



後群移動フォーカシングズームレンズの初期設計法

鄭 晉 浩*・崔 玉 植**・薛 貞 植***

* 現代電子(株)産業電子研究所研究6室 〒467-860 大韓民国京畿道利川郡牙美里

** 嶺南大学校物理学科 〒712-749 大韓民国慶尚北道慶山市大洞

*** 慶南大学校物理学科 〒630-260 大韓民国慶尚南道馬山市月影洞

(1993年5月31日受付, 1993年8月6日受理)

Paraxial Design Methods for the Rear Focusing Zoom Lens System

Jin-Ho JUNG,* Ok-Shik CHOE** and Chung-Sik SUL***

* Industrial Electronics R&D Center, Hyundai Electronics Industries Co., Ltd.,
Ichon-kun, Kyoungki-do, 467-860 Korea

** Department of Physics, Youngnam University, Gyoungsan, 712-749 Korea

*** Department of Physics, Kyoungnam University, Masan, 630-260 Korea

(Received May 31, 1993; Accepted August 6, 1993)

Two paraxial design methods were developed for the rear focusing zoom lens system. A solution under the condition of keeping the same moving distance of the rear lens group for all zooming points was found with respect to a single object at a finite distance for the first method, and two different objects for the second method. In the first method two different approaches were attempted to design the rear lens group: for a fixed focus and for a zoom. The results showed that the maximum variation at the image plane for an object distance of 1.0 m was 0.0682 mm and 0.0705 mm according to the fixed focus and zoom approaches, respectively. Smaller variations in both the lens system thickness and the back focal length were obtained in the zoom approach. According to a similar design reported by Tokumaru the variation at the image plane under the same conditions as the present approaches was 0.171 mm at 1.5 m object distance. The second method proposed here requires further studies for commercial applications due to its complexity. However the result of basic analysis showed that the second method could provide it better system performance than the first one.

1. はじめに

ズームレンズのフォーカシング方式は5種に分類できるが、その中で①1群移動方式はもっとも一般的な方式で、ズーム部前にある第1群の繰出しにより近接物体に対するフォーカシングを行う方式で、たいていのズームレンズ系はこのような方式を採用している。しかし、第1群の繰出し量が大きいつ、収差は急激に悪くなるし、開口効率が悪くなる¹⁻³⁾。このような欠点を補完するために開発した方式が、②1群ズーム方式^{4,5)}、1群を二つ以上のレンズ群で細分して、その中で一つ以上のレン

ズ群が相対的に動きながらフォーカシングを行う方式である。一方、VTRカメラやSLRカメラなどのオートフォーカシング装置はフォーカシングのために1群を移動させると、カメラ本体の内部の駆動モータから1群までの駆動軸が長くなり、またたいてい1群の重さは他の群の重さより4~5倍以上重くて、場合によっては、1群の移動量が大きすぎになり制御上の難点および周辺光量の不足が発生するため、③内部群の移動方式^{6,7)}、④後群移動方式を考えるようになった^{3,8)}。しかし、このような方式で前に述べた欠点は除くことができるが、一度フォーカシングをした後ズーミングをすれば、後面

の位置は変わってくるから再度フォーカシングをしなければならぬという欠点があり、その変化量はワイド側とテレ側の間に大きな差が生じてきた。このような欠点は機械的⁹⁾、電子的、光学的な面から解決しようと努力されているが、最近、電子技術の急激な発展によって電子的な寄与が大きい。しかし、光学的な解決法に対する努力もなされていて、1983年得丸⁹⁾によって研究されたのが、⑤後群ズーム方式である。この方式は1985年ミノルタで市販したα-7000カメラ用28~135mmズームレンズで¹⁰⁾、フォーカシングのため移動される後群をズームにして、1.5mの物体点まで撮影することができるようになった。さて、後群をズームに構成して移動させてもズーミングによる後群の移動量を完全に合わせる解は存在しないから、最大限近似値を求めて最も近接された物体点まで撮影するのがよい。本研究ではより合理的な解釈で後群を固定焦点レンズにした場合とズームにした場合に対する新しい解を求めたが、この解の正確度を比較するために得丸と同一なレンズ系を初期設計し、物体距離1m以下まで像面の変化がない撮影ができることを確かめた。

2. 後群移動方式の解

レンズ系は二つのレンズ群で形成され(Fig. 1)、第一群はレンズ系の焦点距離を変化させるズーム部で、第二群(後群)は焦点調節のため移動されるフォーカシング部である。物体距離と後群移動量との関係は Gaussian bracket (以下 G.B.) を使用して、次のように表される¹¹⁾。

$$[-FWD_H, k_1, -(z_1 - x), k_2, -(BFL_H + x)] = 0 \tag{1}$$

この式を x に対して整理すれば、

$$A_1 x^2 + A_2 x + A_3 = 0 \tag{2}$$

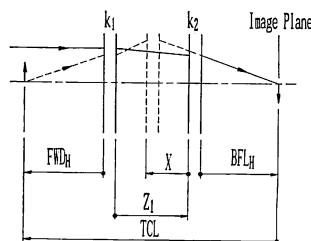


Fig. 1 Schematic design of a rear focusing system.

Table 1a A design data obtained by Method 1 for given parameters of $FWD_H=1.5m$ and $x=-1.0mm$ for a fixed focal length of $f_2=25.18mm$.

| F | f_1 | z_1 | f_2 | BFL_H | $z_1 + BFL_H$ |
|------------|---------|--------|--------|---------|---------------|
| 28 | -22.505 | 22.913 | 25.180 | 56.508 | 79.421 |
| 60 | -32.680 | 6.215 | 25.180 | 71.411 | 77.626 |
| 135 | -37.640 | -5.493 | 25.180 | 115.491 | 110.051 |
| Difference | 15.135 | 28.352 | 0.000 | -58.983 | -30.631 |

unit : mm

Table 1b The maximum difference of shifting distances of the focusing lens group described in Table 1a.

| FWD_H | F | | | Maximum difference |
|-----------|---------|---------|---------|--------------------|
| | 28 | 60 | 135 | |
| 10.0 m | -0.1440 | -0.1515 | -0.1531 | 0.0091 |
| 5.0 m | -0.2898 | -0.3025 | -0.3050 | 0.0152 |
| 3.0 m | -0.4875 | -0.5030 | -0.5060 | 0.0185 |
| 2.0 m | -0.7402 | -0.7522 | -0.7544 | 0.0142 |
| 1.8 m | -0.8259 | -0.8349 | -0.8366 | 0.0107 |
| 1.5 m | -1.0000 | -1.0000 | -1.0000 | 0.0000 |
| 1.3 m | -1.1639 | -1.1517 | -1.1497 | 0.0142 |
| 1.1 m | -1.3930 | -1.3578 | -1.3521 | 0.0409 |
| 1.0 m | -1.5458 | -1.4912 | -1.4826 | 0.0632 |
| unit : mm | SUM | | | 0.1860 |

$$\begin{cases} A_1 = [-FWD_H, k_1]k_2 \\ A_2 = [-FWD_H, k_1, -z_1, k_2] \\ \quad - [-FWD_H, k_1][k_2, -BFL_H] \\ A_3 = -[-FWD_H, k_1, -z_1, k_2, -BFL_H] \end{cases}$$

となる。

$$[-FWD_H, k_1] = 1 - k_1 FWD_H = (f_1 - FWD_H)/f_1 \quad (3)$$

となり、

$$\begin{aligned} & [-FWD_H, k_1, -z_1, k_2, -BFL_H][k_1, -z_1, k_2] \\ & - [-FWD_H, k_1, -z_1, k_2][k_1, -z_1, k_2, -BFL_H] \\ & = -1 \end{aligned} \quad (4)$$

になる G. B. の原理と、

$$[k_1, -z_1, k_2] = K = 1/F \quad (5)$$

$$[k_1, -z_1, k_2, -BFL_H] = 0 \quad (6)$$

という焦点距離とバックフォーカスに関する基本式から

$$[-FWD_H, k_1, -z_1, k_2, -BFL_H] = -F \quad (7)$$

となる。また(7)式は

$$\begin{aligned} & -FWD_H[k_1, -z_1, k_2, -BFL_H] \\ & + [-z_1, k_2, -BFL_H] = -F \end{aligned} \quad (7')$$

となるから(6)式を代入すれば

$$[-z_1, k_2, -BFL_H] = -F \quad (8)$$

となり、また(6)式は

$$k_1[-z_1, k_2, -BFL_H] + [k_2, -BFL_H] = 0 \quad (6')$$

となるから、

$$[k_2, -BFL_H] = Fk_1 = F/f_1 \quad (9)$$

となる。また(5)式は

$$k_1[-z_1, k_2] + k_2 = 1/F \quad (5')$$

だから

$$[-z_1, k_2] = 1/Fk_1 - k_2/k_1 = f_1/F - f_1/f_2 \quad (10)$$

となるので

$$\begin{aligned} & [-FWD_H, k_1, -z_1, k_2] \\ & = -FWD_H[k_1, -z_1, k_2] + [-z_1, k_2] \\ & = -FWD_H/F + f_1/F - f_1/f_2 \end{aligned} \quad (11)$$

である。結論的に(3)式から(11)式までの結果を(2)式

に代入すれば

$$A_1x^2 + A_2x + A_3 = 0 \quad (12)$$

$$\begin{cases} A_1 = (f_1 - FWD_H)/(f_1f_2) \\ A_2 = (f_1/F - F/f_1)(f_1 - FWD_H)/f_1 - f_1/f_2 \\ \quad = (f_1/F - F/f_1 - f_1/f_2)(f_1 - FWD_H)/f_1 \\ \quad \quad - FWD_H/f_2 \\ A_3 = F \end{cases}$$

が求められる。

Table 2a A design data obtained by Method 2 for given parameter groups of ($FWD_{H1} = 1.5\text{m}$, $x_1 = -1.0\text{mm}$) and ($FWD_{H2} = 1.0\text{m}$, $x_2 = -1.5\text{mm}$).

| F | f_1 | z_1 | f_2 | BFL_H | $z_1 + BFL_H$ |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| 28 | -22.693 | 173.607 | 108.425 | 242.206 | 415.813 |
| 60 | -32.563 | -13.572 | 12.301 | 34.993 | 21.422 |
| 135 | -37.349 | -35.317 | 1.592 | 7.346 | -27.971 |
| Difference | 14.656 | 208.924 | 106.833 | 234.860 | 443.784 |

unit : mm

Table 2b The maximum difference of shifting distances of the focusing lens group described in Table 2a.

| FWD_H | F | | | Maximum difference |
|-----------|---------|---------|---------|--------------------|
| | 28 | 60 | 135 | |
| 10.0 m | -0.1501 | -0.1502 | -0.1508 | 0.0007 |
| 5.0 m | -0.3001 | -0.3003 | -0.3013 | 0.0012 |
| 3.0 m | -0.5001 | -0.5003 | -0.5013 | 0.0012 |
| 2.0 m | -0.7500 | -0.7502 | -0.7508 | 0.0008 |
| 1.8 m | -0.8334 | -0.8335 | -0.8339 | 0.0005 |
| 1.5 m | -1.0000 | -1.0000 | -1.0000 | 0.0000 |
| 1.3 m | -1.1538 | -1.1538 | -1.1535 | 0.0003 |
| 1.1 m | -1.3636 | -1.3635 | -1.3632 | 0.0004 |
| 1.0 m | -1.5000 | -1.5000 | -1.5000 | 0.0000 |
| unit : mm | SUM | | | 0.0051 |

3. 一番目のフォーカシング方式

(12) 式を f_1 に対して整理すれば,

$$B_1 f_1^3 + B_2 f_1^2 + B_3 f_1 + B_4 = 0 \quad (13)$$

$$\begin{cases} B_1 = (1/F - 1/f_2)x \\ B_2 = x^2/f_2 - x FWD_H / F + F \\ B_3 = -x^2 FWD_H / f_2 - xF \\ B_4 = x FWD_H F \end{cases}$$

となる。ここで、求めた(13)式には変数が五つ、すなわち FWD_H, x, f_1, f_2, F があって、このうち三つの変数 FWD_H, x, f_2 の値は外部から決める。Fig. 2 に示すように、ある一つの FWD_H について移動量 x の値はいつも一定になるような方法でレンズ系の焦点距離 F を変化 (ズーム) させ、 f_1 の変化量を計算した。得丸と類似なデータを代入して値を求めた結果を Table 1a に示す。

Table 1b はそれぞれの焦点距離から物体距離によるフォーカシングレンズの移動量とその差を表しているが、後群をうしろに (-符号) 1mm 移動させれば、物体距離 1.5 m に対して焦点が一致して物体距離 1 m までは移動量の最大差が 0.0632 mm にしかならないこと

がわかった。

4. 二番目のフォーカシング方式

一番目の方式は ∞ 物体点を除いたある一つの点から物体距離と後群移動量を一致させた場合であるが、ここでは二つの点に対して一致されることを考えてみよう。

Fig. 3 からわかるように、二つの物体距離 FWD_{H1} と FWD_{H2} に対する各々の移動量 x_1, x_2 を (13) 式に代入すれば、まず F, x_1, FWD_{H1} を代入した式と F, x_2, FWD_{H2} を代入した二つの式から f_2 を消去して f_1 に対して整理させて、

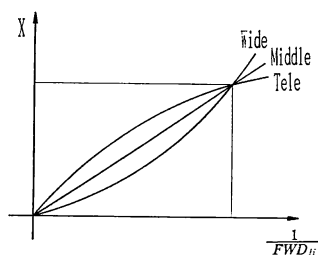


Fig. 2 A concept showing a constant shifting distance of the rear focusing lens group for a single object (Method 1).

Table 3a A design data obtained by Method 1 for given parameters of $FWD_H=1.5\text{m}$ and $x=-1.0\text{mm}$ for a fixed foral length of $f_2=36.17\text{mm}$.

| F | f_1 | z_1 | f_2 | BFL_H | $z_1 + BFL_H$ |
|------------|---------|--------|--------|---------|---------------|
| 28 | -22.580 | 42.759 | 36.170 | 81.023 | 123.782 |
| 60 | -32.713 | 23.718 | 36.170 | 102.511 | 125.689 |
| 135 | -37.645 | 8.611 | 36.170 | 165.880 | 174.491 |
| Difference | 15.065 | 34.148 | 0.000 | -84.857 | -50.709 |

unit : mm

Table 3b The maximum difference of shifting distances of the focusing lens group described in Table 3a.

| FWD_H | F | | | Maximum difference |
|-----------|---------|---------|---------|--------------------|
| | 28 | 60 | 135 | |
| 10.0 m | -0.1464 | -0.1519 | -0.1531 | 0.0067 |
| 5.0 m | -0.2939 | -0.3032 | -0.3051 | 0.0112 |
| 3.0 m | -0.4925 | -0.5038 | -0.5060 | 0.0135 |
| 2.0 m | -0.7442 | -0.7528 | -0.7545 | 0.0103 |
| 1.8 m | -0.8290 | -0.8354 | -0.8367 | 0.0077 |
| 1.5 m | -1.0000 | -0.0000 | -1.0000 | 0.0000 |
| 1.3 m | -1.1596 | -1.1512 | -1.1496 | 0.0100 |
| 1.1 m | -1.3803 | -1.3563 | -1.3519 | 0.0284 |
| 1.0 m | -1.5257 | -1.4890 | -1.4823 | 0.0434 |
| unit : mm | SUM | | | 0.1312 |

$$C_1 f_1^4 + C_2 f_1^3 + C_3 f_1^2 + C_4 f_1 + C_5 = 0 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= F(x_1 - x_2) + (FWD_{H1} - FWD_{H2} + x_2 - x_1)(x_1 x_2 / F) \\ C_2 &= F(x_2^2 - x_1^2) + (x_1 FWD_{H2} - x_2 FWD_{H1} + x_1 FWD_{H1} + x_2 FWD_{H2})(x_1 x_2 / F) \\ C_3 &= (FWD_{H2} - FWD_{H1} + x_1 - x_2)x_1 x_2 F + (x_1^2 FWD_{H1} - x_2^2 FWD_{H2})F - x_1 x_2 FWD_{H1} FWD_{H2} (x_1 - x_2) / F \\ C_4 &= F x_1 x_2 (x_2 FWD_{H1} - x_1 FWD_{H2} + x_2 FWD_{H2} - x_1 FWD_{H1}) \\ C_5 &= (x_1 - x_2) F x_1 x_2 FWD_{H1} FWD_{H2} \end{aligned}$$

となる。(14)式の4次式はBairstows-method¹²⁾を利用してコンピュータで処理し、求められた四つの解の中で物理的な意味と周辺条件を考えて一つの解を選ぶ。

Table 2a, 2b は二つの点を一致させる方法によって求められた初期設計値と後群レンズの移動量を示しているが、移動量の差は非常に少ないことがわかる。しかし、 f_2 および z_1 , BFL_H , 全長 (レンズ系は具体的には形成されていないのでレンズの主点間隔 z_1 と BFL_H の計を全長を表す基準として定める) の変化が非常に大き

いため光学系で成立させるには問題点が多い。この方式を実用化するためにはもっと深い研究が必要である。

5. 一番目の方式による後群のズームレンズ化

Table 1a, 3a, 4a は $x = -1$ mm の場合後群の焦点距離を得丸と類似なデータで変化させながら、その解を求めた初期設計値で、Table 1b, 3b, 4b はそれによる後群の移動量との差である。

後群の焦点距離が大きくなると、 z_1 と BFL_H の変化量も大きくなることから、レンズ系の全長は長くなるこ

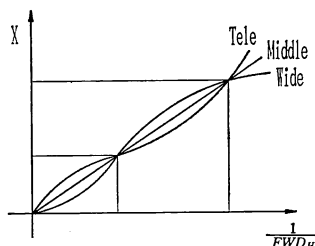


Fig. 3 A concept showing two constant shifting distances of the rear focusing lens group for two different objects (Method 2).

Table 4a A design data obtained by Method 1 for given parameters of $FWD_H = 1.5$ m and $x = -1.0$ mm for a fixed focal length of $f_2 = 42.32$ mm.

| F | f_1 | z_1 | f_2 | BFL_H | $z_1 + BFL_H$ |
|------------|---------|--------|--------|---------|---------------|
| 28 | -22.605 | 53.881 | 42.320 | 94.741 | 148.622 |
| 60 | -32.724 | 32.677 | 42.320 | 119.915 | 152.592 |
| 135 | -37.647 | 16.475 | 42.320 | 194.080 | 210.556 |
| Difference | 15.042 | 37.406 | 0.000 | -99.339 | -61.934 |

unit : mm

Table 4b The maximum difference of shifting distances of the focusing lens group described in Table 4a.

| FWD_H | F | | | Maximum difference |
|-----------|---------|---------|---------|--------------------|
| | 28 | 60 | 135 | |
| 10.0 m | -0.1472 | -0.1521 | -0.1531 | 0.0059 |
| 5.0 m | -0.2953 | -0.3034 | -0.3051 | 0.0098 |
| 3.0 m | -0.4942 | -0.5040 | -0.5061 | 0.0119 |
| 2.0 m | -0.7456 | -0.7530 | -0.7545 | 0.0089 |
| 1.8 m | -0.8300 | -0.8335 | -0.8367 | 0.0067 |
| 1.5 m | -1.0000 | -1.0000 | -1.0000 | 0.0000 |
| 1.3 m | -1.1584 | -1.1510 | -1.1496 | 0.0088 |
| 1.1 m | -1.3765 | -1.3559 | -1.3519 | 0.0246 |
| 1.0 m | -1.5197 | -1.4883 | -1.4822 | 0.0375 |
| unit : mm | SUM | | | 0.1141 |

とがわかる。しかし後群移動量の差は小さくなるので、像面が安定化することがわかった。したがって、28 mm では後群の焦点距離が大きく、135 mm では後群の焦点距離が小さくなった光学系になると、ズームの中 BFL_H および全長の変化が最小に維持できることがわかる。また $x = -1.5$ mm の場合の初期設計値と後群移動量の差を計算した結果、 $x = -1$ mm と比べて BFL_H および全長の変化量は著しく小さくなるが、後群移動量の

差の計は比較的大きく表れることから像面が安定しないことがわかった (Table 5)。さらに、Table 1a, 3a, 4a の設計値を一つずつ抜き取り Table 6a のズームシステムを構成して BFL_H および全長の変化を安定させ、Table 6b で見える後群移動量の差を Table 1b, 3b, 4b と比べてみると、像面は非常に安定しているのがわかる。

Table 5 The comparison of the results of $x = -1.0$ mm and $x = -1.5$ mm.

| Division | | f | | |
|------------|--|---------|---------|---------|
| | | 25.18 | 36.17 | 42.32 |
| $x = -1.0$ | Difference of z_1 | 28.352 | 34.148 | 37.406 |
| | Difference of BFL_H | -58.983 | -84.857 | -99.339 |
| | Difference of $z_1 + BFL_H$ | -30.631 | -50.709 | -61.934 |
| | Sum of difference of focusing group/ x | 0.186 | 0.131 | 0.114 |
| $x = -1.5$ | Difference of z_1 | 34.461 | 40.127 | 43.327 |
| | Difference of BFL_H | -45.295 | -65.280 | -76.462 |
| | Difference of $z_1 + BFL_H$ | -10.835 | -25.152 | -33.135 |
| | Sum of difference of focusing group/ x | 0.508 | 0.325 | 0.273 |

unit : mm

Table 6a A System design using the rear lens group as a zoom in Method 1 for given parameters of $FWD_H = 1.5$ m and $x = -1.0$ mm with the rear zooming foci of 42.32, 36.17 and 25.18 obtained from Table 4a, 3a and 1a respectively.

| F | f_1 | z_1 | f_2 | BFL_H | $z_1 + BFL_H$ |
|------------|---------|--------|--------|---------|---------------|
| 28 | -22.605 | 53.881 | 42.320 | 94.741 | 148.622 |
| 60 | -32.713 | 23.718 | 36.170 | 102.551 | 125.689 |
| 135 | -37.640 | -5.439 | 25.180 | 115.491 | 110.052 |
| Bifference | 15.035 | 59.320 | 17.140 | -20.750 | 38.570 |

unit : mm

Table 6b The maximum difference of shifting distances of the focusing lens group described in Table 6a.

| FWD_H | F | | | Maximum difference |
|-----------|---------|---------|---------|--------------------|
| | 28 | 60 | 135 | |
| 10.0 m | -0.1472 | -0.1519 | -0.1531 | 0.0059 |
| 5.0 m | -0.2953 | -0.3032 | -0.3050 | 0.0097 |
| 3.0 m | -0.4942 | -0.5038 | -0.5060 | 0.0118 |
| 2.0 m | -0.7456 | -0.7528 | -0.7544 | 0.0088 |
| 1.8 m | -0.8300 | -0.8354 | -0.8366 | 0.0066 |
| 1.5 m | -1.0000 | -1.0000 | -1.0000 | 0.0000 |
| 1.3 m | -1.1584 | -1.1512 | -1.1497 | 0.0087 |
| 1.1 m | -1.3765 | -1.3563 | -1.3521 | 0.0244 |
| 1.0 m | -1.5197 | -1.4890 | -1.4826 | 0.0371 |
| unit : mm | SUM | | | 0.1130 |

6. 初期設計の適用

Table 2a, 6a で提示されたシステムを具体的なズームレンズ系で形成させるため、まず第一群の f_1 を f_{11} と f_{12} のズーム系に分けると、 f_{11} は短ければ短いほど全長

および後群移動量の差の計は小さくなり、 f_{12} は短ければ短いほど全長は小さくなるが、後群移動量の差の計は大きくなる傾向を見せている。一方設計的な観点では画角が大きいレンズほど f_{11} レンズは大きな有効径が必要になるから、 f_{11} の焦点距離が小さくなると実際に構成

Table 7a A paraxial system design data for the rear focusing group with fixed focal length.

| F | z_{11} | z_{12} | BFL_H | SUM |
|------------|----------|----------|----------|----------|
| 28 | 13.5800 | 25.3580 | 56.5077 | 95.4457 |
| 60 | 42.9745 | 17.4501 | 71.4180 | 131.8354 |
| 135 | 51.5441 | 10.0815 | 115.4908 | 177.1164 |
| Difference | -37.9641 | 15.2765 | -58.9831 | -81.6707 |

$f_{11}=125.0$ mm, $f_{12}=-17.0$ mm, $f_2=25.18$ mm
unit: mm

Table 7b The maximum difference of shifting distances of the focusing lens group described in Table 7a.

| FWD_H | F | | | Maximum difference |
|----------|---------|---------|---------|--------------------|
| | 28 | 60 | 135 | |
| 10.0 m | -0.1448 | -0.1523 | -0.1540 | 0.0092 |
| 5.0 m | -0.2941 | -0.3055 | -0.3089 | 0.0148 |
| 3.0 m | -0.5003 | -0.5113 | -0.5167 | 0.0164 |
| 2.0 m | -0.7708 | -0.7710 | -0.7785 | 0.0077 |
| 1.8 m | -0.8643 | -0.8581 | -0.8663 | 0.0082 |
| 1.5 m | -1.0572 | -1.0335 | -1.0427 | 0.0237 |
| 1.3 m | -1.2426 | -1.1964 | -1.2066 | 0.0462 |
| 1.1 m | -1.5081 | -1.4204 | -1.4314 | 0.0877 |
| 1.0 m | -1.6895 | -1.5671 | -1.5785 | 0.1224 |
| unit: mm | SUM | | | 0.3363 |

Table 7c The imaging point deviations of the design described in Table 7a (rear fixed focal length) at wide and middle-zoom positions from the image plane formed by a tele-zoom position.

| TCL | The shifting distance of the rear focusing lens group at $F=135$ mm | Imaging point deviation | | Maximum deviation |
|--------|---|-------------------------|-----------|-------------------|
| | | $F=28$ mm | $F=60$ mm | |
| 10.0 m | -0.1540 | 0.0048 | 0.0041 | 0.0048 |
| 5.0 m | -0.3089 | 0.0075 | 0.0078 | 0.0078 |
| 3.0 m | -0.5167 | 0.0080 | 0.0123 | 0.0123 |
| 2.0 m | -0.7785 | 0.0035 | 0.0170 | 0.0170 |
| 1.8 m | -0.8663 | 0.0008 | 0.0183 | 0.0183 |
| 1.5 m | -1.0427 | -0.0066 | 0.0204 | 0.0270 |
| 1.3 m | -1.2066 | -0.0156 | 0.0222 | 0.0378 |
| 1.1 m | -1.4314 | -0.0314 | 0.0239 | 0.0553 |
| 1.0 m | -1.5785 | -0.0437 | 0.0245 | 0.0682 |

unit: mm

するとき困難だと予想している。このようなことを考慮し、後群の焦点距離を 25.18 mm で固定させた場合に選定したシステムを Fig. 4 と Table 7a に、TCL による後群移動量と $F=135$ mm に対する像面変化量を Table 7b, 7c に示す。

また、後群をズームで分けるため未知数を $f_{21}(1/k_{21})$, $f_{22}(1/k_{22})$, $f_{23}(1/k_{23})$, $T(z_{21}+z_{22})$ の四つに置いて引用文献 13) の方法を利用して新しい (15) 式を立て、Gauss-Jordan method¹⁴⁾ で連立方程式を変形して、 k_{21} に対する 4 次式を立て、Bairstow's method¹²⁾ を利用して k_{21}

Table 8a A paraxial system design data when the rear focusing group is zooming.

| F | z_{11} | z_{12} | z_{21} | z_{22} | BFL_H | SUM |
|------------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|
| 28 | 13.992 | 37.767 | 8.170 | 27.241 | 53.692 | 140.862 |
| 60 | 43.041 | 25.110 | 16.145 | 19.266 | 55.689 | 159.251 |
| 135 | 51.544 | 14.529 | 29.540 | 5.871 | 77.511 | 178.995 |
| Difference | -37.552 | 23.238 | -21.370 | -21.370 | -23.819 | -38.133 |

$f_{11}=125.0$ mm, $f_{12}=-17.0$ mm, $f_{21}=24.0697$ mm, $f_{22}=-35.9035$ mm, $f_{23}=62.2805$ mm
unit: mm

Table 8b The maximum difference of shifting distances of the focusing lens group described in Table 8a.

| FWD_H | F | | | Maximum difference |
|----------|---------|---------|---------|--------------------|
| | 28 | 60 | 135 | |
| 10.0 m | -0.1490 | -0.1531 | -0.1541 | 0.0051 |
| 5.0 m | -0.3027 | -0.3079 | -0.3090 | 0.0630 |
| 3.0 m | -0.5154 | -0.5168 | -0.5170 | 0.0016 |
| 2.0 m | -0.7950 | -0.7824 | -0.7793 | 0.0157 |
| 1.8 m | -0.8912 | -0.8720 | -0.8673 | 0.0245 |
| 1.5 m | -1.0911 | -1.0529 | -1.0441 | 0.0470 |
| 1.3 m | -1.2825 | -1.2218 | -1.2084 | 0.0741 |
| 1.1 m | -1.5557 | -1.4555 | -1.4339 | 0.1218 |
| 1.0 m | -1.7416 | -1.6093 | -1.5816 | 0.1600 |
| unit: mm | SUM | | | 0.4561 |

Table 8c The imaging point deviations of the design described in Table 8a (rear zoom) at wide and middle-zoom positions from the image plane formed by a tele-zoom position.

| TCL | The shifting distance of the rear focusing lens group at $F=135$ mm | Imaging point deviation | | Maximum deviation |
|--------|---|-------------------------|-----------|-------------------|
| | | $F=28$ mm | $F=60$ mm | |
| 10.0 m | -0.1541 | 0.0027 | 0.0023 | 0.0027 |
| 5.0 m | -0.3090 | 0.0033 | 0.0026 | 0.0033 |
| 3.0 m | -0.5170 | 0.0008 | 0.0005 | 0.0008 |
| 2.0 m | -0.7793 | -0.0077 | -0.0070 | 0.0077 |
| 1.8 m | -0.8673 | -0.0118 | -0.0107 | 0.0118 |
| 1.5 m | -1.0441 | -0.0222 | -0.0198 | 0.0222 |
| 1.3 m | -1.2084 | -0.0343 | -0.0301 | 0.0343 |
| 1.1 m | -1.4339 | -0.0547 | -0.0477 | 0.0547 |
| 1.0 m | -1.5816 | -0.0705 | -0.0611 | 0.0705 |

unit: mm

の値を求め、続いて k_{22} , k_{23} , T の値を求める方法を使用した。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{21} \\ k_{22} \\ k_{21}k_{22} \\ k_{23} \\ T \\ k_{23}T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{17} \\ a_{27} \\ a_{37} \\ a_{47} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{cases} a_{11}=1, & a_{21}=-z_{10}, & a_{31}=1, & a_{41}=-z_{11} \\ a_{12}=1, & a_{22}=0, & a_{32}=1, & a_{42}=0 \\ a_{13}=-z_{10}, & a_{23}=0, & a_{33}=-z_{11}, & a_{43}=0 \\ a_{14}=K_0BFL_0, & a_{24}=-K_0BFL_0z_{10}, \\ & a_{34}=K_1BFL_1, & a_{44}=-K_1BFL_1z_{11} \\ a_{15}=0, & a_{25}=-K_0, & a_{35}=0, & a_{45}=-K_1 \\ a_{16}=0, & a_{26}=K_0BFL_0, & a_{36}=0, & a_{46}=K_1BFL_1 \\ a_{17}=K_0, & a_{27}=(BFL_0-z_{10})K_0-1, \\ & a_{37}=K_1, & a_{47}=(BFL_1-z_{11})K_1-1 \end{cases}$$

初期値で

$$\begin{aligned} F_0 &= 42.32 \text{ mm} \quad (K_0=0.02363), \\ BFL_0 &= 1.27 \text{ mm}, \quad Z_{10}=8.17 \text{ mm} \\ F_1 &= 25.18 \text{ mm} \quad (K_1=0.03971), \\ BFL_1 &= -12.8 \text{ mm}, \quad Z_{11}=29.54 \text{ mm} \end{aligned}$$

を代入して解いてみると、二つの実根が存在するが

- ① $f_{21} = -21.4958 \text{ mm}$, $f_{22} = 20.2049 \text{ mm}$,
 $f_{23} = 16.2550 \text{ mm}$, $T = 70.1470 \text{ mm}$
- ② $f_{21} = 24.0697 \text{ mm}$, $f_{22} = -35.9035 \text{ mm}$,
 $f_{23} = 62.2805 \text{ mm}$, $T = 35.4107 \text{ mm}$

となる。ここで解①は f の値が小さく、 T の値が大きいからはずし、解②を利用してシステムを完成させた。

Fig. 5 と Table 8a は最終的に求められたズームレンズ系の初期設計値を示し、Table 8b, 8c は TCL による後群移動量と $F=135 \text{ mm}$ に対する像面変化量を示している。

7. 結果および考察

後群移動フォーカシング方法において後群を固定焦点にする場合とズームにする場合について初期設計値を求めた。その結果、引用文献 9) の物体距離 1.5m の最大変化量 0.171 mm (=0.070+0.101) と比べてみると、1m で最大変化量は後群固定焦点の場合では 0.0682 mm、後群ズームの場合は 0.0705 mm と有効な結果を得た。

上のような結果を誘導する過程で表れた現象および今後改善事項を整理すると、次のようである。

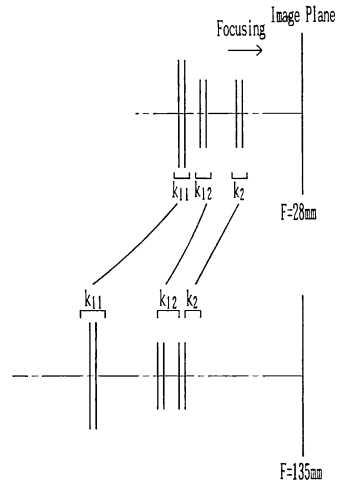


Fig. 4 A schematic rear focusing system design with a rear fixed focal length group.

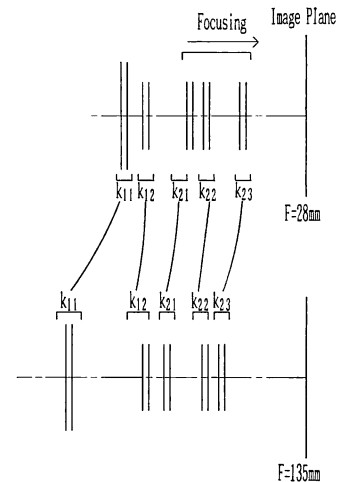


Fig. 5 A schematic rear focusing system design with a rear zoom group.

① Table 7b と 8b の後群移動量の差の計 0.3363 mm と 0.4561 mm を比べてみると、後群ズームレンズ系の屈折能配置をさらに合理的にする必要があると思われる。

② Table 7a の後群が固定焦点である設計値において、 BFL_H の変化量は 58.9831 mm で一眼レフカメラ用レンズ系としてはほぼ限界に到達したが、Table 8a の後群がズームの場合は 23.8197 mm で変化量が半分以下になったことを考慮すると、28~135 mm レンズより大きいズーム倍率をもつレンズ系にも適用することができると思われる。

③ FWD_H と x の関係式から解を誘導した現在の近似的な方法より、TCL と x の関係式から解を求めると

撮影距離をもっと短縮することができるようになる。また、解析的で式を解くことが難しければ、求められた初期設計値から最適化技法を利用すると像面変化量をさらに小さくすることができると思われる。

④ 二番目の焦点調節方式の解 Table 2a, 2b は全長の変化が大きく、像面が安定しており、一番目の焦点調節方式から変形された後群ズームの解 Table 6a, 6b は全長の変化が小さく像面の安定度が落ちることを比較すると、二番目の焦点調節方式をさらに発展させればより良い結果を得る可能性があると思われた。

文 献

- 1) 高野榮一：“ズームレンズとその周辺 (36, フォーカシング方式～その 1～)”, 光学技術コンタクト, **24** (1986) 69-73.
- 2) 高野榮一：“ズームレンズとその周辺 (37, フォーカシング方式～その 2～)”, 光学技術コンタクト, **24**(1986)135-147.
- 3) 石山唱蔵, 坂野 誠, 小島 忠：“ズームレンズの新しいフォーカシング方式”, 光学, **10** (1981) 364-371.
- 4) 田中一夫, 武士邦雄：“ズームレンズの新しいフォーカシング方式”, 光学, **8** (1979) 326-329.
- 5) 高野榮一：“ズームレンズとその周辺 (38, フォーカシング方式～その 3～)”, 光学技術コンタクト, **24**(1986)232-242.
- 6) Konica Camera 設計 Group：“Camera Test (コニカアイボーク)”, 写真工業, **49**, 6(1991)58-65.
- 7) 旭光学工業(株) Camera 開発企画室：“Camera Test (ペンタックズーム 105 スーパー)”, 写真工業, **48**, 7 (1990) 74-88.
- 8) 高野榮一：“ズームレンズとその周辺 (39, フォーカシング方式～その 4～)”, 光学技術コンタクト, **24** (1986) 300-309.
- 9) 得丸 祥：“ズームレンズの新しいフォーカシング方式”, 光学, **12** (1983) 359-366.
- 10) Minolta Camera 開発部：Camera Test (ミノルタ α -7000)”, 写真工業, **43**, 4 (1985) 80-92.
- 11) M. Herzberger: *Modern Geometrical Optics* (Interscience Publishers, Inc., New York, 1958) pp. 452-462.
- 12) S. S. Kuo: *Computer Applications of Numerical Method* (Addison-Wesley Publishing Co., Inc., London, 1972) pp. 457-462.
- 13) J.-H. Jung and H.B. Chung: “4-Component zoom lens system II. Paraxial design,” Korean Appl. Phys., **3** (1990) 39-43.
- 14) F.B. Hildebrand: *Method of Applied Mathematics* (Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1965) pp 1-4.