

# 저가형 디지털 카메라 적용을 위한 기하학적 왜곡 및 광도 왜곡 보정 방법

유원필<sup>o</sup> 정연구  
한국전자통신연구원, 컴퓨터&소프트웨어연구소  
{ywp<sup>o</sup>, ykchung}@etri.re.kr

## Geometric and Photometric Distortion Correction Method for Low Cost Digital Cameras

Wonpil Yu<sup>o</sup> Yunkoo Chung  
Computer & Software Research Laboratory, ETRI

### 요 약

본 논문에서는 카메라 렌즈에서 흔히 발견할 수 있는 렌즈계 왜곡에 의한 영상 품질 저하 현상을 소개하고 이를 보정하는 방법을 제시한다. 렌즈계 왜곡은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 기하학적 왜곡과 광도 왜곡이 그것이다. 이상적인 렌즈계가 아닌 경우 이러한 왜곡 현상은 필연적으로 발생을 하게 되는데 왜곡 보정을 위해서 기존의 카메라 캘리브레이션과는 다른 방식의 접근이 필요하게 된다. 본 논문에서는 기하학적 왜곡 보정을 위한 이미지 워핑 방법을 제시하며 아울러 광도 왜곡 보정을 위한 보정 방법을 다루고자 한다.

### 1. 서 론

최근의 카메라 기술의 발달로 인해 소형 디지털 카메라의 상용화가 활발히 시도되고 있다. 특히 휴대형 단말에 적용되는 디지털 카메라에 사용되는 이미지 센서의 경우 CMOS 이미지 센서가 많이 채용되고 있으며 향후 그 수가 더욱 증가될 것으로 전망된다. 이것은 CMOS 이미지 센서의 경우 센서와 센서 제어를 위한 전자 회로를 하나의 단일 칩으로 구현할 수 있으며 디지털 센서 출력을 직접 얻을 수 있기 때문에 디지털 카메라에 적용하기에 매우 손쉬운 뿐만 아니라 소자 자체의 품질도 꾸준히 개선되고 있기 때문이다. 특히, 무선 인터넷의 활용이 점차 일반화되고 PDA 나 스마트 폰 등 정보 단말의 사용자 층이 확대됨에 따라 저가형 디지털 카메라는 거의 모든 정보 단말기에 채용될 것으로 여겨진다.

CMOS 이미지 센서는 현재까지 주로 저가형 디지털 이미징에 응용이 많이 되고 있고 이런 종류의 디지털 카메라는 제조 원가에 대한 제약에 의해 저품질의 광학계를 주로 채용하고 있어 렌즈계의 왜곡에 의한 영상의 품질 저하가 두드러진다. 기존의 렌즈 왜곡을 다루는 연구 결과는 주로 기하학적 왜곡을 보정하는 것에 초점이 맞추어져 있는 것이 대부분이다. 특히, 컴퓨터 비전 및 그래픽스, 원격 탐사 영역에서 렌즈의 기하학적 왜곡 보정 기법이 많이 활용되어 왔는데 이러한 영역에서는 촬영 대상체에 대한 기하학적 정

보가 미리 주어지거나 특별히 고안된 캘리브레이션 대상체를 활용하는 것이 대부분이다.

하지만, 저가형 디지털 카메라를 이용하는 응용의 경우 일반 사용자가 이러한 카메라 캘리브레이션 기술을 일상에 적용하기에 곤란하므로 디지털 카메라를 제조하는 단계에서 카메라 파라미터를 미리 측정하여 비휘발성 메모리류에 저장하거나 영상으로부터 직접 카메라 변수를 추정하는 식의 방법을 적용하는 수 밖에 없게 된다. 특히, 저가의 소형 디지털 카메라의 경우에는 적용할 수 있는 렌즈의 부피가 한정되기 때문에 물리적으로 렌즈 왜곡을 보정할 수 있는 광학계를 설계 혹은 제조하는 것이 매우 어렵다. 따라서, 렌즈 왜곡 변수를 계산하여 소프트웨어적으로 보정하는 것이 광학계의 개선을 통한 보정 방식보다는 비용면에서 훨씬 매력적이며 실제 구현에서의 유연성을 가진다고 생각해 볼 수 있다.

한편, 렌즈계의 왜곡에 의한 영상의 품질 저하는 기하학적 왜곡 이외에 광도 왜곡(photometric distortion)에 의한 vignetting 효과에도 상당 부분 기인하고 있다. Vignetting 에 의한 영상 품질의 저하는 영상의 중심으로부터 방사 방향으로 갈수록 밝기가 감소하는 형태로 나타나게 된다. 기존의 카메라 캘리브레이션에서는 광도 왜곡에 의한 영상 보정을 다루고 있는 경우가 매우 드문데 이것은 카메라 캘리브레이션이 주로 사용되는 컴퓨터 비전 영역의 경우 영상

내의 특징점들의 기하학적 정보 추출에 주로 관심을 가지고 있기 때문이다. 하지만 일반 사용자용 디지털 카메라의 경우에는 영상의 품질을 다루고 있기 때문에 매우 중요한 문제가 된다. 더 나아가 영상 정보를 다루는 경우에도 비록 특징점의 기하학적 정보 추출이 목적이더라도 전처리 단계에서의 thresholding 이나 영상 인식 응용, 이미지 모자이크 합성 등의 경우에 중요한 문제로 부각된다.

본 논문에서는 렌즈계 고유의 기하학적 왜곡 보정에 대한 방법을 제시하고 아울러 광도 왜곡에 의한 밝기 왜곡 보정 방법을 제시하고자 한다. 먼저 2 절에서 기하학적 왜곡 보정에 대한 방법을 제안하며 3 절에서 vignetting 효과 보정 기술에 대한 소개를 하며 4 절에서 향후 연구 방향에 대해 설명하도록 한다.

## 2. 기하학적 왜곡 보정

본 연구에서는 렌즈 기하학적 왜곡 보정을 위한 광학계 모델로 컴퓨터 비전에서 일반적으로 채용하고 있는 방사상 왜곡 모델(radial lens distortion model)을 채택하도록 한다. 카메라 캘리브레이션 연구에서 일반적으로 잘 알려져 있는 바와 같이 기하학적 왜곡은 크게 두 가지 형태로 구분할 수 있다. 즉, 방사상 왜곡과 접선 방향의 왜곡이다 [1]. 하지만, 실질적으로 최종 영상의 품질을 결정하는 것은 방사상 왜곡의 영향이 가장 두드러지며 실제 보정 대상에서도 접선 방향의 왜곡은 무시하는 것이 일반적이다. 방사상 왜곡 모델은 다음과 같이 2 차식으로 모델링한다.

$$x_u = x_d(1 + \kappa r_d^2), \quad (1)$$

$$y_u = y_d(1 + \kappa r_d^2). \quad (2)$$

여기서  $r_d = \sqrt{\mu x_d^2 + y_d^2}$ 의 관계가 있으며 이것은 이미지 센터에서 픽셀 좌표  $(x_d, y_d)$ 까지의 거리이다. 본 방법에서 계산하고자 하는 기하학적 왜곡 변수는  $\kappa$ 에 해당하며  $\mu$ 는 scale factor ratio이며 카메라 캘리브레이션을 통하여 계산할 수 있다. 카메라 캘리브레이션 방법과 scale factor ratio 및 이미지 센터 처리 방법은 [2]에 자세히 기술되어 있다. 기하학적 왜곡 변수를 계산하기 위해 식 1-2를 극좌표계로 변환한다. 즉,

$$r_u = r_d(1 + \kappa r_d^2), \quad \text{여기서 } r_u = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}. \quad (3)$$

여기서  $\kappa r_d^2 \ll 1$ 를 가정하면 식 3은 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$r_u \approx \frac{r_d}{1 - \kappa r_d^2} \Rightarrow r_d = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\kappa r_u^2}}{2\kappa r_u}. \quad (4)$$

식 4로부터 기하학적 왜곡 보정을 위한 이미지 워핑 함수를 구하였고 결과 영상의 픽셀 좌표값에 해당하

는 픽셀값은 원영상의 픽셀 좌표값에 대한 보간(interpolation)값으로 구해진다. 원영상의 좌표값은 극좌표계로부터 Cartesian 좌표값으로 변환을 하여 정해진다. 즉,

$$\theta_u = \tan^{-1}\left(\frac{y_u}{x_u}\right) = \theta_r = \tan^{-1}\left(\frac{y_d}{x_d}\right). \quad (5)$$

이상의 결과를 이용하여 기하학적 왜곡 보정을 취한 결과는 그림 1과 같다. 그림 1은 상용 PDA에 사용되는 디지털 카메라를 이용한 것이다.

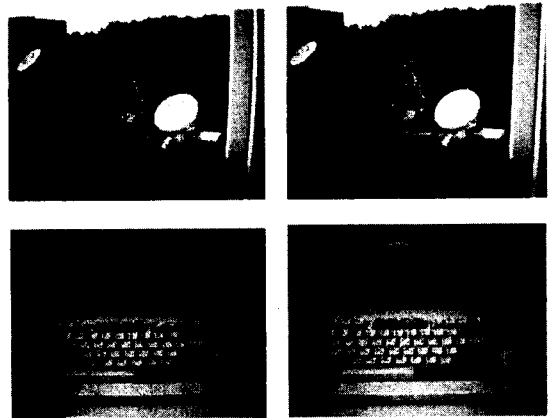


그림 1. 렌즈 왜곡 보정 전(왼쪽) 영상과 왜곡 보정 후(오른쪽)의 영상.

## 3. 광도(Photometric) 왜곡 보정

이미 잘 알려져 있는 바와 같이 이상적인 렌즈계인 경우광축에서 벗어나 있는 지점의 시선각이  $\phi$ 라고 했을 때  $\cos^4 \phi$ 에 비례하여 이미지 평면에서 측정되는 빛의 세기가 감소된다. 한편, vignetting 현상은 광축에서 벗어난 incident light가 렌즈계를 통과하면서 실린더 형태의 경로를 형성하면서 발생하는 것이다. 쉽게 말하자면 빛이 앞단의 렌즈와 최후단의 렌즈에 의해 일부분 차단되는 것으로 설명할 수 있다. Vignetting 현상에 의해 실제 영상에서는 가장자리 부근으로 갈수록 방사형으로 어두운 영역이 나타나게 된다. Vignetting 현상은 렌즈의 F/#가 클수록 감소하게 되는데 극단적으로 유효 구경(effective aperture)이 제로가 되는 핀홀 렌즈인 경우에는 vignetting 현상이 나타나지 않게 된다 [3].

$\cos^4 \phi$ 에 비례한 밝기의 감소는 보정이 불가능하지만 vignetting에 의한 영상의 품질 저하를 보정하기 위한 연구는 오래 전부터 진행되어 왔다. 예를 들어, 기상 관측을 위한 위성 영상에서의 보정, 비행 시뮬레이터 제작을 위한 모자이크 합성시의 광도 보정,

threshold 적용을 위한 영상 개선 등 전처리 과정과 고급형 카메라 제작을 위한 기술로 주목을 받아 왔다. 최근의 휴대형 단말용 디지털 카메라의 경우에는 vignetting에 의한 영상 품질의 저하가 매우 두드러지는 경향이 있어 영상 품질 개선의 측면 뿐만 아니라 향후 영상 정보 처리의 관점에서도 영상 획득의 한 단계로서 필요한 부분이다.

그림 2는 [3]에서 제안한 varying cylinder 모델을 적용했을 때 incident light의 입사각이 제로가 아닌 경우에 위치에 따른 밝기 레벨의 감소를 나타낸 것이다. 이러한 특성은 대부분의 렌즈계에 있어 일반적인 현상으로 기존에 제안된 방법은 거의 대부분 가장자리 영역의 픽셀에 대해서 측정된 밝기 레벨을 증가시키는 방법을 취하여 보정을 실시하고 있다.

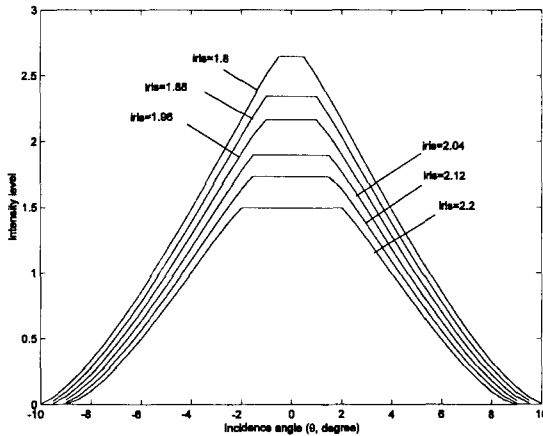


그림 2. 입사 각도가 변함에 따른 밝기 레벨의 변화. 각각의 그래프는 줌렌즈를 사용했을 때 조리개의 위치를 변경하면서 계산한 값이다.

본 연구에서 적용한 vignetting 보상 함수의 형태는 다음과 같다.

$$P_{mn} = P_{mn} + a(R^b - 1), \quad (6)$$

여기서  $P_{mn}$ 은  $(m,n)$ 에서의 픽셀값,  $R$ 은 미리 정해진 방사상 (radial) 거리의 임계치와 현재 픽셀 위치  $(m,n)$ 까지의 거리의 비율이며  $a, b$ 는 photometric 캘리브레이션을 통해 결정된 상수값이다. 식 6은 [4]에서 제안된 방법을 적용한 것이며 이 외에도 vignetting 보상 기법은 대부분 방사 방향으로의 보상을 통해 밝기 왜곡을 보정하는 방식을 채용하고 있어 뚜렷한 차이점을 발견하기 어렵다. 그림 3은 식 6에서  $a=3, b=2$ 를 적용했을 때 실내 영상에 대해 vignetting 보상을 취한 결과를 나타낸 것이다. 이 때 사용한 카메라는 저가형 USB 카메라를 이용하였다. 그림 3의 결과를 포함하여 다양한 실험에서

vignetting 보상 효과에 의해 영상의 품질이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 카메라 광학계에서 발견되는 왜곡을 두 가지로 분류하여 각각에 대해 보정 방법을 제시하였다. 흔히 기하학적 왜곡 보정만을 많이 다루고 있는 반면 본 연구에서는 photometric 캘리브레이션의 중요성을 설명하였으며 실제 영상에 대해 vignetting 보상 방법을 적용하였고 결과를 제시하였다. 향후 연구 방향은 vignetting 보상의 경우에 보상 후의 영상의 품질의 향상 정도를 나타낼 수 있는 측정 함수를 개발하는 것과 특별히 고안된 조명 조건이 아닌 일반 촬영 환경에서 획득된 영상을 이용하더라도 photometric 왜곡 보정을 적용할 수 있는 알고리즘의 개발이다.

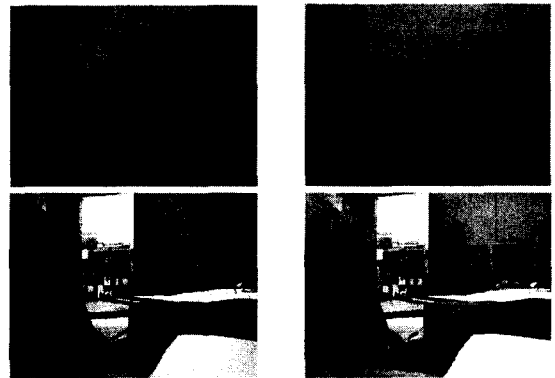


그림 3. 원영상(왼쪽)과 식 6을 적용하여 vignetting 보상을 취한 결과(오른쪽).

#### 참고 문헌

- [1] R. Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 3, no. 4, 1987, pp. 323-344.
- [2] 유원필, 이형구, 정연구, "내장형 렌즈 왜곡 보정 알고리즘 구현을 위한 이미지 워핑 방법," 제 18회 한국정보처리학회 추계학술대회 논문집, 제 9권 제 2호, pp. 673-676.
- [3] N. Asada, A. Amano, and M. Baba, "Photometric Calibration of Zoom Lens Systems," IEEE Int. Conf. on Pattern Recognition, vol. 1, pp. 186-190, 1996.
- [4] Y. P. Chen and B. K. Mudunuri, "An Anti-vignetting Technique for Superwide Field of View Mosaicked Images," J. of Imaging Technology, vol. 12, no. 5, pp. 293-295, 1986.