

非共軸光学系の撮像系への展開

荒 木 敬 介

Extension of Non-Co-Axial Optics into the Imaging Systems

Keisuke ARAKI

Non-co-axial optics is the promising technology in optical designs. In this paper, paraxial and aberration analysis method for non-co-axial systems are explained. Then several application examples of these systems are shown. Finally, possibilities and issues are discussed for extension of non-co-axial optics into the imaging systems.

Key words: non-co-axial optics, decentered optical systems, off-axial optical systems

従来、撮像光学系の光学系としては、共軸球面屈折光学系が広く用いられてきた。この光学系は、光軸という回転対称軸の上に曲率中心をもつ球面の屈折面を複数面並べて構成される光学系である。この光学系は、その回転対称性から、回転非対称な偶数次の収差が発生しないという特徴をもち、収差論的にも合理的な光学系である。さらに、非球面の作製・評価技術が進歩するにつれ、また光学系の小型化が要求されるようになるにつれ、光軸まわりの回転対称性を保ちながら、一部の面に回転対称非球面を使い奇数次の回転対称収差の補正自由度を高めた屈折光学系が、現在は撮像光学系の主流になってきている。

一方、共軸光学系の範疇には、構成面が反射面を含む光学系も存在する。こうした反射面を使う光学系は、反射面が色収差を発生させないこと、正のパワーでも負のペッツバル項の値をとる点など、設計上では大きなメリットがあるが、反射面で光路が折り返され、軸上の光束がけられて使えないというデメリットのため、その利用は望遠鏡の光学系など一部の用途に限られてきた。

しかし、1990 年前後から、自動設計技術の向上に伴い、反射面のメリットを生かししかも、物体中心と瞳中心を通る基準波長の光線（以下では基準軸光線とよぶ）でもけられない構成とした非共軸光学系の設計が観察光学系を中心

に見受けられるようになってきている。こうした光学系では、物体中心と瞳中心を通る光線が折れ曲がった経路をとり、この光線に対して構成面が非対称な配置となるため、構成面も非対称な非球面が偶数次収差補正のために用いられるのが一般的である。この報告では、そうした非共軸光学系の撮像系への展開について述べることにしたい。

1. 非共軸光学系の表現法

非共軸光学系の設計値の表現方法は、以下の 2 つの表現形式に大別される。

① 偏心光学系としての表現：共軸光学系の面を回転非対称化するとともに、表現の原点や座標軸を偏心させて光学配置を表現する方法。従来の共軸光学系に、「偏心」という考え方を付け加えるだけで光学系が表現できるため、現在広く用いられているが、基準軸光線を固定した設計や、光学系の近軸量や収差解析が行いにくいという欠点をもつ。

② off-axial 光学系としての表現：共軸光学系のレンズデータ（R：面形状、D：面間隔、N：硝材情報）を拡張し、さらに（A：基準軸光線の折れ曲がり情報）を加えて表現する方法¹⁾で、図 1 に示すように光学系概念自体が拡張されている表現方法である。この表

キヤノン(株)オプティクス技術開発センター（〒321-3298 宇都宮市清原工業団地 23-10） E-mail: araki.keisuke@canon.co.jp
宇都宮大学オプティクス教育研究センター（〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2）

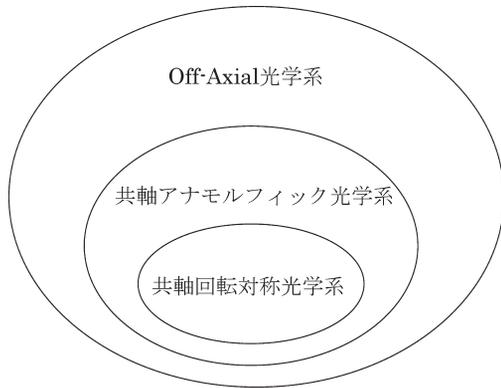


図1 光学系の包含関係.

現方法では、「偏心」という考え方をいわず、面形状の表現式の原点が常に基準軸光線の光路として定義される「基準軸」上に置かれるために、基準軸光線を固定した設計や、光学系の近軸量や収差解析が行いやすいという特徴がある。

2. 非共軸光学系の近軸量や収差解析の概要

2.1 off-axial 光学系の近軸解析

非共軸光学系の設計・評価にあたっては、光学系に対する近軸理論、収差理論を確立しておくことは重要なことである。以下ではまず非共軸光学系としての近軸量や収差解析について、off-axial 光学系の考え方をを使った解析手法²⁻⁵⁾について簡単に紹介したい。

off-axial 光学系とは、図2に示すように折れ曲がった「基準軸」に沿って

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

のように定義される自由曲面が配列されていて、レンズデータがRDNAデータ(R:面形状データ, D:面間隔データ, N:硝材データ, A:基準軸の曲がり方を規定する角度データ)で与えられる光学系である。

off-axial 光学系の基準軸に沿った近軸解析においては、「光線基本4元ベクトル」²⁾と名づけた式(2)に示されるベクトルの導入が有効である。

$$\vec{I} = \begin{bmatrix} h_y \\ h_z \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで h は光線の入射高さ、 α は換算傾角を表すが、この傾角成分は正接成分として記述されるものである。この

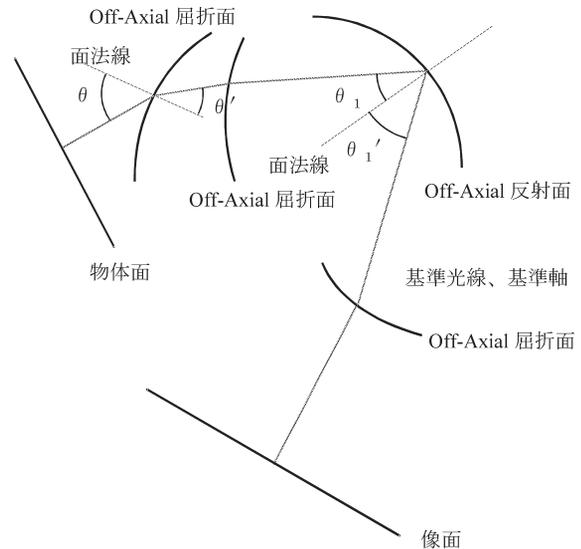


図2 off-axial 光学系の考え方.

新概念のベクトルに対し、射出側の4元ベクトル \vec{I}' を入射側の4元ベクトル \vec{I} でべき級数展開することを考える。その数学的表現はテンソルを使った表現を用いれば次の式(3)のように表すことができる。

$$\vec{I}' = G_{ij}I_j + H_{i_1j_1}I_{j_1}I_{j_2} + M_{i_1j_2j_3}I_{j_1}I_{j_2}I_{j_3} + \dots \quad (3)$$

この展開表現において、近軸特性はガウス行列 G_{ij} に集約的に表現される。

1つの off-axial 曲面での屈折に対しガウス行列 G_r は面形状の曲率に関連するデータ C_{20} , C_{11} , C_{02} と境界両サイドの屈折率 N , N' および面法線と基準軸とのなす角の方向余弦 $\cos\theta$, $\cos\theta'$ を使って次のように書けることが証明できる³⁾。

$$G_r = \begin{bmatrix} \frac{\cos\theta'}{\cos\theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2N^*C_{20} & 2N^*\cos\theta C_{11} & \frac{\cos\theta}{\cos\theta'} & 0 \\ 2N^*\cos\theta' C_{11} & 2N^*\cos\theta'\cos\theta C_{02} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

ただし

$$N^* = \frac{N'\cos\theta' - N\cos\theta}{\cos\theta'\cos\theta} \quad (5)$$

同様に、次の面への転送に対してのガウス行列 G_t は共軸光学系と同様の以下の形式で表される。

$$G_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -e' & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -e' \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 e' は次の面への換算面間隔で基準軸に沿った間

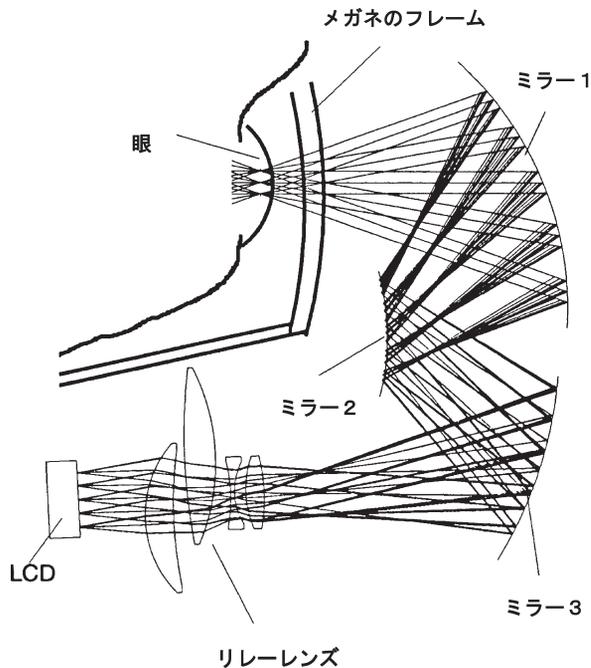


図3 HMD用非共軸光学系の設計例1.

隔を空間の屈折率で割ったものである。

全系トータルのガウス行列は、各要素に対するこれらの屈折と転送の繰り返し積として次のように表される。

$$G = G_{kf} G_{(k-1)t} G_{(k-1)f} \cdots G_{2t} G_{2f} G_{1t} G_{1f} \quad (7)$$

ここで、この近軸特性を表すガウス行列 G は系の RDNA データを使って表せ、すべての A データをゼロとすれば共軸系の表現になることは off-axial 光学系を共軸光学系の拡張概念として位置づけることの合理性を示すものであるといえることができる。

2.2 off-axial 光学系の収差解析

off-axial 光学系の収差論的解析に対しては、「光線通過点 4 元ベクトル」²⁾ と名づけた別の 4 元ベクトルの表現が有効である。

$$\vec{p} \equiv \begin{bmatrix} b \cos \zeta \\ b \sin \zeta \\ r \cos \eta \\ r \sin \eta \end{bmatrix} \quad (8)$$

この 4 元ベクトル \vec{p} は、上の 2 成分が物体面内での正規化された光線通過点座標、下の 2 成分が入射瞳面内での正規化された光線通過点座標を表す。 \vec{I}' の場合と同様に、この射出側の光線通過点 4 元ベクトル \vec{p}' は、入射側の 4 元ベクトル \vec{p} を使って以下のようにべき級数展開ができる。

$$p'_i = T_{ij} p_j + U_{ij_1 j_2} p_{j_1} p_{j_2} + V_{ij_1 j_2 j_3} p_{j_1} p_{j_2} p_{j_3} + \cdots \quad (9)$$

ここで式 (9) から入射側の 4 元ベクトルを引き去ると次のような表現となるが、これが最終的なテンソル表示を用いた収差展開の表現である。

$$p'_i - p_i = (T_{ij} - \delta_{ij}) p_j + U_{ij_1 j_2} p_{j_1} p_{j_2} + V_{ij_1 j_2 j_3} p_{j_1} p_{j_2} p_{j_3} + \cdots \quad (10)$$

この表現において、 $T_{ij} - \delta_{ij}$ (ただし δ_{ij} はクロネッカーのデルタ) は 1 次の収差係数 (1 次収差には、軸上非点収差や正方形が平行四辺形に歪む歪曲が含まれる)、 $U_{ij_1 j_2}$ は 2 次の収差係数 (2 次収差には軸上コマ収差や像面の傾き、台形歪み等の回転非対称な歪曲が含まれる)、 $V_{ij_1 j_2 j_3}$ は 3 次の収差係数 (3 次収差には共軸回転対称系で存在するザイデルの 5 収差以外にも回転非対称な収差も存在する) を表す。

この表現でもわかるように、非共軸光学系の収差は共軸回転対称系とは異なり、1 次と偶数次の収差をも含む複雑なものとなる。こうした収差解析の詳細については、誌面の関係で割愛するが、設計に必要な知見でもあるので必要に応じ文献 4, 5 を参照してほしい。

3. 非共軸光学設計の設計例

3.1 観察光学系の例

非共軸光学系の導入検討は、光学系を顔のまわりにメガネやゴーグルのように、コンパクトに配置することが望まれる HMD (head mounted display) の光学系等の観察光学系から始まった。以下にその代表的な設計事例を示す。

図 3 は、LCD (liquid crystal display) からの光束を眼球に導く非共軸接眼光学系の設計例⁶⁾ である。この光学系では、光路をミラーを使って顔のまわりを通るように折り曲げるが、コンパクト化のためにその面にパワーをもたせると、基準軸光線のまわりについてみてみれば回転非対称な収差が発生する。この回転非対称な収差をキャンセルする収差をリレーレンズ系の偏心で発生させ、良好な性能を保つようにした光学系である。なお、この光学系ではじめて、前記 off-axial 光学系の近軸理論を使った近軸量の計算がなされ、理論と実際の設計との対応が確認された。

図 4 は、自由曲面プリズムからなるメガネ型 HMD 用接眼光学系^{7,8)} の光路図である。この光学系において、P で表される LCD の表示素子から出た光束が、自由曲面プリズムに入射し、全反射面で反射され今度は前記全反射面 S2 を透過して瞳位置 S を通って眼球に導かれ、網膜上に拡大像が形成される。この全反射面を利用した基準軸光線 L0 の光路の折りたたみと、自由曲面を使った収差補正により、コンパクトな接眼光学系が実現されている設計例である。

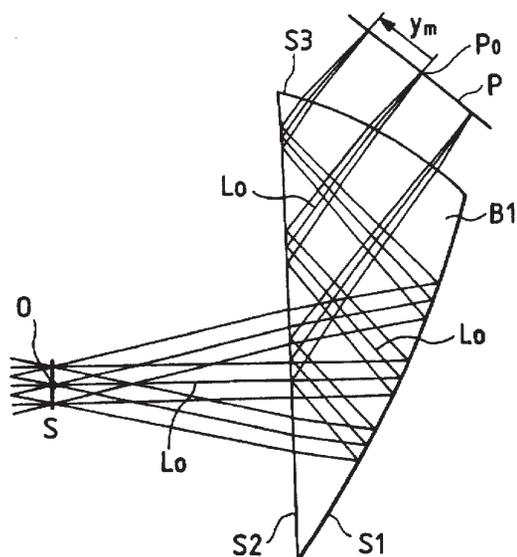


図4 HMD用非共軸光学系の設計例2.

以上観察光学系の設計例をいくつか示したが、こうした光学系は、光路を逆向きに考えると、LCD面に結像する前絞りの撮像光学系と考えることもできる。そういった意味では、非共軸光学系の撮像光学系を考える際には、非常に参考になる設計例でもある。

3.2 投射光学系の例

観察光学系のほかに、結像光学系の観点から注目すべき非共軸光学系の応用例はプロジェクター用の投射光学系である。フロントプロジェクターの光学系では、光学系を含む装置が観察者の視界を遮ることがないように、画像が投影されるスクリーンを光学系に対して斜めの方向（斜め上方または下方、あるいは側方）に配置するのが一般的である。そのため、はじめは共軸光学系の軸外を使うことが多かったが、こうした配置の場合、光学系が大きくなってしまふ欠点があった。また、背面投影型プロジェクターも、反射面を使って光学系を折りたたむ構成が一般的である。そのため、最近ではコンパクトな光学系をめざすため、いずれのタイプも自由曲面反射面を使い、投影光学系を非軸対称光学系を使って設計することが多くなってきている。最近発売された日立製作所の超短投写距離業務用フロントプロジェクター「CP-A100J」では、本体からスクリーンまでの距離が63cm（本体含む）という近距離から80型の画面表示を実現している。この光学系では反射型の自由曲面ミラーのほかに、2枚の自由曲面屈折レンズ⁹⁾が採用され、このレンズも使って回転非対称型の収差を補正しているところに大きな特徴がある。

なお、投影光学系に関し最近の技術で特筆すべき自由曲面光学系の例として、オリンパスによって提案されている

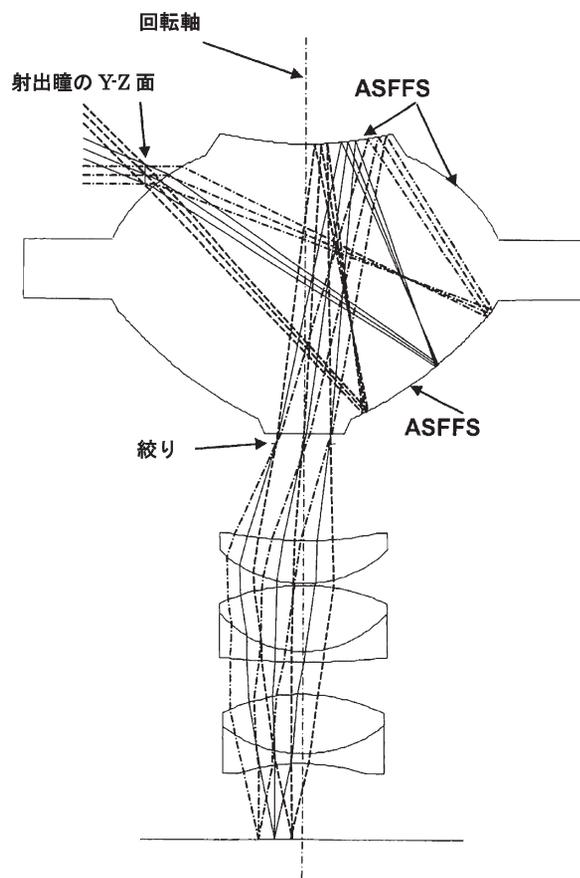


図5 全方位光学系の光路図.



図6 試作された全方位プロジェクター.

全方位光学系¹⁰⁾を挙げることができるであろう。図5に光路図を、図6に試作された全方位投影光学系の写真を示す。この光学系では図中にASFFS (axially symmetric free-form surface) と示されているトーリック型の回転対称自由曲面の反射面を使って、投影画角 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}\times 360^{\circ}$ の全方位への投影ができることが特徴である。これらの面の曲率中心は一般に回転対称軸上にない形で定義されるのが常のため、回転対称とはいっても非共軸光学系である。ま

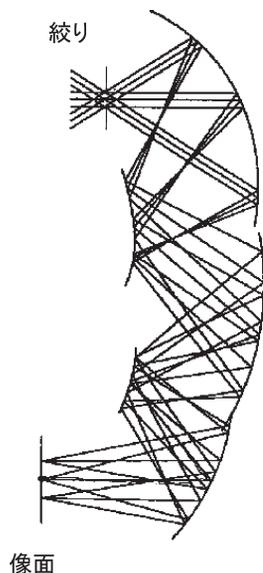


図7 非共軸結像光学系の設計例。

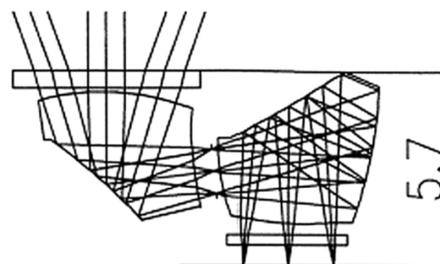


図9 プリズム2個で構成される非共軸撮像光学系の光路図。



図10 試作された撮像モジュールの概観。

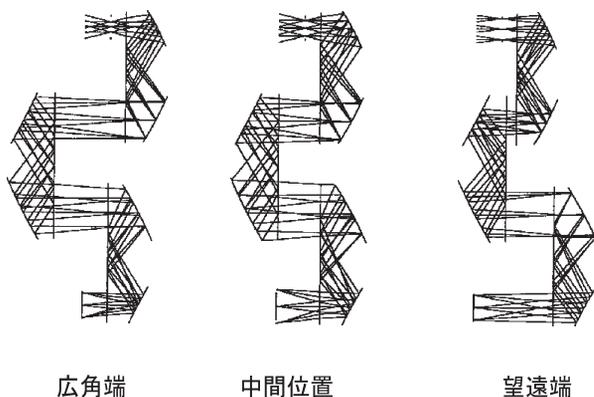


図8 off-axial系の考え方に則った撮像系ズームレンズの設計例。

た、この光学系の面の定義は先に挙げた偏心光学系としての表現ではなく、基準軸光線の光路が固定される off-axial 系の考え方に近い表現になっていることも特筆すべきことであろう。

なお、この光学系も、光路を逆向きに考えると、LCD面に結像する前絞りの全方位撮像光学系と考えることもできる。そういった意味では、非共軸光学系の撮像光学系を考える際には、やはり参考になる設計例でもある。

4. 非共軸光学設計の撮像光学系への展開

自由曲面を使った撮像系の設計例としては、古くは図7に示されるような光学系¹⁾を挙げることができるであろう。この光学系では反射面5枚を使い、中間結像をもつ前絞りの撮像光学系となっている。なお、この光学系は off-axial 光学系の考え方に則って設計されているために、入

射の基準軸光線と射出の基準軸光線が反平行になるように設計できていることにも特徴がある。

次に、off-axial 光学系を使ったズームレンズの設計例を図8に示す^{4,5)}。このレンズにおいては、上記の単レンズの特徴でも述べたように、ズームレンズを構成する各群の基準軸が入口部分と出口部分で平行になるように基準軸配置が固定された設計となっているため、通常の共軸光学系と同様に各群の間隔を変えることでズームレンズが実現できる。このようなズーム系の設計に対しては、“偏心”の考え方では面の最適化に対して基準軸の固定が難しいため対応がとりにくいが、off-axial 光学系の考え方はレンズのAデータを固定さえしておけばよい。そういった意味で off-axial 光学系の考え方は、こうしたズーム光学系の設計には必須の重要な考え方であろう。

上記2例は設計例のみの公開であったが、以下には実際の試作が公表された例¹¹⁾を提示する。この光学系はオリンパスが2004年に開発したもので、1回反射の第1プリズムと2回反射の第2プリズムからなる携帯端末用の小型カメラモジュールの光学系である。光路図を図9に、実際に製作されたモジュールの写真を図10に示す。焦点距離3.6mm(銀塩35mm相当、F no. 2.8の仕様であるが、空間周波数130本/mmで、50%以上のMTF(modulation transfer function)が得られている。非共軸の小型撮像系としては、今後の基準となる光学系であろう。

5. 非共軸撮像光学系への今後

以上、これまでの自由曲面を使った光学系について、非共軸光学系を撮像系への展開という観点で関連しそうな設計例を中心に述べてきた。こうした非共軸光学系は従来の共軸光学系に対して、新たな光学系の可能性を秘めているのは確かである。その可能性を広げているおもな特徴点としては

1. 自ら光路をけらない反射光学系が得られる
 2. 上記に絡み、色収差補正がやりやすい
 3. 光学系の配置の自由度が高い
 4. 複数の面を一体化したユニットが可能
 5. 面の表現パラメーターの自由度が多い
- などが挙げられよう。

なおこのうち、5. に関しては、表現パラメーターの自由度を今までの設計（基準軸が平面内に収まる設計）の倍に高め、基準軸を三次元的に配置する光学系¹²⁾も最近提案されてきている。こうした新しい動向にも注目しておく必要がある。

一方、非共軸光学系が普及するに当たっての障害は、上記

1. の反射面が使えるメリットとは裏腹に、
 - ・面精度への要求が高くなる
 - ・対称性の低い面を使うことになるので、面加工、面評価に高い技術力が必要
 - ・上記に伴うコストアップ

といった課題もみえてくる。こうした課題は、技術力を高めることで解決していかなければならない。

自由曲面の加工に関しては、試作は切削、研削・研磨工程でよいが、量産を考える場合、自由曲面金型を使った射出成形がキー技術である。そのために、CAM (computer aided manufacturing) などを使い高機能で精度のよい金型を効率よく作り出すシステムの構築¹³⁾が進められている。一方、作られた自由曲面の面精度の評価技術も重要である。現在は、原子間力プローブを用いた測定でナノメートルのオーダーの精度での測定ができる装置¹⁴⁾が開発されている。今後とも、こうした技術が改良され、より安価に短時間で測定できる技術の開発が望まれる。

また、上記5. のメリットについても、光学系の対称性が低いために、従来は対称性のよさで出ることがなかった軸上非点収差等の1次収差や、軸上コマ収差や像面の傾きといった2次収差など補正すべき収差も増えるので、場合によっては必ずしも設計自由度が上がったともいえない場

合も多いと思われる。また、そうしたこともあり、配置自由度はあっても光学系としての小型化は必ずしも進まない可能性もある。現実にデジタルカメラの光学系では、共軸回転対称系でも小型化が進んでいるので、非共軸光学系が撮像系として生き残るためには差別化が必要であろう。

非共軸光学系の撮像光学系への展開に関連し、こうした光学系が出てくるに至った背景、理論的基礎、特徴的な設計・試作例を紹介した。それとともに、こうした光学系の特徴と課題についても考察を加えた。非共軸光学系は付加価値を高める技術として有望であるが、その価値を高めるためには加工、評価の技術力アップのほかに、共軸光学系との差別化を進める必要があると考えられる。

文 献

- 1) 荒木敬介：“Off-Axial 光学系の近軸解析”，光学，**29** (2000) 156-163.
- 2) K. Araki: “Analysis of off-axial optical systems (1),” Opt. Rev., **7** (2000) 221-229.
- 3) K. Araki: “Analysis of off-axial optical systems (2),” Opt. Rev., **7** (2000) 326-336.
- 4) 荒木敬介：“Off-Axial 光学系の近軸・収差論的解析”，学位論文（東京大学，2002）.
- 5) 荒木敬介：“Off-Axial 光学系の近軸・収差論的解析”，第30回光学シンポジウム (2005) pp. 19-22.
- 6) 森島英樹，秋山健志，難波則広，田中常文：“非対称非球面を用いた Off-Axial HMD 光学系の設計”，第20回光学シンポジウム (1995) pp. 53-54.
- 7) 山崎章市，奥山 敦，石野俊樹，藤原昭弘，為国靖宏：“視線入力を搭載した超小型 HMD の開発”，3次元画像コンファレンス '95 (1995) pp. 70-75.
- 8) A. Okuyama and S. Yamazaki: U.S. Patent No. 5706136 (1998).
- 9) 久田隆紀，吉川博樹，大石 哲，谷津雅彦，平田浩二：特開2006-292901.
- 10) 研野孝吉：“全方位光学系”，第32回光学シンポジウム (2007) pp. 23-24.
- 11) T. Nagata, T. Nozawa, A. Sakurai, T. Ishii and T. Nagaoaka: “Optical design, fabrication and evaluation of an ultra compact photographic objective for cellular telephones using free shaped prisms,” *Proceedings of ICO '04*, Tokyo (2004) pp. 9-10.
- 12) 中野貴敬，松本佳宏，玉川恭久：“3次元的な偏心構造による反射光学系の設計”，第32回光学シンポジウム (2007) pp. 17-18.
- 13) 鈴木 裕：“金型の自由曲面加工”，光技術コンタクト，**45** (2007) 645-650.
- 14) 吉住恵一：“超高精度三次元測定機 UA 3 P による自由曲面の測定”，光技術コンタクト，**45** (2007) 651-657.

(2008年2月12日受理)