{2j201}0y + C_{2j230}0x^3 + C_{2j221}0x^20y \\ + C_{2j212}0x0y^2 + C_{2j203}0y^3 + \dots$$

(5')

$$B_{2j2}(-0x, -0y) = -C_{2j210}0x - C_{2j201}0y - C_{2j230}0x^3 - C_{2j221}0x^20y \\ - C_{2j212}0x0y^2 - C_{2j203}0y^3 - \dots \\ = -\{C_{2j210}0x + C_{2j201}0y + C_{2j230}0x^3 + C_{2j221}0x^20y \\ + C_{2j212}0x0y^2 + C_{2j203}0y^3 + \dots\}$$

(5'')

[0147] その結果、 $B_{2j2}(-0x, -0y) = -B_{2j2}(0x, 0y)$ となる。このように、偏心量の2乗に比例する偏心収差感度では、ゼルニケ項の第2項が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{2j2}(0x, 0y)$ は、物体高座標に対して奇関数になっている。

[0148] $B_{2j1}(-0x, -0y) = B_{2j1}(0x, 0y)$ を反映したときの第1の収差成分 W_{21} を表7に示す。表7から分かるように、2つの照射位置が対称な場合、すなわち、物体高座標が $(0x, 0y)$ と $(-0x, -0y)$ の場合、 $W_{21}(-0x, -0y) = W_{21}(0x, 0y)$ となる。このように、第1の収差成分 W_{21} は物体高座標に対して偶関数になっている。

[表7]

(8-2)	$W_{21}(0x, 0y)$	$\Delta_1 B_{211}(0x, 0y)$	$\Delta_2 B_{221}(0x, 0y)$	...	$\Delta_j B_{2j1}(0x, 0y)$
(8-2')	$W_{21}(-0x, -0y)$	$\Delta_1 B_{211}(0x, 0y)$	$\Delta_2 B_{221}(0x, 0y)$	...	$\Delta_j B_{2j1}(0x, 0y)$

[0149] また、 $B_{2j2}(-0x, -0y) = -B_{2j2}(0x, 0y)$ を反映したときの第2の収差成分 W_{22} を表8に示す。表8から分かるように、2つの照射位置が対称な場合、 $W_{22}(-0x, -0y) = -W_{22}(0x, 0y)$ となる。このように、第2の収差成分 W_{22} は物体高座標に対して奇関数になっている。

[表8]

(8-2)	$W_{22}(0x, 0y)$	$\Delta_1^2 B_{212}(0x, 0y)$	$\Delta_2^2 B_{222}(0x, 0y)$	...	$\Delta_j^2 B_{2j2}(0x, 0y)$
(8-2')	$W_{22}(-0x, -0y)$	$-\Delta_1^2 B_{212}(0x, 0y)$	$-\Delta_2^2 B_{222}(0x, 0y)$	...	$-\Delta_j^2 B_{2j2}(0x, 0y)$

[0150] 一方、 $W_4(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)$ と $W_4(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)$ は、それぞれ、式(8-4)と式(8-4')で表される。

$$\begin{aligned}
& W_4(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
& = [\{\Delta_1 B_{411}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{421}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{4j1}(0x, 0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{412}(0x, 0y) + \Delta_2^2 B_{422}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j^2 B_{4j2}(0x, 0y)\}] \quad (8-4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_4(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
& = [\{\Delta_1 B_{411}(-0x, -0y) + \Delta_2 B_{421}(-0x, -0y) + \dots + \Delta_j B_{4j1}(-0x, -0y)\} \\
& \quad + \{\Delta_1^2 B_{412}(-0x, -0y) + \Delta_2^2 B_{422}(-0x, -0y) + \dots + \Delta_j^2 B_{4j2}(-0x, -0y)\}] \quad (8-4')
\end{aligned}$$

[0151] 上述のように、 W_4 は、偏心量の1乗に比例する収差成分と偏心量の2乗に比例する収差成分とからなる。ここで、偏心量の1乗に比例する収差成分は第1の収差成分で、偏心量の2乗に比例する収差成分は第2の収差成分である。そこで、第1の収差成分を W_{41} 、第2の収差成分を W_{42} とする。

[0152] 式(8-4)と式(8-4')について、第1の収差成分 W_{41} における各項を表9に示す。なお、簡単のために、 W_{41} は物体高座標のみで表す。

[表9]

(8-4)	$W_{41}(0x, 0y)$	$\Delta_1 B_{411}(0x, 0y)$	$\Delta_2 B_{421}(0x, 0y)$	...	$\Delta_j B_{4j1}(0x, 0y)$
(8-4')	$W_{41}(-0x, -0y)$	$\Delta_1 B_{411}(-0x, -0y)$	$\Delta_2 B_{421}(-0x, -0y)$	...	$\Delta_j B_{4j1}(-0x, -0y)$

[0153] また、式(8-4)と式(8-4')について、第2の収差成分 W_{42} における各項を表10に示す。

[表10]

(8-4)	$W_{42}(0x, 0y)$	$\Delta_1^2 B_{412}(0x, 0y)$	$\Delta_2^2 B_{422}(0x, 0y)$	...	$\Delta_j^2 B_{4j2}(0x, 0y)$
(8-4')	$W_{42}(-0x, -0y)$	$\Delta_1^2 B_{412}(-0x, -0y)$	$\Delta_2^2 B_{422}(-0x, -0y)$	...	$\Delta_j^2 B_{4j2}(-0x, -0y)$

[0154] 表10における $B_{4j1}(0x, 0y)$ と $B_{4j1}(-0x, -0y)$ は、ゼルニケ項の第4項が乗じられた項の偏心収差感度であって、第j面における偏心量の1乗に比例する偏心収差感度を表している。

[0155] この場合、上述のように、ゼルニケ項の第4項等が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ ($z=1, 4, 5, 6, 9, \dots$)は、式(4)で表される。式(4)を、再度、以下に示す。

$$B_{zj1}(0x, 0y) = C_{zj110}0x + C_{zj101}0y + C_{zj130}0x^3 + C_{zj121}0x^20y \\ + C_{zj112}0x0y^2 + C_{zj103}0y^3 + \dots$$

(4)

[0156] よって、 $B_{4j1}(0x, 0y)$ と $B_{4j1}(-0x, -0y)$ は、式(4)から以下のように式(4')、(4'')で表される。

$$B_{4j1}(0x, 0y) = C_{4j110}0x + C_{4j101}0y + C_{4j130}0x^3 + C_{4j121}0x^20y \\ + C_{4j112}0x0y^2 + C_{4j103}0y^3 + \dots$$

(4')

$$B_{4j1}(-0x, -0y) = -C_{4j110}0x - C_{4j101}0y - C_{4j130}0x^3 - C_{4j121}0x^20y \\ - C_{4j112}0x0y^2 - C_{4j103}0y^3 - \dots \\ = -\{C_{4j110}0x + C_{4j101}0y + C_{4j130}0x^3 + C_{4j121}0x^20y \\ + C_{4j112}0x0y^2 + C_{4j103}0y^3 + \dots\}$$

(4'')

[0157] その結果、 $B_{4j1}(-0x, -0y) = -B_{4j1}(0x, 0y)$ となる。このように、偏心量の1乗に比例する偏心収差感度では、ゼルニケ項の第4項が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{4j1}(0x, 0y)$ は、物体高座標に対して奇関数となっている。

[0158] 一方、表11における $B_{4j2}(0x, 0y)$ と $B_{4j2}(-0x, -0y)$ は、ゼルニケ項の第4項が乗じられた項の偏心収差感度であって、第j面における偏心量の2乗に比例する偏心収差感度を表している。

[0159] この場合、上述のように、ゼルニケ項の第4項等が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj2}(0x, 0y)$ ($z=1, 4, 5, 6, 9, \dots$)は、式(6)で表される。式(6)を、再度、以下に示す。

$$B_{zj2}(0x, 0y) = C_{zj200} + C_{zj220}0x^2 + C_{zj211}0x0y + C_{zj202}0y^2 + \dots \quad (6)$$

[0160] よって、 $B_{4j2}(0x, 0y)$ と $B_{4j2}(-0x, -0y)$ は、式(6)から以下のように式(6')、(6'')で表される。

$$B_{4j2}(0x, 0y) = C_{4j200} + C_{4j220}0x^2 + C_{4j211}0x0y + C_{4j202}0y^2 + \dots \quad (6')$$

$$B_{4j2}(-0x, -0y) = C_{4j200} + C_{4j220}0x^2 + C_{4j211}0x0y + C_{4j202}0y^2 + \dots \quad (6'')$$

[0161] その結果、 $B_{4j2}(-0x, -0y) = B_{4j2}(0x, 0y)$ となる。このように、偏心量の2乗に

比例する偏心収差感度では、ゼルニケ項の第4項が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{4j2}(0x, 0y)$ は、物体高座標に対して偶関数となっている。

[0162] $B_{4j1}(-0x, -0y) = -B_{4j1}(0x, 0y)$ を反映したときの第1の収差成分 W_{41} を表11に示す。表11から分かるように、2つの照射位置が対称な場合、 $W_{41}(-0x, -0y) = -W_{41}(0x, 0y)$ となる。このように、第1の収差成分 W_{41} は物体高座標に対して奇関数となっている。

[表11]

(8-4)	$W_{41}(0x, 0y)$	$\Delta_1 B_{411}(0x, 0y)$	$\Delta_2 B_{421}(0x, 0y)$	...	$\Delta_j B_{4j1}(0x, 0y)$
(8-4')	$W_{41}(-0x, -0y)$	$-\Delta_1 B_{411}(0x, 0y)$	$-\Delta_2 B_{421}(0x, 0y)$	...	$-\Delta_j B_{4j1}(0x, 0y)$

[0163] また、 $B_{4j2}(-0x, -0y) = B_{4j2}(0x, 0y)$ を反映したときの第2の収差成分 w_{42} を表12に示す。表12から分かるように、2つの照射位置が対称な場合、 $W_{42}(-0x, -0y) = W_{42}(0x, 0y)$ となる。このように、第2の収差成分 W_{42} は物体高座標に対して偶関数となっている。

[表12]

(8-4)	$W_{42}(0x, 0y)$	$\Delta_1^2 B_{412}(0x, 0y)$	$\Delta_2^2 B_{422}(0x, 0y)$	...	$\Delta_j^2 B_{4j2}(0x, 0y)$
(8-4')	$W_{42}(-0x, -0y)$	$\Delta_1^2 B_{412}(0x, 0y)$	$\Delta_2^2 B_{422}(0x, 0y)$	...	$\Delta_j^2 B_{4j2}(0x, 0y)$

[0164] 以上のように、所定の収差成分 W_2 では、第1の収差成分 W_{21} を表す関数は偶関数、第1の収差成分 W_{22} を表す関数は奇関数になる。一方、所定の収差成分 W_4 では、第1の収差成分 W_{41} を表す関数は偶関数、第1の収差成分 W_{42} を表す関数は奇関数になる。

[0165] ここで、所定の関数を、第2の収差成分を表す関数であって、物体高座標を変数とする関数とすると、所定の関数は、偶関数になる場合と奇関数になる場合とに分かれる。

[0166] そこで、ステップS310を実行して、所定の関数が奇関数の場合と、所定の関数が偶関数の場合とで、異なる演算を行う。

[0167] 所定の収差成分 W_2 では、第2の収差成分 W_{22} を表す関数は奇関数なので、所定の関数は奇関数になる。この場合、ステップS310における判断結果はYESになる。その結果、ステップS320が実行される。ステップS32

0は第1の演算工程である。

[0168] 第1の演算工程では、一方の照射位置における所定の収差成分と、他方の照射位置における所定の収差成分との和をとる。すなわち、 $W_2(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)$ と $W_2(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)$ の和をとる。

[0169] 両者の和をとった結果を式(11)に示す。

$$\begin{aligned} & W_2(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) + W_2(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ &= 2 \cdot \{ \Delta_1 B_{211}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{221}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{2j1}(0x, 0y) \} \quad (11) \end{aligned}$$

[0170] ここで、第1の収差成分 W_{21} は式(9-2)で表される。式(9-2)を、再度、以下に示す。

$$\begin{aligned} & W_{21}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ &= \Delta_1 B_{211}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{221}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{2j1}(0x, 0y) \quad (9-2) \end{aligned}$$

[0171] よって、式(11)と式(9-2)から式(11')が得られる。

$$\begin{aligned} & W_2(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) + W_2(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ &= 2 \cdot \{ \Delta_1 B_{211}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{221}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{2j1}(0x, 0y) \} \\ &= 2 \cdot W_{21}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \quad (11') \end{aligned}$$

[0172] 式(11')に示すように、両者の和をとることで、第1の収差成分 W_{21} は残り、第2の収差成分 W_{22} が消滅する。よって、所定の収差成分 W_2 から第1の収差成分 W_{21} を抽出することができる。

[0173] 一方、所定の収差成分 W_4 では、第2の収差成分 W_{42} を表す関数は偶関数なので、所定の関数は偶関数になる。この場合、ステップS310における判断結果はNOになる。その結果、ステップS330が実行される。ステップS330は第2の演算工程である。

[0174] 第2の演算工程では、一方の照射位置における所定の収差成分と、他方の照射位置における所定の収差成分との差をとる。すなわち、 $W_4(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)$ と $W_4(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)$ の差をとる。両者の差をとった結果を式(12)に示す。

$$\begin{aligned} & W_4(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) - W_4(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ &= 2 \cdot \{ \Delta_1 B_{411}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{421}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{4j1}(0x, 0y) \} \quad (12) \end{aligned}$$

[0175] ここで、第1の収差成分 W_{41} は式(9-4)で表される。式(9-4)を、再度、以下に示す。

$$W_{41}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ = \Delta_1 B_{411}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{421}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{4j1}(0x, 0y) \quad (9-4)$$

[0176] よって、式(12)と式(9-4)から式(12')が得られる。

$$W_4(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) - W_4(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ = 2 \cdot \{ \Delta_1 B_{411}(0x, 0y) + \Delta_2 B_{421}(0x, 0y) + \dots + \Delta_j B_{4j1}(0x, 0y) \} \\ = 2 \cdot W_{41}(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \quad (12')$$

[0177] 式(12')に示すように、両者の差をとることで、第1の収差成分 W_{41} は残り、第2の収差成分 W_{42} が消滅する。よって、所定の収差成分 W_4 から第1の収差成分 W_{41} を抽出することができる。

[0178] 第1の収差成分 W_{z1} と第2の収差成分 W_{z2} について、物体高座標に対して偶関数になる場合と物体高座標に対して奇関数になる場合をまとめた結果を表13に示す。表13では、ここで、第1の収差成分を W_{z1} で表し、第2の収差成分を W_{z2} で表している。

[表13]

		$z=2, 3, 7, 8 \dots$	$z=1, 4, 5, 6, 9 \dots$
所定の収差成分	第1の収差成分 (偏心量の1乗に比例)	物体高座標に対して偶関数 $W_{z1}(-0x, -0y) = W_{z1}(0x, 0y)$	物体高座標に対して奇関数 $W_{z1}(-0x, -0y) = -W_{z1}(0x, 0y)$
	第2の収差成分 (偏心量の2乗に比例)	物体高座標に対して奇関数 $W_{z2}(-0x, -0y) = -W_{z2}(0x, 0y)$	物体高座標に対して偶関数 $W_{z2}(-0x, -0y) = W_{z2}(0x, 0y)$

[0179] 表13から分かるように、以下の所定の収差成分については、第1の演算工程を実行することで、所定の収差成分から第1の収差成分を抽出することができる。

$$W_3(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \text{ と } W_3(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)。$$

$$W_7(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \text{ と } W_7(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)。$$

$$W_8(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \text{ と } W_8(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)。$$

このように、 W_z のうち、瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた収差成分、すなわち、ゼルニケ項の第2項等の関数が乗じられた収差成分 W_z については、以下のようなになる($z=2, 3, 7, 8 \dots$)。

$$W_z(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) + W_z(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ = 2 \Delta_1 B_{z11}(0x, 0y) + \dots + 2 \Delta_j B_{zj1}(0x, 0y)$$

[0180] また、以下の所定の収差成分については、第2の演算工程を実行することで、所定の収差成分から第1の収差成分を抽出することができる。

$$W_5(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \text{と} W_5(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)。$$

$$W_6(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \text{と} W_6(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)。$$

$$W_9(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \text{と} W_9(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)。$$

このように、 W_z のうち、瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた収差成分、すなわち、ゼルニケ項の第4項等の関数が乗じられた収差成分 W_z については、以下のようなになる($z=1, 4, 5, 6, 9, \dots$)。

$$W_z(0x, 0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) - W_z(-0x, -0y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ = 2 \Delta_1 B_{z11}(0x, 0y) + \dots + 2 \Delta_j B_{zj1}(0x, 0y)$$

[0181] このように、所定の関数、すなわち、第2の収差成分を表す関数が奇関数の場合は、第1の演算工程を実施する。第1の演算工程では、一方の照射位置における所定の収差成分と、他方の照射位置における所定の収差成分との和をとる。その結果、所定の収差成分から第1の収差成分を抽出することができる。

[0182] また、所定の関数が偶関数の場合は、第2の演算工程を実施する。第2の演算工程では、一方の照射位置における所定の収差成分と、他方の照射位置における所定の収差成分との差をとる。その結果、所定の収差成分から第1の収差成分を抽出することができる。

[0183] 以上説明したように、ステップS300を実行することで、第1の収差成分が抽出される。抽出した第1の収差成分を用いてステップS400を実行する。ステップS400で連立1次方程式を解くことで、偏心量 $\Delta_1 \sim \Delta_j$ を求めることができる。

[0184] このように、本実施形態の偏心量計測方法によれば、レンズ面の形状や光学系を構成するレンズの数に関係なく、短い時間で偏心量を計測できる。

[0185] また、本実施形態の計測方法では、設計収差成分が存在する場合であって

も、所定の収差成分から第 1 の収差成分を抽出することができる。

[0186] 以上の説明では、波面収差Wは被検光学系に偏心がないときの波面に対する偏差としてきた。ここでは、波面収差Wを平面波や球面波といった理想的な波面に対する偏差として説明する。

[0187] 設計収差成分について説明する。偏心計測における被検光学系は、組み上がりレンズ、群単体、レンズ単体、などが対象となる。被検光学系は、設計時のデータに基づいて製造される。光学系の設計では、複数枚のレンズを組み合わせて収差の発生を極力抑えるように設計が行われるが、全ての収差について、発生量をゼロにすることは非常に困難である。また、そのような組み上がりレンズのうちの一部のレンズ、例えば各群単体、各レンズ単体については設計上収差が発生する。

[0188] よって、設計の段階で被検光学系は収差を持つ。そこで、この収差を設計収差とすると、設計収差も波面収差に含まれる。設計収差成分を $M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ とすると、波面収差Wは、以下の式（1-3）で表される。

$$\begin{aligned}
 [0189] \quad W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 &= M(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_1 B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_1^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_2 B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_2^2 B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \dots \\
 &+ \Delta_j B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_j^2 B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-3)
 \end{aligned}$$

[0190] この設計収差成分 $M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は、所定の収差成分である。設計収差成分 $M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ も、偏心収差感度と同様に、収差論に基づいて多項式で展開できる。例えば、ゼルニケ多項式を用いると、設計収差成分 $M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は、以下の式（1-3）で示すように多項式で展開できる。

$$[0191] \quad M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$$

$$\begin{aligned}
&= 1 \cdot M_1(0x, 0y) \\
&+ \rho x \cdot M_2(0x, 0y) \\
&+ \rho y \cdot M_3(0x, 0y) \\
&+ \{2(\rho x^2 + \rho y^2) - 1\} \cdot M_4(0x, 0y) \\
&+ \{\rho x^2 - \rho y^2\} \cdot M_5(0x, 0y) \\
&+ 2\rho x \rho y \cdot M_6(0x, 0y) \\
&+ \{3(\rho x^2 + \rho y^2)\rho x - 2\rho x\} \cdot M_7(0x, 0y) \\
&+ \{3(\rho x^2 + \rho y^2)\rho y - 2\rho y\} \cdot M_8(0x, 0y) \\
&+ \{6(\rho x^2 + \rho y^2)^2 - 6(\rho x^2 + \rho y^2) + 1\} \cdot M_9(0x, 0y) \\
&+ \dots \quad (13)
\end{aligned}$$

ここで、

$M_1(0x, 0y) \sim M_9(0x, 0y)$ は物体高座標に依存する関数、
である。

[0192] ここで、物体高座標に依存する関数を $M_z(0x, 0y)$ で表すと、 $M_z(0x, 0y)$ は物体高座標に依存する関数であって、ゼルニケ項の第 z 項が乗じられた項における関数である。なお、ゼルニケ項は瞳座標に依存する関数である。よって、 $M_z(0x, 0y)$ は物体高座標に依存する関数であって、瞳座標に依存する関数が乗じられた項における関数、ということもできる。

[0193] このように、設計収差成分 $M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ をゼルニケ多項式で展開した場合、多項式の各項は、瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた項と、瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた項と、に分かれる。

[0194] 更に、物体高座標に依存する関数 $M_z(0x, 0y)$ も、多項式で展開することができる。ただし、瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた項と瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた項とで、展開式が異なる。

[0195] 瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた項の $M_z(0x, 0y)$ は、ゼルニケ項の第 2 項等が乗じられた項の $M_z(0x, 0y)$ である。この場合の $M_z(0x, 0y)$ ($z=2, 3, 7, 8, \dots$) は、以下の式 (14) で表される。

$$M_z(0x, 0y) = C_{zm10}0x + C_{zm01}0y + C_{zm30}0x^3 + C_{zm21}0x^20y + C_{zm12}0x0y^2 + C_{zm03}0y^3 + \dots \quad ($$

1 4)

[0196] 式(1 4)に示すように、ゼルニケ項の第2項等が乗じられた項の $M_z(0x, 0y)$ は、物体高座標に対して奇関数となっている。

[0197] 瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた項の $M_z(0x, 0y)$ は、ゼルニケ項の第4項等が乗じられた項の $M_z(0x, 0y)$ である。この場合の $M_z(0x, 0y)$ ($z=1, 4, 5, 6, 9, \dots$)は、以下の式(1 5)で表される。

$$M_z(0x, 0y) = C_{zm00} + C_{zm20}0x^2 + C_{zm11}0x0y + C_{zm02}0y^2 + \dots \quad (1 5)$$

[0198] 式(1 5)に示すように、ゼルニケ項の第4項等が乗じられた項の $M_z(0x, 0y)$ は、物体高座標に対して偶関数となっている。

[0199] 第1の収差成分を表す関数、第2の収差成分を表す関数及び設計収差成分における物体高座標に依存する関数(以下、「設計収差成分を表す関数」という)について、偶関数になる場合と奇関数になる場合をまとめた結果を表1 4に示す。

[表14]

		$z=2, 3, 7, 8, \dots$	$z=1, 4, 5, 6, 9, \dots$
所定の収差成分	第1の収差成分 (偏心量の1乗に比例)	物体高座標に対して偶関数 $W_{z1}(-0x, -0y) = W_{z1}(0x, 0y)$	物体高座標に対して奇関数 $W_{z1}(-0x, -0y) = -W_{z1}(0x, 0y)$
	第2の収差成分 (偏心量の2乗に比例)	物体高座標に対して奇関数 $W_{z2}(-0x, -0y) = -W_{z2}(0x, 0y)$	物体高座標に対して偶関数 $W_{z2}(-0x, -0y) = W_{z2}(0x, 0y)$
	設計収差成分 (物体高座標に依存する関数)	物体高座標に対して奇関数 $M_z(-0x, -0y) = -M_z(0x, 0y)$	物体高座標に対して偶関数 $M_z(-0x, -0y) = M_z(0x, 0y)$

[0200] 上述のように、所定の関数、すなわち、第2の収差成分を表す関数が奇関数の場合、第1の演算工程を実施すると、第2の収差成分が消滅する。ここで、表1 4から分かるように、第2の収差成分を表す関数が奇関数の場合、設計収差成分を表す関数も奇関数になっている。そのため、第1の演算工程を実施すると、設計収差成分も消滅することになる。その結果、所定の収差成分から第1の収差成分を抽出することができる。

[0201] また、所定の関数が偶関数の場合、第2の演算工程を実施すると、第2の収差成分が消滅する。ここで、表1 4から分かるように、第2の収差成分を表す関数が偶関数の場合、設計収差成分を表す関数も偶関数になっている。そのため、第2の演算工程を実施すると、設計収差成分も消滅することにな

る。その結果、所定の収差成分から第1の収差成分を抽出することができる。

[0202] 抽出した第1の収差成分を用いてステップS400を実行する。ステップS400で連立1次方程式を解くことで、偏心量 $\Delta_1 \sim \Delta_j$ を求めることができる。

[0203] このように、本実施形態の偏心量計測方法によれば、被検光学系に設計収差が存在する場合であっても、レンズ面の形状や光学系を構成するレンズの数に関係なく、短い時間で偏心量を計測できる。

[0204] また、本実施形態の計測方法では、取得工程は第1の回転を含み、第1の回転では、計測軸の周りに被検光学系を回転させ、同一の照射位置で、第1の回転前の波面データと、第1の回転後の波面データと、を取得することが好ましい。

[0205] 本実施形態の計測方法のフローチャートを図8に示す。本実施形態の計測方法では、ステップS100は、ステップS110、ステップS121、ステップS122及びステップS150を有する。なお、ステップS200、ステップS300及びステップS400については、詳細な説明を省略する。

[0206] 上述のように、波面データは、波面収差の情報を含んだデータである。波面データは受光系によって取得される。例えば、受光系が干渉計の場合、波面データは位相データになる。また、受光系がシャックハルトマンセンサー（以下、「SHセンサー」という）の場合、波面データは光スポット像位置のデータになる。SHセンサーの詳細については後述する。

[0207] 図9は投光系におけるシステム収差を説明する図であって、（a）はシステム収差が発生していない状態を示し、（b）は投光系においてシステム収差が発生している状態を示す。システム収差は、計測系自身が持つ収差である。システム収差は、投光系や受光系で発生する。

[0208] 図9（a）に示すように、投光系10の照射位置Pに、光源が配置されている。投光系10においてシステム収差が発生していない場合、光源から球

面波40が出射する。球面波40は、被検光学系20に入射する。被検光学系20は0z軸に対して偏心しているため、被検光学系20から非平面波50が出射する。

[0209] 照射する光束の波面については、スペイシャルフィルターを使うなどすれば収差を除去できる。しかしながら、製造誤差により、十分な除去ができないこともある。この場合、投光系10においてシステム収差が発生する。

[0210] 投光系10においてシステム収差が発生すると、図9(b)に示すように、被検光学系20に照射する光束の波面は、歪んだ波面60になる。この場合、被検光学系20から出射する非平面波51は、球面波40を被検光学系20に照射した時の非平面波50と異なる。

[0211] 図10は受光系におけるシステム収差を示す図であって、(a)はセンサ一部品構成部におけるシステム収差を示し、(b)は波面データ取得部におけるシステム収差を示している。

[0212] 受光系30は、例えば、センサ一部品構成部31と波面データ取得部32とで構成されている。受光系30に入射した非平面波50は、センサ一部品構成部31を通過した後、波面データ取得部32に到達する。

[0213] センサ一部品構成部31には、必要に応じて光学系が配置される。例えば、受光系に入射する光束径と、波面データ取得部32における受光領域を略一致させる必要がある場合、センサ一部品構成部31に光学系が配置される。また、複数の光スポット像を形成する場合にも、センサ一部品構成部31に光学系が配置される。

[0214] この光学系に製造誤差がある場合や、この光学系の取り付けに誤差が生じた場合、光学系で収差が発生する。そのため、センサ一部品構成部31においてシステム収差が発生する。この場合、非平面波50にシステム収差が加わる。その結果、図10(a)に示すように、波面データ取得部32に入射する非平面波52は非平面波50と異なる。

[0215] また、上述のように、受光系30が干渉計の場合、波面データ取得部32には干渉縞が形成される。また、受光系30がSHセンサーの場合、波面デ

ータ取得部 32 には複数の光スポット像が形成される。

[0216] よって、波面データ取得部 32 では、干渉縞を細かい領域に分割して波面の情報を取得する。あるいは、波面データ取得部 32 では、複数の光スポット像の位置を検出する。そのために、波面データ取得部 32 では、例えば、微小な受光素子 33（以下、「受光素子」という）が 2 次元に配置されている。

[0217] 波面データ取得部 32 に製造誤差がある場合、例えば、図 10（b）に示すように、受光素子 33 は規則正しく配列されない。そのため、波面データ取得部 32 においてシステム収差が発生する。また、製造誤差によって、受光素子 33 の受光面積の大きさにばらつきが生じることもある。この場合も、波面データ取得部 32 においてシステム収差が発生する。

[0218] このように、投光系 10 や受光系 30 がシステム収差を持つ場合、システム収差も波面収差に含まれる。この場合、受光系 30 で取得した波面データは、被検光学系 20 の偏心によって生じた波面収差を正確に反映したデータにはならない。

[0219] システム収差成分を $\text{Sys}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ とすると、波面収差 W は、以下の式（1-4）で表される。但し、ここでの波面収差 W は被検光学系の偏心がなく、かつ、システム収差がないときの波面に対する偏差として説明する。

$$\begin{aligned}
 [0220] \quad W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 &= \text{Sys}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_1 B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_1^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_2 B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_2^2 B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \dots \\
 &+ \Delta_j B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \Delta_j^2 B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-4)
 \end{aligned}$$

[0221] ここで、システム収差成分は、あらかじめ求めておくことができる。図 1

1 はシステム収差成分を予め求めておく方法を示す図である。ここでは、センサー部品構成部 3 1 でシステム収差が発生しているものとする。

[0222] この方法では、収差が非常に少ない光学系 2 1 を用いる。図 1 1 では、光学系 2 1 から出射する光束は、受光系 3 0 に入射する角度、位置及び光束径が、被検光学系 2 0 から出射する光束（図 1 0 (a)）と一致した状態になっている。すなわち、このような状態となるように、照射位置 P_p 、照射角度、光学系 2 1 の位置及び $0z$ 軸に対する光学系 2 1 の傾きが調整されている。

[0223] 図 1 1 では、投光系 1 0 の照射位置 $P_p(0x_p, 0y_p, 0)$ に光源が配置されている。投光系 1 0 ではシステム収差が発生していないので、光源から球面波 4 0 が出射する。球面波 4 0 は、光学系 2 1 に入射する。光学系 2 1 は、収差が非常に少ない光学系である。よって、光学系 2 1 から平面波 5 3 が出射する。平面波 5 3 は、センサー部品構成部 3 1 に入射する。

[0224] ここで、平面波 5 3 には、センサー部品構成部 3 1 におけるシステム収差が加わる。その結果、センサー部品構成部 3 1 から非平面波 5 4 が出射する。非平面波 5 4 は波面データ取得部 3 2 に入射し、波面データが取得される。

[0225] 取得された波面データには、センサー部品構成部 3 1 におけるシステム収差の情報のみが含まれている。そこで、この波面データから得られる波面収差 W' は、以下の式 (16) で表される。

$$W'(0x, 0y, \rho x, \rho y) = \text{Sys}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (16)$$

[0226] 但し、上述のように、光学系 2 1 から出射する光束は、受光系 3 0 に入射する角度、位置及び光束径が、被検光学系 2 0 から出射する光束（図 1 0 (a)）と一致するようになっている。よって、図 1 1 における投光系 1 0 の照射位置 $P_p(0x_p, 0y_p, 0)$ は、図 1 0 (a) における照射位置 $P(0x, 0y, 0)$ に対応する。よって、 W' の物体高座標を $(0x, 0y)$ で表した。

[0227] そこで、式 (17) の演算を行うことで、 $\text{Sys}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ を除去することができる。

$$W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) - W'(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (17)$$

)

[0228] 照射位置が一つの場合、この方法は容易に実施できる。しかしながら、照射位置が非常に多くなると、あらかじめ求めておくデータの数も膨大になる。そのため、この方法を実施することは容易ではない。

[0229] そこで、本実施形態の計測方法では、同一の照射位置で、2つの波面データを取得する。そのために、図8に示すように、ステップS100を実行する。

[0230] 図12は第1の回転を示す図であって、(a)は第1の回転を行う前の状態を示し、(b)は第1の回転を行った後の状態を示している。なお、投光系と受光系は、共にシステム収差を有しているものとする。

[0231] ステップS110では、図12(a)に示すように、照射位置 $P(0x, 0y, 0)$ から光束を被検光学系20に照射する。波面60は被検光学系20に入射する。被検光学系20から非平面波51が出射する。非平面波51は、投光系10のシステム収差と被検光学系20の偏心収差を含んでいる。非平面波51は受光系30に入射する。受光系30もシステム収差を持つ。よって、最終的に検出される波面は、投光系10のシステム収差、被検光学系20の偏心収差及び受光系30のシステム収差を有する。

[0232] 続いて、ステップS121を実行する。これにより、波面データ $WFD\theta$ 1が取得される。波面データ $WFD\theta$ 1は、投光系10のシステム収差の情報、被検光学系20の偏心収差の情報及び受光系30のシステム収差の情報を有する。この波面データ $WFD\theta$ 1を解析することで、波面収差 W が得られる。波面収差 W は以下の式(1-5)で表される。なお、ここでは、被検光学系の偏心をY方向のシフトとしているので、偏心量は δ で表している。

$$\begin{aligned}
 [0233] \quad & W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j) \\
 & = \text{Sys}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + \delta_1 B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + \delta_1^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + \delta_2 B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \delta_2^2 B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
& + \cdot \cdot \cdot \\
& + \delta_j B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
& + \delta_j^2 B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-5)
\end{aligned}$$

[0234] 次に、ステップS150を実行する。ステップS150では第1の回転を行う。第1の回転では、計測軸の周りに被検光学系20を回転させる。回転させる角度は、例えば、180°である。なお、投光系10の位置は固定したままである。よって、照射位置Pは移動しない。また、受光系30の位置も固定したままである。

[0235] ステップS150の終了後、ステップS110を実行する。ステップS110では、図12(b)に示すように、照射位置P(0x, 0y, 0)から光束を被検光学系20に照射する。波面60は被検光学系20に入射する。被検光学系20から非平面波55が出射する。非平面波55は、非平面波51とは異なる。

[0236] 非平面波55は、投光系10のシステム収差と被検光学系20の偏心収差を含んでいる。非平面波55は受光系30に入射する。受光系30もシステム収差を持つ。よって、最終的に検出される波面は、投光系10のシステム収差、被検光学系20の偏心収差及び受光系30のシステム収差を有する。

[0237] 続いて、ステップS122を実行する。これにより、波面データWFDθ2が取得される。波面データWFDθ2は、投光系10のシステム収差の情報、被検光学系20の偏心収差の情報及び受光系のシステム収差の情報を有する。この波面データWFDθ2を解析することで、波面収差Wが得られる。波面収差Wは以下の式(1-6)で表される。

$$\begin{aligned}
[0238] \quad & W(0x, 0y, \rho x, \rho y, -\delta_1, -\delta_2, \cdot \cdot \cdot, -\delta_j) \\
& = \text{Sys}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
& + (-\delta_1) B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
& + (-\delta_1)^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
& + (-\delta_2) B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +(-\delta_2)^2 B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
& + \cdots \\
& +(-\delta_j) B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
& +(-\delta_j)^2 B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-6)
\end{aligned}$$

[0239] 上述のように、システム収差成分 $Sys(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は、投光系や受光系の製造誤差などで生じる収差成分である。このシステム収差成分は、座標 $(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ に依存する。被検光学系20を回転する前の偏心状態と回転した後の偏心状態とで、偏心状態がそれほど大きく変化しなければ、実質的に、システム収差成分 $Sys(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は偏心量に依存しないとみなせる。

[0240] 式(1-5)と式(1-6)とでは、システム収差成分は同一である。そこで、ステップS200において、式(18)の演算を行う。この演算により $Sys(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ が除去されるので、所定の収差成分を抽出することができる。

$$\begin{aligned}
& W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1, \delta_2, \cdots, \delta_j) \\
& - W(0x, 0y, \rho x, \rho y, -\delta_1, -\delta_2, \cdots, -\delta_j) \quad (18)
\end{aligned}$$

[0241] ここで、上述のように、本実施形態の計測方法では、2つの波面データが得られる。そこで、第1の回転を行う前に取得した波面データを参照用データ、第1の回転後に取得した波面データを計測用データとする。この場合、式(18)は、参照用データを波面の基準として、計測用データを解析していることになる。すなわち、式(18)で表される波面収差は、被検光学系が第1の回転前の波面に対する第1の回転後の波面の偏差である。

[0242] 例えば、参照用データから計測用データへの波面データの変化量を、解析により求める。SHセンサーの場合、参照用のスポット画像の光スポット像位置を基準として、測定用のスポット画像の光スポット像位置へのベクトルを計算する。このベクトル計算に用いられる参照用の光スポット像と計測用の光スポット像は、一対一で対応している。一対一で対応している2つの光スポット像は、同一のマイクロレンズアレイを通して形成された光スポット像である。干渉計の場合は、参照用の位相データを基準として、計測用の位

相データの位相変化量を計算する。

[0243] ここで、スポット画像は、光スポット像を撮像した画像である。参照用のスポット画像とは、参照波面をSHセンサーに入射したときに形成される光スポット像を撮像した画像である。また、測定用のスポット画像とは、測定波面をSHセンサーに入射させたときに形成される光スポット像を撮像した画像である。第1の回転を行う場合は、参照用のスポット画像は、第1の回転を行う前の状態で光スポット像を撮像した画像、測定用のスポット画像は、第1の回転を行った後の状態で光スポット像を撮像した画像である。

[0244] このようにして、参照用データと計測用データから、最終的な波面データが取得される。ここで、例えば回転角度が180度である場合は、被検光学系の各レンズは、計測軸に対する偏心量の-2倍、変位したことになる。

[0245] ここで、レンズ面が球面で構成されている場合は、レンズ面の位置は球心で表すことができる。図13は第1の回転によって球心が変化する様子を示す図であって、(a)は第1の回転前の球心の位置を示し、(b)は第1の回転後の球心の位置を示し、(c)は第1の回転による球心の移動量を示している。図13では、被検光学系22は4つのレンズ面で構成されている。

[0246] 図13(a)に示すように、第1の回転を行う前の状態では、球心70、球心71、球心72及び球心73は、第1の回転軸の一方の側に位置している。この状態から第1の回転を行うと、図13(b)に示すように、球心70、球心71、球心72及び球心73は、第1の回転軸の他方の側に移動する。この他方の側は、第1の回転軸を挟んで一方の側と反対の位置である。

[0247] 図13(c)に示すように、計測軸に対する球心の偏心量は、球心70では $\delta 1$ 、球心71では $\delta 2$ 、球心72では $\delta 3$ 、球心73では $\delta 4$ である。被検光学系の回転によって、球心70、球心71、球心72及び球心73の各々は変位する。この変位量は、回転前の計測軸に対する偏心量の-2倍となる。

[0248] ステップS200では、最終的な波面データから所定の収差成分が抽出される。このとき、所定の収差成分は、計測軸に対する偏心量の-2倍に相当

する収差量である。このようにして、システム収差が存在しても、計測軸に対する偏心量の -2 倍の収差量を抽出することができる。

[0249] ステップS200の実行後、ステップS300を実行する。ステップS300を実行することで、第1の収差成分が抽出される。抽出した第1の収差成分を用いてステップS400を実行する。ステップS400で連立1次方程式を解くことで、偏心量 $\Delta_1 \sim \Delta_j$ を求めることができる。

[0250] この時の偏心量 $\Delta_1 \sim \Delta_j$ は、計測軸に対する -2 倍の偏心量である。ステップS400の実行で得られた偏心量を -2 で割ると、計測軸に対する偏心量を求めることができる。なお、このときの偏心量は、被検光学系が回転する前の状態での偏心量である。

[0251] このように、本実施形態の偏心量計測方法によれば、投光系や受光系にシステム収差が存在する場合であっても、レンズ面の形状や光学系を構成するレンズの数に関係なく、短い時間で偏心量を計測できる。

[0252] なお、レンズ面が複数存在する場合、レンズ面どうしの偏心量を評価しても良い。この場合は、図13(c)に示すように、空間に分布する複数レンズ面の偏心量が最小になるように、新たな軸80を設定する。そして、新たな軸80を基準にして、レンズ面の偏心量を評価すれば良い。

[0253] 新たな軸80の設定は、例えば、仮の軸を設定し、仮の軸から球心までの距離について、全レンズ面で2乗和をとる。そして、仮の軸を変化させて、2乗和が最小となったときの仮の軸を新たな軸にすれば良い。あるいは、仮の軸から球心までの距離をレンズの曲率半径で割った量について、全レンズ面で2乗和をとる。そして、仮の軸を変化させて、2乗和が最小となったときの仮の軸を新たな軸にしても良い。

[0254] また、本実施形態の計測方法では、設計収差成分が存在する場合であっても、設計収差成分を除去することができる。

[0255] 式(1-4)、式(1-5)、式(1-6)の波面収差 W は被検光学系の偏心がなく、かつ、システム収差がないときの波面に対する偏差として説明してきた。波面収差 W を平面波や球面波といった理想的な波面に対する偏差

としたときは、設計収差成分 $M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ の項を W に加えて同様の説明ができる。

[0256] 設計収差成分 $M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は、物体高座標と瞳座標のみで表される偏心量に依存しない収差成分である。そのため、システム収差成分 $Sys(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ と同じように扱うことができる。

[0257] そこで、式(1-5)における $Sys(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ と式(1-6)における $Sys(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ を、各々 $M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ に置き換える。この場合、式(1-5)と式(1-6)とで、設計収差成分 $M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は同一である。そこで、ステップS200において式(18)の演算を行うと、 $M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ が除去される。その結果、所定の収差成分を抽出することができる。

[0258] また、一般的には被検光学系は、偏心以外にも、各面の曲率半径誤差、面間隔誤差、屈折率誤差などの回転対称な製造誤差を持っている。よって、実際に計測される波面収差 W には、製造誤差によって生じる収差成分も含まれる。しかし、回転対称な製造誤差によって生じる波面収差成分も、物体高座標と瞳座標のみで表される偏心量に依存しない収差成分である。そのため、システム収差成分 $Sys(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ や設計収差成分 $M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ と同じように扱うことができる。よって被検光学系に、各面の曲率半径誤差、面間隔誤差、屈折率誤差などの回転対称な製造誤差があっても、所定の収差成分を抽出することができる。

[0259] また、実際の波面計測において波面収差 W を平面波や球面波といった理想的な波面に対する偏差として解析する必要はない。式(18)に示すように、被検光学系が第1の回転前の波面に対する第1の回転後の波面の偏差を解析すればよい。

[0260] よって、波面データ $WFD\theta 1$ と波面データ $WFD\theta 2$ の偏差から波面収差を解析することで、システム収差成分を除去し、所定の収差成分を抽出することができる。

[0261] 以降の説明でも上述と同様に、被検光学系の第1の回転前の波面に対する

第1の回転後の波面の偏差を解析する。そのため、以降の説明では波面収差Wの参照波面のとり方については省略する。

[0262] ステップS200の実行後、ステップS300を実行する。ステップS300を実行することで、第1の収差成分が抽出される。抽出した第1の収差成分を用いてステップS400を実行する。ステップS400で連立1次方程式を解くことで、偏心量 $\Delta_1 \sim \Delta_j$ を求めることができる。

[0263] このように、本実施形態の偏心量計測方法によれば、被検光学系に設計収差が存在する場合であっても、レンズ面の形状や光学系を構成するレンズの数に関係なく、短い時間で偏心量を計測できる。

[0264] また、本実施形態の計測方法では、被検光学系と受光系の間に配置された受光光学系が偏心している場合であっても、受光光学系の収差成分を除去することができる。

[0265] 受光光学系について説明する。上述のように、被検光学系から出射した光束は、受光系に入射する。ここで、受光系に入射する光束の径を適切にするために、受光光学系を配置する場合がある。図14は、被検光学系と受光系の間に受光光学系を配置した様子を示す図である。なお、ここでは、システム収差や設計収差は発生していないものとする。

[0266] 受光光学系は、第 $j+1$ レンズ面から第 m レンズ面までのレンズ面から構成されている。ここで、受光光学系のレンズ面が偏心すると、収差が生じる。図14においても、球心を用いてレンズ面のシフトを表している。図14において、 SC_{j+1} 、 SC_{j+2} 、 $\dots$ 、 SC_m は、各レンズ面の球心を表している。また、 δ_{j+1} 、 δ_{j+2} 、 $\dots$ 、 δ_m は、各レンズ面のY方向のシフト量を表している。

[0267] 受光光学系のレンズ面が偏心している場合、受光系に入射する波面の波面収差は、被検光学系の偏心で生じた波面収差に、受光光学系の偏心で生じた波面収差が加わったものになる。よって、最終的に検出される波面は、被検光学系の偏心収差と受光光学系の偏心収差を有する。

[0268] ここで、ステップS110とステップS121を実行することで、波面デ

ータ $WFD\theta 1$ が取得される。波面データ $WFD\theta 1$ は、被検光学系の偏心収差の情報と受光光学系の偏心収差の情報を有する。この波面データ $WFD\theta 1$ を解析することで、波面収差 W が得られる。波面収差 W は以下の式（１－７）で表される。なお、ここでは、偏心は Y 方向のシフトとしているので、偏心量は δ で表す。

[0269] $W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j)$

$$\begin{aligned}
 &= \delta_1 B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_1^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_2 B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_2^2 B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \dots \\
 &+ \delta_j B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_j^2 B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_{j+1} B_{(j+1)1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_{j+1}^2 B_{(j+1)2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_{j+2} B_{(j+2)1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_{j+2}^2 B_{(j+2)2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \dots \\
 &+ \delta_m B_{m1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_m^2 B_{m2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-7)
 \end{aligned}$$

[0270] 次に、ステップ $S150$ を実行する。ステップ $S150$ では第１の回転を行う。第１の回転では、計測軸の周りに被検光学系を回転させる。回転させる角度は、例えば、 180° である。なお、投光系の位置は固定したままである。よって、照射位置 P は移動しない。また、受光光学系や受光系の位置も固定したままである。

[0271] 続いて、ステップ $S110$ とステップ $S122$ を実行することで、波面データ $WFD\theta 2$ が取得される。波面データ $WFD\theta 2$ は、被検光学系の偏心収差の情報と受光光学系の偏心収差の情報を有する。この波面データ WFD

θ_2 を解析することで、波面収差 W が得られる。波面収差 W は以下の式 (1-8) で表される。

$$\begin{aligned}
 [0272] \quad W(0x, 0y, \rho x, \rho y, -\delta_1, -\delta_2, \dots, -\delta_j) \\
 &= (-\delta_1) B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ (-\delta_1)^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ (-\delta_2) B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ (-\delta_2)^2 B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \dots \\
 &+ (-\delta_j) B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ (-\delta_j)^2 B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_{j+1} B_{(j+1)1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_{j+1}^2 B_{(j+1)2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_{j+2} B_{(j+2)1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_{j+2}^2 B_{(j+2)2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \dots \\
 &+ \delta_m B_{m1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \delta_m^2 B_{m2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-8)
 \end{aligned}$$

[0273] 受光光学系の偏心収差成分について、式 (1-7) と式 (1-8) とで比較した結果を表 15 に示す。表 15 から分かるように、式 (1-7) と式 (1-8) とでは、受光光学系の偏心収差成分は同一である。

[表15]

式 (1-7)	式 (1-8)
$\delta_{j+1} B_{(j+1)1}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	$\delta_{j+1} B_{(j+1)1}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$
$\delta_{j+1}^2 B_{(j+1)2}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	$\delta_{j+1}^2 B_{(j+1)2}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$
$\delta_{j+2} B_{(j+2)1}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	$\delta_{j+2} B_{(j+2)1}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$
$\delta_{j+2}^2 B_{(j+2)2}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	$\delta_{j+2}^2 B_{(j+2)2}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$
$\dots$	$\dots$
$\delta_m B_{m1}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	$\delta_m B_{m1}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$
$\delta_m^2 B_{m2}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	$\delta_m^2 B_{m2}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$

[0274] そこで、ステップ S200 において、式 (1-8) の演算を行う。この演算

により受光光学系の偏心収差成分が除去されるので、所定の収差成分を抽出することができる。

[0275] ステップS200の実行後、ステップS300を実行する。ステップS300を実行することで、第1の収差成分が抽出される。抽出した第1の収差成分を用いてステップS400を実行する。ステップS400で連立1次方程式を解くことで、偏心量 $\Delta_1 \sim \Delta_j$ を求めることができる。

[0276] このように、本実施形態の偏心量計測方法によれば、偏心した受光光学系が存在する場合であっても、レンズ面の形状や光学系を構成するレンズの数に関係なく、短い時間で偏心量を計測できる。

[0277] 以上、取得工程が第1の回転を含む場合について説明した。なお、図8におけるステップS100の実行は、複数の照射位置で行っても良い。例えば、軸外と軸上において、被検光学系から出射した光束の波面を受光系で計測し、波面データを記録しておく。その後、ある角度だけ第1の回転を行う。そして、第1の回転後に、軸外及び軸上において、被検光学系から出射した光束の波面を受光系で計測し、波面データを記録する。ここで、照射位置が計測軸上にある場合を軸上、照射位置が計測軸上にない場合を軸外という。

[0278] また、本実施形態の計測方法では、取得工程は第1の回転を含み、第1の回転では、計測軸と平行な軸の周りに被検光学系を回転させ、同一の照射位置で、第1の回転前の波面データと、第1の回転後の波面データと、を取得することができる。

[0279] 本実施形態の計測方法では、第1の回転は第1の回転軸の周りに行われる。第1の回転軸は、計測軸とは別の軸であって、被検光学系を略光軸周りに回転させる軸である。

[0280] 図15は、第1の回転軸が計測軸に対して偏心している状態を示す図である。図15では、第1の回転軸 AX_{R1} が、計測軸すなわち、 Oz 軸に対して Y 方向にシフトしている。この時のシフト量を E とする。

[0281] 本実施形態の計測方法も、図8に示すフローチャートのステップS100を実行する。まずステップS110を実行して、照射位置 $P(0x, 0y, 0)$ から被

検光学系に光束を照射する。そして、ステップS 1 2 1を実行して、波面データW F D θ 1を取得する。波面収差Wは以下の式（1－9）で表される。なお、ここでは、被検光学系の偏心をY方向のシフトとしているので、偏心量は δ で表している。

[0282] また、一般的にEと δ の大きさは微小量に抑えることができるので、偏心量の3乗以上に比例する項については、各項における収差量は微小と考えられるので、無視することができる。そのため、（1－9）には、偏心量の3乗以上に比例する項は含まれていない。

$$\begin{aligned}
 [0283] \quad W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1+E, \delta_2+E, \dots, \delta_j+E) \\
 &= (\delta_1+E) B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ (\delta_1+E)^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ (\delta_2+E) B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ (\delta_2+E)^2 B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ \dots \\
 &+ (\delta_j+E) B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ (\delta_j+E)^2 B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-9)
 \end{aligned}$$

[0284] 次に、ステップS 1 5 0を実行する。ステップS 1 5 0では第1の回転を行う。第1の回転では、計測軸の周りに被検光学系20を回転させる。回転させる角度は、例えば、180°である。

[0285] ステップS 1 5 0の終了後、ステップS 1 1 0を実行して、照射位置P(0x, 0y, 0)から被検光学系に光束を照射する。そして、ステップS 1 2 2を実行して、波面データW F D θ 2を取得する。波面収差Wは以下の式（1－10）で表される。

$$\begin{aligned}
 [0286] \quad W(0x, 0y, \rho x, \rho y, -\delta_1+E, -\delta_2+E, \dots, -\delta_j+E) \\
 &= (-\delta_1+E) B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ (-\delta_1+E)^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ (-\delta_2+E) B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+ (-\delta_2+E)^2 B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y)
 \end{aligned}$$

+ . . .

$$+(-\delta_j + E)B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$$

$$+(-\delta_j + E)^2B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-10)$$

[0287] 続いて、ステップS200を実行する。第1の回転を行う前に取得した波面データWFDθ1は参照用データ、第1の回転後に取得した波面データWFDθ2は計測用データである。そこで、参照用データを波面の基準として、計測用データを解析することで、最終的な波面収差を求める。

[0288] 最終的な波面収差を求めるために、具体的には、式(1-9)で表される波面収差を参照用データ、式(1-10)で表される波面収差を計測用データとして、式(1-9)の演算を行う。

$$\begin{aligned} & W(0x, 0y, \rho x, \rho y, -\delta_1 + E, -\delta_2 + E, \dots, -\delta_j + E) \\ & - W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1 + E, \delta_2 + E, \dots, \delta_j + E) \end{aligned} \quad (19)$$

[0289] その結果、最終的な波面収差は式(1-11)で表される。

$$\begin{aligned} & W(0x, 0y, \rho x, \rho y, -\delta_1 + E, -\delta_2 + E, \dots, -\delta_j + E) \\ & - W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1 + E, \delta_2 + E, \dots, \delta_j + E) \\ & = (-2\delta_1)B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\ & + [(-\delta_1 + E)^2 - (\delta_1 + E)^2]B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\ & + (-2\delta_2)B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\ & + [(-\delta_2 + E)^2 - (\delta_2 + E)^2]B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\ & + \dots \\ & + (-2\delta_j)B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\ & + [(-\delta_j + E)^2 - (\delta_j + E)^2]B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\ & = (-2\delta_1)B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\ & + (-4\delta_1 E)B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\ & + (-2\delta_2)B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\ & + (-4\delta_2 E)B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\ & + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+(-2\delta_j)B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 &+(-4\delta_j E)B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-11)
 \end{aligned}$$

[0290] 式(1-11)で表される波面収差は、被検光学系が第1の回転前の波面に対する第1の回転後の波面の偏差である。

[0291] ここで、 δ_1 とEはいずれも偏心量を表している。よって、 $(-4\delta_1 E) \sim (-4\delta_j E)$ へ偏心量の2乗を表しているとみなせる。式(1-11)の各項の説明を表16に示す。

[表16]

項	項の説明
$(-2\delta_1)B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	第1面における偏心量の1乗に比例する偏心収差成分
$(-4\delta_1 E)B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	第1面における偏心量の2乗に比例する偏心収差成分
$(-2\delta_2)B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	第2面における偏心量の1乗に比例する偏心収差成分
$(-4\delta_2 E)B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	第2面における偏心量の2乗に比例する偏心収差成分
...	...
$(-2\delta_j)B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	第j面における偏心量の1乗に比例する偏心収差成分
$(-4\delta_j E)B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y)$	第j面における偏心量の2乗に比例する偏心収差成分

[0292] 式(1-11)に示すように、最終的な波面収差は、偏心量の1乗に比例する収差成分と偏心量の2乗に比例する収差成分、すなわち、第1の収差成分と第2の収差成分とからなる。このように、式(19)の演算を行うことで、所定の収差成分が抽出される。

[0293] なお、式(1-9)や式(1-10)には、設計収差成分、システム収差成分及び受光光学系の偏心収差成分は含まれていない。しかしながら、これらの収差成分が含まれていても良い。ただし、これらの収差成分は式(19)の演算を行うことで除去される。このようなことから、これらの収差成分については、式(1-9)や式(1-10)には記載していない。

[0294] 式(1-11)は第2の収差成分を含んでいる。これは、第1の回転軸が計測軸に対してシフト量Eだけシフトしているからである。そのため、このままでは、第1の偏心成分に関する方程式を用いて偏心量を求めることはできない。

[0295] そこで、図7に示したように、照射位置P'において、第1の回転を行う前の波面データと、第1の回転を行った後の波面データを取得する。第1の

回転を行う前の波面データは参照用データ、第1の回転を行った後の波面データは計測用データである。そこで、参照用データを波面の基準として、計測用データを解析することで、照射位置P'における最終的な波面収差を求める。

[0296] 照射位置P'は照射位置Pと対称であるので、物体高座標は $(-0x, -0y, 0)$ になる。よって、最終的な波面収差は式(1-12)で表される。

$$\begin{aligned}
 & W(-0x, -0y, \rho x, \rho y, \delta_1 + E, \delta_2 + E, \dots, \delta_j + E) \\
 & \quad - W(-0x, -0y, \rho x, \rho y, -\delta_1 + E, -\delta_2 + E, \dots, -\delta_j + E) \\
 & = (-2\delta_1)B_{11}(-0x, -0y, \rho x, \rho y) \\
 & \quad + (-4\delta_1 E)B_{12}(-0x, -0y, \rho x, \rho y) \\
 & \quad + (-2\delta_2)B_{21}(-0x, -0y, \rho x, \rho y) \\
 & \quad + (-4\delta_2 E)B_{22}(-0x, -0y, \rho x, \rho y) \\
 & \quad + \dots \\
 & \quad + (-2\delta_j)B_{j1}(-0x, -0y, \rho x, \rho y) \\
 & \quad + (-4\delta_j E)B_{j2}(-0x, -0y, \rho x, \rho y) \quad (1-12)
 \end{aligned}$$

[0297] 式(1-12)で表される波面収差は、被検光学系が第1の回転前の波面に対する第1の回転後の波面の偏差である。

[0298] 式(1-11)や式(1-12)から分かるように、最終的な波面収差は、所定の収差成分として、偏心量の1乗に比例する収差成分と偏心量の2乗に比例する収差成分、すなわち、第1の収差成分と第2の収差成分とを有する。

[0299] 続いて、ステップS300を実行して、第1の収差成分を抽出する。ここで、収差成分をWzで表す。瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた収差成分Wzは、ゼルニケ項の第2項等が乗じられた収差成分である。この収差成分Wz($z=2, 3, 7, 8, \dots$)については、式(1-11)と式(1-12)の和をとる。その結果を式(20)に示す。

$$\begin{aligned}
 & Tz(0x, 0y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j) \\
 & = [Wz(0x, 0y, -\delta_1 + E, -\delta_2 + E, \dots, -\delta_j + E)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -Wz(0x, 0y, \delta_1+E, \delta_2+E, \dots, \delta_j+E)] \\
& +[Wz(-0x, -0y, -\delta_1+E, -\delta_2+E, \dots, -\delta_j+E) \\
& -Wz(-0x, -0y, \delta_1+E, \delta_2+E, \dots, \delta_j+E)] \\
& =(-2\delta_1)[Bz_{11}(0x, 0y)+Bz_{11}(-0x, -0y)] \\
& +(-4\delta_1 E)[Bz_{12}(0x, 0y)+Bz_{12}(-0x, -0y)] \\
& +(-2\delta_2)[Bz_{21}(0x, 0y)+Bz_{21}(-0x, -0y)] \\
& +(-4\delta_2 E)[Bz_{22}(0x, 0y)+Bz_{22}(-0x, -0y)] \\
& +\dots \\
& +(-2\delta_j)[Bz_{j1}(0x, 0y)+Bz_{j1}(-0x, -0y)] \\
& +(-4\delta_j E)[Bz_{j2}(0x, 0y)+Bz_{j2}(-0x, -0y)] \quad (20)
\end{aligned}$$

[0301] ここで、 $Bz_{j1}(-0x, -0y)=Bz_{j1}(0x, 0y)$ 、 $Bz_{j2}(-0x, -0y)=-Bz_{j2}(0x, 0y)$ である。よって、式(20)から式(21)が得られる。

$$\begin{aligned}
& Tz(0x, 0y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j) \\
& =(-2\delta_1)[2Bz_{11}(0x, 0y)] \\
& +(-2\delta_2)[2Bz_{21}(0x, 0y)] \\
& +\dots \\
& +(-2\delta_j)[2Bz_{j1}(0x, 0y)] \quad (21)
\end{aligned}$$

[0302] 式(20)に示すように、両者の和をとることで、第1の収差成分は残り、第2の収差成分が消滅する。よって、所定の収差成分から第1の収差成分 $Tz(0x, 0y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j)$ を抽出することができる。

[0303] 一方、瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた収差成分 Wz は、ゼルニケ項の第4項等が乗じられた収差成分である。この収差成分 Wz ($z=1, 4, 5, 6, 9, \dots$)については、式(1-11)と式(1-12)の差をとる。その結果を式(22)に示す。

$$\begin{aligned}
& [0304] \quad Tz(0x, 0y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j) \\
& =[Wz(0x, 0y, -\delta_1+E, -\delta_2+E, \dots, -\delta_j+E) \\
& -Wz(0x, 0y, \delta_1+E, \delta_2+E, \dots, \delta_j+E)] \\
& -[Wz(-0x, -0y, -\delta_1+E, -\delta_2+E, \dots, -\delta_j+E)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -Wz(-0x, -0y, \delta_1 + E, \delta_2 + E, \dots, \delta_j + E)] \\
& = (-2\delta_1)[Bz_{11}(0x, 0y) - Bz_{11}(-0x, -0y)] \\
& + (-4\delta_1 E)[Bz_{12}(0x, 0y) - Bz_{12}(-0x, -0y)] \\
& + (-2\delta_2)[Bz_{21}(0x, 0y) - Bz_{21}(-0x, -0y)] \\
& + (-4\delta_2 E)[Bz_{22}(0x, 0y) - Bz_{22}(-0x, -0y)] \\
& + \dots \\
& + (-2\delta_j)[Bz_{j1}(0x, 0y) - Bz_{j1}(-0x, -0y)] \\
& + (-4\delta_j E)[Bz_{j2}(0x, 0y) - Bz_{j2}(-0x, -0y)] \quad (22)
\end{aligned}$$

[0305] ここで、 $Bz_{j1}(-0x, -0y) = -Bz_{j1}(0x, 0y)$ 、 $Bz_{j2}(-0x, -0y) = Bz_{j2}(0x, 0y)$ である。よって、式(22)から式(23)が得られる。

$$\begin{aligned}
& Tz(0x, 0y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j) \\
& = (-2\delta_1)[2Bz_{11}(0x, 0y)] \\
& + (-2\delta_2)[2Bz_{21}(0x, 0y)] \\
& + \dots \\
& + (-2\delta_j)[2Bz_{j1}(0x, 0y)] \quad (23)
\end{aligned}$$

[0306] 式(22)に示すように、両者の差をとることで、第1の収差成分は残り、第2の収差成分が消える。よって、所定の収差成分から第1の収差成分 $Tz(0x, 0y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j)$ を抽出することができる。

[0307] また、式(21)と式(23)において、係数は δ_1 、 δ_2 、 $\dots$ 、 δ_j になっている。ここで、図15に示すように、 δ_1 、 δ_2 、 $\dots$ 、 δ_j は第1の回転軸からの偏心量である。このように、偏心量を表す基準が第1の回転軸になっていることがわかる。すなわち、計測軸が偏心量を表す基準にはなっていない。

[0308] 続いて、第1の収差成分 $Tz(0x, 0y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j)$ を用いてステップS400を実行する。ステップS400で連立1次方程式を解く。これにより、第1の回転軸を基準とした偏心量の－2倍の値が解として求まる。

[0309] このように、第2の収差成分が消え、第1の収差成分を抽出することにより、被検光学系の各面の変位と第1の収差成分の収差量が線形に扱えるよう

になったことにより、計測軸 $0z$ と第1の回転軸 AX_{R1} が一致していなくても、被検光学系の第1の回転軸 AX_{R1} 周りの回転に伴う各面の変位量を求めることができる。よって第1の回転軸を基準として偏心量を正確に求めることができる。

[0310] 以上のように、本実施形態の計測方法では、計測軸あるいは第1の回転軸の周りに、被検光学系をある角度で回転させて2つの波面データを取得する。そして、第1の回転前の波面データを参照用データ、第1の回転後の波面データを計測用データとして、波面収差を解析することで、設計収差、システム収差及び受光光学系の偏心収差が除去できる。

[0311] また、本実施形態の計測方法では、被検光学系を回転させる角度が 10° 以上であることが好ましい。更には、被検光学系を回転させる角度が 180° 度であることが好ましい。

[0312] 以上の説明では、被検光学系を計測軸あるいは第1の回転軸の周りに 180° 度回転させている。しかしながら、回転角度は何度でもよい。好ましい回転角度は 10° 度以上で、より好ましい角度は 180° 度である。

[0313] また、計測軸に対して第1の回転軸がチルトしてしまうことがある。この点について説明する。

[0314] 図16は第1の回転軸と計測軸の相対関係を示す図であって、(a)は計測軸と第1の回転軸が一致している状態を示し、(b)は計測軸に対して第1の回転軸がチルトしている状態を示している。

[0315] 上述のように、レンズ面が球面の場合、第1の回転による球心の変位量は、計測軸に対する偏心量の -2 倍になる。一方、被検光学系90のレンズ面が非球面の場合、第1の回転による変位の様子は、図16(a)に示すようになる。ここで、図16(a)に示すように、非球面91は、非球面面頂92と非球面軸93とで表される。

[0316] 第1の回転における回転角度が 180° の場合、非球面面頂の変位量と非球面軸の変位量は、回転前の第1の回転軸 AX_{R1} に対する偏心量の -2 倍となる。例えば、非球面面頂92は、第1の回転によって、非球面面頂 $92'$

の位置に変位する。この場合、非球面面頂 9 2 の変位量は $-2 \times y_1$ になる。
また、非球面軸 9 3 の変位量は $-2 \times a_1$ になる。

[0317] 上述の通り、第 1 の収差成分から被検光学系の第 1 の回転軸周りの回転に伴う各面の変位量を求められる。この変位量を元に被検光学系の第 1 の回転軸基準の偏心量を求めることができる。よって、被検光学系の第 1 の回転軸周りの回転に伴う各面の変位量は、被検光学系の偏心量を反映している必要がある。

[0318] 第 1 の回転を行う場合、第 1 の回転軸 AX_{R1} は計測軸 AX_M と一致していることが望ましい。しかしながら、計測軸 AX_M に対して第 1 の回転軸 AX_{R1} にシフトやチルトが生じることがある。この場合、シフト量やチルト量が微小であれば実用上は問題ない。特に、第 1 の回転軸 AX_{R1} が計測軸 AX_M に対してシフトしている場合は、第 1 の回転に伴う変位量には影響しない。よってこの場合、各面の変位量は各面の偏心量を正確に反映している。

[0319] 一方、図 1 6 (b) に示すように、第 1 の回転軸 AX_{R1} が計測軸 AX_M に対してチルトしている場合、チルトは第 1 の回転に伴う変位量に影響する。例えば、計測軸 AX_M に対して第 1 の回転軸 AX_{R1} が角度 θ でチルトしているとする。この場合、非球面面頂 9 2 の変位量 Y_1 は、 $Y_1 = -2 \times y_1 \times \cos \theta$ になる。

[0320] このように、第 1 の回転軸 AX_{R1} がチルトしていないときに比べると、第 1 の回転軸 AX_{R1} が θ チルトしているときは、変位量の変化は $\cos \theta$ 倍になる。ただし、 θ が 1° 程度であっても、図 1 6 (a) で算出した変位量との変化は 0.02% 以下である。よってこの場合、非球面面頂 9 2 の変位量は偏心量をほぼ正確に反映している。

[0321] また、非球面軸 9 3 の変位量 A_1 は、 $A_1 = (-a_1 + \theta) - (a_1 - \theta) = -2 \times a_1$ になる。これは、図 1 6 (a) で算出した変位量と同じである。よって、非球面軸の変位量は、第 1 の回転軸 AX_{R1} のチルトの影響を受けない。各面の非球面軸の変位量についても同様である。よってこの場合、各面の非球面軸の変位量は偏心量を正確に反映している。

[0322] よって、計測軸 AX_M に対する第 1 の回転軸 AX_{R1} の微小のチルトがあっても問題なく被検光学系の偏心量を求めることができる。

[0323] また、被検光学系を回転させたときに、第 1 の回転軸 AX_{R1} にはブレが生じないことが望ましい。仮にブレが生じたとしても、第 1 の回転軸 AX_{R1} に生じたブレの量が微量の場合は、実用上問題ない。図 17 は計測軸に対して第 1 の回転軸がブレている状態を示す図である。

[0324] 第 1 の回転軸 AX_{R1} で発生するブレは、計測軸 AX_M に対するシフトとチルトで表すことができる。例えば、計測軸 AX_M に対して第 1 の回転軸 AX_{R1} が距離 T でシフトし、角度 θ でチルトしているとする。この場合、非球面面頂 92 の変位量 $Y1$ は、 $Y1 = -y1 + T - y1 \times \cos \theta$ になる。ただし、上述のように、 θ が 1° 程度であっても、図 16 (a) で算出した変位量との変化は 0.02% 以下である。よってこの場合、非球面面頂 92 の変位量は偏心量をほぼ正確に反映している。

[0325] また、非球面軸 93 の変位量 $A1$ は、 $A1 = (-a1 + \theta) - (a1 - \theta) = -2 \times a1$ になる。これは、図 16 (a) で算出した変位量と同じである。よって、非球面軸の変位量は、第 1 の回転軸 AX_{R1} のチルトの影響を受けない。各面の非球面軸の変位量についても同様である。よって、この場合、非球面軸 93 の変位量は偏心量を正確に反映している。

[0326] なお、非球面面頂 92 以外の非球面面頂では、変位 95 が余分に発生する。例えば、非球面面頂 94 における変位 95 は $d4 \sin \theta$ になる。よって、非球面面頂 94 における変位量は、 $-y4 + T - y4 \times \cos \theta + d4 \sin \theta$ になる。但し $d4$ は、非球面面頂 92 と非球面面頂 94 の計測軸 AX_M 方向の距離である。つまり、計測軸 AX_M 方向の距離の $\sin \theta$ 倍だけ変位量加わる。

[0327] このことから、第 1 の回転軸 AX_{R1} とは別の仮想的な回転軸 AX_I が生じたと考えることができる。仮想的な回転軸 AX_I は、計測軸 AX_M に対し距離 $T/2$ でシフトし、角度 $\theta/2$ でチルトした軸である。この仮想的な回転軸 AX_I 周りに被検光学系が回転していると考えられる。よって、第 1 の

収差成分から仮想的な回転軸 AX_1 周りの回転に伴う各面の変位量を求められる。この変位量を元に被検光学系の仮想的な回転軸 AX_1 基準の偏心量を求めることができる。よって、計測軸に対し第1の回転軸がチルトしても実用上問題にならない。

[0328] また、一組の照射位置から光束を照射する場合でも、第1の回転を行うことができる。第1の回転の実行例について、実行例1と実行例2を用いて説明する。

[0329] 図18は実行例1のフローチャートを示す図である。実行例1では、まず、一方の照射位置で第1の回転を行って、第1の回転前の波面データと第1の回転後の波面データを取得する。その後、照射位置を変えて、他方の照射位置で第1の回転を行って、第1の回転前の波面データと第1の回転後の波面データを取得する。

[0330] ステップS100は、ステップS110、ステップS121、ステップS122、ステップS130、ステップS141、ステップS142、ステップS150及びステップS151を有する。

[0331] ステップS100では、ステップS110、ステップS121、ステップS150、ステップS110及びステップS122を実行する。これにより、照射位置Pにおいて、第1の回転前の波面データ $WFD\theta_1$ と第1の回転後の波面データ $WFD\theta_2$ が取得される。

[0332] ステップS122の実行が終了した状態は、第1の回転後の状態である。そこで、ステップS151を実行して、被検光学系を第1の回転を行う前の状態に戻す。

[0333] そして、ステップS130、ステップS141、ステップS150、ステップS130及びステップS142を実行する。これにより、照射位置P'において、第1の回転前の波面データ $WFD'\theta_1$ と第1の回転後の波面データ $WFD'\theta_2$ が取得される。

[0334] このように、実行例1では、第1の回転前に、光源を0x0y方向に駆動して、任意の0x0y座標に光源を位置させて、参照用データを取得する。すなわち

、任意の物体高座標($0x, 0y$)で参照用データを取得する。その後、第1の回転を行って、被検光学系を回転させる。

[0335] そして、第1の回転後に計測用データを取得する。この時、光源の座標、すなわち物体高座標($0x, 0y$)は、第1の回転前と第1の回転後で変わっていない。よって、第1の回転前と同じ物体高座標($0x, 0y$)で計測用データが取得される。

[0336] その後、第1の回転前の状態に戻し、光源を $0x0y$ 方向に駆動し、最初の $0x0y$ 座標とは異なる座標に光源を位置させて、参照用データを取得する。すなわち、最初の物体高座標($0x, 0y$)とは異なる物体高座標($0x', 0y'$)で、参照用データを取得する。その後、第1の回転を行って、計測用データを取得する。

[0337] このように、実行例1では、参照用データの取得と計測用データの取得とを、交互に繰り返して行う。そして、全ての物体高座標で参照用データの取得と計測用データの取得を完了した後に、波面解析を実施する。

[0338] なお、図18に示すフローチャートでは、ステップS122の実行後の回転状態は、第1の回転後の状態になっている。そこで、ステップS151を実行せずに、ステップS130とステップS142を実行して波面データ $WFD' \theta 2$ を取得しても良い。その後、ステップS151を実行して、被検光学系を第1の回転前の状態に戻す。そして、ステップS130とステップS141を実行して、波面データ $WFD' \theta 1$ を取得しても良い。

[0339] このように、実行例1では、照射位置が複数の場合であっても、各々の照射位置において、第1の回転前の波面データと第1の回転後の波面データを取得できる。第1の回転前の波面データを参照用データ、第1の回転後の波面データを計測用データとして、波面収差を解析することで、設計収差、システム収差及び受光光学系の偏心収差が除去できる。

[0340] 図19は実行例2のフローチャートを示す図である。実行例2では、まず、一方の照射位置と他方の照射位置で波面データを取得する。その後、第1の回転を行って、再び、一方の照射位置と他方の照射位置で波面データを取

得する。

- [0341] ステップS 1 0 0は、ステップS 1 1 0、ステップS 1 2 1、ステップS 1 2 2、ステップS 1 3 0、ステップS 1 4 1、ステップS 1 4 2及びステップS 1 5 0を有する。
- [0342] ステップS 1 0 0では、まず、ステップS 1 1 0、ステップS 1 2 1、ステップS 1 3 0及びステップS 1 4 1を実行する。これにより、第1の回転前の状態で、照射位置Pにおける波面データ $WFD\theta 1$ と照射位置P'における波面データ $WFD'\theta 1$ が取得される。
- [0343] 次に、ステップS 1 5 0を実行して、被検光学系を回転させる。続いて、ステップS 1 1 0、ステップS 1 2 2、ステップS 1 3 0及びステップS 1 4 2を実行する。これにより、第1の回転後の状態で、照射位置Pにおける波面データ $WFD\theta 2$ と照射位置P'における波面データ $WFD'\theta 2$ が取得される。
- [0344] このように、実行例2では、第1の回転前に、光源を0x0y方向に駆動して、複数の物体高座標に光源を位置させて、参照用データを取得する。すなわち、複数の物体高座標で参照用データの取得を全て完了する。その後、第1の回転を行って、被検光学系を回転させる。
- [0345] 第1の回転後に、再び光源を0x0y方向に駆動して測定用データの取得を行う。測定用データの取得では、光源を第1の回転前と同一の0x0y座標に位置させる。すなわち、第1の回転前と同じ物体高座標で測定用データの取得を全て完了させる。そして、測定用データの取得が全て完了した後に、波面解析を実施する。
- [0346] このように、実行例2では、参照用データの取得を全て取得した後に、第1の回転を実行する。
- [0347] そして、対称な物体高座標について、所定の収差成分の和もしくは差をとることで、被検光学系の偏心に伴う偏心収差のうち偏心量の1乗に比例する収差成分、すなわち、第1の収差成分が抽出できる。
- [0348] なお、図19に示すフローチャートでは、ステップS 1 5 0の実行後の照

射位置はP' になっている。そこで、ステップS 1 4 2を実行して、波面データWFD' θ 2を取得しても良い。そして、ステップS 1 1 0とステップS 1 2 2を実行して波面データWFD θ 2を取得しても良い。

[0349] このように、実行例2では、照射位置が複数の場合であっても、各々の照射位置において、第1の回転前の波面データと第1の回転後の波面データを取得できる。第1の回転前の波面データを参照用データ、第1の回転後の波面データを計測用データとして、波面収差を解析することで、設計収差、システム収差及び受光光学系の偏心収差が除去できる。

[0350] また、本実施形態の計測方法では、一方の照射位置と他方の照射位置とをそれぞれ移動させ、移動後の照射位置で波面データを取得することが好ましい。

[0351] 1つのレンズでは、レンズ面が2面ある。2つのレンズ面が非球面の場合、各レンズ面でシフトとチルトが生じると、偏心自由度の数は8になる。また、2つのレンズでは、4つのレンズ面が非球面の場合、各レンズ面でシフトとチルトが生じると、偏心自由度の数は16になる。このように、偏心するレンズ面の数が増加するにつれて、偏心自由度の数が増える。

[0352] 偏心自由度の数が増えるということは、式(9-1)～(9-9)の $\Delta_1 \sim \Delta_j$ においてjの数が増えることを意味する。ここで、 $\Delta_1 \sim \Delta_j$ は未知数であるから、1次方程式の数が最大で9だと Δ_9 までは求めることができるが、 Δ_{10} 以上は求めることができない。

[0353] そこで、一方の照射位置と他方の照射位置とを移動させ、移動した位置で波面データを取得する。この場合、移動前の照射位置(0x1, 0y1)と(-0x1, -0y1)から、以下の式(9-1')～(9-9')が得られる。

$$\begin{aligned} & w_{11}(0x1, 0y1, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ & = \Delta_1 B_{111}(0x1, 0y1) + \Delta_2 B_{121}(0x1, 0y1) + \dots + \Delta_j B_{1j1}(0x1, 0y1) \quad (9-1') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & w_{21}(0x1, 0y1, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\ & = \Delta_1 B_{211}(0x1, 0y1) + \Delta_2 B_{221}(0x1, 0y1) + \dots + \Delta_j B_{2j1}(0x1, 0y1) \quad (9-2') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &) \\
 & w_{31}(0x1, 0y1, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = \Delta_1 B_{311}(0x1, 0y1) + \Delta_2 B_{321}(0x1, 0y1) + \dots + \Delta_j B_{3j1}(0x1, 0y1) \quad (9-3')
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &) \\
 & w_{41}(0x1, 0y1, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = \Delta_1 B_{411}(0x1, 0y1) + \Delta_2 B_{421}(0x1, 0y1) + \dots + \Delta_j B_{4j1}(0x1, 0y1) \quad (9-4')
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &) \\
 & w_{51}(0x1, 0y1, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = \Delta_1 B_{511}(0x1, 0y1) + \Delta_2 B_{521}(0x1, 0y1) + \dots + \Delta_j B_{5j1}(0x1, 0y1) \quad (9-5')
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &) \\
 & w_{61}(0x1, 0y1, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = \Delta_1 B_{611}(0x1, 0y1) + \Delta_2 B_{621}(0x1, 0y1) + \dots + \Delta_j B_{6j1}(0x1, 0y1) \quad (9-6')
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &) \\
 & w_{71}(0x1, 0y1, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = \Delta_1 B_{711}(0x1, 0y1) + \Delta_2 B_{721}(0x1, 0y1) + \dots + \Delta_j B_{7j1}(0x1, 0y1) \quad (9-7')
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &) \\
 & w_{81}(0x1, 0y1, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = \Delta_1 B_{811}(0x1, 0y1) + \Delta_2 B_{821}(0x1, 0y1) + \dots + \Delta_j B_{8j1}(0x1, 0y1) \quad (9-8')
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &) \\
 & w_{91}(0x1, 0y1, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = \Delta_1 B_{911}(0x1, 0y1) + \Delta_2 B_{921}(0x1, 0y1) + \dots + \Delta_j B_{9j1}(0x1, 0y1) \quad (9-9')
 \end{aligned}$$

[0354] 更に、移動後の照射位置(0x2, 0y2)と(-0x2, -0y2)から、以下の以下の式 (9-1'') ~ (9-9'') が得られる。

$$\begin{aligned}
 & w_{11}(0x2, 0y2, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j) \\
 & = \Delta_1 B_{111}(0x2, 0y2) + \Delta_2 B_{121}(0x2, 0y2) + \dots + \Delta_j B_{1j1}(0x2, 0y2) \quad (9-1'')
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &) \\
 & w_{21}(0x2, 0y2, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_j)
 \end{aligned}$$

$$= \Delta_1 B_{211}(0x2, 0y2) + \Delta_2 B_{221}(0x2, 0y2) + \cdots + \Delta_j B_{2j1}(0x2, 0y2) \quad (9-2'')$$

$$w_{31}(0x2, 0y2, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ = \Delta_1 B_{311}(0x2, 0y2) + \Delta_2 B_{321}(0x2, 0y2) + \cdots + \Delta_j B_{3j1}(0x2, 0y2) \quad (9-3'')$$

$$w_{41}(0x2, 0y2, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ = \Delta_1 B_{411}(0x2, 0y2) + \Delta_2 B_{421}(0x2, 0y2) + \cdots + \Delta_j B_{4j1}(0x2, 0y2) \quad (9-4'')$$

$$w_{51}(0x2, 0y2, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ = \Delta_1 B_{511}(0x2, 0y2) + \Delta_2 B_{521}(0x2, 0y2) + \cdots + \Delta_j B_{5j1}(0x2, 0y2) \quad (9-5'')$$

$$w_{61}(0x2, 0y2, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ = \Delta_1 B_{611}(0x2, 0y2) + \Delta_2 B_{621}(0x2, 0y2) + \cdots + \Delta_j B_{6j1}(0x2, 0y2) \quad (9-6'')$$

$$w_{71}(0x2, 0y2, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ = \Delta_1 B_{711}(0x2, 0y2) + \Delta_2 B_{721}(0x2, 0y2) + \cdots + \Delta_j B_{7j1}(0x2, 0y2) \quad (9-7'')$$

$$w_{81}(0x2, 0y2, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ = \Delta_1 B_{811}(0x2, 0y2) + \Delta_2 B_{821}(0x2, 0y2) + \cdots + \Delta_j B_{8j1}(0x2, 0y2) \quad (9-8'')$$

$$w_{91}(0x2, 0y2, \Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_j) \\ = \Delta_1 B_{911}(0x2, 0y2) + \Delta_2 B_{921}(0x2, 0y2) + \cdots + \Delta_j B_{9j1}(0x2, 0y2) \quad (9-9'')$$

[0355] その結果、1次方程式の数は最大で18になるので、より多くの自由度を求めることができる。

[0356] このように、照射位置を増やすことで、1次方程式の数を増やすことができる。そのため、本実施形態の計測方法によれば、計測可能な偏心自由度を増やすことができる。

[0357] また、本実施形態の計測方法では、一方の照射位置を移動させ、移動後の照射位置で波面データを全て取得し、その後、他方の照射位置を移動させ、移動後の照射位置で波面データを全て取得することが好ましい。

[0358] 本実施形態の計測方法のフローチャートを図20に示す。なお、図20では、ステップS200以降は省略している。また、図21は照射位置の移動の様子を示す図であって、(a)は一方の照射位置の移動前の位置を示し、(b)は一方の照射位置の移動後の位置を示し、(c)は他方の照射位置の移動前の位置を示し、(d)は他方の照射位置の移動後の位置を示している。

[0359] 本実施形態の計測方法では、ステップS100は、ステップS111、ステップS123、ステップS131、ステップS143、ステップS160、ステップS161、ステップS170及びステップS171を有する。

[0360] ステップS100では、照射位置 P_n と照射位置 P'_n から光束が照射される。ここで、照射位置 P_n は一方の照射位置で、照射位置 P'_n は他方の照射位置である。また、照射位置 P_n と照射位置 P'_n は計測軸に対して対称になっている。

[0361] ステップS111の実行の前に、照射位置を変える回数 N が使用者によって設定される。回数 N は予定回数である。また、 n の値が0に設定される。 n は、照射位置の移動回数を表している。

[0362] 続いて、ステップS111が実行される。ステップS111では、照射位置 P_n から光束が照射される。具体的には、図21(a)に示すように、照射位置 $P_0(0x0, 0y0, 0)$ に光源が位置する。被検光学系2は計測軸に対して偏心しているので、被検光学系2から非平面波 9_0 が出射する。非平面波 9_0 は受光系3で検出される。

[0363] ステップS111が終わると、ステップS123が実行される。ステップS123では、非平面波 9_0 に基づいて波面データ WFD_n が取得される。その後、ステップS160が実行される。

[0364] ステップS160では、 n と N とが比較される。 n と N が等しくない場合

、照射位置の移動回数が予定回数に達していない。そこで、現時点での移動回数に1が加えられ、ステップS170が実行される。ステップS170では、照射位置を移動させる。移動量は、予め使用者によって設定しておけば良い。

[0365] ステップS170の実行後、再びステップS111が実行される。この時、照射位置が移動しているので、図21(b)に示すように、照射位置P1($0x1, 0y1, 0$)に光源が位置する。被検光学系2から非平面波 9_1 が出射する。非平面波 9_1 は受光系3で検出される。

[0366] ここで、照射位置P1($0x1, 0y1, 0$)は照射位置P0($0x0, 0y, 0$)と異なる。そのため、非平面波 9_1 は非平面波 9_0 と異なる。

[0367] ステップS111が終わると、ステップS123が実行される。ステップS123では、非平面波 9_1 に基づいて波面データWFD $_n$ が取得される。照射位置の移動と波面データWFD $_n$ の取得は、 n と N が等しくなるまで行われる。取得された波面データWFD $_n$ は全て記憶される。

[0368] ステップS160において n と N が等しくなった場合、照射位置の移動が終了する。このようにして、一方の照射位置の移動と、移動後の照射位置における波面データの取得が完了する。そして、 n の値が0に設定される。

[0369] 続いて、ステップS131が実行される。ステップS131では、照射位置P' $_n$ から光束が照射される。具体的には、図21(c)に示すように、照射位置P'0($-0x0, -0y0, 0$)に光源が位置する。照射位置P'0($-0x0, -0y0, 0$)は、計測軸に対して照射位置P0($0x0, 0y0, 0$)と対称な位置である。被検光学系2から非平面波 $9'_0$ が出射する。非平面波 $9'_0$ は受光系3で検出される。

[0370] ここで、照射位置P'0($-0x0, -0y0, 0$)は、照射位置P0($0x0, 0y0, 0$)や照射位置P1($0x1, 0y1, 0$)と異なる。そのため、非平面波 $9'_0$ は、非平面波 9_0 や非平面波 9_1 と異なる。

[0371] ステップS131が終わると、ステップS143が実行される。ステップS143では、非平面波 $9'_0$ に基づいて波面データWFD' $_n$ が取得される

。その後、ステップS 1 6 1 が実行される。

[0372] ステップS 1 6 1 では、 n と N とが比較される。 n と N が等しくない場合、照射位置の移動回数が予定回数に達していない。そこで、現時点での移動回数に1が加えられ、ステップS 1 7 1 が実行される。ステップS 1 7 1 では、照射位置を移動させる。移動量は、予め使用者によって設定しておけば良い。

[0373] ステップS 1 7 1 の実行後、再びステップS 1 3 1 が実行される。この時、照射位置が移動しているので、図2 1 (d)に示すように、照射位置 $P' 1 (-0x1, -0y1, 0)$ に光源が位置する。照射位置 $P' 1 (-0x1, -0y1, 0)$ は、計測軸に対して照射位置 $P 1 (0x1, 0y1, 0)$ と対称な位置である。被検光学系2から非平面波 $9' 1$ が出射する。非平面波 $9' 1$ は受光系3で検出される。

[0374] ここで、 $P' 1 (-0x1, -0y1, 0)$ は、照射位置 $P' 0 (-0x0, -0y0, 0)$ 、 $P 0 (0x0, 0y0, 0)$ 及び照射位置 $P 1 (0x1, 0y1, 0)$ と異なる。そのため、非平面波 $9' 1$ は、非平面波 $9' 0$ 、非平面波 $9 0$ 及び非平面波 $9 1$ と異なる。

[0375] ステップS 1 3 1 が終わると、ステップS 1 4 3 が実行される。ステップS 1 4 3 では、非平面波 $9' 1$ に基づいて波面データ $WFD' n$ が取得される。照射位置の移動と波面データ $WFD' n$ の取得は、 n と N が等しくなるまで行われる。取得された波面データ $WFD' n$ は全て記憶される。

[0376] ステップS 1 6 1 において n と N が等しくなった場合、照射位置の移動が終了する。このようにして、他方の照射位置の移動と、移動後の照射位置における波面データの取得が完了する。

[0377] なお、図2 1 では、照射位置 $P 1 (0x1, 0y1, 0)$ での照射が終了した後、照射位置 $P' 0 (-0x0, -0y0, 0)$ に移動している。しかしながら、照射位置 $P' 1 (-0x1, -0y1, 0)$ に移動し、その後、照射位置 $P' 0 (-0x0, -0y0, 0)$ に移動しても良い。

[0378] このように、照射位置を増やすことで、1次方程式の数を増やすことができる。そのため、本実施形態の計測方法によれば、計測可能な偏心自由度を増やすことができる。

[0379] また、本実施形態の計測方法では、一方の照射位置と他方の照射位置の各々で波面データを取得し、その後、一方の照射位置と他方の照射位置を移動させ、移動後の照射位置の各々で波面データを取得することが好ましい。

[0380] 本実施形態の計測方法のフローチャートを図22に示す。なお、ステップS200以降は省略している。また、図23は照射位置の移動の様子を示す図であって、(a)は一方の照射位置の移動前の位置を示し、(b)は他方の照射位置の移動前の位置を示し、(c)は一方の照射位置の移動後の位置を示し、(d)は他方の照射位置の移動後の位置を示している。

[0381] 本実施形態の計測方法では、ステップS100は、ステップS111、ステップS123、ステップS131、ステップS143、ステップS162及びステップS172を有する。

[0382] まず、ステップS111が実行される。ステップS111では、照射位置 P_n から光束が照射される。具体的には、図23(a)に示すように、照射位置 $P_0(0x0, 0y0, 0)$ に光源が位置する。

[0383] ステップS111が終わると、ステップS123が実行される。ステップS123では、非平面波 9_0 に基づいて波面データ WFD_n が取得される。

[0384] 続いて、ステップS131が実行される。ステップS131では、照射位置 P'_n から光束が照射される。具体的には、図23(b)に示すように、照射位置 $P'_0(-0x0, -0y0, 0)$ に光源が位置する。

[0385] ステップS131が終わると、ステップS143が実行される。ステップS143では、非平面波 $9'$ に基づいて波面データ WFD'_n が取得される。その後、ステップS162が実行される。

[0386] ステップS162では、 n と N とが比較される。 n と N が等しくない場合、照射位置の移動回数が予定回数に達していない。そこで、現時点での移動回数に1が加えられ、ステップS172が実行される。ステップS172では、照射位置を移動させる。移動量は、予め使用者によって設定しておけば良い。

[0387] ステップS172の実行後、再びステップS111が実行される。この時

、照射位置が移動しているので、図23(c)に示すように、照射位置 $P_1(0x_1, 0y_1, 0)$ に光源が位置する。

[0388] ステップS111が終わると、ステップS123が実行される。ステップS123では、非平面波 9_1 に基づいて波面データ WFD_n が取得される。

[0389] 続いて、ステップS131が実行される。ステップS131では、照射位置 P'_n から光束が照射される。この時、照射位置が移動しているので、図23(d)に示すように、照射位置 $P'_1(-0x_1, -0y_1, 0)$ に光源が位置する。

[0390] ステップS131が終わると、ステップS143が実行される。ステップS143では、非平面波 $9'_1$ に基づいて波面データ WFD'_n が取得される。その後、ステップS162が実行される。

[0391] 照射位置の移動、波面データ WFD_n 及び波面データ WFD'_n の取得は、 n と N が等しくなるまで行われる。取得された波面データ WFD_n と波面データ WFD'_n は全て記憶される。

[0392] ステップS162において n と N が等しくなった場合、照射位置の移動が終了する。このようにして、一方の照射位置と他方の照射位置の移動、及び移動後の照射位置における波面データの取得が完了する。

[0393] このように、照射位置を増やすことで、1次方程式の数を増やすことができる。そのため、本実施形態の計測方法によれば、計測可能な偏心自由度を増やすことができる。

[0394] なお、図21や図23では、照射位置の移動方向は、 $0z$ 軸に近づく方向になっている。しかしながら、照射位置の移動方向は、 $0z$ 軸から離れる方向でも良い。また、図21や図23では、4つの照射位置を示したが、照射位置は4つに限られない。また、原点 $(0, 0, 0)$ から光束を照射しても良い。

[0395] 図24は照射位置の移動の様子を示す図であって、(a)は照射位置の移動方向が一方向の場合を示し、(b)は照射位置の移動方向が二方向の場合を示している。

[0396] 照射位置の一方向への移動を図24(a)に示す。図24(a)では、照射位置の移動を負の最大物体高座標から開始している。そして、正の最大物

体高座標へ向かって照射位置が移動する。すなわち、照射位置 $P'4(-0x4, 0, 0)$ 、照射位置 $P0(0, 0, 0)$ 、照射位置 $P4(0x4, 0, 0)$ の順に照射位置が移動している。

[0397] 照射位置の二方向への移動を図 24 (b) に示す。図 23 (b) では、照射位置の移動を軸上から開始している。そして、正の最大物体高へ向かって照射位置が移動する。次に、照射位置を軸上 ($0z$ 軸上) に戻し、負の最大物体高へ向かって照射位置が移動する。すなわち、照射位置 $P0(0, 0, 0)$ から照射位置 $P4(0x4, 0, 0)$ に向かって照射位置が移動し、続いて、照射位置 $P0(0, 0, 0)$ から照射位置 $P'4(-0x4, 0, 0)$ に向かって照射位置が移動する。

[0398] なお、図 24 (a) において、照射位置 $P4(0x4, 0, 0)$ から照射位置 $P4'(-0x4, 0, 0)$ までの間で、照射位置をランダムに移動させても良い。同様に、図 23 (b) において、照射位置 $P0(0, 0, 0)$ から照射位置 $P4(0x4, 0, 0)$ までの間や、照射位置 $P0(0, 0, 0)$ から照射位置 $P'4(-0x4, 0, 0)$ までの間で、照射位置をランダムに移動させても良い。

[0399] このように、照射位置を増やすことで、1 次方程式の数を増やすことができる。そのため、計測可能な偏心自由度を増やすことができる。

[0400] 図 25 は照射位置のパターンを示す図であって、(a) は照射位置が二方向の状態を示し、(b) は照射位置が同心円状の状態を示し、(c) は照射位置が格子状の状態を示している。

[0401] 図 25 (a) では、投光系 1 における照射位置は、 $0x$ 軸上と $0y$ 軸上のみに位置している。図 25 (b) と図 25 (c) では、投光系 1 における照射位置は、 $0x$ 軸と $0y$ 軸との間にも位置している。図 25 (b) では、照射位置は同心状、あるいは、放射状に位置している。図 25 (c) では、照射位置は格子状に位置している。

[0402] また、投光系 1 における照射位置の移動のピッチの目安は、被検光学系の有効口径程度から、有効口径の $1/50$ 程度であれば良い。また、高い精度で偏心量の計測を行う場合は、移動のピッチを小さめにして、より多くの波面データを取得するようにする。

[0403] また、正の最大物体高と負の最大物体高のみで波面データの取得を行えば、第1の収差成分を抽出することができる。そのため、計測を短時間で終了させたい場合は、照射する光束の径は、被検光学系の直径と同程度でよい。ただし、この場合、光束が被検光学系の有効口径外でけられないように、物体高を小さめにしておく。

[0404] このように、照射位置を増やすことで、1次方程式の数を増やすことができる。そのため、計測可能な偏心自由度を増やすことができる。

[0405] また、本実施形態の計測方法では、第1の照射状態で波面データの取得が行われ、第1の照射状態では、光束の中心光線が計測軸と平行であることが好ましい。

[0406] 第1の照射状態では、光束の中心光線が計測軸と平行になっている。すなわち、図6に示すように、投光系1の照射位置 $P(0x, 0y, 0)$ から出射する光束の中心光線 CR は、 $0z$ 軸、すなわち計測軸と平行になっている。この場合、 $0x0y$ 面内で照射位置 $P(0x, 0y, 0)$ を変化させると、被検光学系2から出射する光束が変化する。ここで、光束の受光系3への入射角度は変化するが、入射位置はほとんど変化しない。そのため、受光系3と、受光系3に入射する光束との位置調整が少なく済む。

[0407] また、本実施形態の計測方法では、第2の照射状態で波面データの取得が行われ、第2の照射状態では、光束の中心光線が計測軸と所定の角度で交わることが好ましい。

[0408] 第2の照射状態では、光束の中心光線が計測軸と所定の角度で交わっている。図26は光束を被検光学系に照射している様子を示す図であって、(a)は角度 θ での照射を示し、(b)は角度 θ' での照射を示している。図26に示すように、投光系1の照射位置 $P(0x, 0y, 0)$ から出射する光束の中心光線 CR は、 $0z$ 軸、すなわち計測軸と角度 θ で交わるようになっている。なお、 $|\theta| = |\theta'|$ である。

[0409] 図26でも、照射位置 $P(0x, 0y, 0)$ から球面波4が出射している。ただし、図6と異なる位置及び角度で、光束が被検光学系2の照射されている。その

ため、被検光学系 2 から出射する非平面波 8、8' は、図 6 の非平面波 7、7' と異なる。

[0410] なお、一方の照射位置と他方の照射位置とをそれぞれ移動させ、移動後の照射位置で波面データを取得する場合は、移動後の照射位置で所定の角度を変えて波面データを取得することが望ましい。

[0411] また、本実施形態の計測方法では、第 2 の抽出工程は、所定の関数系を用いて行われ、所定の関数系は、第 1 の収差成分を示す関数系であって、一方の照射位置における所定の収差成分と、他方の照射位置における所定の収差成分とを、所定の関数系に当てはめることが好ましい。

このようにすることで、偏心量 Δ の 1 乗に比例する量、すなわち第 1 の収差成分を抽出することができる。

[0412] また、本実施形態の計測方法では、取得工程は第 2 の回転を含み、第 2 の回転では、計測軸と直交する軸の周りに被検光学系を 180 度回転させ、第 2 の回転前の波面データと、第 2 の回転後の波面データと、を取得することが好ましい。

[0413] 本実施形態の計測方法のフローチャートを図 27 に示す。本実施形態の計測方法では、ステップ S100 は、ステップ S110、ステップ S123、ステップ S124 及びステップ S180 を有する。なお、ステップ S200、ステップ S300 及びステップ S400 については、詳細な説明を省略する。

[0414] 図 28 は第 2 の回転を示す図であって、(a) は第 2 の回転を行う前の状態を示し、(b) は第 2 の回転を行った後の状態を示している。

[0415] ここで、便宜上、被検光学系 20 に「前」と「後ろ」の呼び方を付けることにする。例えば、被検光学系 20 に光束を照射する場合、レンズ 23 側から光束を照射することもできれば、レンズ 25 側から光束を照射することもできる。レンズ 23 側から光束を照射する場合を「前」とすると、レンズ 25 側から光束を照射する場合は「後ろ」になる。

[0416] 「前」から被検光学系 20 へ光束を照射した場合（以下、「前側計測」と

する)と、「後ろ」から被検光学系20へ光束を照射した場合(以下、「後ろ側計測」とする)とで、各レンズの偏心収差感度は変わる。

[0417] 被検光学系20が6つのレンズ面から構成されている場合、「前」から順にレンズ面に番号を名づけると、第1面、第2面、・・・、第6面となる。前側計測において光束が最初に透過する面は第1面である。後ろ側計測において光束は第6面、第5面・・・の順に透過し、第1面は最後に透過する面となる。

[0418] 被検光学系20の各レンズ面で物点はリレーされている。そのため、あるレンズ面に偏心があると、そのレンズ面の後ろ側にリレーされた物点は、理想の位置から横ズレする。そして、これが原因となって、以降の後ろのレンズ面で収差が発生すると考えることができる。すなわち偏心によって生じる収差は、レンズ面の順序が関係している。これが、被検光学系20を前側計測した際と後ろ側計測した際とで、偏心収差感度が変わる理由である。本実施形態の計測方法では、このことを利用して、第1の収差成分に関する情報量を増やしている。

[0419] ステップS110では、図28(a)に示すように、照射位置 $P(0x, 0y, 0)$ から光束を被検光学系20に照射する。このとき、投光系10とレンズ23が対向するように、被検光学系20が配置されている。よって、レンズ23側から、被検光学系20に光束が照射される。被検光学系20から非平面波51が出射する。非平面波51は受光系30に入射する。

[0420] 続いて、ステップS123を実行する。これにより、波面データ $WFD\theta_3$ が取得される。

[0421] 次に、ステップS180を実行する。ステップS180では第2の回転を行う。第2の回転では、計測軸と直交する軸の周りに被検光学系20を回転させる。回転させる角度は 180° である。第2の回転を行うと、投光系10とレンズ25が対向するように、被検光学系20が配置される。よって、レンズ25側から、被検光学系20に光束が照射される。なお、投光系10と受光系30の位置は動かない。

- [0422] ステップS 1 8 0の終了後、ステップS 1 1 0を実行する。ステップS 1 1 0では、図2 8 (b)に示すように、照射位置 $P(0x, 0y, 0)$ から光束を被検光学系2 0に照射する。波面6 0は被検光学系2 0に入射する。被検光学系2 0から非平面波5 5が出射する。非平面波5 6は非平面波5 1とは異なる。
- [0423] 続いて、ステップS 1 2 4を実行する。これにより、波面データ $WFD\theta 4$ が取得される。
- [0424] ここで、波面データ $WFD\theta 3$ と波面データ $WFD\theta 4$ とは異なる。よって、最終的に、第1の収差成分を2つ得ることができる。
- [0425] このように、本実施形態の計測方法では、異なる波面データが取得されるに光束を照射するので、第1の収差成分の数を増やすことができる。そのため、計測可能な偏心自由度を増やすことができる。
- [0426] なお、第2の回転を行う場合、計測結果の扱いについては注意する必要がある。図2 9は第2の回転による座標軸の変化を説明するための図であって、(a)は第2の回転を行う前の状態を示し、(b)は第2の回転を行った後の状態を示している。ここでは、 $0y$ 軸の周りに被検光学系を 180° 回転させている。
- [0427] 第2の回転を行う前の状態では、前側計測が行われる。前側計測では、図2 9 (a)に示すように、原点 $(0, 0, 0)$ 側に、レンズL 1が配置され、レンズL 1に続いてレンズL 2が配置されている。よって、レンズ面は、原点 $(0, 0, 0)$ 側から順に、レンズ面L 1₁、レンズ面L 1₂、レンズ面L 2₁、レンズ面L 2₂となる。ここで、座標軸 X_{L2} と $0x$ 軸は同じ方向である。
- [0428] この状態で照射位置 $P(0x, 0y, 0)$ から、被検光学系に光束が照射される。光束は、レンズL 1、レンズL 2の順に照射される。
- [0429] 一方、第2の回転を行った後の状態では、後ろ側計測が行われる。後ろ側計測では、図2 9 (b)に示すように、原点 $(0, 0, 0)$ 側に、レンズL 2が配置され、レンズL 2に続いてレンズL 1が配置されている。よって、レンズ面は、原点 $(0, 0, 0)$ 側から順に、レンズ面L 2₂、レンズ面L 2₁、レンズ面L 2

2、レンズ面 L_{21} となる。ここで、座標軸 X_{L2} は Ox 軸と逆方向になっている。

[0430] 前側計測と後ろ側計測とでは、座標軸 Y_{L2} の向きは変わらないが、座標軸 X_{L2} の向きが逆向きになる。ここで、前側計測では、レンズ L_2 の球心がプラス側に位置していたとする。この場合、後ろ側計測では、座標軸 X_{L2} を基準にすると、レンズ L_5 の球心はプラス側に位置している。しかしながら、 Ox 軸を基準にすると、後ろ側計測では、レンズ L_2 の球心はマイナス側に位置することになる。

[0431] なお、 Ox 軸の周りに被検光学系を回転させた場合は、座標軸 X_{L2} の向きは変わらないが、座標軸 Y_{L2} の向きが 180° 異なる。よって、 Oy 軸を基準にすると、例えば、前側計測での球心位置の符号がプラスだと、後ろ側計測での球心位置の符号はマイナスになる。

[0432] このようなことから、後ろ側計測で得た計測結果については、ステップS200以降の処理において、数値の符号を反転させる必要がある。

[0433] また、本実施形態の計測方法では、第2の回転前の波面データの取得時における偏心量と、第2の回転後の波面データの取得時における偏心量とは、両者の絶対値が同一であることが好ましい。

[0434] 上述のように、第1の回転では、被検光学系を計測軸の周りに回転させている。このようにすることで、この回転に伴って生じる変位量を各レンズについて求めることができる。第2の回転による計測でも、第1の回転による計測と同一の計測系を利用する。第2の回転では、被検光学系の前後が逆になるよう、被検光学系を配置する。そして、第1の回転での計測と同様の処理を行うことで、第1の収差成分を抽出する。

[0435] ただし、前側計測の際と後ろ側計測の際とで、レンズと回転軸との距離の絶対値を同じにする必要がある。例えば、被検光学系が6つのレンズ面を有しているとする。ここで、6つのレンズ面は、いずれも球面である。そして、前側計測時の第1面、第2面、・・・、第6面の偏心量が、 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) ・・・ (X_6, Y_6) であったとする。なお、各レンズ

面の偏心量は第1の回転軸基準のX Y座標で表した。

[0436] 後ろ側計測の際は、前側計測の際の被検光学系を、Y軸周りに回転させる。これにより被検光学系の向きを前後逆にする。そして、後ろ側計測を行うが、その際、後ろ側計測の際の各レンズ面の偏心量が、 $(-X_1, Y_1)$ 、 $(-X_2, Y_2) \cdots (-X_6, Y_6)$ となるように、被検光学系を配置する。

[0437] 後ろ側計測を行う計測の配置の際は、所定の距離の絶対値が、後ろ側計測時と前側計測時とで同じになるように、被検光学系を配置する必要がある。所定の距離とは、前側計測の際の被検光学系の各レンズ面の球心と第1の回転軸との距離である。

[0438] なお、本実施形態の計測方法においても、第1の回転を行っても良い。前側計測で第1の回転の前後で複数の波面データを取得する。続いて、第2の回転を行い、後ろ側計測が可能な状態にする。第2の回転によって、被検光学系の前後が逆になる。

[0439] レンズ面が球面の場合、レンズ面が偏心していると、第1の回転によって球心が移動する。図30は第1の回転による球心の移動を示す図であって、(a)は前側計測時での球心の移動を示し、(b)は後ろ側計測時での球心の移動を示している。なお、図30では、球心の近傍のレンズ面を円で示している。よって、2つの円は、各々、同一のレンズ面の一部を表示しているに過ぎない。

[0440] 前側計測時の球心の動きを、図30(a)を用いて説明する。第1の回転前では、球心96は0x0y座標系の第1象限に位置している。そして、第1の回転後では、球心96は第3象限に位置している。球心96の移動量は δf で、x成分は δX 、y成分は δY である。

[0441] 後ろ側計測時の球心の動きを、図30(b)を用いて説明する。第1の回転前では、球心96は0x0y座標系の第2象限に位置している。そして、第1の回転後では、球心96は第4象限に位置している。球心96の移動量は δr で、x成分は δX 、y成分は δY である。

[0442] 上述のように、第2の回転を行う計測では、所定の距離の絶対値が、後ろ側計測時と前側計測時とで同じになるように、被検光学系が配置されている。よって、 $|\delta f| = |\delta r|$ となる。

[0443] なお、球心96の移動を示すベクトルにおいて、Y成分のベクトルの向きは、前側計測時と後ろ側計測時とで同じである。一方、X成分のベクトルの向きは、前側計測時と後ろ側計測時とで逆向きになる。

[0444] このようなことから、後ろ側計測で得た計測結果については、ステップS200以降の処理において、数値の符号を反転させる必要がある。

[0445] 図31は第1の回転と第2の回転による球心の動きを示す図であって、(a)は前側計測時で、第1の回転前の球心の位置を示し、(b)は前側計測時で、第1の回転後の球心の位置を示し、(c)は後ろ側計測時で、第1の回転前の球心の位置を示し、(d)は後ろ側計測時で、第1の回転後の球心の位置を示している。

[0446] なお、0x0y座標の原点は第1の回転軸の位置である。すなわち、図31は第1の回転軸に対する球心の位置を示している。また、被検レンズに非球面が含まれる場合は、非球面の第1の回転と第2の回転による面の動きは、図31と同様の図を使って、第1の回転軸に対する非球面面頂の位置と非球面軸の位置によって示すことができる。但し図31において非球面軸の位置を表示する場合は、0x軸はB方向のチルト量、0y軸はA方向のチルト量を示す。

[0447] 前側計測時で、第1の回転前の状態では、図31(a)に示すように、球心96は0x0y座標系の第1象限に位置している。この状態で第1の回転を行うと、前側計測時で、第1の回転後の状態になる。この状態では、図31(b)に示すように、球心96は0x0y座標系の第3象限に位置している。

[0448] この状態から第1の回転前の状態に戻して、第2の回転を行う。これにより、後ろ側計測時で、第1の回転前の状態になる。この状態では、図31(c)に示すように、球心96は0x0y座標系の第2象限に位置している。この状態で第1の回転を行うと、後ろ側計測時で、第1の回転後の状態になる。

この状態では、図31（d）に示すように、球心96は0x0y座標系の第4象限に位置している。

[0449] 第1の回転による球心96の変位量の絶対値は、図31（b）と図31（d）とで同じになる。また、図31（b）と図31（d）から、前側計測時と後ろ側計測時で、球心の移動ベクトルのX方向が逆ということもわかる。

[0450] そこで、後ろ側計測のX方向のシフトの偏心収差感度について符号を反転させれば、偏心量についての連立1次方程式の解は、前側計測と後ろ側計測とで同じになる。よって、前側計測の偏心量の1乗に比例する偏心収差感度と後ろ側計測の偏心量の1乗に比例する偏心収差感度を同時に使って、偏心量についての連立1次方程式を解くことができる。すなわち、より多くの偏心収差感度の手がかりを使って、多くの自由度の偏心量を高精度に求めることができる。なお、求まる偏心量は図31（a）の状態の球心位置である。

[0451] 被検光学系に非球面が含まれる場合は、非球面の偏心収差感度について、X方向のシフトとA方向のチルトの偏心収差感度について符号を反転させて偏心量についての連立1次方程式を解けばよい。求まるA方向のチルト量は同様に前側計測時の第1の回転前の第1の回転軸基準の非球面軸チルト量である。

[0452] なお、前側計測での計測が終わると第2の回転を行うが、このとき、第1の回転前の状態に戻さずに、後ろ側計測を行っても良い。この計測は、図31（d）に示すように、球心96が第4象限に位置する状態と同じである。

[0453] また、本実施形態の計測方法では、第1の抽出工程は、ゼルニケ多項式を用いて行われ、所定の収差成分は、ゼルニケ多項式の係数であることが好ましい。

[0454] 波面データは、波面収差の情報を含んでいる。そこで、波面データをゼルニケ多項式に当てはめることで、波面収差における収差成分を、球面収差や、コマ収差や、非点収差などに分解すると共に、収差成分ごとに収差量を定量化することができる。

[0455] なお、第1の回転を行って波面データを取得した場合、ゼルニケ多項式の

各項の係数は、被検光学系から出射した波面の波面収差そのものを表しているわけではない。各項の係数が表す収差成分からは、システム収差成分や被検光学系の設計収差成分は排除されている。システム収差成分や設計収差成分の排除については、既に説明したとおりである。

[0456] また、上述のように、ゼルニケ多項式を用いた場合、式（3）～（6）で示す結果が得られる。

[0457] 偏心量の1乗に比例する収差成分における偏心収差感度では、上述のように、ゼルニケ項の第2項等が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ ($z=2, 3, 7, 8, \dots$) は、以下の式（3）で表される。

$$B_{zj1}(0x, 0y) = C_{zj100} + C_{zj120}0x^2 + C_{zj111}0x0y + C_{zj102}0y^2 + \dots \quad (3)$$

[0458] また、ゼルニケ項の第4項等が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ ($z=1, 4, 5, 6, 9, \dots$) は、以下の式（4）で表される。

$$B_{zj1}(0x, 0y) = C_{zj110}0x + C_{zj101}0y + C_{zj130}0x^3 + C_{zj121}0x^20y \\ + C_{zj112}0x0y^2 + C_{zj103}0y^3 + \dots \quad (4)$$

[0459] 偏心量の2乗に比例する収差成分における偏心収差感度では、上述のように、ゼルニケ項の第2項等が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj2}(0x, 0y)$ ($z=2, 3, 7, 8, \dots$) は、以下の式（5）で表される。

$$B_{zj2}(0x, 0y) = C_{zj210}0x + C_{zj201}0y + C_{zj230}0x^3 + C_{zj221}0x^20y \\ + C_{zj212}0x0y^2 + C_{zj203}0y^3 + \dots \quad (5)$$

[0460] また、ゼルニケ項の第4項等が乗じられた項の偏心収差感度 $B_{zj2}(0x, 0y)$ ($z=1, 4, 5, 6, 9, \dots$) は、以下の式（6）で表される。

$$B_{zj2}(0x, 0y) = C_{zj200} + C_{zj220}0x^2 + C_{zj211}0x0y + C_{zj202}0y^2 + \dots \quad (6)$$

[0461] 被検光学系の偏心による波面収差は、ゼルニケ多項式で各収差成分に分解できる。分解した収差成分が、各物体高座標において、どのような分布になるかは理論的に知られている（参照：Image field distribution model of wavefront aberration and models of distortion and field curvature [T.

Matsuzawa: J. Opt. Soc. Am. A, 28, No. 2 (2011) 96-110] 。

[0462] そこで、この理論を元に、偏心収差感度 $B_{2jl}(0x, 0y)$ について、物体高座標を変数とする関数（以下、「物体高関数」という）の分布を整理する。以下、整理した結果を、簡易に示す。以下の各表では、偏心量の1乗に比例する収差成分（ $l = 1$ ）、偏心量の2乗に比例する収差成分（ $l = 2$ ）及び偏心量の3乗に比例する収差成分（ $l = 3$ ）について示している。但し、波面収差のピストン成分であるゼルニケ項の第 $Z - 1$ 項については、実際の波面計測では正確に計測することが困難であることもあるため、省略している。

[0463] まず、偏心収差感度 $B_{2jl}(0x, 0y)$ と $B_{3jl}(0x, 0y)$ について、整理した結果を表17に示す。

[表17]

		物体高座標の次数			
		0	1	2	3
$B_{2jl}(0x, 0y)$	$l = 1$	○		○	
	$l = 2$		○		○
	$l = 3$			○	

		物体高座標の次数			
		0	1	2	3
$B_{3jl}(0x, 0y)$	$l = 1$	○		○	
	$l = 2$		○		○
	$l = 3$			○	

[0464] 偏心量の1乗に比例する収差成分における偏心収差感度 $B_{2jl}(0x, 0y)$ と $B_{3jl}(0x, 0y)$ では、物体高座標の0乗と2乗に物体高関数が現れる。よって、偏心量の1乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数である。偏心量の2乗に比例する収差成分については、物体高座標の1乗と3乗に物体高関数が現れる。よって、偏心量の2乗に比例する収差成分は、物体高座標について奇関数である。偏心量の3乗に比例する収差成分については、物体高座標の2乗に物体高関数が現れる。よって、偏心量の3乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数である。

[0465] 図32は、偏心収差感度 $B_{2jl}(0x, 0y)$ と $B_{3jl}(0x, 0y)$ において現れる物体高関数を示す図であって、(a)は被検光学系が偏心していない場合を示し、(b)と(c)は、被検光学系が偏心している場合を示している。図中、 $l = 1$

で示す関数は、偏心量の 1 乗に比例する収差成分において現れる物体高関数を示し、 $l = 2$ で示す関数は、偏心量の 2 乗に比例する収差成分において現れる物体高関数を示し、 $l = 3$ で示す関数は、偏心量の 3 乗に比例する収差成分において現れる物体高関数を示している。

[0466] ここで、 $B_{2jl}(0x, 0y)$ は波面チルト（コマ収差）の x 成分、 $B_{3jl}(0x, 0y)$ は波面チルト（コマ収差）の y 成分を表している。図 3 2（b）、（c）に示すように、波面チルト（ x 成分）では、偏心量の 1 乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数で表される。偏心量の 2 乗に比例する収差成分は、物体高座標について奇関数で表される。偏心量の 3 乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数で表される。

[0467] よって、波面チルト（ x 成分）については、一方の照射位置における所定の収差成分と他方の照射位置における所定の収差成分との和をとれば、第 1 の収差成分を抽出することができる。例えば物体高座標を $(0x, 0y)$ で表すと、 $(0, 4)$ と $(0, -4)$ 、 $(1, 2)$ と $(-1, -2)$ というように $(0x, 0y)$ と $(-0x, -0y)$ といった対称の物体高座標において、一方の照射位置における所定の収差成分と他方の照射位置における所定の収差成分を抽出し、両者の和をとれば良い。なお、本実施例で扱う偏心量は微小であり偏心量の 3 乗に比例する収差成分は非常に小さいので無視することができる。

[0468] なお、波面チルト（ y 成分）についても同様にすれば良い。

[0469] 次に、偏心収差感度 $B_{4jl}(0x, 0y)$ について、整理した結果を表 1 8 に示す。

[表18]

		物体高座標の次数			
		0	1	2	3
$B_{4jl}(0x, 0y)$	$l = 1$		○		○
	$l = 2$			○	
	$l = 3$				○

[0470] 偏心量の 1 乗に比例する収差成分における偏心収差感度 $B_{4jl}(0x, 0y)$ では、物体高座標の 1 乗と 3 乗に物体高関数が現れる。よって、偏心量の 1 乗に比例する収差成分は、物体高座標について奇関数である。偏心量の 2 乗に比例する収差成分については、物体高座標の 2 乗に物体高関数が現れる。よって、

偏心量の2乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数である。偏心量の3乗に比例する収差成分については、物体高座標の3乗に物体高関数が現れる。よって、偏心量の3乗に比例する収差成分は、物体高座標について奇関数である。

[0471] 図33は、偏心収差感度 $B_{4jl}(0x, 0y)$ において現れる物体高関数を示す図であって、(a)は被検光学系が偏心していない場合を示し、(b)と(c)は、被検光学系が偏心している場合を示している。図中、 $l=1$ で示す関数は、偏心量の1乗に比例する収差成分において現れる物体高関数を示し、 $l=2$ で示す関数は、偏心量の2乗に比例する収差成分において現れる物体高関数を示し、 $l=3$ で示す関数は、偏心量の3乗に比例する収差成分において現れる物体高関数を示している。

[0472] ここで、 $B_{4jl}(0x, 0y)$ は球面収差（フォーカス）を表している。図33(b)、(c)に示すように、球面収差（フォーカス）では、偏心量の1乗に比例する収差成分は、物体高座標について奇関数で表される。偏心量の2乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数で表される。偏心量の3乗に比例する収差成分は、物体高座標について奇関数で表される。

[0473] よって、球面収差（フォーカス）については、一方の照射位置における所定の収差成分と他方の照射位置における所定の収差成分との差をとれば、第1の収差成分を抽出することができる。例えば物体高座標を $(0x, 0y)$ で表すと、 $(0, 4)$ と $(0, -4)$ 、 $(1, 2)$ と $(-1, -2)$ というように $(0x, 0y)$ と $(-0x, -0y)$ といった対称の物体高座標において、一方の照射位置における所定の収差成分と他方の照射位置における所定の収差成分を抽出し、両者の差をとれば良い。なお、本実施例で扱う偏心量は微小であり偏心量の3乗に比例する収差成分は非常に小さいので無視することができる。

[0474] まず、偏心収差感度 $B_{5jl}(0x, 0y)$ と $B_{6jl}(0x, 0y)$ について、整理した結果を表19に示す。

[表19]

		物体高座標の次数			
		0	1	2	3
$B_{5jl}(0x, 0y)$	$l = 1$		○		○
	$l = 2$	○		○	
	$l = 3$		○		○

		物体高座標の次数			
		0	1	2	3
$B_{6jl}(0x, 0y)$	$l = 1$		○		○
	$l = 2$	○		○	
	$l = 3$		○		○

[0475] 偏心量の1乗に比例する収差成分における偏心収差感度 $B_{5jl}(0x, 0y)$ と $B_{6jl}(0x, 0y)$ では、物体高座標の1乗と3乗に物体高関数が現れる。よって、偏心量の1乗に比例する収差成分は、物体高座標について奇関数である。偏心量の2乗に比例する収差成分については、物体高座標の0乗と2乗に物体高関数が現れる。よって、偏心量の2乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数である。偏心量の3乗に比例する収差成分については、物体高座標の1乗と3乗に物体高関数が現れる。よって、偏心量の3乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数である。

[0476] 図34は、偏心収差感度 $B_{5jl}(0x, 0y)$ と $B_{6jl}(0x, 0y)$ において現れる物体高関数を示す図であって、(a)は被検光学系が偏心していない場合を示し、(b)と(c)は、被検光学系が偏心している場合を示している。図中、 $l = 1$ で示す関数は、偏心量の1乗に比例する収差成分において現れる物体高関数を示し、 $l = 2$ で示す関数は、偏心量の2乗に比例する収差成分において現れる物体高関数を示し、 $l = 3$ で示す関数は、偏心量の3乗に比例する収差成分において現れる物体高関数を示している。

[0477] ここで、 $B_{5jl}(0x, 0y)$ と $B_{6jl}(0x, 0y)$ は共に非点収差を表している。図34(b)、(c)に示すように、非点収差では、偏心量の1乗に比例する収差成分は、物体高座標について奇関数で表される。偏心量の2乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数で表される。偏心量の3乗に比例する収差成分は、物体高座標について奇関数で表される。

[0478] よって、非点収差については、一方の照射位置における所定の収差成分と

他方の照射位置における所定の収差成分との差をとれば、第1の収差成分を抽出することができる。例えば物体高座標を $(0x, 0y)$ で表すと、 $(0, 4)$ と $(0, -4)$ 、 $(1, 2)$ と $(-1, -2)$ というように $(0x, 0y)$ と $(-0x, -0y)$ といった対称の物体高座標において、一方の照射位置における所定の収差成分と他方の照射位置における所定の収差成分を抽出し、両者の差をとれば良い。なお、本実施例で扱う偏心量は微小であり偏心量の3乗に比例する収差成分は非常に小さいので無視することができる。

[0479] まず、偏心収差感度 $B_{2jl}(0x, 0y)$ と $B_{3jl}(0x, 0y)$ について、整理した結果を表20に示す。

[表20]

		物体高座標の次数			
		0	1	2	3
$B_{7jl}(0x, 0y)$	$l = 1$	○		○	
	$l = 2$		○		○
	$l = 3$			○	

		物体高座標の次数			
		0	1	2	3
$B_{8jl}(0x, 0y)$	$l = 1$	○		○	
	$l = 2$		○		○
	$l = 3$			○	

[0480] 偏心量の1乗に比例する収差成分における偏心収差感度 $B_{7jl}(0x, 0y)$ と $B_{8jl}(0x, 0y)$ では、物体高座標の0乗と2乗に物体高関数が現れる。よって、偏心量の1乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数である。偏心量の2乗に比例する収差成分については、物体高座標の1乗と3乗に物体高関数が現れる。よって、偏心量の2乗に比例する収差成分は、物体高座標について奇関数である。偏心量の3乗に比例する収差成分については、物体高座標の2乗に物体高関数が現れる。よって、偏心量の3乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数である。

[0481] 図35は、偏心収差感度 $B_{7jl}(0x, 0y)$ と $B_{8jl}(0x, 0y)$ において現れる物体高関数を示す図であって、(a)は被検光学系が偏心していない場合を示し、(b)と(c)は、被検光学系が偏心している場合を示している。図中、 $l = 1$ で示す関数は、偏心量の1乗に比例する収差成分において現れる物体高関数

を示し、 $l = 2$ で示す関数は、偏心量の2乗に比例する収差成分において現れる物体高関数を示し、 $l = 3$ で示す関数は、偏心量の3乗に比例する収差成分において現れる物体高関数を示している。

[0482] ここで、 $B_{7jl}(0x, 0y)$ と $B_{8jl}(0x, 0y)$ は共にコマ収差を表している。図35 (b)、(c)に示すように、コマ収差では、偏心量の1乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数で表される。偏心量の2乗に比例する収差成分は、物体高座標について奇関数で表される。偏心量の3乗に比例する収差成分は、物体高座標について偶関数で表される。

[0483] よって、コマ収差については、一方の照射位置における所定の収差成分と他方の照射位置における所定の収差成分との和をとれば、第1の収差成分を抽出することができる。例えば物体高座標を $(0x, 0y)$ で表すと、 $(0, 4)$ と $(0, -4)$ 、 $(1, 2)$ と $(-1, -2)$ というように $(0x, 0y)$ と $(-0x, -0y)$ といった対称の物体高座標において、一方の照射位置における所定の収差成分と他方の照射位置における所定の収差成分を抽出し、両者の和をとれば良い。なお、本実施例で扱う偏心量は微小であり偏心量の3乗に比例する収差成分は非常に小さいので無視することができる。

[0484] なお、照射位置Pの波面データから抽出した所定の収差成分と、照射位置P'の波面データから抽出した所定の収差成分とを、物体高ごとに、所定の関数系にフィッティングすることにより、第2の偏心収差量を抽出してもよい。関数系としてはField Termsがある (Image field distribution model of wavefront aberration and models of distortion and field curvature [T. Matsuzawa: J. Opt. Soc. Am. A, 28, No. 2 (2011) 96-110])。

[0485] 次に、偏心収差感度の計算方法について説明する。上述のように、被検光学系が設計収差を有する場合がある。また、偏心量計測装置はシステム収差を有する場合がある。また、受光光学系が偏心を有する場合がある。また、第1の回転を行う場合、計測軸に対して第1の回転軸がシフトしている場合がある。

[0486] このような収差成分が存在する場合、波面収差Wは以下の式 (1-13)

で表される。

$$\begin{aligned}
 & W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1 + E, \delta_2 + E, \dots, \delta_j + E, \delta_{j+1}, \delta_{j+2}, \dots, \delta_m) \\
 &) \\
 & = M(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + \text{Sys}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + (\delta_1 + E) B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + (\delta_1 + E)^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + (\delta_2 + E) B_{21}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + (\delta_2 + E)^2 B_{22}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + \dots \\
 & + (\delta_j + E) B_{j1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + (\delta_j + E)^2 B_{j2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + \delta_{j+1} B_{(j+1)1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + \delta_{j+1}^2 B_{(j+1)2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + \delta_{j+2} B_{(j+2)1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + \delta_{j+2}^2 B_{(j+2)2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + \dots \\
 & + \delta_m B_{l1}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
 & + \delta_m^2 B_{l2}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-13)
 \end{aligned}$$

[0487] 一方、偏心収差感度は、例えば、光学シミュレーションソフトを用いて求める。光学シミュレーションソフトにおいて、被検光学系の各レンズについて、偏心自由度が単位量だけ偏心したときに発生する波面収差量を計算しておく。この波面収差量が偏心収差感度である。

[0488] 光学シミュレーションでは、被検光学系、投光系、受光系のレンズの設計値を用いて、実際に波面計測する光学系を設定する。システム収差や計測軸に対する第1の回転軸のシフトがない状況を設定する。被検光学系、投光系、受光系の偏心がない状況を設定する。

[0489] この場合、 $\delta_1=0, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0, E=0, \text{Sys}(0x, 0y, \rho x, \rho y)=0$

になる。よって、偏心収差感度を求めるときの波面収差 W は式（１－１４）で表される。ここでの $M(0x, 0y, \rho x, \rho y)$ は被検光学系、投光系、受光系の設計収差とする。

$$\begin{aligned} [0490] \quad & W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1=0, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0) \\ & = M(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-14) \end{aligned}$$

[0491]　そこで、まず、手順１を実行する。手順１では、被検光学系の偏心量 $\Delta_i = \delta_i = 0$ の状態では光線追跡シミュレーションを実行し、波面データを計算で求める。

[0492]　次に、手順２を実行する。手順２では、式（１－１４）において、被検光学系の第１面のみに単位偏心量（例えば $\Delta_o = 0.01\text{mm}$ ）を与える。この場合の波面収差 W は、式（１－１５）で表される。

$$\begin{aligned} [0493] \quad & W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1 = \Delta_o = 0.01\text{mm}, \delta_2 = 0, \dots, \delta_m = 0) \\ & = M(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\ & + \Delta_o B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\ & + \Delta_o^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-15) \end{aligned}$$

[0494]　そして、手順２では、被検光学系の偏心量 $\Delta_o = \delta_1 = 0$ の状態では、光線追跡シミュレーションを実行し、波面データを計算で求める。

[0495]　なお、波面検出装置としてSHセンサーを用いる場合は、光線追跡シミュレーションを実行して、光スポット像位置のデータを求める。光スポット像位置のデータは、式（１－１４）の波面収差や式（１－１５）の波面収差を瞳座標で微分したものに相当する。

[0496]　手順３を実行する。手順３では、手順１で得られた波面データを参照として、手順２で得られた波面データを解析して波面収差を求める。この場合の波面収差は、式（１－１６）で表される。式（１－１６）で表される波面収差は、被検光学系に偏心がないときの波面に対する単面が偏心したときの波面の偏差である。よって、実際には式（１－１５）の波面収差 W を直接計算する必要はない。

$$[0497] \quad W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1 = \Delta_o = 0.01, \delta_2 = 0, \dots, \delta_m = 0)$$

$$\begin{aligned}
& - W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1=0, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0) \\
& = \Delta o B_{11}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \\
& + \Delta o^2 B_{12}(0x, 0y, \rho x, \rho y) \quad (1-16)
\end{aligned}$$

[0498] 手順4を実行する。手順4では、物体高座標(0x, 0y)と対称な物体高座標(-0x, -0y)について、手順2と手順3を実行する。この場合の波面収差Wは、式(1-17)で表される。

$$\begin{aligned}
[0499] \quad & W(-0x, -0y, \rho x, \rho y, \delta_1=\Delta o=0.01, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0) \\
& - W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1=0, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0) \\
& = \Delta o B_{11}(-0x, -0y, \rho x, \rho y) \\
& + \Delta o^2 B_{12}(-0x, -0y, \rho x, \rho y) \quad (1-17)
\end{aligned}$$

[0500] 手順5を実行する。手順5では、式(1-16)と式(1-17)を、それぞれゼルニケ多項式で展開する。ここで、ゼルニケ項の各項は、瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた項と、瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた項と、に分かれる。

[0501] 瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた項を含む収差成分は、ゼルニケ項の第2項等が乗じられた項を含む収差成分である。この場合の収差成分(z=2, 3, 7, 8, ...)については和をとる。その結果、式(24)が得られる。

$$\begin{aligned}
[0502] \quad & Sz_1(0x, 0y) \\
& = [Wz(0x, 0y, \delta_1=\Delta o=0.01, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0) - W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1=0, \\
& \quad \delta_2=0, \dots, \delta_m=0)] \\
& + [Wz(-0x, -0y, \delta_1=\Delta o=0.01, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0) - W(-0x, -0y, \rho x, \rho y, \delta_1 \\
& \quad =0, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0)] \\
& = \Delta o [2Bz_{11}(0x, 0y)] \quad (24)
\end{aligned}$$

[0503] 瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた項を含む収差成分は、ゼルニケ項の第4項等が乗じられた項を含む収差成分である。この場合の各収差成分(z=1, 4, 5, 6, 9, ...)については差をとる。その結果、式(25)が得られる。

$$\begin{aligned}
[0504] \quad & Sz_1(0x, 0y) \\
& = [Wz(0x, 0y, \delta_1=\Delta o=0.01, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0) - W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1=0,
\end{aligned}$$

$$\delta_2=0, \dots, \delta_m=0)]$$

$$-[Wz(-0x, -0y, \delta_1=\Delta o=0.01, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0) - W(-0x, -0y, \rho x, \rho y, \delta_1=0, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0)]$$

$$=\Delta o[2Bz_{11}(0x, 0y)] \quad (25)$$

[0505] 式(25)を変形すると、式(25')となる。

$$Bz_{11}(0x, 0y)=Sz_1(0x, 0y)/(2\Delta o) \quad (25')$$

[0506] ここで、 Δo は既知である。また、以下の4つの波面収差の量も、光線追跡シミュレーションから求めることができる。よって、 $Sz_1(0x, 0y)$ も既知である。

$$W(0x, 0y, \delta_1=\Delta o=0.01, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0)$$

$$W(0x, 0y, \rho x, \rho y, \delta_1=0, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0)$$

$$W(-0x, -0y, \delta_1=\Delta o=0.01, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0)$$

$$W(-0x, -0y, \rho x, \rho y, \delta_1=0, \delta_2=0, \dots, \delta_m=0)$$

[0507] よって、式(25')から $Bz_{11}(0x, 0y)$ を求めることができる。式(25')に示す $Bz_{11}(0x, 0y)$ が、被検光学系の第1面における偏心収差感度になる。この偏心収差感度は、偏心量の1乗に比例する偏心収差感度であって、ゼルニケ項の第Z項、物体高座標(0x, 0y)における単位偏心量あたりの偏心収差感度である。

[0508] 手順6を実行する。手順6では、全ての偏心自由度($\delta_1 \dots \delta_i \dots \delta_j$)、波面計測を実施する全ての物体高座標(0x1, 0y1) $\dots$ (0xq, 0yq) (q点)について、手順1から手順5を実施し、偏心収差感度 $Bz_{i1}(0x, 0y)$ を求める。

[0509] なお、非球面についてはチルトの偏心収差感度計算を行う。このときのチルトの回転中心は非球面面頂を選んでも良いし、非球面軸上の他の場所を選んでも良い。但し、非球面面頂以外の場所をチルトの中心に選ぶ場合は、シフトの偏心についてその場所の偏心と定義する必要がある。

[0510] 手順6の実行が終了すると、以下のように偏心収差感度のマトリックスが得られる。

[数1]

$$\begin{pmatrix} B_{211}(O_{x1}, O_{y1}) & B_{221}(O_{x1}, O_{y1}) & \cdots & B_{2j1}(O_{x1}, O_{y1}) \\ B_{311}(O_{x1}, O_{y1}) & B_{321}(O_{x1}, O_{y1}) & \cdots & B_{3j1}(O_{x1}, O_{y1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n11}(O_{x1}, O_{y1}) & B_{n21}(O_{x1}, O_{y1}) & \cdots & B_{nj1}(O_{x1}, O_{y1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{211}(O_{xq}, O_{yq}) & B_{221}(O_{xq}, O_{yq}) & \cdots & B_{2j1}(O_{xq}, O_{yq}) \\ B_{311}(O_{xq}, O_{yq}) & B_{321}(O_{xq}, O_{yq}) & \cdots & B_{3j1}(O_{xq}, O_{yq}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n11}(O_{xq}, O_{yq}) & B_{n21}(O_{xq}, O_{yq}) & \cdots & B_{nj1}(O_{xq}, O_{yq}) \end{pmatrix}$$

[0511] また、この偏心収差感度のマトリックスを用いた連立1次方程式は、以下のようになる。

[数2]

$$\begin{pmatrix} T_2(O_{x1}, O_{y1})/2 \\ T_3(O_{x1}, O_{y1})/2 \\ \vdots \\ \vdots \\ T_n(O_{x1}, O_{y1})/2 \\ \vdots \\ \vdots \\ T_2(O_{xq}, O_{yq})/2 \\ T_3(O_{xq}, O_{yq})/2 \\ \vdots \\ \vdots \\ T_n(O_{xq}, O_{yq})/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{211}(O_{x1}, O_{y1}) & B_{221}(O_{x1}, O_{y1}) & \cdots & B_{2j1}(O_{x1}, O_{y1}) \\ B_{311}(O_{x1}, O_{y1}) & B_{321}(O_{x1}, O_{y1}) & \cdots & B_{3j1}(O_{x1}, O_{y1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n11}(O_{x1}, O_{y1}) & B_{n21}(O_{x1}, O_{y1}) & \cdots & B_{nj1}(O_{x1}, O_{y1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{211}(O_{xq}, O_{yq}) & B_{221}(O_{xq}, O_{yq}) & \cdots & B_{2j1}(O_{xq}, O_{yq}) \\ B_{311}(O_{xq}, O_{yq}) & B_{321}(O_{xq}, O_{yq}) & \cdots & B_{3j1}(O_{xq}, O_{yq}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n11}(O_{xq}, O_{yq}) & B_{n21}(O_{xq}, O_{yq}) & \cdots & B_{nj1}(O_{xq}, O_{yq}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \delta_j \end{pmatrix}$$

[0512] 数2に示す連立1次方程式の左辺は、実際の波面計測で得られたデータから計算されるTzから構成される。すなわち、計測データのマトリックスである。右辺の偏心収差感度のマトリックスに乘じられているマトリックスは、被検光学系を第1の回転軸によってある角度だけ回転させた際の回転に伴う

変位量のマトリックスである。これを変位量のマトリックスとする。

[0513] ここで、偏心自由度は j 個である。例えば、球面が 2 面、非球面が 2 面の場合、一方の球面での自由度は X と Y 、他方の球面での自由度は X と Y 、一方の非球面での自由度は X 、 Y 、 A 及び B 、他方の非球面での自由度は X 、 Y 、 A 及び B なるので、自由度 j は 1 2 になる。また、ゼルニケ項は $2 \sim n$ を使用している。また、物体高は $(0x_1, 0y_1) \cdots (0x_q, 0y_q)$ の q 点である。

[0514] この連立 1 次方程式では、物体高座標ごとに計測した T_z を式にそのまま代入して偏心量を解析する。但し、 T_z は第 2 の収差成分を除去する工程で、偏心収差感度に対する本来の第 1 の収差成分量の 2 倍の値になっているため、計測データのマトリックスではそれを考慮して 2 で割っている。

[0515] なお、偏心収差感度は、物体高座標によって変わる。そのため、各物体高座標において偏心収差感度を求めておく。

[0516] ここで、上述のように、瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた項の偏心収差感度は、ゼルニケ項の第 2 項等が乗じられた偏心収差感度である。この場合の偏心収差感度 $B_{zj1}(0x, 0y)$ ($z=2, 3, 7, 8 \cdots$) は、式 (3) で表される。

$$B_{zj1}(0x, 0y) = C_{zj100} + C_{zj120} 0x^2 + C_{zj111} 0x 0y + C_{zj102} 0y^2 + \cdots \quad (3)$$

[0517] この式 (3) は、以下の式 (2 6) のように記述することができる。

$$\begin{aligned} B_{zj1}(0x, 0y) \\ = D_{zj10} \cdot g_0(0x, 0y) + D_{zj12} \cdot g_2(0x, 0y) + D_{zj14} \cdot g_4(0x, 0y) + \cdots \end{aligned} \quad (26)$$

ここで、

$g_0(0x, 0y)$ は、物体高座標の最大次数が 0 次の関数、

$g_2(0x, 0y)$ は、物体高座標の最大次数が 2 次の関数、

$g_4(0x, 0y)$ は、物体高座標の最大次数が 4 次の関数、

である。

[0518] また、瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた項の偏心収差感度は、ゼルニケ項の第 4 項等が乗じられた偏心収差感度である。この場合の偏心収差感度 B_z

$_{j1}(0x, 0y)$ ($z=1, 4, 5, 6, 9 \dots$) は、以下の式 (4) で表される。

$$B_{zj1}(0x, 0y) = C_{zj110}0x + C_{zj101}0y + C_{zj130}0x^3 + C_{zj121}0x^20y \\ + C_{zj112}0x0y^2 + C_{zj103}0y^3 + \dots$$

(4)

[0519] この式 (4) は、以下の式 (27) のように記述することができる。

$$B_{zj1}(0x, 0y) \\ = Dz_{j11} \cdot g_1(0x, 0y) + Dz_{j13} \cdot g_3(0x, 0y) + Dz_{j15} \cdot g_5(0x, 0y) + \dots \quad (27)$$

ここで、

$g_1(0x, 0y)$ は、物体高座標の最大次数が 1 次の関数、

$g_3(0x, 0y)$ は、物体高座標の最大次数が 3 次の関数、

$g_5(0x, 0y)$ は、物体高座標の最大次数が 5 次の関数、

である。

[0520] 式 (26) ~ (27) における D は物体高座標、瞳座標及び偏心量に依存しない定数である。また、D における添え字は、左側から順に、ゼルニケ項の第 Z 項、第 j 面、l の値、物体高座標における次数を表している。

[0521] なお、関数 $g_k(0x, 0y)$ ($K = 1, 2, 3, \dots$) としては、直交関数系を使用してもよく、Field terms を使用しても良い。

[0522] 同様に、式 (21) についても同様に展開できる。瞳座標が奇数次数の関数が乗じられた項を含む収差成分は、ゼルニケ項の第 2 項等が乗じられた収差成分である。この場合の収差成分 $T_z(0x, 0y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j) / 2$ は、以下の式 (28) のように記述することができる。

$$T_z(0x, 0y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j) / 2 \\ = Ez_{10} \cdot g_0(0x, 0y) + Ez_{12} \cdot g_2(0x, 0y) + Ez_{14} \cdot g_4(0x, 0y) \cdot \dots \quad (28)$$

ここで、

$g_0(0x, 0y)$ は、 $0x, 0y$ のベキが最大次数 0 次の関数、

$g_2(0x, 0y)$ は、 $0x, 0y$ のベキが最大次数 2 次の関数、

$g_4(0x, 0y)$ は、 $0x, 0y$ のベキが最大次数 4 次の関数、

である。

[0523] また、瞳座標が偶数次数の関数が乗じられた項を含む収差成分は、ゼルニケ項の第4項等が乗じられた収差成分である。この場合の収差成分 $T_z(0x, 0y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j)/2$ は、以下の式(29)のように記述することができる。

$$\begin{aligned} & T_z(0x, 0y, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j)/2 \\ & = E_{z_{11}} \cdot g_1(0x, 0y) + E_{z_{13}} \cdot g_3(0x, 0y) + E_{z_{15}} \cdot g_5(0x, 0y) + \dots \end{aligned} \quad (29)$$

ここで、

$g_1(0x, 0y)$ は、 $0x, 0y$ のベキが最大次数1次の関数、

$g_3(0x, 0y)$ は、 $0x, 0y$ のベキが最大次数3次の関数、

$g_5(0x, 0y)$ は、 $0x, 0y$ のベキが最大次数5次の関数、

である。

[0524] 式(28)～(29)における E は物体高座標、瞳座標及び偏心量に依存しない定数である。また、 E における添え字は、左側から順に、ゼルニケ項の第 Z 項、 l の値、物体高座標における次数を表している。

[0525] 物体高座標ごとに計測した波面データから得られる T_z 、計算で求めた Bz_{j1} についてフィッティングを行い、係数 E, D に収差を当てはめる。

[0526] なお、第2の収差成分が含まれている式(1-16)、式(1-17)のデータから、フィッティングにより、 D を求めても良い。フィッティングにより第2の収差成分を排除して D に当てはめることができる。

[0527] なお、第2の収差成分が含まれている式(1-11)、式(1-12)のデータから、フィッティングにより、 E を求めても良い。フィッティングにより第2の収差成分を排除して E に当てはめることができる。

[0528] その結果、連立1次方程式は、以下のように表現できる。

[数3]

$$\begin{pmatrix} E_{210} \\ E_{212} \\ E_{214} \\ \vdots \\ \vdots \\ E_{21(2k)} \\ \vdots \\ \vdots \\ E_{411} \\ E_{413} \\ E_{415} \\ \vdots \\ \vdots \\ E_{41(2k+1)} \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{2110} & D_{2210} & \cdots & D_{2j10} \\ D_{2112} & D_{2212} & \cdots & D_{2j12} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{211(2k)} & D_{221(2k)} & \cdots & D_{2j1(2k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{4111} & D_{4211} & \cdots & D_{4j11} \\ D_{4113} & D_{4213} & \cdots & D_{4j13} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{411(2k+1)} & D_{421(2k+1)} & \cdots & D_{4j1(2k+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \delta_j \end{pmatrix}$$

[0529] この連立1次方程式では、物体高座標ごとに計測した波面データから計算されるTzからフィッティングによりEを求め、式に代入して偏心量を解析する。

[0530] この連立1次方程式では、物体高関数として直交関数系を採用すれば、実際の波面計測で得られた波面データから計算されるTzに、ある種のフィルタリングが行われ、Tzの誤差の影響を低減することができる。しかしながら、波面計測において物体高座標の点数を多く取る必要があることや、TzをEに当てはめるための解析工程が必要となる。

[0531] 以上、連立1次方程式を2種類示したが、どちらの連立1次方程式を用いても良い。

[0532] 偏心量の2乗に比例する収差成分を排除したデータを用いているため、偏心量の3乗以降に比例する収差成分が無視できる場合は、計測データのマト

リックスと、偏心収差感度のマトリックスと偏心量のマトリックスの積は、等しいとみなせる。そこで測定データマトリックスが偏心収差感度マトリックスと偏心量マトリックスの積と等しい方程式を立てる。そして、最小二乗法などのフィッティングアルゴリズムを用いて、各偏心自由度の偏心量を求めることができる。

[0533] 計測データのマトリックスと偏心収差感度のマトリックス偏心量の1乗に比例する収差成分で構成されているため、偏心量が製造誤差として大きい場合でも、高精度に偏心量を求めることができる。

[0534] また、例えば被検光学系を第1の回転軸によって180度回転させた場合は、回転軸基準の各レンズ面の偏心量に対し、各レンズ面の変位量は-2倍になる。このとき数2に示す連立1次方程式を解析して求まる変位量のマトリックスの各要素($\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j$)は、回転軸基準の各レンズ面の偏心量の-2倍となる。そのため、求まった変位量のマトリックスの各要素($\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j$)を-2で割ることで、被検光学系の回転前における回転軸基準の各レンズの偏心量を求めることができる。

[0535] なお、第1の回転での回転角度が180度とは異なる場合、例えば90°などの場合がある。この場合は、回転に伴って生じる各レンズ面の変位量を考慮して、回転軸基準の各レンズ面の偏心自由度ごとの偏心量を求めることができる。

[0536] 計測データのマトリックスと偏心収差感度のマトリックスは、偏心量の1乗に比例する収差成分で構成されているため、第1の回転軸が計測軸に対してズレがあっても、高精度に偏心量を求めることができる。

[0537] また、ゼルニケ係数ごとに、繰り返し性などの計測誤差の度合いがわかっている場合がある。このような場合は、計測誤差に基づいて方程式に重みをつけて、連立1次方程式を解くと、解析で得られた偏心量の誤差も低減される。

[0538] また、第2の回転を行った場合は以下のように連立1次方程式を立てることができる。但し、前側計測の第1の収差成分データを T_z 、偏心収差感度を

B、後ろ側計測の第1の収差成分データを $T'z$ 、偏心収差感度を B' とする。
 数4の通り、前側計測における変位量 $(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j)$ と後ろ側計測における変位量 $(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j)$ は同一であるので、被検光学系の第2の回転の仕方を考慮して、感度の符号を考慮する必要がある。例えば、被検光学系の第2の回転をY軸周りに行う場合は、後ろ側計測の偏心収差感度は、偏心自由度がX方向のシフト、A方向のチルトの偏心収差感度については前側計測に対し、符号を反転させる。

[数4]

$$\begin{pmatrix} T_2(O_{x1}, O_{y1})/2 \\ T_3(O_{x1}, O_{y1})/2 \\ \vdots \\ T_n(O_{x1}, O_{y1})/2 \\ \vdots \\ T_2(O_{xq}, O_{yq})/2 \\ T_3(O_{xq}, O_{yq})/2 \\ \vdots \\ T_n(O_{xq}, O_{yq})/2 \\ T'_2(O_{x1}, O_{y1})/2 \\ T'_3(O_{x1}, O_{y1})/2 \\ \vdots \\ T'_n(O_{x1}, O_{y1})/2 \\ \vdots \\ T'_2(O_{xq}, O_{yq})/2 \\ T'_3(O_{xq}, O_{yq})/2 \\ \vdots \\ T'_n(O_{xq}, O_{yq})/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{211}(O_{x1}, O_{y1}) & B_{221}(O_{x1}, O_{y1}) & \cdots & B_{2j1}(O_{x1}, O_{y1}) \\ B_{311}(O_{x1}, O_{y1}) & B_{321}(O_{x1}, O_{y1}) & \cdots & B_{3j1}(O_{x1}, O_{y1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n11}(O_{x1}, O_{y1}) & B_{n21}(O_{x1}, O_{y1}) & \cdots & B_{nj1}(O_{x1}, O_{y1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{211}(O_{xq}, O_{yq}) & B_{221}(O_{xq}, O_{yq}) & \cdots & B_{2j1}(O_{xq}, O_{yq}) \\ B_{311}(O_{xq}, O_{yq}) & B_{321}(O_{xq}, O_{yq}) & \cdots & B_{3j1}(O_{xq}, O_{yq}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n11}(O_{xq}, O_{yq}) & B_{n21}(O_{xq}, O_{yq}) & \cdots & B_{nj1}(O_{xq}, O_{yq}) \\ B'_{211}(O_{x1}, O_{y1}) & B'_{221}(O_{x1}, O_{y1}) & \cdots & B'_{2j1}(O_{x1}, O_{y1}) \\ B'_{311}(O_{x1}, O_{y1}) & B'_{321}(O_{x1}, O_{y1}) & \cdots & B'_{3j1}(O_{x1}, O_{y1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B'_{n11}(O_{x1}, O_{y1}) & B'_{n21}(O_{x1}, O_{y1}) & \cdots & B'_{nj1}(O_{x1}, O_{y1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B'_{211}(O_{xq}, O_{yq}) & B'_{221}(O_{xq}, O_{yq}) & \cdots & B'_{2j1}(O_{xq}, O_{yq}) \\ B'_{311}(O_{xq}, O_{yq}) & B'_{321}(O_{xq}, O_{yq}) & \cdots & B'_{3j1}(O_{xq}, O_{yq}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B'_{n11}(O_{xq}, O_{yq}) & B'_{n21}(O_{xq}, O_{yq}) & \cdots & B'_{nj1}(O_{xq}, O_{yq}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_j \end{pmatrix}$$

[0539] 本実施形態の計測方法で計測できる偏心自由度について説明する。本実施形態の計測方法では、被検光学系を透過した波面における波面収差の情報を

用いて、各レンズについて偏心自由度ごとの偏心量を計測している。そのため、偏心自由度が多いほど、偏心自由度ごとの偏心量を区別しにくくなる。そこで計測できる偏心自由度の目安を提示しておく。

[0540] 表 2 1 は、波面収差を瞳座標と物体高と偏心量でベキ展開したとき、偏心量の 1 乗に比例する項を丸で示したものである。これらの丸で示された項は、第 1 の収差成分である。例えば、Z 2 項の関数が乗じられた第 1 の収差成分は、物体高の 0 乗に比例する成分、2 乗に比例する成分・・・がある。Z 4 項の関数が乗じられた第 1 の収差成分は、物体高の 1 乗に比例する成分、3 乗に比例する成分・・・がある。表 2 1 において、ハイフン（－）は、第 1 の収差成分が存在しないことを表している。

[0541] また、表中の偏心自由度は、その偏心自由度によって生じる第 1 の収差成分を示している。数 2 に示す連立 1 次方程式で、多くの物体高で第 1 の収差成分のデータを用いたとしても、計測可能な偏心自由度の数は、表 2 1 中の丸の数に集約されると考えられる。すなわち、丸の数が実質的な偏心に関する情報量と考えることができる。

[表21]

			物体高次数							
			0		1		2		3	
			XB偏心	YA偏心	XB偏心	YA偏心	XB偏心	YA偏心	XB偏心	YA偏心
瞳座標次数	1	Z 2	●	-	-	-	○	○	-	-
		Z 3	-	●	-	-	-	-	-	-
	2	Z 4	-	-	●	●	-	-	○	○
		Z 5	-	-	●	●	-	-	○	○
	3	Z 6	-	-	-	-	-	-	-	-
		Z 7	●	-	-	-	○	○	-	-
	4	Z 8	-	●	-	-	-	-	-	-
		Z 9	-	-	○	○	-	-	○	○

[0542] 本実施例で計測できる偏心自由度をわかりやすくする目的で、被検光学系の第 1 の収差成分について、瞳座標の 3 次以下（ゼルニケ項の第 2 項～第 8 項）、物体高座標の 1 次以下の成分が生じると考える。

[0543] この場合、第 1 の収差成分は、表 2 1 の黒丸で表せる。黒丸の数は 8 個となる。情報量は 8 個に集約されていると考えられるので、求められる偏心自由度の数も 8 個となる。

- [0544] 例えば、球面の場合は偏心自由度の数が2である。そのため、被検光学系が4つのレンズ面で構成される場合、各レンズ面の偏心自由度の数は8個になる。よって、この場合は、各レンズ面における偏心量は計測可能である。また、例えば、非球面の場合は偏心自由度の数が4である。そのため、非球面が2つのレンズ面で構成される場合、各レンズ面の偏心自由度の数は8である。よって、この場合も、各レンズ面における偏心量は計測可能である。
- [0545] 但し、被検光学系の収差の性質、及び、波面測定条件によって、測定可能な波面収差の瞳座標次数、及び物体高座標の次数は増えるため、あくまでも8個は物体高座標と瞳座標の次数を低次に限定した際の目安である。
- [0546] また、第2の回転を用いて前側計測と後ろ側計測を行う場合は、それぞれの計測において、同様に黒丸の情報を得ることができる。但し、前側計測と後ろ側計測では上述の通り、偏心収差感度が異なるため、黒丸の数、すなわち第1の収差成分の数が16個まで増える。よって16個の偏心自由度の偏心計測を行うことができる。
- [0547] 数2、数3及び数4に示す偏心収差感度のマトリックスの条件数 (condition number) を求めることで、実際の波面計測で得られたデータから計算される T_z に誤差が含まれる際の、求まる偏心量への誤差伝播の度合いを評価することができる。条件数はマトリックスの最大特異値と最小特異値の比で計算できる。誤差伝播の度合いが小さいマトリックスほど条件数の値は小さくなる。条件数の最小値は1である。被検光学系の波面を計測する際、被検光学系へのビームの入射方法は無数に考えられるが、条件数が小さくなるような入射方法を選択すれば、求められる偏心量の精度を向上することができる。
- [0548] 本実施形態の計測方法によると、波面センサーとしてSHセンサーを用いることで、複数の物体高ごとの波面計測を簡易に短時間に実施できる。そのため、簡易に短時間で偏心量を計測できる。また、計測系における各種製造誤差起因の収差成分と被検光学系の設計収差成分を排除して、被検光学系の偏心収差量を正確に抽出することができるため、正確な偏心量の計測を行うことができる。

[0549] なお、本実施形態の計測方法が対象とする被検光学系は、回転対称な光学系である。

[0550] S Hセンサーにおける波面データとそれを用いた波面収差解析方法について説明する。S Hセンサーはマイクロレンズアレイとイメージャ（CCDやCMOS）から構成される。マイクロレンズの焦点距離が f の場合、 f だけ離してマイクロレンズアレイとイメージャは固定される。

[0551] 波面をS Hセンサーへ入射させると、波面はマイクロレンズアレイで分割され、イメージャに複数の光スポット像が投影される。この複数の光スポット像の位置を、ここでは波面データと呼ぶ。

[0552] S Hセンサーを含めた計測装置には通常製造誤差があり、それがシステム収差となる。以下ではシステム収差を除去する通常の方法について説明する。

[0553] 収差のない波面 W_0 をS Hセンサーに入射し、そのとき作られる光スポット像位置 $(S_{0x}(\rho x, \rho y), S_{0y}(\rho x, \rho y))$ を計測する。ここでは、この光スポット像位置を波面データと呼ぶ。 $(\rho x, \rho y)$ はマイクロレンズの位置の座標（瞳座標）である。

[0554] 光スポット像位置 (S_{0x}, S_{0y}) にはシステム収差 $sys(\rho x, \rho y)$ の影響が含まれる。この場合、 (S_{0x}, S_{0y}) は以下の式（30）、（31）で表される。

$$\begin{aligned} S_{0x}(\rho x, \rho y) &= \partial (W_0(\rho x, \rho y) + sys(\rho x, \rho y)) / \partial \rho x \cdot f \\ &= \partial W_0(\rho x, \rho y) / \partial \rho x + \partial sys(\rho x, \rho y) / \partial \rho x \cdot f \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} S_{0y}(\rho x, \rho y) &= \partial (W_0(\rho x, \rho y) + sys(\rho x, \rho y)) / \partial \rho y \cdot f \\ &= \partial W_0(\rho x, \rho y) / \partial \rho y + \partial sys(\rho x, \rho y) / \partial \rho y \cdot f \end{aligned} \quad (31)$$

[0555] 次に、収差を持つ波面 W を入射し、そのとき作られる光スポット像位置 (S_x, S_y) を計測する。この場合、 (S_x, S_y) は以下の式（32）、（33）で表される。

$$S_x(\rho x, \rho y)$$

$$\begin{aligned}
&= 6 (W(\rho x, \rho y) + \text{sys}(\rho x, \rho y)) / \partial \rho x \cdot f \\
&= \partial W(\rho x, \rho y) / \partial \rho x + \partial \text{sys}(\rho x, \rho y) / \partial \rho x \cdot f \quad (32)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&S_y(\rho x, \rho y) \\
&= 6 (W(\rho x, \rho y) + \text{sys}(\rho x, \rho y)) / \partial \rho y \cdot f \\
&= \partial W(\rho x, \rho y) / \partial \rho y + \partial \text{sys}(\rho x, \rho y) / \partial \rho y \cdot f \quad (33)
\end{aligned}$$

[0556] 式(30)と式(32)の差をとると、式(34)が得られる。

$$\begin{aligned}
&S_x(\rho x, \rho y) - S_{0x}(\rho x, \rho y) \\
&= \partial (W(\rho x, \rho y) - W_0(\rho x, \rho y)) / \partial \rho x \cdot f \quad (34)
\end{aligned}$$

[0557] また、式(31)と式(33)の差をとると、式(35)が得られる。

$$\begin{aligned}
&S_y(\rho x, \rho y) - S_{0y}(\rho x, \rho y) \\
&= \partial (W(\rho x, \rho y) - W_0(\rho x, \rho y)) / \partial \rho y \cdot f \quad (35)
\end{aligned}$$

[0558] 式(34)と式(35)は、波面の微分量を示すデータである。このデータから波面を求めるため方法には、2種類の方法がある。

[0559] 一つ目の方法は、式(34)と式(35)を、ゼルニケ多項式を ρx で微分した関数、 ρy で微分した関数でフィッティングしてゼルニケ係数を求める方法である（波面解析1）。

[0560] 二つ目の方法は、式(34)と式(35)を ρx 、 ρy で積分して波面を求める方法である（波面解析2）。

[0561] 通常の方法では、この2種類の方法の何れかを用いる。ただし、この方法を用いる場合は、収差のない波面 W_0 をSHセンサーに入射して、波面の較正データを得る必要がある。この場合、複数の物体高座標において、収差のない波面 W_0 をSHセンサーに入射させ、波面データを取得することになる。しかしながら、このようにすると、コストがかかる。

[0562] これに対して、本実施形態の計測方法では、収差のない波面 W_0 をSHセンサーに入射させることをしない。その代わりに、被検光学系を第1の回転軸の周りに回転させ、第1の回転前で波面 W_1 を計測し、第1の回転後で波面 W_2 を計測する。

[0563] まず、波面 W_1 をSHセンサーに入射させ、そのとき作られる光スポット

像位置 ($S1x(\rho x, \rho y)$, $S1y(\rho x, \rho y)$) を計測する。続いて、第 1 の回転を行い、波面 $W2$ を SH センサーに入射させ、そのとき作られる光スポット像位置 ($S2x(\rho x, \rho y)$, $S2y(\rho x, \rho y)$) を計測する。

[0564] そして、両者の差をとると、式 (36) と式 (37) が得られる。

$$\begin{aligned} S2x(\rho x, \rho y) - S1x(\rho x, \rho y) \\ = \partial (W2(\rho x, \rho y) - W1(\rho x, \rho y)) / \partial \rho x \cdot f \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} S2y(\rho x, \rho y) - S1y(\rho x, \rho y) \\ = \partial (W2(\rho x, \rho y) - W1(\rho x, \rho y)) / \partial \rho y \cdot f \end{aligned} \quad (37)$$

[0565] このデータから波面を求めるために、以下の 2 種類の方法のいずれかで波面を解析する。

[0566] 一つ目の方法は、式 (36) と式 (37) を、ゼルニケ多項式を ρx で微分した関数、 ρy で微分した関数でフィッティングしてゼルニケ係数を求める方法である (波面解析 1)。

[0567] 二つ目は、式 (36) と式 (37) を ρx 、 ρy で積分して波面を求める方法である (波面解析 2)。

[0568] 受光系に SH センサーを用いた場合、例えば、上述の (1V) の説明で用いた波面データは、光スポット像位置のデータのことである。また、波面データから波面収差を解析するとは、2 種類の状態で得た光スポット像位置データについて、式 (36) に示す処理と式 (37) に示すの処理を行った後、波面解析 1 もしくは波面解析 2 を実施して波面収差を求めることを意味する。

[0569] また、本実施形態の偏心量計測装置は、計測軸の一端に配置された投光系と、計測軸の他端に配置された受光系と、被検光学系を保持する保持部材と、波面計測装置に接続された処理装置と、を備え、保持部材は、投光系と受光系との間に配置され、投光系は、被検光学系に光束を照射する位置に設けられ、処理装置では、取得工程と、第 1 の抽出工程と、第 2 の抽出工程と、解析工程が実行され、取得工程では、被検光学系から出射した光束に基づいて波面データが取得され、第 1 の抽出工程では、波面データから所定の収差

成分が抽出され、第2の抽出工程では、所定の収差成分から第1の収差成分が抽出され、解析工程では、第1の収差成分、偏心収差感度及び偏心量についての連立1次方程式が解析され、所定の収差成分は、偏心によって生じる収差成分が含まれる収差成分であり、第1の収差成分は、所定の収差成分のうちの偏心量の1乗に比例する収差成分であり、偏心収差感度は、偏心量の1乗に比例する収差感度であることを特徴とする。

[0570] 本実施形態の偏心量計測装置を図36に示す。偏心量計測装置100は、投光系102と、受光系103と、保持部材104と、を有する。また、偏心量計測装置100は、本体部101を有する。本体部101に、投光系102、受光系103及び保持部材104が設けられている。

[0571] 計測軸 AX_M の一方の側に投光系102が配置され、他方の側に受光系103が配置されている。また、保持部材104は、投光系102と受光系103との間に配置されている。このように、投光系102と受光系103は、保持部材104を挟んで対向するように設けられている。

[0572] 投光系102は、被検光学系105に照射する光束を発生する。そのために、投光系102は光源を有する。光源としては、レーザ、LED、ハロゲンランプ、キセノンランプ等がある。

[0573] また、投光系102は、光学系を備えていても良い。光源から出射した光を光学系で集光することで、球面波を生成することができる。

[0574] 偏心量計測装置100では、投光系102は保持部材106を介して、駆動ステージ107上に固定されている。また、駆動ステージ107は、駆動ステージ108上に固定されている。駆動ステージ108は、本体部101に固定されている。

[0575] 駆動ステージ107と駆動ステージ108は、各々、一方向に移動するステージである。駆動ステージ107の移動方向と駆動ステージ108の移動方向は直交する。そのため、駆動ステージ107と駆動ステージ108とによって、計測軸 AX_M と直交する面内（以下、「 $OxOy$ 面内」という）で投光系102を移動させることができる。なお、計測軸 AX_M は Oz 軸と一致している。

。

[0576] 保持部材 104 には、被検光学系 105 が載置される。ここで、被検光学系 105 は偏心状態になっている。そこで、被検光学系 105 の略中心を計測軸 AX_M に一致させるように、被検光学系 105 を配置することになる。そのために、被検光学系 105 は、その位置が $0x0y$ 面内で調整可能になっていることが好ましい。

[0577] 例えば、保持部材 104 と被検光学系 105 との間に、保持部材 109 を配置する。そして、この保持部材 109 を 2 つの駆動ステージで構成する。このとき、この 2 つの駆動ステージを、駆動ステージ 107 と駆動ステージ 108 と同じように組み合わせる。このようにすることで、被検光学系 105 の位置を $0x0y$ 面内で調整することができる。

[0578] このように、保持部材 109 は、 $0x0y$ 面内での調整機能を有する。なお、保持部材 109 には、他の機能を持たせることができる。他の機能については後述する。

[0579] なお、被検光学系 105 を保持部材 109 に載置した後、計測軸 AX_M 上から光束を被検光学系 105 に照射する。そして、受光系 103 で得た波面データから所定の収差成分を抽出する。この所定の収差成分が最小となるように、被検光学系 105 の位置を調整しても良い。

[0580] 例えば、ゼルニケ多項式を用いると、チルトに関する収差量、コマ収差の収差量及びフォーカスに関する収差量が抽出される。そこで、チルトに関する収差量とコマ収差の収差量が最小になるように、また、フォーカスに関する収差量が設計時の収差程度になるように、被検光学系 105 の位置調整を行っても良い。

[0581] また、被検光学系 105 としては、様々な仕様の光学系が存在する。そのため、被検光学系 105 の前側焦点位置と後側焦点位置は、被検光学系 105 によって異なる。偏心量計測装置 100 では、被検光学系 105 の前側焦点位置に投光系 102 が配置され、被検光学系 105 の後側焦点位置に受光系 103 が配置される。

- [0582] 様々な被検光学系 105 について偏心量が計測できるようにするためには、投光系 102、保持部材 104 及び受光系 103 のうち、少なくとも 2 つが、計測軸 AX_M に沿って移動する必要がある。偏心量計測装置 100 では、保持部材 104 が移動機構 110 に保持されている。駆動機構 110 を駆動させることで、保持部材 104、すなわち、被検光学系 105 を計測軸 AX_M に沿って移動させることができる。
- [0583] ただし、保持部材 104 の移動だけでは、投光系 102 と受光系 103 のいずれか一方しか、焦点位置と一致させることしかできない。そこで、投光系 10 と受光系 103 のどちらかが、計測軸 AX_M に沿って移動するようにする。あるいは、移動機構 110 を持たない代わりに、投光系 102 と受光系 103 を移動可能にしても良い。
- [0584] また、投光系 102 から保持部材 104 までの間に、保持部材 111 を設けても良い。この保持部材 111 は、被検光学系 105 を保持する位置に設けられている。被検光学系 105 の全長が長い場合、保持部材 111 によって、被検光学系 105 を安定して保持することができる。なお、保持部材 111 には、他の機能を持たせることができる。他の機能については後述する。
- [0585] 受光系 103 は、波面計測装置を有する。波面計測装置は、被検光学系 105 の後側焦点面に配置されている。波面計測装置は、例えば、SH センサーである。図 37 は SH センサーの構造と機能を示す図であって、(a) は SH センサーに平面波が入射した場合の様子を示し、(b) は SH センサーに非平面波が入射した場合の様子を示している。
- [0586] SH センサー 120 は、マイクロレンズアレイ 121 と撮像素子 122 から構成される。撮像素子 122 は、例えば、CCD や CMOS である。ここでは、各マイクロレンズは等間隔で配置され、各マイクロレンズには収差が無いものとする。
- [0587] SH センサー 120 では、マイクロレンズアレイ 121 によって、SH センサー 120 に入射した光束が集光される。このとき、集光位置には、光束

が透過したマイクロレンズの数と同じ数の光スポット像が形成される。集光位置には、撮像素子122が配置されている。光スポット像の各々は、撮像素子122によって受光される。ここで、撮像素子122では、微小な受光素子が2次元配列されている。よって、各光スポット像の位置を知ることができる。

[0588] SHセンサー120に平面波が入射した場合、図37(a)に示すように、光スポット像の各々は等間隔で形成される。一方、SHセンサー120に非平面波が入射した場合、図37(b)に示すように、光スポット像の各々は、等間隔で形成されない。このように、各光スポット像の位置は、SHセンサー120に入射した波面の形状、すなわち、波面収差の発生量に依存する。

[0589] 計測したい波面をSHセンサー120に入射させると、波面はマイクロレンズアレイ121によって分割される。その結果、波面は、撮像素子122の撮像面に複数の光スポット像として投影される。これら複数の光スポット像位置の基準位置からのズレ量から、波面収差を計測することができる。

[0590] なお、基準位置とは、参照となる平面波を事前にSHセンサーに入射させ、平面波が投影されたときの光スポット像の位置である（参照：シャック・ハルトマン鏡面測定装置のデータ処理 国立天文台報 Report of the National Astronomical Observatory of Japan(第2巻第2号) (Vol.2, No.2), pp. 431-446)。これは、図37(a)における各光スポット像の位置である。

[0591] 上述のように、高い精度で偏心量を計測する場合は、照射位置の移動ピッチを小さめにして、より多くの情報量を得るようにすることが好ましい。移動ピッチを小さめにするると計測点数が多くなる。SHセンサーでは、光スポット像を撮像素子で撮像するだけなので、波面データの取得を短時間で終わらせることができる。そのため、例えば、干渉計のフリンジスキャン方式と比べると、波面データの取得は非常に短時間で済む。このように、SHセンサーを用いれば、十分実用的な時間で計測を行うことができる。

[0592] なお、上述のように、受光系103、すなわち波面計測装置はシステム収

差を有する場合がある。図38はSHセンサー120におけるシステム収差を示す図であって、(a)は基板が歪んだ場合を示し、(b)は基板が傾いた場合を示し、(c)はレンズピッチに誤差が生じた場合を示し、(d)はレンズごとの焦点距離が異なる場合を示している。

[0593] SHセンサー120は、マイクロレンズアレイ121は、基板121aとマイクロレンズ121bとからなる。図38(a)では、各マイクロレンズ121bの焦点距離は同じだが、基板121aが湾曲している。この場合、マイクロレンズ121bの配列が不規則になる。そのため、平面波が入射したとしても、光スポット像の間隔も不規則になる。

[0594] 更に、マイクロレンズ121bの位置が周辺になるほど、マイクロレンズ121bの光軸の向きが外側に向かう。そのため、光スポット像の間隔は、周辺部になるほど広がる。

[0595] また、図38(b)では、基板121aに歪みは無く、マイクロレンズ121bも規則的に配置されている。また、各マイクロレンズ121bの焦点距離も同じである。しかしながら、マイクロレンズアレイ121全体が、撮像素子122に対して傾いている。この場合、平面波が入射すると、等間隔で光スポット像が形成される。しかしながら、光スポット像全体が、本来の位置からずれた位置に移動する。

[0596] また、図38(c)では、基板121aに歪みは無く、各マイクロレンズ121bの焦点距離も同じである。しかしながら、マイクロレンズ121bの配置が不規則的になっている。そのため、平面波が入射したとしても、光スポット像の間隔も不規則になる。

[0597] また、図38(d)では、基板121aに歪みは無い。しかしながら、マイクロレンズ121bの焦点距離にばらつきがある。この場合、外形の異なるマイクロレンズが存在するので、マイクロレンズ121bの配列が不規則になる。そのため、平面波が入射したとしても、光スポット像の間隔も不規則になる。

[0598] このように、マイクロレンズ121bにおいて製造誤差が生じると、波面

計測装置 103 がシステム収差を持つ。この場合、撮像素子 122 に形成された各光スポット像の位置は、計測したい波面で形成される光スポット像の位置と異なってしまう。

[0599] この場合、予め平面波を SH センサー 120 に入射させて各光スポット像の位置を求め、求めた位置を基準位置としておく方法がある。基準位置を求めたときの平面波も計測したい波面もほぼ同一の測定系を通る。そのため、予め基準位置を求めておけば、システム収差が存在したとしても、システム収差をキャンセルして、計測したい波面を正確に計測することができる。

[0600] しかしながら、高精度な平面波を作るにはコストがかかる。その上、軸外から光束を照射したときの波面を計測する場合、SH センサーへの入射する光束の角度を、計測したい波面と基準位置を求めるときの波面とで、高い精度で一致させる必要が生じる。

[0601] また、仮に 2 つの波面を高い精度で一致させることができたとしても、被検光学系の設計収差、被検光学系の各面の曲率半径誤差及び面間隔誤差などの回転対称な製造誤差に伴う収差、投光系等の投光系の製造誤差に伴う収差については、偏心に起因する収差との区別をすることは困難である。

[0602] そこで、SH センサーを用いた場合でも、第 1 の回転を行って波面データを取得することで、このような問題は解消される。

[0603] 偏心量計測装置 100 では、被検光学系 105 の前側焦点位置に投光系 102 を配置する。投光系 102 の光源が点光源の場合、光源の発光部から球面波が出射する。この場合は、被検光学系 105 の前側焦点面と発光部とが一致するように、投光系 102 が配置される。

[0604] なお、投光系 102 の光源は点光源に限られない。投光系 102 の光源は、実質的に点光源と見なせる発光部を有していれば良い。また、発光部はそれ自体が発光していなくても良い。例えば、ピンホールを照明することで、ピンホールから球面波が出射する。この場合、ピンホールを発光部とみなすことができる。

[0605] 投光系 102 の光源からから射出される光束は、被検光学系 105 の軸外

領域を透過する。被検光学系 105 を射出した光束は、被検光学系 105 の後側焦点面に投影される。

[0606] 上述のように、駆動ステージ 107 と駆動ステージ 108 とによって、投光系 102 の光源は $0x0y$ 面内で移動させることができる。そこで、照射位置を $0x0y$ 面内で移動させることで、被検光学系 105 を通過する光束の位置を変えることができる。

[0607] ここで、受光系 103、例えば、波面計測装置は被検光学系 105 の後側焦点位置に配置されている。そのため、被検光学系 105 を通過する光束の位置が変わっても、受光系（波面計測装置）103 に入射する光束は、その入射角度が変わるだけである。

[0608] このように、偏心量計測装置 100 では、投光系 102 の光源（物点）を $0x0y$ 面内で移動させることで、被検光学系 105 と受光系（波面計測装置）103 を動かすことなく、軸外及び軸上の波面データを取得することができる。

[0609] 軸外の波面データを取得する目的は、偏心に起因する収差成分の種類を多く得るためである。すなわち、軸上の波面データからは、物体高の 0 乗に比例する収差成分の情報しか得られない。これに対して、軸外の波面データからは、物体高の 1 乗以上に比例する収差成分の情報が得られる。

[0610] また、偏心量計測装置 100 は処理装置 112 を有する。処理装置 112 には、投光系 102、受光系 103、駆動ステージ 107 及び駆動ステージ 108 が、ケーブル 113 を介して接続されている。なお、投光系 102 は、保持部材 106 を介して処理装置 112 に接続されているが、保持部材 106 を介さなくても良い。また、保持部材 109 との接続は、保持部材 109 の持つ機能に応じて決めれば良い。

[0611] 処理装置 112 では、取得工程と、第 1 の抽出工程と、第 2 の抽出工程と、解析工程が実行される。取得工程では、被検光学系から出射した光束に基づいて波面データが取得され、第 1 の抽出工程では、波面データから所定の収差成分が抽出され、第 2 の抽出工程では、所定の収差成分から第 1 の収差

成分が抽出され、解析工程では、第 1 の収差成分、偏心収差感度及び偏心量についての連立 1 次方程式が解析される。

[0612] また、所定の収差成分は、偏心によって生じる収差成分が含まれる収差成分であり、第 1 の収差成分は、所定の収差成分のうちの偏心量の 1 乗に比例する収差成分であり、偏心収差感度は、偏心量の 1 乗に比例する収差感度である。

[0613] これらの各工程、収差成分、所定の収差成分、第 1 の収差成分及び偏心収差感度については、図 1 のフローチャートを使って既に説明している。よって、ここでの説明は省略する。

[0614] このように、偏心量計測装置 100 は、本実施形態の偏心量計測方法を実施することができる。よって、本実施形態の偏心量計測装置によれば、レンズ面の形状や光学系を構成するレンズの数に関係なく、短い時間で偏心量を計測できる。

[0615] 投光系の変形例を図 39 に示す。図 39 は投光系の変形例であって、(a) は第 1 の変形例を示し、(b) は第 2 の変形例を示している。

[0616] 第 1 の変形例を図 39 (a) に示す。投光系 130 は、光源 131 と、光ファイバー 132 と、出射部 133 とを有する。光ファイバー 132 の一方の側は光源 131 に接続され、他方の側は出射部 133 に接続されている。

[0617] 光源 131 から出射した光は光ファイバー 132 に入射し、光ファイバー 132 内を進行して、出射部 133 に到達する。投光系 130 では、光源 131 が大型であっても出射部 133 は小さい。出射部 133 を偏心量計測装置 100 に取り付ければ良いので、偏心量計測装置 100 の大型化を防止することができる。なお、出射部 133 は、必要に応じて光学系を有していても良い。

[0618] また、投光系 130 では、光源 131 と出射部 133 とは光ファイバー 132 で接続されている。この場合、光源 131 と出射部 133 の相対位置を自由に変化させることができる。よって、光源 131 を偏心量計測装置 100 に取り付ける必要がない。その結果、光源 131 が大型であっても、偏心

量計測装置 100 の大型化を防止することができる。

[0619] 第2の変形例を図39(b)に示す。第2の変形例では、投光系140は、基板141と光源142とを有する。光源142は格子状に配置されている。いずれか1つの光源142から光束が照射されるようにすることで、照射位置を変えることができる。よって、第2の変形例では、偏心量計測装置100における駆動ステージ107や駆動ステージ108が不要になる。

[0620] なお、偏心量計測装置100では、第1の回転を行っても良い。第1の回転を行う場合は、保持部材109を回転ステージにすればよい。図40は保持部材と計測軸の位置関係を示す図であって、(a)は第1の回転軸が計測軸と一致している場合を示し、(b)は第1の回転軸が計測軸と一致していない場合を示している。

[0621] 保持部材109を回転ステージにした場合、保持部材109で第1の回転を行うことができる。ここで、図40(a)に示すように、保持部材109の回転軸 AX_{R1} 、すなわち第1の回転軸は、計測軸 AX_M と一致していることが好ましい。この場合、式(18)を用いることで、システム収差成分や設計収差成分を除去することができる。

[0622] しかしながら、実際には、保持部材109の回転軸 AX_{R1} と計測軸 AX_M とを一致させることは難しい。そのため、図40(b)に示すように、保持部材109の回転軸 AX_{R1} は、計測軸 AX_M と一致しない。この場合は、式(20)を用いることで、システム収差成分や設計収差成分を除去することができる。

[0623] 上述のように、保持部材109には、 $OxOy$ 面内での調整機能や、計測軸 AX_M に沿う方向での調整機能に代えて、回転機能を持たせても良い。あるいは、これらの3つの機能を持たせても良い。

[0624] 保持部材109の変形例について説明する。図41は保持部材の変形例を示す図であって、(a)は第1の変形例を示し、(b)は第2の変形例を示している。

[0625] 図36に示す偏心量計測装置100では、計測軸 AX_M が紙面内の上下方向

と一致するように、偏心量計測装置 100 が構成されている。しかしながら、偏心量計測装置 100 を 90° 回転させ、計測軸 AX_M が紙面内の左右方向と一致するように、偏心量計測装置 100 を構成しても良い。計測軸 AX_M が紙面内の左右方向と一致する構成では、保持部材 109 は次のような構成にすることができる。

[0626] 第 1 の変形例では、図 41 (a) に示すように、保持部材 109 は V ブロック 150 で構成されている。ここで、被検光学系 105 は筒状の治具 151 に保持されている。そして、治具 151 が V 字型の凹部に保持されている。凹部の 2 つの傾斜面と治具 151 の外周面とが接触している。接触状態を維持したまま鏡筒を回転させることで、第 1 の回転が行える。

[0627] 第 2 の変形例では、図 41 (b) に示すように、保持部材 109 は回転モータ 152 で構成されている。被検光学系 105 は治具 151 に保持されている。治具 151 は回転モータ 152 に接続されている。回転モータ 152 を回転させることで、第 1 の回転が行える。

[0628] また、保持部材 111 は、被検光学系 105 を補助的に保持する機能を持たせているが、保持部材 111 に第 2 の回転を行う機能を持たせても良い。図 42 は第 2 の回転を行う様子を示す図であって、(a) は保持部材の移動前の様子を示し、(b) は保持部材の移動後の様子を示している。

[0629] 保持部材 111 に回転機能を持たせた場合、保持部材 111 で第 2 の回転を行うことができる。保持部材 111 は、円環部 111a と回転機構 111b とで構成されている。そして、保持部材 111 の円環部 111a で被検光学系 105 が保持されている。

[0630] 円環部 111a は、回転機構 111b によって回転軸 AX_{R2} の周りに回転可能になっている。回転軸 AX_{R2} は計測軸 AX_M と直交しているので、回転軸 AX_{R2} は第 2 の回転軸である。よって、円環部 111a を回転させることで、被検光学系 105 を第 2 の回転軸 AX_{R2} の周りに回転させることができる。

[0631] このとき、図 42 (a) に示すように、被検光学系 105 の一部が、保持

部材 109 の内側に位置している。そのため、このままでは、第 2 の回転を行うことができない。そこで、図 42 (b) に示すように、保持部材 104 を受光系 103 側に少し移動させる。これにより、被検光学系 105 と保持部材 109 との間に隙間が形成される。その結果、被検光学系 105 を第 2 の回転軸 AX_{R2} の周りに回転させることができる。

[0632] なお、保持部材の第 1 の変形例でも、第 2 の回転を行うことができる。この場合、使用者が被検光学系 105 を持ち上げ、被検光学系 105 の前後を逆にする。そして、被検光学系 105 を V ブロック 150 上に配置する。この場合も、治具 151 の外周面が、凹部の 2 つの傾斜面に当てつけられる。そのため、回転軸に対する偏心量の絶対値は、第 2 の回転の前後で変化しない。

[0633] また、保持部材の第 2 の変形例でも、第 2 の回転を行うことができる。この場合、使用者が被検光学系 105 を治具 151 から引き抜いて、被検光学系 105 の前後を逆にする。そして、被検光学系 105 を治具 151 に挿入する。このとき、治具 151 は回転モータ 152 に接続されたままである。そのため、回転軸に対する偏心量の絶対値は、第 2 の回転の前後で変化しない。

[0634] このように、第 1 の変形例と第 2 の変形例のいずれにおいても、回転軸に対する偏心量の絶対値は、第 2 の回転の前後で変化しない。なお、回転軸に対する偏心量の絶対値とは、図 29 における $|\delta r|$ のことである。

[0635] 被検光学系が負の屈折力を有する場合について説明する。図 43 は、被検光学系が負の屈折力を有する場合の投光系を示す図である。

[0636] 図 43 に示すように、投光系 160 は、光源 161 と光学系 162 とで構成されている。光学系 162 は、レンズ 163 とレンズ 164 とで構成されている。投光系 160 から出射した光束は、レンズ 163 で平行光束に変換される。平行光束はレンズ 164 で収斂光束に変換される。そこで、被検光学系 170 を、その後側焦点位置が収斂光束の集光位置と一致するように配置する。

- [0637] このようにすることで、被検光学系が負の屈折力を有する場合であっても、レンズ面の形状や光学系を構成するレンズの数に関係なく、短い時間で偏心量を計測できる。
- [0638] 受光系 103 の変形例について説明する。図 44 は、受光系の変形例を示す図である。
- [0639] 受光系 180 は、光学系 181 と波面計測装置 184 とで構成されている。光学系 181 は変倍光学系であって、レンズ 182 とレンズ 183 とで構成されている。被検光学系 190 から出射した光束 185 は、レンズ 182 で集光される。そして、レンズ 183 で光束 186 に変換される。ここで、レンズ 182 の焦点距離とレンズ 183 の焦点距離とを異ならせることで、光束 185 の径と光束 186 の径とを異ならせることができる。
- [0640] 波面計測装置 184 が SH センサーの場合、多くのマイクロレンズアレイに平行光束を入射させることが好ましい。平行光束 185 の径が小さいと、多くのマイクロレンズアレイに平行光束を入射させることができない。
- [0641] そこで、変倍光学系 181 で光束径を拡大する。これにより、光束径が大きい光束 186 を、マイクロレンズアレイに入射させることができる。この場合、光束 186 の照射範囲に占めるマイクロレンズアレイの数は、光束径が小さい場合に比べると格段に多くなる。すなわち、マイクロレンズアレイによって形成される光スポット像の数が格段に多くなる。そのため、SH センサーにおける空間分解能を上げることができる。
- [0642] その結果、高い空間分解能で波面データを取得することができる。これは、波面データにおける空間的な情報量を増やすことができるということである。波面データが高い空間分解能で取得されることで、高精度でゼルニケ係数にフィッティングすることができる。これにより、所定の収差成分や第 1 の収差成分も高い精度で抽出できるので、偏心量も高い精度で求めることができる。
- [0643] 偏心量計測装置の第 1 の変形例について説明する。図 45 は、偏心量計測装置の第 1 の変形例を示す図である。なお、受光系として波面計測装置 10

3を用いて説明する。

[0644] 偏心量計測装置100では、球面波が被検光学系105に照射されている。しかしながら、被検光学系105に照射される光束は平面波であっても良い。図45に示すように、偏心量計測装置200では、被検光学系220に、平面波210が照射されている。この場合における物体高座標は、計測軸に対する平面波の角度を使って表すことができる。

[0645] 平面波210は、被検光学系220の後側焦点位置で集光される。そのため、後側焦点位置に波面計測装置103を配置しても空間分解能が足りず波面計測を行うことが困難である。

[0646] そこで、偏心量計測装置200は、被検光学系220と波面計測装置103との間にレンズ230を有する。そして、レンズ230の前側焦点位置が集光位置と一致するように、レンズ230が配置されている。これにより、集光した光はレンズ230で略平行な光束に変換される。これにより、波面計測装置103の受光面全体に、光束を入射させることができる。

[0647] なお、偏心量計測装置200では、照射位置を変える場合、被検光学系220に対する平面波210の入射角度を変化させる。この場合、被検光学系220から出射する波面の方向が変化する。そのため、偏心量計測装置100において駆動ステージ107や108を設ける必要がない。

[0648] 偏心量計測装置の第2の変形例について説明する。図46は、偏心量計測装置の第2の変形例を示す図である。

[0649] 上述のように、偏心量計測装置100では、照射位置は被検光学系105の前側焦点位置と一致している。しかしながら、照射位置は、被検光学系105の前側焦点位置と一致していなくても良い。図46に示すように、偏心量計測装置240では、球面波250の照射位置は、被検光学系220の前側焦点位置よりも被検光学系220から離れた位置である。

[0650] 球面波250は被検光学系220によって集光される。よって、偏心量計測装置200と同様に、被検光学系220と波面計測装置103との間にレンズ230が配置されている。

- [0651] レンズ 230 と波面計測装置 103 の機能や動作は、偏心量計測装置 200 で説明したので、ここでの説明は省略する。
- [0652] 第 3 の変形例について説明する。図 47 は、偏心量計測装置の第 3 の変形例を示す図である。
- [0653] 上述のように、偏心量計測装置 100 では、照射位置を移動させて波面データを取得している。しかしながら、照射位置を固定して波面データを取得しても良い。図 47 に示すように、偏心量計測装置 260 では、平面波 210 の入射位置と入射角は固定されている。そして、被検光学系 220 を軸 270 の周りに回転させている。この場合における物体高座標は、計測軸 AX_M に対する被検光学系 220 の回転角度を使って表すことができる。
- [0654] 平面波 210 は被検光学系 220 によって集光される。よって、偏心量計測装置 200 と同様に、被検光学系 220 と波面計測装置 103 との間にレンズ 230 が配置されている。
- [0655] 偏心量計測装置 260 では、集光位置は、被検光学系 220 の回転に伴って紙面内の上下方向に移動する。よって、波面計測装置 103 に入射する光束も、上下方向に移動する。波面計測装置 103 の受光面を十分広くしておけば、波面計測装置 103 は移動させる必要がない。また、被検光学系 220 の回転位置を被検光学系 220 の後側主点にすることで、波面計測装置 103 に入射する光束の上下方向の移動量は小さくなり、波面計測装置 103 の受光面は最小限の広さですませられる。

産業上の利用可能性

- [0656] 以上のように、本発明は、レンズ面の形状や光学系を構成するレンズの数に関係なく、短い時間で偏心量を計測できる偏心量計測方法及び偏心量計測装置に適している。

符号の説明

- [0657] 1、10 投光系
2、20、22 被検光学系
3、30 受光系

4 球面波

7、7'、8、8'、9₀、9'₀、9₁、9'₁ 非平面波

2 1 光学系

2 3、2 4、2 5 レンズ

3 1 センサー部品構成部

3 2 波面データ取得部

3 3 受光素子

4 0 球面波

5 0、5 1、5 2、5 4、5 5、5 6 非平面波

5 3 平面波

6 0 歪んだ波面

7 0、7 1、7 2、7 3 球心

8 0 新たな軸

9 0 被検光学系

9 1 非球面

9 2、9 2'、9 4 非球面面頂

9 3 非球面軸

9 5 変位

9 6 球心

1 0 0 偏心量計測装置

1 0 1 本体部

1 0 2 投光系

1 0 3 受光系、波面計測装置

1 0 4 保持部材

1 0 5 被検光学系

1 0 6 保持部材

1 0 7 駆動ステージ

1 0 8 駆動ステージ

- 1 0 9 保持部材
- 1 1 0 移動機構
- 1 1 1 保持部材
- 1 1 1 a 円環部
- 1 1 1 b 回転機構
- 1 1 2 処理装置
- 1 1 3 ケーブル
- 1 2 0 S Hセンサー
- 1 2 1 マイクロレンズアレイ
- 1 2 1 a 基板
- 1 2 1 b マイクロレンズ
- 1 2 2 撮像素子
- 1 3 0 投光系
- 1 3 1 光源
- 1 3 2 光ファイバー
- 1 3 3 出射部
- 1 4 0 投光系
- 1 4 1 基板
- 1 4 2 光源
- 1 5 0 Vブロック
- 1 5 1 治具
- 1 5 2 回転モータ
- 1 6 0 投光系
- 1 6 1 光源
- 1 6 2 光学系
- 1 6 3、1 6 4 レンズ
- 1 7 0 被検光学系
- 1 8 0 受光系

1 8 1 光学系

1 8 2、1 8 3 レンズ

1 8 4 波面計測装置

1 8 5、1 8 6 光束

1 9 0 被検光学系

2 0 0 偏心量計測装置

2 1 0 平面波

2 2 0 被検光学系

2 3 0 レンズ

2 4 0、2 6 0 偏心量計測装置

2 5 0 球面波

2 7 0 軸

$A X_M$ 計測軸

$A X_{R1}$ 第1の回転軸

$A X_{R2}$ 第2の回転軸

$C R$ 中心光線

E シフト量

$L S_1$ 、 $L S_2$ 、 $L S_3$ レンズ面

$L S_1$ 、 $L S_2$ 、 $L S_j$ レンズ面

$L 1$ 、 $L 2$ レンズ

$L 1_1$ 、 $L 1_2$ 、 $L 2_1$ 、 $L 2_2$ レンズ面

$I M 1$ 、 $I M 2$ 、 $I M 3$ 像

$O B$ 物体

X 、 Y 、 A 、 B 偏心自由度

$S C_1$ 、 $S C_2$ 、 $\dots$ 、 $S C_j$ 、 $S C_{j+1}$ 、 $S C_{j+2}$ 、 $\dots$ 、 $S C_m$ 球心

δ_1 、 δ_2 、 $\dots$ 、 δ_j 、 δ_{j+1} 、 δ_{j+2} 、 $\dots$ 、 δ_m Y 方向のシフト量

請求の範囲

- [請求項1] 計測軸上に配置された被検光学系に光束を照射して、偏心量を計測する方法であって、
- 前記被検光学系から出射した前記光束に基づいて波面データを取得する取得工程と、
- 前記波面データから所定の収差成分を抽出する第1の抽出工程と、
- 前記所定の収差成分から第1の収差成分を抽出する第2の抽出工程と、
- 前記第1の収差成分、偏心収差感度及び偏心量についての連立1次方程式を解析する解析工程と、を備え、
- 前記所定の収差成分は、偏心によって生じる収差成分が含まれる収差成分であり、
- 前記第1の収差成分は、前記所定の収差成分のうちの偏心量の1乗に比例する収差成分であり、
- 前記偏心収差感度は、偏心量の1乗に比例する収差感度であることを特徴とする偏心量計測方法。
- [請求項2] 前記取得工程では、2つの照射位置から前記光束が照射され、
- 前記2つの照射位置は前記計測軸に対して対称になっており、
- 前記第1の抽出工程は、一方の照射位置における波面データと他方の照射位置における波面データの各々から、前記所定の収差成分を抽出することを特徴とする請求項1に記載の偏心量計測方法。
- [請求項3] 前記所定の収差成分は第2の収差成分を含んでおり、
- 前記第2の収差成分は、前記所定の収差成分のうちの偏心量の2乗に比例する収差成分であり、
- 物体高座標は前記照射位置を表す座標であり、
- 所定の関数は前記第2の収差成分を表す関数であって、前記物体高座標を変数として含んでいる関数であり、
- 前記第2の抽出工程は、第1の演算工程と第2の演算工程とを有し

、

前記第 1 の演算工程では、前記所定の関数が奇関数の場合に、前記一方の照射位置における前記所定の収差成分と、前記他方の照射位置における前記所定の収差成分との和をとり、

前記第 2 の演算工程では、前記所定の関数が偶関数の場合に、前記一方の照射位置における前記所定の収差成分と、前記他方の照射位置における前記所定の収差成分との差をとることを特徴とする請求項 2 に記載の偏心量計測方法。

[請求項4]

前記取得工程は第 1 の回転を含み、

前記第 1 の回転では、前記計測軸の周りに前記被検光学系を回転させ、

同一の前記照射位置で、前記第 1 の回転前の波面データと、前記第 1 の回転後の波面データと、を取得することを特徴とする請求項 2 または 3 に記載の偏心量計測方法。

[請求項5]

前記取得工程は第 1 の回転を含み、

前記第 1 の回転では、前記計測軸と平行な軸の周りに前記被検光学系を回転させ、

同一の前記照射位置で、前記第 1 の回転前の波面データと、前記第 1 の回転後の波面データと、を取得することを特徴とする請求項 2 または 3 に記載の偏心量計測方法。

[請求項6]

前記被検光学系を回転させる角度が 10 度以上であることを特徴とする請求項 4 または 5 に記載の偏心量計測方法。

[請求項7]

前記被検光学系を回転させる角度が 180 度であることを特徴とする請求項 6 に記載の偏心量計測方法。

[請求項8]

前記一方の照射位置と前記他方の照射位置とをそれぞれ移動させ、移動後の照射位置で前記波面データを取得することを特徴とする請求項 2 から 7 のいずれか一項に記載の偏心量計測方法。

[請求項9]

前記一方の照射位置を移動させ、移動後の照射位置で前記波面デー

タを全て取得し、

その後、前記他方の照射位置を移動させ、移動後の照射位置で前記波面データを全て取得することを特徴とする請求項 8 に記載の偏心量計測方法。

[請求項10] 前記一方の照射位置と前記他方の照射位置の各々で前記波面データを取得し、

その後、前記一方の照射位置と前記他方の照射位置を移動させ、移動後の照射位置の各々で前記波面データを取得することを特徴とする請求項 8 に記載の偏心量計測方法。

[請求項11] 第 1 の照射状態で前記波面データの取得が行われ、

前記第 1 の照射状態では、前記光束の中心光線が前記計測軸と平行であることを特徴とする請求項 1 から 10 のいずれか一項に記載の偏心量計測方法。

[請求項12] 第 2 の照射状態で前記波面データの取得が行われ、

前記第 2 の照射状態では、前記光束の中心光線が前記計測軸と所定の角度で交わることを特徴とする請求項 1 から 10 のいずれか一項に記載の偏心量計測方法。

[請求項13] 前記第 2 の抽出工程は、所定の関数系を用いて行われ、

前記所定の関数系は、前記第 1 の収差成分を示す関数系であって、一方の照射位置における前記所定の収差成分と、他方の照射位置における前記所定の収差成分とを、前記所定の関数系に当てはめることを特徴とする請求項 1 に記載の偏心量計測方法。

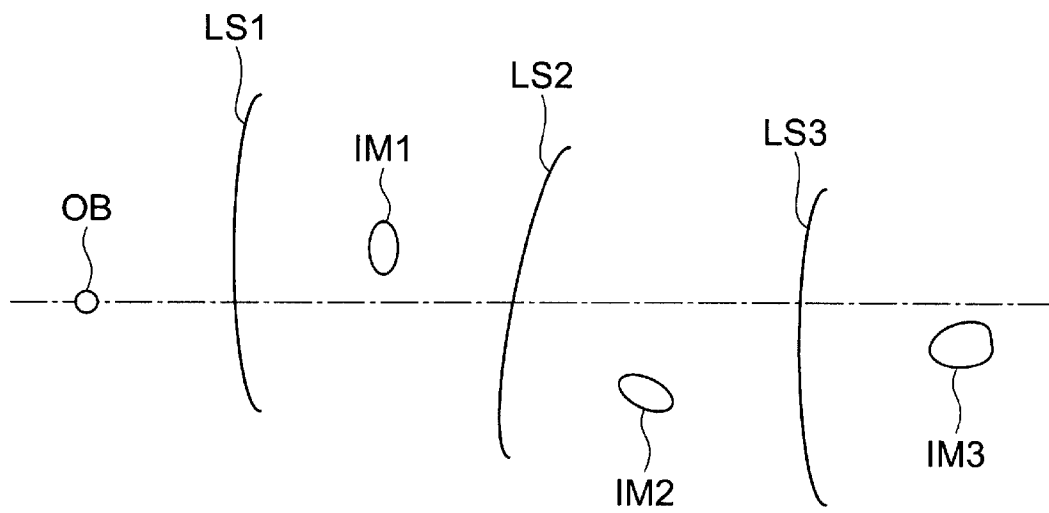
[請求項14] 前記取得工程は第 2 の回転を含み、

前記第 2 の回転では、前記計測軸と直交する軸の周りに前記被検光学系を 180 度回転させ、

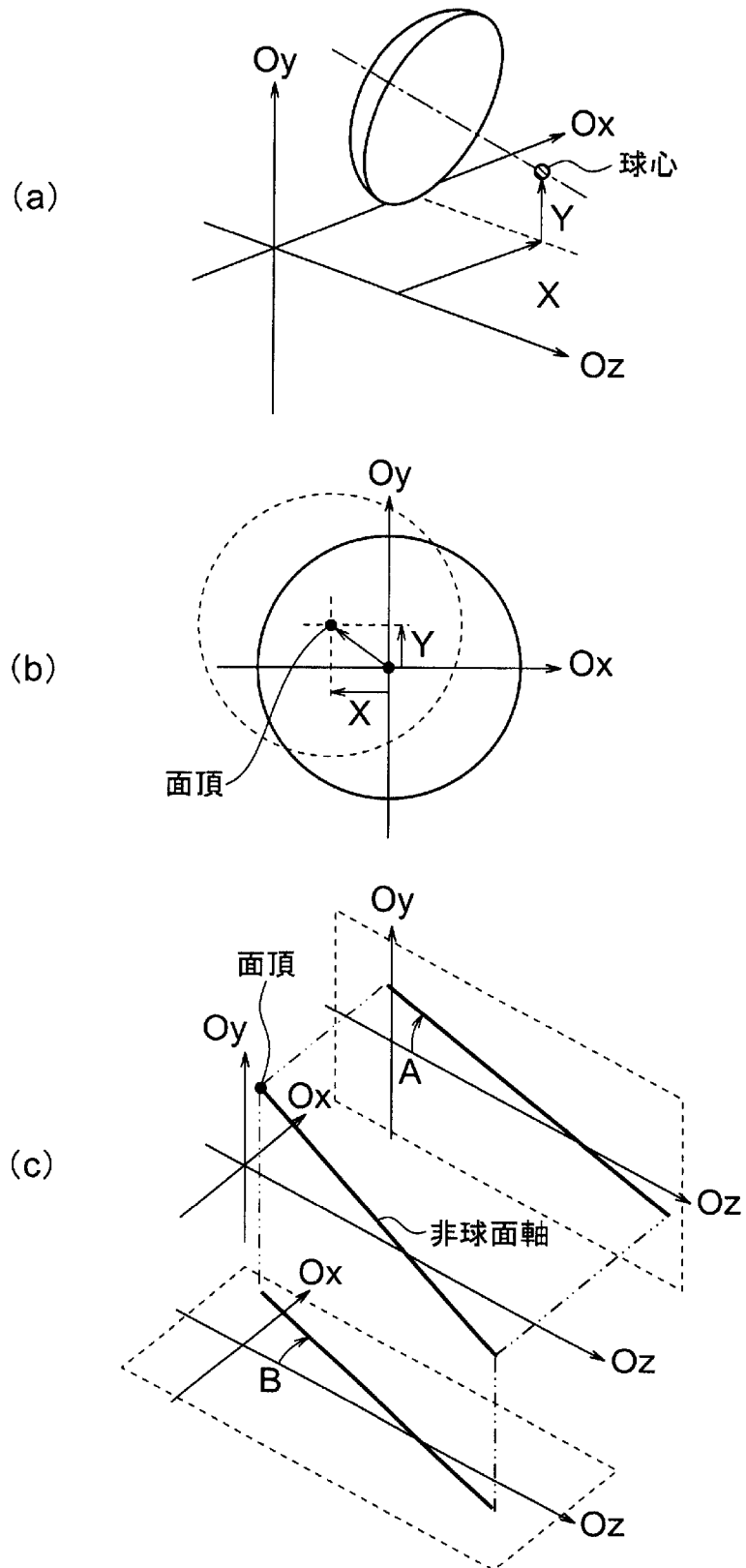
前記第 2 の回転前の波面データと、前記第 2 の回転後の波面データと、を取得することを特徴とする請求項 1 から 13 のいずれか一項に記載の偏心量計測方法。

- [請求項15] 前記第2の回転前の波面データの取得時における偏心量と、前記第2の回転後の波面データの取得時における偏心量とは、両者の絶対値が同一であることを特徴とする請求項14に記載の偏心量計測方法。
- [請求項16] 前記第1の抽出工程は、ゼルニケ多項式を用いて行われ、
前記所定の収差成分は、ゼルニケ多項式の係数であることを特徴とする請求項1から15のいずれか一項に記載の偏心量計測方法。
- [請求項17] 計測軸の一端に配置された投光系と、
前記計測軸の他端に配置された受光系と、
被検光学系を保持する保持部材と、
波面計測装置に接続された処理装置と、を備え、
前記保持部材は、前記投光系と前記受光系との間に配置され、
前記投光系は、前記被検光学系に光束を照射する位置に設けられ、
前記処理装置では、取得工程と、第1の抽出工程と、第2の抽出工程と、解析工程が実行され、
前記取得工程では、前記被検光学系から出射した前記光束に基づいて波面データが取得され、
前記第1の抽出工程では、前記波面データから所定の収差成分が抽出され、
前記第2の抽出工程では、前記所定の収差成分から第1の収差成分が抽出され、
前記解析工程では、前記第1の収差成分、偏心収差感度及び偏心量についての連立1次方程式が解析され、
前記所定の収差成分は、偏心によって生じる収差成分が含まれる収差成分であり、
前記第1の収差成分は、前記所定の収差成分のうちの偏心量の1乗に比例する収差成分であり、
前記偏心収差感度は、偏心量の1乗に比例する収差感度であることを特徴とする偏心量計測装置。

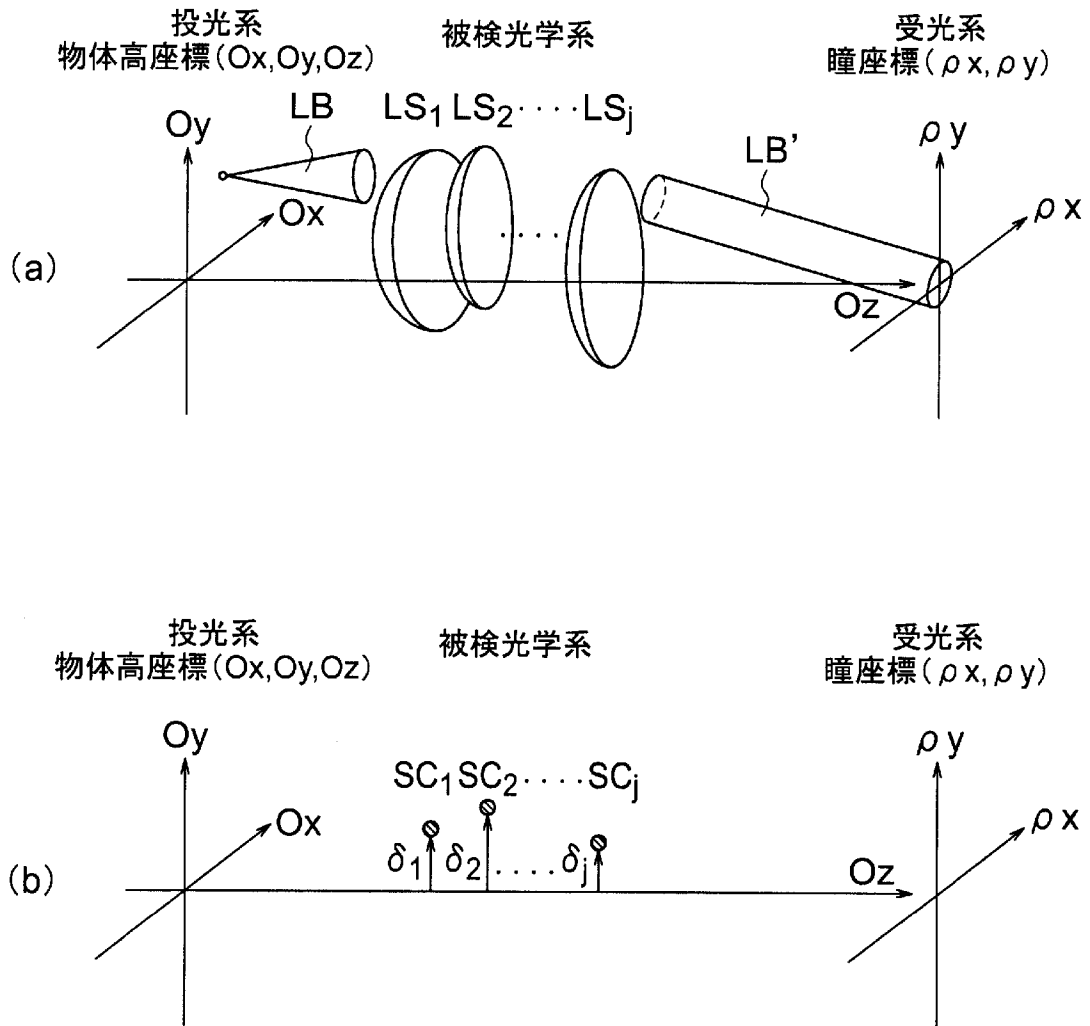
[図1]



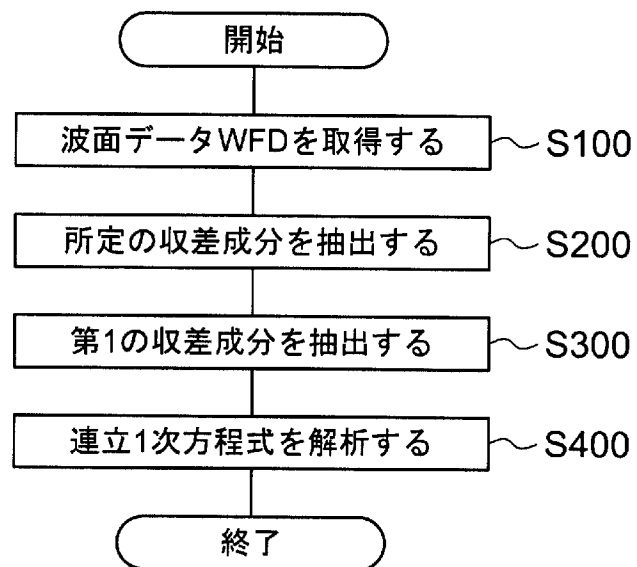
[図2]



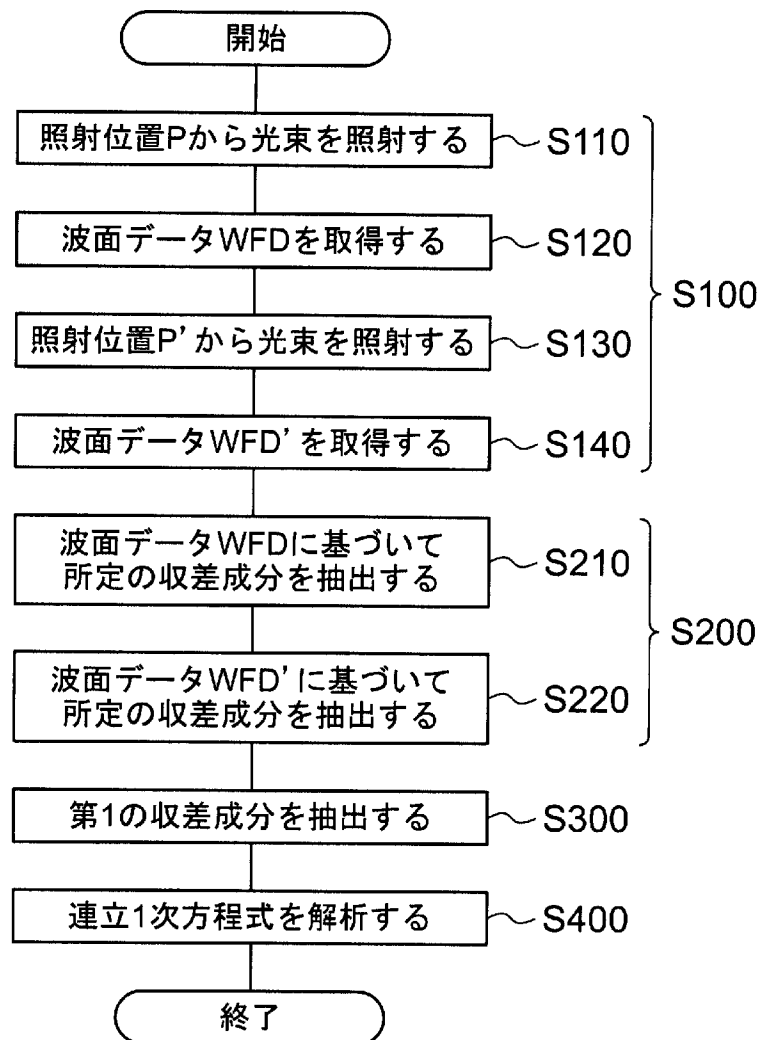
[図3]



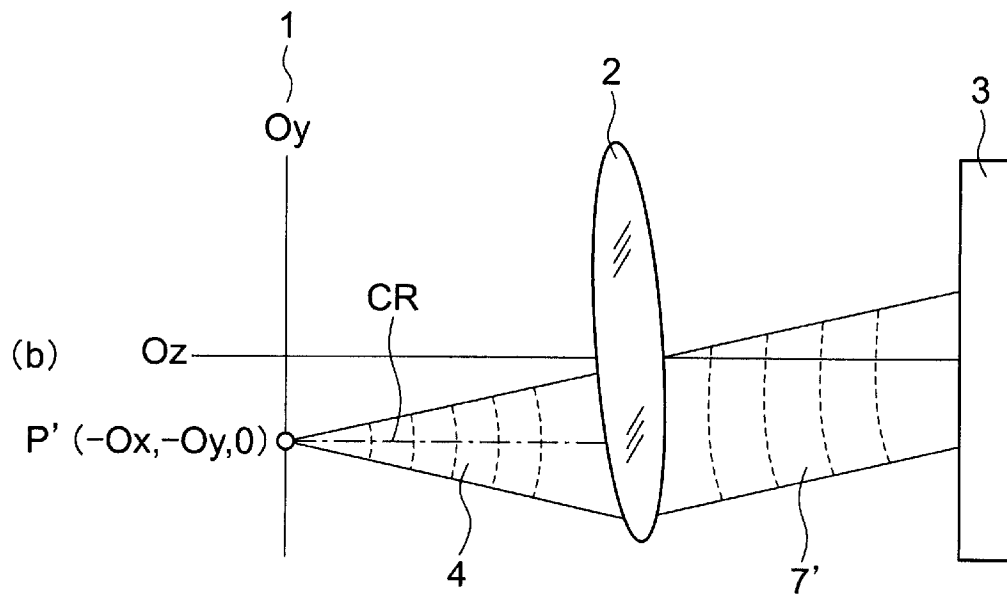
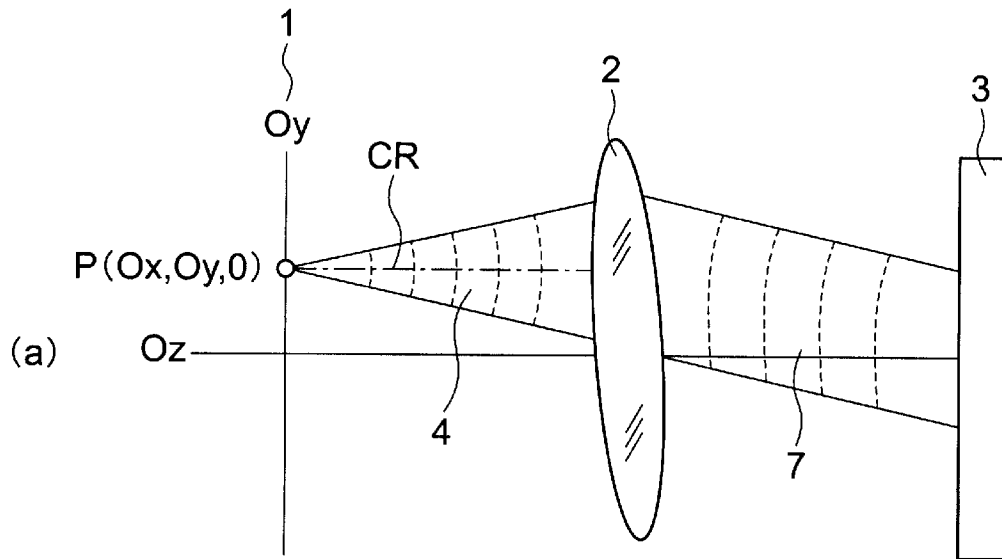
[図4]



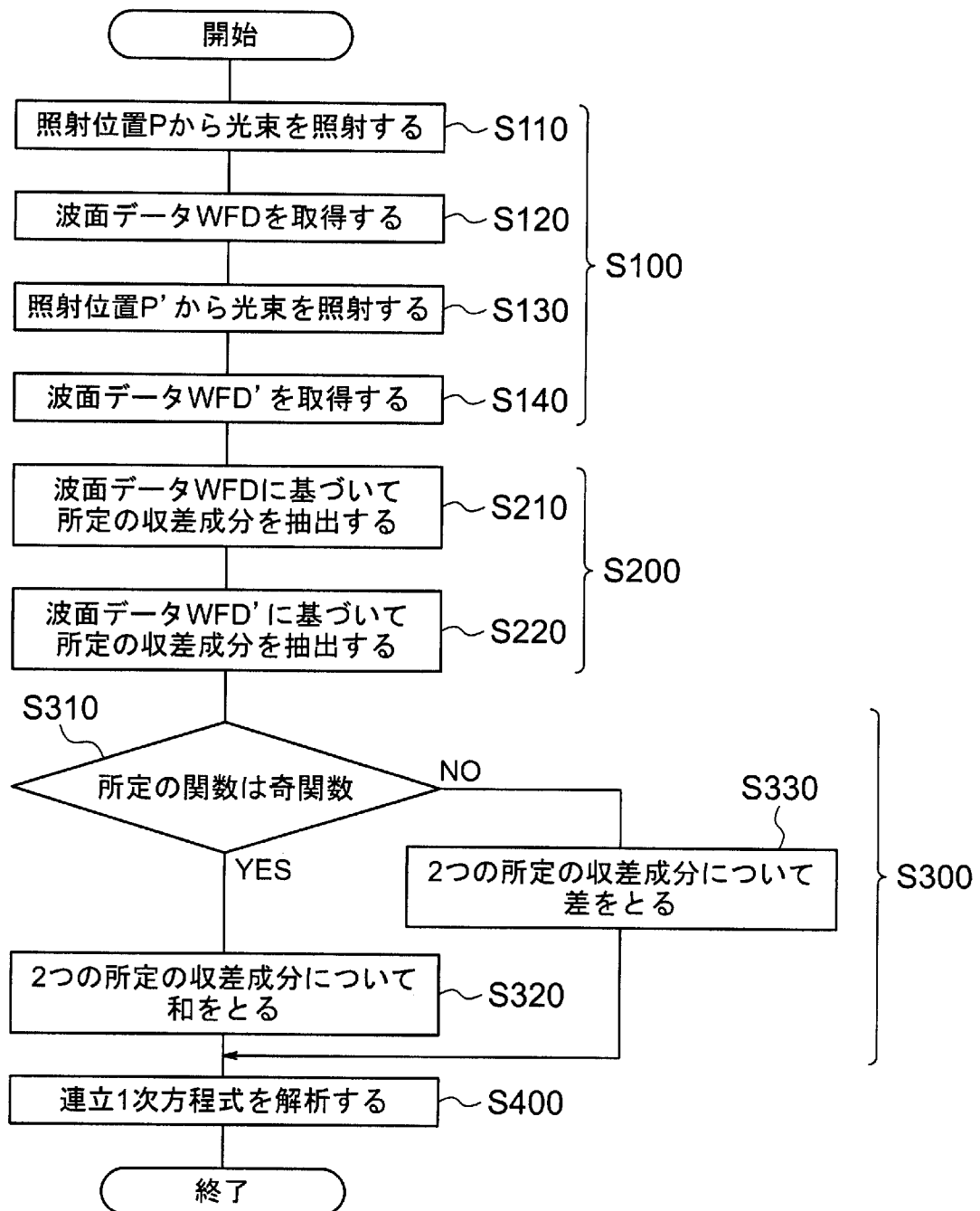
[図5]



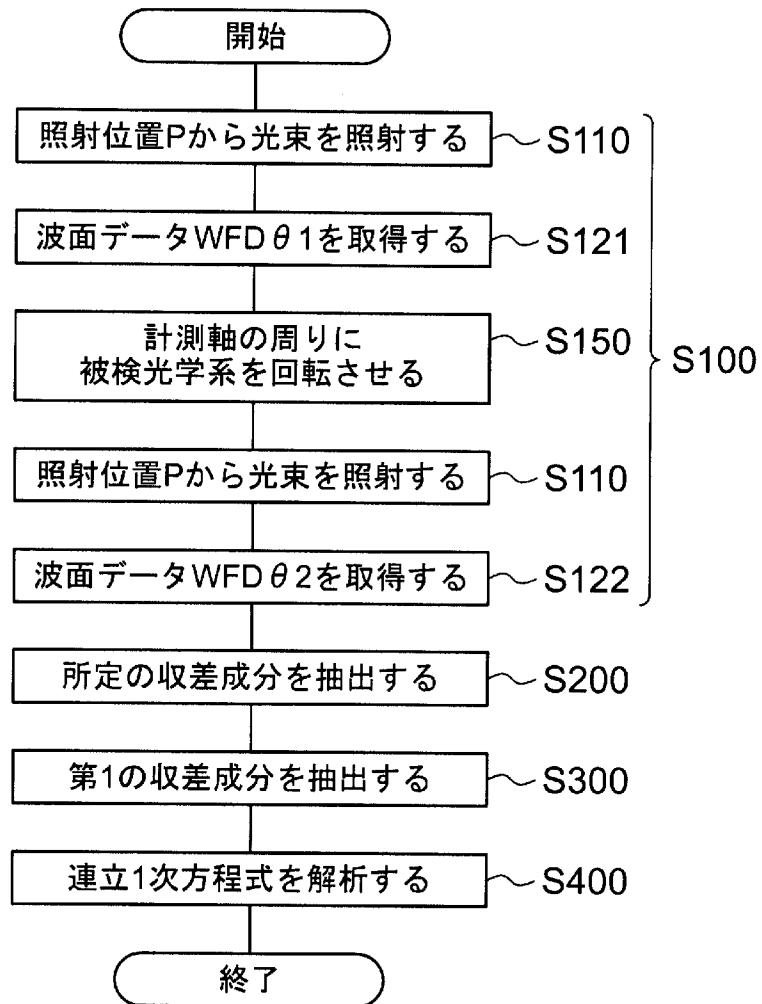
[図6]



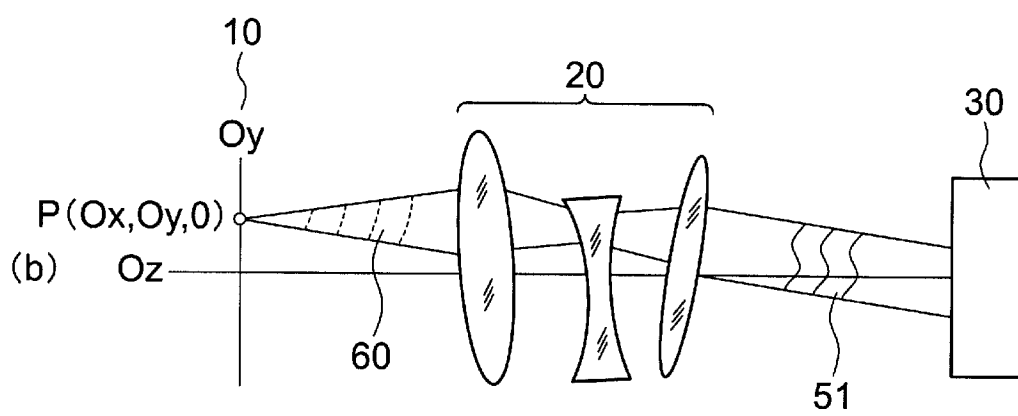
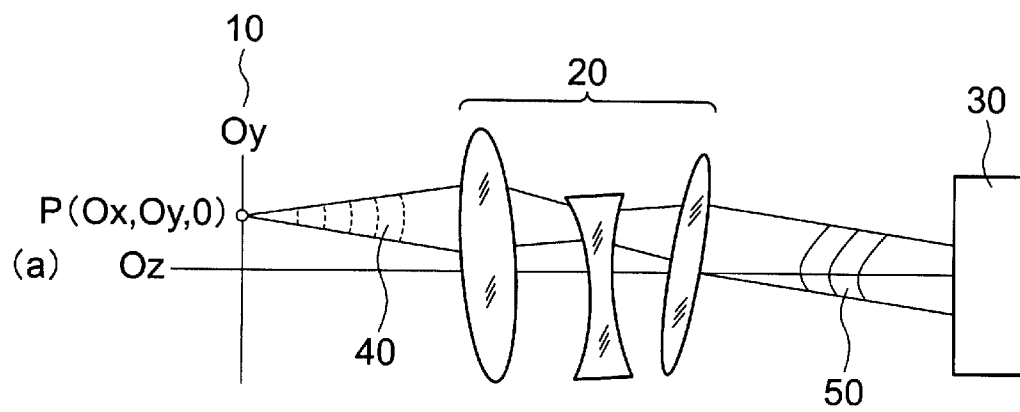
[図7]



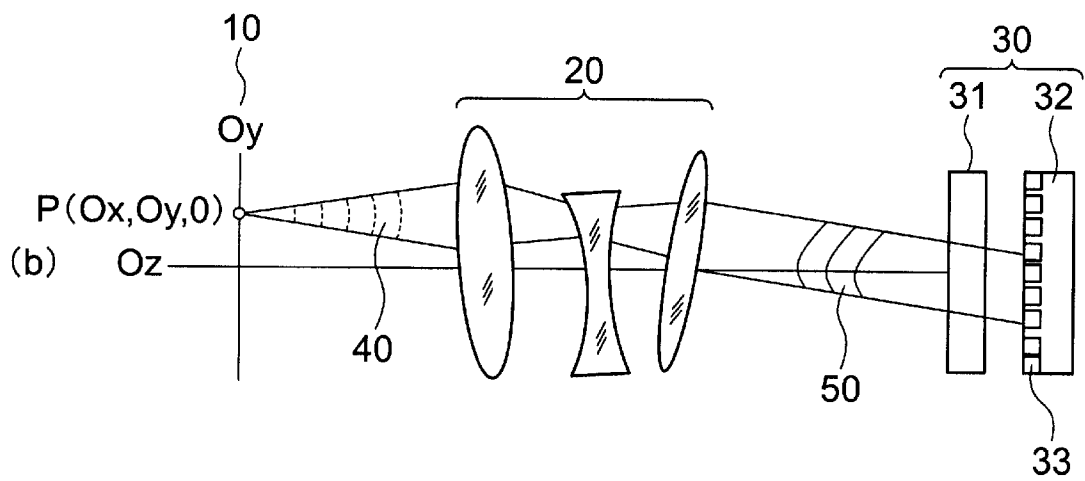
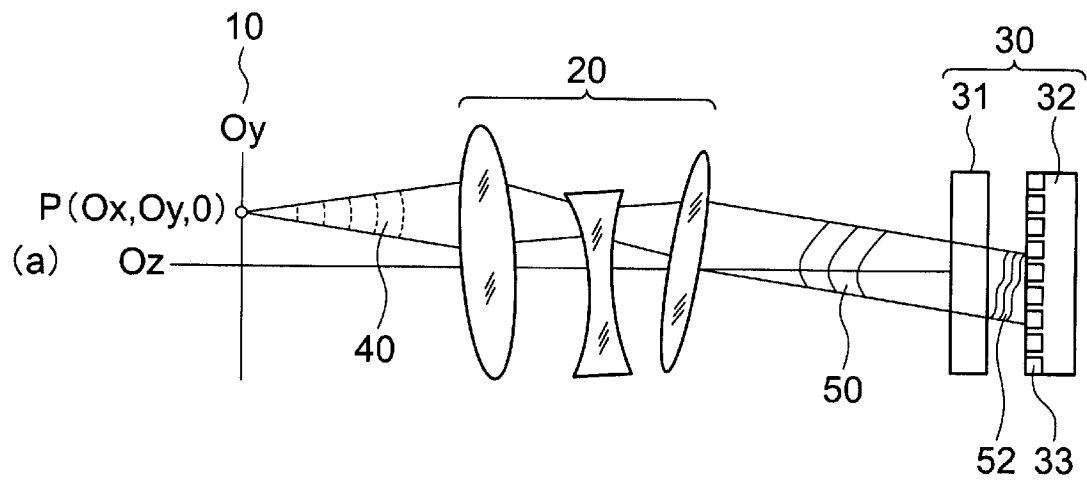
[図8]



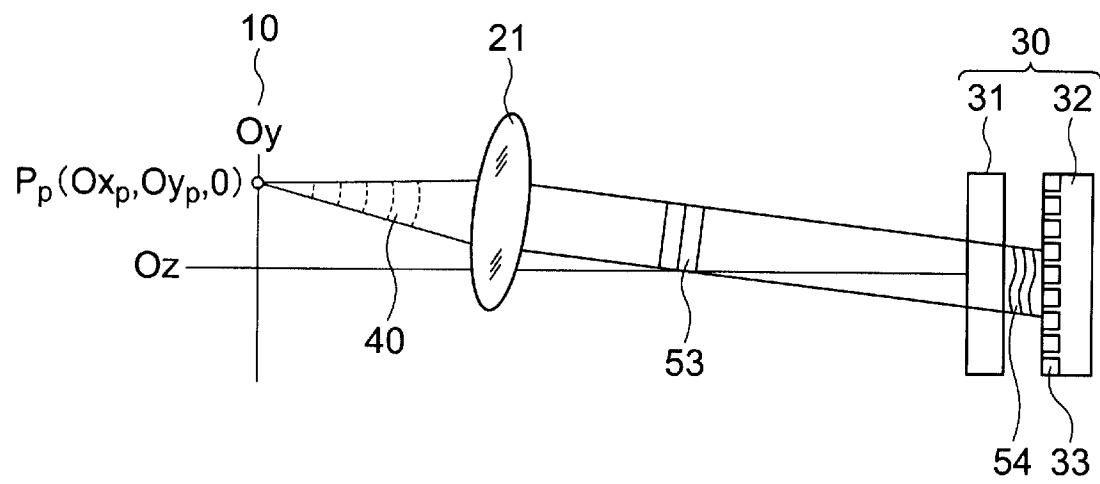
[図9]



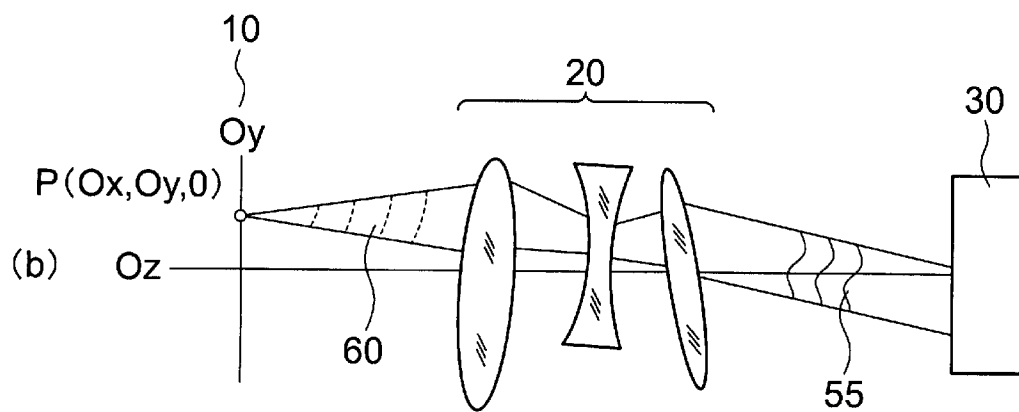
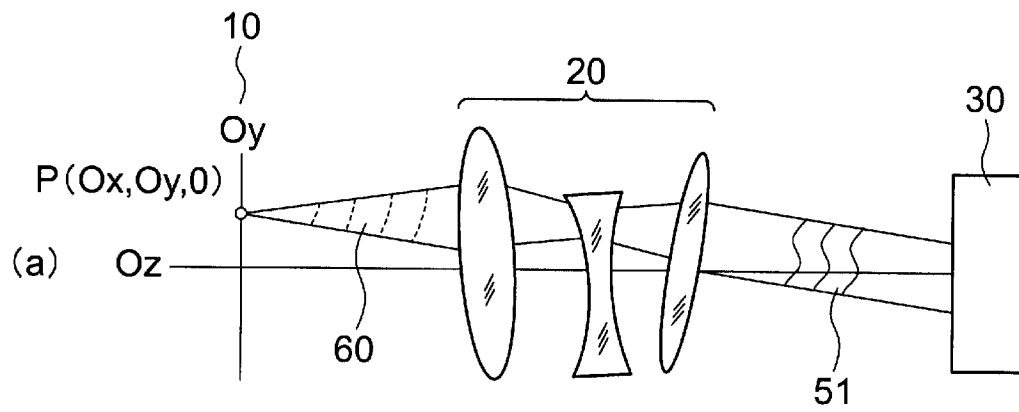
[図10]



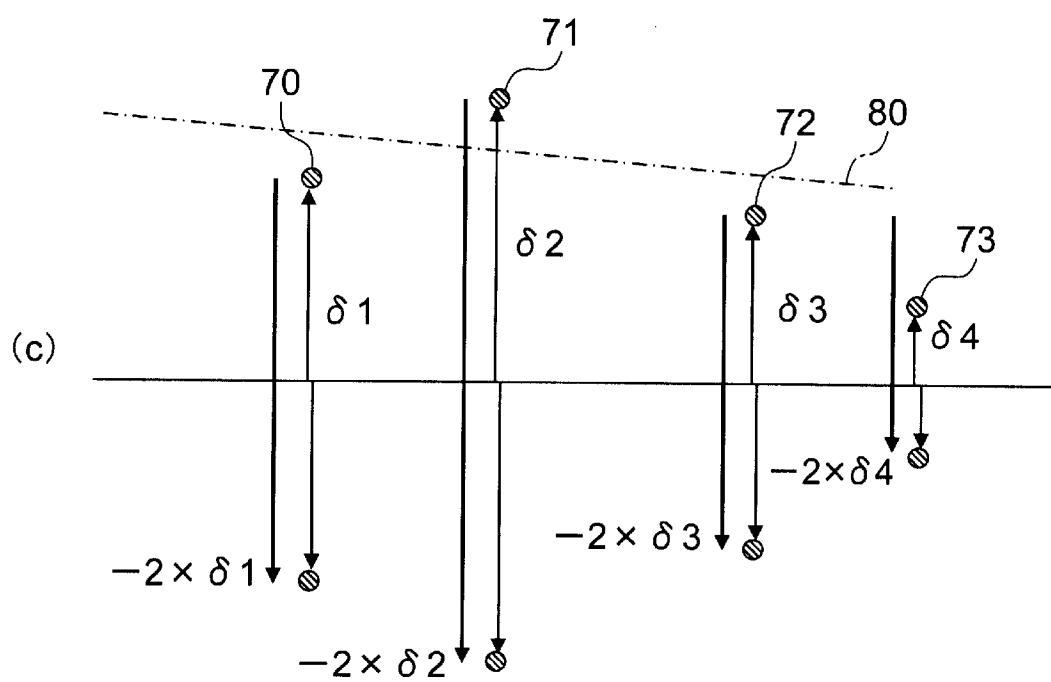
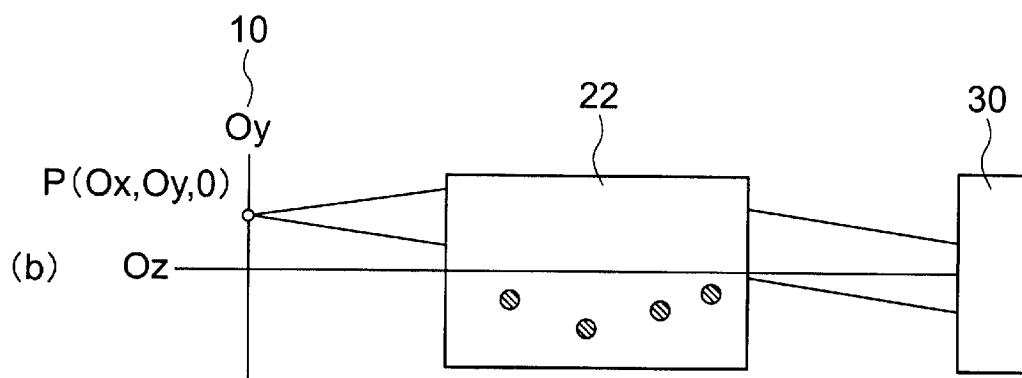
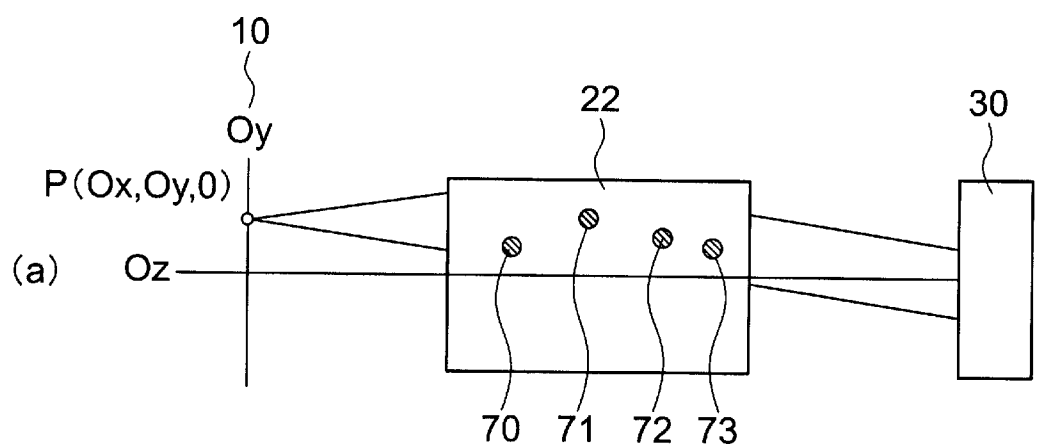
[図11]



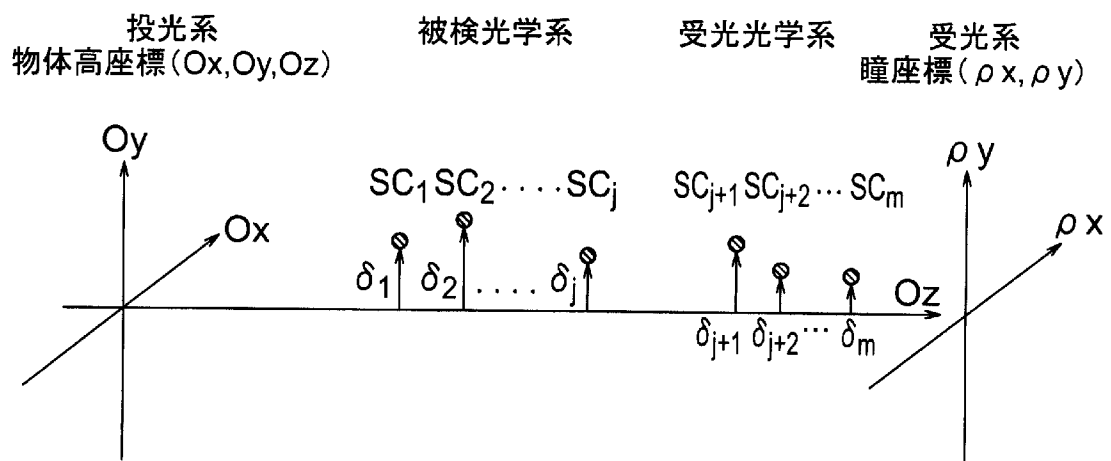
[図12]



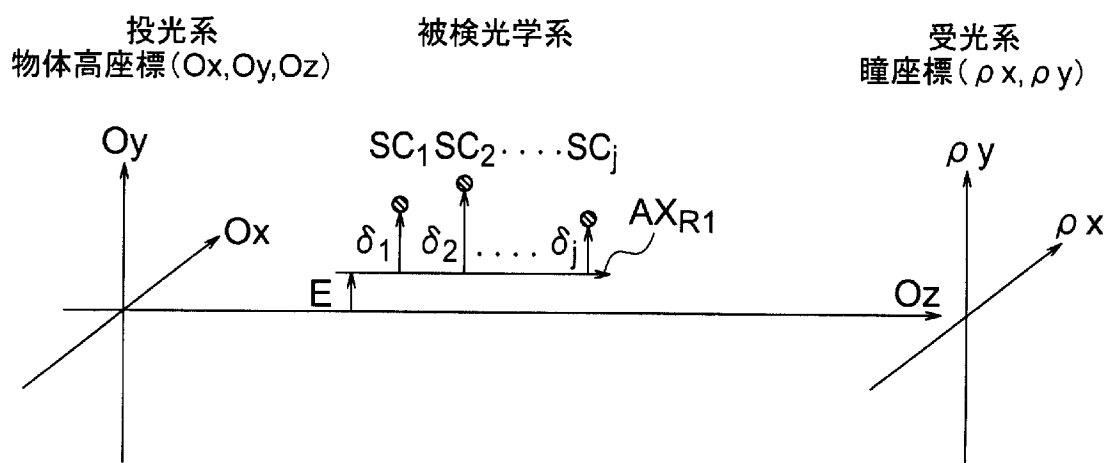
[図13]



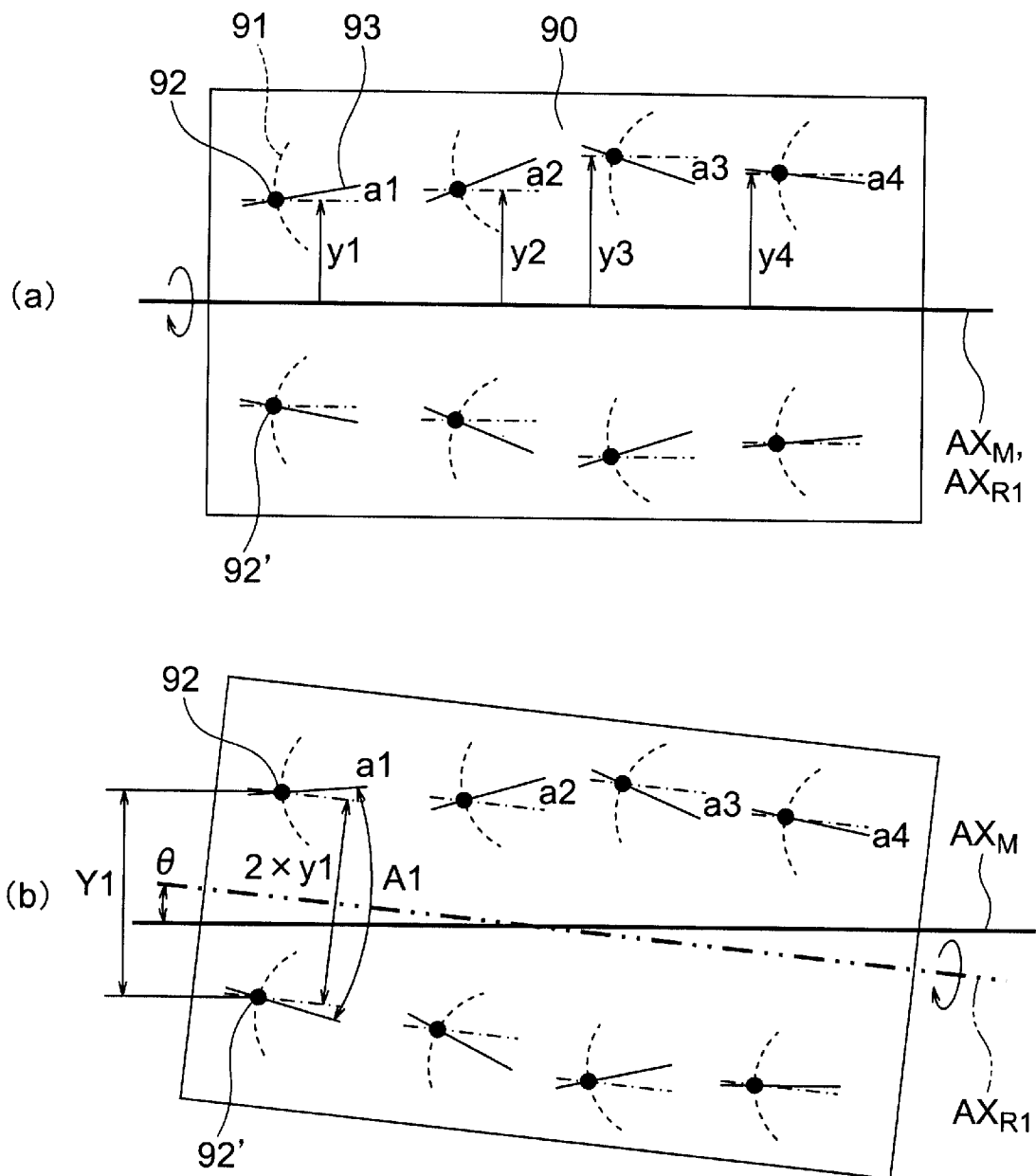
[図14]



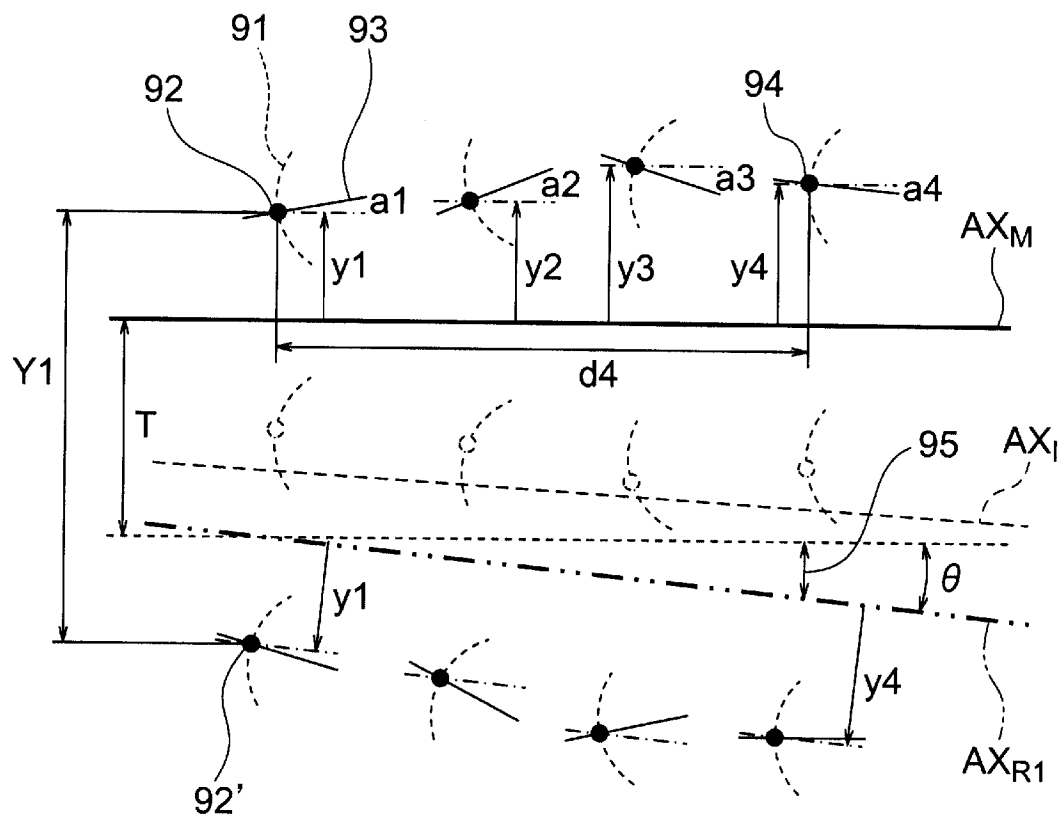
[図15]



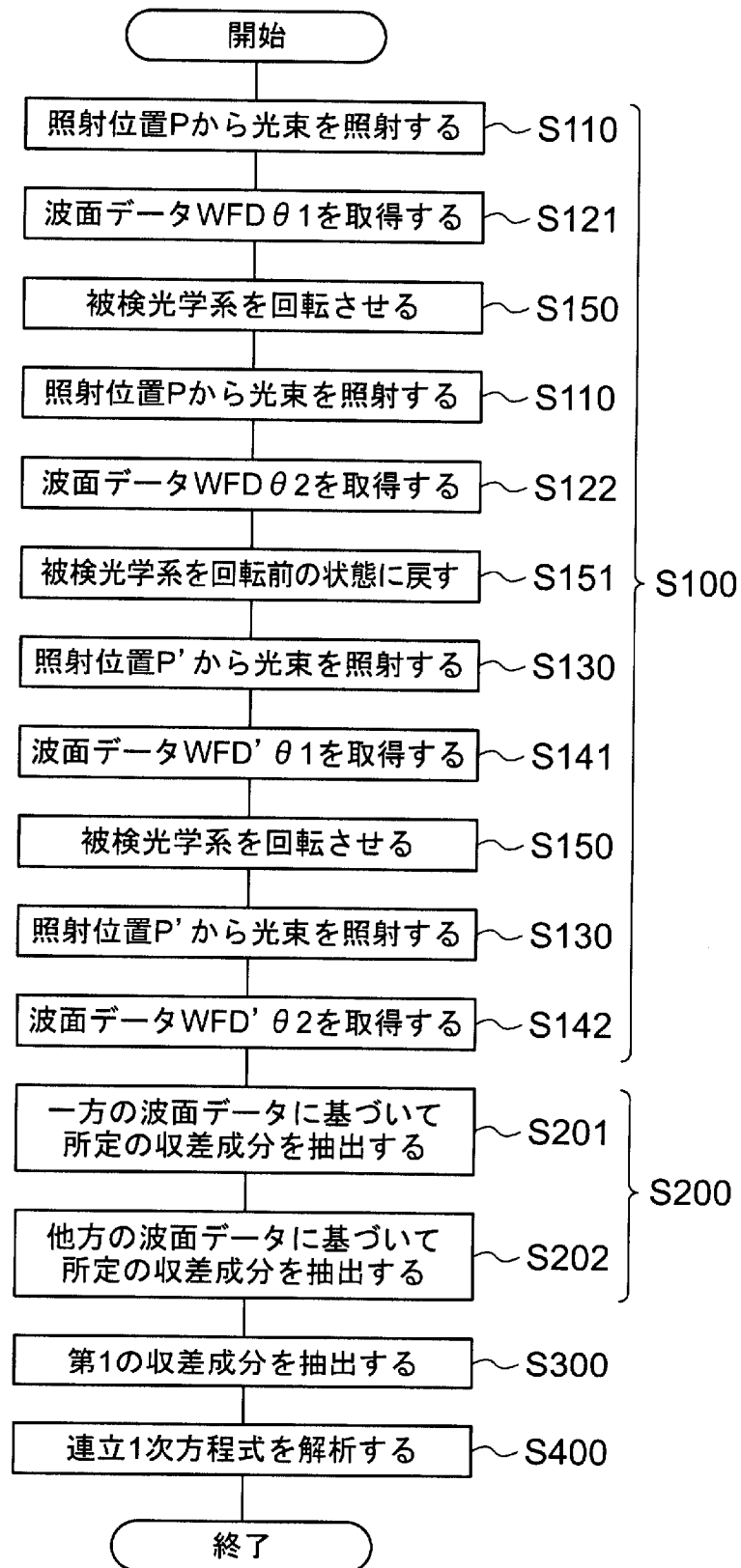
[図16]



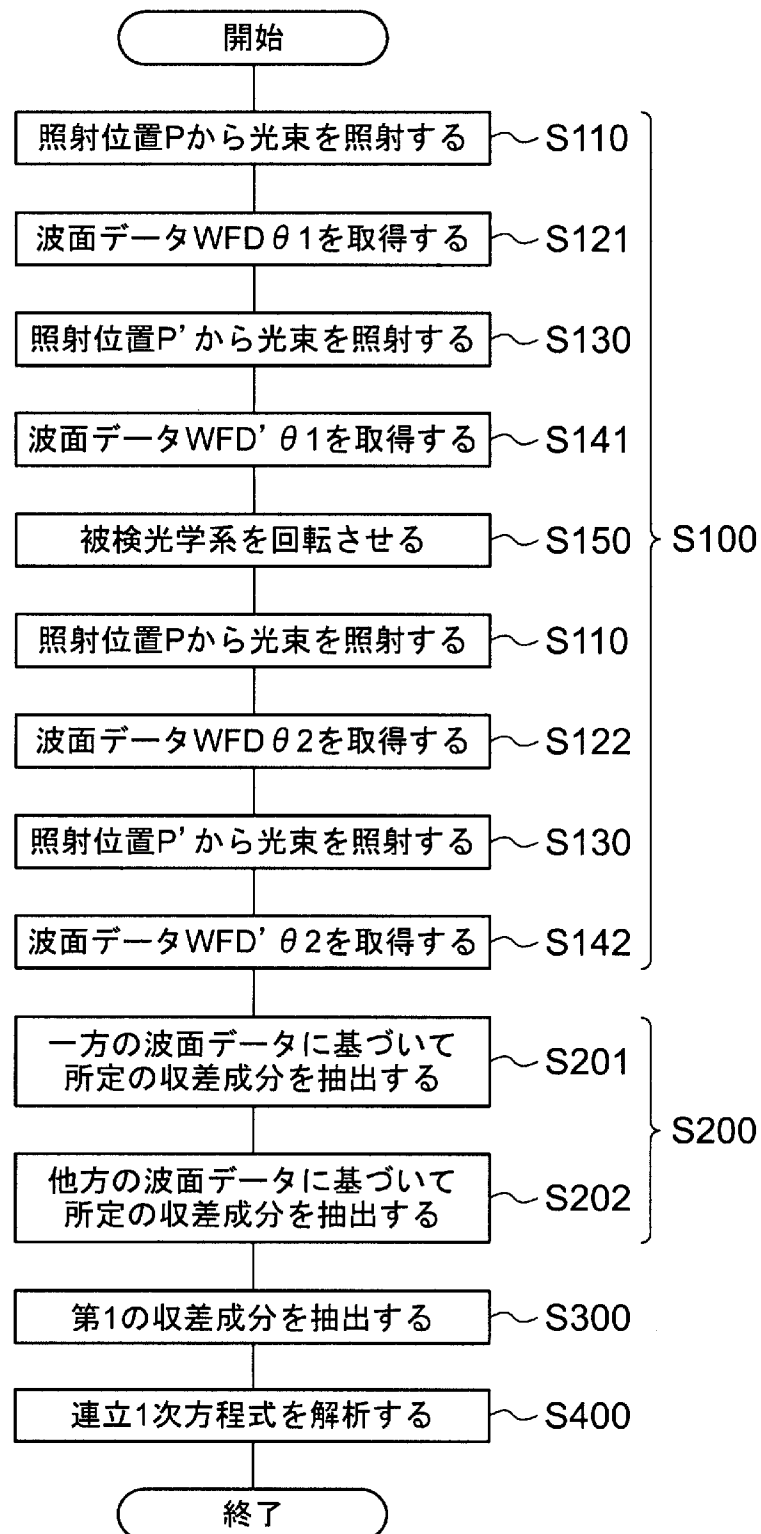
[図17]



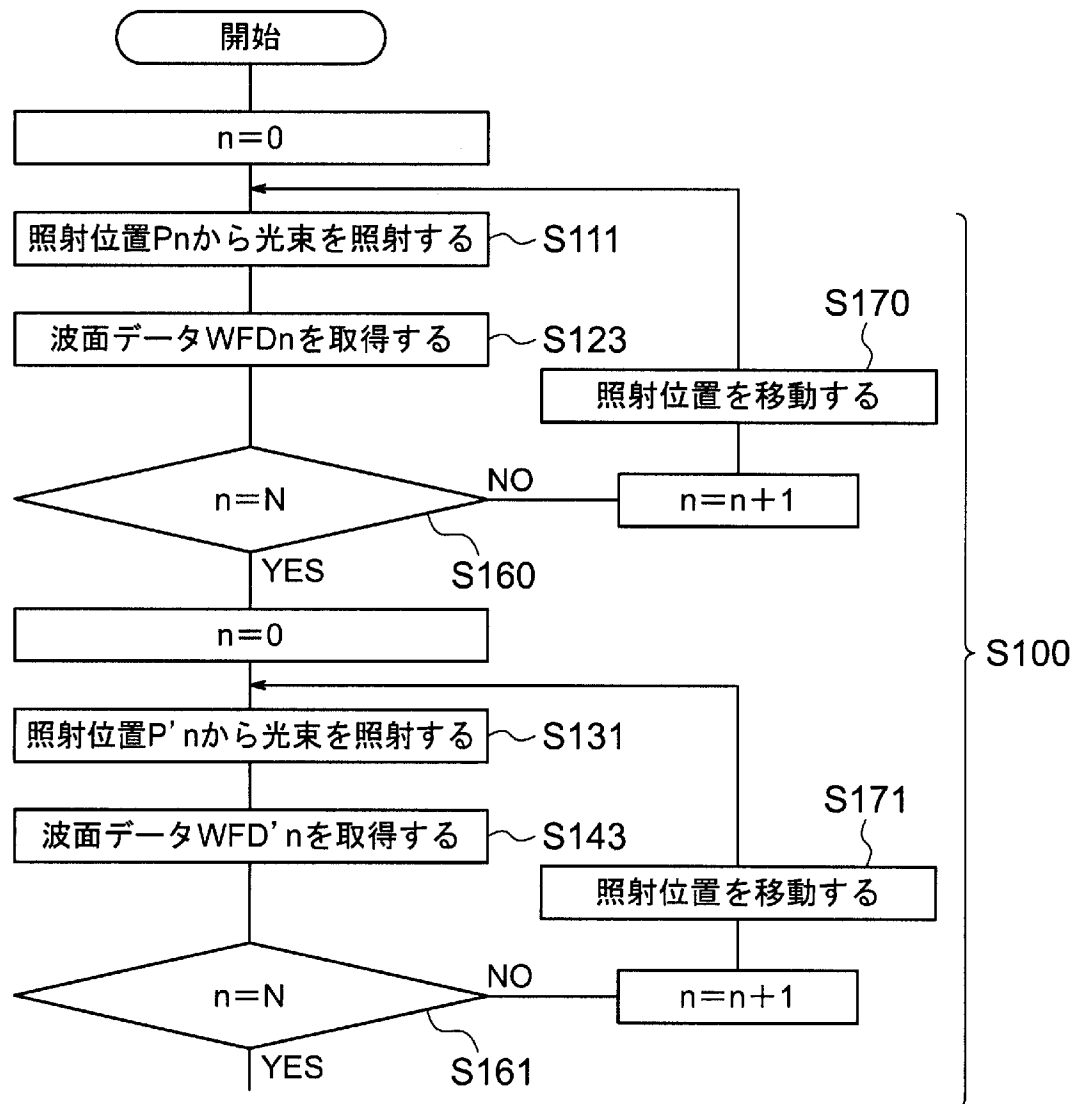
[図18]



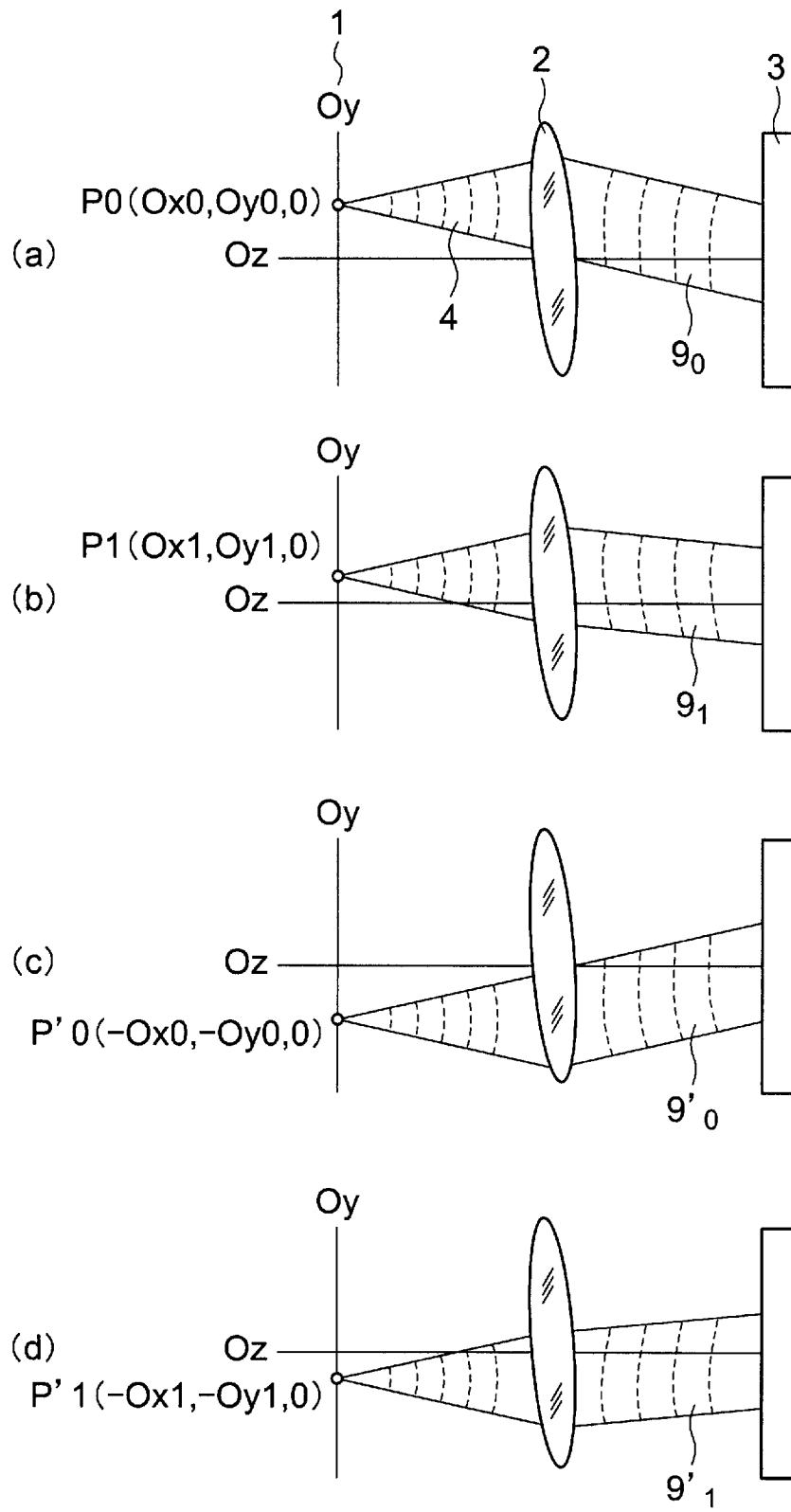
[図19]



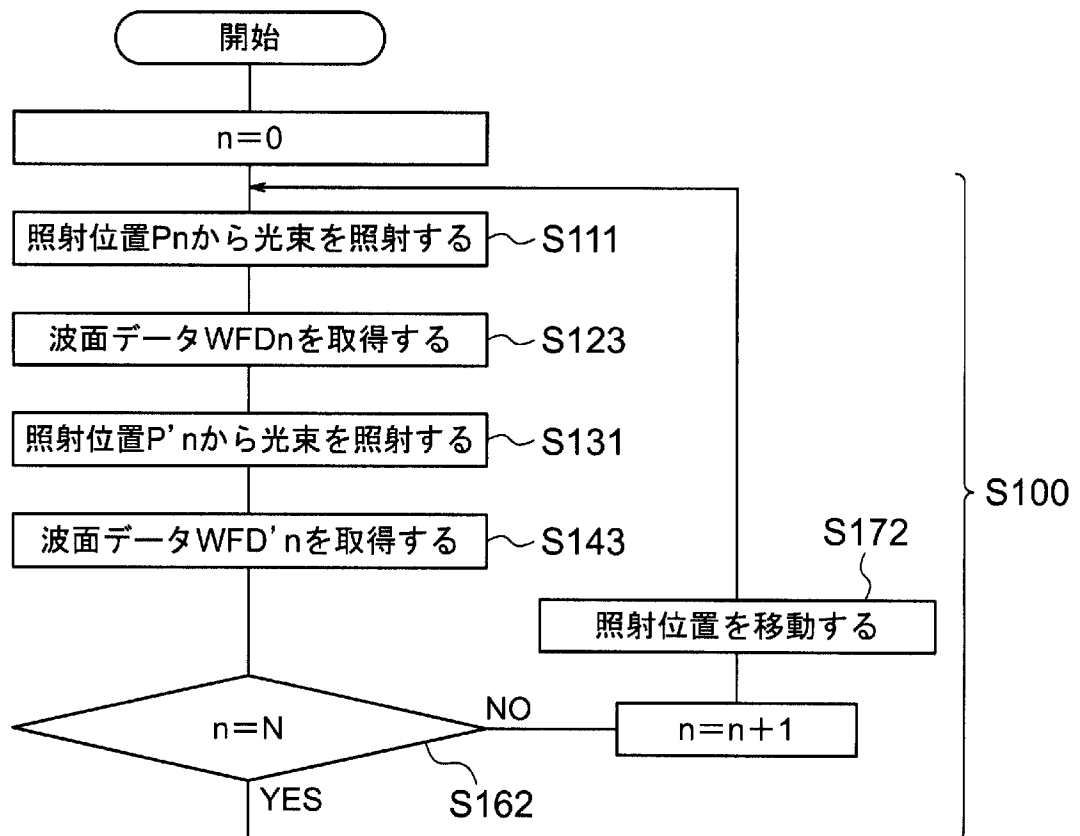
[図20]



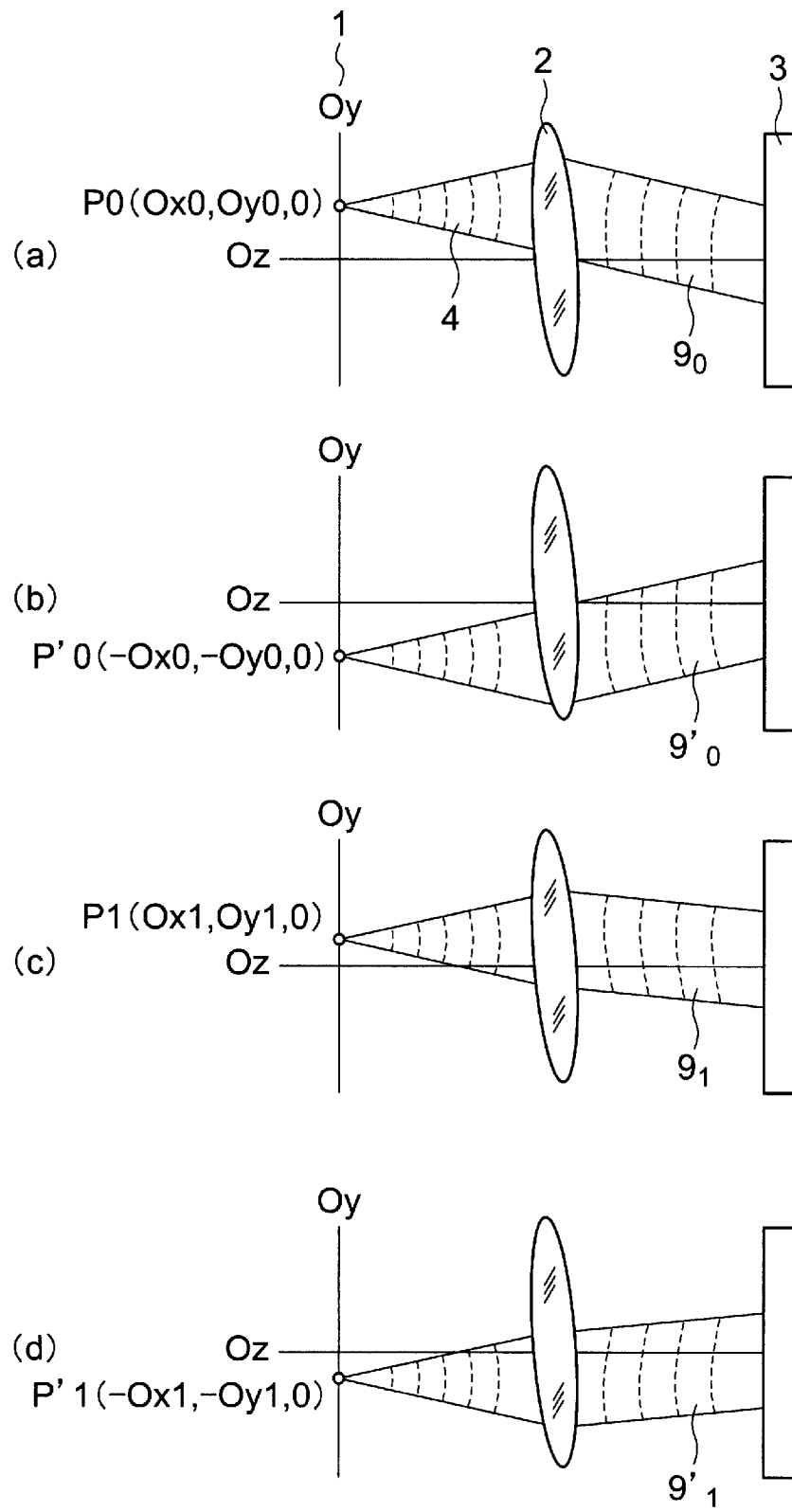
[図21]



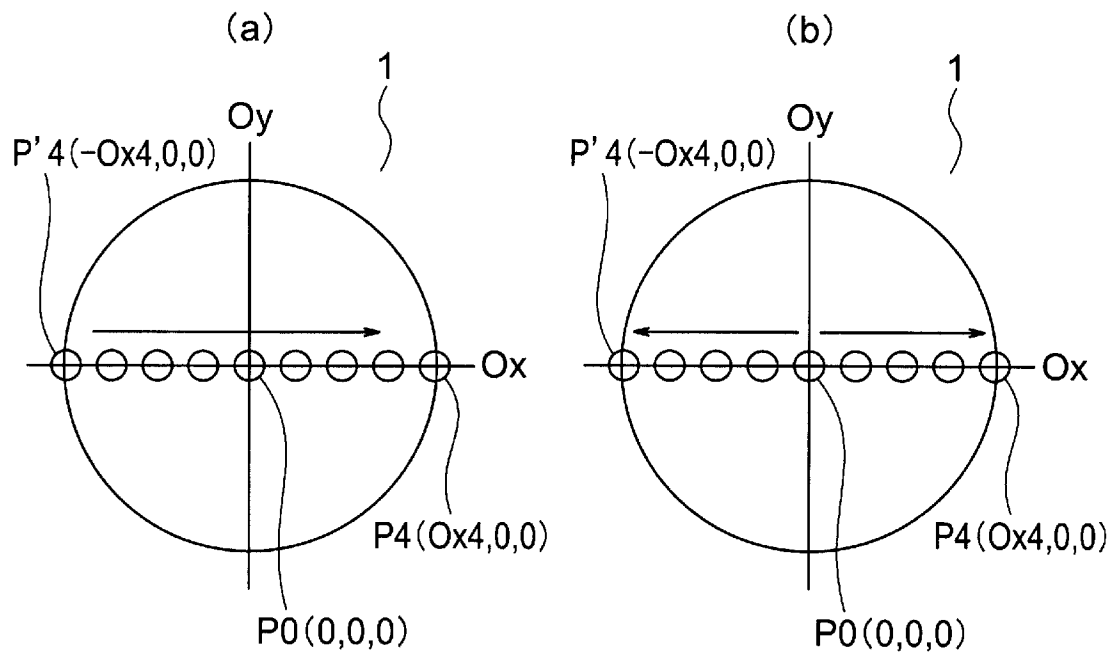
[図22]



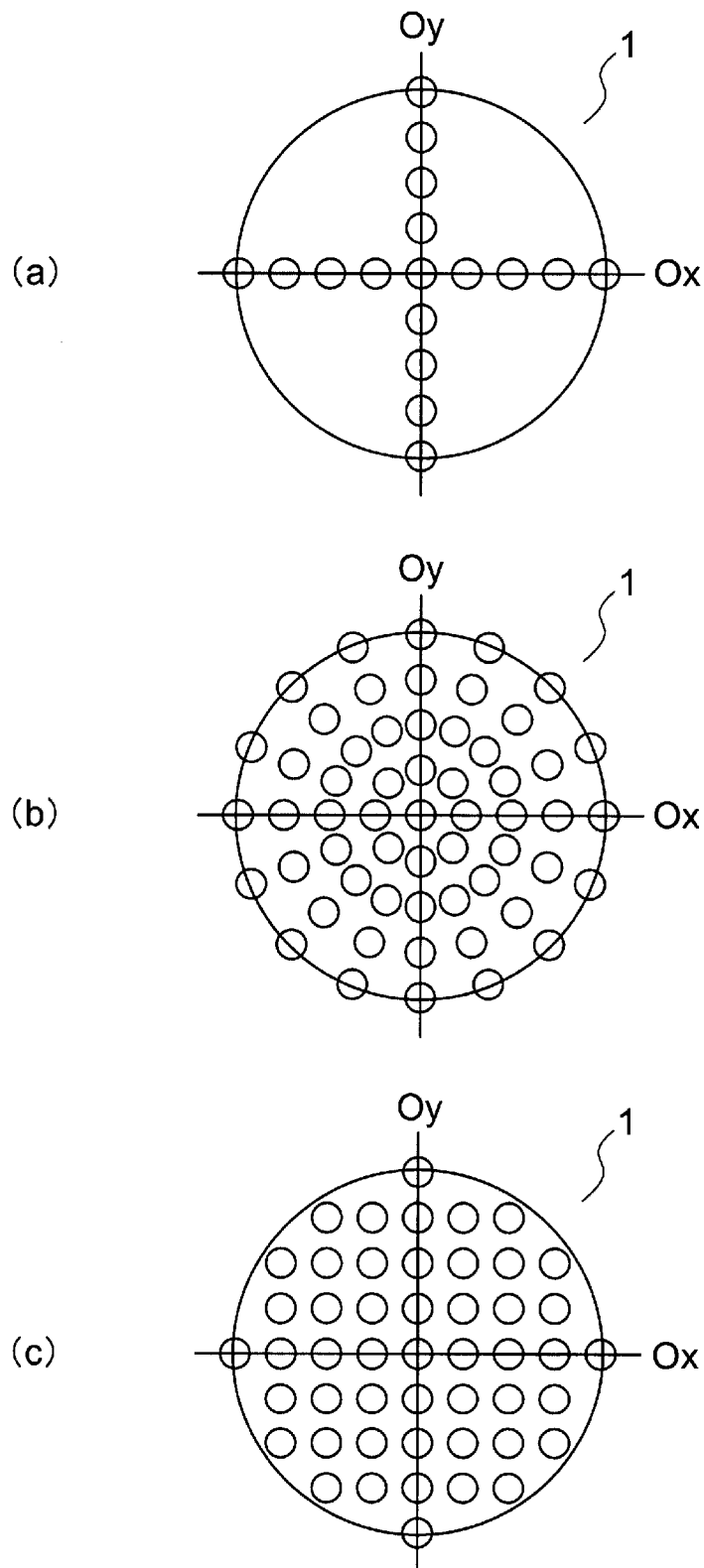
[図23]



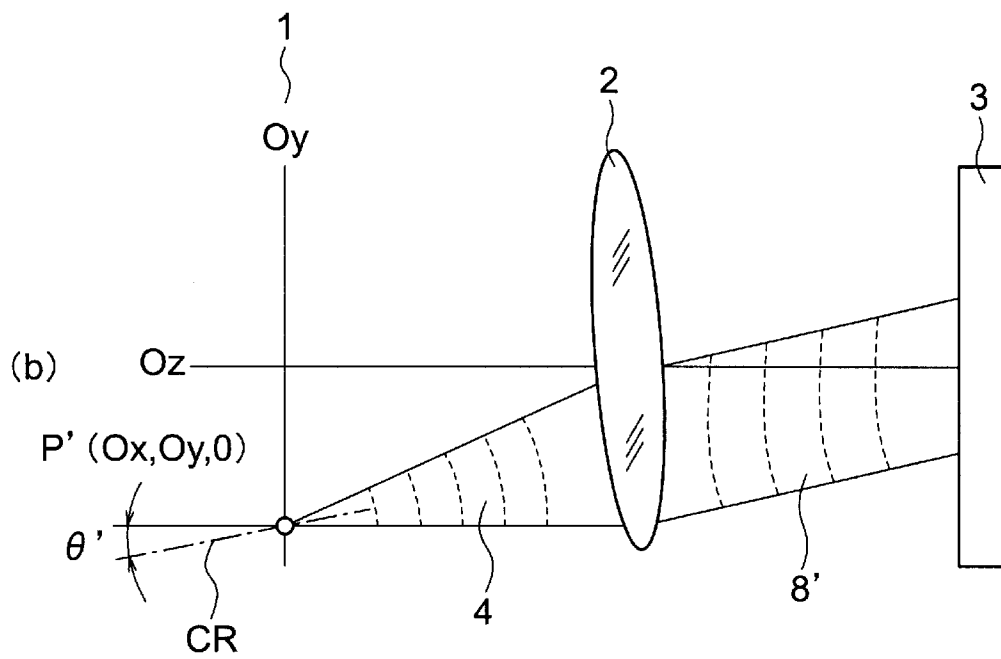
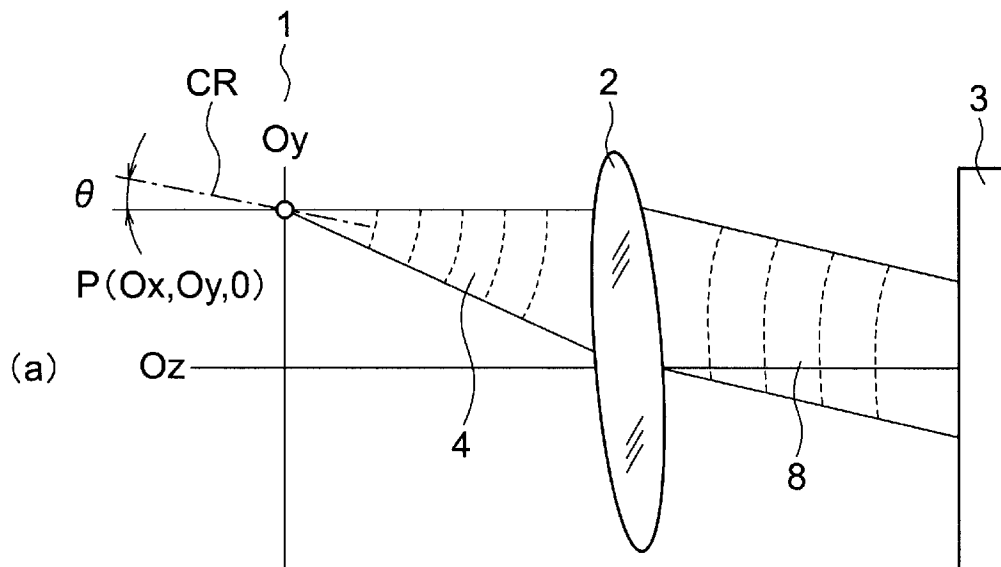
[図24]



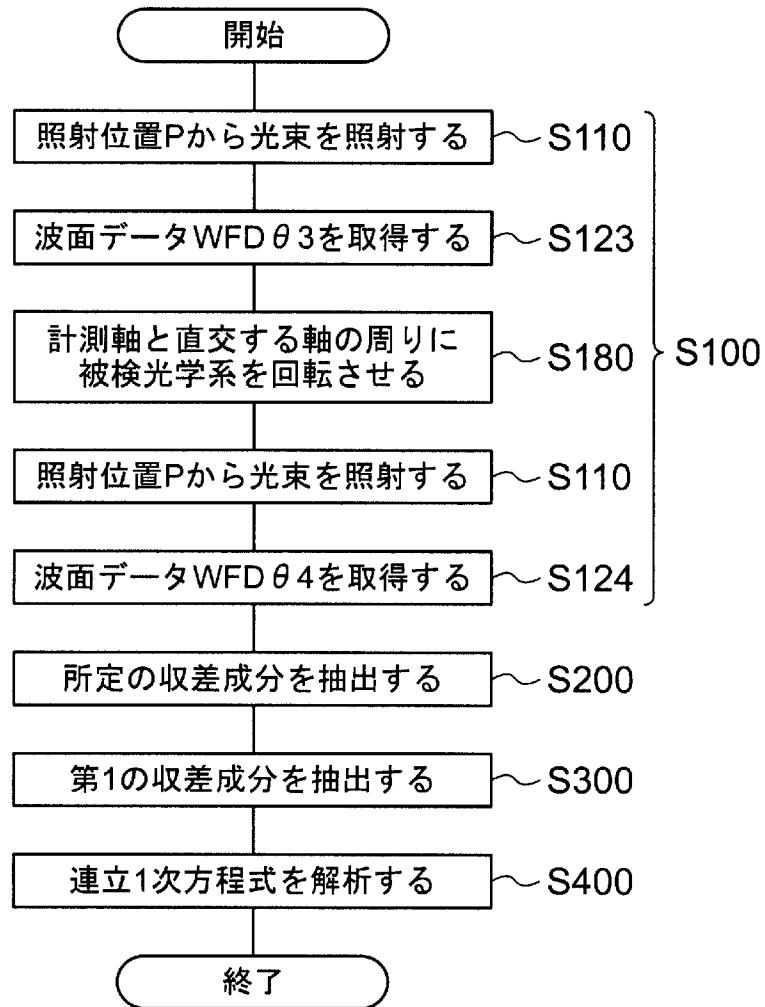
[図25]



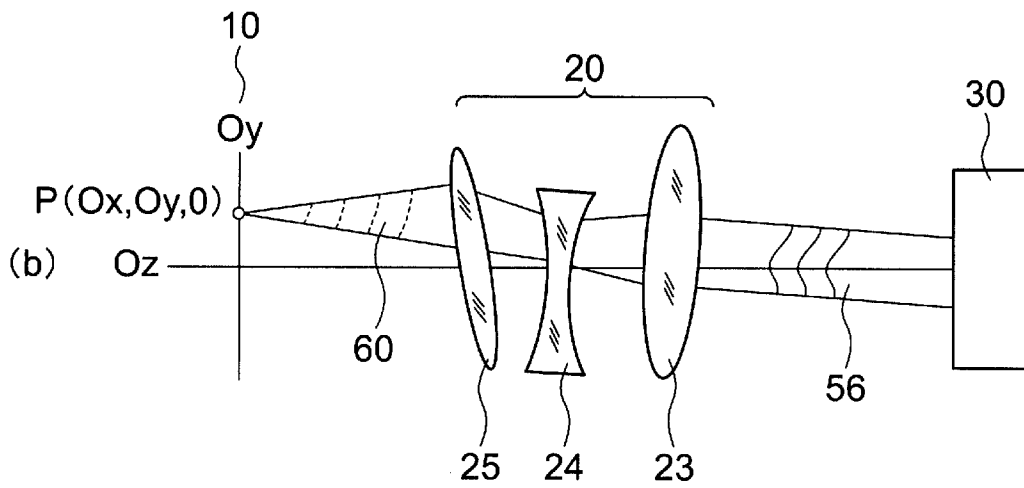
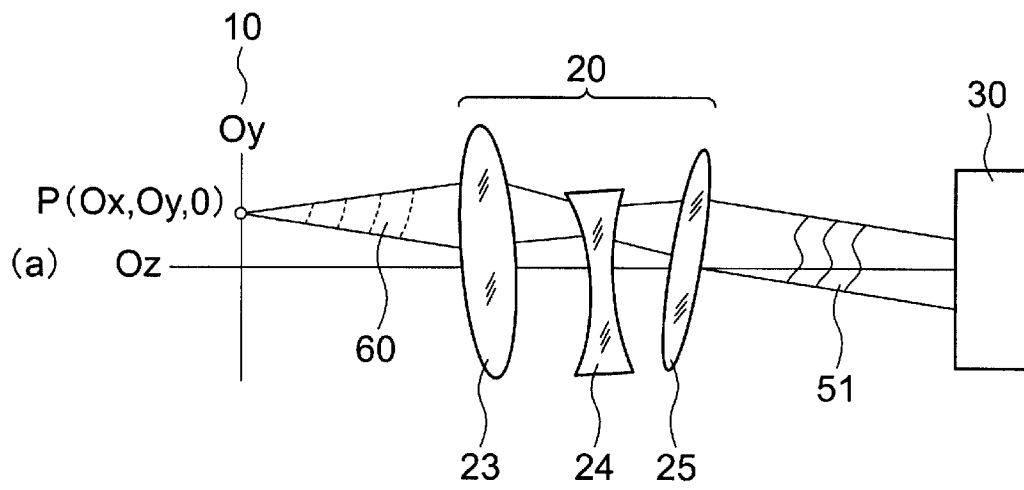
[図26]



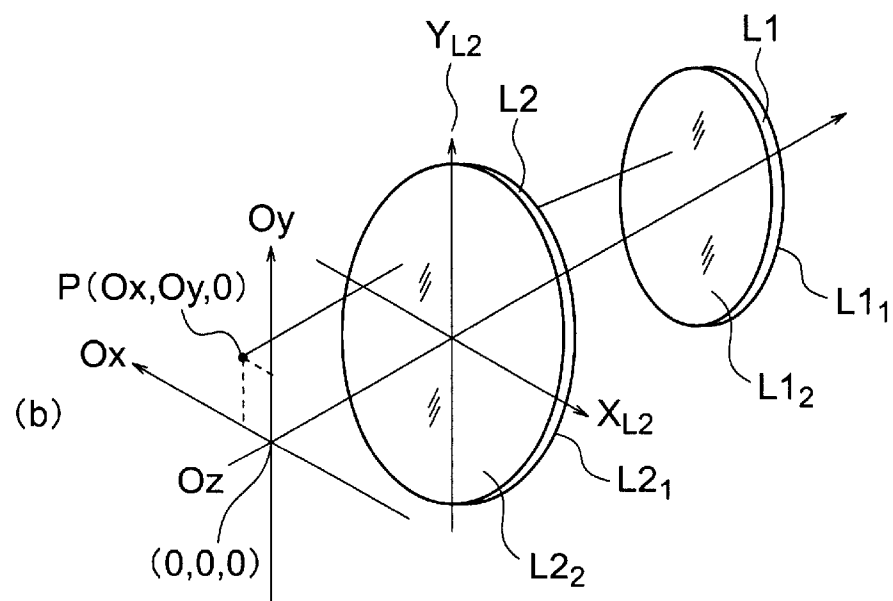
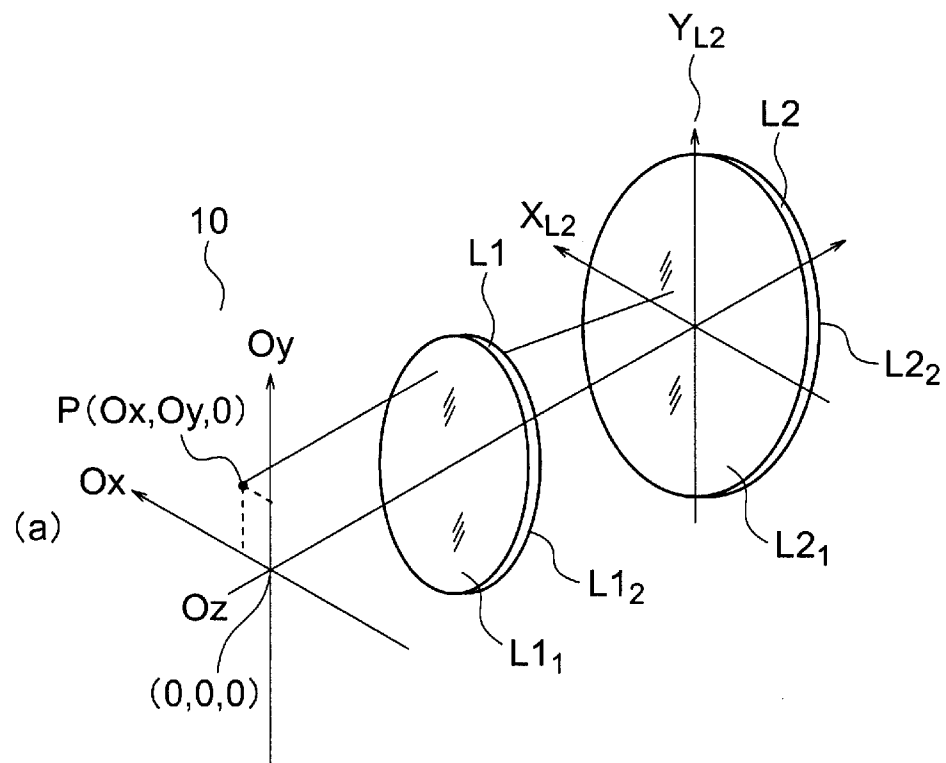
[図27]



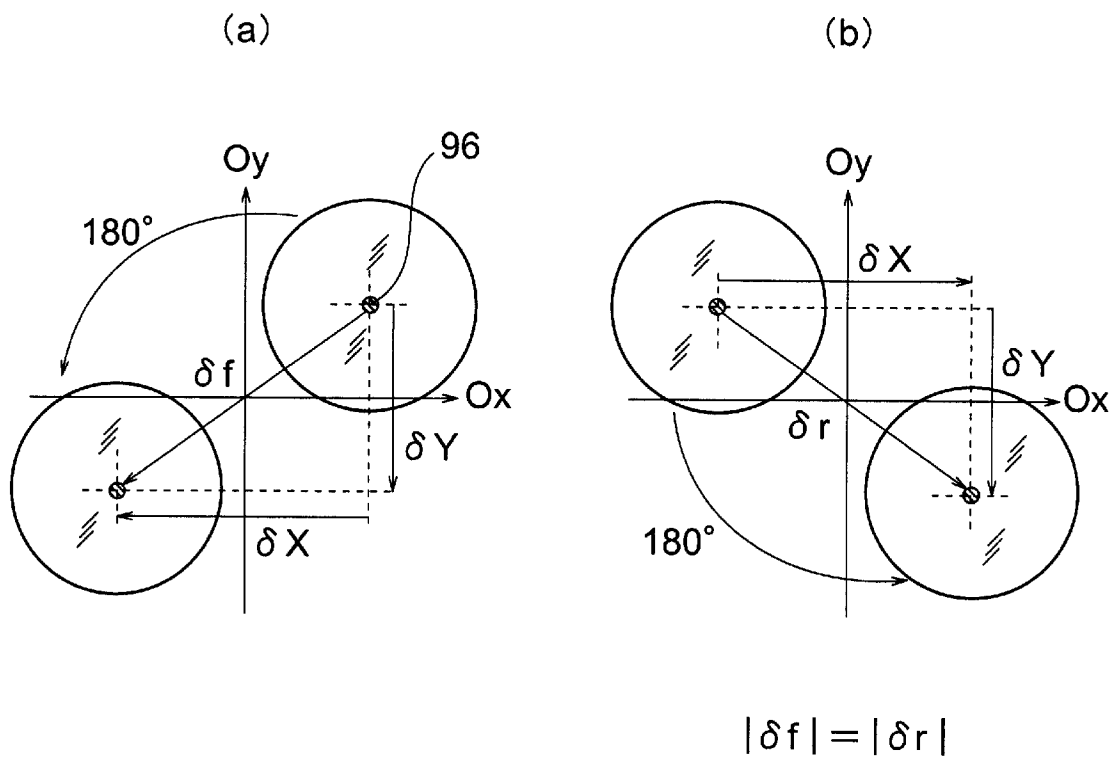
[図28]



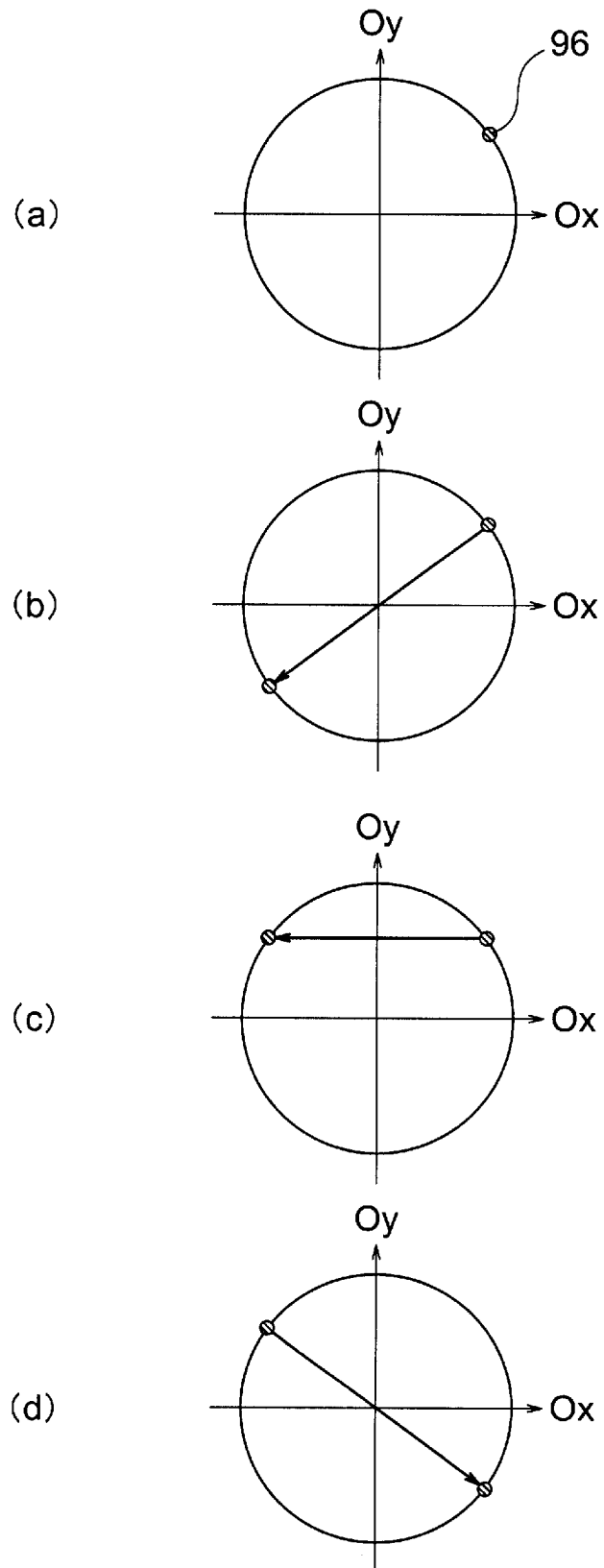
[図29]



[図30]



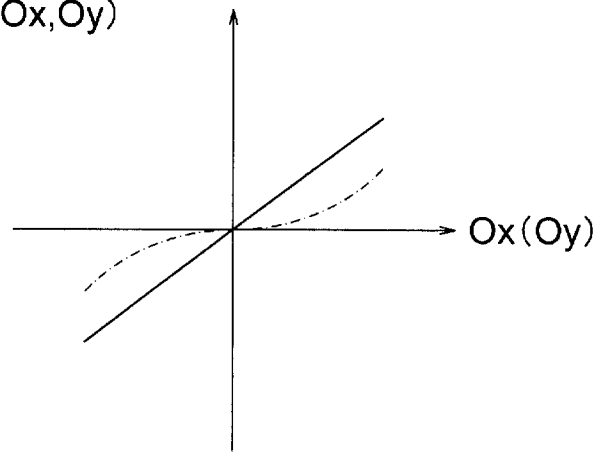
[図31]



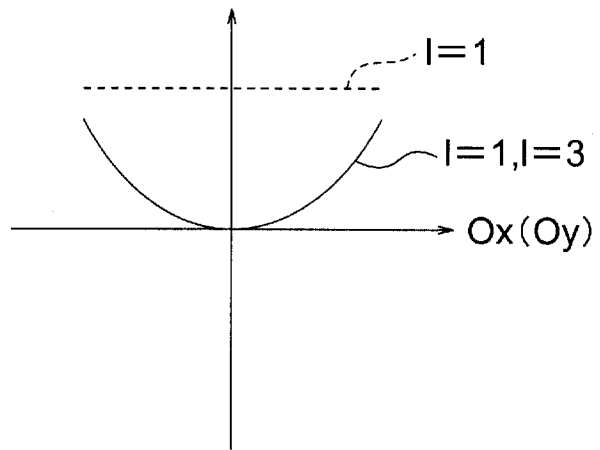
[図32]

 $B_{2j}(Ox,Oy), B_{3j}(Ox,Oy)$

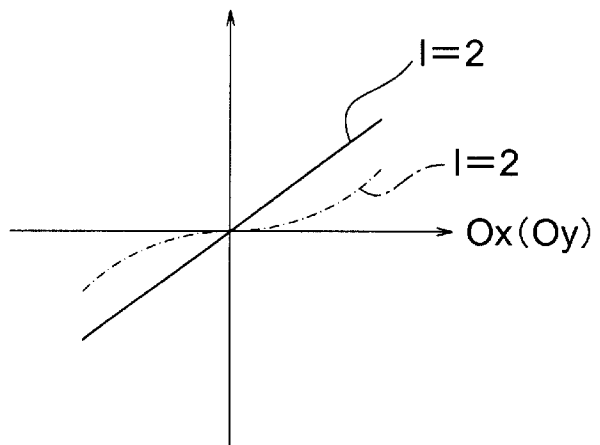
(a)



(b)



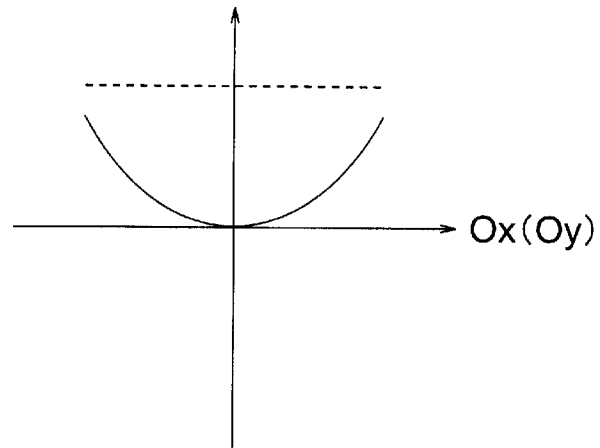
(c)



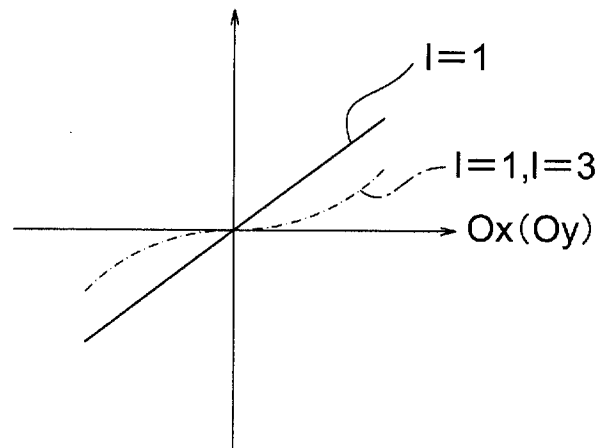
[図33]

 $B_{4jl}(Ox, Oy)$

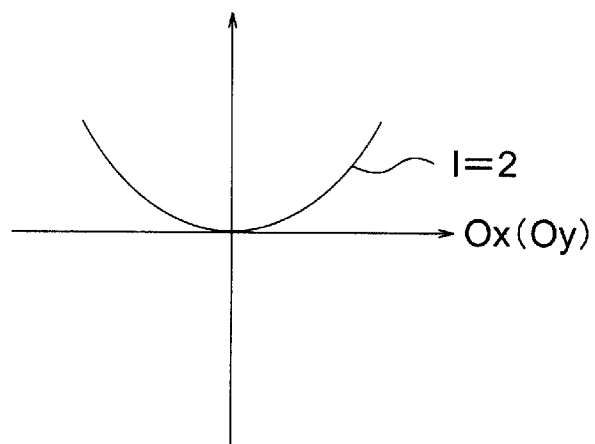
(a)



(b)



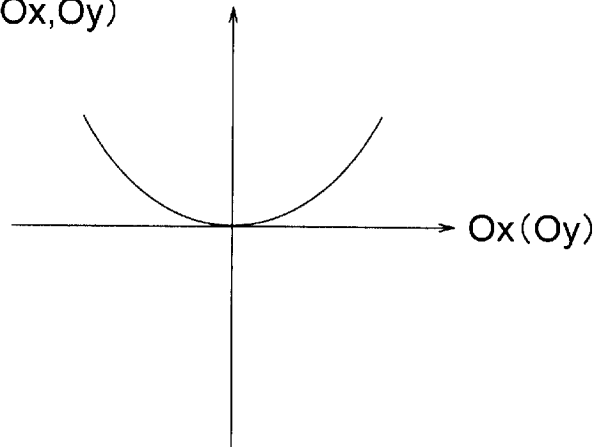
(c)



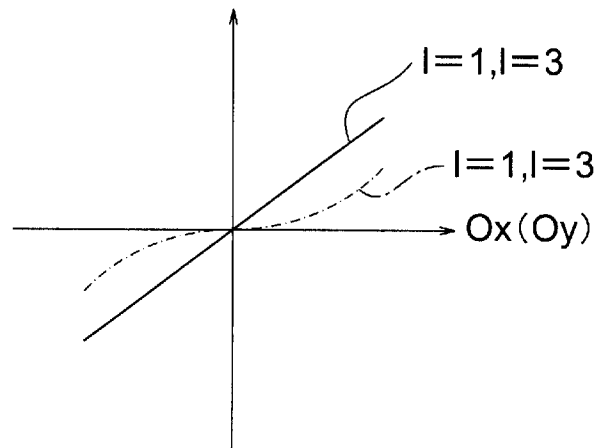
[図34]

 $B_{5jl}(Ox,Oy), B_{6jl}(Ox,Oy)$

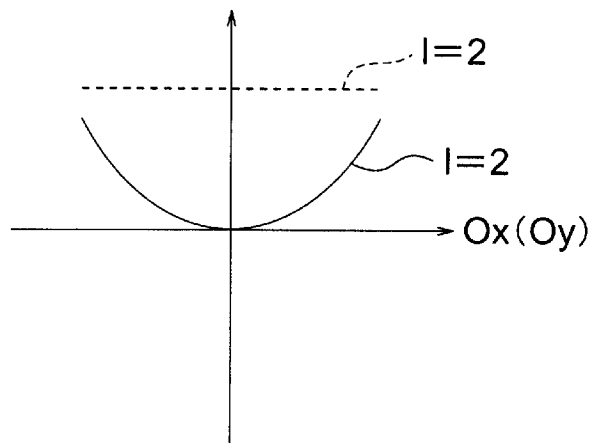
(a)



(b)



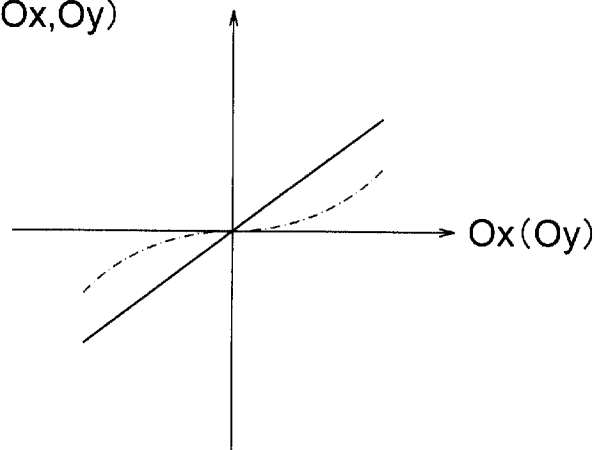
(c)



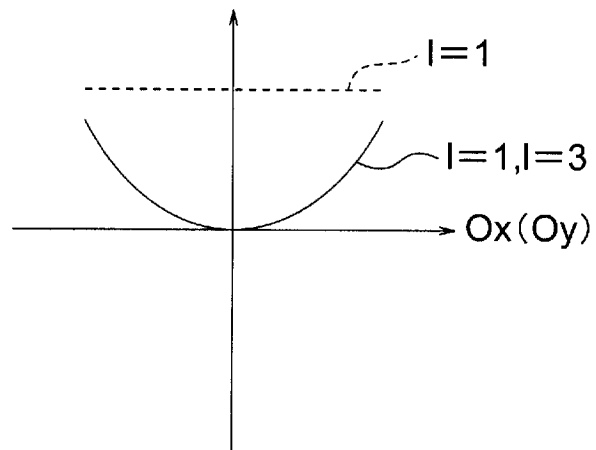
[図35]

 $B_{7jl}(Ox,Oy), B_{8jl}(Ox,Oy)$

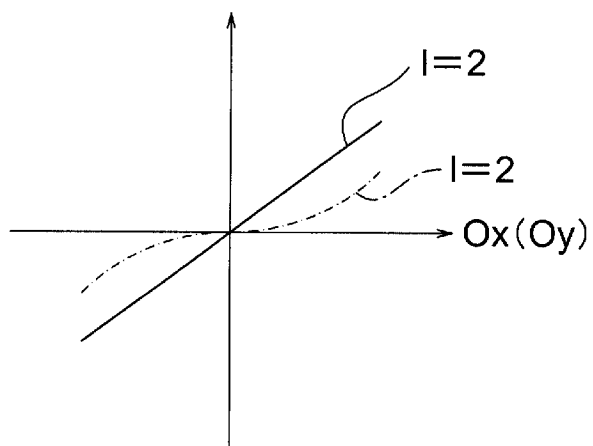
(a)



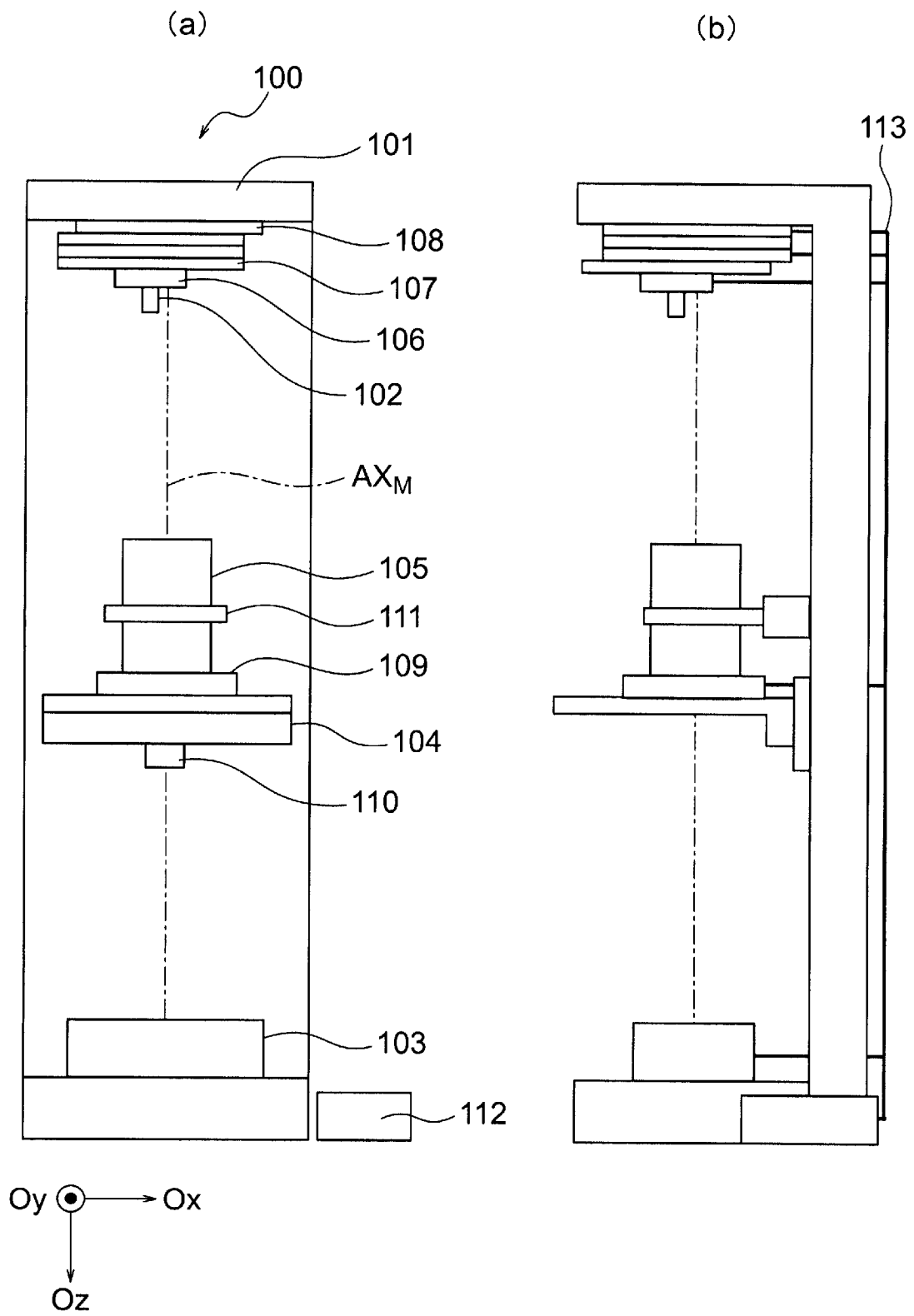
(b)



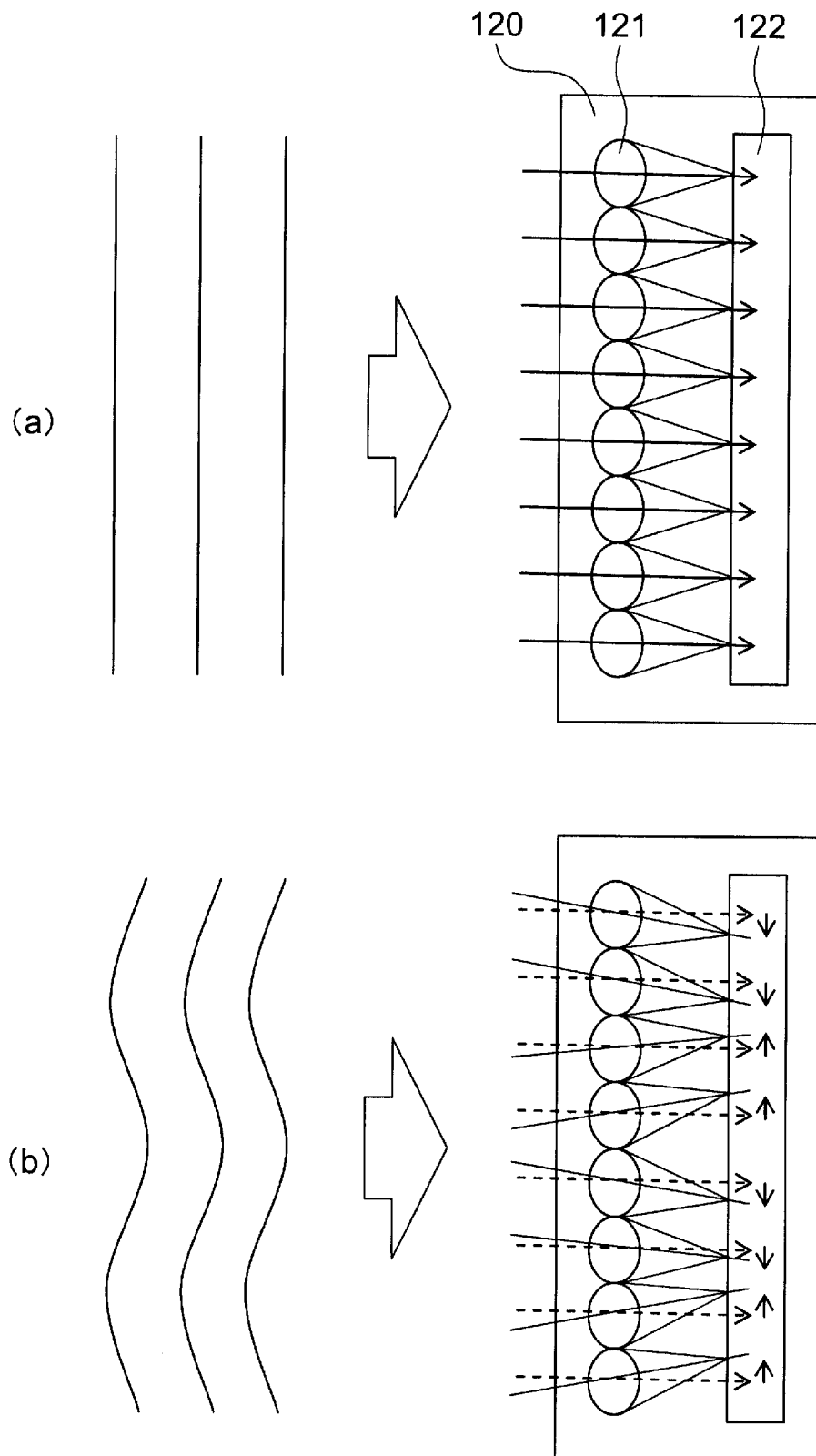
(c)



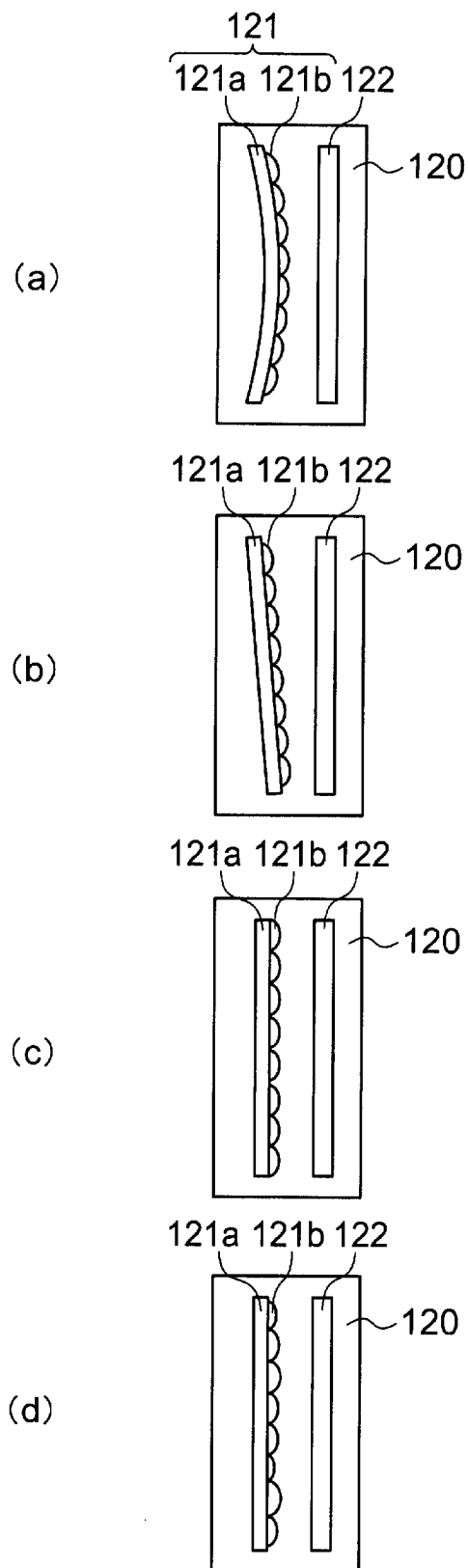
[図36]



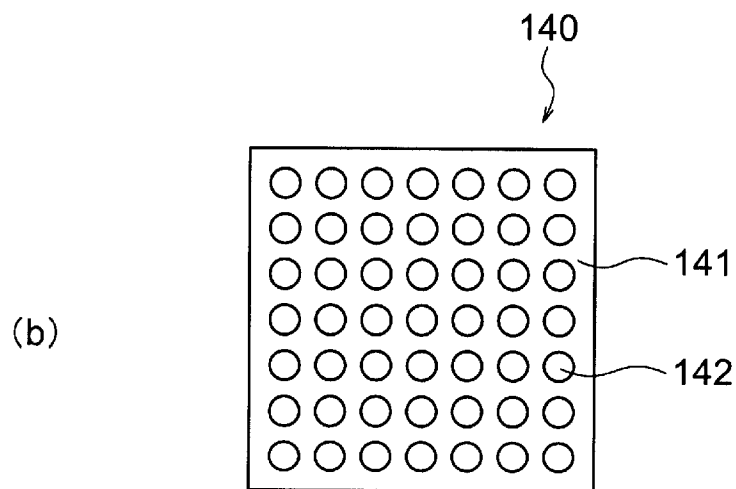
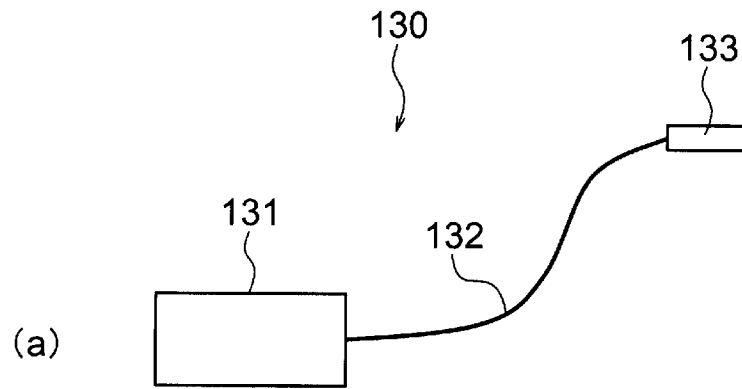
[図37]



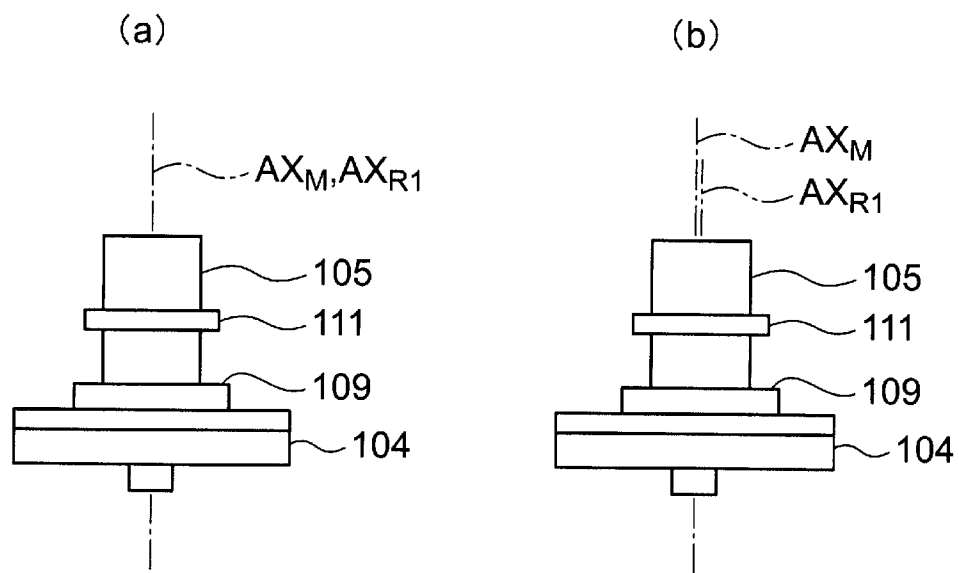
[図38]



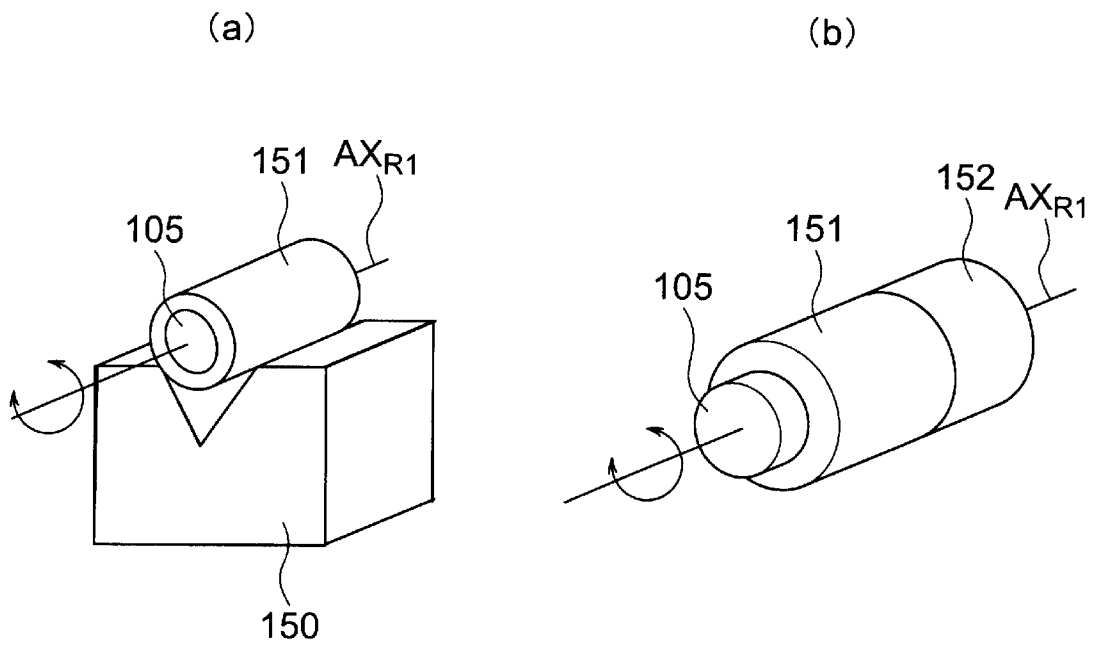
[図39]



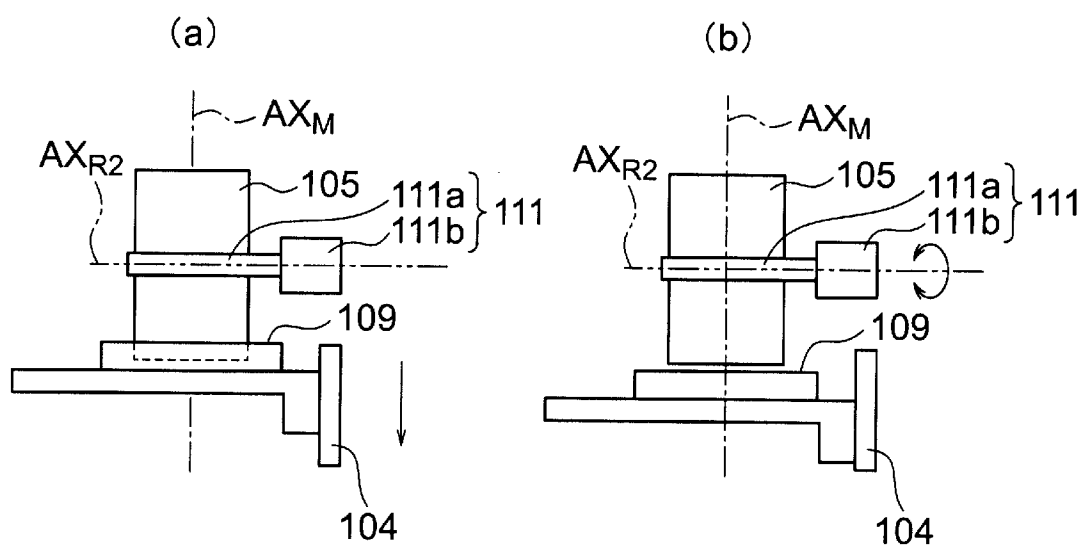
[図40]



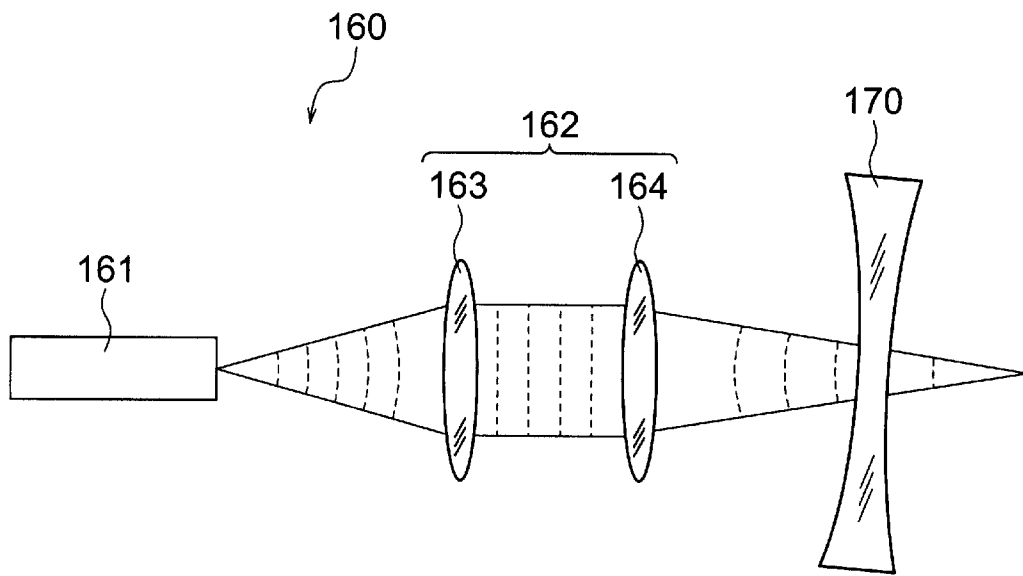
[図41]



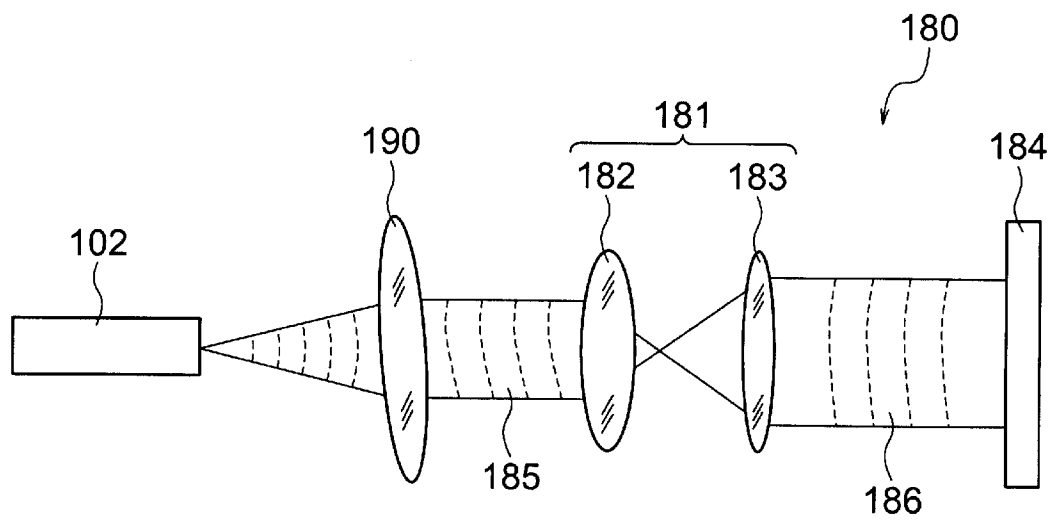
[図42]



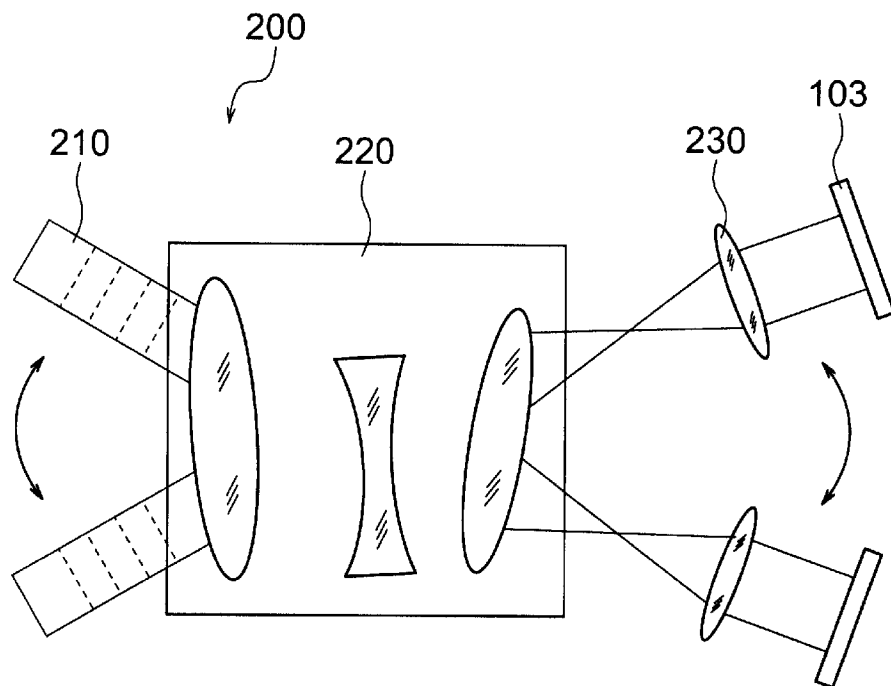
[図43]



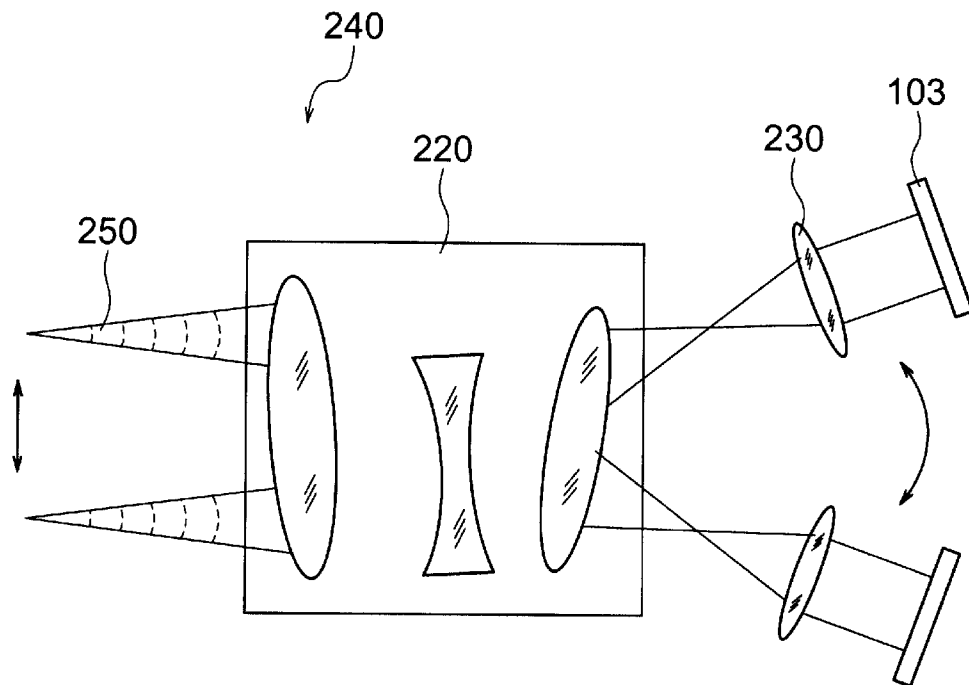
[図44]



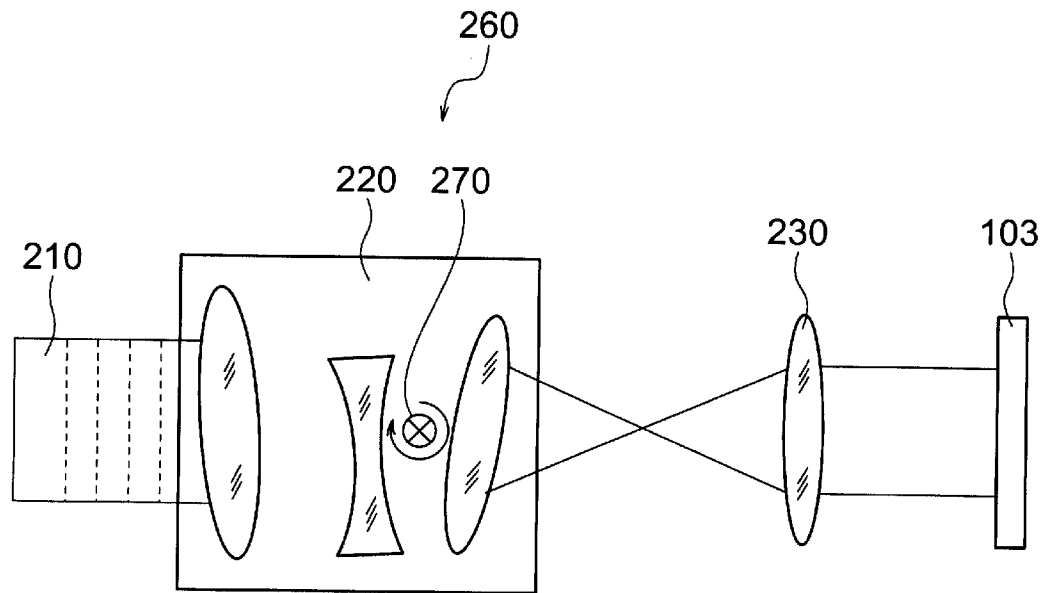
[図45]



[図46]



[図47]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/059056

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01M11/00(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01M11/00-11/08, G01B11/00-11/30, G02B7/02-7/16

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus(JDreamIII), JST7580(JDreamIII), JSTChina(JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 2001-147174 A (Olympus Optical Co., Ltd.), 29 May 2001 (29.05.2001), paragraphs [0010] to [0046]; fig. 1, 2 (Family: none)	1, 2, 4-7, 11, 17 3, 8-10, 12-16
X A	JP 2014-115077 A (Fujifilm Corp.), 26 June 2014 (26.06.2014), paragraphs [0023] to [0081]; fig. 1 to 6 (Family: none)	1, 11, 17 2-10, 12-16
X A	JP 2007-33343 A (Hoya Corp.), 08 February 2007 (08.02.2007), paragraphs [0055] to [0078]; fig. 6, 7 (Family: none)	1, 11, 17 2-10, 12-16

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
08 June 2015 (08.06.15)

Date of mailing of the international search report
23 June 2015 (23.06.15)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/059056

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2014-20881 A (Olympus Corp.), 03 February 2014 (03.02.2014), entire text; all drawings (Family: none)	1-17
A	JP 2013-195410 A (Olympus Corp.), 30 September 2013 (30.09.2013), entire text; all drawings (Family: none)	1-17
A	JP 2012-163899 A (Mitsubishi Electric Corp.), 30 August 2012 (30.08.2012), entire text; all drawings (Family: none)	1-17
A	JP 2005-24504 A (Olympus Corp.), 27 January 2005 (27.01.2005), entire text; all drawings (Family: none)	1-17
A	JP 2003-257812 A (Nikon Corp.), 12 September 2003 (12.09.2003), entire text; all drawings & US 2003/0206289 A1 & EP 1341043 A2 & CN 1441236 A & KR 10-2003-0071521 A & TW 200303417 A	1-17

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01M11/00(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01M11/00-11/08, G01B11/00-11/30, G02B7/02-7/16

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 5 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 5 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 5 年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

JSTPlus (JDreamIII), JST7580 (JDreamIII), JSTChina (JDreamIII)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X A	JP 2001-147174 A（オリンパス光学工業株式会社）2001. 05. 29, [0 0 1 0] - [0 0 4 6], 第 1、2 図（ファミリーなし）	1, 2, 4-7, 11, 17 3, 8-10, 12-16
X A	JP 2014-115077 A（富士フイルム株式会社）2014. 06. 26, [0 0 2 3] - [0 0 8 1], 第 1 - 6 図（ファミリーなし）	1, 11, 17 2-10, 12-16
X A	JP 2007-33343 A（HOYA株式会社）2007. 02. 08, [0 0 5 5] - [0 0 7 8], 第 6、7 図（ファミリーなし）	1, 11, 17 2-10, 12-16

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の 1 以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

0 8 . 0 6 . 2 0 1 5

国際調査報告の発送日

2 3 . 0 6 . 2 0 1 5

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目 4 番 3 号

特許庁審査官（権限のある職員）

小野寺 麻美子

2 W

9 5 0 5

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 5 0

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2014-20881 A (オリンパス株式会社) 2014. 02. 03, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-17
A	JP 2013-195410 A (オリンパス株式会社) 2013. 09. 30, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-17
A	JP 2012-163899 A (三菱電機株式会社) 2012. 08. 30, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-17
A	JP 2005-24504 A (オリンパス株式会社) 2005. 01. 27, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-17
A	JP 2003-257812 A (株式会社ニコン) 2003. 09. 12, 全文、全図 & US 2003/0206289 A1 & EP 1341043 A2 & CN 1441236 A & KR 10-2003-0071521 A & TW 200303417 A	1-17