

대칭성 공차를 갖는 교환렌즈용 줌 렌즈의 핀트 조정법과 통계적 해석

류재명¹ · 조재홍^{2†} · 강건모¹ · 이해진¹ · 요네야마 슈지¹

¹삼성전자(주) 디지털이미징사업부 렌즈개발그룹
☎ 443-742 경기도 수원시 삼성로 129 (매탄동)

²한남대학교 이과대학 광·전자물리학과
☎ 306-791 대전광역시 대덕구 한남로 70 (오정동)

(2011년 8월 17일 받음, 2011년 10월 7일 수정본 받음, 2011년 10월 7일 게재 확정)

디지털 일안 반사식 카메라 또는 콤팩트 시스템 카메라용의 교환렌즈용 줌 광학계는 화각과 제품 사양에 따라 여러 가지 형태가 있으므로, 하나의 AF(auto-focus)군으로만 줌 렌즈의 광각단과 망원단 2곳에서 상면이동의 보정(즉, 핀트 조정)이 불가능한 경우가 발생한다. 또한 줌 광학계의 광각단과 망원단 2곳에서의 후초점거리(back focal length, BFL)가 설정된 BFL 설계값과 일치하도록 조정하기 위해서는 적어도 2곳에서 핀트 조정을 해야 한다. 본 논문에서는 이러한 광학계에 대한 중민감도의 개념을 사용한 핀트 조정의 계산 방법에 대해 제안하고, 이 광학계에 대해 핀트 조정의 조정량 한계를 통계적 분석을 통하여 계산했다.

Focus Adjustment Method with Statistical Analysis for an Interchangeable Zoom Lens with Symmetric Error Factors

J. M. Ryu¹, J. H. Jo^{2†}, G. M. Kang¹, H. J. Lee¹, and Suji Yoneyama¹

¹R&D Team, Digital Imaging Business, Samsung Electronics Co., LTD., Suwon 443-742, Korea

²Department of Applied Optics and Electromagnetics, Hannam University, Taejeon 306-791, Korea

(Received August 17, 2011; Revised manuscript October 7, 2011; Accepted October 7, 2011)

There are many types of interchangeable zoom lens in the digital single lens reflex camera and the compact digital still camera system in order to meet various specifications such as the field angle. Thus special cases for which the focus adjustment using only an auto-focus group is not available in the focal point correction (that is, the focus adjustment) of both wide and tele-zoom positions are sometimes generated. In order to make each BFL(back focal length, BFL) coincide at wide and tele-zoom positions with each designed BFL, focus adjustment processes must be performed at least in these two points within the zoom lens system. In this paper, we propose a method of focus adjustment by using the concept of focus sensitivity, and we calculate a limit on focus adjustment distance by means of statistical analysis.

Keywords: Lens design, Tolerance analysis, Zoom lens system, Focus adjustment

OCIS codes: (220.2740) Geometric optical design; (220.3620) Lens system design

I. 서 론

과거 국내에서도 35 mm 필름용 일안 반사식(Single Lens Reflex; SLR) 카메라 및 교환렌즈가 출시된 적이 있기는 하나, 전체 생산량과 판매량이 일반 소형 카메라에 비해 매우 미미하고, 많이 보급되지 않아 제품화되었다고 보기는 힘들다. 이러한 SLR 카메라는 교환렌즈 광학계로부터 들어온 빛은 일부가 반투과 거울(half-mirror)에 반사되어 뷰파인더

(view-finder)로 보내져 피사체를 관찰할 수 있도록 한다. 이때 반사된 빛이 뷰파인더에 의해 상이 반전되지 않도록 뷰파인더 앞에 펜타 프리즘(penta-prism)을 넣는다. 이에 반하여 반투과 거울을 투과한 빛은 AF(Auto-focus) 광학계에 입사하여 빛을 보낸다. 그림 1은 이러한 SLR 카메라의 구조를 나타낸 것이다.

AF는 여러 가지 방식이 있으나, 최근 디지털 SLR 카메라(DSLR)에는 절대 다수의 제품이 위상차 AF 방식을 채택하

†E-mail: jhjo@hnu.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

고 있으며,^[1] 그림 1에서 ‘TTL-AF Optics’로 표시된 부분이 이에 해당한다. 이 때문에 반투과 거울과 펜타 프리즘은 필수적 부품이다. 이 때 반투과 거울과 펜타 프리즘을 한꺼번에 통칭하여 거울박스(mirror-box)라고 부른다. 그러므로 위상차 AF를 채택하는 SLR 카메라는 반투과 거울이 들어갈 공간이 필요하므로, 카메라 몸체가 커질 수밖에 없다. 또한 광학 설계 입장에서 보면, 반투과 거울이 들어갈 만큼의 후초점거리(back focal length; BFL)를 확보해야 하므로, 특히 화각이 넓은 광학계의 경박단소화가 어려워진다. 이 때문에 최근에는 국내에서도 세계 최초로 APS-C (Advanced Photographic System, type C) 크기의 CMOS(complementaly metal oxidized semiconductor)가 채용되고 거울박스를 없앤 렌즈교환식 카메라가 출시되었다.^[2] 카메라 업계에서는 이러한 방식의 카메라를 콤팩트 시스템 카메라(Compact System Camera; CSC)라고 부른다.^[3]

거울박스의 유무에 관계없이 렌즈교환식 카메라용 광학계의 경우에는 화각 범위가 상당히 다양하기 때문에 여러 가지 형태의 광학계가 존재한다. 그러나 렌즈교환식 광학계의 설계에 있어서 카메라 몸체와의 호환성을 반드시 고려해야 한다. 이 때 렌즈가 장착되는 마운트(mount)면에서 촬상소자의 결상면까지의 거리를 FB(flange back)거리라고 하는데, 제품간 이 거리가 일정해지도록 조정해야만 한다. 이를 핀트 조정(focus adjustment) 공정이라 하며, 생산되는 광학계의 초점 위치가 촬상소자에 일치 되도록 조정하는 것이다. 물론 핀트 조정 공정이 콤팩트 카메라에서도 없는 것은 아니며, 콤팩트 카메라에서는 렌즈교환식 카메라에 비해 상대적으로 작은 크기의 촬상소자를 사용하기 때문에, 초점거리가 짧고 BFL 변화량이 상대적으로 작다. 따라서 콤팩트 카메라에서는 이러한 핀트 조정은 주로 AF 군을 이용한다.^[4] 그러나 렌즈교환식 카메라에 사용되는 광학계에서는 AF군만으로 핀트 조정이 불가능한 경우가 많이 발생한다. 또한 줌 광학계에서는 기본적으로 광각단(Wide)과 망원단(Tele)에서 FB 거리를 모

두 맞추어야 하므로 일반적으로 조정점은 2곳이 된다. 그러므로 이러한 핀트 조정량에 대한 범위를 광학계의 기구 설계에서 반드시 반영해야만 한다.

본 논문에서는 렌즈교환식 카메라에 사용되는 줌 광학계에서 AF군만으로 핀트 조정이 불가능한 광학계의 예를 들고, 이러한 핀트 조정에 필요한 이론식을 유도하고자 한다. 그리고 이를 바탕으로 몬테카를로(Monte Carlo) 전산시뮬을 통해 핀트 조정방법과 조정범위를 결정하고자 한다.

II. 종민감도 계산 방법

그림 2는 임의의 얇은 렌즈들에 대한 굴절을 나타낸 광로도이다. 여기서 a 는 앞에 놓인 렌즈군들에 의해 만들어진 상에서부터의 물체거리이고, b 는 이 임의의 군이 만드는 상까지의 상거리를 의미한다. 또한 a 와 b 는 광선의 출발점을 기준으로 부호를 정하며, 광선의 출발점의 오른쪽으로 광선이 진행하면 양의 값이며, 반대로 광선의 출발점 왼쪽으로 진행하면 음의 값이다. 그림 2와 같은 경우에는 물체로부터 광선이 오른쪽으로 진행하므로, a 는 양수이며, 이 광선이 얇은 렌즈에서 굴절되어 렌즈 중심을 기준으로 계속 오른쪽으로 진행하므로, b 역시 양의 값이 된다. 이러한 방법으로 a 및 b 의 부호를 결정하면, 프로그래밍에 유리한 장점이 있다. 이 때 U 는 물체거리 a 와 상거리 b 를 더한 값으로 물상거리라 하며 식 (1)과 같이 정의되는 값이다.

$$U \equiv a + b \tag{1}$$

이 때 물체거리 a 와 상거리 b 의 부호규약을 광선의 출발점을 기준으로 하여 직각좌표계로 부호를 정하고 이 임의의 군의 초점거리를 f 라 하면, 식 (2)와 같은 결상식이 성립한다.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \tag{2}$$

한편 광학계의 횡배율 m 은 상거리 b 를 물체거리 a 로 나눈 값으로 정의되는데, 종배율 m_l 은 식 (2)를 물체거리 a 와 상거리 b 에 대해 각각 미분하면 횡배율로부터 식 (3)과 같이 계산된다.

$$m_l = \Delta b / \Delta a = -m^2 \tag{3}$$

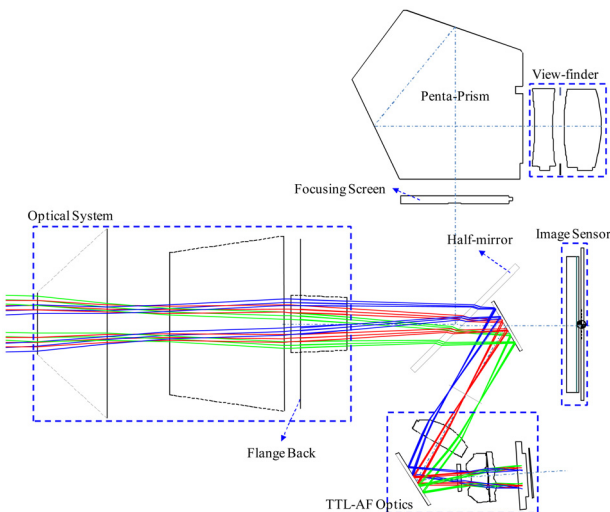


FIG. 1. Optical layout and structure of SLR cameras.

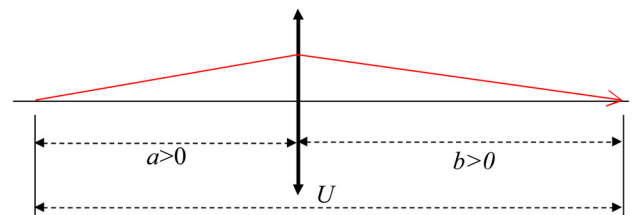


FIG. 2. Refraction by a thin lens group.

여기서 이 임의의 군이 광축 방향으로 조금 움직인다면, 물체와 상까지의 거리 변화량 ΔU 는 식 (3)을 사용하여 식 (4)와 같이 주어진다.

$$\Delta U = \Delta a + \Delta b = \Delta a \cdot (1 - m^2) \quad (4)$$

즉 식 (3)에서 주어지는 Δb 는 물체면 이동에 대한 상면의 이동량이고, 식 (4)에서 주어지는 ΔU 는 렌즈 이동에 대한 상면의 이동량으로 해석할 수 있다. 이제 여러 개의 군이 있는 경우, 임의의 군이 이동할 때의 상면 이동량을 계산해 보고자 한다.

그림 3은 3개의 군으로 이뤄진 줌 렌즈 광학계를 얇은 렌즈계로 해석했을 때의 광로도이다. 여기서 첫 번째 군이 Δa_1 만큼 움직였을 때, 첫 번째 군의 물상거리 변화 $\Delta U'_1$ 은 식 (5)와 같다.

$$\Delta U'_1 = (1 - m_1^2) \cdot \Delta a_1 \quad (5)$$

이때 2군의 물체거리는 $\Delta U'_1$ 만큼 이동된 것이므로, 첫 번째 군의 이동에 따른 두 번째 군까지의 물상거리 변화 $\Delta U'_2$ 는 식 (6)과 같다.

$$\Delta U'_2 = m_2^2 \cdot \Delta U'_1 = (1 - m_1^2) \cdot m_2^2 \cdot \Delta a_1 \quad (6)$$

이를 일반화하여 총 n개의 군으로 이뤄진 광학계에서 i번째 군이 Δa_i 만큼 움직였을 때, 상면 변화량 $\Delta U'_n$ 은 식 (7)과 같이 주어짐을 쉽게 알 수 있다.

$$\Delta U'_n = p_i \cdot \Delta a_i$$

$$p_i \equiv (1 - m_i^2) \cdot \prod_{k=i+1}^n m_k^2 \quad (7)$$

본 논문에서 식 (7)의 p_i 를 i번째 군의 중민감도(focus sensitivity, 관습적으로는 핀트 민감도라고도 함)로 정의한다.

III. 설계 변수와 BFL의 통계적 계산과 의미

본 논문에서 예제로 사용할 광학계는 DSLR용 고배율 광학계의 줌 렌즈로서,^[5, 6] 이 광학계에서 군의 이동에 따른 배율 변화가 가장 큰 군인 변배자(variator)는 2군이다.^[7] 일반

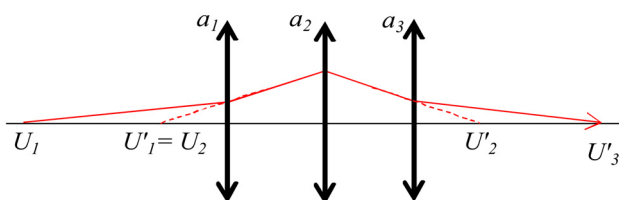


FIG. 3. Optical layout by three lens groups.

적인 콤팩트 카메라 광학계에서는 보상자(compensator)를 조출군(focusing group)으로 사용하거나,^[4] DSLR용 교환렌즈 광학계에서는 제1군을 조출군으로 사용한다. 그러나 이 광학계는 제2군인 변배자를 조출군으로 사용하여 결상시에도 광학계의 전장이 바뀌지 않도록 했다.

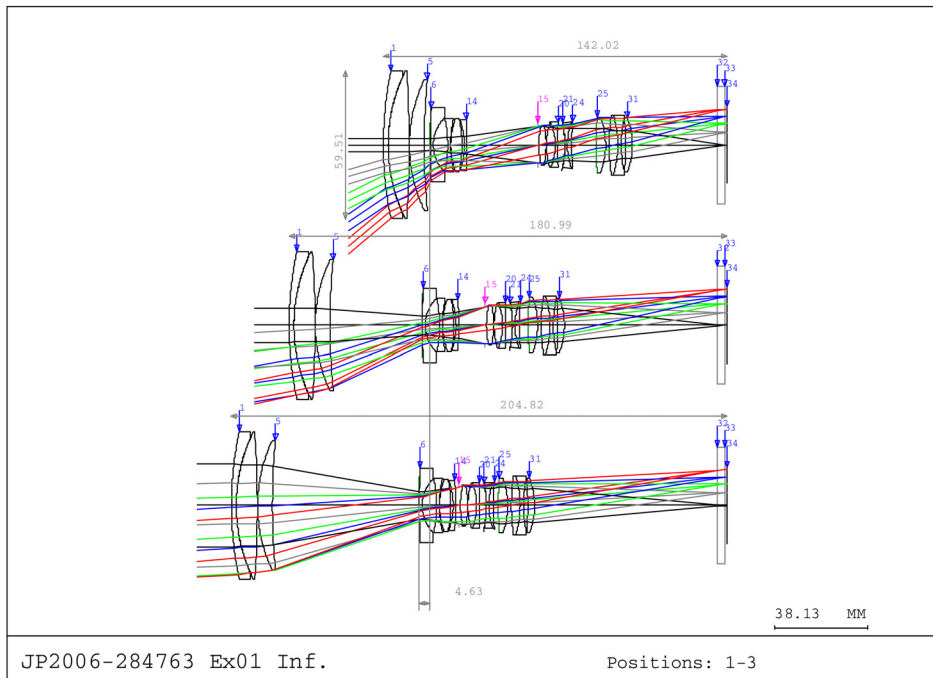
표 1은 JP2006-284763의 실시예 1의 줌 렌즈계에 대한 대략적인 광학 사양들로서 유효초점거리(effective focal length, EFL), 반화각(half field of view, HFOV), F수(F/#), 센서(sensor), 줌비(zoom ratio), 줌형태(zoom type), 결상군, 손떨림 보정군, 렌즈매수 등이 열거되어 있다.^[8] Sensor는 APS-C format(Advanced Photo System type-C)인데, 이는 35 mm 필름의 약 0.67배 정도 작은 크기를 갖는 sensor를 의미한다. Sensor의 최대 반대 각 크기는 제조사, 총 화소수 등에 따라 약간의 차이가 있으나, 대략 14.1 mm이다. 줌 형태에서 'PNPP'라 함은 1군이 양의 굴절능(positive power), 2군은 음의 굴절능(negative power), 3군 및 4군은 양의 굴절능임을 의미한다. 또한 그림 4는 이 광학계의 광로도(그림 4(a))와 줌 궤적(그림 4(b))이다. 그림 4(b)는 상면에서 각 군의 첫 면까지의 거리가 줌 배율이 변할 때 변화하는 줌 궤적을 그린 것이며, 가장 오른쪽의 1점 파선은 고정된 상면을 의미한다. 그림 4(b)의 줌 궤적에서 다섯 개 실선은 왼쪽부터 차례로 1군, 2군, 3-1군, 3-2군, 4군을 의미하고, 점선은 렌즈 첫 면에서 1 m 거리에 위치한 물체의 상을 맺기 위한 조출군의 위치를 의미한다.

대칭형 공차는 광축에 대해 대칭인 오차 요인들에 대한 오차 한계를 의미한다. 이러한 대칭형 공차 항목으로는 곡률, 두께, 굴절률 등이 있으며, 이것들은 광학계의 주요한 설계 변수들이다.^[4] 이러한 설계 변수의 변화에 의해 BFL을 포함한 광학 수치가 결정이 된다. 즉 BFL은 곡률, 두께, 굴절률의 함수가 되며, 곡률, 두께, 굴절률 등의 설계 변수로 식 (8)와 같이 테일러(Taylor) 전개가 가능하다.

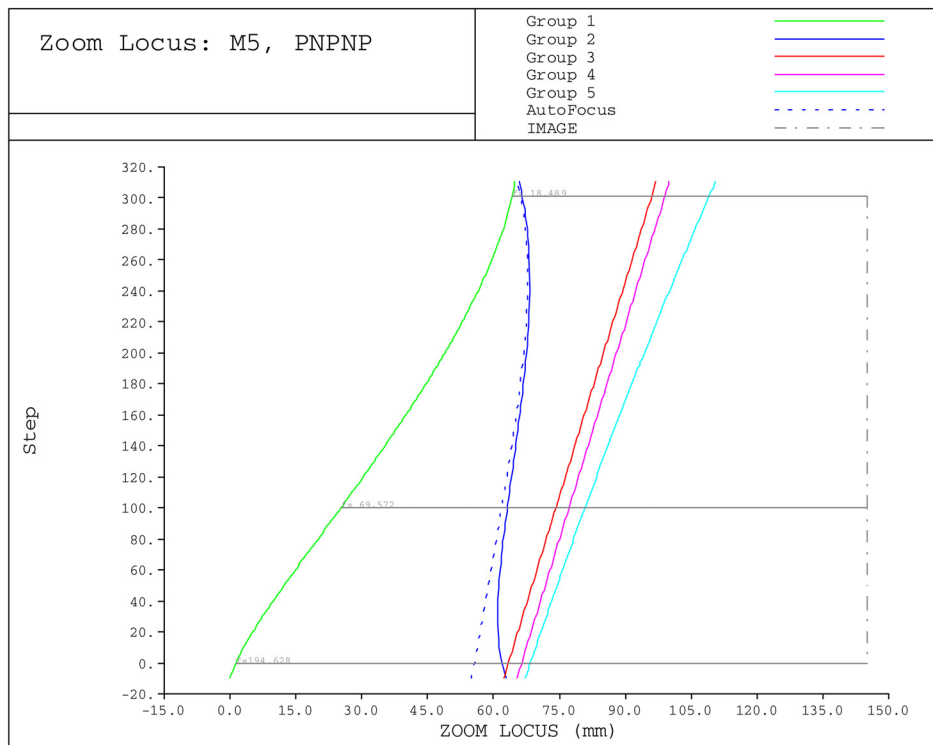
$$BFL = f_{BFL}(R, d, n) = f_{BFL_0} + \frac{\partial f_{BFL}}{\partial R}(R - R_0) + \frac{\partial f_{BFL}}{\partial d}(d - d_0) + \frac{\partial f_{BFL}}{\partial n}(n - n_0) + \dots \quad (8)$$

TABLE 1. Specifications of the first example in patent JP2006-284763^[8]

	JP2006-284763
EFL	18.49mm ~ 193.63mm
HFOV	39.57° ~ 4.17°
F/#	3.54~5.88
Sensor	APS-C
Zoom Ratio	10.5
Zoom Type	PNPP(Group 4)
Focusing group	Group 2 (Inner Focus)
Image Stabilizer	Group 3-2
Lens construction	16 elements in 12 groups (with three aspherical lens elements)



(a)



(b)

FIG. 4. Optical layout (up) and zoom locus (down) for the first example in patent JP2006-284763.

이 식은 단순히 독립 변수가 3개가 아닌, 광학계의 렌즈 구성에 따라 이 이상이 되는 것이 일반적이다. 예를 들면 2매 접합렌즈의 경우에는 곡률이 3개, 두께 2개, 굴절률이 2개 이므로 독립 변수의 총 개수는 7개가 된다. 따라서 식 (8)의 R 은 곡률을 대표하고, d 는 두께, n 은 굴절률을 대표하는

변수를 의미한다. 여기서 본 논문은 어떤 광학계의 BFL을 구하는 것이 목적이 아니고 설계 변수의 변화에 따른 BFL의 변화량을 구하는 것이 목적이므로, 테일러 전개를 주어진 초기 설계값 중심으로 전개를 하여 아래와 같이 식 (9)를 사용해야 한다.

$$\Delta BFL = BFL - f_{BFL_0} \approx \frac{\partial f_{BFL}}{\partial R} \cdot \Delta R + \frac{\partial f_{BFL}}{\partial d} \cdot \Delta d + \frac{\partial f_{BFL}}{\partial n} \cdot \Delta n \tag{9}$$

식 (9)에서 ΔR , Δd , Δn 등은 각각 곡률, 두께, 굴절률, 디센터(decenter), 틸트(tilt)의 변화량으로 초기에 주어진 설계값에 대한 오차량을 의미한다. 그리고 각 수차 함수의 미분값이 해당 공차항목의 민감도가 된다. 물론 각 오차량에 의한 교차효과 때문에 추가 항을 계산할 필요가 있겠으나, 카메라 광학계에 대해 여러 해 동안의 개발 경험에 따르면 이러한 추가항은 별도 계산할 필요는 없는데, 이는 수차 함수의 선형 근사가 비교적 잘 맞는다는 것을 의미한다. 이때 ΔR , Δd , Δn 등을 공차로 결정한다면, 각 변수의 미분값은 해당 공차항목의 변화량으로 근사할 수 있으며, 민감도에 해당하는 이 값들을 구할 수 있도록 CodeV에서는 “tol”이라는 명령어를

제공한다.^[9]

표 2는 JP2006-284763의 실시예 1의 줌 렌즈계에 대해 Code V의 “tol” 명령어로 계산한 각 면의 대칭형 오차에 따른 BFL의 변화량이다.^[8] 여기서 초기 공차값으로는 뉴턴 무늬수(Fringe)는 5분, 두께(Thickness)는 0.05 mm, 굴절률(Index)은 0.0005를 잡았으며, 표 2는 이 값에 대한 각 변수들에 변화를 주었을 때 생기는 BFL의 변화에 대한 값이다. 실제 설계에서는 광학계의 성능을 보면서 각 공차를 결정하나, 공차를 부여하는 방법에 관한 것은 본 논문의 주제를 넘으므로 본 논문에서는 설명을 생략하고 추후의 논문이나 새로운 저서를 통해서 소개하고자 한다.

표 2의 각 셀의 값들은 부여된 공차에 따른 식 (9)로 주어진 BFL의 변화량을 의미한다. 만약 모든 가공 과정에서 작업자의 실수가 없어서 우연에 의한 영향으로만 오차가 발생한다면, 오차의 분포는 정규분포를 가질 수 있다. 또한 각

TABLE 2. Focus sensitivities of the first example in patent JP2006-284763.

Nominal	Wide			Tele		
	Fringe	Thickness	Index	Fringe	Thickness	Index
1	-0.000926	-0.000345	0.001323	-0.102606	-0.038187	0.146672
2	0.000442	-0.000007	-0.002953	0.048976	-0.000755	-0.326910
3	-0.000625	-0.000068		-0.069266	-0.007499	
4	-0.000797	-0.001545	-0.002175	-0.088261	-0.171101	-0.240837
5	-0.000741	-0.001672		-0.082121	-0.185178	
6	-0.002104	-0.001307	0.000193	-0.032668	-0.128302	0.003099
7	-0.000994	-0.001290	0.008942	-0.015373	-0.116287	0.135591
8	-0.005338	-0.024566		-0.080500	-0.113574	
9	-0.008336	-0.028997	0.009459	-0.104500	-0.194600	0.116669
10	-0.009427	-0.099860		-0.116198	-0.801310	
11	-0.009912	-0.016950	-0.013084	-0.121868	-0.091512	-0.159912
12	-0.012359	-0.007623		-0.143535	-0.011073	
13	-0.011542	-0.030208	0.008720	-0.131282	-0.196496	0.098792
14	-0.012654	-0.043206		-0.142247	-0.262061	
15		-0.043206			-0.262061	
16	-0.076259	-0.000046	-0.076223	-0.212276	-0.013902	-0.215108
17	-0.073361	-0.044221		-0.210575	-0.036311	
18	-0.055094	-0.112230	-0.089962	-0.158453	-0.187072	-0.267679
19	-0.033569	-0.035577	0.051819	-0.100864	-0.037572	0.155742
20	-0.077443	-0.044572		-0.234998	-0.033899	
21	-0.039843	-0.004544	0.000014	-0.128801	-0.001258	-0.000011
22	-0.015644	-0.000661	0.061649	-0.050632	-0.010097	0.201448
23	-0.002373	-0.001303	-0.028392	-0.007778	-0.006435	-0.092227
24	-0.051739	-0.001471		-0.173112	-0.071268	
25	-0.033039	-0.001420	-0.045074	-0.108633	-0.007064	-0.153560
26	-0.031172	-0.069705		-0.107804	-0.084851	
27	-0.021676	-0.070333	-0.030186	-0.077478	-0.109998	-0.115546
28	-0.012713	-0.033616	0.036793	-0.048165	-0.036186	0.140125
29	-0.030130	-0.008304		-0.116421	-0.002684	
30	-0.020890	-0.001419	-0.018557	-0.084749	-0.012069	-0.080035
31	-0.019812	-0.050000		-0.084265	-0.050000	
32	-0.000060	-0.032922	0.000650	-0.000060	-0.032922	0.000650
33	-0.000007	0.000000		-0.000007	0.000000	
RSS	0.176188	0.220991	0.162075	0.652732	1.020333	0.712714

오차에 따른 BFL 변화가 선형임을 가정하면, 오차 분포와 그 오차에 의한 BFL 변화 분포는 같은 확률 분포를 따르게 된다. 예를 들어 16번 면의 곡률이 표준편차가 5본인 정규분포를 따른다면, 광각단의 BFL은 표준편차가 0.076인 정규분포를 따른다는 것을 의미한다. 여기서 주의할 점은 설계자가 예를 들어 뉴턴 무늬수를 5본으로 준다는 것은 일반적으로 곡률 오차 분포의 표준편차 σ 의 3배, 즉 3σ 가 공차 한계인 5본임을 의미한다는 것이다.

이 장에서 가정대로 모든 면의 뉴턴 무늬수에 대한 곡률 오차가 표준편차의 3배인 3σ 가 5본인 정규분포를 따른다면 곡률 가공 오차에 따른 BFL의 분포는 표 2의 마지막 줄인 RSS값, 즉 표준편차의 3배가 0.176 mm인 정규분포를 가지게 된다. 마찬가지로 여기에서 주어진 대로 모든 면에 대해 뉴턴 무늬수에 대한 공차값은 5본, 두께는 0.05 mm, 굴절률은 0.0005의 변화가 있다면, 광각(Wide)단의 각 변수들에 대한 BFL은 표 2의 RSS 줄의 기하평균인 0.326 mm의 1/3배만큼의 표준편차를 갖고, 망원단(Tele)은 1.405 mm의 1/3배의 표준편차를 갖는 정규분포를 이루게 된다.

그러나 곡률, 두께, 굴절률 등을 정규분포에 따르도록 품질 관리하는 것은 매우 어렵다. 그렇지만 이렇게 가공 오차가 정규분포를 따르지 않아도, 이들 오차가 누적되어 만드는 BFL의 분포는 중심극한의 정리에 따라 정규분포에 근접하게 되며,^[10] 참고문헌 [5]에서 언급한 바와 같이 몬테카를로 방법으로 전산모의를 해 보면 정규성을 가지게 됨을 확인할 수 있다. 최악의 경우에는 곡률, 두께, 굴절률 등이 균등 분포를 따를 수도 있는데, 이러한 경우 광각단과 망원단의 BFL 분포의 표준편차는 각 오차가 정규분포를 이룰 때보다 약 $\sqrt{3}$ 배가 커져서 0.188 mm, 0.811 mm가 된다.

IV. 기존 핀트 조정 방법의 문제점과 신규 보정 방법

이 장에서는 JP2006-284763의 실시예 1의 줌 렌즈계에서 조출근으로부터 상면 보정을 했을 때의 문제점을 논의하고, 이에 대한 새로운 해결방법을 제안하고자 한다. 3장에서 이 광학계의 모든 면에 대해 뉴턴 무늬수는 5본, 두께는 0.05 mm, 굴절률은 0.0005의 공차 내에서 최악의 분포인 균등분포가 된다면 광각단과 망원단의 BFL의 표준편차는 0.188 mm, 0.811 mm가 됨을 설명했다.

만약 BFL 변화, 즉 오차에 대해 6σ 수준으로 품질 관리를 한다고 가정하고,^[11] 중심값 이동에 대해서 1.5σ 을 허용한다고 가정하면 BFL 분포에 대한 표준편차의 4.5배에 해당하는 범위에 대해 보정이 가능해야 한다. 이 때 공차 분포를 관리하지 않고, 공차 범위만 관리한다면 핀트 조정은 광각단의 경우 ± 0.846 mm, 망원단의 경우 ± 3.651 mm 범위에서 조정 되도록 해야만 한다. 그러나 이러한 조정 범위는 상당히 큰 값이므로, 실제의 경우 공차 분포를 이 보다는 훨씬 줄여서 관리를 해야 한다. 이 때 공차 분포를 정규분포와 균등분포 사이가 되는 삼각형 분포(triangle distribution)가 되도록 관리

를 한다고 가정한다면 표준편차의 약 $\sqrt{2}$ 배에 해당하는 BFL 변화가 생기게 된다. 따라서 오차 분포를 삼각형 분포가 되도록 관리한다고 가정하고, 중심값 이동 1.5σ 을 고려한 6σ 수준의 품질관리를 목표로 한다면 BFL 변화량은 광각단과 망원단에서 각각 0.691 mm, 2.981 mm가 보정되도록 1군 및 마운트면의 조정량을 결정해야 한다. 만약 1군 및 마운트면의 조정량을 더 줄이기 위해서는 BFL 변화량을 작게 해야 하기 때문에, 제작 공차를 줄여야만 한다.

이 변화량을 보정하기 위한 2군의 이동량은 식 (7)로 주어진 각 군의 배율로부터 계산되는 2군의 중민감도를 구하면 알 수 있다.

표 3은 본 줌 렌즈계를 구성하는 광각단(Wide), 중간단(Normal), 망원단(Tele)의 각 군에 대한 초점거리(EFL)와 배율(magnification)로서 e-line (파장 546.1 nm)에서 계산한 값이다. 그리고 표 4는 표 3의 각 군의 배율을 이용하여 식 (7)로 계산한 중민감도이다. 이 표에서 2군의 중민감도는 광각단에서는 0.832, 망원단에서는 1.558임을 알 수 있다. 따라서 광각단에서는 0.744 mm ($=0.619/0.832$), 망원단은 1.913 mm ($=2.981/1.558$)이다. 그러나 JP2006-284763의 실시예 1의 망원단에서 2군의 마지막 면에서 3군의 첫 면인 조리개까지의 거리가 불과 1.5 mm이므로 2군만으로는 망원단에서 보정량이 부족하다. 또한 이러한 문제 외에도 2군이 초점거리가 짧고 군배율이 높은 변배자이므로 2군의 보정량이 많아지면, 2군의 이동에 따른 광학계 전체 초점거리 변화가 커서 AF시 촬영자가 화각 변화를 인지하게 되는 문제점도 있다. 따라서 2군의 보정량은 최소화하는 것이 필요하다.

일반적으로 렌즈의 가공오차와 조립오차에 의해 발생하는

TABLE 3. EFLs and Magnifications of each group for the first example in patent JP2006-284763

Group	EFL	Magnification		
		Wide (cfg 1)	Normal (cfg 2)	Tele (cfg 3)
1 st	101.141199	0.000000	0.000000	0.000000
2 nd	-14.926878	-0.196520	-0.369879	-0.838959
3 rd -1	27.767048	-0.985434	-2.227566	-2.785875
3 rd -2	-39.383124	-5.502011	-0.945612	-0.689108
4 th	39.575562	-0.171567	-0.882879	-1.194783

TABLE 4. Focus Sensitivities of each group for the first example in patent JP2006-284763

	Wide	Normal	Tele
1 st	0.03342	0.47316	3.70303
2 nd	0.83188	2.98535	1.55806
3 rd -1	0.02577	-2.76152	-4.58321
3 rd -2	-0.86163	0.08248	0.74963
4 th	0.97056	0.22052	-0.42751

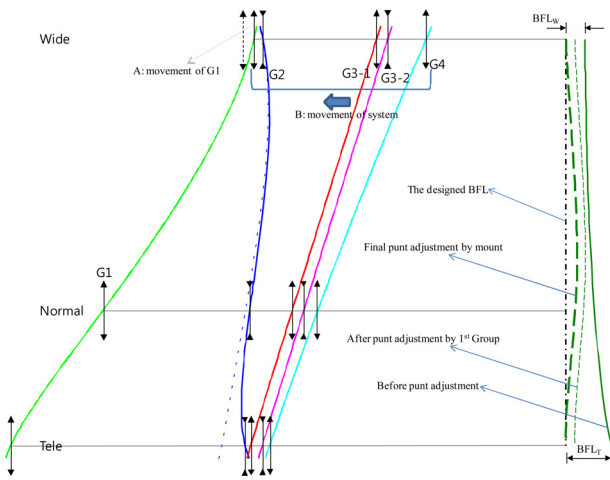


FIG. 5. Focus adjustment for the first example in patent JP2006-284763.

BFL의 변화는 광각단에서의 값과 망원단에서의 값이 다르다. 이 때 핀트 보정의 목표는 광각단과 망원단에서 모두 BFL의 변화량이 설계값인 0이 되도록 하는 것이다. 그러나 1개의 군만을 일률적으로 움직이면 광각단 또는 망원단의 한 곳에서만 보정이 가능하기 때문에 보정 지점이 2군데 필요하다. 일반적으로 본 논문에서 언급한 광학계와 같은 PLT (positive leading type) 형식의 광학계는 1군과 2군 사이의 거리와 광학계의 마지막 면과 촬상소자 사이의 간격을 조정하여 어긋난 핀트를 보정한다. 이때 광학계의 마지막 면과 촬상소자 사이의 간격을 조정하는 것은 광학계 전체가 조정된 양만큼 이동되는 것이며, JP2006-284763 실시예 1과 같은 교환렌즈용 광학계에서는 마운트면 간격을 조정하는 것과 같은 의미를 갖는다. PLT 형식의 모든 광학계에서 반드시 1군과 마운트면을 조정할 필요는 없으나, 광학계의 성능과 생산 공정 등을 고려했을 때, JP2006-284763 실시예 1에서는 1군과 마운트면으로 조정하는 것이 유리하다.

그림 5는 핀트 조정에 대한 그림이다. 여기서 굵은 곡선은 왼쪽부터 차례대로 1군(녹색선), 2군(청색선), 3-1군(적색선), 3-2군(분홍색선), 4군(연청색선)의 궤적이고, 가장 오른쪽 수직인 검은 일점쇄선은 설계된 광학계의 BFL이다. 광학계의 가공 및 조립 오차에 의해 BFL 변화가 생겨서 가장 오른쪽 녹색의 굵은 곡선과 같이 각 단에서 BFL이 변하게 된다. 만약 1군과 2군 사이에 간격 변화를 주게 되면, 1군의 종민감도가 광각단에서 작고, 망원단에서 크기 때문에 광각단 근처에서는 BFL이 작게 보정되고, 망원단에서는 크게 보정되는 것을 보여주는 가는 점선과 같아진다. 여기에 광학계 전체를 이동하면 광각단과 망원단에서의 BFL 변화가 0이 되므로, 녹색의 굵은 점선과 같게 된다. 그림 5의 중간단에서 보는 BFL의 변화인 녹색의 가는 점선처럼, 중간단에서는 핀트 보정이 되지 않으므로, 잔류 핀트는 AF군인 2군으로 보정해야 한다. 우선 2군의 보정량을 구하기 전에 1군 조정량과 마운트면 조정량을 구해 보고자 한다.

그림 5와 같이 광각단에서의 BFL이 BFL_W , 망원단에서의 BFL이 BFL_T 이고, 1군의 핀트 민감도가 p_1 , 마운트면의 종민감도가 p_M 이고, 1군의 조정량이 A, 마운트면의 조정량이 B 라면, 식 (7)로부터 다음과 같은 식 (10)이 성립한다. 여기서 첨자 W와 T는 각각 광각단과 망원단에서의 값을 의미한다.

$$\begin{aligned} p_{1,W} A + p_{M,W} B &= BFL_W \\ p_{1,T} A + p_{M,T} B &= BFL_T \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 미지수는 A와 B이다. 따라서 식 (10)을 A와 B에 대해 정리하면 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \frac{1}{p_{1,W} \cdot p_{M,T} - p_{1,T} \cdot p_{M,W}} \begin{bmatrix} p_{M,T} BFL_W - p_{M,W} BFL_T \\ -p_{1,T} BFL_W + p_{1,W} BFL_T \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (11)에서 마운트면의 종민감도 p_M 은 1군부터 4군까지의 각 군의 종민감도를 모두 더하면 되는데, 이는 각 군이 모두 같은 방향으로 마운트면의 이동량만큼 동일하게 움직이기 때문이다. 이렇게 해서 구하면 마운트면의 핀트 민감도 p_M 은 모든 단에서 항상 1이 되는데, 이는 핀트 조정을 위하여 각 단을 조정하여 줌 렌즈계가 종방향으로 이동한 양이 마운트만을 움직여서 핀트를 맞춘 종방향 이동량과 일치한다는 물리적 의미를 가지고 있다. 실제로 표 4의 종민감도를 모두 더하면 1이 됨을 확인할 수 있다. 어쨌든 식 (11)에 따라 1군은 A만큼 이동하고, 광학계 전체는 B만큼 이동시키면, BFL은 설계치 값을 갖게 되기 때문에 핀트 오차는 자동적으로 0이 된다.

V. 몬테카를로 전산시뮬의 결과

이 장에서는 JP2006-284763의 실시예 1의 줌 광학계에 대해 몬테카를로 전산시뮬으로 1군과 마운트 조정량을 결정하고자 한다.^[5] 사실 이에 앞서 각 렌즈면의 곡률과 두께, 굴절률 등에 대한 공차 분석을 해야 하나, 이를 위해서는 기구 설계도 같이 반영되지 않으면 안 된다. 따라서 본 논문에서는 각 면에 대한 공차가 결정되었다고 가정하고자 한다. 이러한 공차량은 앞 장에서 예를 들었듯이 뉴턴 무늬수는 5분, 두께는 0.05 mm로 하기로 한다. 굴절률의 경우, 특수한 경우가 아니면 소재 업체로부터 제공받는 공차값을 사용하며 최근 대다수의 소재 업체는 0.0005 내에서 품질을 관리하고 있으므로 굴절률 공차는 0.0005로 하여 계산했다.

그림 6은 JP2006-284763의 실시예 1에 대해 뉴턴 무늬수 5분, 두께 0.05 mm, 굴절률 0.0005 내에 균등 분포의 난수를 발생시켜서 BFL의 변화를 그린 것이다. 그림 6의 x축은 광각단에서의 BFL 변화량, y축은 망원단에서의 변화량을 그린 것이다. 이러한 제작 및 조립 오차에 따라 각 군의 군 배율이 변화하기 때문에 각 군의 종민감도도 바뀌게 된다. 그러

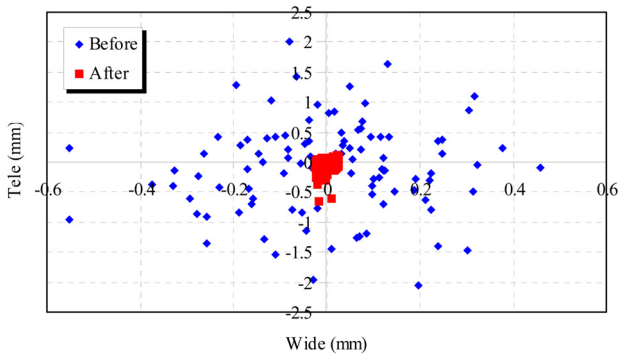


FIG. 6. Comparison of focus adjustments.

나 제조 공정에서 핀트 조정은 설계치를 기준으로 1군과 마운트 조정량을 통하여 최종 결정된다. 따라서 이론적인 종민감도와 실제 제품에서의 종민감도가 약간 다르게 되기 때문에 핀트 조정 후에도 BFL 변화량은 정확히 0이 되지 않는다. 그러나 잔류량은 AF 군인 2군으로 보상이 가능하므로 큰 문제가 되지 않는다. 그림 6과 같은 결과에서 조정 전, 광각단과 망원단에서의 BFL 변화량의 표준편차는 각각 0.190 mm, 0.765 mm이다. 이 값은 균등분포를 가정한 이론적인 예측값인 0.188 mm, 0.811 mm과 상당히 비슷한 값을 알 수 있다. 한편 핀트 조정을 하면 광각단과 망원단에서의 BFL 변화량의 표준편차는 각각 0.016 mm, 0.129 mm로 대폭 줄어드는 것을 알 수 있고, 그림 6에서 확인할 수 있다. 따라서 AF군인 2군에 의한 잔류 보정량은 핀트 조정 전보다 많이 줄일 수 있음을 알 수 있다. 한편 1군 분포도(검은 실선과 적색 사각기둥분포) 및 마운트 조정량 분포도(적색 점선과 녹색 사각기둥분포)는 그림 7의 히스토그램과 같으며 표준편차는 각각 0.212 mm, 0.191 mm이다. 이는 균등분포로 전산시뮬했을 때의 값이다. 따라서 각 부품의 오차 분포가 정규분포를 따른다면, 표준편차는 이 값의 $\sqrt{3}$ 배가 작아진다. 만약 각 부품의 분포를 삼각형 분포를 이루도록 하고, 중심치 이동 1.5 σ 를 고려한 6 σ 수준의 품질관리한다면, 1군 및 마운트 조정량은 각각 약 ± 0.9 mm, ± 0.7 mm로 결정하면 된다.

그림 8은 중간단에서는 보정 전(검은 실선과 적색 사각기둥분포)과 보정 후(적색 점선과 녹색 사각기둥분포)에서의 BFL 변화량의 빈도수를 보여주는 히스토그램이다. 이로부터 보정 전과 보정 후의 표준편차는 각각 0.459 mm, 0.413 mm로 큰 변화가 없으며, 이를 그림 8에서도 쉽게 알 수 있다. 또한 중간단에서는 그림 4(a)의 광로도에서 보는 것처럼 AF군의 앞뒤 공간이 충분하므로 문제가 되지 않는 것을 알 수 있다. 이 광학계를 최근 많은 회사에서 발표되고 있는 미러리스(mirrorless) 렌즈교환식 카메라에 사용하기 위해서는 대비식(contrast) AF를 해야 하며, 이를 위해서는 초점을 찾기 위한 탐색거리(searching margin)를 설정해야만 한다. 또한 온도 변화에 따른 BFL 변화, 기구적 간섭량 등을 모두 감안해야 한다면 핀트 보정량이 더 필요하다. 이를 위해서는 각 부품의 공차량을 보다 적절하게 조절해야만 한다.

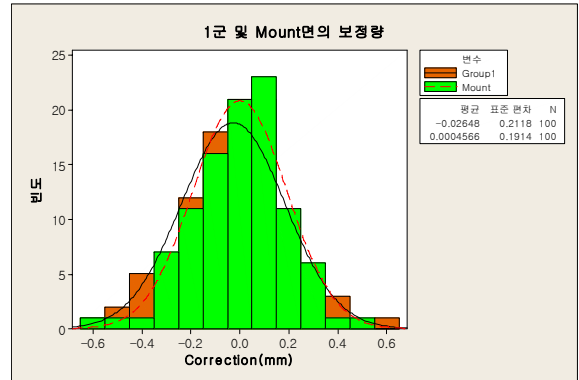


FIG. 7. Distributions of focus adjustments for group-1 and mount.

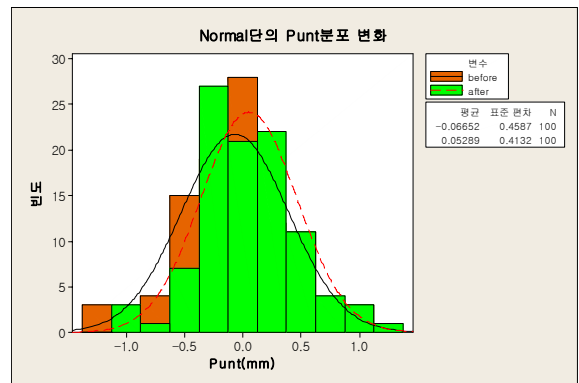


FIG. 8. Comparison of focus adjustments for normal.

VI. 결 론

렌즈교환식 카메라용 광학계는 제품의 사양에 따라 화각 범위가 매우 다양하여 여러 가지 형태의 광학계가 존재한다. 이러한 교환렌즈 광학계는 여러 카메라에 사용되어야 하므로, BFL이 설계치에 정확히 오도록 핀트 조정 공정을 거쳐야 한다. 물론 콤팩트 DSC용 광학계에서도 핀트 조정 단계가 있으며, 일반적으로는 AF군으로 조정을 하게 된다. 여기서 교환렌즈용 광학계의 형태에 따라서 AF군으로만 핀트 조정이 불가능한 경우도 많이 있다. 또한 광학계의 사용 목적을 고려하여 AF군의 보정량을 최소화할 필요도 있으므로, 다른 방법을 생각해야 한다.

이렇게 AF군으로만 핀트 보정이 불가능한 광학계도 광각단과 망원단 2곳에서 BFL이 설계치에 일치하도록 AF군 이외의 군으로 핀트 조정을 하려면, 최소한 2곳에서 핀트 조정이 이뤄져야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 핀트 조정 방법을 판단하고, 실제 핀트 조정을 위해 사용하게 되는 각 군의 종이동에 따른 BFL 변화량인 핀트 민감도를 정의하고, 관련된 식을 유도했다.

또한 AF군만으로 핀트 보정이 불가능한 광학계의 예를 들고, 광각단과 망원단의 BFL을 설계치에 맞출 수 있도록 조정 지점 2곳을 정하고, BFL 변화에 영향을 주는 설계 변수

를 난수 발생시켜서 조정 지점 2곳에 대한 조정량을 계산했다. 이 계산 결과의 잔류량을 보정하기 위한 AF군의 이동량도 계산하여, AF군만으로 핀트 보정을 했을 때보다 그 양이 많이 감소함을 확인했다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 한남대학교 학술연구구성비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

1. *Camera Lens Hyaka, Encyclopedia*, 1st ed. (Shashin Kogyo Shoppan Co. LTD, 2001, Japanese ed.), Chapter 76.
2. Dpreview.com, <http://www.dpreview.com/news/1001/10010402samsungnx.asp>.
3. Amateur Photographer, "AP award winners 2011," (IPC Media Ltd., 2011), http://www.amateurphotographer.co.uk/news/AP_Awards_2011_news_305140.html.
4. J. M. Ryu, G. M. Kang, H. J. Lee, H. K. Lee, and J. H. Jo, "Correction method for the variation of the image plane generated by various symmetric error factors of zoom lenses of digital still cameras and estimation method of defect rate due to the correction," *Hankook Kwanghak Hoeji* **15**, 420-429 (2006).
5. T. Suzuki and K. Usui, "Development of the 18-200 mm high zoom ratio lens system," *Optics Design Group of Opt. Soc. Japan (Japanese ed.)* No. 35 (2006).
6. S. Hayakawa, "Design of image stabilizing optical system," *Proc. SPIE* **3482**, 240-251 (1998).
7. K. Yamaji, "Design of zoom lenses," in *Progress in Optics VI*, E. Wolf, ed. (North-Holland, Amsterdam, The Netherlands, 1971), Chapter 4.
8. G. Suzuki, A. Shibayama, and T. Ito, "Zoom lens with vibration insulation," *Japan Patent* 2006-284763 (2006).
9. "Code V," is a registered trademark of ORA, <http://www.opticalres.com/>.
10. W. Mendenhall, R. J. Beaver, and B. M. Beaver, *Introduction to Probability and Statistics*, 12th ed. (Tomson Co., Toronto, Canada, 2006), Chapter 11.
11. A. M. Joglekar, *Statistical Methods for Six Sigma* (John Wiley & sons, Inc., New Jersey, USA, 2003), Chapter 5.