

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5921287号
(P5921287)

(45) 発行日 平成28年5月24日 (2016. 5. 24)

(24) 登録日 平成28年4月22日 (2016. 4. 22)

(51) Int. Cl. F 1
GO 2 B 13/00 (2006. 01) GO 2 B 13/00
GO 2 B 13/18 (2006. 01) GO 2 B 13/18

請求項の数 17 (全 29 頁)

(21) 出願番号	特願2012-81495 (P2012-81495)	(73) 特許権者	000001007
(22) 出願日	平成24年3月30日 (2012. 3. 30)		キヤノン株式会社
(65) 公開番号	特開2013-210534 (P2013-210534A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43) 公開日	平成25年10月10日 (2013. 10. 10)	(74) 代理人	100126240
審査請求日	平成27年3月25日 (2015. 3. 25)		弁理士 阿部 琢磨
		(74) 代理人	100124442
			弁理士 黒岩 創吾
		(72) 発明者	石原 圭一郎
			東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社内
		審査官	堀井 康司

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 撮像装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

物体側に向かって凹形状の撮像面と、該撮像面の近傍に物体像を形成する撮像光学系と
を備える撮像装置であって、

前記撮像光学系は、複数のレンズ及び開口絞りを含み、

前記開口絞りに対して最も近い物体側のレンズと前記開口絞りに対して最も近い像側の
 レンズとの間に配置され、入射する光に位相差を与える位相制御素子を更に備え、

前記位相制御素子のパワーは、入射する光の波長が短いほど負の方向に大きくなり、

前記撮像光学系の焦点距離を f_{sys} 、前記撮像光学系の射出瞳から前記撮像面までの
 距離を d_{pup} 、前記撮像面の曲率半径を R_{img} 、としたとき、次の式を満足す
ることを特徴とする撮像装置。

$$0.8 \leq f_{sys} / d_{pup} \leq 1.5$$

$$0.8 \leq |R_{img}| / f_{sys} \leq 1.5$$

【請求項 2】

前記複数のレンズにおける最も像側のレンズ面の曲率中心は、前記開口絞りよりも物体
 側に位置することを特徴とする請求項 1 に記載の撮像装置。

【請求項 3】

前記開口絞りから前記撮像面までの距離を d_{ape} としたとき、次の式を満足するこ
とを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の撮像装置。

$$d_{pup} < d_{ape}$$

10

20

0.7 $d_{\text{pup}} / d_{\text{ape}}$ 0.95

【請求項 4】

次の式を満足することを特徴とする請求項 1 乃至 3 の何れか 1 項に記載の撮像装置。

0.8 $|R_{\text{img}}| / d_{\text{pup}}$ 1.5

【請求項 5】

前記位相制御素子は、光軸上に入射する光に対して周辺部に入射する光の位相を遅らせることを特徴とする請求項 1 乃至 4 の何れか 1 項に記載の撮像装置。

【請求項 6】

前記位相制御素子において、光軸上でのパワーよりも周辺部でのパワーの方が負の方向に大きいことを特徴とする請求項 1 乃至 5 の何れか 1 項に記載の撮像装置。

10

【請求項 7】

前記位相制御素子は、正のパワーを有することを特徴とする請求項 1 乃至 6 の何れか 1 項に記載の撮像装置。

【請求項 8】

前記位相制御素子は、光軸に対して回転対称な位相分布を有することを特徴とする請求項 1 乃至 7 の何れか 1 項に記載の撮像装置。

【請求項 9】

前記位相制御素子の入射面は、前記複数のレンズのうち前記開口絞りに対して最も近い物体側のレンズに接合されていることを特徴とする請求項 1 乃至 8 の何れか 1 項に記載の撮像装置。

20

【請求項 10】

前記位相制御素子の出射面は、前記複数のレンズのうち前記開口絞りに対して最も近い像側のレンズに接合されていることを特徴とする請求項 1 乃至 9 の何れか 1 項に記載の撮像装置。

【請求項 11】

前記開口絞り及び前記位相制御素子は、光軸方向において互いに同じ位置に配置されていることを特徴とする請求項 1 乃至 10 の何れか 1 項に記載の撮像装置。

【請求項 12】

前記複数のレンズ、前記開口絞り、及び位相制御素子は、互いに接合されていることを特徴とする請求項 1 乃至 11 の何れか 1 項に記載の撮像装置。

30

【請求項 13】

前記位相制御素子は、位相差板、回折光学素子、又は液晶素子の何れかであることを特徴とする請求項 1 乃至 12 の何れか 1 項に記載の撮像装置。

【請求項 14】

前記位相制御素子は、回折光学素子であることを特徴とする請求項 13 に記載の撮像装置。

【請求項 15】

前記位相制御素子は、光軸方向において互に対向する 2 つの回折格子を含むことを特徴とする請求項 14 に記載の撮像装置。

【請求項 16】

前記 2 つの回折格子のうち、像側の回折格子の屈折率は、物体側の回折格子の屈折率よりも高いことを特徴とする請求項 15 に記載の撮像装置。

40

【請求項 17】

前記撮像面を含む光伝送手段と、該光伝送手段からの光を受光する撮像素子と、を備えることを特徴とする請求項 1 乃至 16 の何れか 1 項に記載の撮像装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は撮像光学系の像面近傍に湾曲した撮像面を配置した撮像装置に関する。特にデジタルスチルカメラやデジタルビデオカメラ、携帯電話用カメラ、監視カメラ等に好適な

50

撮像装置を提供するものである。

【背景技術】

【0002】

このような湾曲させた撮像面を用いた撮像装置の例がいくつか開示されている。球殻レンズと、該レンズの内側に球状レンズとで同心球を成した球レンズが提案されている（特許文献1）。

この球レンズは、球面収差や色収差を良好に補正することが可能である。

また、点対称な構成のため広画角化が容易であり、広角かつ高解像度が要求される撮像装置の撮像光学系に適している。

この球レンズにおいて、フレア等の有害光を遮断し良好な結像性能を得るために、球レンズの球中心を通る平面上に開口絞りを有した例が開示されている。

10

【0003】

また、電子撮像素子面を2次元的に湾曲させた撮像光学系が提案されている（特許文献2）。

ここでは、電子撮像素子を画像記録媒体とする場合の制約条件を緩和するために、電子撮像素子の受光面を物体側に凹面化して、電子撮像素子に対する光束の入射角度を法線角度に近づけた例が開示されている。

近年の撮像装置では電子撮像素子の画素サイズが急速に小さくなり、撮像光学系は高解像度化が求められている。そのため、撮像光学系は明るいF値においても高い結像性能を実現する必要があった。

20

さらに、近年の撮像装置は広角化やコンパクト化が求められている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開昭63-081413号公報

【特許文献2】特許第4628781号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

特許文献1では球レンズを用いた実施例が開示されており、主な実施例はF/2.8の撮像光学系であって、球面収差や軸上色収差が良好に補正されており、結像性能が良い撮像光学系である。

30

一方、そこではF/2.8よりも明るい実施例も開示されている。例えば、F/2.0やF/1.4の撮像光学系が開示されている。しかし、このような明るいF値においては球面収差が大きく発生しており、十分な結像性能が得られていない。

すなわち、F/2.0を超える明るいF値の撮像光学系においては、球レンズだけでは特に球面収差が補正しきれず、結像性能が劣化する問題が発生していた。また、F/1.0の撮像光学系も開示されているが、 $N = 2.50$ や $N = 2.3$ 等の高屈折率材料を用いて収差を補正している。

この様な高屈折率材料は高価であり、また透過率が低下する問題がある。

40

【0006】

特許文献2では、非点対称な撮像光学系を用いた実施例が開示されており、F/2.45～F/2.91の撮像光学系の比較的明るいF値において、球面収差、軸上色収差、像面湾曲などの収差を補正しており、高い結像性能を実現している。

しかしながら、近年の撮像装置においては、電子撮像素子の画素サイズが微小化され、更なる高解像度な光学系が求められている。

そのために、F/2.0を超える明るいF値の撮像光学系において、球面収差等の収差が発生して結像性能が劣化することが問題となる。

【0007】

本発明は、上記課題に鑑み、F/2.0を超える明るいF値において、収差を良好に補

50

正し、高い結像性能を得ることが可能となる撮像装置を提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明の一側面としての撮像装置は、物体側に向かって凹形状の撮像面と、該撮像面の近傍に物体像を形成する撮像光学系と、を備える撮像装置であって、前記撮像光学系は、複数のレンズ及び開口絞りを含み、前記開口絞りに対して最も近い物体側のレンズと前記開口絞りに対して最も近い像側のレンズとの間に配置され、入射する光に位相差を与える位相制御素子を更に備え、前記位相制御素子のパワーは、入射する光の波長が短いほど負の方向に大きくなり、前記撮像光学系の焦点距離を f_{sys} 、前記撮像光学系の射出瞳から前記撮像面までの距離を d_{pup} 、前記撮像面の曲率半径を R_{img} 、としたとき、次の(1)式及び(2)式を満足することを特徴とする。

$$0.8 \leq f_{sys} / d_{pup} \leq 1.5 \dots (1)$$

$$0.8 \leq |R_{img}| / f_{sys} \leq 1.5 \dots (2)$$

【発明の効果】

【0009】

本発明によれば、 $F/2.0$ を超える明るいF値において、収差を良好に補正し、高い結像性能を得ることが可能となる撮像装置を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】本発明の実施例1における撮像装置の構成例を説明する図。

【図2】本発明の実施例1における撮像装置の波面制御手段の概略図。

【図3】本発明の実施例1における撮像装置の波面制御手段の概略図。

【図4】本発明の実施例1における撮像装置の波面制御手段の概略図。

【図5】本発明の実施例1における撮像装置の波面制御手段の概略図。

【図6】本発明の実施例1における撮像装置の波面制御手段の概略図。

【図7】本発明の実施例1における撮像装置の波面制御素子に付与した位相分布。

【図8】本発明の実施例1における撮像装置の波面制御素子の位相差によるパワー差を示す図。

【図9】本発明の実施例1における撮像光学系の縦収差図。

【図10】本発明の実施例1における撮像光学系の横収差図。

【図11】本発明の実施例2における撮像装置の構成例を説明する図。

【図12】本発明の実施例2における波面制御素子に付与した位相差分布を示す図。

【図13】本発明の実施例2における波面制御素子の位相差によるパワー差を示す図。

【図14】本発明の実施例2における撮像光学系の縦収差図。

【図15】本発明の実施例2における撮像光学系の横収差図。

【図16】本発明の実施例3における撮像装置の構成例を説明する図。

【図17】本発明の実施例3における波面制御素子の位相差によるパワー差を示す図。

【図18】本発明の実施例3における撮像光学系の縦収差図。

【図19】本発明の実施例3における撮像光学系の横収差図。

【図20】本発明の実施形態における撮像装置の物体面を有限距離に配置した際の結像関係を示す図。

【図21】本発明の実施形態における撮像装置のピント調整時におけるピント位置と撮像面形状の関係を示す図。

【発明を実施するための形態】

【0011】

本発明の実施形態における撮像装置の構成例について説明する。

まず、その全体構成について説明する。

本実施形態の撮像装置は、複数のレンズを有する撮像光学系を備え、該撮像光学系の像面近傍に、物体側に凹面を向けて湾曲した撮像面を有し、この像面湾曲のうちペッツバル像面分を補正できる構成とされている。

10

20

30

40

50

さらに、撮像光学系を点対称な光学系に近づけることによって、コマ収差、非点収差、歪曲収差、倍率色収差などの軸外収差の発生を抑え、補正対象収差を球面収差、軸上色収差などの軸上収差のみに限定するように構成されている。

撮像光学系を点対称な光学系に近づけることは、レンズ形状を制限してしまい光学設計の自由度を狭めることになるが、それ以上に補正すべき収差を軸上収差のみに限定できる利点の方が重要である。これにより、広画角に渡って明るく高い結像性能を有する撮像装置を実現することができる。

そこで、本発明の撮像装置では、撮像光学系の焦点距離を撮像光学系の射出瞳から撮像面までの距離と略等しく設定し、撮像面の曲率半径を撮像光学系の焦点距離と略等しく設定することにより、撮像光学系を点対称な光学系に近づけている。

10

特に、撮像光学系の開口絞りよりも像側の光学系が点対称に近い構成を取ることが重要であり、画角光束に対してコンセンリックな構成としている。

撮像光学系の焦点距離を撮像光学系の射出瞳から撮像面までの距離と略等しく設定することで、撮像光学系の像側主点と射出瞳とを略同位置に揃えることができる。

これは、画角光束の入射高が低くなるので、画角光束を軸上光束と同様に扱うことができ、撮像光学系の開口絞りよりも像側の光学系を点対称に近い構成にすることができる。

具体的には、以下で説明するように(1)式(以下の表で示された丸数字1の条件式)を満足させるように構成すると良い。

これにより、広画角に渡ってコマ収差、非点収差、歪曲収差、倍率色収差などの軸外収差を良好に補正することができる。

20

また、撮像面の曲率半径を撮像光学系の焦点距離と略等しく設定することで、像面湾曲を良好に補正することができる。

具体的には、以下で説明するように(2)式(以下の表で示された丸数字2の条件式)を満足させるように構成すると良い。

以上の撮像光学系の構成により非点収差を良好に補正できるので、像面湾曲をペッツパール像面のみに限定でき、撮像面を湾曲させることによってペッツパール像面を補正することができ、軸外収差の全てに対して発生を小さく抑えることができる。これらにより、残りの収差を軸上収差に限定することができる。

【0012】

更に、本発明は、次のように(1)式、(2)式を満足させる構成を採るに当たり、上記した撮像光学系に備えられている開口絞りの近傍に、波面制御素子を配置することで、軸上収差の補正効果の向を図るように構成されている。

30

すなわち、複数のレンズを有する撮像光学系と、該撮像光学系の像面近傍に、物体側に凹面を向けて湾曲した撮像面を有する撮像装置において、

前記撮像光学系の焦点距離と前記撮像光学系の射出瞳から前記撮像面までの距離が略等しく設定されていると共に、前記撮像面の曲率半径が前記撮像光学系の射出瞳から前記撮像面までの距離と略等しく設定されている。

その際、撮像光学系の焦点距離を f_{sys} 、撮像光学系の射出瞳から撮像面までの距離を d_{pup} 、撮像面の曲率半径を R_{img} 、としたとき、以下の(1)式及び(2)式を満足させるように構成することができる。

40

$$0.8 \leq f_{sys} / d_{pup} \leq 1.5 \quad \dots (1)$$

$$0.8 \leq |R_{img}| / f_{sys} \leq 1.5 \quad \dots (2)$$

なお、ここでの撮像装置における撮像面とは、湾曲させた電子撮像素子、もしくは、入射面を湾曲させた光伝送手段のことである。

この湾曲させた電子撮像素子とは、例えば、形状可変な基板上に電子撮像素子を形成したものや、小さな平面型電子撮像素子をアレイ状に配置して凹面形状としたものが考えられる。

50

また、光伝送手段とは、例えば、光ファイバーを束ねてプレート状に構成したイメージプレートが考えられ、一端を凹面形状に、他端を平面に加工したものである。

そして、光伝送手段の入射面を物体側に凹面を向けて湾曲させた面を撮像面とし、平面の射出面を電子撮像素子へと接続して撮像ユニットとする構成を採ることができる。

【 0 0 1 3 】

次に、上記した開口絞り近傍に配置した波面制御素子の構成について、更に詳しく説明する。

波面制御素子は、光束の波面に位相差を付与して収差を補正することができ、例えば、位相差板、回折光学素子、位相変調型空間変調器（液晶素子）など位相制御素子、ならびに微小な非球面量を与えた非球面が挙げられる。

本実施形態では、波面制御素子を開口絞り近傍（開口絞子上を含む）に配置して、開口絞りを通過する光束中に位相差を与えることで収差を良好に補正している。

波面制御素子を開口絞り近傍に配置すると、波面制御素子が軸外収差に与える影響を最小限に抑えることができるので、波面制御素子の位相差分布を、軸上収差の補正に最適な形状にすることができ、軸上収差の補正効果を向上させることができる。

ここで、光軸上の波面の位相に対して、光軸から離れるに従って波面の位相を遅らせた位相差分布をつけると、球面収差を良好に補正することができる。

なお、本明細書では、開口絞りよりも物体面側にある開口絞りに一番近いレンズと、開口絞りよりも像面側にある開口絞りに一番近いレンズとの間のことを、

“ 開口絞りの近傍 ” と定義する。

【 0 0 1 4 】

また、撮像光学系は点対称に近い光学系としているので、軸上光束と各軸外光束とは同様な収差が残存しており、共通の位相差分布形状によって収差を良好に補正することができる。

すなわち、点対称に近い撮像光学系の開口絞り面近傍に波面制御素子を配置すれば、 $F/2.0$ を超える明るい光学系においても、広域な画角に渡って収差を良好に補正することができる。更には、 $F/1.4$ を超える格段に明るい光学系においても、同様な効果を発揮できる。

また、明るい F 値の撮像光学系は被写界深度が狭くなるので、コンパクトカメラでありながら、ピント面以外の背景をぼかした撮影が可能となる。

さらに、明るい F 値の撮像光学系は、 F 値の 2 乗に比例して露光時間を短く設定することができるため、手ブレや被写体ブレ、ショットノイズを格段に軽減でき、高品位な画像による撮像装置を提供することができる。

【 0 0 1 5 】

次に、周辺光量落ちを改善する作用について説明する。

一般的な撮像光学系では、画角（入射角）に対して \cos^4 乗則に従って周辺光量比が低下することが知られている。そのため、撮影された画像の周辺部がとても暗くなり綺麗な画像が得られない。

近年のデジタルカメラやデジタルビデオカメラでは、周辺部の感度を大幅に持ち上げて周辺光量落ちをデジタル的に補正するものがあるが、コントラストは低いままノイズが増加してしまうので、画像の中心部と比べて画質がかなり劣化する。

周辺光量落ちは、このような深刻な問題を引き起こす。この傾向は広画角な撮像光学系ほど顕著となり、広画角な撮像光学系を実現するために必要な要素の 1 つとなっている。

周辺光量比の \cos^4 乗則の内訳は、

（ a ）画角に応じて、見かけの焦点距離が長くなることで \cos の 2 乗分、

（ b ）画角に応じて見かけの開口径が狭まることで \cos の 1 乗分、

（ c ）画角に応じて撮像面への入射角がきつくなることで \cos の 1 乗分、である。

【 0 0 1 6 】

本実施形態の撮像装置における撮像光学系では、撮像面の曲率半径を撮像光学系の焦点距離と略等しく設定しており、全画角において見かけの焦点距離を略同一にすることがで

10

20

30

40

50

きる。

これにより、周辺光量比を \cos の 2 乗分を改善することができる。

(2) 式を満足することにより、相応の効果を得ることができる。

すなわち、周辺光量比が \cos の 4 乗から \cos の 2 乗へ向上させることができる。広画角な撮像光学系の周辺光量比を大幅に改善することができるので、広画角に渡ってコントラストが高く、ノイズが少なく高画質な画像を撮影することができる撮像装置を提供することができる。

【0017】

次に、上記(1)式、(2)式の意義について更に詳しく説明する。

(1) 式は、撮像光学系の焦点距離 f_{sys} と撮像光学系の射出瞳から撮像面までの距離 d_{pup} とを略等しく設定する条件であり、撮像光学系の開口絞りよりも像側の光学系を点対称に近い構成にすることができる。

(1) 式を満たせた、コマ収差、非点収差、歪曲収差、倍率色収差などの軸外収差を良好に補正することができる。

(1) 式の上限を超えると、撮像光学系の開口絞りよりも像側の光学系の点対称性が確保できず、コマ収差、非点収差、歪曲収差、倍率色収差などの軸外収差が発生して問題となる。

(1) 式の下限を超えると、撮像光学系の開口絞りよりも像側の光学系の点対称性が確保できず、コマ収差、非点収差、歪曲収差、倍率色収差などの軸外収差が発生して問題となる。

【0018】

(2) 式は、撮像面の曲率半径を R_{img} 、撮像光学系の焦点距離 f_{sys} と略等しく設定する条件であり、像面湾曲と非点収差を良好に補正するための条件である。

(2) 式を満たせば、撮像装置の像面形状をペッツバル像面に近づけることができるので、広画角に渡って非点収差を発生させることなく像面湾曲を補正することができる。

(2) 式の上限を超えると、撮像面の周辺部でペッツバル像面からの乖離が大きくなり、像面湾曲が発生して結像性能が劣化する。

(2) 式の下限を超えると、撮像面の周辺部でペッツバル像面からの乖離が大きくなり、像面湾曲が発生して結像性能が劣化する。

F 値が明るい撮像光学系の場合、焦点深度が狭いので像面湾曲の許容範囲が狭く、像面湾曲は高精度に補正する必要がある。

【0019】

なお、撮像面が、球面ではなく、非球面または階段状になっている場合には、撮像面の曲率半径を以下のように定義する。

まず、撮像面の形状が非球面の場合、基準球面の曲率半径を「撮像面の曲率半径」とする。

非球面は 式で表すことができ、 式の光軸上における曲率 c の逆数が曲率半径である。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + \dots \quad \dots \alpha$$

【0020】

ここで、 z は非球面形状の光軸方向のサグ量 (mm)、 c は光軸上における曲率 ($1/\text{mm}$)、 r は半径方向の光軸からの距離 (mm) であり、 A 、 B 、 C 、 D はそれぞれ 4 次、6 次、8 次、10 次の係数である。

撮像面が非球面形状であっても、光軸上の曲率半径を計測することによって基準曲面の曲率半径を求めることができる。

次に、撮像面の形状が階段状の場合について説明する。

小さな電子撮像素子をアレイ化して構成した場合や、光ファイバーを束ねて湾曲した撮像

10

20

30

40

50

面を構成した場合、厳密に言うと撮像面が階段状になる。

その場合は、電子撮像素子の1画素もしくは光ファイバーの1本の中心点を結んだ曲面を撮像面とみなすことができる。

その曲面を上記式で最小二乗法によりフィッティングした結果から基準曲面の曲率半径を算出すれば、撮像面の曲率半径を求めることができる。

【0021】

また、本実施形態の撮像装置は、撮像光学系と撮像面の間隔を変更することによってピント位置を調整する。

図20(a)および図20(b)に物体面を有限距離に配置した際の結像関係を示す。

図20(a)において、OBJは物体面、SYSは撮像光学系、IMGは像面であり、撮像光学系SYSは物体面OBJ上のある物点を像面IMG上の像点へ結像させている。

図20(a)に示したように、撮像光学系SYSは、撮像光学系SYSから等距離にある物点をペッツバル像面上へ結像させるので、このときの物体面OBJは湾曲した形状となる。

しかしながら、撮像光学系では物体面OBJは平面であることが好ましい。

図20(b)に示したように、光軸上以外にある物点は破線で示した湾曲状の物体面ではなく、実線で示した平面の物体面とする。

すると、図20(b)の矢印Aで示したように、物点は撮像光学系SYSから離れる方向へ移動し、像点も矢印Bで示したように、破線で示したペッツバル像面から実線で示した像面IMGへと撮像光学系SYSに近づく方向へ移動する。

【0022】

この像面側の移動量を、光束の進行方向におけるデフォーカス量として図20(b)の撮像光学系のモデルにおいて一例を図21のグラフに示した。

図21にはある例におけるピント調整時におけるピント位置と撮像面形状の関係を示している。

【0023】

この例では、各パラメーターを撮像光学系の焦点距離を $f_{sys} = 12.0$ (mm)、撮像面の曲率半径を $R_{img} = 12.0$ (mm)としている。

また、撮像光学系の射出瞳から撮像面までの距離を $d_{up} = 12.0$ (mm)、物体距離を $S = -300$ (mm)、画角を $\theta = 60$ (deg)としている。前述の通り、物体面を平面とした場合、各画角光束のピント位置がペッツバル像面から撮像光学系側にデフォーカスする。

光束の進行方向におけるデフォーカス量を丸数字1のピント位置のグラフに表示している。

また、撮像面の曲率半径は撮像光学系の焦点距離と等しく設定しており、物体距離が無限遠におけるペッツバル像面形状に相当する。

物体距離が無限遠で丸数字1のピント位置と丸数字2の撮像面形状が一致するのは当然だが、図21は物体距離を $S = -300$ (mm)まで近づけた場合でも丸数字1のピント位置と丸数字2の撮像面形状がぴったり一致することを示している。

これは物体距離が無限遠から $S = -300$ (mm)までのどの距離においても、平面の物体面を像面湾曲を発生させることなく、ピント調整できることを意味している。

また、画角 $-60 \sim +60$ (deg)の広範囲において上記のように実現することができる。

撮像光学系の焦点距離を撮像光学系の射出瞳から撮像面までの距離と略等しく設定し、撮像面の曲率半径を撮像光学系の焦点距離と略等しく設定すれば、撮像面の形状を変化させることなく、撮像光学系と撮像面の距離を変更するだけでピント調整が可能となる。

そのために、(1)式および(2)式を満足させることが重要である。

本発明の撮像装置のように格段に明るいF値の撮像光学系は焦点深度が非常に狭いので、高精度なピント調整を簡単に実現できることは撮像装置にとって極めて重要である。

【実施例】

【 0 0 2 4 】

以下に、本発明の実施例について説明する。

[実施例 1]

実施例 1 として、本発明を適用した撮像装置の構成例について説明する。

本実施例の撮像装置に用いる撮像光学系は、図 1 に示すように、3 枚のレンズ G 1 , G 2 , G 3 と開口絞り S T O を兼ねた波面制御手段 W C M で構成されている。

物体側から順に、物体側に凸面を向けた平凸レンズである第 1 レンズ G 1、波面制御手段 W C M、像側に凸面を向けた平凸レンズである第 2 レンズ G 2、そして像側に凸面を向けたメニスカスレンズである第 3 レンズ G 3 が配置されている。第 1 レンズ G 1 の射出面は波面制御手段 W C M の入射面と貼り合せており、波面制御手段 W C M の射出面は第 2 レンズ G 2 の入射面と貼り合せており、第 2 レンズ G 2 の射出面は第 3 レンズ G 3 の入射面と貼り合せている。

10

図 2 は、本実施例の撮像装置における波面制御手段 W C M の概略図である。

本実施例の撮像装置における波面制御手段 W C M は 2 枚の平板を貼り合せており、その貼り合せ面の有効部に位相差を与える波面制御素子 W C D としてのバイナリ回折格子 B D G __ a , B D G __ b を形成しており、主に球面収差や色の球面収差を補正している。

また、波面制御手段 W C M は、2 枚の平板の貼り合せ面の非有効部に遮光部材を配置しており、開口絞り S T O を構成している。

【 0 0 2 5 】

なお、本実施例では、開口絞り S T O 上に波面制御素子 W C D を配置した。しかし、図 3 ~ 図 6 に示したように、開口絞りよりも物体面側にある開口絞りに一番近いレンズと開口絞りよりも像面側にある開口絞りに一番近いレンズとの間であれば、波面制御素子 W C D はどこに配置しても良い。

20

バイナリ回折格子 B D G __ a , B D G __ b は基準波長を d 線としており、光軸から離れるに伴い位相差が変化するが、位相差が基準波長の整数倍を超える毎にバイナリ回折格子の段差が 1 段増えるように構成している。

【 0 0 2 6 】

本実施例の波面制御素子 W C D は光軸から離れるに従って位相差が増加する構成であり、バイナリ回折格子 B D G __ a の屈折率をバイナリ回折格子 B D G __ b の屈折率よりも高く設定して、波面制御素子 W C D を通過する波面に所望の位相差を与えている。

30

なお、バイナリ回折格子 B D G __ b は空気に限らず、光学ガラスや光学プラスチックでも良い。バイナリ回折格子 B D G __ a の屈折率をバイナリ回折格子 B D G __ b の屈折率よりも高く設定することで、広画角の光束が回折格子の界面で全反射することを低減することができる。

【 0 0 2 7 】

図 1 中の I M G は撮像面である。

図 1 に示したように、本実施例における撮像装置の撮像面 I M G は、球状に形成した光伝送手段 O T M の入射面であり、撮像光学系の像面湾曲に沿わせているため撮像面 I M G の全域に渡って良好な結像を実現している。

本実施例における撮像装置の光伝送手段 O T M は数ミクロンピッチの光ファイバーを束ねて構成したイメージファイバーであり、撮像光学系の像面に形成された像を電子撮像素子 I C D へ伝送する役割を担う。

40

光伝送手段 O T M の射出面は平面に形成しており、電子撮像素子 I C D に密着させて接続することで撮像ユニット I C U を構成している。

本実施例では光伝送手段 O T M を用いたが、撮像素子自体を球面状に構成するのに比べて、光伝送手段 O T M の一方の面を球面状に構成し他方の面を電子撮像素子 I C D に接続した撮像ユニット I C U の方が製造が容易となるメリットがある。

【 0 0 2 8 】

表 1 に本実施例の撮像装置の構成を示す。

面番号 1 は第 1 レンズ G 1 の入射面、面番号 2 は第 1 レンズ G 1 の射出面と波面制御手段

50

W C Mの入射面との貼り合せ面、面番号 3 は波面制御手段 W C Mの 2 枚の平板ガラスの貼り合せ面である。その有効部に波面制御素子 W C D、非有効部に開口絞り S T Oを配置している。

このように、本実施例の撮像装置では、開口絞り S T O面に波面制御素子 W C Dを配置している。

面番号 4 は波面制御手段 W C Mの射出面と第 2 レンズ G 2 の入射面との貼り合せ面、面番号 5 は第 2 レンズ G 2 の射出面と第 3 レンズ G 3 の入射面との貼り合せ面、面番号 6 は第 3 レンズ G 3 の射出面である。

面番号 7 は撮像面 I M Gであり、光伝送手段 O T Mの入射面である。そして、表記しない光伝送手段 O T Mの射出面が電子撮像素子 I C Dと接続している。

表中の R は曲率半径 (m m)、d は面間隔 (m m)、N d は d 線の屈折率、 νd はアッベ数を示す。尚、「印」がある面は波面制御素子である。

10

表 1 : 構成表				
面番号	R	d	Nd	νd
1	5.6187	4.520	1.74400	44.8
2	平面	0.263	1.51680	64.2
3 (STO)	平面 ◆	0.263	1.51680	64.2
4	平面	1.990	1.83481	42.7
5	-2.3218	2.938	2.00170	20.6
6	-6.3973	2.148		
7 (IMG)	-7.3276	4.520		

20

【 0 0 2 9 】

本実施例の撮像装置における波面制御素子 W C D に付与した位相分布形状は光軸に対して回転対称な形状としており、(3) 式の位相多項式で表現される。

30

$$\phi(r) = C_1 r^2 + C_2 r^4 + C_3 r^6 + C_4 r^8 + C_5 r^{10} + \dots \quad \dots (3)$$

【 0 0 3 0 】

ここで、r は光軸からの距離 (m m)、 $\phi(r)$ は光軸上に対する各距離 r での位相差 (波長)、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 はそれぞれ 2 次、4 次、6 次、8 次、10 次の係数である。

表 2 に、面番号 3 の波面制御素子 W C D における位相多項式のパラメータを示す。

表 2 : 位相多項式 (面番号 3)		
パラメータ	記号	値
回折次数		1 次
規格化波長		587.5618(nm)
2 次の係数	C ₁	0.000000E+00
4 次の係数	C ₂	5.18443E-04
6 次の係数	C ₃	0.000000E+00
8 次の係数	C ₄	0.000000E+00
10 次の係数	C ₅	0.000000E+00

10

【 0 0 3 1 】

本実施例の撮像装置における波面制御素子 W C D は、(3) 式で示された位相多項式のうち 4 次項だけを用いている。

図 7 に、本実施例の波面制御素子 W C D に付与した位相差分布を示す。

波面制御素子 W C D では、光軸上に対して、光軸から離れるに従い位相差を正の方向に増加させており、光軸から離れるに従い徐々に位相を遅らせた波面を形成している。

20

波面制御素子 W C D の位相差によるパワー P (r) は、(3) 式の位相多項式を光軸からの距離 r で二階微分したものに「 - 1 」を掛けて求められ、(4) 式で表現される。

$$P(r) = -(2C_1 + 12C_2r^2 + 30C_3r^4 + 56C_4r^6 + 90C_5r^8 + \dots) \quad \dots (4)$$

【 0 0 3 2 】

さらに、光軸上 (r = 0) における位相差によるパワー P (0) = - 2 C₁ であることから、各距離 r における位相差によるパワー P (r) と光軸上 (r = 0) における位相差によるパワー P (0) との差、すなわち、位相差によるパワー差 P (r) は (5) 式で表現される。

30

$$\Delta P(r) = -(12C_2r^2 + 30C_3r^4 + 56C_4r^6 + 90C_5r^8 + \dots) \quad \dots (5)$$

【 0 0 3 3 】

図 8 に、本実施例の波面制御素子 W C D の位相差によるパワー差 P (r) を示す。

波面制御素子 W C D は、光軸から離れるに従って徐々に負の方向にパワーを強くしており、入射高の高い位置の光線の集光位置を奥へ移動させる効果を有する。撮像光学系は全体で正のパワーであって球面収差はアンダーとなる傾向にあり、入射高の高い位置の光線程光軸上近傍の光線よりも手前で結像してしまう。

40

そこで、本実施例の波面制御素子 W C D の効果により、入射高の高い位置程集光位置を奥へ移動させることで、球面収差を補正することができる。

F 値が明るい撮像光学系程この傾向が顕著となり、波面制御素子 W C D によって球面収差を補正する効果が大きくなる。

色の球面収差についても基準波長 d 線 (5 8 7 . 5 6 1 8 n m) に対して例えば C 線 (6 5 6 . 2 7 2 5 n m) や F 線 (4 8 6 . 1 3 2 7 n m) 、 g 線 (4 3 5 . 8 3 4 3 n m) などでは、球面収差の量または形状が異なり、像面上に揃えられない問題が生じている。

具体的には、基準波長 d 線に対して F 線や g 線などの短い波長では、入射高の高い位置で

50

球面収差がアンダーとなる量が増加し、C線などの長い波長では入射高の高い位置で球面収差がアンダーとなる量が減少する傾向にある。

位相差によるパワーは、短い波長程強いパワーが得られるので、本実施例の波面制御素子WCDにおいても、球面収差の補正量は短い波長程大きくなり、色の球面収差を補正することができる。

【0034】

図9に本実施例の撮像光学系における縦収差図を、図10に横収差図を示す。図9に示したように、球面収差、軸上色収差、非点収差、像面湾曲、ディストーション、及び色の球面収差を良好に補正している。

ここでは、色の球面収差を基準波長（例えばd線）の球面収差量に対する各波長（例えば、C線、F線、g線など）の球面収差量の差と定義する。

特に、入射高の低い光線から高い光線に掛けての全域で像面上に集光させることができており、球面収差を非常に良く補正できている。

また、軸上色収差、ならびに色の球面収差も非常に良好に補正できており、高い結像性能が得られている。

図10に示したように、各画角光束においても良好な性能が得られており、コマ収差、像面湾曲、倍率色収差が良好に補正されている。

表3に本実施例の撮像装置の仕様を示す。

表3			
撮像光学系の焦点距離	f_{sys}	6.699	(mm)
F値	$F/\#$	1.40	
画角	2ω	90.0	(deg)
全長	L_{sys}	9.974	(mm)
射出瞳から像面までの距離	d_{pup}	6.595	(mm)
開口絞りから像面までの距離	d_{ape}	7.340	(mm)
開口絞りから最終面までの距離	d_{ape_last}	5.191	(mm)

【0035】

本実施例の撮像装置は、F値が $F/1.4$ と明るく、画角が 90.0 (deg)と広画角ながら、全長が 9.974 (mm)とコンパクトに抑えおり、明るさ、高解像度、超広画角、コンパクトを同時に実現した撮像装置の例である。

【0036】

表4に、本実施例の撮像装置における、(1)式および(2)式の値を示す。

表4		
条件式①	f_{sys}/d_{pup}	1.02
条件式②	$ R_{img} /f_{sys}$	1.09
条件式⑥	$ R_{img} /d_{pup}$	1.11
条件式⑧	d_{pup}/d_{ape}	0.899

【0037】

(1) 式の値は 1 . 0 2 であり、(1) 式の範囲を満足している。これにより、撮像光学系の開口絞りから像側の光学系を点対称に近い構成にでき、コマ収差、非点収差、歪曲収差、倍率色収差を良好に補正することができる。

(2) 式の値は 1 . 0 9 であり、(2) 式の範囲を満足している。これにより、90 . 0 (deg) の広画角に渡って像面湾曲と非点収差を良好に補正することができる。

(1) 式と(2) 式を満足させることで、撮像面の形状を変化させることなく、撮像光学系と撮像面の距離を変更するだけで、無限遠から至近距離までのピント調整が可能となる。

また、本発明の撮像装置では、撮像面の曲率半径を撮像光学系の射出瞳から撮像面までの距離と略等しく設定している。

下記に示した(6) 式は、撮像面の曲率半径 R_{img} を撮像光学系の射出瞳から撮像面までの距離 d_{pup} と略等しく設定する条件である。

$$0.8 \leq |R_{img}| / d_{pup} \leq 1.5 \quad \dots (6)$$

(6) 式を満足すれば、撮像光学系をより点対称に近い構成にできる。

本実施例の撮像装置では撮像光学系と撮像面との距離を変更することにより、ピント調整を行う。

その際、(6) 式を満たすことにより、無限遠から至近距離までの広範囲な被物体距離において、ピント調整による像面湾曲を非常に小さく抑えることができ、高解像度な撮影を可能とする。

【 0 0 3 8 】

本実施例の撮像装置は、(6) 式の値が 1 . 1 1 であり、(6) 式の範囲を満足している。

これにより、撮像光学系を点対称に近い構成としコマ収差、非点収差、歪曲収差、倍率色収差を良好に補正している。さらに、無限遠から至近距離までの広範囲のピント調整範囲において高解像度を維持したまま、ピント調整を可能としている。

本実施例の撮像装置は、開口絞り S T O 面に波面制御素子 W C D を配置しており、波面制御素子 W C D に付与した位相差によってコマ収差が発生する。

本実施例の波面制御素子 W C D は光束の光軸上に対して周辺部の波面を遅らせている。

画角光束は波面制御素子 W C D に対して斜めに入射するため、上光線と下光線では波面制御素子 W C D から像面までの距離が異なってしまう、光路差が大きく発生してコマ収差となる。

【 0 0 3 9 】

これを図 1 を用いて説明すると、波面制御素子 W C D から最も像側の面までの距離は、画角光束の上光線よりも下光線の方が長くなる。

すなわち、最も像側の面上では、下光線の方が上光線よりも主光線から離れた位置に到達することになる。

そのため、各光線の最も像側のレンズ面上の到達点から撮像面上の像点までの距離も上光線と比較して下光線を長くする必要がある。

本発明の撮像装置では、撮像面は画角光束に対してコンセンリックな形状としているため、通常の場合、各光線の最も像側のレンズ面上の到達点から撮像面上の像点までの距離は上光線と下光線では殆ど等しくなる。

しかし、本実施例の撮像装置では、画角光束が最も像側のレンズ面から撮像面へ向かう際、外に開くようにすることによって、各光線の最も像側のレンズ面上の到達点から撮像面上の像点までの距離が、上光線よりも下光線の方が長くなるように構成している。

これによって、コマ収差を良好に補正することができる。

【 0 0 4 0 】

具体的には、最も像側のレンズ面からの曲率中心を開口絞りよりも物体側に配置すると良い。

本実施例の撮像装置では、最も像側のレンズ面の曲率半径 $R_{last} = -6.3973$ (mm) であり、開口絞りから最も像側のレンズ面までの距離 $d_{ape_last} = 5.191$ (mm) である。

故に (7) 式の関係を満たさせおり、最も像側のレンズ面からの曲率中心を開口絞りよりも物体側に配置している。

$$|R_{last}| > d_{ape_last} \dots (7)$$

また、撮像光学系の射出瞳から撮像面までの距離 $d_{pup} = 6.595$ (mm) を開口絞りから撮像面までの距離 $d_{ape} = 7.340$ (mm) よりも短く設定しており、画角光束が最も像側のレンズ面から撮像面へ向かう際、外に開くように構成している。その際、(8) 式の条件を満たさせると、コマ収差を良好に補正することができる。

$$0.7 < d_{pup} / d_{ape} < 0.95 \dots (8)$$

次に、周辺光量落ちを改善する作用について説明する。

本実施例の撮像装置における撮像光学系では、撮像面の曲率半径を撮像光学系の焦点距離と略等しく設定しており、全画角において焦点距離を略同一にすることができる。

これにより、周辺光量比を \cos の 2 乗分を改善することができる。

本実施例の最大半画角 $= 45.0$ (deg) であり、 $\cos^4 = 0.25$ のところ $\cos^2 = 0.5$ にでき、周辺光量を 2 倍に改善できる。

(2) 式を満たすことにより、相応の効果を得ることができる。

さらに、本実施例の撮像装置における撮像光学系では、撮像面の曲率半径を撮像光学系の射出瞳から撮像面までの距離と略等しく設定しており、撮像面への入射角を略垂直に設定することができる。

これにより、周辺光量比を \cos の 1 乗分を改善することができる。

【0041】

本実施例の最大半画角 $= 45.0$ (deg) であり、 $\cos^4 = 0.25$ のところ $\cos^3 = 0.5$ にでき、周辺光量を 1.4 倍に改善できる。

(6) 式を満たすことにより、相応の効果を得ることができる。

(2) 式と (6) 式を同時に満たすことにより、周辺光量比を \cos の 3 乗分を改善することができ、周辺光量を 2.8 倍に改善できる。

これにより、広画角な撮像光学系の周辺光量比を大幅に改善することができるので、広画角に渡ってコントラストが高く、ノイズが少なく高画質な画像を撮影することができる撮像装置を提供することができる。

【0042】

以上のように、本実施例の構成によれば、 $F/2.0$ を超える明るい F 値でも広画角に渡って良好なる結像性能を有した撮像装置をコンパクトな構成で実現できる。

また、周辺光量落ちを大幅に改善することができ、広画角に渡って非常に明るい撮像光学系を実現することができる。

これにより、露光時間を大幅に短縮できるので、手ブレ、被写体ブレ、ノイズを良好に低減した高品位な画像を撮影することが可能な撮像装置を提供することができる。

また、コンパクトな構成ながら、デフォーカスした被写体に大きなボケを付与することができる撮像光学系を提供することができる。

さらに、上記の高性能な撮像光学系を、簡便な構成ながら無限遠から至近距離に至る広範囲において、結像性能を殆ど劣化させることなくピント調整が可能となる。

【0043】

[実施例 2]

実施例 2 として、実施例 1 と異なる形態の撮像装置の構成例について説明する。

本実施例の撮像装置の撮像光学系は、図 11 に示すように、4 枚のレンズ $G1$, $G2$, G

3、G4と開口絞りSTO、ならびに波面制御素子WCDで構成されている。

物体側から順に、物体側に凸面を向けたメニスカスレンズである第1レンズG1、

物体側に凸面を向けた平凸レンズである第2レンズG2、

像側に凸面を向けた平凸レンズである第3レンズG3、

像側に凸面を向けたメニスカスレンズである第4レンズG4、が配置されている。

図11中のIMGは撮像面である。図11に示したように、本実施例における撮像装置の撮像面IMGは、球状に形成した光伝送手段OTMの入射面であり、撮像光学系の像面湾曲に沿わせているため撮像面IMGの全域に渡って良好な結像を実現している。

本実施例における撮像装置の光伝送手段OTMは、数ミクロンピッチの光ファイバーを束ねて構成したイメージファイバーであり、撮像光学系の像面に形成された像を電子撮像素子ICDへ伝送する役割を担う。

光伝送手段OTMの射出面は平面に形成しており、電子撮像素子ICDに密着させて接続することで撮像ユニットICUを構成している。

【0044】

表5に本実施例の撮像装置の構成を示す。

面番号1は第1レンズG1の入射面であり、(9)式で示した多項式で表現される回転対称非球面形状を有している。

面番号2は第1レンズG1の射出面と第2レンズG2の入射面との貼り合せ面、面番号3はG2の射出面と第3レンズG3の入射面との貼り合せ面であり、その有効部に波面制御素子WCD、非有効部に開口絞りSTOを配置している。

このように、本実施例の撮像装置では、開口絞りSTO面に波面制御素子WCDを配置している。

面番号4は第3レンズG3の射出面と第4レンズG4の入射面との貼り合せ面、面番号5は第4レンズG4の射出面であり、(9)式で示した多項式で表現される回転対称非球面形状を有している。

面番号7は撮像面IMGであり、光伝送手段OTMの入射面である。そして、表記しない光伝送手段OTMの射出面が電子撮像素子ICDと接続している。

表中のRは曲率半径(mm)、dは面間隔(mm)、Ndはd線の屈折率、 ν_d はアッベ数を示す。尚、「*印」がある面は非球面であり、「印」がある面は有効部に波面制御素子を設けた面である。

表5：構成表

面番号	R	d	Nd	ν_d
1	9.0932 *	2.7636	2.00060	25.5
2	3.3892	5.2692	2.00100	29.1
3 (STO)	平面 ◆	2.9521	1.91082	35.3
4	-3.1249	2.9342	2.00270	19.3
5	-8.0232 *	1.6787		
6 (IMG)	-9.1592			

【0045】

本実施例の撮像装置における非球面は光軸を中心とした回転対称非球面としており、(9)式の多項式で表現される。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} \dots \quad (9)$$

10

20

30

40

50

【 0 0 4 6 】

ここで、 z は非球面形状の光軸方向のサグ量 (mm)、 c は光軸上における曲率 ($1/\text{mm}$)、 r は半径方向の光軸からの距離 (mm) であり、 A 、 B 、 C 、 D はそれぞれ 4 次、6 次、8 次、10 次の係数である。

本実施例の撮像装置における第 1 面の非球面係数を表 6 A に、第 5 面の非球面係数を表 6 B に、第 3 面の位相差多項式の係数を表 6 C に示す。

表 6 A : 非球面係数 (面番号 1)		
パラメータ	記号	値
コーニック定数	K	-7.67865E-01
4 次の係数	A	8.91147E-05
6 次の係数	B	8.34469E-07
8 次の係数	C	-1.30692E-08
10 次の係数	D	1.51136E-10

10

【 0 0 4 7 】

表 6 B : 非球面係数 (面番号 5)		
パラメータ	記号	値
コーニック定数	K	-8.00433E+00
4 次の係数	A	-1.68038E-03
6 次の係数	B	5.00405E-05
8 次の係数	C	-1.02512E-06
10 次の係数	D	5.65476E-09

20

【 0 0 4 8 】

表 6 C : 位相多項式 (面番号 3)		
パラメータ	記号	値
回折次数		1 次
規格化波長		587.5618(nm)
2 次の係数	C_1	-5.72626E-03
4 次の係数	C_2	5.73805E-04
6 次の係数	C_3	4.34455E-06
8 次の係数	C_4	-1.44872E-06
10 次の係数	C_5	7.68743E-09

30

40

【 0 0 4 9 】

表 6 C に示したように、本実施例の波面制御素子 W C D では (3) 式で示される位相多項式の 2 次から 10 次まで項を用いて位相差を与えている。

図 1 2 に、本実施例の波面制御素子 W C D に付与した位相差分布を示す。

波面制御素子 W C D では、光軸上に対して、光軸から離れるに従い位相差を負の方向に増加させており、光軸から離れるに従い徐々に位相を進ませた波面を形成している。

50

光束全体に正のパワーを与えており、波面制御素子WCDが撮像光学系のパワーの一部を担っている。

一方、波面制御素子WCDには球面収差を補正する役割がある。

球面収差を補正するためには、軸上光線の集光位置に対して、入射高が高い位置の光線の集光位置を移動させることが重要であり、(5)式に示したように、入射高が高い位置の光線と光軸上における位相差によるパワーの差が重要である。

撮像光学系は全体で正のパワーであって球面収差はアンダーとなる傾向にあり、入射高の高い位置の光線程光軸上近傍の光線よりも手前で結像してしまう。

前者に対して相対的に負の方向のパワーを付与すると、入射高の高い位置の光線の集光位置を奥へ移動させる効果が得られ、球面収差を補正することができる。

10

【0050】

図13に、本実施例の波面制御素子WCDの位相差によるパワー差 $P(r)$ を示す。波面制御素子WCDは、光軸から離れるに従って徐々に負の方向にパワーが強くなり、球面収差を良好に補正することができる。

$F/1.4$ 以上のF値が格段に明るい撮像光学系では、各入射が高い程この傾向が顕著なり、波面制御素子WCDによって球面収差を補正する意義が大きくなる。色の球面収差についても基準波長d線(587.5618nm)に対して例えばC線(656.2725nm)やF線(486.1327nm)、g線(435.8343nm)などでは、球面収差の量または形状が異なり、像面上に揃えられない問題が生じている。

具体的には、基準波長d線に対してF線やg線などの短い波長では、入射高の高い位置で球面収差がアンダーとなる量が増加し、C線などの長い波長では入射高の高い位置で球面収差がアンダーとなる量が減少する傾向にある。

20

位相差によるパワーは、短い波長程強いパワーが得られるので、本実施例の波面制御素子WCDにおいても、球面収差の補正量は短い波長程大きくなり、色の球面収差を補正することができる。

【0051】

図14に本実施例の撮像光学系における縦収差図を、図15に横収差図を示す。

図14に示したように、球面収差、軸上色収差、非点収差、像面湾曲、ディストーション、及び色の球面収差を良好に補正している。

ここでは、色の球面収差を基準波長(例えばd線)の球面収差量に対する各波長(例えば、C線、F線、g線など)の球面収差量の差と定義する。

30

特に、入射高の低い光線から高い光線に掛けての全域で像面上に集光させることができ、球面収差を非常に良く補正できている。

また、軸上色収差、ならびに色の球面収差も非常に良好に補正でき、高い結像性能が得られている。

図15に示したように、各画角光束においても良好な性能が得られており、コマ収差、像面湾曲、倍率色収差が良好に補正されている。

【0052】

表7に本実施例の撮像装置の仕様を示す。

表 7			
撮像光学系の焦点距離	f_{sys}	7.499	(mm)
F 値	F/#	1.00	
画角	2ω	90.0	(deg)
全長	L_{sys}	13.919	(mm)
射出瞳から像面までの距離	d_{pup}	6.334	(mm)
開口絞りから像面までの距離	d_{ape}	7.565	(mm)
開口絞りから最終面までの距離	d_{ape_last}	5.886	(mm)

10

【 0 0 5 3 】

本実施例の撮像装置は、F 値が $F / 1.0$ と明るく、画角が 90.0 (deg) と広画角ながら、全長が 9.974 (mm) とコンパクトに抑えおり、明るさ、高解像度、超広画角、コンパクトを同時に実現した撮像装置の例である。

表 8 に、本実施例の撮像装置における、(1) 式および (2) 式の値を示す。

20

表 8		
条件式①	f_{sys} / d_{pup}	1.18
条件式②	$ R_{img} / f_{sys}$	1.22
条件式⑥	$ R_{img} / d_{pup}$	1.45
条件式⑧	d_{pup} / d_{ape}	0.837

【 0 0 5 4 】

30

(1) 式の値は 1.18 であり、(1) 式の範囲を満足している。これにより、撮像光学系の開口絞りから像側の光学系を点対称に近い構成にでき、コマ収差、非点収差、歪曲収差、倍率色収差を良好に補正することができる。

(2) 式の値は 1.22 であり、(2) 式の範囲を満足している。これにより、 90.0 (deg) の広画角に渡って像面湾曲と非点収差を良好に補正することができる。

(6) 式の値が 1.45 であり、(6) 式の範囲を満足している。

これにより、撮像光学系を点対称に近い構成としコマ収差、非点収差、歪曲収差、倍率色収差を良好に補正している。

さらに、本実施例の撮像装置では撮像光学系と撮像面との距離を変更することにより、ピント調整を行う。(6) 式を満足しているため、無限遠から至近距離までの広範囲のピント調整範囲において高解像度を維持したまま、ピント調整を可能としている。

40

【 0 0 5 5 】

本実施例の撮像装置では、最も像側のレンズ面の曲率半径 $R_{last} = -8.0232$ (mm) であり、開口絞りから最も像側のレンズ面までの距離 $d_{ape_last} = 5.886$ (mm) である。

(7) 式の関係を満足させおり、最も像側のレンズ面からの曲率中心を開口絞りよりも物体側に配置して、波面制御素子 WCD によって発生したコマ収差を良好に補正するのに適した構成としている。

また、撮像光学系の射出瞳から撮像面までの距離 $d_{pup} = 6.334$ (mm) を開口絞りから撮像面までの距離 $d_{ape} = 7.565$ (mm) よりも短く設定しており、画

50

角光束が最も像側のレンズ面から撮像面へ向かう際、外に開くように構成している。

(8) 式を満足しており波面制御素子 W C D によって発生したコマ収差を良好に補正するのに適した構成としている。

【 0 0 5 6 】

[実施例 3]

実施例 3 として、上記各実施例と異なる形態の撮像装置の構成例について説明する。

本実施例の撮像装置の撮像光学系は、図 16 に示すように、開口絞り S T O と 6 枚のレンズ G 1 ~ G 6 と波面制御手段 W C M で構成されている。

物体側から順に、物体側に凸面を向けたメニスカスレンズである第 1 レンズ G 1、物体側に凸面を向けたメニスカスレンズである第 2 レンズ G 2、物体側に凸面を向けた平凸レンズである第 3 レンズ G 3 を有している。

次には、波面制御手段 W C M、像側に凸面を向けた平凸レンズである第 4 レンズ G 4、像側に凸面を向けたメニスカスレンズである第 5 レンズ G 5、像側に凸面を向けたメニスカスレンズである第 6 レンズ G 6 が配置されている。

第 1 レンズ G 1 から第 6 レンズ G 6 までの全ての光学素子を貼り合せて構成されている。本実施例における撮像装置では実施例 1 と同様の撮像ユニット I C U を配置されている。

【 0 0 5 7 】

表 9 に本実施例の撮像装置の構成を示す。

面番号 1 は第 1 レンズ G 1 の入射面、面番号 2 は第 1 レンズ G 1 の射出面と第 2 レンズ G 2 の入射面との貼り合せ面、面番号 3 は第 2 レンズ G 2 の射出面と第 3 レンズ G 3 の入射面との貼り合せ面である。

面番号 4 は第 3 レンズ G 3 の射出面と波面制御手段 W C M の入射面との貼り合せ面、面番号 5 は波面制御手段 W C M の 2 枚の平板ガラスの貼り合せ面であり、有効部には波面制御素子 W C D である位相差板、非有効部には開口絞り面 S T O を配置されている。

面番号 6 は波面制御手段 W C M の射出面と第 4 レンズ G 4 の入射面との貼り合せ面、面番号 7 は第 4 レンズ G 4 の射出面と第 5 レンズ G 5 の入射面との貼り合せ面、面番号 8 は第 5 レンズ G 5 の射出面と第 6 レンズ G 6 の入射面との貼り合せ面である。

また、面番号 9 は第 6 レンズ G 6 の射出面、面番号 10 は撮像面 I M G であり、撮像ユニット I C U の光伝送手段 O T M の入射面である。

そして、光伝送手段 O T M の射出面が電子撮像素子 I C D と接続されている。

表中の R は曲率半径 (mm)、d は面間隔 (mm)、N d は d 線の屈折率、d はアッペ数を示す。尚、R の欄に「* 印」があるレンズ面は非球面であり、「印」がある面は波面制御素子である。

10

20

30

表 9				
面番号	R	d	Nd	v_d
1	9.2576*	1.0868	1.922860	18.9
2	4.2724	4.5322	1.849860	24.1
3	20.4855	1.5758	1.922860	20.9
4	無限	0.2500	1.516800	64.2
5 (STO)	無限◆	0.2500	1.516800	64.2
6	無限	1.0208	1.882023	37.2
7	-8.1725	2.6185	1.756999	47.7
8	-3.6502	1.9300	1.804855	24.7
9	-7.9006*	2.3903		
10 (IMG)	-9.5769	1.0868		

10

20

【 0 0 5 8 】

本実施例の撮像装置における非球面は光軸を中心とした回転対称非球面としており、(9) 式の多項式で表現される。

本実施例の撮像装置における第 1 面の非球面係数を表 1 0 A に、第 9 面の非球面係数を表 1 0 B に、第 5 面の位相差多項式の係数を表 1 0 C に示す。

表 1 0 A 非球面係数 (面番号 1)		
パラメータ	記号	値
コーニク定数	K	-2.45628E+00
4 次の係数	A	3.21177E-04
6 次の係数	B	-1.74680E-06
8 次の係数	C	0.00000E+00
10 次の係数	D	0.00000E+00

30

【 0 0 5 9 】

40

表 1 0 B 非球面係数 (面番号 9)		
パラメータ	記号	値
コーニック定数	K	-1.21591E+01
4 次の係数	A	-2.59045E-03
6 次の係数	B	1.30885E-04
8 次の係数	C	-4.66439E-06
10 次の係数	D	7.14736E-08

10

【 0 0 6 0 】

表 1 0 C 位相差多項式 (面番号 5)		
パラメータ	記号	値
回折次数		1 次
規格化波長		587.5618(nm)
2 次の係数	C ₁	-8.67933E-03
4 次の係数	C ₂	4.41119E-04
6 次の係数	C ₃	0.00000E+00
8 次の係数	C ₄	0.00000E+00
10 次の係数	C ₅	0.00000E+00

20

30

【 0 0 6 1 】

図 1 7 に、本実施例の波面制御素子 W C D の位相差によるパワー差 $P(r)$ を示す。波面制御素子 W C D は、光軸から離れるに従って負の方向にパワーが徐々に強くなるように構成しており、球面収差をオーバーの方向に変化させることができ、球面収差を良好に補正することができる。

また、位相差によるパワーが光軸上よりも周辺部のパワーを負の方向にすることによって、長波長よりも短波長の球面収差をよりオーバーに変化させることができるので、色の球面収差においても良好に補正することができる。

40

【 0 0 6 2 】

図 1 8 に本実施例の撮像光学系における縦収差図を、図 1 9 に横収差図を示す。図 1 8 に示したように、球面収差、軸上色収差、非点収差、像面湾曲、ディストーション、及び色の球面収差を良好に補正している。

特に、入射高の低い光線から高い光線に掛けての全域で像面上に集光させることができ、球面収差を非常に良く補正できている。

また、軸上色収差、ならびに色の球面収差も非常に良好に補正でき、高い結像性能が得られている。

図 1 9 に示したように、各画角光束においても良好な性能が得られており、コマ収差、像面湾曲、倍率色収差が良好に補正されている。

50

本実施例の撮像装置では、最も物体側のレンズである第1レンズG1の入射面と、最も像側のレンズである第5レンズG5の射出面を非球面としており、周辺部でパワーが弱まる非球面形状とすることで球面収差を補正している。

【0063】

また、表11に本実施例の撮像装置の仕様を示す。

表 1 1			
撮像光学系の焦点距離	f_{sys}	7.499	(mm)
F 値	$F/\#$	1.0	
画角	2ω	74.0	(deg)
全長	L_{sys}	13.264	(mm)
射出瞳から像面までの距離	d_{pup}	7.166	(mm)
開口絞りから像面までの距離	d_{ape}	8.210	(mm)
開口絞りから最終面までの距離	d_{ape_last}	5.819	(mm)

10

20

【0064】

本実施例の撮像装置は、最も物体側のレンズの入射面と最も像側の射出面を非球面とし、開口絞りの位置に波面制御素子を配置して、球面収差の補正能力を向上させており、焦点距離7.499(mm)と長くした場合においても $F/1.0$ と明るい光学系で良好な結像性能を実現することができる。

表12に、本実施例の撮像装置における、(1)式および(2)式の値を示す。

表 1 2		
条件式①	f_{sys}/d_{pup}	1.05
条件式②	$ R_{img} /f_{sys}$	1.28
条件式⑥	$ R_{img} /d_{pup}$	1.34
条件式⑧	d_{pup}/d_{ape}	0.873

30

【0065】

(1)式の値は1.05であり、(1)式の範囲を満足している。これにより、撮像光学系の開口絞りから像側の光学系を点対称に近い構成にでき、コマ収差、非点収差、歪曲収差、倍率色収差を良好に補正することができる。

40

(2)式の値は1.28であり、(2)式の範囲を満足している。これにより、広画角に渡って像面湾曲と非点収差を良好に補正することができる。

(6)式の値は1.34であり、(6)式を満足している。これにより、撮像光学系を点対称に近い構成としコマ収差、非点収差、歪曲収差、倍率色収差を良好に補正している。また、実施例の撮像装置でも、撮像光学系と撮像面との距離を変更することにより、ピント調整を行う。(6)式を満足しているため、無限遠から至近距離までの広範囲のピント調整範囲において高解像度を維持したまま、ピント調整を可能としている。

【0066】

50

本実施例の撮像装置では、最も像側のレンズ面の曲率半径 $R_{last} = -7.9006$ (mm) であり、開口絞りから最も像側のレンズ面までの距離 $d_{ape_last} = 5.819$ (mm) である。

(7) 式の関係を満たさせおり、最も像側のレンズ面からの曲率中心を開口絞りよりも物体側に配置して、波面制御素子 WCD によって発生したコマ収差を良好に補正するのに適した構成としている。

また、撮像光学系の射出瞳から撮像面までの距離 $d_{up} = 7.166$ (mm) を開口絞りから撮像面までの距離 $d_{ape} = 8.210$ (mm) よりも短く設定しており、画角光束が最も像側のレンズ面から撮像面へ向かう際、外に開くように構成している。

(8) 式を満足しており波面制御素子 WCD によって発生したコマ収差を良好に補正する

10

これらにより、 74.0 (deg) の画角に渡って $F/1.0$ の格段に明るい撮像装置を実現している。

以上で説明した各実施例を含む本発明の構成は、デジタルカメラやデジタルビデオカメラ、携帯電話用カメラ、監視カメラなど、撮像装置を用いる製品に利用可能である。

【符号の説明】

【0067】

G1、G2、G3、G4、G5、G6: レンズ

STO: 開口絞り

WCM: 波面制御手段

WCD: 波面制御素子

IMG: 撮像面

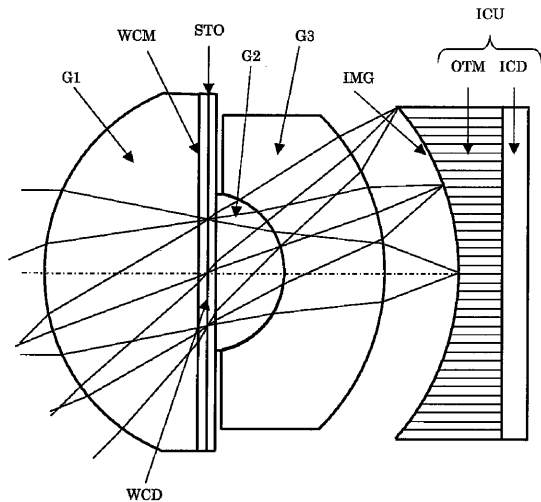
OTM: 光伝送手段

ICD: 電子撮像素子

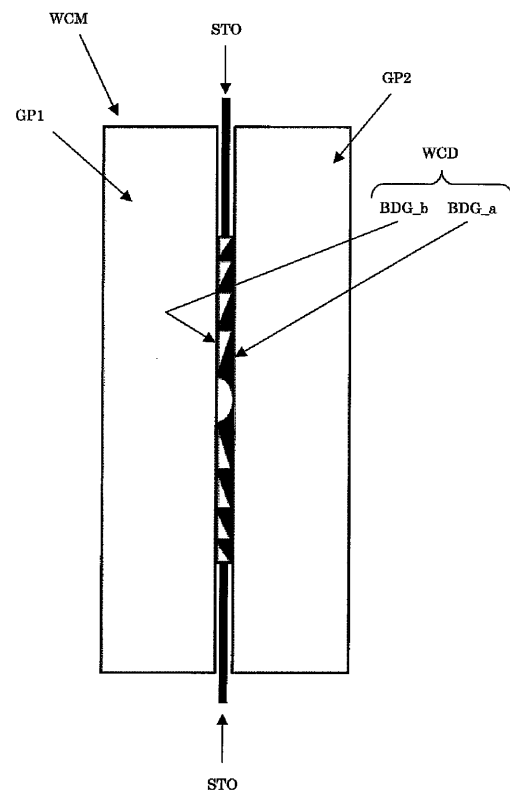
ICU: 撮像ユニット

20

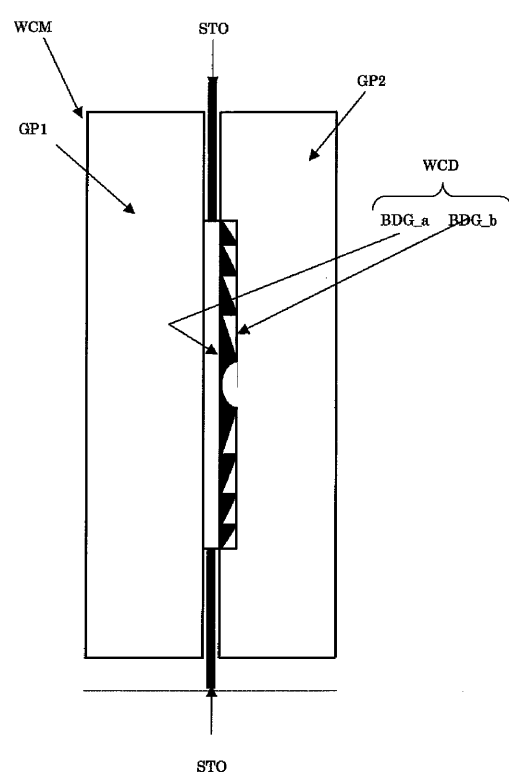
【図1】



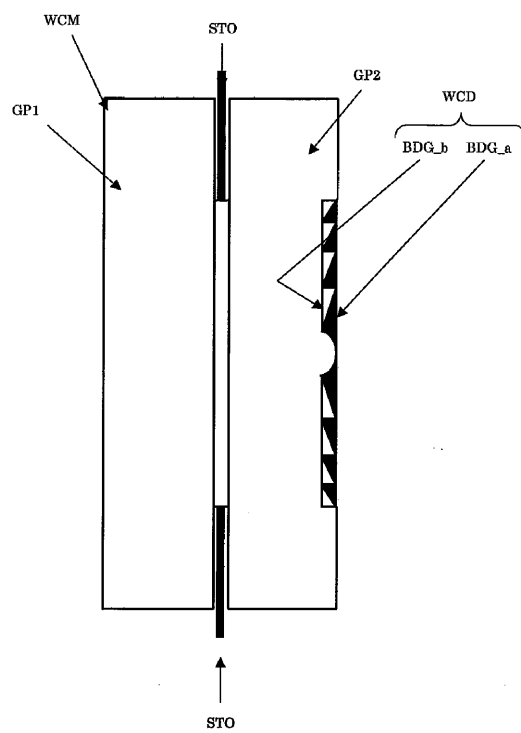
【図2】



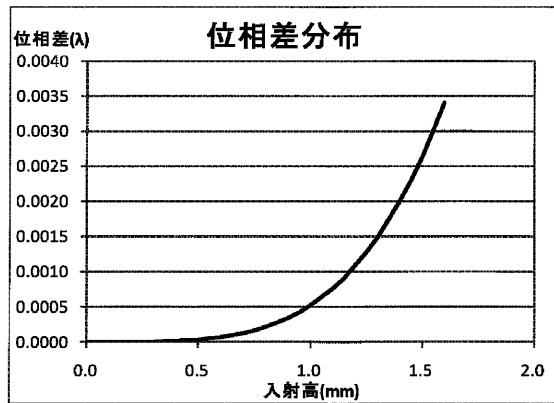
【圖 4】



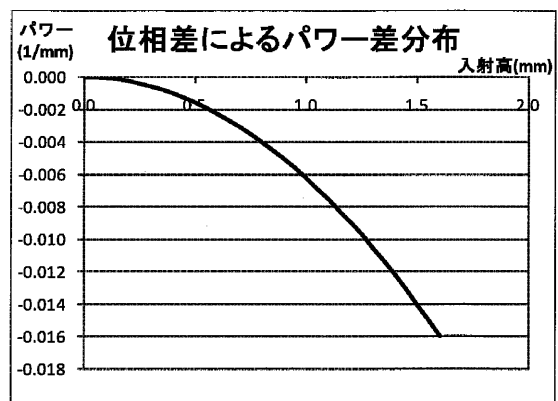
【 図 6 】



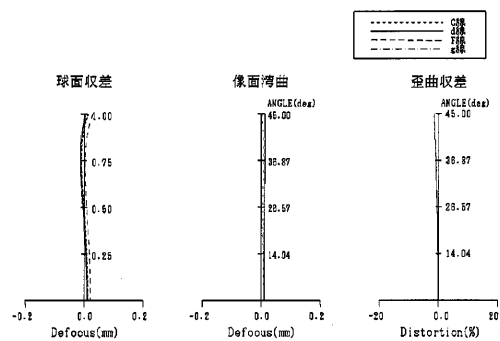
【図 7】



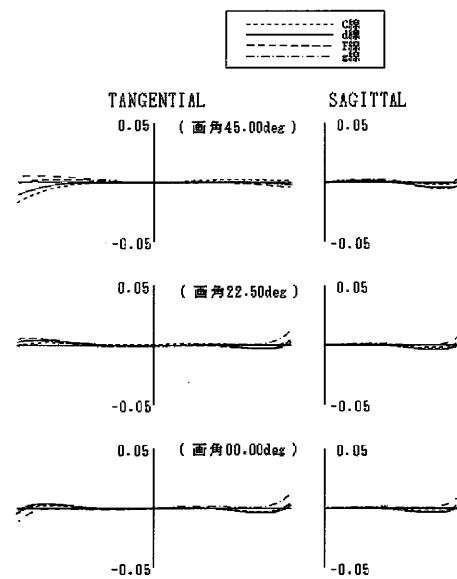
【図 8】



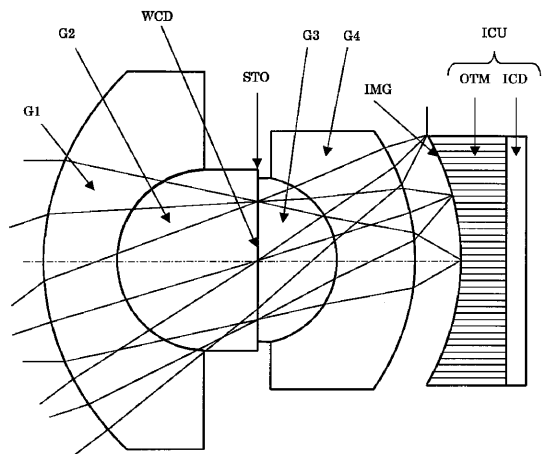
【図 9】



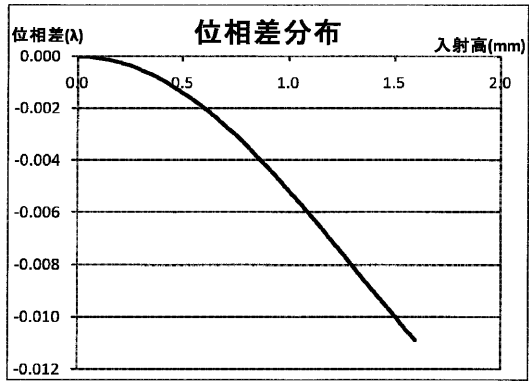
【図 10】



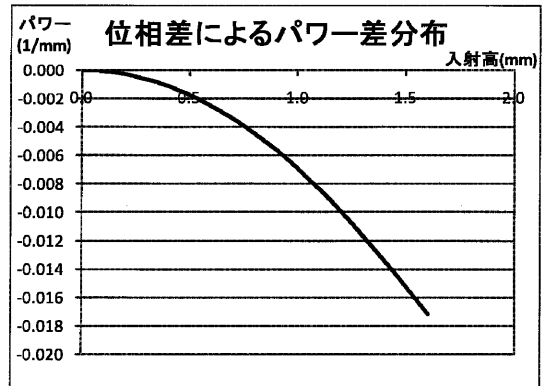
【図 1 1】



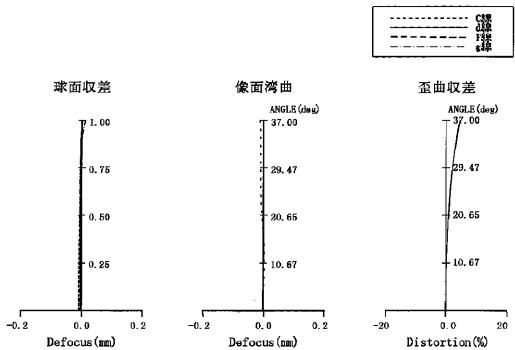
【図 1 2】



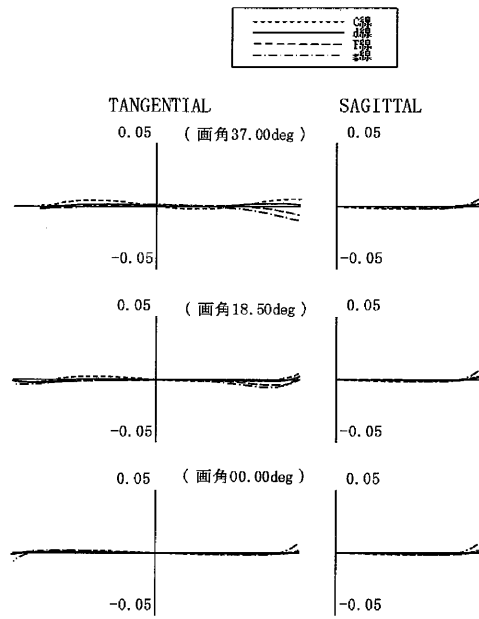
【図 1 3】



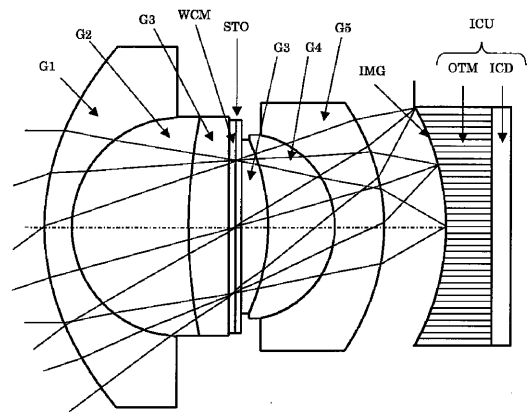
【図 1 4】



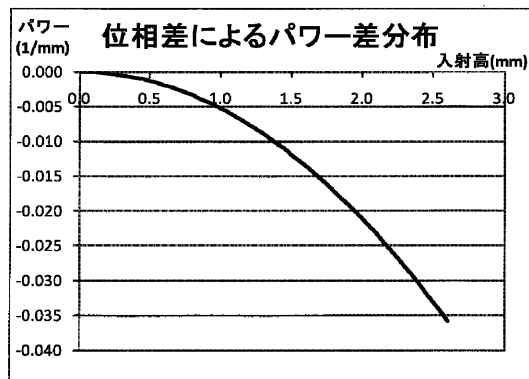
【図 15】



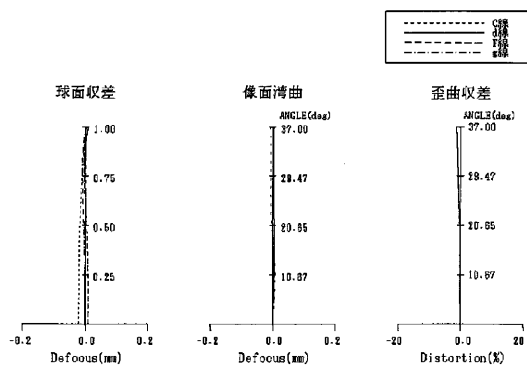
【図 16】



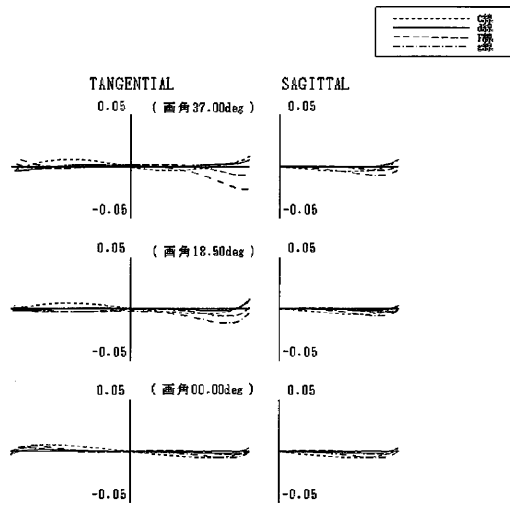
【図 17】



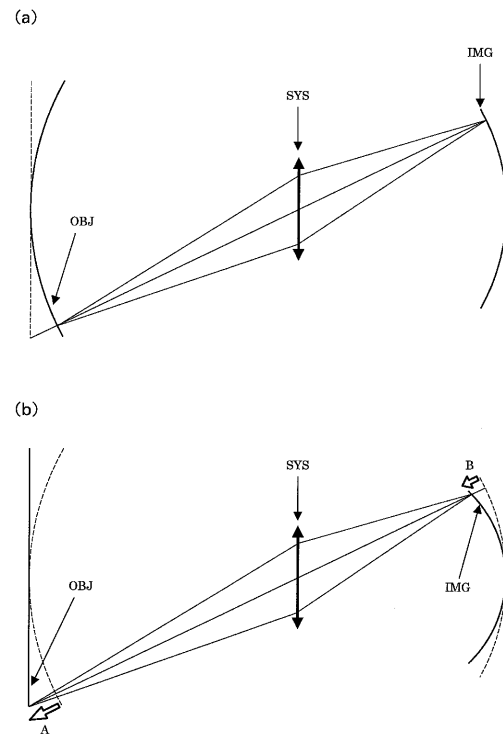
【図 18】



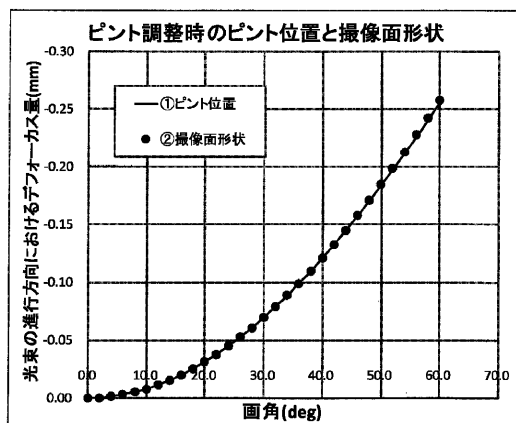
【図 19】



【図 20】



【図 21】



【計算条件】

焦点距離 : $f_{\text{sys}} = 12.0$ (mm)
 撮像面の曲率半径 : $R_{\text{img}} = 12.0$ (mm)
 射出瞳から撮像面までの距離 : $d_{\text{pup}} = 12.0$ (mm)
 物体距離 : $S = -300$ (mm)
 最大画角 : $\omega = 60.0$ (deg)

フロントページの続き

(56)参考文献 特開昭63-096616(JP,A)
米国特許第06097545(US,A)
国際公開第2013/027641(WO,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl.,DB名)
G02B 9/00-17/08
G02B 21/02-21/04
G02B 25/00-25/04