

Off-Axial 光学系の近軸解析

荒木 敬介

キャノン株式会社オプティクス技術研究所 〒146-8501 東京都大田区下丸子 3-30-2

Paraxial Analysis for Off-Axial Optical Systems

Keisuke ARAKI

Optics Technology Research Laboratories, Canon Inc., 3-30-2, Shimomaruko, Ohta-ku, Tokyo 146-8501

By using the method of expansion around the folded axis of reference which is set on the optical path of the reference ray, the paraxial theory for off-axial optical systems can be derived. It is shown that this analytical theory generalizes the prior paraxial theory for co-axial optical systems and includes it perfectly. Some simple examples are also shown for understanding the results of this theory.

1. はじめに

最近 HMD (head mounted display) のような表示系においては従来の共軸光学系の範疇には属さない非対称非球面を用いた設計 (主として反射面) が自動設計技術の向上に伴いしばしば見られるようになってきている。Fig. 1 に示した光学系はそうした光学系の一例である¹⁾。こうした光学系は慣例的に偏心光学系と呼ばれてきているが、構成面が最近是非対称非球面が用いられるのが一般的である。そういった意味では一般的非対称非球面の系では“偏心”の“心”の意味の対称性をもった点や線が存在しないため“偏心”という言葉は適当ではない。むしろ反射や屈折をする光学要素を光線が通るようにという制限はあるものの、自由に配列された光学系という意味合いが強い。したがって本報告ではこうした光学系に対して今後“偏心光学系”という言葉はあえて用いず、非共軸といった意味合いで off-axial 光学系という言葉を用いることにする。(この off-axial 光学系については次の節で共軸系を包含する概念としてきちんと定義するものとする。)

しかし、こうした光学系 (off-axial 光学系) に対しては共軸系の近軸論・収差論の手法^{2,3)}は、光線のあたる部分の近傍に対称軸が存在しないので、一般的にいう意味をもたない。そこで別の近軸論、収差論的取り扱いが必要となってくるが、従来なされている共軸回転対称光学系以

外の近軸論、収差論的取り扱いは総じて以下の4つの取り扱いに大きく分類される。

- (1) 共軸回転対称光学系の微小偏心
- (2) 共軸アナモフィック光学系の解析
- (3) 回転対称を乱す光学要素についての結像特性の変化の解析
- (4) Hamilton の特性関数 (eikonal) を用いた結像特性の一般解析

このうち (1) の共軸回転対称光学系の微小偏心の取り扱い⁴⁾は共軸回転対称の偏心誤差の影響を解析するものであるが、Fig. 1 に示した光学系は微小偏心光学系とはいええず、こうした体系も Fig. 1 に示した光学系には適用することができない。(2) の共軸アナモフィック光学系の解析^{5,6)}は回転対称でないシリンドリカルレンズやトーリックレンズといったアナモフィック光学系用の解析であるが、これも回転対称ではないものの対象が共軸光学系であるために Fig. 1 に示した光学系には適用することができない。(3) の回転対称を乱す光学要素についての結像特性の変化の解析⁷⁾も共軸回転対称光学系を乱すような斜めに置かれた平行平板やプリズムウェッジなどの影響を個別に解析するやりかたなので Fig. 1 に示した一般的な光学系には適用することができない。(4) の Hamilton の特性関数を用いた結像特性の一般解析^{8,9)}はこの4つの解析の中では最も一般性のある解析である。しかしながら理論の展開が光路長を表す Hamilton の特性関数を用いた解析のた

E-mail: araki@ccc.canon.co.jp

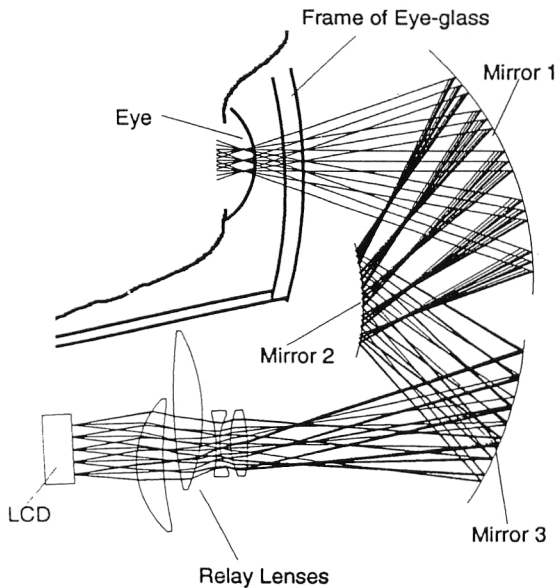


Fig. 1 An example of the off-axis HMD optical system.

めに、また使われる式が複雑かつ難解でわかりにくいいため、設計者が用いたい近軸解析、実収差分析としては有効に使われていない状況にある。

本報告では、このように従来の近軸論、収差論的扱いではうまく取り扱うことができないこうした off-axis 光学系に対しても、光学系の骨組みを決める近軸解析が折れ曲がった基準軸光線に沿った近軸展開手法を用いれば構築可能であり、その結果は従来の共軸系の近軸理論を完全に包含する形としてより一般化した形式にまとめあげることができることを示す。そしてその理論解析の簡単な適用例を紹介する。

2. off-axis 光学系

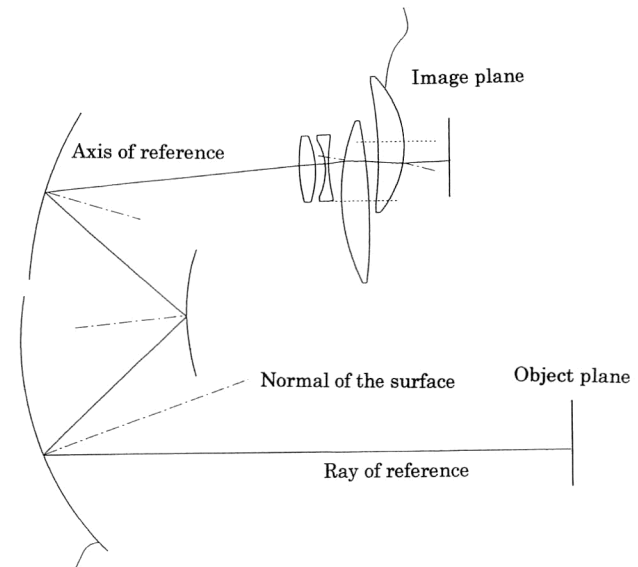
従来多く用いられている共軸光学系に対し、非対称非球面を用いる非軸対称の off-axis 光学系は対称軸をもたないのが一般的である。ただ対称軸をもたない非軸対称の光学系というだけでは、off-axis 光学系という概念がわかりにくいので、よりきちんと off-axis 光学系を定義しよう。そのためには、従来の共軸光学系の光軸の概念を拡張した基準軸というものを定義しておくことが有用である。

以下に off-axis 光学系とその骨組みとなる基準軸の定義を示す。

2.1 基準軸の定義

一般的には物体面から像面にいたる基準となる基準波長の光線の光路をその光学系における基準軸と定義する。これだけでは基準となる光線の選び方に曖昧性が残るので、通常は以下の2つの原則のいずれかに則り基準光線を設定する。

Off-axis surface (refraction)



Off-axis surface (reflection)

Fig. 2 Schematic diagram of an off-axis optical system.

- (1) 光学系に部分的にでも対称性を有する軸が存在し、収差のとりまとめが対称性よく行うことができる場合にはその対称性を有する軸上を通る光線を基準光線とする
- (2) 光学系に一般的に対称軸が存在しないとき、あるいは部分的には対称軸が存在しても、収差のとりまとめが対称性よく行えないときには、物体面中心（被撮影、被観察範囲の中心）から出る光線のうち、光学系の指定される面の順に光学系を通り、光学系内に定義される絞り中心を通る光線を基準光線として設定する
このようにして定義される基準軸は一般的には折れ曲がっている形状となる（Fig. 2 参照）。

2.2 off-axis 光学系の定義

上記のように定義した基準軸が曲面と交わる点において面法線が基準軸と一致しない曲面（off-axis 曲面）を含む光学系を off-axis 光学系と定義する。そうすれば、Fig. 2 に示す例は off-axis 光学系ということになる。なお、平面反射面によって基準軸が単純に折れ曲がっている場合も面法線が基準軸と一致しないが、あえて上記定義では曲面に限定し off-axis 光学系の対象から除外してある。これはそうした平面反射面は収差の対称性を損なわず単に光路を曲げただけで、折れ曲がり延ばして考えれば共軸光学系と同等な性質を示すからである。

3. off-axis 光学系の構成面の表現方法

off-axis 光学系を構成する面は一般に対称性をもたない

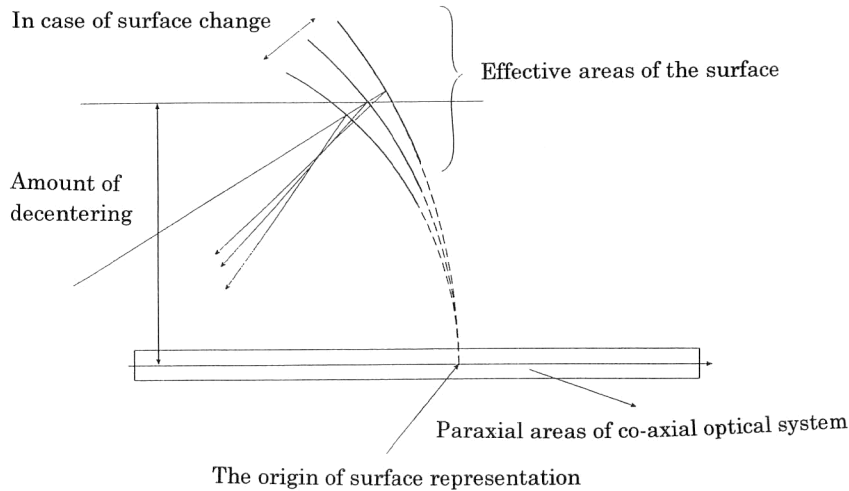


Fig. 3 Previous method for surface arrangement: the ray of reference cannot be fixed with the changes of surface.

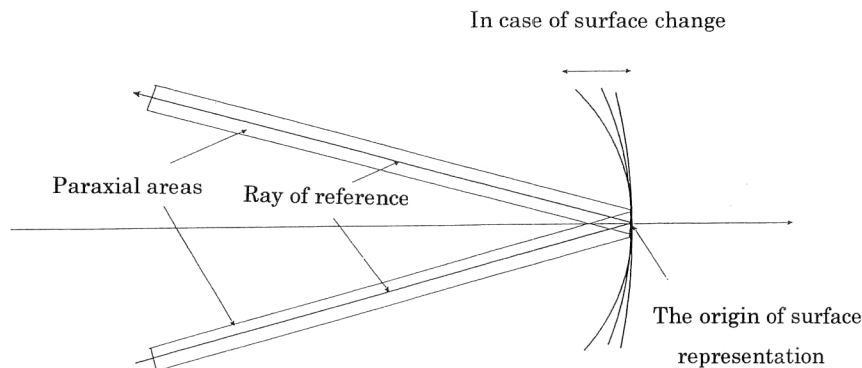


Fig. 4 New method for surface arrangement: the ray of reference can be fixed with the changes of surface.

い。対称性をもたない面の表現法としては展開の中心に対する2変数べき級数展開が最も一般的である。ここでは展開の中心は面と基準軸との交点とし、その面形状を表現するローカル座標系としては面法線に x 軸をあわせたものを用いる。そして形状を表す式を $x = x(y, z)$ の形に表現する。その際その点での面法線が、面形状の変化に伴っても変化しないように展開は2次から始めるようにする。つまり

$$\begin{aligned}
 x(y, z) = & C_{20}y^2 + 2C_{11}yz + C_{02}z^2 + D_{30}y^3 \\
 & + 3D_{21}y^2z + 3D_{12}yz^2 + D_{03}z^3 \\
 & + E_{40}y^4 + 4E_{31}y^3z + 6E_{22}y^2z^2 + 4E_{13}yz^3 \\
 & + E_{04}z^4 + \dots \dots \dots \quad (1)
 \end{aligned}$$

のように表す。(なお、この表現において各次数の展開係数の前には、2項係数が便宜的につけてある。これは、2項係数をつけておくことで後に述べる近軸解析時に、係数が揃いまとめやすくなるためである。)

このように基準軸との交点を中心に面法線を固定して展

開する手法を用いて構成面を定義しておけば、Fig. 3に示すような従来の off-axial 光学系の設計法とは異なり、光学配置の骨組み(基準軸の配置)を変えずに面形状を変化させることができる (Fig. 4参照)。また更に、2次の展開係数も固定して3次以降の係数のみを変化させれば各アジマスでの近軸量(後述の Table 2の結果参照)を変えずに収差補正のみを行うこともできる。

4. 折れ曲がった基準軸に沿った近軸展開手法

Fig. 5に解析に用いた折れ曲がった基準軸に沿った近軸展開の座標系とそこで用いる諸量を示す。反射は屈折率が負の屈折と一般化できるので展開は屈折系で考えることにする。この図において物体側、像側ともに基準軸に沿って local 座標系がとられ、物体面、像面、入射瞳面、射出瞳面を基準軸に垂直に図に示すように定義する。面形状は前項で述べたように面法線に沿った local 座標系で表現されている。このとき物線ベクトル \mathbf{b} 、入射瞳上の高さベクト

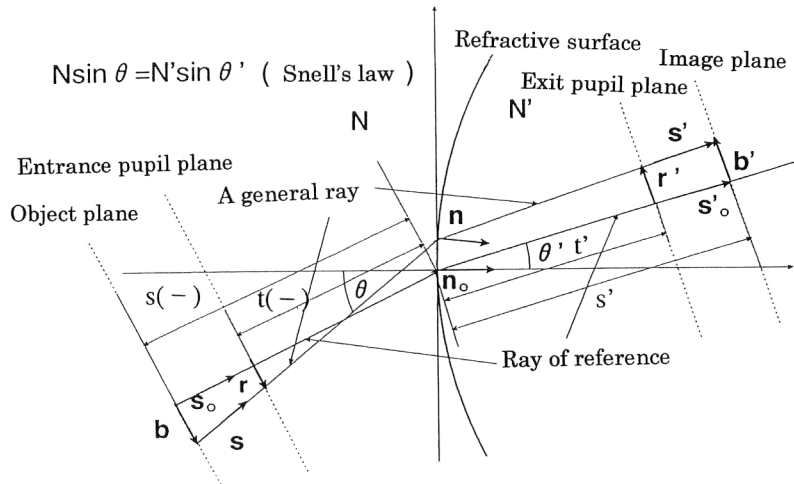


Fig. 5 Notations of quantities used in expansion around the folded axis of reference. N , refractive index of incident side; N' , refractive index of exit side; \mathbf{s}_0 , unit vector for incident ray of reference; \mathbf{s}'_0 , unit vector for exit ray of reference; \mathbf{n}_0 , unit normal vector at the point where the ray of reference intersects; \mathbf{n} , unit normal vector at the point where a general ray intersects; \mathbf{s} , unit vector for an incident general ray; \mathbf{s}' , unit vector for a refracted general ray; \mathbf{b} , vector for object height; \mathbf{b}' , vector for image height; \mathbf{r} , vector for entrance pupil height; \mathbf{r}' , vector for exit pupil height; s , length to the object plane; s' , length to the image plane; t , length to the entrance pupil plane; t' , length to the exit pupil plane.

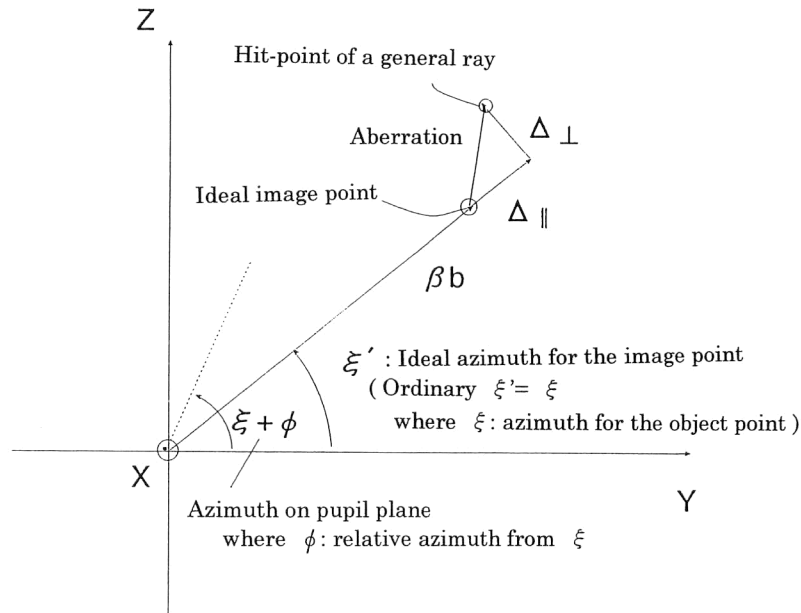


Fig. 6 Decomposition of an image point vector into two components.

ル \mathbf{r} を通る光線を考え、この \mathbf{b} , \mathbf{r} が微小量として屈折の法則をべき級数展開することを考える。その手順は

- (1) 光線の方角ベクトル \mathbf{s} を図中の距離 s , b (\mathbf{b} の絶対値) および ξ (\mathbf{b} のアジマス; ただし基準軸の屈折面を $\xi=0$ とする), 距離 t , r (\mathbf{r} の絶対値) および $\xi_r = \xi + \phi$ (\mathbf{r} のアジマス; ϕ は相対アジマス) を用いて表す

- (2) (1) で求めた始点ベクトルと方向ベクトルおよび面形状の式を使い屈折面上の交点を求める
- (3) (2) の交点における面法線ベクトル \mathbf{n} をベクトル解析の手法で求める
- (4) (3) の結果と屈折の法則を用い、その交点における屈折後の方向ベクトル \mathbf{s}' を求める
- (5) 屈折面上の位置と屈折後の方向ベクトル \mathbf{s}' とがわ

Table 1 Results of the paraxial expansion around the folded axis of reference.

$$\begin{aligned}
 \Delta_{//} &= r[s(\cos\theta' \cos\xi' \cos(\xi+\phi) + \cos\theta \sin\xi' \sin(\xi+\phi))/(\cos\theta(s-t)) \\
 &\quad - s' N(\cos\theta' \sin\xi' \sin(\xi+\phi) + \cos\theta \cos\xi' \cos(\xi+\phi))/(N' \cos\theta'(s-t)) \\
 &\quad - 2s s'(N' \cos\theta' - N \cos\theta)\{\cos\xi' \cos(\xi+\phi) C_{20} \\
 &\quad + (\cos\theta' \sin\xi' \cos(\xi+\phi) + \cos\theta \cos\xi' \sin(\xi+\phi)) C_{11} \\
 &\quad + \cos\theta \cos\theta' \sin\xi' \sin(\xi+\phi) C_{02}\}/(N' \cos\theta \cos\theta'(s-t))] \\
 &\quad - b[\beta + t(\cos\theta' \cos\xi' \cos\xi + \cos\theta \sin\xi' \sin\xi)/(\cos\theta(s-t)) \\
 &\quad - s' N(\cos\theta' \sin\xi' \sin\xi + \cos\theta \cos\xi' \cos\xi)/(N' \cos\theta'(s-t)) \\
 &\quad - 2t s'(N' \cos\theta' - N \cos\theta)\{\cos\xi' \cos\xi C_{20} \\
 &\quad + (\cos\theta' \sin\xi' \cos\xi + \cos\theta \cos\xi' \sin\xi) C_{11} \\
 &\quad + \cos\theta \cos\theta' \sin\xi' \sin\xi C_{02}\}/(N' \cos\theta \cos\theta'(s-t))] \\
 \Delta_{\perp} &= \partial\Delta_{//}/\partial\xi' \\
 &= r[s(-\cos\theta' \sin\xi' \cos(\xi+\phi) + \cos\theta \cos\xi' \sin(\xi+\phi))/(\cos\theta(s-t)) \\
 &\quad - s' N(\cos\theta' \cos\xi' \sin(\xi+\phi) - \cos\theta \sin\xi' \cos(\xi+\phi))/(N' \cos\theta'(s-t)) \\
 &\quad - 2s s'(N' \cos\theta' - N \cos\theta)\{-\sin\xi' \cos(\xi+\phi) C_{20} \\
 &\quad + (\cos\theta' \cos\xi' \cos(\xi+\phi) - \cos\theta \sin\xi' \sin(\xi+\phi)) C_{11} \\
 &\quad + \cos\theta \cos\theta' \cos\xi' \sin(\xi+\phi) C_{02}\}/(N' \cos\theta \cos\theta'(s-t))] \\
 &\quad - b[t(-\cos\theta' \sin\xi' \cos\xi + \cos\theta \cos\xi' \sin\xi)/(\cos\theta(s-t)) \\
 &\quad - s' N(\cos\theta' \cos\xi' \sin\xi - \cos\theta \sin\xi' \cos\xi)/(N' \cos\theta'(s-t)) \\
 &\quad - 2t s'(N' \cos\theta' - N \cos\theta)\{-\sin\xi' \cos\xi C_{20} \\
 &\quad + (\cos\theta' \cos\xi' \cos\xi - \cos\theta \sin\xi' \sin\xi) C_{11} \\
 &\quad + \cos\theta \cos\theta' \cos\xi' \sin\xi C_{02}\}/(N' \cos\theta \cos\theta'(s-t))]
 \end{aligned}$$

かったので距離 s' , t' が与えられれば像線ベクトル \mathbf{b}' , 射出瞳面上の高さベクトル \mathbf{r}' が求まる。この手順による \mathbf{b}' の b , r の 1 次量までの展開結果を Table 1 に示す。この結果において \mathbf{b}' は Fig. 6 に図示してあるように

$$\mathbf{b}' = \beta\mathbf{b} + \Delta_{//} + \Delta_{\perp} \quad (2)$$

の形に成分に分解して表現してある。ただし $\beta\mathbf{b} + \Delta_{//}$ はアジムス ξ に対する平行成分 (β は後述の Table 2 の式で決められる投影倍率), Δ_{\perp} は垂直成分を表す。

5. off-axial 光学系での結像の式と近軸量の導出

Table 1 の結果を使って近軸関係を求める場合は物高 h は 0 とおいてよい。したがって $\Delta_{//}$ と Δ_{\perp} の r の 1 次の比例係数を調べればよいわけであるが、系の回転非対称性のために近軸光線が基準軸に対してねじれの位置にあることを反映して、これら 2 つの係数はアジムス ξ 依存をもち一般的には同時に 2 つの係数をゼロとすることはできない。一般にこうした近軸光線が基準軸に対してねじれの位置にあるアナモルフィックな光学系では、光路をアジムス断面に投影した $\Delta_{//}$ の係数=0 により結像共役関係式と近軸量を定義し、 Δ_{\perp} に対しては、ねじれの位置から生じる 1 次の球面収差をもつと考えると便利である。しかしながら、 $\Delta_{//}$ の係数=0 の式から結像共役関係式を求めるとはいつでも一般に回転対称のない系では相対アジムス $\phi=0$ の光線 (メリディオナル光線に対応) と $\phi=\pi/2$ の光線 (サジタル光線に対応) とでは結像位置が異なる (いわゆる非点収差をもつ) ことが生じる。この軸上の非点収差に

対し本理論では相対アジムス $\phi=0$ の場合の結像面を近軸像面と定義し、 $\phi \neq 0$ の場合は軸上非点収差が残るとして理論を構築することにする。そうした像面の定義により投影された結像関係式として

$$\begin{aligned}
 &N'(\cos\theta' \cos\xi' \cos\xi + \cos\theta \sin\xi' \sin\xi)/(s' \cos\theta) \\
 &\quad - N(\cos\theta' \sin\xi' \sin\xi + \cos\theta \cos\xi' \cos\xi)/(s \cos\theta') \\
 &\quad - 2(N' \cos\theta' - N \cos\theta)\{\cos\xi' \cos\xi C_{20} \\
 &\quad + (\cos\theta' \sin\xi' \cos\xi + \cos\theta \cos\xi' \sin\xi) C_{11} \\
 &\quad + \cos\theta \cos\theta' \sin\xi' \sin\xi C_{02}\}/(\cos\theta \cos\theta') = 0
 \end{aligned} \quad (3)$$

が求まるが、これは s , s' を t , t' に変えるだけで断面の結像式となるので、従来の共軸系の一般拡張となる合理的な定義であることがわかる。

次にこの投影された結像関係式を従来の共軸系での結像の式

$$(N'A)/s' - (ND)/s - \Phi = 0 \quad (4)$$

と比較することを考える。ここで A , D は

$$\begin{bmatrix} h' \\ \alpha' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ \Phi & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

で示されるガウシヤンブラケットの対角成分、 Φ はパワーを表す (ただし成分の $B=0$, $AD=1$ の場合)。

ただちにわかるとおりこれら 2 つの式はまったく同じ形式をしているので、比較によりこの結像式に対応する off-axial 屈折面の近軸量を決定することができる。つまり近軸光線を投影して考えれば共軸系の場合と同様に各アジムスごとに近軸量の計算ができることになる。その結果を Table 2 に示す。

Table 2 Paraxial parameters for an off-axial refracting surface.

$A = \sqrt{\frac{\cos\theta'(\cos\theta' \cos\xi' \cos\xi + \cos\theta \sin\xi' \sin\xi)}{\cos\theta(\cos\theta' \sin\xi' \sin\xi + \cos\theta \cos\xi' \cos\xi)}}$	$D = 1/A$
$\Phi = \frac{2(N' \cos\theta' - N \cos\theta) G_m}{\sqrt{\cos\theta' \cos\theta (\cos\theta' \cos\xi' \cos\xi + \cos\theta \sin\xi' \sin\xi) (\cos\theta' \sin\xi' \sin\xi + \cos\theta \cos\xi' \cos\xi)}}$	
where	
$G_m = \cos\xi' \cos\xi C_{20} + (\cos\theta' \sin\xi' \cos\xi + \cos\theta \cos\xi' \sin\xi) C_{11} + \cos\theta \cos\theta' \sin\xi' \sin\xi C_{02}$	
magnification $\beta = \frac{Ns'}{N's} D = \alpha/\alpha'$	

ここで Table 2 に示された近軸量の式に共軸、回転対称の条件の

$$\theta = \theta' = 0, C_{20} = C_{02} = 1/(2r), C_{11} = 0 \quad (6)$$

(ただし r は曲率半径)

を代入して計算すれば、従来からよく知られている共軸系の場合の式が得られる。これは Table 2 に示された近軸量が従来の共軸系の近軸量の一般拡張になっていることを示すが、これは注目に値することである。

6. 簡単な面での分析・確認

ここで、求まった近軸理論の簡単な面への適用を考えてみる。

6.1 off-axial 反射面

HMD などでも多用される off-axial 反射面においては $\theta = \theta'$ であるのでガウシャンプラケットの A, D の値が共軸系と同様に 1 となる。この場合反射面のパワーは一般には曲率のほかに入射角 θ およびアジムス ξ に依存するアナモルフィックなものとなる。ここでさらに Fig. 7 に示す基準軸が 2 焦点を通る off-axial 反射 2 次曲面を考えると a, b を 2 つの焦点と面頂点との距離とすれば反射面

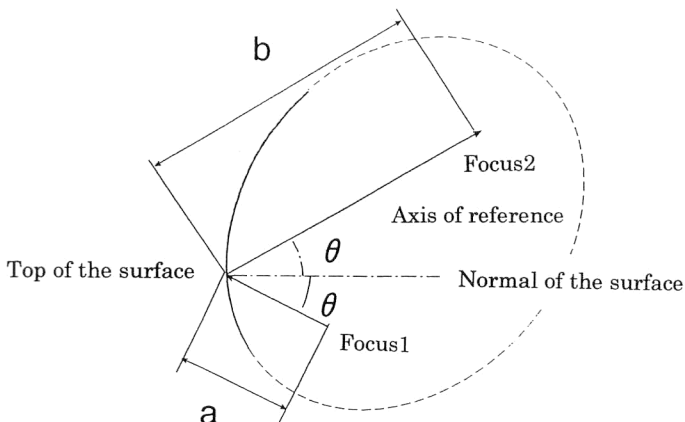


Fig. 7 An off-axial reflecting quadric surface.

のパワーは直観的に $1/a + 1/b$ とアジムス依存性をもたないことが予想される。この系の面の 2 次の展開係数を面頂点における曲率計算より求めると、

$$\begin{aligned} C_{20} &= (1/a + 1/b) \cos\theta/4, \\ C_{02} &= (1/a + 1/b)/(4\cos\theta), \\ C_{11} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

となるが、これらの量を使い反射の屈折率 $N' = -N = 1$ を Table 2 の式に代入すればパワーが予想どおりの結果になることが確かめられる。この off-axial 反射 2 次曲面の展開係数から $(1/a + 1/b)$ を消去して得られる

$$C_{20} = C_{02} \cos^2\theta, C_{11} = 0 \quad (8)$$

の式は反射面のパワーがアジムス ξ に依存しない条件式を示すが、逆にこの条件式を満たすように面形状を選べば近軸的には共軸回転対称系と同様な扱いができることができる。

6.2 off-axial 屈折面

off-axial 屈折面は反射面のように簡単にはならない。これはガウシャンプラケットの対角要素 A, D が 1 ではない ($A = 1/D \neq 1$ なる逆数関係) ためである。しかしながらこのことも屈折面を平面にして考えれば理解可能である。屈折面が平面の場合屈折面のプリズム効果により系はアジムス依存性をもった角倍率をもつが、これは一般にガウシャンプラケットの D として表される。このことを念頭において考えれば、一般の off-axial 屈折面のガウシャンプラケットの各成分は off-axial な屈折によるプリズム効果と曲面によって生じたパワー変化との複合された項であると理解することができる。

7. 近軸トレースとその設計への応用

このように off-axial 系の各面においてガウシャンプラケットを用いた手法で屈折の近軸量を定義できたが、複数の面から構成される系においては面と面との間の転送項を定義しておく必要がある。off-axial 系の場合も簡単な幾何学的考察により、基準軸上に沿って長さを定義すれば従来と同様に換算面間隔 e' を用いて

$$\begin{pmatrix} 1 & -e' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

の形でガウシアンブラケットを使った表現ができることがわかる。したがって off-axial 面が複数ある系においても従来と同様にアジムスごとに近軸トレースが可能である。つまり off-axial 光学系全体の骨組みも共軸系の場合と同様に近軸的に解析できるわけである。一般に倍率がアジムスに依存しない等方的結像の場合、設計はたとえば次のよ

うな手順で行えばよい。

- (1) 光学系を光路の干渉などを考慮しつつ、折れ曲がった基準軸に沿って配置する
- (2) 次にガウシアンブラケットの手法を用いてアジムスごとに近軸トレースを行い、全系の近軸量・像面位置がアジムス依存をもたないように各面の曲率を決めて

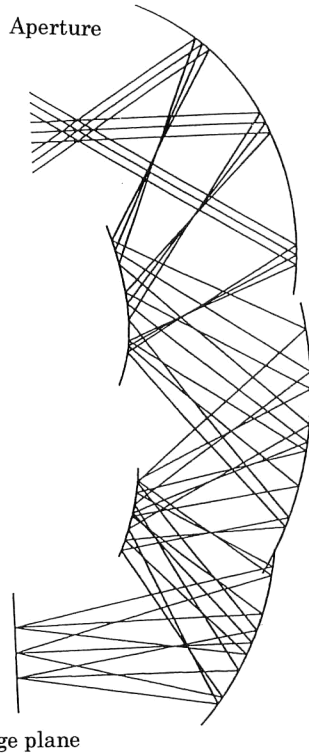


Fig. 8 An example of lens design using 5 off-axial mirrors.

Table 3 Specifications of the off-axial optical system shown in Fig. 8.

Half angle of view (horizontal)	31.7 deg.
Half angle of view (vertical)	24.8 deg.
Diameter of aperture	1.60 mm
Image size	4.8 mm (horizontal) × 3.6 mm (vertical)

Table 4 Azimuth dependence of the power.

Surface No.	Azimuth			
	0	30	60	90
2	0.1071	0.1080	0.1098	0.1107
3	-0.1541	-0.1583	-0.1669	-0.1712
4	0.0762	0.0773	0.0797	0.0808
5	-0.1258	-0.1307	-0.1406	-0.1455
6	0.0879	0.0881	0.0887	0.0889
Total	-0.3102	-0.3118	-0.3133	-0.3131

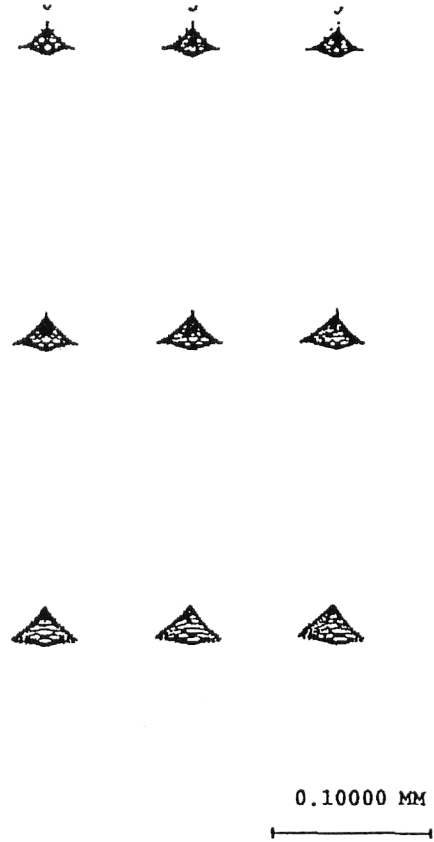


Fig. 9 Spot-diagram of the example shown in Fig. 8.

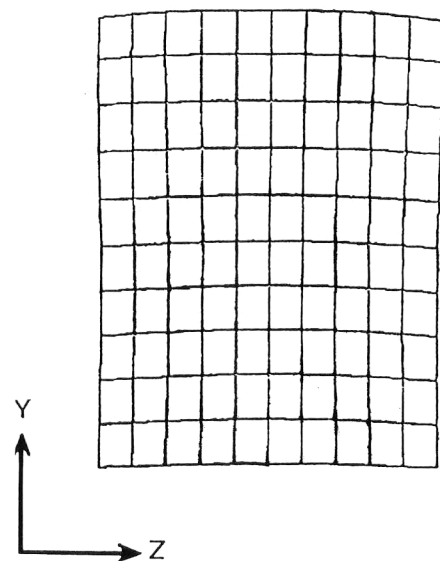


Fig. 10 Distortion of the example shown in Fig. 8.

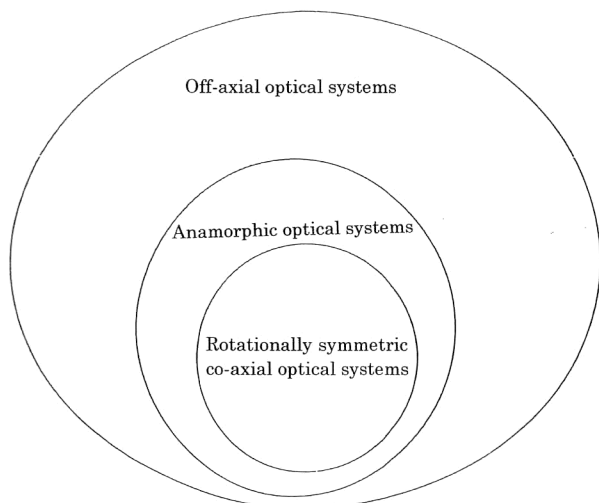


Fig. 11 Inclusion relations among optical systems.

やる (1 次収差の除去)

- (3) 3 次以降の奇数次の高次非球面係数を導入することにより、主として 2 次収差、4 次収差といった非対称の偶数次収差を補正し、4 次以降の偶数次の高次非球面係数を導入することにより主として 3 次、5 次といった共軸回転対称系でも存在する奇数次収差を補正する

こうした手法を用いて HMD 光学系用に設計された光学系の一例を Fig. 8 (仕様は Table 3) に示す。この例では、Table 4 に示すように、勾玉状に配列された反射面 5 面の off-axial 光学系で系のパワーがほぼアジムス依存がないように設計されている。また、Fig. 9, Fig. 10 に瞳側から追跡した場合のスポットダイアグラムとディストーションを示すように、共軸光学系でないにもかかわらず収差もかなり良好に補正されていることがわかる。

8. ま と め

off-axial 光学系に対する近軸量は折れ曲がった基準軸に沿った近軸展開手法を用いれば導出可能であり、光軸回

転対称系と同様にガウシアンブラケットを用いた形式にまとめることができる。結果の近軸量は一般にはアジムス依存性をもつ形で表現され、これは従来の共軸回転対称系の理論を一般拡張した形となっている。このことを模式的に書くと Fig. 11 のような包含関係にあるとすることができる。この図に表されるように off-axial 光学系は従来の共軸回転対称光学系やアナモルフィック光学系のより一般的な概念と考えることができるわけである。このような視点に立ったより一般形としてのこうした近軸解析の手法は off-axial 面が複数といった一般の off-axial 光学系の骨組みを決める上で有用である。

本報告をまとめるにあたっては、数値例の作成等でキャノン(株)の秋山健志氏に大変お世話になった。ここに付記してお礼に代えたい。

文 献

- 1) 森島英樹, 秋山健志, 難波則広, 田中常文: “非対称非球面ミラーを用いた off-axial HMD 光学系の設計”, 第 20 回光学シンポジウム講演予稿集 (1995) pp. 53-56.
- 2) 松居吉哉: レンズ設計法 (共立出版, 1972) pp. 13-38.
- 3) 松居吉哉: 収差論 (日本オプトメカトロニクス協会, 1989) pp. 3-21.
- 4) 松居吉哉: 偏心の存在する光学系の 3 次の収差論 (日本オプトメカトロニクス協会, 1989) pp. 1-7.
- 5) C. G. Wynne: “The primary aberrations of anamorphic lens systems,” Proc. Phys. Soc., Lond. B, **67** (1954) 529-537.
- 6) T. A. Kuz'mina: “Third-order aberrations of optical systems with two symmetry planes,” Sov. J. Opt. Technol., **41** (1974) 434-437.
- 7) J. W. Howard: “Formulas for the coma and astigmatism of wedge prisms used in converging light,” Appl. Opt., **24** (1985) 4265-4268.
- 8) B. D. Stone and G. W. Forbes: “Foundations of first-order layout for asymmetric systems: an application of Hamilton's methods,” J. Opt. Soc. Am. A, **9** (1992) 96-109.
- 9) H. A. Buchdahl: “Systems without symmetries: foundations of a theory of Lagrangian aberration coefficients,” J. Opt. Soc. Am., **62** (1972) 1314-1324.