

# 내장형 렌즈 왜곡 보정 알고리즘 구현을 위한 이미지 워핑 방법

유원필, 이형구, 정연구  
한국전자통신연구원,  
컴퓨터.소프트웨어연구소, 휴먼정보처리연구부  
e-mail: {ywp, hgl, ykchung}@etri.re.kr

## An Image Warping Method for Implementation of Embedded Lens Distortion Correction Algorithm

Wonpil Yu, Hyunggu Lee, Yunkoo Chung  
Human Information Processing Dept.,  
Computer & Software Research Laboratory, ETRI

### 요 약

저가형 디지털 카메라에 사용되는 광학계의 경우 상대적으로 많은 렌즈 왜곡을 보인다. 이러한 현상은 제조 가격 및 소형 구현시의 제한에 기인하는 것으로 렌즈 재설계를 통한 물리적 보정에는 비용 및 구현시 부피 등의 측면에서 바람직하지 못한 것으로 여겨진다. 본 연구에서는 이러한 렌즈 왜곡을 소프트웨어 측면에서 보정하는 경우에 카메라 캘리브레이션을 통한 렌즈 왜곡 변수를 계산하는 방법 및 계산된 렌즈 왜곡 변수를 이용하여 왜곡된 원영상을 이미지 워핑을 통해 보정하는 방법에 대해 알아본다. 아울러 이러한 방법의 적용 타당성을 살펴보기 위하여 카메라 캘리브레이션을 통해 scale factor ratio 및 이미지 센터와 같은 카메라 상수를 처리하는 방식에 대해 살펴보고자 한다.

### 1. 서론

최근의 카메라 기술의 발달로 인해 소형 디지털 카메라의 상용화가 활발히 시도되고 있다. 디지털 카메라에 사용되는 이미징 소자의 경우 아직까지 CCD 이미지 센서가 많이 채용되고 있으며 CMOS 이미지 센서를 이용하는 경우에는 픽셀의 품질이 아직까지는 열악한 이유로 주로 저가형의 디지털 카메라에 많이 채용되고 있는 추세이다.

하지만, 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 손쉬우며 소자 자체의 품질도 꾸준히 개선되고 있어 향후 CMOS 이미지 센서를 채용한 디지털 카메라의 응용의 범위가 확대될 것으로 예상된다. 특히, 무선 인터넷의 활용이 점차 일반화되고 PDA 나 스마트폰 등 정보 단말의 사용자 층이 확대됨에 따라 저가형 디지털 카메라라는 거의 모든 정보 단말기에 채용될 것으로 여겨진

다.

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 렌즈 왜곡에 의한 영상의 품질 저하가 두드러진다.

전통적으로 렌즈 왜곡 보정은 컴퓨터 비전 및 그래픽스, 원격 탐사 영역에서 많이 활용되어 왔는데 이러한 영역에서는 촬영 대상체에 대한 기하학적 정보가 미리 주어지거나 특별히 고안된 캘리브레이션 대상체를 활용하는 것이 대부분이다 [1, 4, 5, 6]. 이 외에도 미리 결정된 특별한 카메라 모션을 이용하여 렌즈 왜곡 변수를 추출하는 사례가 많이 보고되고 있다.

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

라 변수를 추정하는 식의 방법을 적용하는 수 밖에 없게 된다 [3].

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 생각할 수 있다.

한편, 렌즈 왜곡을 보정하는 방법은 이처럼 소프트웨어적인 방식으로 접근한다고 하더라도 실시간으로 정보 기기의 내부에서 영상을 왜곡 보정하기 위해서는 미리 결정되어 있는 알고리즘을 구현 단계에서 적절히 처리해 주어야 할 필요가 있다. 특히 현재의 DSP 프로세서의 성능이 꾸준히 개선되고 있고 ARM 프로세서와 같은 범용 프로세서 코어와의 결합에 의한 SoC(System-on-Chip) 코어의 발표가 이루어지고 있으므로 기존의 다양한 영상 보정 알고리즘의 구현 기술에 대한 고찰이 필요하다고 여겨진다.

본 연구에서는 저가형 디지털 카메라에서 흔히 발생하는 영상 왜곡을 보정하기 위한 알고리즘의 개발과 이의 실시간 구현을 위한 단계에서의 기술적인 고려 사항에 대하여 살펴보고자 한다. 특히, 카메라 캘리브레이션을 이용하는 경우에 적용 단계에서의 카메라 상수의 결정, 왜곡 변수를 이용한 이미지 워핑(warping)을 이용하는 경우 역 공간 매핑(inverse spatial mapping)의 적용 방법에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 렌즈 왜곡 변수 추정을 위한 카메라 캘리브레이션 방법

본 연구에서는 렌즈 왜곡 보정을 위한 광학계 모델로 컴퓨터 비전에서 일반적으로 채용하고 있는 방사상 렌즈 왜곡 모델(radial lens distortion model)을 채택하도록 한다. 카메라 캘리브레이션 연구에서 일반적으로 잘 알려져 있는 바와 같이 렌즈의 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 왜곡의 경우 정교한 렌즈 모델을 수립하기 위해서는 무한개의 고차 함수를 포함하는 모델이 사용되어야 하지만 2 차 함수 이상의 고차항은 실질적으로 의미가 없으며 적용하는 경우에도 오히려 수치 연산에서의 불안정성을 유발하는 등 역효과를 유발한다. 본 연구에서는 이러한 성질을 감안하여 방사상 렌즈 모델을 다음과 같은 2 차식으로 모델링한다.

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

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

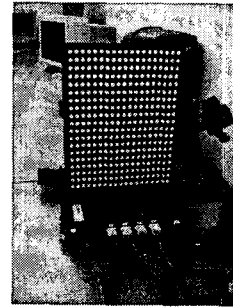


그림 1. 카메라 캘리브레이션을 위한 실험 장치

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 렌즈 왜곡 변수는  $\kappa$ 에 해당하며  $\mu$ 는 scale factor ratio이며 카메라 캘리브레이션을 통하여 계산할 수 있다. 카메라 캘리브레이션 방법은 RAC(Radial Alignment Constraint)에 기반한 두 단계 방법을 이용하도록 한다 [1]. 그림 1은 실제 카메라 캘리브레이션 적용을 위한 실험 장비를 나타낸 것이다. Scale factor ratio를 계산하기 위해서는 일반적으로 non-planar 물체를 캘리브레이션 대상으로 사용하여야 하지만 본 방법의 경우 평면 형태의 캘리브레이션 그리드를 채용하고 있는 이유로 캘리브레이션 그리드를 미리 정해진 거리만큼 평행 이동 시키고 각 이동시마다 캘리브레이션 그리드의 특징점을 추출하여 scale factor ratio를 계산하는 방식을 이용하도록 한다. 위의 실험에 사용된 이동 장치로 단위 이동의 해상도가  $2 \mu m$ 를 제공하는 XYZ 스테이지 장비를 사용하였고 scale factor ratio를 구하기 위해 3 mm 씩 4 번 이동을 하고 각각의 위치에서 scale factor ratio를 구하고 이를 평균하여 scale factor ratio에 대한 대표값으로 사용하도록 한다.

현재 대부분의 상용 영상 획득 장비의 경우에는 채용된 이미지 소자의 물리적 픽셀이 정사각형이 아니더라도 내부 디지털라이저에 의해 정사각형 픽셀의 형태로 제공되고 있으며 특히 CMOS 이미지 센서의 경우 정사각형 픽셀로부터 디지털 영상을 직접 획득할 수 있으므로 scale factor ratio가 실질적으로 1.0에 가깝게 될 것이라고 예상할 수 있다.

이러한 성질이 실제로 적용 가능한지를 알아보기 위해서 일반 CCD 카메라를 이용하여 scale factor ratio를 측정하는 경우 표 1과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이때 표 1은 하니웰사의 GC455NK 줌 카메라와 Matrox사에서 제조하는 Meteor-II 스탠더드형 영상 그라버(grabber)를 이용한 결과이다. 이 때, CCD 카메라의 물리적 픽셀 크기는  $4.75\mu m \times 5.55\mu m$ 이다. 사용된 CCD 카메라는 줌 렌즈를 채택하고 있어 전체 줌 영역을 등간격으로 10 단계로 나누어 각 단계에서 구한 scale factor ratio를 표 1에 나타낸 것이다.

표 1. 10 단계의 줌 위치에서의 scale factor ratio 의 변화

줌위치	1	2	3	4	5
$\mu$	1.0032	1.0021	1.0032	1.0019	1.0029
줌위치	6	7	8	9	10
$\mu$	1.0078	1.0066	1.0182	1.0022	1.0032

표 1에서 알 수 있듯이 scale factor ratio 는 실질적으로 1로 설정하여도 무방하며 이러한 결과는 다른 종류의 카메라의 경우에도 마찬가지로 나타난다. 즉, PDA 용 카메라인 JK710DC 를 이용하는 경우 scale factor ratio 는 1.0097 의 값을 얻을 수 있었으며 삼성 MPC-C10 USB 카메라의 경우 1.0064 의 값을 얻을 수 있었다.

렌즈 왜곡 보정을 위한 또 하나의 카메라 상수인 이미지 센터의 경우에는 scale factor ratio 와는 다르게 실제 실험에서 그 위치를 정확하게 추정하는 것은 매우 어렵다. 이것은 물리적 픽셀의 크기가 대부분  $10^{-6}m$  의 수준에서 결정되기 때문에 이러한 측정 단위를 단순한 영상 특징 (feature)만을 이용하여 결정한다는 것은 매우 어려운 일이다. 실제로 이미지 센터를 정확하게 구하는 것은 [7]에서 시도한 것과 같은 레이저를 이용하는 방법이다. 하지만, 이 방법을 시도하는 것은 고비용과 장비에 대한 숙달 및 일반 제조사의 적용에 어려움이 있게 된다. 본 연구에서는 이미지 센터를 직접 추출하는 방식 대신 이미지 센터의 잘못된 추정에 의해 렌즈 왜곡 보정 후의 최종 영상에서의 품질의 저하가 어떻게 발생하는지를 살펴보고 이미지 센터의 적절한 선택 방법에 알아보려고 한다.

이미지 센터의 영향에 대해 알아보기 위한 과정은 다음과 같다.

1. 카메라 캘리브레이션을 통한 렌즈 왜곡 변수의 추정
2. 임의의 위치로 이미지 센터값을 설정
3. 설정된 이미지 센터값과 렌즈 왜곡 변수를 이용하여 이미지 워핑을 적용
4. 워핑 후의 결과 영상에 대한 왜곡을 계산

다음 절에서 설명한 이미지 워핑 방법은 역공간 매핑을 적용하도록 하며 결과 영상에 대한 왜곡율은 다음의 예리 함수(SSE: Sum of Square Error)를 정의하도록 한다.

$$SSE = \sum_{n=1}^N \left| \frac{Y_{n1} - Y_{n2}}{X_{n1} - X_{n2}} - \frac{Y_{n2} - Y_{n3}}{X_{n2} - X_{n3}} \right|^2, \quad (3)$$

위 식에서  $(X_{n1}, Y_{n1}), \dots, (X_{n3}, Y_{n3})$  는 그림 1 의 캘리브레이션 그리드에서 각 원 중심의 픽셀 좌표값에 해당한다. 즉, 식 (3)을 이용하여 왜곡 보정후의 SSE 값의 변화 추이를 통하여 이미지 센터값의 영향을 알아볼 수 있다.

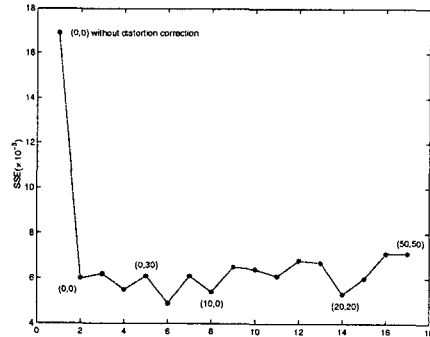


그림 2. 이미지 센터값의 변화에 따른 최종 영상에서의 SSE 값의 변화.

그림 2에서 알 수 있듯이 이미지 센터값의 변화에 따른 SSE 값의 변화는 이미지 센터값이 크게 벗어나지 않는 경우에 적절함을 알 수 있다. 이것은 왜곡 보정을 하지 않은 경우의 이미지 센터값 (0,0)에서의 결과와 같은 위치에서 왜곡 보정후의 SSE 값을 살펴보는 것으로도 알 수 있다.

이상의 결과로부터 실제 렌즈 왜곡 보정을 위한 알고리즘의 적용을 위한 카메라 상수의 결정에서 scale factor ratio 는 1로 설정하여도 무방하며 이미지 센터값은 이미지 버퍼의 중심으로 설정하여도 무방함을 알 수 있다. 그 외의 카메라 캘리브레이션 과정은 [1]에서 제시한 RAC 기반 방식을 포함한 어떤 것이어도 최종 영상에서의 결과는 유사할 것으로 기대된다.

### 3. 렌즈 왜곡 보정을 위한 이미지 워핑 방법의 구현

식 (1), (2)로 표현된 렌즈 왜곡 모델을 통하여 이미지 워핑을 구현하는 방식은 [2]에서 언급된 바와 같이 두 가지 경우를 생각해 볼 수 있다. 즉, 전방향 공간 매핑(forward spatial mapping)과 역 공간 매핑(inverse spatial mapping)이다. 전자의 경우 왜곡된 원영상으로부터 왜곡 보정된 결과 영상을 픽셀단위의 대응점으로 직접 계산할 수 있는 장점이 있으나 원근 효과 등에 의한 영상의 내용에 따라 결과 영상에서 hole 이나 오버랩이 발생할 수 있는 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 픽셀을 하나의 영역으로 설정하는 이른바 four-corner mapping 방식을 사용하여 이러한 문제를 없앨 수 있지만 새롭게 accumulator 를 정의해야 하고 각 픽셀영역간의 중첩 여부를 판단해야 하는 과정이 필요하게 되어 적용이 복잡해진다. 반면 역공간 매핑의 경우에는 결과 영상에서의 픽셀 좌표값으로부터 이에 해당하는 원영상에서의 좌표값을 획득해야 하므로 전방향 매핑에서의 단점은 극복할 수 있으나 역공간 매핑 함수를 수학적으로 구할 수 있어야 정확하게 워핑을 실시할 수 있다.

기존의 렌즈 왜곡 모델에서는 이러한 역공간 매핑에 대한 언급이 없으나 본 연구에서는 Cardan 방법을 도입하여 역공간 매핑 함수를 정확하게 계산하여 좌표계 resampling 과 픽셀값의 interpolation 에 대응하도록

록 하였다.

식 (1)과 (2)는 다음과 같이 극좌표계로 변환하는 경우에 단일식으로 표현이 가능하다. 즉,

$$r_u = r_d(1 + \kappa r_d^2), \text{ 여기서 } r_u = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}. \quad (4)$$

방사 방향의 렌즈 왜곡만 고려하고 있으므로 극좌표계에서의 각도값은 다음과 같이 표현이 가능하다.

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

식 (4)의 결과 영상의 좌표값  $r_u$ 로부터 이에 해당하는 왜곡된 원영상의 좌표값  $r_d$ 를 구하기 위해서는 3차 방정식의 근을 구하여야 한다. 즉, 다음과 같은 일반적인 3차 방정식 형태에서

$$ax^3 + bx^2 + cx + d = 0,$$

$a=1, b=0, c=1/\kappa, d=-r_u/\kappa$ 로 설정하고 다음의 두 변수를 새로이 도입한다.

$$\delta^2 = \frac{b^2 - 3ac}{9a^2} = -\frac{c}{3}, \quad h = 2a\delta^3.$$

이 때,  $d$ 와  $h$ 의 관계에 따라 다음과 같이 두 가지 경우에 대한 역공간 매핑 함수의 근을 구할 수 있다. 즉,

(i)  $d^2 > h^2$ 인 경우 하나의 실근이 구해진다.

$$\text{Sol.} = \left[ \frac{1}{2}(-d + \sqrt{d^2 - h^2}) \right]^{\frac{1}{3}} + \left[ \frac{1}{2}(-d - \sqrt{d^2 - h^2}) \right]^{\frac{1}{3}}.$$

(ii)  $d^2 < h^2$ 인 경우 세 개의 실근을 얻게 된다.

$$\text{Sol.} = \left\{ -\frac{2}{3}c \cos \theta, -\frac{2}{3}c \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta\right), -\frac{2}{3}c \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta\right) \right\},$$

이 때,  $\theta = 1/3 \cos^{-1}(-d/h)$ 의 관계가 있으며 위의 세 개의 실근중에서  $r_u$ 에 가장 가까운 값이 실제 근이 된다.

이러한 과정을 거쳐 역공간 매핑에 필요한 정확한 수학적식을 구할 수 있으며 실제 적용에 있어 DSP 등의 수치 연산 프로세서에 직접 적용이 가능해진다.

그림 3은 2점의 카메라 상수를 적용하고 위에서 설명한 역공간 매핑 함수를 이용하여 실제 영상에 렌즈 왜곡 보정 알고리즘을 적용한 결과를 나타낸다. 그림 3은 PDA용 디지털 카메라인 CASIO사의 JK710DC를 이용한 결과이며 카메라 캘리브레이션을 통해 구해진 렌즈 왜곡 변수는  $4.6688 \times 10^{-7}$ 이다. 이외에도 다양한 디지털 카메라에 대한 결과를 얻을 수 있었으나 지면의 제한으로 두 가지 경우에 대한 결과를 보이도록 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 저가형 디지털 카메라의 렌즈 왜곡 보정 알고리즘의 적용을 위한 실질적인 고려 사항에 대해 살펴보았다. 카메라 캘리브레이션을 이용하는 경

우에 두 개의 카메라 상수인 scale factor ratio와 이미지 센터를 설정하는 방법에 대하여 살펴보았으며 실제 실험을 통하여 타당성을 보였다.

이미지 워핑을 통해 왜곡 보정된 영상을 얻기 위한 역공간 매핑(θ정에서 필요한 역공간 매핑 함수의 정확한 표현식을 구하였으며 실제 영상에 적용하여 결과를 보였다. 이러한 방식은 DSP를 이용한 실시간 구현에 매우 적합한 형태이며 저가의 디지털 카메라에 적용하기 어려운 고품질 렌즈 채용대신 소프트웨어적으로 영상을 보정하는 방식의 구현에 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 제안한 카메라 캘리브레이션을 이용한 렌즈 왜곡 보정 방식과 구현에 관한 사항을 실제 DSP 회로에 적용하여 왜곡이 없는 저가형 디지털 카메라의 구현은 향후 편재형 디지털 이미지 제품의 개발에 도움이 될 것으로 여겨진다.

#### 참고문헌

- [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] G. Wolberg, "Separable Image Warping with Spatial Lookup Tables," Computer Graphics, vol. 23, no. 3, 1989.
- [3] H. Farid and A. C. Popescu, "Blind Removal of Lens Distortion," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 18, no. 9, 2001, 2072-2078.
- [4] A. Goshtasby, "Correction of Image Deformation from Lens Distortion Using Bezier Patches," CVGIP 47, 1989, pp. 385 - 394.
- [5] S. Park and K. Hong, "Practical Ways to Calculate Camera Lens Distortion for Real-time Camera Calibration," Pattern Recognition 34, 2001, pp. 1199 - 1206.
- [6] F. Devernay and O. Faugeras, "Straight Lines Have to be Straight," Machine Vision and Applications, vol. 13, 2001, pp. 14 - 24.
- [7] R. G. Willson, "What is the Center of the Image?," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 11, no. 11, 1994, pp. 2946 - 2955.

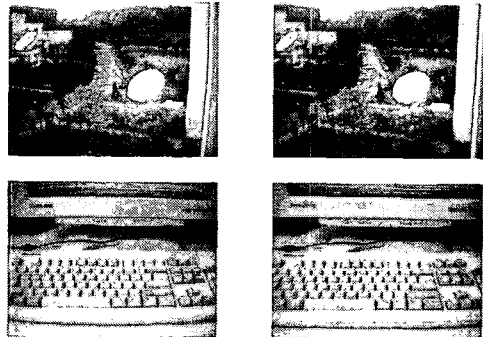


그림 3. 렌즈 왜곡 보정 전(왼쪽) 영상과 왜곡 보정 후(오른쪽)의 영상.