

내장형 렌즈 왜곡 보정 알고리즘 구현을 위한 이미지 워핑 방법

유 원 필[†] · 정 연 구[†]

요 약

대부분의 저가형 디지털 카메라에 사용되는 광학계의 경우 상대적으로 심한 렌즈 왜곡을 보이고 있다. 본 연구의 목적은 렌즈의 기하학적 왜곡에 의한 영상 품질의 저하를 보정하려는 것으로 Tsai의 카메라 캘리브레이션 방법을 단순화한 렌즈 왜곡 변수 계산 방법 및 계산된 렌즈 왜곡 변수를 이용하여 왜곡된 원영상을 이미지 워핑을 통해 보정하는 방법을 제안한다. 렌즈 왜곡 변수 계산 단계에서는 카메라 캘리브레이션 과정의 단순화를 위해 scale factor ratio 및 이미지 센터를 처리하는 실질적인 방식에 대해 보고하며 정량적인 이미지 품질 척도를 이용하여 왜곡 보정 효과를 측정함으로써 제안된 방법의 타당성을 보인다. 한편, 렌즈 왜곡 변수 계산 단계에서의 결과를 바탕으로 이미지 워핑을 적용하기 위해 역공간 매핑 방식을 적용하는 경우 본 연구에서 적용된 방사상 렌즈 왜곡 모델의 정확한 해를 구하기 위해서는 3차 방정식의 해를 구하여야 한다. 본 논문에서는 정보기기로의 내장형 구현에 필수적인 실시간 처리를 목적으로 2차 방정식에서의 근사화 방법을 제안한다. 실험을 통하여 제안된 근사화 방법의 실시간 구현 가능성을 보이며 아울러 3차 방정식의 해를 이용한 이미지 워핑의 경우와 성능이 동등함을 보인다.

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

Wonpil Yu[†] · Yunkoo Chung[†]

ABSTRACT

Most of low cost digital cameras reveal relatively high lens distortion. The purpose of this research is to compensate the degradation of image quality due to the geometrical distortion of a lens system. The proposed method consists of two stages : calculation of a lens distortion coefficient by a simplified version of Tsai's camera calibration and subsequent image warping of the original distorted image to remove geometrical distortion based on the calculated lens distortion coefficient. In the lens distortion coefficient calculation stage, a practical method for handling scale factor ratio and image center is proposed, after which its feasibility is shown by measuring the performance of distortion correction using a quantitative image quality measure. On the other hand, in order to apply image warping via inverse spatial mapping using the result of the lens distortion coefficient calculation stage, a cubic polynomial derived from an adopted radial distortion lens model must be solved. In this paper, for the purpose of real-time operation, which is essential for embedding into an information device, an approximated solution to the cubic polynomial is proposed in the form of a solution to a quadratic equation. In the experiment, potential for real-time implementation and equivalence in performance as compared with that from cubic polynomial solution are shown.

키워드 : 렌즈 왜곡(Lens Distortion), 카메라 캘리브레이션(Camera Calibration), 이미지 워핑(Image Warping)

1. 서 론

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 저가

형의 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 PDA나 스마트폰 등 정보 단말의 사용자 층이 확대됨에 따라 CMOS 이

[†] 기 회 원 : 한국전자통신연구원

‡:문접수: 2003년 2월 18일, 심사완료: 2003년 6월 2일

미지 센서를 채택한 제품의 수는 2004년경에 CCD 소자를 이용한 제품의 수를 능가할 것으로 전망되고 있다[1]. 하지만, 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[2-5]. 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 변수를 추정하는 식의 방법을 적용하는 수 밖에 없게 된다[6]. 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 볼 수 있다.

한편, 렌즈 왜곡을 보정하는 방법은 이처럼 영상 처리 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 저전력 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.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서 렌즈 왜곡 모델을

소개하고 카메라 캘리브레이션 기법을 이용하여 렌즈 왜곡 변수를 계산하는 경우에 카메라 상수를 처리하는 방법 및 왜곡 보정된 영상에서의 영향에 대해서 소개한다. 3절에서는 왜곡 보정을 위한 역공간 이미지 워핑 방법을 소개하며 DSP 구조에 적합한 형태의 근사법을 제안한다. 4절에서는 제안된 방법을 적용한 실험 결과에 대해 보고하며 렌즈 왜곡 변수를 추정하는 단계에서 카메라 캘리브레이션 과정을 생략할 수 있는 방법에 대해 소개하며 결과를 제시한다. 마지막으로 5절에서 제안한 방법의 기대 효과에 대해 설명하며 향후 연구 방향을 제시하도록 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[2]. 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 2차 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 2차식으로 모델링한다.

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

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

여기서 $r_d = \sqrt{\mu^2 x_d^2 + y_d^2}$ 의 관계가 있으며 이것은 이미지 센터에서 왜곡된 원영상의 픽셀 좌표 (x_d, y_d) 까지의 거리이다. (x_u, y_u) 는 왜곡 보정된 영상에서 (x_d, y_d) 에 대응되는 픽셀 좌표를 나타내며 식 (1)~식 (2)의 픽셀 좌표값 $(x_u, y_u), (x_d, y_d)$ 은 모두 카메라의 이미지 센터를 기준으로 표현된 것이다. 본 방법에서 계산하고자 하는 렌즈 왜곡 변수는 k 에 해당하며 μ 는 scale factor ratio이며 카메라 캘리브레이션을 통하여 계산할 수 있다. k 를 구하기 위한 카메라 캘리브레이션 방법은 RAC(Radial Alignment Constraint)에 기반한 두 단계 방법을 이용하도록 한다[2]. RAC

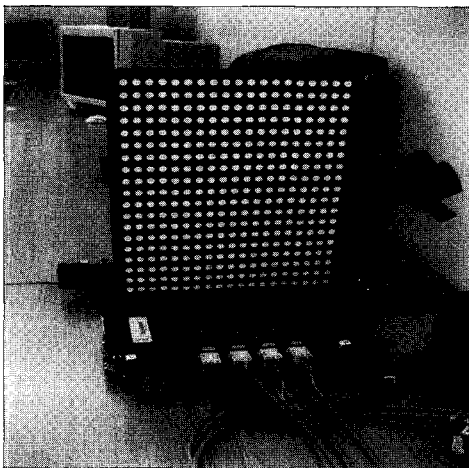
기반의 카메라 캘리브레이션 방법을 포함한 기존의 방법을 일반적인 환경에서 적용함에 있어서 가장 큰 문제점은 적절한 캘리브레이션 패턴을 구하거나 제조하기가 용이하지 않다는 점에 있다. 실제로 k 를 계산하기 위해 필요한 scale factor ratio 추정을 위해 [2]의 경우 정교하게 조정 가능한 이동 장치가 필요하거나 non-planar 형태의 캘리브레이션 대상체가 필요하게 된다. 또한 식 (1)~식 (2)에 표현된 바와 같이 이미지 센터의 위치에 대한 정확한 값이 필요하게 된다. 캘리브레이션 단계에서의 이러한 어려움은 일반 디지털 카메라나 내장형 카메라와 같이 일반 사용자를 대상으로 하는 영상 장치에는 적합하지 못한 것으로서 scale factor ratio나 이미지 센터에 대한 적절한 처리 방법을 도입할 수 있다면 이후의 캘리브레이션 과정은 캘리브레이션 패턴에 대한 한 장의 영상만을 이용하여 손쉽게 적용 가능하게 된다. 본 절에서는 변화된 영상 환경하에 적용 가능한

캘리브레이션 방법의 도입을 위해 위의 두 가지 카메라 상수를 처리할 수 있는 실질적인 방법을 제안하고자 하며 아울러 제안된 방법을 기존의 정교한 캘리브레이션 방법을 적용했을 경우와 비교하여 성능에 있어 손색이 없음을 보이고자 한다.

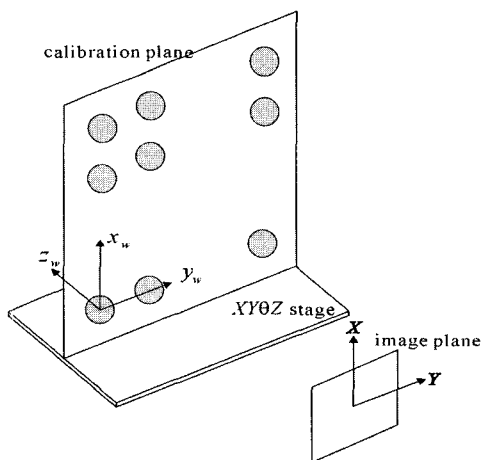
(그림 1)(a)는 실제 카메라 캘리브레이션 적용을 위한 실험 장비를 나타낸 것이다. 캘리브레이션 그리드는 직경 1cm의 361(=19×19)개의 원으로 구성되어 있으며 인접 원끼리의 거리는 가로 방향으로 1.5cm, 세로 방향으로 2cm의 구조이다.

Scale factor ratio를 계산하기 위해서는 일반적으로 non-planar 물체를 캘리브레이션 대상체로 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 2μm를 제공하는 Hephaist사의 XYθZ 스테이지 장비인 NAF3A-02-15를 사용하였고 scale factor ratio를 구하기 위해 3mm씩 4번 이동을 하여 총 다섯 장의 영상을 획득한다. 매 이동시 현재 위치에서의 영상과 이전 위치에서의 영상을 이용하여 scale factor ratio를 구하고 이를 평균하여 scale factor ratio에 대한 대표값으로 사용하도록 한다.

(그림 1)(b)에서 캘리브레이션용 평면을 +Z_w 방향으로 3mm씩 이동한 후에 이전 영상과 현재 영상에서 원의 중심에 대한 픽셀 좌표값을 추출하여 (X_j, Y_j), j = 1, ..., n로 표시하면 두 장의 영상으로부터 구해지는 scale factor ratio μ는 다음과 같이 표현된다.



(a)



(b)

그림 1 (a)카메라 캘리브레이션을 위한 실험 장치 및 (b)좌표계

$$\mu = \sqrt{\frac{\frac{1}{d^2} \left(\frac{\nu_1}{\nu_1} - 1 \right)^2 \nu_4^2 + \nu_5^2}{\frac{1}{d^2} \left(\frac{\nu_3 \nu_1}{\nu_1} - 1 \right)^2 + \nu_1^2 + \nu_2^2}} \quad (3)$$

여기서, ν₁, ..., ν₅는 이전 영상에서 식 (4)로부터 최소 자승법으로 구해진 값이며 d는 +z_w 축으로의 이동량을 나타낸 값으로 3mm에 해당한다. 기준 좌표계인 {x_w, y_w, z_w}는 캘리브레이션 평면의 임의의 위치에 놓일 수 있으며 기술한 캘리브레이션 패턴의 기하학적 배치에 따른 공간 좌표값을 나타낸다.

$$[x_{w,j} Y_j, y_{w,j} Y_j, -x_{w,j} X_j, -y_{w,j} X_j] \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \\ \nu_5 \end{bmatrix} = X_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (4)$$

마찬가지로 ν_1, \dots, ν_5 는 현재 위치에서 구해진 원중심의 좌표값을 이용하여 식 (4)로부터 구해진다. 식 (4)를 구하기 위한 유도 과정은 [7]에 자세히 기술되어 있다.

한편, 현재 대부분의 상용 영상 획득 장비의 경우에는 채용된 이미지 소자의 물리적 픽셀이 정사각형이 아니라라도 내부 디지털라이저에 의해 정사각형 픽셀의 형태로 제공되고 있으며 특히 CMOS 이미지 센서의 경우 각 픽셀의 디지털 값을 직접 획득할 수 있으므로 scale factor ratio가 실질적으로 1.0에 가깝게 될 것이라고 예상할 수 있다. 이 경우, (그림 1)과 같이 평면 형태의 캘리브레이션 패턴을 사용하더라도 이송 장비의 구동 없이 한 장의 영상으로부터 캘리브레이션을 실시할 수 있게 된다.

이러한 성질이 실제로 적용 가능한지를 알아보기 위해서 일반 CCD 카메라를 대상으로 식 (3)~식 (4)를 이용하여 scale factor ratio를 측정하는 실험을 실시하였다. <표 1>은 하니웰사의 GC455NK 줌 카메라와 Matrox사의 Meteor-II standard 이미지 그래버를 이용한 결과이다. GC455NK CCD 카메라의 물리적 픽셀 크기는 $4.75\mu\text{m} \times 5.55\mu\text{m}$ 이다. 사용된 CCD 카메라는 줌 렌즈를 채택하고 있어 전체 줌 영역을 등간격으로 10 단계로 나누어 각 단계에서 구한 scale factor ratio를 <표 1>에 나타낸 것이다.

<표 1> GC455NK 카메라의 10단계 줌 위치에서의 scale factor ratio의 변화($\bar{\mu}$: 평균, σ : 표준편차)

줌위치	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\bar{\mu}$	1.0032	1.0021	1.0032	1.0019	1.0029	1.0078	1.0066	1.0182	1.0022	1.0032
σ	0.0012	0.0001	0.0013	0.0003	0.0005	0.0026	0.0034	0.0113	0.0086	0.0013

<표 1>에서 알 수 있듯이 scale factor ratio는 실질적으로 1로 설정하여도 무방하며 이러한 결과는 다른 종류의 카메라의 경우에도 마찬가지로 나타난다. 즉, PDA용 카메라인 JK710DC를 이용하는 경우 scale factor ratio는 1.0097의 값을 얻을 수 있었으며 삼성 MPC-C10 USB 카메라의 경우 1.0064의 값을 얻을 수 있었다.

렌즈 왜곡 보정을 위한 또 하나의 카메라 상수인 이미지 센터의 경우에는 scale factor ratio와는 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 영상 특징만을 이용하여 결정하는 것은 매우 큰 측정 오차를 유발할 수 있기 때문이다. 실제로 이미지 센터를 정확하게 구하는 것은 [8]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 센터

를 직접 추출하는 방식 대신 이미지 센터의 잘못된 추정에 의해 렌즈 왜곡 보정 후의 영상에서의 품질의 저하가 어느 정도인지 살펴보기로 한다. 이 때 사용된 영상 보정을 위한 이미지 워핑 방법은 3절에서 설명하기로 한다.

이미지 센터의 영향에 대해 알아보기 위한 과정은 다음과 같다. 이 때, scale factor ratio는 1로 설정한다.

- ① 카메라 캘리브레이션을 통한 렌즈 왜곡 변수의 추정[2]
- ② 임의의 위치로 이미지 센터값을 설정
- ③ 설정된 이미지 센터값과 1에서 구한 렌즈 왜곡 변수를 이용하여 이미지 워핑을 적용
- ④ 보정 후의 결과 영상에 대한 왜곡을 계산

위의 단계 4에서 적용한 결과 영상에 대한 왜곡율은 다음의 에러 함수(SSE: Sum of Square Error)로 나타내도록 한다.

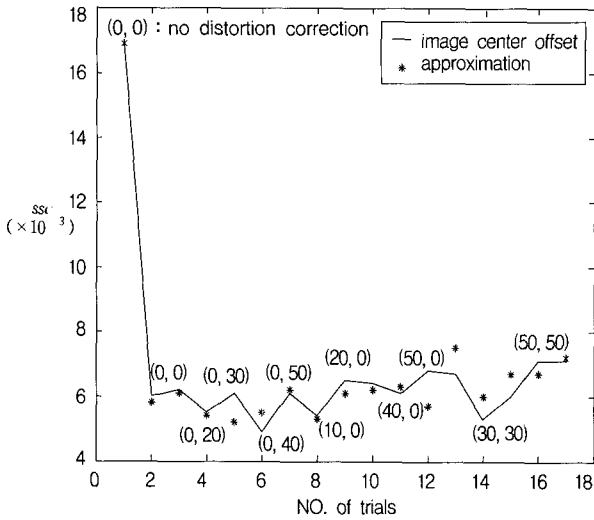
$$SSE = \sum_{n=1}^N \left| \frac{Y_{n1} - Y_{n2}}{X_{n1} - X_{n2}} - \frac{Y_{n2} - Y_{n3}}{X_{n3} - X_{n3}} \right| \quad (5)$$

위 식에서 $(Y_{n1}, X_{n1}), \dots, (Y_{n3}, X_{n3})$ 는 (그림 1)의 캘리브레이션 그리드로부터 가로 방향으로 추출한 하나의 행 내부에 위치한 서로 인접한 세 개의 원 중심의 픽셀 좌표값을 나타내며 N 은 카메라의 FOV(Field Of View)내에 위치한 인접한 세 개의 원으로 구성된 집합의 갯수이다. 임의의 영상에 대한 왜곡율은 이와 같이 각각의 행으로부터 구한 SSE값을 더한 후 수직 방향으로 같은 방식으로 구한 값과 합한 값으로 나타내도록 한다. 즉, 식 (5)를 이용하여 왜곡 보정후의 SSE값의 변화 추이를 통하여 이미지 센터값의 영향을 알아볼 수 있다.

(그림 2)는 이미지 센터를 임의의 위치에 설정한 후, 위에서 설명한 네 단계를 적용했을 때의 SSE값의 변화를 나타낸 것이다('-' 표시). (그림 2)에서 SSE값의 변화 추이를 나타내기 위해 임의로 설정한 이미지 센터의 픽셀 위치값을 그래프에 중첩하여 나타내었다. (그림 2)에서 알 수 있듯이 이미지 센터에 따른 SSE값의 변화는 실험에 적용된 이미지 센터값에 한하여 분산값 $0.4025(\times 10^{-6})$ 로 미미한 것을 알 수 있으며 왜곡 보정을 하지 않은 경우의 이미지 센터값 (0, 0)에서의 결과와 비교했을 때 영상 품질이 현저하게 향상됨을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 실제 렌즈 왜곡 보정을 위한 알고리즘의 적용을 위한 카메라 상수의 결정에서 scale factor ratio는 1로 설정하여도 무방하며 이미지 센터값은 이미지 버퍼의 중심으로 설정하여도 무방함을 알 수 있다. 실제로 이미지 버퍼 중심을 이미지 센터로 설정하는 것은 이미지 센터에 대한 정보가 주어지지 않은 경우 흔히 선택하는 방법이기도 하다. 한편, 카메라 캘리브레이션 과정은 [2]에서 제시한 RAC 기반 방식을 포함한 어떤 것이어도 최종 영상

에서의 결과는 유사할 것으로 기대된다.



(그림 2) 이미지 센터값의 변화에 따른 최종 영상에서의 SSE 값의 변화(“-” 표시)와 Cardan 방법의 근사화에 따른 SSE 값의 변화(“*” 표시)

3. 렌즈 왜곡 보정을 위한 이미지 워핑 방법의 구현

식 (1), 식 (2)로 표현된 렌즈 왜곡 모델을 통하여 이미지 워핑을 구현하는 방식은 [9]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 영상의 내용에 따라 원근 효과 등에 의해 결과 영상에서 hole이나 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 accumulator를 정의해야 하고 각 픽셀 영역간의 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 방법[10]을 도입하여 역공간 매핑 함수를 정확하게 계산하여 좌표계 resampling과 픽셀값 보간(interpolation)에 대응하도록 하였다.

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

$$r_u = r_d(1 + kr_d^2) \quad \text{여기서} \quad r_u = \sqrt{x_u^2 + y_u^2} \quad (6)$$

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

$$\theta_u = \tan^{-1}\left(\frac{y_u}{x_u}\right) = \theta_r = \tan^{-1}\left(\frac{y_d}{x_d}\right) \quad (7)$$

식 (6)의 결과 영상의 좌표거리 r_u 로부터 이에 해당하는 왜곡된 원영상의 좌표거리 r_d 를 구하기 위해서는 3차 방정식의 근을 구하여야 한다. 즉, 다음과 같은 일반적인 3차 방정식 형태에서

$$ax^3 + bx^2 + cx + d = 0 \quad (8)$$

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

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

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

① $d^2 > h^2$ 인 경우 하나의 실근이 구해진다.

$$\text{Sol.} = \left[\frac{1}{2}(-d + \sqrt{d^2 - h^2}) \right]^{\frac{1}{3}} + \left[\frac{1}{2}(-d - \sqrt{d^2 - h^2}) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

② $d^2 < h^2$ 인 경우 세 개의 실근을 얻게 된다.

$$\text{Sol.} = \left\{ -\frac{2}{3}c \cos \theta, -\frac{2}{3}c \cos \theta \left(\frac{2\pi}{3} + \theta \right), -\frac{2}{3}c \cos \theta \left(\frac{4\pi}{3} + \theta \right) \right\} \quad (11)$$

이 때, $\theta = 1/3 \cos^{-1}(-d/h)$ 의 관계가 있으며 barrel 형태의 렌즈 왜곡인 경우($k > 0$) 위의 세 개의 실근 중에서 r_u 에 가장 가까운 값이 실제 근이 된다. 이러한 과정을 거쳐 역공간 매핑에 필요한 정확한 수학적식을 구할 수 있으며 적절한 보간법을 이용하여 보정된 영상에서의 픽셀값을 결정할 수 있다.

식 (10)~식 (11)을 이용하여 이미지 워핑에 필요한 역공간 함수를 정확히 구할 수 있지만 정보기에 내장하는 목적에는 적합하지 못하다. 예를 들어, 신호처리 프로세서의 경우 주로 MAC(Multiply and Accumulate) 연산에 특화되어 있는데 Cardan의 방법을 직접 이용하는 경우에는 이미지의 각 픽셀에 대해서 조건문과 여러 단계의 실수 연산을 처리해야 한다. 이것은 이미지의 크기가 증가할수록 수행시간의 증가를 가져오게 될 뿐만 아니라 신호처리 프로세서의 특성에도 적합하지 못하다. 알고리즘의 소형화 및 실시간 구현을 위해 렌즈 왜곡 정도에 대한 다음의 가정을 도입하도록 한다.

$kr_d^2 \ll 1$ 을 가정하면 식 (6)은 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$r_u \approx \frac{r_d}{1 - kr_d^2} \quad (12)$$

식 (12)로부터 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$r_d = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4kr_u^2}}{2kr_u} \quad (13)$$

(그림 2)에서 '*'로 표시한 것은 식 (13)을 이용하여 SSE를 계산하였을 때의 결과이다. (그림 2)에서 알 수 있듯이 근사법을 이용하더라도 에러 함수값에는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 한편, 이미지 워핑 방법의 수행 시간을 비교하기 위하여 매트랩 실행 환경에서 식 (13)을 이용하는 경우는 식 (10)~식 (11)을 이용하는 Cardan방법의 수행 시간의 56%로 줄어듦을 확인하였다.

4. 실험 결과

(그림 3)은 2절에서 소개한 카메라 상수 처리 방법을 적용하고 식 (13)의 역공간 매핑 함수를 이용하여 카메라 캘리브레이션에 사용된 그리드 패턴을 포함하여 실제 영상에 렌즈 왜곡 보정 알고리즘을 적용한 결과를 나타낸다. (그림 3)의 중간열은 PDA용 디지털 카메라인 CASIO사의 JK710 DC를 이용한 결과이며 카메라 캘리브레이션을 통해 구해

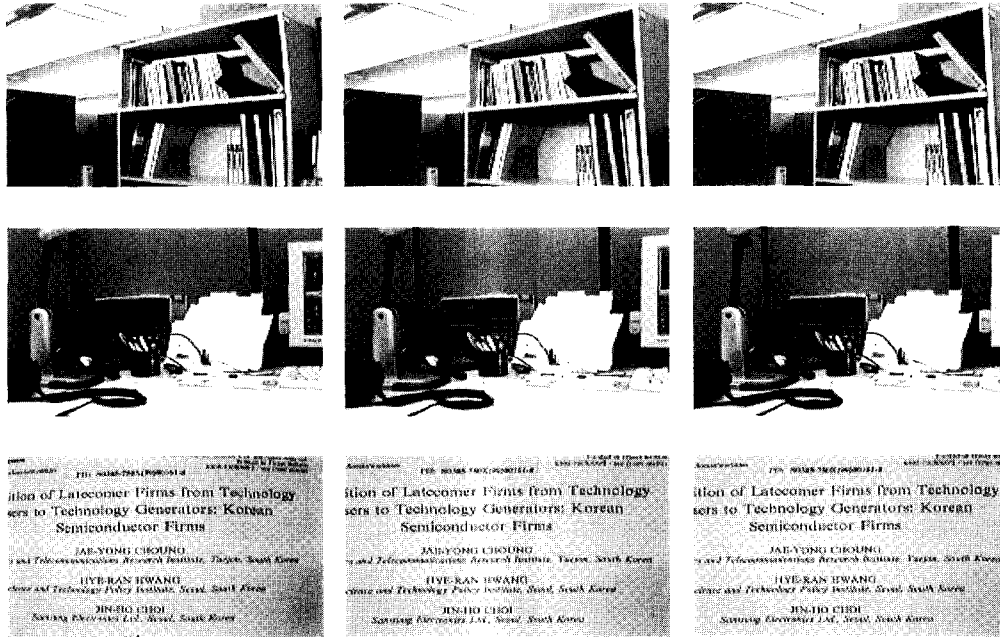
진 렌즈 왜곡 4.6688×10^{-7} 변수는 4.688×10^{-7} 이다. (그림 4)의 중간열은 삼성 MPC-C10 카메라 영상에 대해 제안한 렌즈 왜곡 보정 방법을 적용한 결과이다. 이 때의 렌즈 왜곡 변수값은 6.3314×10^{-7} 이다.

실험에 사용된 카메라는 고정 초점 거리를 가지는 렌즈를 채용한 것으로서 초점 심도(Depth-of-Focus)내에서 만족할 만한 보정 효과를 얻을 수 있었다. (그림 3)~(그림 4)의 카메라 문서 영상에서 알 수 있듯이 임의의 렌즈계는 최소 촬영 거리(Minimum Object Distance)에 접근할수록 왜곡 효과가 두드러지는데 촬영거리에 상관없이 하나의 고정된 렌즈 왜곡값을 이용하더라도 원하는 보정 효과를 거두고 있음을 확인할 수 있다. 현재 대부분의 휴대폰 카메라 및 PDA용 카메라가 고정 초점계를 채택하고 있어 본 논문에서 제안하는 왜곡 보정 방법만으로도 충분히 보정 효과를 얻을 수 있을 것으로 여겨진다.

한편, 렌즈 왜곡 변수를 계산하는 방식에 있어서 캘리브레이션 기법을 적용하는 것은 촬영 대상체에 대한 정확한 기하학적 정보를 추정해야 하는 번거로움이 있으므로 이를 대체하는 방법으로 사용자가 육안으로 영상 왜곡 정도를 확인하면서 왜곡 변수값을 결정하는 방식을 시도하였다. 이것은 Cardan 방법을 대체하는 근사화 기법에서 적용된 가정을 이용한다. 즉, $m \times n$ 크기를 가지는 영상을 촬영하는 경우 $kr_d^2_{max} = \frac{k}{4}(m^2 + n^2) \equiv R \ll 1$ 를 가정하면 렌즈 왜곡 변수인 k 의 범위를 R 과 영상의 크기를 이용하여 나타낼



(그림 3) CASIO JK710DC 카메라로 촬영한 렌즈 왜곡 보정 전(왼쪽) 영상과 왜곡 보정 후(가운데)의 영상, 식 (12)를 이용한 렌즈 왜곡 변수값을 적용한 결과 영상(오른쪽)



(그림 4) 삼성 MPC-C10 카메라로 촬영한 렌즈 왜곡 보정 전(왼쪽) 영상과 왜곡 보정 후(가운데)의 영상, 식 (12)를 이용한 렌즈 왜곡 변수값을 적용한 결과 영상(오른쪽)

수 있다.

$$0 < k < M \times 10^{-E} \tag{14}$$

여기서 $E = \lceil \log_{10}(R/r_{d, max}^2) \rceil$, $M = 10^{\lceil \log_{10}(R/r_{d, max}^2) - E \rceil}$ 이고 $\lceil \cdot \rceil$ 는 수학 함수 floor에 해당한다. 식 (14)는 barrel 형태의 렌즈 왜곡을 표현하고 있으며 핀쿠션 형태의 렌즈 왜곡의 경우에는 $-M \times 10^{-E} < k < 0$ 으로 표현된다. 식 (14)를 이용하고 $R=0.1$ 을 사용하여 육안으로 보정 효과를 확인하면서 렌즈 왜곡이 최소가 되는 지점을 찾게 되면 실제 카메라 캘리브레이션을 적용한 것과 동일한 효과를 얻을 수 있었다. CASIO JK710DC 카메라인 경우 4.375×10^{-7} 의 값을 얻었으며 MPC-C10인 경우에는 6.25×10^{-7} 의 값을 얻었다. 이 때 구한 렌즈 왜곡 변수값을 적용한 이미지 워핑의 결과는 (그림 3)~(그림 4)의 세 번째 열에 표시하였다. 이 결과에서 확인할 수 있듯이 식 (14)로 표현된 범위 내에서 캘리브레이션을 수행하지 않고도 간단하게 렌즈 왜곡 보정이 가능함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 저가형 디지털 카메라의 렌즈 왜곡 보정 방법과 이의 적용을 위한 실질적인 고려 사항에 대해 살펴 보았다. 카메라 캘리브레이션을 이용하는 경우에 두 개의 카메라 상수인 scale factor ratio와 이미지 센터를 설정하는 방법에 대하여 살펴보았으며 실제 실험을 통하여 타당

성을 보였다.

이미지 워핑을 통해 왜곡 보정된 영상을 얻기 위한 역공간 매핑 과정에서 필요한 역공간 매핑 함수의 정확한 표현식을 구하였고 DSP를 이용한 실시간 구현에 적합한 형태로 근사화하는 방법으로 확장하였다. 카메라 캘리브레이션을 사용하지 않으면서 사용자의 주관적인 이미지 품질 판단에 의해서도 렌즈 왜곡 변수를 추정할 수 있는 방법을 제안하였고 실제 영상 실험을 통하여 타당성을 보였다. 이것은 실제 환경에서 정교한 캘리브레이션 패턴을 구할 수 없는 경우나 영상의 초점이 정확하게 맺히지 않은 경우, 주변 조명이 적합하지 않은 경우에도 적용 가능한 것으로 초기 단계의 렌즈 왜곡 변수 추정 단계에서 활용도가 높으리라 여겨진다. 향후 렌즈의 vignetting 현상에 의해 발생하는 영상의 어두운 영역에 대한 밝기 개선 방법을 통하여 광학계의 불완전성에 기인하는 영상 품질 저하를 보상하는 방법을 개발하는 것과 내장형 화질 개선 방법의 구현을 통해 다양한 영상 기기로의 적용이 가능해질 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

[1] B. O'Rourke, "The Big Picture : CCDs, CMOS & the Image Sensor Market," Cahners In-Stat Group, 2001.
 [2] 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, pp.323-344, 1987.

[3] A. Goshtasby, "Correction of Image Deformation from Lens Distortion Using Bezier Patches," CVGIP 47, pp.385-394, 1989.

[4] S. Park and K. Hong, "Practical Ways to Calculate Camera Lens Distortion for Real-time Camera Calibration," Pattern Recognition 34, pp.1199-1206, 2001.

[5] F. Devernay and O. Faugeras, "Straight Lines Have to be Straight," Machine Vision and Applications, Vol.13, pp.14-24, 2001.

[6] H. Farid and A. C. Popescu, "Blind Removal of Lens Distortion," J. Opt. Soc. Am. A, Vol.18, No. 9, pp.2072-2078, 2001.

[7] H. Zhang and Z. S. Roth, "Camera-Aided Robot Calibration," CRC Press, Ch. 2, 1996.

[8] R. G. Willson, "What is the Center of the Image?," J. Opt. Soc. Am. A, Vol.11, No.11, pp.2946-2955, 1994.

[9] G. Wolberg, "Digital Image Warping," IEEE Computer Society Press, 1990.

[10] R. W. D. Nickalls, "A New Approach to Solving the Cubic : Cardan's Solution Revealed," The Mathematical Gazette, Vol.77, pp.354-359, 1993.



유원필

e-mail : ywp@etri.re.kr

1992년 서울대학교 제어계측공학과(학사)

1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학
학과(석사)

1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공
학과(박사)

1999년~2001년 국방과학연구소

2001년~현재 한국전자통신연구원

관심분야 : 로봇 비전, 영상 처리, 신호 처리



정연구

e-mail : ykchung@etri.re.kr

1979년 고려대학교 전자공학과(학사)

1986년 미국 Cleveland State Univ. 전산
학과(석사)

1991년 미국 Wayne State Univ. 전산
학과(박사)

1991년~현재 한국전자통신연구원

관심분야 : 영상인식, 영상처리