

複数の機能要素からなる光学機器の中に、他の機能要素の占める空間を回避して結像光学系を組み込む場合、図1に示すように配置可能な位置にいくつかの平面反射面を設け、その光路中に結像レンズを配置する構成が採られることがある。空間の制約があると、結像レンズの光軸を物体面に垂直でなく配置せざるを得ない。このような光学系の設計においては、反射面や像面の設計情報を得る手続きが煩雑になってしまうが、本稿では、物体面に設定した単位ベクトルを反射面ごとに逐次追跡することによって、必要な設計情報を容易にかつ的確に得ることができる手法を紹介する。

1. 前 提

結像レンズの光軸上の結像倍率を β とする。そして、結像光レンズの光軸と反射面との交点座標はあらかじめ配置可能な位置に定める。光軸と物体面との交点を原点とし物体面をX、Y面とする三次元直角座標(X, Y, Z)をとる。ベクトルは常に単位ベクトルとして取り扱う。本稿の演算子は、ベクトルの外

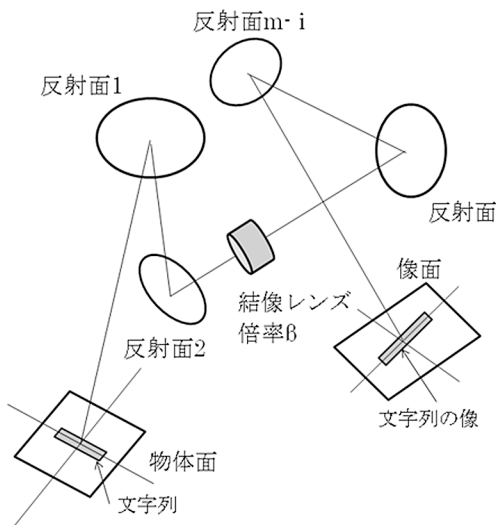


図1 多数の平面反射面を含む結像光学系.

積を \times 、ベクトルの内積を $*$ 、スカラー積を \cdot と表記し、特にベクトルの規格化を $Nor()$ と表記する。

2. 物体面と像面の記述

物体面に設定した2つのベクトルを像面まで射影追跡すると、像面はその2つのベクトルで記述することができる。図2に示す通り、原点を R_0 、反射点を $R_1 \sim R_{m-1}$ 、像点を R_m とする。 R_0 から順次 R_{i-1} から R_i に向かう方向ベクトルを r_i とする。そして、物体面を表す2つのベクトルとして、 H_0 をX軸上の単位ベクトル、 V_0 をY軸上の単位ベクトルにとり、 H_0 と V_0 を R_1 から R_{m-1} まで射影追跡する。 R_{m-1} での射影ベクトルを H_{m-1} 、 V_{m-1} とすると、 H_{m-1} と r_m 、 V_{m-1} と r_m とで記述される面は、それぞれ H_0 と r_1 、 V_0 と r_1 で記述される平面と連続しており、像面上の射影ベクトル H_m 、 V_m を含む。また、 H_0 と H_m 、 V_0 と V_m とはScheimpflug条件を満足する。

3. 追 跡

H_0 と r_1 とで成す角を α_0 とし、像点での射影ベクトル H_m が r_m とで成す角を ψ_m とすると、Scheimpflug条件より、

$$\psi_m = \text{atan}(-1/\beta) \cdot \tan(\alpha_0) \quad (1)$$

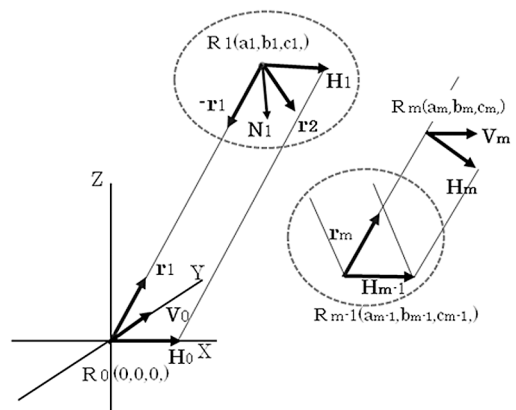


図2 平面反射面上の射影ベクトル.

表1 物点, 反射点, 像点の位置座標.

	X	Y	Z	光路長
物点	0	0	0	
反射点 1	80	20	280	291.890
反射点 2	97.8	40	224	62.071
像点	238	40	305	161.917
合計				515.878

第1反射点の法線ベクトル N_1 は,

$$N_1 = \text{Nor}(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \quad (2)$$

H_1 は H_0 と r_1 とで成す面内にあり, $H_1 \cdot N_1 = 0$ を満たすから,

$$H_1 = \text{Nor}(H_0 - (H_0 \cdot N_1) / (r_1 \cdot N_1) \cdot r_1) \quad (3)$$

この追跡を同様にして R_{m-1} 面まで行う.

像面上の射影ベクトル H_m は, H_{m-1} と r_m とで成す角を α_{m-1} として

$$H_m = \text{Nor}(H_{m-1} - \sin(\alpha_{m-1} + \psi_m) / \sin(\psi_m) \cdot r_m) \quad (4)$$

V_0 から V_m への追跡も同様に追跡して, V_{m-1} と r_m とで成す角を γ_{m-1} , V_m と r_m とで成す角を ω_m として,

$$V_m = \text{Nor}(V_{m-1} - \sin(\gamma_{m-1} + \omega_m) / \sin(\omega_m) \cdot r_m) \quad (5)$$

像面に関する設計情報として, 像面の法線ベクトルは,

$$N_m = \text{Nor}(H_m \times V_m) \quad (6)$$

像面上にあり Z 成分が 0 であるベクトル L_m は,

$$L_m = \text{Nor}(H_m - (H_m \cdot V_m) / (V_m \cdot V_m) \cdot V_m) \quad (7)$$

で計算できる.

4. 計算例

像面に画像を投影する撮影レンズを避けて, 図1にあるように物体面にある文字列を像面に結像する光学系として, 簡易な反射面 2 面 1 回結像の例を示す.

表2 追跡結果.

	X	Y	Z
H_0 ベクトルの追跡			
H_0	1	0	0
r_1	0.274075	0.068519	0.959264
α_0	74.093	deg	
ψ_3	60.318	deg	
H_3	-0.000095	0.143143	-0.989702
V_0 ベクトルの追跡			
V_0	0	1	0
γ_0	86.071	deg	
ω_m	82.179	deg	
V_3	-0.209040	0.973776	0.089794
N_3	0.977851	0.207160	0.029868
L_3	-0.207253	0.978287	0.000000

4.1 追跡

物点, 反射点, 像点を表1の通り与え, 結像倍率を -2 倍とする. 追跡結果を表2に示す.

4.2 追跡結果から得られる設計情報

物体面 X 軸上に文字列があると, N_3 を法線とする像面上 H_3 の上に文字列が並ぶ. 文字列像の X 方向成分は 0 であるが, $\text{atan}(H_{3Y}/H_{3Z}) = -8.230^\circ$ 傾いている. 物体面上文字列線に対して垂直であった文字の縦線は像面では文字列に線に対して $\text{acos}(H_3 \cdot V_3) = 87.103^\circ$ の角度をなす. 像面を XY 面でスライスしたときの傾きは $\text{atan}(L_{3X}/L_{3Y}) = -11.961^\circ$ である. このように, 本稿の手法によれば像面の設計情報が簡単に得られる. また, 各 i 反射面に必要な大きさと配置は, N_i, H_i, V_i をもとに計算できる. そして, これらはベクトル表記であるので, 空間配置の把握が容易である.

(キヤノン(株) 横田秀夫)

文 献

- 1) 早水良定: 光機器の光学 I (日本オプトメカトロニクス協会, 1988).