

논문-00-5-2-12

왜곡율이 큰 렌즈가 부착된 CCD 카메라를 위한 간단한 자동 보정 방법

한 기 태*, 김 회 율*

A Simple Auto Calibration Method for CCD Camera With High Distortion Lens

Gi-Tae Han* and Whoi-Yul Kim*

요 약

본 논문에서는 왜곡율이 큰 광각 렌즈가 부착된 CCD 카메라를 위한 왜곡 영상의 간단한 자동 보정 방법을 제안한다. 제안된 방법으로 보정 목표물(Calibration Target)인 왜곡 그리드(Grid) 영상과 왜곡되지 않은 표준 그리드 영상에서 매칭되는 교차점들 사이의 관계를 3차 와핑(Warping) 식으로 모델링하고, 모델링한 식으로부터 보정 계수를 추출한다. 실험은 방사 왜곡이 심한 광각 CCD 컬러 카메라로부터 얻어진 투시가 강하게 들어있는 입력 영상을 가지고 수행하였다. 제안한 방법은 왜곡 영상의 보정율이 평균 영상 오차와 최대 영상오차 영역에 대하여 모두 95 퍼센트 이상을 유지하므로 보정의 정확도가 기존 방법 보다 우수하며, 렌즈의 종류나 왜곡의 형태에 관계없이 포괄적으로 적용이 가능한 것으로 나타났다.

Abstract

In this paper, we propose a simple auto calibration method for a CCD camera with wide angle lens that causes high degree of distortion. We formulate a cubic warping equation for the relationship between the cross points on the distorted calibration target and the corresponding points from the standard grid image, and calibrate distorted images using the computed parameters. The experiment has been performed with the distorted images resulted from wide angle CCD camera. The experimental results show that the proposed method, in terms of the average and maximum distorted error, has higher accuracy than the existing methods because of maintaining the calibration ratio more than 95 percent. The proposed method is applicable to wide variety of images regardless a type of lens or distortion.

I. 서 론

비전산업은 카메라로부터 들어오는 영상을 분석하여 얻어지는 정보를 활용하기 때문에 무엇보다도 정확한 영상을 획득하는 것이 중요하다. 그러나 영상은 적용 시스템의 환경이나 카메라 렌즈의 왜곡 정도에 따라 원래의 영상과는 차이가 있는 변형된 형태의 영상으로 나타날 수 있다. 특히 광각 렌즈로 촬영된 영상은 중심에서 벗어날수록

심한 방사 왜곡(barrel distortion)이 일어나며, Image Intensifier Camera를 이용한 영상은 역 방사 왜곡(pincushion distortion)이 일어난다^{[1][2][3][4]}. 또한 초점거리가 맞지 않은 카메라로부터는 흐려진 영상이 나타날 수 있으며, 투시정도가 심한 상태에서 렌즈 왜곡 특성이 혼합된 영상에는 복합왜곡이 나타날 수 있다. 이러한 경우에서 입력된 영상을 패턴인식이나 특징추출 또는 검색과 같은 영상처리 시스템에 그대로 사용한다면 심각한 오류를 일으키는 요인으로 작용할 수 있다. 이러한 오류를 방지하기 위하여 왜곡 영상에 대한 보정 기술의 연구가 필요하다.

기존에 제안된 방법들은 복잡한 캘리브레이션 식을 사용

* 한양대학교 전자공학과 영상공학 연구실
Image Engineering Lab., Dept. of Electronic Engineering, Hanyang University

하고 계수를 구하기 위하여 여러함수의 최소화와 같은 많은 노력을 해야만 하지만, 왜곡이 심한 광각 렌즈에 대한 보정 결과는 만족할 만한 수준에 이르지 못하고 있다^{[1][2]}.

본 논문은 폐쇄 공간상에 설치된 광각 CCD 카메라나 Image Intensifier Camera와 같이 왜곡이 심하고 투시가 많이 들어간 영상에도 적용 가능한 영상의 적응적 보정 기술로 방사나 역 방사왜곡처럼 카메라의 종류에 따라 왜곡의 형태가 다르게 나타나더라도 모든 경우에 적용 가능한 간단한 왜곡 영상의 보정 방법을 제안한다. 왜곡이 있는 카메라 렌즈를 통하여 직선으로 구성된 그리드 형태의 캘리브레이션 오브젝트(Calibration Object)를 캡처해 보면 직선이 곡선의 형태로 나타난다^{[1][2][3][4]}. 그러나 왜곡 그리드 영상의 중심에 위치한 화소들은 방사나 역 방사 왜곡이 있는 렌즈의 경우라도 중심으로부터 거리가 가깝기 때문에 왜곡이 거의 나타나지 않는다. 표준 그리드 영상은 왜곡 그리드 영상의 중심으로부터 가장 가까이 있는 4개의 그리드로부터 거리의 평균값을 가지고 단위 그리드를 생성한 후 이것으로 재구성한 그리드 영상으로 왜곡이 거의 없는 비교의 기준이 되는 영상이다. 이렇게 만들어진 표준 그리드 영상의 교차점과 왜곡 그리드 영상의 각 곡선에 대한 교차점들의 변환관계를 모델링하여 얻은 계수 즉, 왜곡 그리드 영상의 교차점이 이에 대응하는 표준 그리드 영상의 교차점으로부터 변환될 때의 변환 행렬상의 계수가 왜곡 계수가 되며, 이를 역 변환하여 나타낸 것이 보정 계수가 된다.

실험은 표준 그리드 영상과 왜곡 그리드 영상의 교차점들간의 관계를 3차 식으로 모델링한 변환계수를 사용하여 방사 왜곡과 역 방사 왜곡의 영상 및 투시가 심하게 가미된 불특정 왜곡 영상을 대상으로 시행하였다. 제안한 방법에 대한 성능 평가는 표준 그리드 영상과 왜곡 그리드 영상과의 영상 오차, 기존에 제안된 B.Prescott & G.F McLean의 방법을 통해 보정한 결과와 표준 영상과의 영상 오차, 본 논문에서 제안한 방법을 통해 보정한 결과와 표준 영상과의 영상 오차들을 서로 비교하여 제안한 방법에 대한 우수성을 보인다.

II 장에서는 제안한 논문과의 관련연구로 일반적인 캘리브레이션 모델과 이를 통한 보정계수 추출방법을 기술하고, III 장은 본 논문의 제안한 방법으로 보정계수 추출에 필요한 그리드의 교차점 추출방법과 3차 Warping 모델링을 통한 보정계수 추출방법 및 왜곡 영상 보정방법을 설명하고, IV 장에서는 실험방법과 평가방법, 그리고 결과 분석으로 기존 방법과의 비교와 실제 왜곡 영상에 대한 보정 결과를 보이고, V 장에서는 제안한 방법에 대한 결론을 맺고 있다.

II. 관련 연구

광각 렌즈에 의해 캡처된 영상에는 심한 왜곡이 존재하며 그 왜곡은 일반적으로 Optical Center를 중심으로 점들을 끌어당기는 형태로 나타나기 때문에 피사체(Scene)의 직선이 영상에서는 곡선 형태로 나타난다^{[1][2][5][6][7]}. 이러한 렌즈의 왜곡을 보정하기 위한 기존의 연구들은 왜곡 계수를 찾기 위하여 실세계상의 알고 있는 점들을 이용하는 방법^[7], Calibration Object를 사용하는 방법^[5], 사용자 하여금 영상으로부터 이용할 Object를 선택하는 방법^[1]들로 모두가 기존에 제안된 아래와 같은 복잡한 왜곡 모델을 기반으로 한다^{[1][2]}. 그림 1에서 scene의 한 점(q)은 투시사영(perspective project)과 렌즈의 왜곡에 의해 영상에서는 q'으로 나타난다.

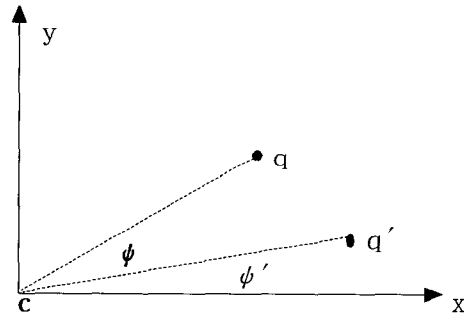


그림 1. 한 점의 영상 플랜상 투시사영(점 q가 점 q'으로 매칭)
Fig. 1. Perspective projection of a point on image(match point q to point q')

(x,y) : Cartesian of q, (r,ψ) : polar coordinate of q
 (x',y') : Cartesian of q', (r',ψ') : polar coordinate of q'
 $C(x_p, y_p)$: optical center

라 할 때 Cartesian과 polar 좌표는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}, \tan(\phi) = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}, \quad (1)$$

where: $\bar{x} = x - x_p, \bar{y} = y - y_p$

q'의 왜곡은 (a)영상 중심의 이동, (b)방사왜곡(radial distortion), (c)이탈왜곡(decentering distortion) 요소로 나누어지며, (a)는 (x_p, y_p) 에 의하여 주어진다.

방사 왜곡은 거의 모든 광각 렌즈에서 일어나며 광학적

중심(optical center)을 향하여 점들이 끌려지는 형태로 대칭적 방사의 모양을 갖게 되며 중심으로부터 거리가 멀수록 왜곡이 심하게 나타나는 특성을 갖는다. 식(2)는 방사 왜곡 모델을 나타내고 있다^[8].

$$\Delta r(q) = \sum_{i=1}^{\infty} C_{2i+1} r^{2i+1} \quad (2)$$

여기서 C_{2i+1} 는 왜곡 계수이며, 차수가 5 이상이면 왜곡에 미치는 영향이 낮으므로 무시할 수 있어 아래의 식(3)으로 표현하였다^[8].

$$\Delta r(q) \approx C_3 r^3 + C_5 r^5 \quad (3)$$

중심 이탈 왜곡은 광축(optical axis)에 관계되는 렌즈 요소의 비직교성(nonorthogonality)이 원인이다. 이것의 모델은 식(4)로 나타낼 수 있다^[9].

$$\begin{aligned} \Delta T_x(q) &= [P_1 r^2 (1 + 2 \cos^2(\phi)) + 2P_2 r^2 \sin(\phi) \cos(\phi)] [1 + \sum_{i=1}^{\infty} P_{i+2} r^{2i}] \\ \Delta T_y(q) &= [P_2 r^2 (1 + 2 \sin^2(\phi)) + 2P_1 r^2 \sin(\phi) \cos(\phi)] [1 + \sum_{i=1}^{\infty} P_{i+2} r^{2i}] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 P_i 는 왜곡계수이며, ΔT_x , ΔT_y 는 x 와 y 방향에 대한 왜곡이다. 식(4)에서의 고차 항은 중요도가 떨어진다고 하여 일반적으로 P_1 , P_2 만을 가지고 이탈 왜곡을 모델링함으로써 식(5)와 같이 유도하였다^[8].

$$\begin{aligned} \Delta T_x(q) &= [P_1 r^2 (1 + 2 \cos^2(\phi)) + 2P_2 r^2 \sin(\phi) \cos(\phi)] \\ \Delta T_y(q) &\approx [P_2 r^2 (1 + 2 \sin^2(\phi)) + 2P_1 r^2 \sin(\phi) \cos(\phi)] \end{aligned} \quad (5)$$

전체적인 왜곡은 식(3)와 식(5)를 더한 것으로 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta x(q) &\approx \cos(\phi) [\Delta r(q)] + \Delta T_x(q) \\ \Delta y(q) &\approx \sin(\phi) [\Delta r(q)] + \Delta T_y(q) \end{aligned} \quad (6)$$

그러므로 왜곡을 보정하기 위해서는 계수 C_3 , C_5 , P_1 , P_2 를 얻는 것이 필요하다. 기존에 제안된 방법들은 이러한 보정 계수를 구하기 위하여 직선으로 간주되지만 곡선으로 나타난 영역의 점들을 사용하여 그 영역을 직선으로 피팅하면 그 직선과 수평축이 만나는 각을 θ , 영상의 중심으로부터 직선까지의 거리를 ρ 라 하면 왜곡되지 않은 하

나의 점 q 에 관계되는 에러(e)를 식(7)로 나타내었다^{[11][2]}.

$$e = (x' \sin(\theta) - y' \cos(\theta) + \rho)^2 \quad (7)$$

직선이 곡선으로 변화된 영역에 속한 점들에 대하여 e 가 최소가 될 때의 파라메타(C_3 , C_5 , P_1 , P_2)를 구한다. 이러한 과정은 복잡하며 일일이 직선이 곡선으로 변화된 영역을 사용자가 정의하거나 실세계의 직선을 이루는 점들의 좌표가 사전에 알려져 있어야만 구할 수 있었다^[1]. 그러나 본 논문에서는 표준 영상과 왜곡 영상간에 매핑되는 그리드 교차점을 찾아 이들간의 관계를 3차 식으로 모델링함으로써 간단히 보정 계수를 구할 수 있음을 보인다.

III. 제안한 방법

그림 2와 같은 Calibration Object를 카메라로부터 입력 받으면 카메라의 렌즈 특성 및 Perspective와 같은 복합 요인에 의하여 렌즈의 중심에서 멀어질수록 왜곡이 더욱 심한 곡선 형태로 나타나거나 불특정 형태로 변형되어 나타난다. 그림 3과 4는 그림 2를 서로 다른 렌즈를 사용하여 카메라로 입력받은 영상이다.

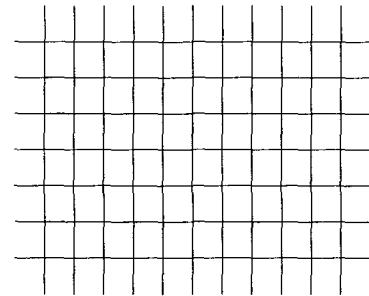


그림 2. 캘리브레이션 오브젝트
Fig. 2. Calibration Object

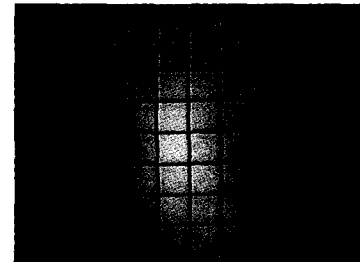


그림 3. 방사 왜곡된 그리드 영상
Fig. 3. The barrel distorted grid image

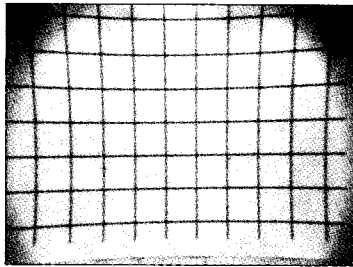


그림 4. 역 방사 왜곡된 그리드 영상
Fig. 4. The pincushion distorted grid image

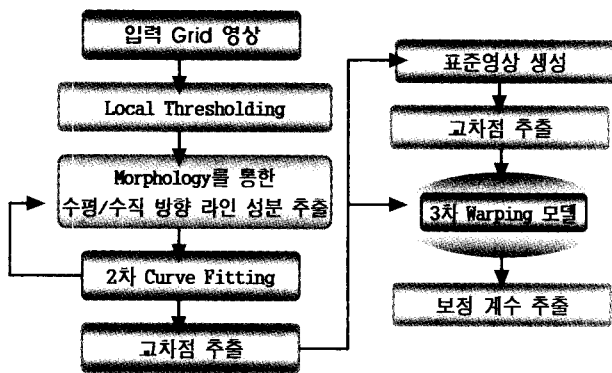


그림 5. 시스템 흐름도
Fig. 5. System flowchart

제안한 방법은 그림 2와 같은 Calibration Object를 카메라로 캡처하여 얻은 그림 3, 4와 같은 왜곡된 그리드 영상과 왜곡 그리드 영상의 중심에 위치한 왜곡이 거의 없는 그리드를 가지고 재생한 표준 그리드 영상간의 대응되는 교차점들로부터 3차원 기하학적 변환 모델 식을 유도하고, 식으로부터 구한 변환계수를 왜곡 영상에 적용하여 왜곡된 영상을 보정한다. 제안한 방법에 대한 시스템 흐름도는 그림 5와 같다.

왜곡 그리드 영상에서 곡선에 대한 교차점을 구하기 위해서는 먼저 왜곡 그리드 영상에 대하여 영상처리 과정을 수행하여 수평과 수직 방향의 곡선 성분을 추출하고, 각 방향으로 레이블링을 수행함으로써 영상에 대하여 n개의 수평 성분 레이블과 m개의 수직 성분 레이블로 분리한다. 분리된 각 CSR(Curve Support Region)에 대하여 2차 Fitting을 수행하게 되면 각 레이블에 대한 Fitting계수를 추출할 수 있다. 수평과 수직방향의 레이블에 대한 Fitting계수를 이용하여 왜곡 그리드 영상의 교차점을 구하고, 영상의 중심에 위치한 그리드 좌표를 이용하여 표준 그리드 영상을 만들어낸다. 제안한 시스템은 영상처리를 통한 CSR 추출 과정, 교차점 추출 및 표준 영상 생성 과정, 보

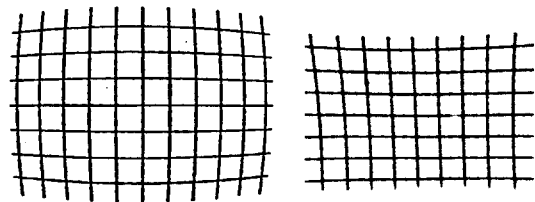
정 계수 추출 과정, 왜곡 영상 보정 과정으로 되어있다.

1. CSR 추출

직선으로 구성된 그리드를 왜곡율이 큰 렌즈가 부착된 카메라를 통해 얻은 영상에서는 직선이 곡선의 형태가 되는데 이 곡선을 형성하는 영역(Curve Support Region)을 CSR이라는 약어로 표기했다. 표준 그리드 영상에서의 직선의 교차점과 왜곡 그리드 영상에서의 직선에 대응되는 곡선의 교차점간 관계로부터 보정 계수를 구하는 것이 본 논문의 목적인데, 왜곡 그리드 영상으로부터 곡선의 교차점을 얻기 위해서는 수평과 수직 방향의 CSR 추출과정이 필요하다. 왜곡 그리드 영상은 카메라의 특수성과 촬영 환경에 따라 잡음이 첨가되어 있을 수 있다. 그러므로 직선이 곡선으로 변환된 영역인 CSR만을 추출하기 위하여 Local Thresholding과 Erosion(혹은 Dilation)^{[10][11][12]}을 수행하고, 각 수평과 수직 방향에 대한 CSR 성분만을 추출하기 위하여 적당한 크기의 Structuring Element를 사용하여 Morphology^{[10][12][13][14]}를 수행한다. 그러면 각 방향에 대한 CSR 성분만이 남게된다.

(1) Local Thresholding

카메라로부터 입력받은 그리드 영상은 카메라의 종류에 따라서 차이는 있지만 빛의 영향에 의하여 많은 노이즈가 삽입되어 있다. 특히 Image Intensifier Camera의 경우는 그 특성으로 인하여 영상의 전 영역에서 배경의 화소 값이 일정하지 않게 나타난다. 그러므로 일반적인 Global Thresholding으로는 원하는 형태의 영상을 얻을 수 없기 때문에 Local Thresholding 방법^{[10][11][12]}을 수행하며, 여기서 제거되지 않은 잔존 노이즈를 제거하기 위하여 Erosion을 수행한다. 그림 6은 그림 3과 4의 영상을 Local Thresholding과 Erosion을 수행한 결과이다.



(a) 방사 왜곡 (b) 역 방사 왜곡
(a) The barrel distortion (b) The pincushion distortion

그림 6. Thresholding과 Erosion 결과
Fig. 6. The result images after thresholding and Erosion

(2) 커브성분 추출 및 Labeling

앞의 과정을 통하여 얻어진 그림 6의 영상에서 각 수평과 수직부분에 대한 성분만을 추출하기 위하여 임의의 화소 크기(수평방향: $1 \times n$, 수직방향: $n \times 1$ size)의 Structuring Element를 사용하여 연속된 화소들의 크기가 Structuring Element 이상인 것들만 추출하는 Morphology를 수행한다. 이것의 결과는 한 방향에 대한 성분들(CSR)만이 추출될 뿐만 아니라 남아있는 노이즈까지도 제거되는 효과를 갖는다. 그 다음에는 Morphology를 수행한 결과 영상을 각각의 독립된 CSR로 분리하기 위하여 Labeling^{[13][14][15]}을 수행한다. 그림 7과 8은 그림 6의 (a)를 Morphology하여 추출한 CSR을 Labeling을 수행한 결과 영상이다.

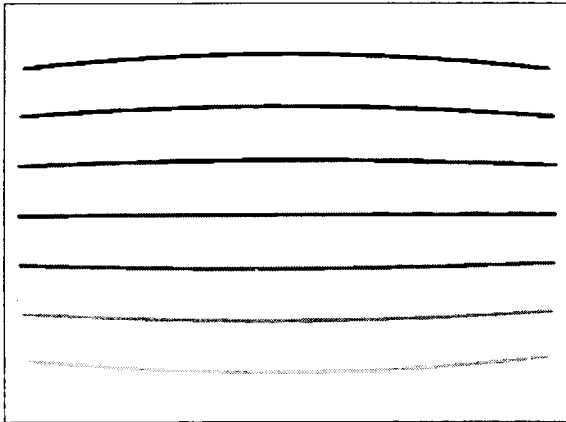


그림 7. 수평방향의 곡선 성분만을 추출한 영상
Fig. 7. The image of curve extraction in the horizontal direction

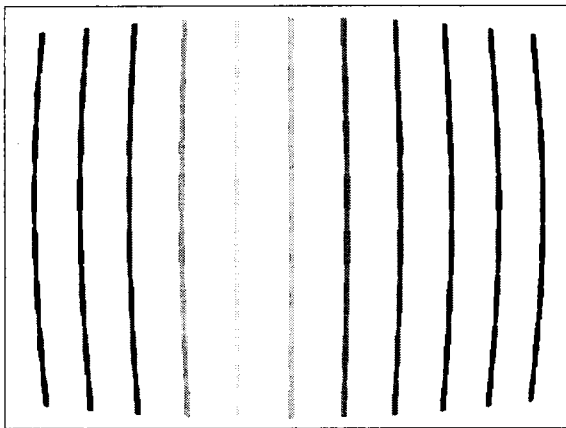


그림 8. 수직방향의 곡선 성분만을 추출한 영상
Fig. 8. The image of curve extraction in the vertical direction

2. Fitting과 교차점 추출

영상처리 과정을 통해 얻은 왜곡 그리드 영상은 곡선 영역의 CSR 형태로 Labeling되어 있기 때문에 한 화소 두께로 구성된 곡선을 얻기 위해서는 각 CSR에 대하여 2차 식으로 Fitting^{[16][17]}을 하여야 한다. 기존의 영상 보정 기술에서는 직선이나 곡선 영역을 Fitting할 경우 이용할 화소 집단의 선택에 대한 정의 없이 영역의 모든 점들에 대한 좌표를 그대로 이용하였다^{[2][13]}. 이러한 경우는 카메라로부터 영상을 얻는 과정에 유입된 잡음도 동일하게 Fitting 과정에 참여하게 되므로 정확한 Fitting 계수의 추출을 기대할 수 없다. Fitting시 이용 가능한 화소 집단의 경우는 표 1과 같이 4가지 유형으로 나타낼 수 있는데 유형 ①은 각 방향의 CSR에 대한 단면상에서 중심점의 좌표만을 취한 경우이고, 유형 ②는 각 방향의 CSR에 대한 단면상에서 Gray Intensity가 가장 큰 화소의 좌표만을 취한 경우이며, 유형 ③은 기존 방법처럼 각 방향의 CSR에 대한 단면상에서 모든 화소의 좌표를 그대로 이용하는 경우이고, 유형 ④는 각 방향의 CSR에 대한 단면상에서 각 화소의 Gray Intensity를 가중치로 하여 구한 평균 화소의 좌표를 이용하는 경우이다. 본 논문에서는 왜곡 그리드 영상에서 CSR에 대한 가장 정확한 곡선 식을 구하는데 이용될 화소집단의 유형을 결정하기 위하여 4 가지 유형 모두에 대하여 실험을 통하여 왜곡 영상에 대한 보정율을 비교하였다. 수평방향으로 레이블링된 CSR에 대하여는 단위 CSR내의 수직방향에 대하여, 수직 방향으로 레이블링된 CSR에 대하여는 단위 CSR내의 수평방향에 대하여 그림 9와 같은 방법으로 화소들을 취할 때 표 1과 같은 식을 적용하여 화소 집단을 선택하였다. 수평방향으로 레이블링된 CSR에서 수평방향으로 j번째 화소를 선택할 시 x축의 좌표는 j가 되며 수직방향으로 레이블링된

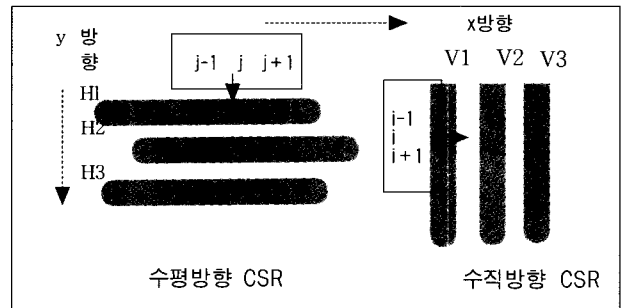


그림 9. 각 방향별 CSR의 화소 선택 방법
Fig. 9. The pixel selection method of CSR for each orientation

표 1. Fitting시 화소 집단 유형
Table 1. The formation of pixel group at fitting

유형	화소 집단의 구성 원소	화소 선택 식	기호 설명
①	Binary Center Point	$P_i^V = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k, P_j^H = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m y_k$	P_i^V : 수직방향 중심화소 P_j^H : 수평방향 중심화소
②	Gray Peak Point	$P_i^V = \max\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ $P_j^H = \max\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$	P_i^V : 수직방향 Gray Peak P_j^H : 수평방향 Gray Peak
③	Binary All Points	$P_i^V = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ $P_j^H = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$	P_i^V : 수직방향 Pixel Set P_j^H : 수평방향 Pixel Set
④	Gray Intensity Mean Point	$T_i = \sum_{k=1}^n G_k, T_j = \sum_{k=1}^m G_k,$ $P_i^V = \sum_{k=1}^n (x_k \times G_k / T_i),$ $P_j^H = \sum_{k=1}^m (y_k \times G_k / T_j)$	G_k : 각 방향의 화소에 대한 Gray Intensity 값 P_i^V : 수직방향 Gray Intensity Mean Pixel P_j^H : 수평방향 Gray Intensity Mean Pixel

CSR에서 수직방향으로 i번째 화소를 선택할 시 y축의 좌표는 i가 된다. 한편 수평방향의 CSR에서 y축의 좌표와 수직방향의 CSR에서 x축의 좌표는 표 1에서 제시한 화소 집단 유형별 식을 이용하여 구한다.

수평 및 수직 방향의 각 레이블링된 CSR에 대하여 선택된 화소집단의 유형에 따라 구한 화소의 좌표를 아래의 행렬 식(8)에 적용하여 2차식인 $y = ax^2 + bx + c$ 를 만족하는 계수 a, b, c 를 구한다^[17].

$$\begin{bmatrix} c \\ b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & \sum x_i & \sum x_i^2 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

(단, M은 CSR에서 선택한 화소 개수)

그림 7과 8의 Labeling된 각 CSR에 대하여 2차 Fitting을 한 결과를 그림 10과 11에 나타내고 있다.

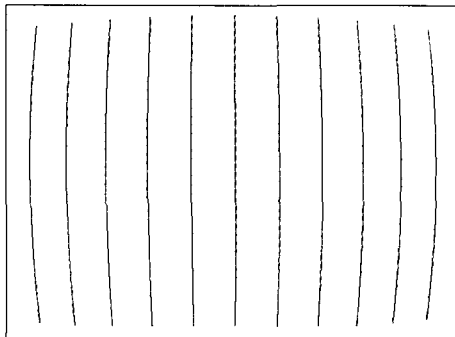


그림 10. 수평방향 CSR의 Fitting 결과
Fig. 10. Fitting result of horizontal CSR

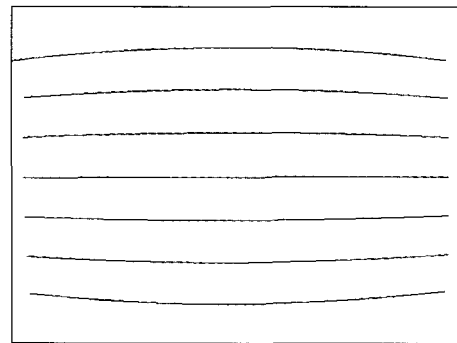


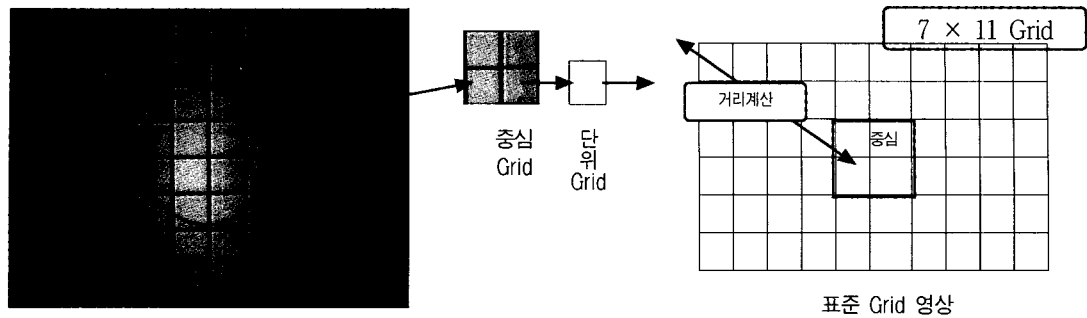
그림 11. 수직방향 CSR의 Fitting 결과
Fig. 11. Fitting result of vertical CSR

수평과 수직 방향의 모든 CSR에 대한 Fitting을 수행하여 계수를 구한 후 이 계수들을 이용하여 왜곡 그리드 영상에 대하여 수평과 수직 방향의 곡선에 대한 교차점들을 구하고 중심의 교차점을 이용하여 표준 그리드 영상을 생성하는 과정은 다음과 같다.

- 단계 1: 왜곡 Grid 영상을 Fitting하여 구한 교차점 중에서 영상의 중심에 위치한 교차점을 찾는다.
- 단계 2: 중심의 교차점 주변에 위치한 4 개의 Grid로부터 x 축과 y 축에 대한 단위 Grid의 평균거리를 구한다.
- 단계 3: 구한 단위 Grid를 가지고 중심 교차점 위치로부터의 거리 계산을 통하여 왜곡 Grid 영상의 Grid 수만큼의 Grid를 재구성한다.

그림 12는 방사 왜곡 그리드 영상으로부터 표준 영상을 생성하는 방법이다.

표준 그리드 영상과 역 방사 왜곡 그리드 영상에 대한 교차점을 구한 결과는 그림 13과 같다.



왜곡 Grid 영상

그림 12. 표준 Grid 생성 방법
Fig. 12. Standard Grid generation method

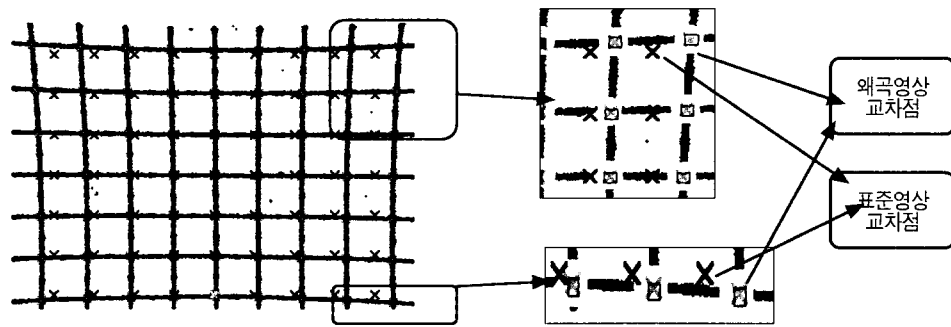


그림 13. 교차점 추출 결과
Fig. 13. Cross points extraction result

3. 보정 계수 추출 방법

제안한 방법에서 보정계수는 왜곡 그리드 영상과 왜곡되지 않았다고 간주되는 표준 그리드 영상간에 대응되는 교차점들에 대한 기하학적인 변환관계로부터 추출한다. 왜곡 영상과 표준 영상간 기하학적 관계를 유도하기 위하여 Warping 모델을 설정하며, Warping을 수행할 때 적용되는 Affine Transformation은 곡선을 직선으로 변환해야 하기 때문에 적합한 모델을 찾기 위하여 2차 식과 3차 식을 모두 적용하여 실험을 하였다. 2차와 3차 Warping식은 (X, Y) 를 왜곡 영상의 교차점이라 하고, (U, V) 를 표준 영상의 교차점이라 할 때 식(9)와 식(10)이 된다.

$$\begin{aligned} X &= 1 + a_0U + a_1V + a_2UV + a_3U^2 + a_4V^2 \\ Y &= 1 + b_0U + b_1V + b_2UV + b_3U^2 + b_4V^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} X &= 1 + a_0U + a_1V + a_2UV + a_3U^2 + a_4V^2 + a_5U^2V + a_6UV^2 + a_7U^3 + a_8V^3 \\ Y &= 1 + b_0U + b_1V + b_2UV + b_3U^2 + b_4V^2 + b_5U^2V + b_6UV^2 + b_7U^3 + b_8V^3 \end{aligned} \quad (10)$$

식(9)와 식(10)에서 왜곡 영상의 교차점들로 이루어진 행렬을 $A(X_1, Y_1; \dots, X_n, Y_n)$, 표준 영상의 교차점들로 이루어진 행렬을 $B(U_1, V_1, \dots, U_n, V_n)$ 변환 계수들이 포함된 변환 행렬을 $T(a_1, b_1, \dots, a_n, b_n)$ 라 하면 식(11)이 성립한다.

$$A = B^T \quad (11)$$

식(11)을 교차점의 수가 n 인 행렬 형태로 나타내면 식(12)와 같다.

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & U_1 & V_1 & U_1V_1 & U_1^2 & V_1^2 & U_1^2V_1 & U_1V_1^2 & U_1^3 & V_1^3 \\ 1 & U_2 & V_2 & U_2V_2 & U_2^2 & V_2^2 & U_2^2V_2 & U_2V_2^2 & U_2^3 & V_2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & U_n & V_n & U_nV_n & U_n^2 & V_n^2 & U_n^2V_n & U_nV_n^2 & U_n^3 & V_n^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 & b_0 \\ a_1 & b_1 \\ \vdots & \vdots \\ a_8 & b_8 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 행렬 B 는 정방 행렬이 아니므로 변환계수 행렬 T 를 구하기 위하여 Pseudo Inverse를 이용하여 식(13)로 구할 수 있다.

$$T = (B^T B)^{-1} B^T A \quad (13)$$

4. 왜곡 영상 보정 방법

영상간의 기하학적 변환은 디지털 영상 처리에서 이미지 평면상에 화소를 재배치하는 공간 변환과 공간적으로 이동된 이미지내의 화소 값을 할당해주는 RGB(혹은 Gray-Scale) 보간으로 구성된다. 보정되어야 할 영상의 한 화소 (P)에 대한 위치를 구하기 위하여 변환 계수 T를 이용하여 왜곡 영상에 매핑시켜 보면 왜곡 영상의 매핑 위치가 P' 처럼 실수 값이 된다. 그러므로 보정 영상에서의 하나의 화소 값을 결정하기 위하여 왜곡 영상의 실수 화소 값이 걸치는 4개의 subpixel 영역을 조사하여 그림 14와 식(14)처럼 가중치를 할당하여 보정 영상에 대한 화소의 값을 결정한다.

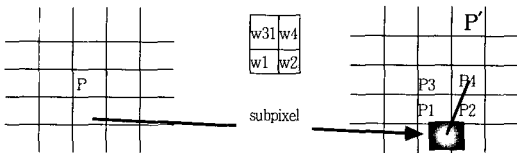


그림 14. 화소 매핑
Fig. 14. The pixel mapping

보정된 영상의 한 화소가 왜곡 영상의 실수 값으로 계산될 경우의 좌표를 X, Y라 하고, 이 값이 걸치는 4개의 점 좌표를 $p_1(x, y)$, $p_2(x, y)$, $p_3(x, y)$, $p_4(x, y)$ 라 할 때, 각 subpixel에 대한 가중치를 식(14)으로 계산하고,

$$\begin{aligned} w_1 &= (p_2 \cdot x - X) \times (p_3 \cdot y - Y), \\ w_2 &= (X - p_1 \cdot x) \times (p_3 \cdot y - Y), \\ w_3 &= (p_2 \cdot x - X) \times (Y - p_1 \cdot y), \\ w_4 &= (X - p_1 \cdot x) \times (Y - p_1 \cdot y) \end{aligned} \quad (14)$$

구한 weight를 4개의 subpixel이 걸쳐있는 좌표 p_1 , p_2 , p_3 , p_4 에 대한 Gray Scale에 곱한 후 합산하여 보정 영상의 화소에 대한 화소 값(G)을 그림 15와 같이 구한다.

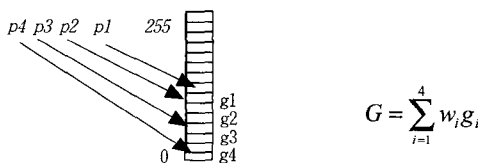


그림 15. Subpixel에 대한 속성 참조(그레이 영상)
Fig. 15. The property reference for subpixels(gray image)

컬러 영상의 경우는 그레이 영상과 동일한 방법으로 가중치를 구하고, subpixel이 걸쳐있는 화소에 대한 $R(r_0, r_1, \dots, r_{255})$, $G(g_0, g_1, \dots, g_{255})$, $B(b_0, b_1, \dots, b_{255})$ 를 그림 15와 같이 참조하고 식(15)로 계산하여 보정 영상의 화소 값으로 할당한다.

$$R = \sum_{i=1}^4 w_i r_i, \quad G = \sum_{i=1}^4 w_i g_i, \quad B = \sum_{i=1}^4 w_i b_i \quad (15)$$

IV. 실험 및 결과

1. 실험 방법

실험은 왜곡 그리드 영상의 CSR에 대한 2차 Fitting시 화소집단을 선택하는 4가지 방법 각각에 대하여 교차점을 구하고, 왜곡 영상의 교차점과 표준 영상의 교차점간 기하학적 관계를 2차와 3차의 Warping 식으로 모델링하여 이것으로부터 추출된 보정 계수를 이용하여 왜곡된 그리드 영상과 일반 왜곡 영상에 대하여 보정 실험을 실시하였다. 각 경우의 실험을 통하여 얻은 왜곡을 보정한 결과 영상과 왜곡되지 않은 표준 영상간의 영상 오차를 계산하여 가장 정확하게 보정되는 경우의 보정 모델을 찾아 제안한 방법의 적합 모델로 선정한다. 선정된 적합 모델의 타당성을 입증하기 위하여 제안한 방법을 이용한 보정 결과와 기존 방법들 중 최근에 발표한 B.Prescott & G.F.McLean과 Rahul & Shree의 방법을 통한 보정 결과에 대하여 영상 오차를 가지고 비교하는 실험을 실시하였다.

제안한 방법에서의 적합한 보정 모델을 찾기 위한 실험은 표 2와 같은 CSR을 Fitting할 화소집단의 선택 유형의 각각에 대하여 2차와 3차 모델식을 적용하여 실시하였으며, 제안한 방법과 기존 방법에 대한 비교 실험은 Perspective와 왜곡이 심한 방사와 역 방사의 왜곡 그리드 영상과 일반 왜곡 영상을 대상으로 하였다.

표 2. 화소 집단별 실험 방법
Table 2. The experiment method for pixel group

번호	CSR Fitting시 화소 집단 선택 유형
①	Binary Center Points
②	Gray Peak Points
③	Binary All Points
④	Gray Intensity Mean Points

2. 평가 방법

제안한 방법에 대한 평가는 왜곡 영상을 보정한 결과 영상과 왜곡되지 않은 원본 영상과의 영상오차를 계산하여 기존 방법과의 비교로 타당성을 검증한다. 영상오차는 원본 영상과 보정 영상간의 대응되는 위치에 대한 거리 차를 평균화소수 및 최대 화소수로 나타낸다. 원본 영상이라 함은 전혀 왜곡이 없는 카메라를 가지고 캡처한 영상이어야 하나 현실적으로 그러한 영상을 얻기는 불가능하므로 본 논문에서는 왜곡이 없는 표준 그리드 영상과 왜곡 그리드 영상을 보정한 결과 영상간의 영상오차를 비교 평가한다. 표 2에 나타난 실험 방법대로 실험한 결과로부터 가장 적합한 모델을 찾는 방법에 대한 평가기준은 왜곡 그리드 영상을 보정한 결과 영상과 표준 그리드 영상의 비교를 통하여 평균 영상 오차가 가장 적은 것을 제안한 방법으로 채택한다. 평균 영상 오차를 구하는 식은 표준 그리드 영상의 교차점 좌표를 (X_i, Y_i) , 왜곡 그리드 영상을 보정한 결과 영상에서의 교차점 좌표를 (U_i, V_i) 교차점 수를 N 이라 할 때 평균 영상오차를 구하는 식은 식 (16)과 같다.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(U_i - X_i)^2 + (V_i - Y_i)^2]^{1/2} \quad (16)$$

기존 방법과의 비교는 식 (16)의 평균 영상오차와 식 (17)의 최대 영상오차 그리고 식 (18)에서 나타내고 있는 왜곡 영상의 보정율을 가지고 비교하였다. 최대 영상 오차(MXE)는 비교 대상 영상에서 매칭되는 각 교차점간의 영상오차(E_i) 중 가장 큰 오차 값을 의미한다.

$$E_i = [(U_i - X_i)^2 + (V_i - Y_i)^2]^{1/2}, \quad (17)$$

$$MXE = \max\{E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_N\}$$

그리고 영상의 보정율(CR: Calibration Ratio)은 표준 영상과 왜곡 영상간의 영상오차인 DE와 표준영상과 보정 영상간의 영상오차인 CE를 가지고 식(18)로 나타낸다.

$$CR = (1 - \frac{CE}{DE}) \times 100 \quad (18)$$

3. 기존 방법과의 이론적 비교

전통적인 카메라 보정방법은 식(6)의 카메라 보정식을 식(7)의 에러 함수에 적용하여 에러가 최소가 될 때의 보정계수를 추출하는 방식을 사용한다. 보정 계수 추출에 사용되는 화소 집단은 직선으로 간주되는 왜곡 영역의 모든 점들이 이용되며, 에러함수로부터 최적화된 보정계수를 추출하기 위하여 비선형 최소화 기법을 이용한다. 이에 반해 제안한 방법은 새로운 왜곡 영상 보정 모델로 식(10)과 같은 3차 Warping 식을 채택했으며 보정계수 추출에 사용되는 화소들은 왜곡영역의 화소집단에 대하여 Gray Intensity Mean Point를 계산한 좌표 값으로 하였다. 본 논문에서는 최근에 제안된 B.Prescott 방법과 Rahul 방법을 비교 기준으로 삼고 있는데, B.Prescott 방법은 켈리브레이션 오브젝트로 Grid Paper를 이용하며, Rahul 방법은 실제 왜곡 영상으로부터 직선이 곡선으로 변형되어 나타나는 영역을 인위적으로 선정하는 방법을 사용한다. 이 두 방법 모두 기존의 보정 모델식을 사용하고 있으며 에러 식으로부터 최적화된 보정계수를 찾기 위하여 복잡한 비선형 최소화 방법을 채택하고 있다. 그러나 제안한 방법은 모델식으로부터 계수를 추출하기 위하여 간단히 Pseudo Inverse Matrix형태로 계산이 가능하다. 이 두 가지 기존 방법과 제안한 방법에 대한 성능 비교는 실제 왜곡영상의 실험을 통하여 4. 결과분석의 표 5에 나타나고 있다. 제안한 방법은 일반적인 왜곡 영상에서는 기존 방법 보다 비슷하거나 약간의 우수한 성능을 보이지만 Perspective가 존재하는 왜곡 영상에 대해서는 훨씬 적응력이 뛰어나며 보정계수 추출을 위한 화소집단의 노이즈에 둔감하게 반응한다.

4. 결과 분석

표 3은 그림 3의 왜곡 그리드 영상과 표준 그리드 영상과의 영상 오차를 나타내며, 표 4는 그림 3에 각 실험 방법을 적용하여 왜곡 그리드 영상을 보정하여 얻은 결과 영상과 표준 영상간의 영상 오차를 화소(pixel) 단위로 나타내었다.

표 3. 왜곡영상의 영상 오차 (단위: pixel)
Table 3. The error ratio of distorted image

	Mean Error	표준편차
왜곡 영상	7.8667058	5.2789886

표 4. 각 실험 방법에 대한 영상 오차 (단위: pixel)
Table 4. The error ratio for each experiment method

2차 모델 식		3차 모델 식	
화소집단	Mean Error	화소집단	Mean Error
①	4.3785233	①	0.5592119
②	4.3619838	②	0.3424238
③	4.3839235	③	0.3130034
④	4.1047288	④	0.2812039

표 4의 실험 결과를 볼 때 모든 화소 집단에 대하여 2차 모델 식을 적용한 경우보다는 3차 모델을 적용한 경우가 적은 영상오차로 보정이 되었으며, 화소 집단의 선택은 CSR을 구성하는 모든 화소들의 그레이 값을 weight로 할당하여 계산한 각 방향별 평균 intensity를 갖는 좌표 값을 Fitting시의 CSR 원소로 이용하는 것이 가장 정확한 보정 결과(④)를 얻을 수 있었다.

그림 16과 17은 역 방사 그리드 왜곡영상 및 방사 그리드 왜곡 영상을 나타내며, 그림 18과 19는 그림 16과 17을 ④의 방법으로 Fitting을 하여 3차 식의 Warping 모델을 적용하여 보정한 결과이다.

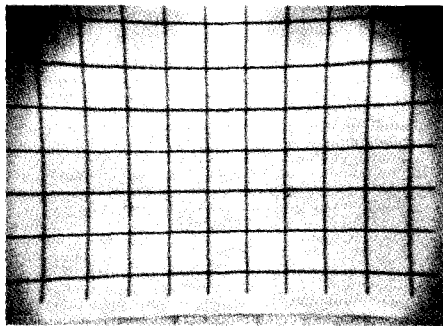


그림 16. 역방사 왜곡된 그리드 영상
Fig. 16. The pincushion grid image

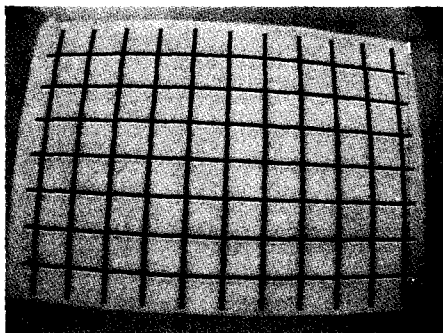


그림 17. 방사 왜곡된 그리드 영상
Fig. 17. The barrel grid image.

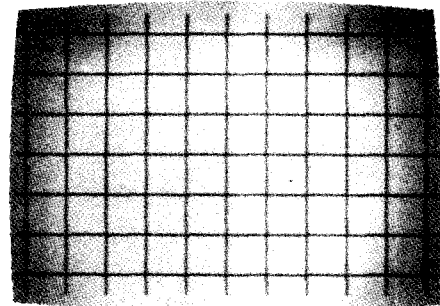


그림 18. 그림 16의 보정 결과
Fig. 18. The calibration result of Fig.16

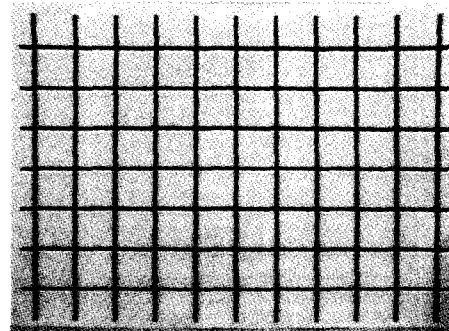


그림 19. 그림 17의 보정 결과
Fig. 19. The calibration result of Fig.17

그러므로 제안한 방법은 실험 결과를 통하여 화소집단은 ④를 택하고 보정 모델 식은 3차 식을 선택할 때가 가장 정확한 보정 결과를 확인할 수 있었다.

한편 ④의 방법으로 화소 집단을 선택하고 2차와 3차식으로 모델링한 결과의 영상 오차에 대한 비교를 그림 20과 21에서 보이고 있다.

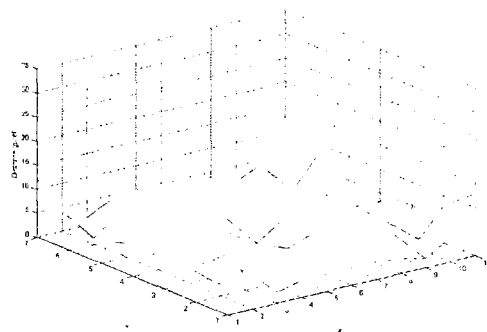


그림 20. 2차 모델식 적용 영상 오차
Fig. 20. The image error for 2nd model application

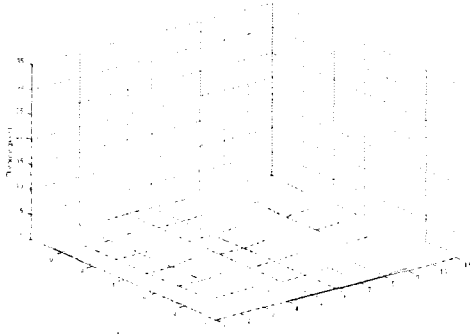


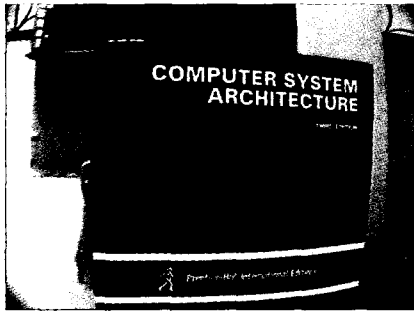
그림 21. 3차 모델식 적용 영상 오차
Fig. 21. The image error for 3rd model application

기존 방법과 제안한 방법에 대한 정확도 비교는 보정 후 결과 영상을 눈으로 직접 확인하여 분별하는 것은 쉽지 않으나 간단히 식(16)에서부터 식(18)까지를

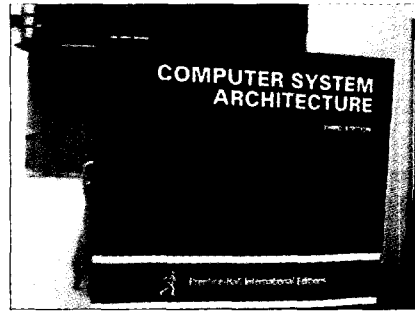
표 5. 제안한 방법과 기존 방법의 비교 (단위: pixel)
Table 5. The comparison of previous method and proposed method

	Mean Error(a)	Ratio of Calibration in (a)	Maximum Error(b)	Ratio of Calibration in (b)
왜곡 영상	7.87	—	29.60	—
B.Prescott 방법	0.367	95.3	2.34	92.1
Rahul 방법	0.324	95.9	2.82	90.5
제안한 방법	0.281	96.4	1.45	95.1

통하여 계산한 결과로 나타낼 수 있다. 표준 그리드 영상에 대한 왜곡 그리드 영상의 영상오차와 기존에 제안한 방법인 B.Prescott의 방법^[2]과 Rahul 방법^[1] 및 제안한 방법을 적용하여 왜곡 영상을 보정한 결과에 대한 비교를 표 5에 나타내었다. 표 5의 비교를 통하여 볼 때 제안한 방법은 심한 왜곡이 있는 High Distortion 렌즈의 경우라 할지라도 기존 방법보다 우수한 평균 0.28 화소이내의 영

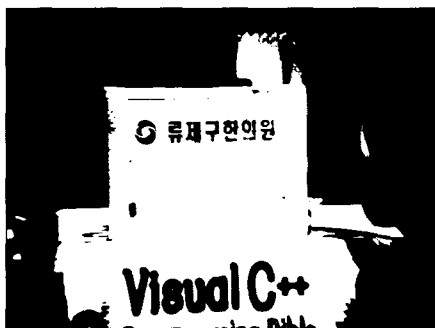


(a) 왜곡 영상
(a) A distorted image



(b) 보정 영상
(b) A calibrated image

그림 22. 방사왜곡 영상의 보정 결과
Fig. 22. The calibrated image with barrel distortion

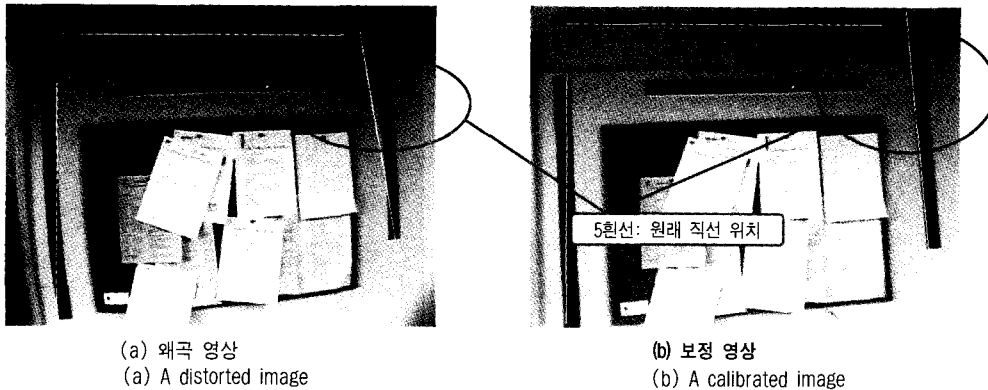


(a) 왜곡 영상
(a) A distorted image



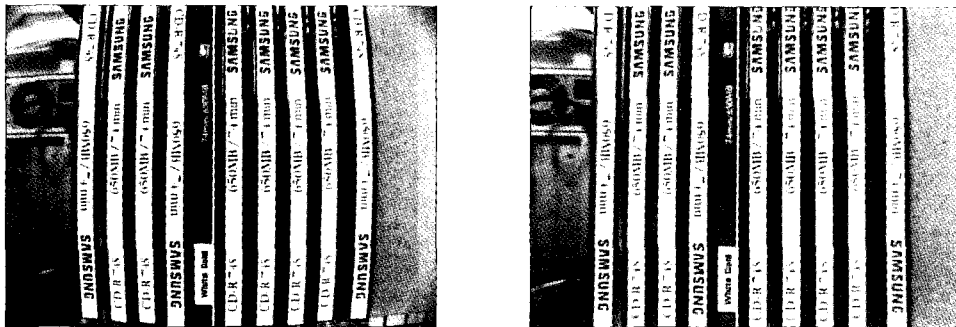
(b) 보정 영상
(b) A calibrated image

그림 23. 역 방사왜곡 영상의 보정 결과
Fig. 23. The calibrated image with pincushion distortion



(a) 왜곡 영상 (a) A distorted image
 (b) 보정 영상 (b) A calibrated image

그림 24. 방사왜곡(직선 삽입) 영상의 보정 결과
 Fig. 24. The calibrated image with barrel distortion(embedded straight line)



(a) 왜곡 영상 (a) A distorted image
 (b) 보정 영상 (b) A calibrated image

그림 25. 방사왜곡(CD 셀) 영상의 보정 결과
 Fig. 25. The calibrated image with barrel distortion(CD Set)

상 오차로 보정이 가능하였으며, 왜곡 보정율이 평균 영상 오차와 최대 영상오차 영역 모두 95% 이상을 유지하고 있다. 그림22에서부터 그림 25는 제안한 방법으로부터 구한 보정 계수를 이용한 렌즈의 유형에 따른 일반 왜곡 영상의 보정 결과 영상이다.

다양한 일반 왜곡 영상의 보정 실험 결과를 볼 때 렌즈의 유형이나 왜곡의 정도 여부에 관계없이 우수한 결과를 보였으며, 투시가 심하게 가해진 영상에서도 투시가 없는 원 영상에 가까운 영상으로 보정이 가능하였다.

V. 결 론

여러 가지 실험 모델을 통하여 실험한 결과를 살펴 볼 때 CSR에 대한 Fitting시 사용할 화소집단의 원소

로는 Gray Scale을 Weight로 하여 구한 평균 Gray Intensity를 갖는 화소들을 이용하고, 표준 그리드 영상의 교차점과 왜곡 그리드 영상의 교차점간의 보정 계수를 구하기 위한 기하학적 모델은 3차 모델(식(10))을 이용하는 것이 보정 결과가 가장 우수하였다. 이러한 방법을 적용할 경우 방사왜곡은 물론 역 방사 왜곡 및 Perspective가 있는 왜곡까지도 평균 0.28 화소 정도의 오차로 정확한 보정을 할 수 있었다. 제안한 방법은 기존의 복잡한 케리브레이션 식에서 계수를 구하기 위한 여러 함수의 최적화 과정이나 케리브레이션 오브젝트의 선택 등에 대한 부담 없이도 간단히 보정 계수를 추출할 수 있는 방법을 제시하고 있으며, 결과에 있어서도 기존 방법보다 우수한 것으로 나타났으므로 광각 CCD 카메라 렌즈를 사용하는 모든 컴퓨터 비전 시스템에서의 활용을 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Rahul Swaminathan and Shree K.Nayar, "Non-Metric Calibration of Wide-Angle Lenses and Polycameras," *Proceeding Computer Vision and Pattern Recognition'99*, pp. 413-419, IEEE Computer Society Press, 1999.
- [2] B. Prescott and G. F. McLean, "Line-Based Correction of Radial Lens Distortion," *Graphical Models and Image Processing*, vol. 59, no. 1, pp. 39-47, Jan. 1997.
- [3] 한기태, 장재영, 김이경, 김희율, "중성자 라디오 그래피 영상처리 시스템을 위한 왜곡 영상 보정 방법", *1998년도 한국통신학회 하계종합학술발표회 논문집(상)*, pp. 415-418, July 1998.
- [4] 한기태, 이광진, 김희율, "광각 CCD 카메라 렌즈를 위한 간단한 자동 보정 방법", *1999년도 한국통신학회 추계종합학술발표회 논문집(하)*, pp. 1547-1550, Nov. 1999.
- [5] A. Goshtasby, "Correction of Image Deformation From Lens Distortion using Bezier Patches," *Graphics, and Image Processing*, pp. 385-394, 1989.
- [6] J. Weng, P. Cohen and M. Hernion, "Camera Calibration With Distortion Models and Accuracy Evaluation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 965-980, Oct. 1992.
- [7] R. Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision," *International Journal of Robotics and Automation*, pp. 323-344, Aug. 1987.
- [8] D. C. Brown, "Decentering Distortion of Lens," *Photogrammetric Engineering*, pp. 444-462, May. 1966.
- [9] A. Conrady, Decentering lens systems, *Monthly notices of the Royal Astronomical Society*, pp. 384-390, 1919.
- [10] Arthur R. Weeks, Jr., *Fundamentals of Electronic Image Processing*, SPIE Press and IEEE Press, 1996.
- [11] Oivid Due Trier and Torfinn Taxt, "Evaluation of Binarization Methods for Document Images," *IEEE TRANSACTIONS ON PAMI* vol. 17, no. 3 pp. 312-315, Mar. 1995.
- [12] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison-Wesely, 1992.
- [13] R. M. Haralick and L. G. Shapiro, *Computer and Robot Vision*, vol. 1, Addison-Wesely, 1992.
- [14] Ramesh Jain, Rangachar Kasturi and Brian G.Schunck, *Machine Vision*, Addison-McGraw Hill, 1995.
- [15] Hironobu Takahashi and Fumiaki Tomita, "Fast Region Labeling with Boundary Tracking," *IEEE International Conference on Image Processing ICIP'89*, Sep. 1989.
- [16] Gilbert and Strang, *Linear Algebra and Its Applications*, Addison-Harcourt Braceovanovich, pp. 154-157, 1988.
- [17] Melvin J. Maron and Robert J. Lopez, *Numerical Analysis*, Wadsworth, Inc. 1991.

저 자 소 개



한 기 태

1982년 2월 : 충남대학교 계산통계학과 (현)컴퓨터과학과 졸업(이학사)
 1990년 2월 : 한양대학교 산업대학원 전자계산과 졸업(공학석사)
 1995년 8월 ~ 현재 : 한양대학교 전자공학과 박사과정(수료)
 1986년 1월 ~ 1992년 8월 : 한국주택은행 전산부 근무(전산역)
 1992년 9월 ~ 현재 : 경원전문대학 컴퓨터정보과(부교수)
 주관심분야 : 컴퓨터 비전, 영상데이터베이스, 전자상거래 등



김 희 율

1976년 ~ 1980년 : 한양대학교 전자공학(공학사)
 1981년 ~ 1983년 : Pennsylvania State Univ. 전자공학(공학석사)
 1984년 ~ 1989년 : Purdue University 전자공학(공학박사)
 1994년 3월 ~ 1998년 2월 : 한양대학교 전자공학과 조교수
 1998년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 전자공학과 부교수
 주관심분야 : 컴퓨터비전, 영상검색, 영상 압축, 워터마크 등