

초점거리 변화에 따른 렌즈 왜곡의 경험적 모델링

Empirical Modeling of Lens Distortion in Change of Focal Length

정성수¹⁾ · 허 준²⁾ · 우선규³⁾

Jeong, Seong Su · Heo, Joon · Woo, Sun Kyu

Abstract

The parameters of lens such as focal length, focus, and aperture stop changes while shooting the scenes with zoom lens. Especially, zooming action dramatically changes the geometry of lens system that causes significant change of lens model. We investigated how the lens model changes while zooming in general shooting condition. Each parameters of lens model was estimated and checked whether they can be modeled well in the condition of auto-controlling focus, aperture and vibration reduction. In order to do this, calibration images were taken, modeled in different focal length setting. And changing patterns of models were inspected to find out if there is some elements that have some particular pattern in changing with respect to focal length. The result showed us that although we didn't control the focus and aperture setting, there's specific changing patterns in radial and de-centering distortion. Especially, the strong linear correlation was found between coefficient of r^2 and focal length. It is expected that many parts of distortion can be eliminated without additional self calibration even if zoom operation is done when shooting the scenes if we know its focal length and model of this coefficient.

Keywords : Focal length, Zoom, Radial distortion, Lens distortion

초 록

줌 렌즈를 이용해 피사체를 촬영할 때 카메라 렌즈의 줌, 포커스, 조리개수치와 같은 요소들은 촬영 현장의 상황에 따라 변하게 된다. 특히 줌 조작을 하여 카메라 렌즈의 초점거리를 변화시키면 렌즈의 기하학적 배율은 크게 변하기 때문에 렌즈모델도 그에 따라 변하게 된다. 본 연구에서는 일반적인 카메라의 촬영 조건하에서 줌 조작시 렌즈모델이 어떻게 변하는지를 조사하였다. 이를 위해 포커스와 조리개 등의 요소를 카메라가 임의로 조절하는 상황에서도 모델의 각 요소들을 효과적으로 모델링할 수 있는지를 검토해보았다. 이를 위해 렌즈모델 추정을 위한 이미지를 촬영후 각각의 초점거리별로 자체검정을 실시하여 렌즈모델의 각 변수들을 수집하고 정리하였다. 그리고 수집된 데이터에서 패턴을 찾아 매개변수의 변화 양상이 특정한 패턴을 보이는지 관찰하였다. 그 결과 포커스와 조리개 수치를 통제하지 않는 조건임에도 불구하고 방사왜곡과 관련된 매개변수에서 일정한 패턴이 관찰되었으며 특히 방사왜곡의 2차항의 계수가 뚜렷한 선형성을 가지고 있음이 확인되었다. 이 계수를 모델링하고 촬영시의 초점거리를 알고 있으면 영상 촬영시 줌 조작을 하여도 별도의 자체검정 과정 없이 영상의 왜곡을 상당부분 제거할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 초점거리, 줌, 방사왜곡, 렌즈왜곡

1. 서 론

측량의 용도로 설계되지 않은 카메라를 측량의 목적으로

로 사용할 때 가장 유의해야 할 점은 카메라 렌즈의 왜곡을 어떤 식으로 모델링하여 보정할 것인가이다. 모든 렌즈는 어느 정도의 기하학적 왜곡을 가지고 있으며 그 정도

1) 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 석사과정(E-mail:tankloli@gmail.com)

2) 연결저자·정회원·연세대학교 사회환경시스템공학부 조교수(E-mail:jheo@yonsei.ac.kr)

3) 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 석사과정(E-mail:wsk0419@yonsei.ac.kr)

는 각각의 렌즈마다 다르다. 특히 줌 기능이 있는 카메라나 캠코더를 사용할 때에는 렌즈의 초점거리가 변할 때 렌즈의 기하 구조가 변하기 때문에 렌즈모델이 변하게 된다. 따라서 줌 렌즈를 측량용으로 사용하기 위해서는 단렌즈를 사용할 때와는 다르게 이에 대한 고려가 필요하다.

줌렌즈의 모델은 많은 학자들에 의해 연구되어왔다 (Fraser 등 2006 ; Chen 등, 2001 ; Wilson, 1994). 특히 Fraser 등(2006)은 그들의 논문에서 초점거리의 변화에 따른 렌즈모델의 각 요소의 변화를 선형관계로 근사하여 모델링 한 바 있다. 그런데 카메라의 특성을 파악하기 위한 실험을 수행시 렌즈모델 매개변수 계산을 위해 조작한 줌 렌즈의 초점거리 세팅은 5개 정도라서 보간을 실시함에 있어 오차가 발생할 여지가 있다. 그 외의 논문들에서도 줌, 포커스, 조리개 세팅을 엄밀히 통제하여 렌즈모델의 변화 양상을 모델링한 바 있으나(Chen 등, 2001 ; Wilson, 1994) 일반적인 저가의 카메라나 캠코더를 이용한 촬영시엔 렌즈의 포커스와 조리개 수치는 캠코더가 자동으로 제어한다. 따라서 이 변수들을 통제하는 것은 정확하고 엄밀한 실험 방법이지만 실용적인 측면에서는 다소 거리가 있다.

국내에도 줌 렌즈를 사용한 좌표 추출에 대한 연구가 보고된 바 있다. 한광수 등(2003)은 정밀 측정 장비에 이용되는 줌 렌즈를 이용해 영상소 크기의 변화와 이미지 중심의 이동에 대해 모델링 하였다. 그런데 실험에 사용한 렌즈의 기하적 왜곡이 작아 방사왜곡(radial distortion)이나 편심왜곡(de-centering distortion)을 고려하지 않았다. 그리고 유환희 등(2003)은 방송용 HDTV 카메라의 영상을 DLT 모델과 Tsai 모델을 이용해 3차원 좌표 추출결과 의 정확도를 비교분석 하였으나 렌즈의 초점거리 변화에 따른 카메라 내부표정 요소들의 변화는 고려하지 않았다.

본 연구에서는 DSLR 카메라와 렌즈의 초점거리를 변화시켜가며 렌즈의 모델링을 위한 이미지를 촬영하여 각 초점거리별로 모델링하였다. 특히 줌 이외의 다른 변수들을 카메라가 자동으로 제어 하도록 한 상황에서 렌즈 모델을 효과적으로 모델링할 수 있는지 조사하였다. 이를 위해 렌즈모델을 초점거리를 기준으로 정리하여 각 요소들의 변화 양상을 관찰하였다.

2. 실험방법

2.1 렌즈 모델

왜곡이 없는 이상적인 카메라에서 임의의 점의 좌표 (X, Y, Z) 와 카메라의 이미지 면에 투영된 좌표 (u, v) 사이

에는 식 (1)과 같은 관계가 성립한다(Bradski 등, 2006).

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 f_x 와 f_y 는 각각 카메라 좌표계 (x, y, z) 에서 x 방향과 y 방향 평면상에서 투영을 할 때의 초점거리를 의미하며 (c_x, c_y) 는 이미지 면을 기준으로 한 렌즈 주점의 좌표를 의미한다. 일반적으로 디지털 영상의 원점은 영상의 왼쪽 위 모서리를 사용하는 게 보통이므로 렌즈 주점의 좌표도 이를 기준으로 표현한다.

일반적으로 모든 카메라는 방사왜곡과 편심왜곡을 가지고 있다. 식 (2)와 식 (3)을 이용해 식 (1)에 이 왜곡요소들을 반영하면 영상면에서의 좌표 (u, v) 는 식 (4)로 표현할 수 있다(Bradski 등, 2006). 카메라의 내부표정 요소인 렌즈주점의 좌표 (c_x, c_y) , 방사왜곡항의 계수 (k_1, k_2, k_3) , 편심 왜곡항의 계수 (p_1, p_2) 는 식 (3)과 식 (4)를 통해 계산한다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \frac{1}{z} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x'' &= x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r_4 + k_3 r^6) + 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2) \\ y'' &= y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r_4 + k_3 r^6) + p_1 (r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x' y' \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u &= f_x x'' + c_x \\ v &= f_y y'' + c_y \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $r^2 = x'^2 + y'^2$ 이다. 실공간 좌표계(World coordinate, (X, Y, Z)), 렌즈 기준 좌표계 (x, y, z) , 영상면 좌표계 (u, v) 의 관계는 그림 1과 같이 표현할 수 있다.

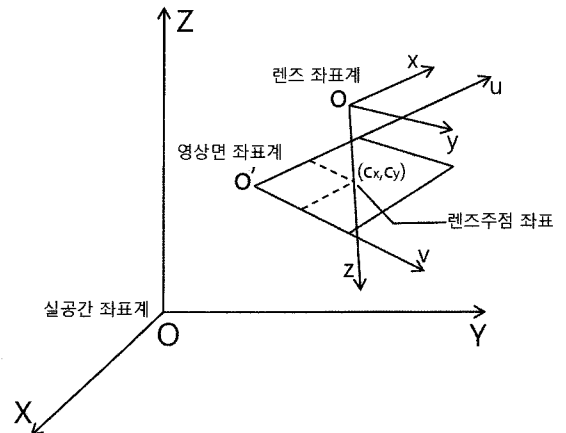


그림 1. 실공간좌표, 렌즈좌표, 영상면 좌표의 관계

추정된 모델은 영상소를 길이의 기준으로 사용한다. 즉 기준으로 사용한 LCD 모니터의 1영상소가 길이의 기본 단위가 된다. 일반적으로 렌즈모델 계산시엔 mm와 같은 물리적으로 정의된 단위를 사용한다. 그러나 디지털 카메라로 3차원 좌표를 추출할 때에는 영상을 영상소에 기반하여 처리하기 때문에 렌즈모델 내에서 수광소자의 치수나 물리적인 초점거리는 그다지 큰 의미를 가지지 않는다. 또한 mm 이외의 임의의 다른 길이단위를 사용한다고 하여도 그 배율이 초점거리(f)에 반영되기 때문에 왜곡변수의 변화 추이를 살펴보는 것이 목적인 경우 단위를 혼용하지 않는다면 이상 다른 길이 단위를 사용하여도 문제가 되지 않는다. 따라서 계산된 렌즈 모델의 각 왜곡요소들을 해석할 때는 값들의 절대적인 크기 보다는 상대적인 크기차이에 주목하여야 한다.

2.2 사용 장비

본 연구에 사용한 카메라는 Canon 사의 DSLR인 EOS 40D로서 약 1050만개의 영상소와 35mm 카메라 대비 1.6배의 환산초점거리를 가진다. 그리고 검정판은 별도로 제작하지 않고 대신 대형 LCD 모니터를 이용하였다. 실험에 사용한 DSLR 카메라와 교환식 렌즈, 그리고 LCD 모니터의 사양을 아래의 표 1~3에 정리하였다.

LCD 모니터를 검정판으로서 사용하려면 모니터는 보

표 1. 카메라 본체의 제원

제조사	Canon
모델명	EOS 40D
촬영해상도	3868*2592
수광소자 크기(mm)	22.2*14.8

표 2. 카메라 렌즈의 제원

제조사	Canon
모델명	EF-S 17-85mm IS USM f/4.0~5.6
렌즈군 구성	12군 17매
손떨림보정기능	있음(광학식)

표 3. LCD 모니터의 제원

제조사	Apple
모델명	Cinema M9179FE/A
화면크기	76.2cm(30")
해상도	2560*1600

는 각도에 따른 화면 색상의 변화가 적어야 한다. 각도에 따른 색상의 변화가 심하면 화면에 출력된 패턴에서 꼭지점을 추출할 때에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 검정판으로 사용한 30인치 애플 시네마 디스플레이 모니터는 S-IPS 패널을 사용함으로써 시야각의 변화에 따른 화면 색상의 변화 정도가 비교적 적은 편이다. 때문에 실험에 사용한 LCD 모니터는 기준점 추출을 위한 피사체로 충분히 사용 가능한 것으로 판단하였다. 실제로 기준점 추출을 위해 촬영한 영상을 육안으로 확인한 결과 비교적 고른 색상 분포를 보여주는 것으로 판단되어 이에 대한 문제는 없는 것으로 결론 내렸다.

2.3 실험방법

각각 다른 초점거리에서 촬영된 영상을 서로 다른 단렌즈의 영상이라고 가정할 후 자체검정(self calibration)을 통해 렌즈 모델을 계산하였다. 계산된 값들은 초점거리를 기준으로 정리한 후 각 렌즈모델 요소들의 변화와 그 회귀곡선을 통계적으로 추정하였다. 이 과정을 그림 2에 순서대로 정리하였다.

검정판으로 사용한 LCD 모니터의 해상도는 가로2560 영상소, 세로 1600영상소인데 본 실험에서는 한 변이 160

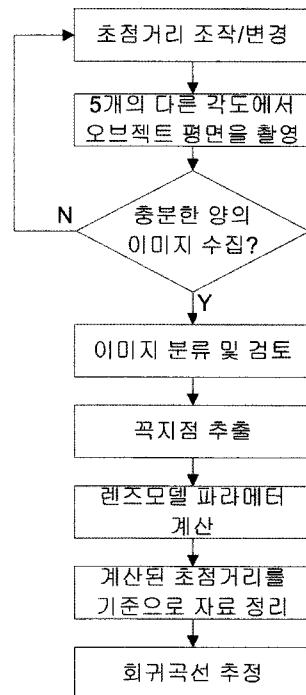


그림 2. 실험과정

영상소인 정사각형을 그림 3과 같은 체크무늬 형태로 배치하여 꼭지점을 추출하였다. 이 패턴을 그림 4와 같은 형식으로 LCD 모니터의 전체 화면에 출력한 후 초점거리를 동일하게 하여 5개의 다른 각도에서 촬영하였다. 촬영한 영상은 3888×2592영상소의 크기를 가지는데 보다 효율적인 데이터 처리를 위해 영상의 크기를 가로 1500영상소, 세로 1000영상소로 줄였다. 그 후 초점거리별로 분류하여 64개의 묶음을 만든 다음 각각의 묶음에 대해 각각 자체검정을 통해 렌즈모델을 추정하였다. 이때 영상 수집 후 육안으로 이미지를 검토하여 그림 5의 오른쪽처럼 심한 흔들림이 발생한 영상은 렌즈모델 추정을 위한 영상에서 제외하였다. 너무 과하게 흔들린 영상은 정확한 꼭지점 추출이 힘들기 때문이다.

일반적으로 줌렌즈를 모델링하기 위해선 조리개와 초점, 그리고 줌을 모두 고려하여야 한다(한광수 등, 2005). 그런데 일반 디지털 카메라를 이용한 촬영시엔 초점거리 이외의 변인은 카메라 내의 처리장치에서 자동으로 조절하게 된다. 이번 실험에는 DSLR의 줌렌즈를 사용하였는데 최대한 일반 디지털 카메라의 촬영환경과 비슷한 상황

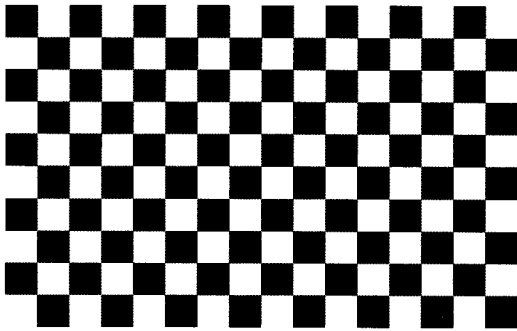


그림 3. 검정판의 무늬

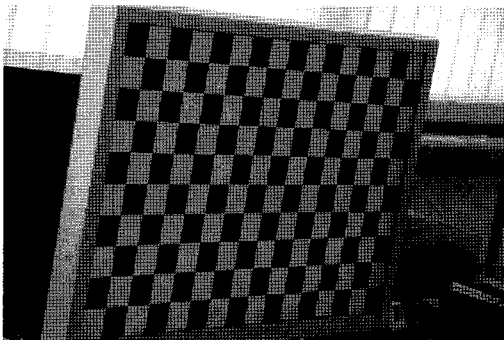


그림 4. 촬영 이미지의 예

을 만들기 위하여 영상 촬영시 카메라의 조리개와 셔터스피드를 카메라가 자동으로 조절하는 P 모드를 설정하고 오토 포커스를 사용하였다. 그리하여 조리개 수치와 포커스를 카메라에서 자동으로 조절하도록 하였다. 또한 렌즈의 손떨림 보정 기능도 사용하여 의도적으로 모델에 영향을 끼칠 수 있는 요소들을 통제하지 않았다. 그리하여 이런 요소들을 통제하지 않은 조건 하에서도 렌즈 왜곡변수들의 변화에 일정한 패턴이 발견되는지의 여부를 조사하였다.

렌즈 모델의 정확도를 검사하기 위해서는 그림 6과 같은 방법을 이용하였다. 렌즈모델을 통해 변환한 이미지상의 기준점의 좌표와 영상에서 추출된 꼭지점들의 x방향과 y방향의 좌표를 비교하여 그 차이의 변화를 살폈다.

2.4 왜곡모델 추정

각각 다른 초점거리상태에서 계산된 렌즈모델의 정보를 각각의 초점거리를 기준으로 정리하였다. 수집한 정보는 초점거리, 방사왜곡항의 계수, 렌즈 주점의 위치, 각 렌즈모델을 이용해 변환된 기준점의 영상위에서의 위치 (x_m, y_m) 와 영상에서 추출된 기준점의 좌표 (x, y) 의 차의 RMS이다. 각각의 변수들이 초점거리에 따라 어떤 형태로 변하는지 확인하기 위해 그래프로 그려 보았으며 일정한 변화 패턴이 보이는 경우 회귀곡선을 그려서 적절한

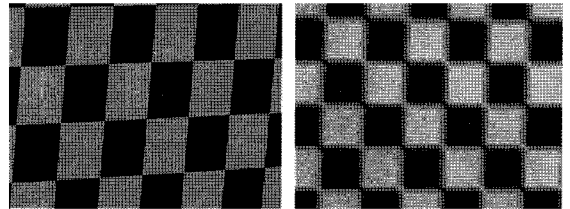


그림 5. 사용할 영상의 검토; 왼쪽: 자체검정에 사용 오른쪽: 자체검정에 사용 안함

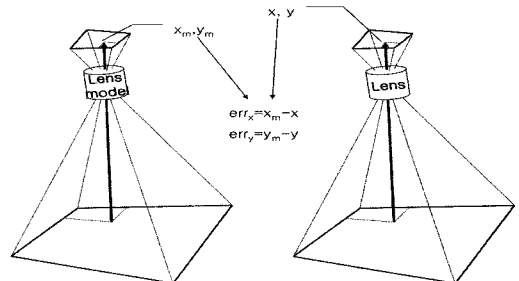


그림 6. 렌즈모델의 정확도 확인 방법

다항함수로 표현하였다.

3. 실험결과 및 분석

초점거리의 변화에 따른 방사왜곡, 편심왜곡, 렌즈주점의 편이를 관찰하고 일정한 패턴이 관찰되면 회귀곡선을 그려보았다. 그 결과는 다음과 같다.

3.1 방사왜곡

초점거리의 변화에 따른 k_1 , k_2 , k_3 의 값을 그래프로 그리고 최소제곱법을 이용해 변화 패턴을 추정하였다. 그런 다음 실험데이터와 추정곡선간의 잔차를 비교해보았다. 그 결과는 그림 7에 그래프로 정리하였다.

그리고 얻어진 데이터들을 이용해 각 매개변수의 변화의 회귀곡선을 그렸다. 각 곡선의 함수식은 식 (9), (10), (11)로 추정하였다.

$$k_1 = 2.1350 \times 10^{-4} f + 0.4083 \quad (9)$$

$$k_2 = -7.3027 \times 10^{-11} f^3 + 3.9827 \times 10^{-7} f^2 - 7.2534 \times 10^{-4} f + 0.6195 \quad (10)$$

$$k_3 = 0 \quad (11)$$

k_1 의 경우 초점거리가 변화에 따라 값이 증가하는 패턴을 보였다. 초점거리와 k_1 의 상관계수를 계산해 본 결과 그 값은 0.9975로 매우 뚜렷한 양의 상관관계를 가지고 있는 것으로 나타났다. 반면 k_2 는 초점거리에 대해 선형성이 발견되지 않아 3차 다항식의 회귀곡선을 그려보았다. 그 결과 데이터의 경향을 잘 반영하는 모습을 보였으

나 초점거리가 길어질수록 곡선과 데이터간의 잔차의 변동이 늘어남을 확인할 수 있었다.

한편 k_3 의 경우 초점거리가 변화여도 그 값이 항상 0으로 일정하였다. 일반적으로 방사왜곡은 한 개 또는 두 개의 향으로 대부분의 왜곡을 모델링할 수 있다는 것을 감안하면 모든 초점거리에서 k_3 이 0이 나온 실험 결과는 타당하다. 실용적인 측면에서 볼 때 방사왜곡에서 k_2 이후의 항은 그 양이 크지 않기 때문에 왜곡보정시 고려하지 않는 경향이 있다(Fraser 등, 2006). 그렇기 때문에 조리개와 포커스의 임의조절 조건 하에서 k_1 이 잘 모델링 된다는 것은 영상 촬영시 줌 조작을 하여도 렌즈의 초점거리를 알고 있으면 방사왜곡을 상당부분 보정할 수 있다는 것을 의미한다.

3.2 편심왜곡

초점거리의 변화에 따른 p_1 과 p_2 의 값은 그림 8과 같았으며 각 매개변수의 회귀식은 식 (12), 식 (13) 과 같이 추정하였다.

$$p_1 = 2.8245 \times 10^{-13} f^3 - 1.8374 \times 10^{-9} f^2 + 3.2003 \times 10^{-6} f - 0.0028 \quad (12)$$

$$p_2 = -3.4811 \times 10^{-13} f^3 + 4.0224 \times 10^{-9} f^2 - 1.3637 \times 10^{-5} f + 0.0107 \quad (13)$$

위의 패턴을 이용해 3차곡선으로 회귀곡선을 그려본 결과 방사왜곡의 k_2 와 비슷하게 초점거리가 길어질수록 회귀곡선과 계산된 매개변수 값 사이의 잔차의 변화폭이 커짐이 확인되었다.

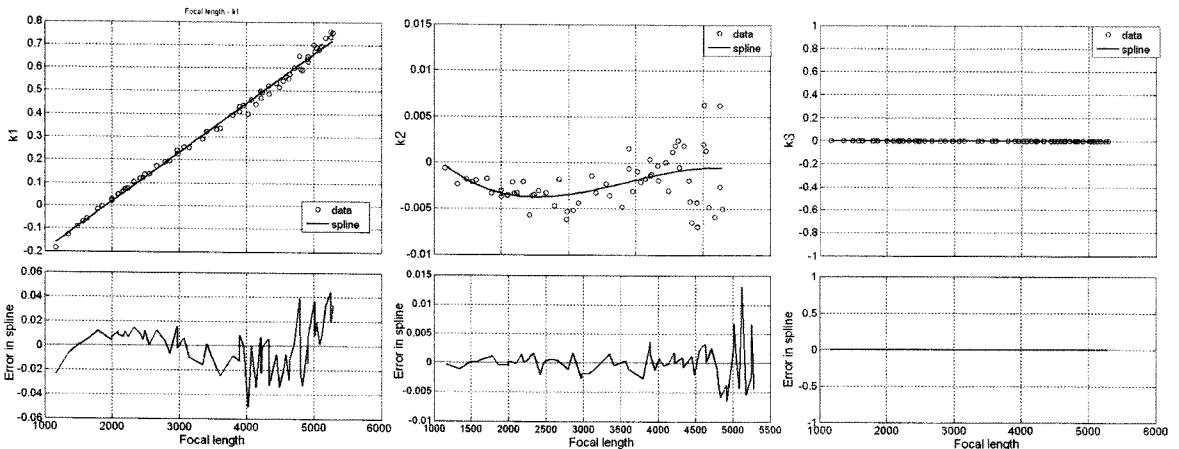


그림 7. 방사왜곡요소들의 변화패턴과 잔차 ; 왼쪽부터 순서대로 k_1 , k_2 , k_3

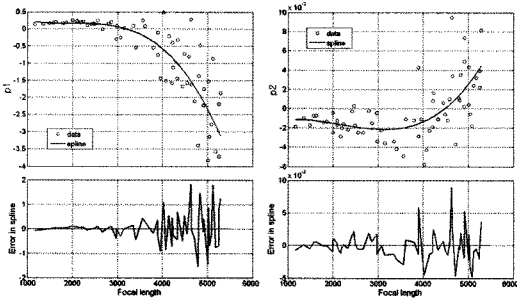


그림 8. 편심왜곡의 변화패턴 ; 좌 : p_1 , 우 : p_2

p_1 과 p_2 는 방사왜곡항의 계수인 k_1 비해 그 경향성이 강하지 않았다. 그런데 일반적인 렌즈는 편심왜곡보다 방사왜곡의 영향이 더 크기 때문에(Tsai, 1987) 기하왜곡을 개략적으로 보정할 때엔 접선왜곡(tangential distortion)은 무시하는게 보통이다(유복모, 2001). 또한 접선왜곡을 일으키는 p_1 과 p_2 의 분포 범위를 살펴보면 방사왜곡에 비해 그 양이 적음을 확인할 수 있다. 따라서 영상을 개략적으로 보정할 경우라면 편심왜곡의 영향을 무시해도 될 것으로 판단된다.

3.3 렌즈주점위치

영상면 상에서의 렌즈 주점의 위치의 변화를 그림 9에 표시하였다. 그래프에서 실선은 주점위치들의 평균적인 위치를 의미한다. 렌즈의 줌 조작을 통해 초점거리를 변화시키면 렌즈의 일부분이 렌즈 경통의 중심을 축으로 회전하므로 주점의 위치는 변하게 된다.

포커스와 조리개를 정밀하게 통제한 다른 연구들에서는 주점 위치의 변화 모습에서 뚜렷한 패턴이 발견된 바 있는데(Wilson, 1994 ; Chen 등, 2001) 이 실험에서는 초점거리의 변화에 따른 주점 위치의 변화 패턴에서 특별한 경향성이 발

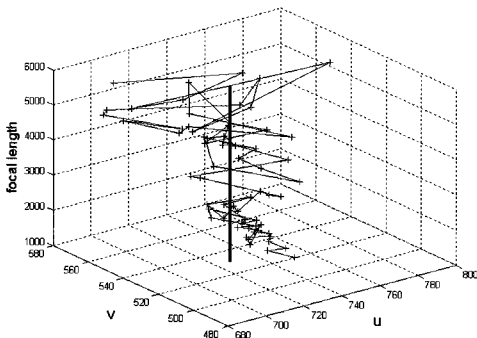


그림 9. 렌즈주점 위치의 변화 패턴

견되지 않았다. 이는 통제변인으로서 조리개 개방수치와 포커스를 고정하지 않았기 때문인 것으로 추측된다. 즉 포커스와 줌 조작 등에 의해 렌즈군의 회전각도는 임의로 정해지기 때문에 이러한 불규칙한 패턴을 보이는 것으로 여겨진다.

한편 조리개 개방수치 역시 렌즈의 내부표정 변수에 영향을 끼치는게 사실이나(Wiley 등, 1995) 많은 경우 그 양은 무시할 수 있을 정도로 작고(Li 등, 1996) 기준점의 추출에 끼치는 영향도 그다지 크지 않은 것으로 알려져 있어서(Chen 등, 2000) 여러 실험들에서 조리개 값을 고정한 채로 실험 영상을 취득하였다(Chen 등, 2001 ; Wilson, 1994). 따라서 이 실험에서도 조리개 개방수치에 의한 영향은 상대적으로 작을 것이라고 잠정적으로 결론지었다.

다만 특이한 것은 초점거리가 길어질수록 주점 위치의 변동 폭이 커진다는 것이다. 그림 10은 주점 위치의 평균 값에서 그 값이 얼마만큼 떨어져 있는지를 나타낸 것이다. 특정한 패턴은 보이지 않으나 대체로 초점거리가 클수록 값의 변동폭이 커짐을 확인할 수 있다. 초점거리가 길어진다는 것은 렌즈가 광각에서 망원의 성격을 띄게 된다는 의미를 가진다. 따라서 물리적으로 같은 길이의 편(bias)라도 줌렌즈가 망원의 영역으로 다가갈수록 그 양이 광학적으로 더 확대되어 보일 수 있다는 걸 의미한다.

3.4 모델의 정확도 변화

각 묶음별로 계산된 렌즈모델이 어느 정도의 정확도를 가지는지 확인해 보기 위해 패턴의 꼭지점들의 좌표를 이미지상의 좌표로 재변환 한 후 이미지에서 추출된 좌표와 비교하였다. 그림 11은 두 좌표간의 차이의 RMS의 변화를 나타낸 것이다. 한편 초점거리가 변할수록 오차의 양이 얼마만큼 증가하는지 알아보기 위해서 x축과 y축의

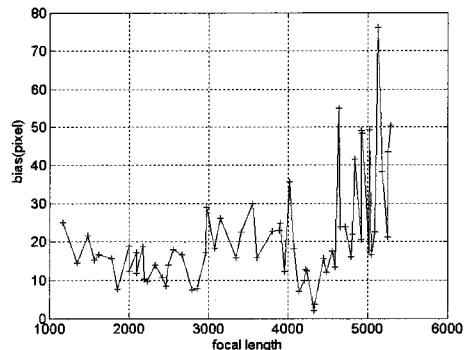


그림 10. 렌즈주점 위치의 변동량

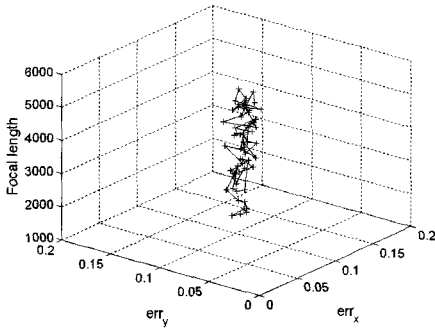


그림 11. 오차 평균의 변화 양상

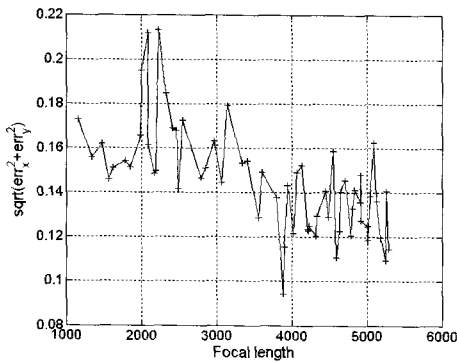


그림 12. 오차 제곱합의 제곱근의 변화

RMS 벡터의 놈(norm)을 계산하여 그 값이 어떻게 변하는지 그림 12를 통해 확인하였다.

그 결과 계산한 값과 초점거리와의 상관계수는 -0.6468 로서, 초점거리가 증가할수록 오차의 평균도 줄어드는 경향을 보이긴 하나 그 경향은 뚜렷하지 않았다. 그리고 이 값들의 평균은 0.1456 이었으며 표준편차는 0.023 으로 나타나 비교적 양호한 수준의 정확도를 가짐을 알 수 있었다.

4. 결 론

초점거리별로 렌즈 모델을 모델링하여 그 변화 양상을 조사한 이번 실험의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 포커스와 조리개, 그리고 손떨림 방지 기능을 카메라가 자동으로 조절하는 실험조건이었음에도 불구하고 방사왜곡과 편심왜곡항의 계수의 변화에서 패턴이 발견되었다. 특히 k_1 은 초점거리에 대해 뚜렷한 선형성을 가지기 때문에 비교적 잘 모델링됨을 확인하였다. 따라서 이를 이용해 방사왜곡항 계수의 변화패턴을 모델링하면

측량을 위한 영상을 촬영시 줌을 조작해도 별도의 자체검정 없이 방사왜곡의 상당부분을 보정할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 높은 정밀도를 요구하지 않는 상황이나 카메라로부터 비교적 가까운 지역의 사진 촬영시에 보다 자유로운 카메라 조작이 가능할 것이다. 다만 본 실험에서 발견되었던 계수 변화 패턴의 뚜렷함이 다른 렌즈에서도 발견되는지를 확인하기 위해 추가적인 실험이 필요할 것이다.

둘째, 방사왜곡과 편심왜곡과는 달리 렌즈 주점 위치의 변화에서는 별 다른 패턴이 발견되지 않았기 때문에 이를 모델링 할 수 없었다. 이는 카메라 렌즈의 포커스와 조리개 구동을 통제하지 않은 본 실험의 조건 때문인 걸로 생각된다. 다만 초점거리가 길어질수록 편이의 변동이 대체로 커짐을 확인할 수 있었는데 이는 초점거리가 확대되면서 그만큼 렌즈주점과 영상의 중점 사이의 편이가 광학적으로 확대되기 때문으로 풀이할 수 있다.

셋째, 초점거리 변화에 따른 오차 크기의 변화를 확인하기 위해 각 초점거리에서 카메라 모델을 이용해 계산한 꼭지점의 위치와 이미지에서 추출한 꼭지점 좌표를 비교하고 두 좌표간 차이와 그 증감의 패턴을 관찰하였다. 그 결과 비교적 정확하게 자체검정이 이루어졌음을 확인했으며 초점거리가 증가할수록 오차의 양이 줄어드는 패턴을 보였으나 그 경향성은 그리 강하지 않았다.

본 실험에서 발견된 k_1 의 강한 선형성은 다른 카메라에서도 발견된다고 단언할 수 없다. 렌즈의 줌과 포커스, 조리개를 제어하기 위해 사용하는 메커니즘과 구동 모터는 모델이나 제조사마다 다르기 때문에 모델을 구성하는 매개변수들과 렌즈 설정간의 관계는 대단히 복잡하다(Chen 등, 2001 ; Wilson, 1994). 그러므로 본 실험에서 발견된 k_1 변화의 선형성 및 모델링 가능성은 다른 렌즈와 카메라를 사용한 추가적인 실험을 통해 확인이 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시기술개발사업 - 지능형 국토정보기술 혁신사업과제의 연구비 지원(07국토정보C04)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

유복모 (2001), 사진측량학 개론, 사이텍미디어, pp. 50.

- 유환희, 정상용, 김성삼 (2003), 줌렌즈 CCD 카메라의 기하학적 검정 정확도 평가, *한국측량학회지*, 한국측량학회, 제 21권 제 3호, pp. 245-254.
- 한광수, 최춘수, 최기원 (2005), 컴퓨터 비전을 이용한 정밀 측정 장비의 줌 렌즈 캘리브레이션. *한국 인터넷 정보학회지*, 한국 인터넷정보학회, 제6권 5호, pp. 57-71.
- Bradski, G. et al (2006), OpenCV Documentation, Intel Corporation, California, <http://www.intel.com/technology/computing/opencv/>
- Chen, Y.S., Shih, S. W., Fuh, Y. P., and Fuh, C. S. (2001), Simple and Efficient method of calibrating a motorized zoom lens, *Image and Vision Computing*, Elsevier Science, 19(2001), pp. 1099-1110.
- Chen, Y. S., Shih, S. W., Hung, Y. P., and Fuh, C. S. (2000), Camera Calibration with a motorized zoom lens, *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, IEEE, Barcelona, Vol. 4, pp. 495-498.
- Fraser, C. S. and Al-Ajiouni, S. S. (2006), Zoom-Dependent Camera Calibration in Digital Close-Range Photogrammetry, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, ASPRS, Vol. 72, No. 9, pp. 1017-1026.
- Li, M. and Laveist, J-M. (1996), Some Aspects of Zoom Lens Calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE, Vol. 18, No. 11, pp. 1105-1110.
- Tsai, R. Y. (1987), A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, IEEE, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323-344.
- Wiley, A. G. and Wong, K. W.(1995), Geometric Calibration of Zoom Lens for Computer Vision Metrology, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, ASPRS, Vol. 61, No. 1, pp. 69-74.
- Wilson, R. G. (1994), *Modeling and Calibration of Automated Zoom Lens*, PhD thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.

(접수일 2008. 1. 29, 심사일 2008. 2. 12, 심사완료일 2008. 2. 18)