

◆특집◆ 비전응용계측기술

어안렌즈왜곡 및 원근왜곡의 보정

송광열*, 윤팔주**, 이준웅***

Correction of Fisheye Distortion and Perspective Distortion

Gwang Yul Song*, PalJoo Yoon** and Joon Woong Lee***

ABSTRACT

This paper considers the lens distortions such as a fisheye distortion and a perspective distortion. While a fisheye lens has a wide field-of-view, it causes a large distortion to the images. Regardless of a fisheye lens or a rectilinear lens, a lens generates perspective distortion in a vertical direction when the lens views in an upward direction or downward direction. These distortions deform images differently from human visual functions. Therefore, this paper presents a method to correct the distortions, and whereby, the research in this paper enlarges choices of images to image processing algorithm that may select the distorted images and the corrected images depending on applications. An infinite polynomial model is employed in the fisheye radial distortion correction, and the vertical perspective distortion correction is done by using a vanishing point. The methods introduced in this paper are implemented on the images captured by a rear-view camera installed on a vehicle and showed their robustness of the correction.

Key Words : Fisheye Distortion(어안왜곡), Radial Distortion Correction(원주방향 왜곡 보정), Perspective Distortion Correction(원근왜곡 보정)

1. 서론

본 논문에서는 다음 두 가지 사항을 다룬다. 1) 어안렌즈(fisheye lens)로 알려진 초광각 렌즈에 의해 빚어진 어안왜곡(fisheye distortion)^{1,2} 영상을 선형렌즈(rectilinear lens)로 얻은 영상에 준하는 수준의 왜곡보정, 2) 사용하는 렌즈의 형식에 관계없이 3 차원 공간에서의 수직선이 카메라의 광축이 수

평으로부터 위를 향하느냐 또는 아래를 향하느냐에 따라 영상에서 안쪽 또는 바깥쪽으로 기울어져 보이는 원근왜곡(perspective distortion)³에 대한 보정이 그것이다.

본 논문의 왜곡보정에 사용할 카메라의 내·외부 파라미터는 Tasi의 동일 평면 캘리브레이션(coplanar calibration)⁴ 방법을 이용하여 얻는다.

컴퓨터비전 기반의 영상처리 응용시스템 구축시 고려해야 하는 요소들이 많다. 카메라와 렌즈의 선택도 그 중에 하나이다. 만약, 넓은 시계(field of view, FOV)가 시스템의 요구사항 가운데 하나라면 어안렌즈의 선택은 적절한 결정이다. 렌즈에 따라 수평 또는 수직으로 180°의 시계를 갖는 어안렌즈도 있다.

최근 자동차에 대한 안전성이 강조되면서 차

* 전남대학교 산업공학과 지능정보시스템 연구실

** 만도㈜ 중앙연구소

*** 전남대학교 산업공학과, 자동차연구소

Tel. 062-501-1781, Fax. 062-501-1789

e-mail: joonlee@chonnam.ac.kr

컴퓨터비전의 지능형 자동차에의 응용 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

량에 카메라가 장착되는 사례를 쉽게 볼 수 있다. 이 가운데 차량의 후진이나 주차시 후방의 장애물 유무를 확인할 목적으로 후방주시 카메라를 장착하는 경우가 늘고 있다.⁵ 이러한 후방주시 목적으로 사용하는 카메라는 한 순간에 넓은 영역을 보아야 하므로 시계가 큰 어안렌즈를 사용하는 것이 보편화되어 있다. 본 연구에서도 자동차의 후방주시 카메라로 획득한 영상을 대상으로 왜곡보정을 구현한다.

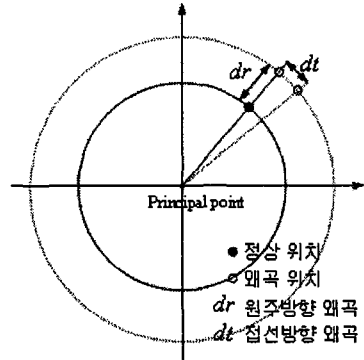
일반적으로 어안렌즈를 통해 얻은 영상은 Fig. 1 에 보인 바와 같이 공간상에서의 직선이 곡선으로 보인다. 특히, 영상의 가장자리에 가까울수록 이러한 왜곡이 심하게 나타난다. 구체적으로 Fig. 1 을 보면 건물들의 기둥이 휘어 있고, 노면에서 직선인 차선경계가 곡선으로 보이며, 중심부에서 벗어난 차량의 경우 마치 언덕에 세워진 것처럼 기울어져 보인다. 이러한 현상은 영상에서 차선관련 정보를 추출하거나, 수평·수직 성분의 에지정보⁶를 활용하여 차량을 검출하고자 할 때 에러의 요인이 될 수 있다. 따라서, 시스템이 추구하는 기능에 따라 이러한 왜곡을 제거할 필요가 있다. 본 논문에서는 이러한 요구에 부응할 수 있는 왜곡보정 알고리즘을 구현할 것이다.



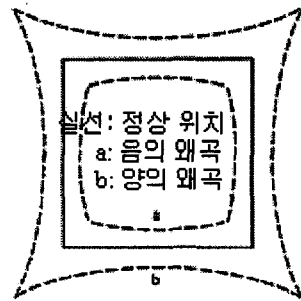
Fig. 1 Distorted fisheye image

렌즈의 왜곡은 영상평면에서 이미지 점들의 위치가 이상적인 위치에서 벗어나는 기하학적인 왜곡으로서 렌즈의 설계와 조립시의 불완전성으로부터 기인된 것이다.¹ Fig. 2(a)에 보인 바와 같이 점들의 위치에러는 원주방향의 에러와 원주방향에 수직인 접선방향의 에러로 구별된다. 원주방향의 에러는 Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 점의 이상적인

위치보다 적거나 커지는 에러이다.



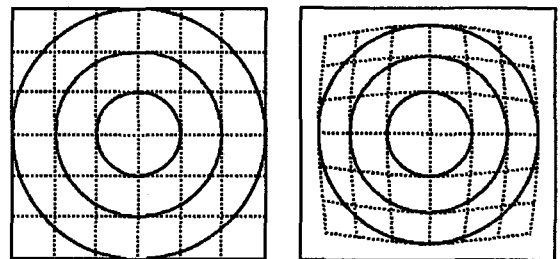
(a) Radial and tangential distortion



(b) Effect of radial distortion

Fig. 2 Distorted fisheye image

Fig. 3 은 원주방향의 왜곡을 실제 표적과 이것의 왜곡된 영상을 가지고 표현한 것이다.



(a) Target

(b) Distorted image

Fig. 3 Target and its distorted image

본 논문은 어안렌즈의 어안왜곡을 설명하는 2 절, 원근왜곡 보정을 다루는 3 절, 각각의

왜곡보정에 대한 실험결과를 보인 4 절, 그리고 마지막으로 결론을 내리는 5 절로 구성되어 있다

2. 어안왜곡

3 차원 공간상의 한 점이 카메라의 영상평면(image plane)에 투영되는 과정은 다음과 같다. 이 때 카메라 모델은 이상적인 핀홀(pinhole) 카메라⁴를 가정한다.

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \mathbf{t} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_u &= f \frac{x_c}{z_c} \\ y_u &= f \frac{y_c}{z_c} \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서 \mathbf{R} 과 \mathbf{t} 는 카메라의 외부 파라미터로서, \mathbf{R} 은 3x3 회전행렬(rotation matrix), \mathbf{t} 는 3x1 병진벡터(translation vector)이다. $(X, Y, Z)'$ 는 3 차원 공간상의 월드좌표계(world coordinate system)상의 한 점이고, $(x_c, y_c, z_c)'$ 는 렌즈의 초점(focal point)을 원점으로 하는 카메라좌표계상의 한 점이다. 수식 (1)은 $(X, Y, Z)'$ 로부터 $(x_c, y_c, z_c)'$ 로의 변환관계를 정의하고 있다. 수식 (2)는 카메라좌표계상의 점 $M_c(x_c, y_c, z_c)$ 이 초점거리 f 인 렌즈를 통해 2 차원의 영상평면에 투영될 때의 관계식을 나타낸 것이다.

렌즈왜곡은 이상점(ideal point) $m_u(x_u, y_u)$ 를 왜곡된 영상점 $m_d(x_d, y_d)$ 로 변환시킨다. 영상의 왜곡모델(distortion model)은 획득된 영상에서 관측되는 왜곡된 좌표로부터 왜곡이 없는 좌표로의 맵핑으로 주어진다.

머신비전의 많은 응용문제에서 접선방향 왜곡은 고려하지 않고 원주방향의 왜곡만을 고려한다.^{2,4} 따라서 본 논문에서도 이러한 개념에 따라 원주방향의 왜곡만을 고려한다. 역변환이 가능한 다음과 같은 함수 R 을 원주방향 왜곡함수라 하자.

$$R: r_u \rightarrow r_d = R(r_u), \quad \frac{\partial R(0)}{\partial r_u} = 1. \quad (3)$$

여기에서 r_u 와 r_d 는 각각 영상평면과 카메라의 광축이 만나는 원점(principal point)으로부터 $m_u(x_u, y_u)$ 와 $m_d(x_d, y_d)$ 까지의 거리를 나타낸다. 이 원점이 왜곡중심인 것이다. 또한 이 수식에서 의미하는 바는 원점 가까운 곳에서의 왜곡은 없다는 것이다.

본 논문에서는 렌즈의 원주방향의 왜곡보정을 위한 왜곡모델로 다음과 같은 무한급수로 표현된 모델을 이용한다.⁴

$$\begin{aligned} x_u &= x_d(1 + \kappa_1 r_d^2 + \kappa_2 r_d^4 + \dots) \\ y_u &= y_d(1 + \kappa_1 r_d^2 + \kappa_2 r_d^4 + \dots) \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 $r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$ 이며, $\kappa_i, i=1,2,\dots$ 는 왜곡상수이다. 수식 (4)에서 1 차 왜곡상수인 κ_1 만을 고려하면 왜곡모델은 수식 (5)로 표현된다.

$$\begin{aligned} x_u &= x_d(1 + \kappa_1 r_d^2) \\ y_u &= y_d(1 + \kappa_1 r_d^2) \end{aligned} \quad (5)$$

이 때 수식 (3)에서 제시한 왜곡함수의 역함수 $R^{-1}(r_d)$ 는 수식 (6)와 같다.

$$r_u = r_d(1 + \kappa_1 r_d^2) \quad (6)$$

여기에서 $r_u = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}$ 이다. Fig. 4 는 수식(6)의 r_u 와 r_d 의 관계를 나타낸 것이다.

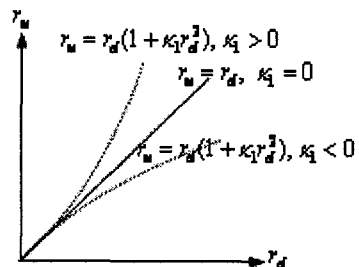


Fig. 4 Relationship of r_u and r_d

r_u 가 주어졌을 때 수식 (6)는 다음과 같이 r_d 에 대한 3 차 방정식이 된다.

$$\kappa_1 r_d^3 + r_d - r_u = 0 \quad (7)$$

r_d 는 카르다노(cardano)의 3 차 방정식의 대수적 해법에 의해 구할 수 있다.² 그러나 렌즈의 왜곡이 커질수록 1 차 왜곡상수인 κ_1 뿐만 아니라 수식 (4)의 높은 차수의 왜곡상수들을 필요로 한다.

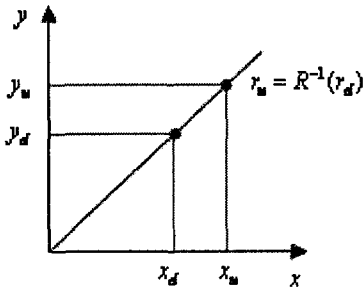


Fig. 5 Relationship of r_u and r_d

원주방향의 왜곡을 묘사한 Fig. 5로부터 다음과 같은 비례식을 얻을 수 있다.

$$\frac{y_d}{x_d} = \frac{y_u}{x_u} \quad (8)$$

이 비례식을 이용하여 다음과 같이 r_d 에 대해 정리한 후 수식 (5)의 첫째 식에 대입한다.

$$r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} = \sqrt{x_d^2 + (x_d \frac{y_u}{x_u})^2} \quad (9)$$

$$x_u = x_d^3 (1 + (\frac{y_u}{x_u})^2) \kappa_1 + x_d \quad (10)$$

(x_u, y_u) 를 알 때, 뉴턴법(Newton-method)⁷에 의해 가장 오차를 작게 갖는 x_d 를 구하고, 식 (7)에 의해 y_d 를 구한다. 높은 차수의 왜곡상수를 고려할 경우도 같은 방법으로 x_d, y_d 를 구한다.

본 논문에서는 수식 (3)의 무한급수 왜곡모델을 κ_1 만을 고려한 p1 모델, κ_2 까지 고려한 p2 모델, κ_3 까지 고려한 p3 모델로 분류한다. 그리고 이 가운데 어떤 모델을 선정하여 어안왜곡의 보정을 할 것인지 결정은 다음과 같은 방법을 이용한다. 3 차원 공간상에서 기지의 N 개의 표적 점들(target points)

각각의 좌표를 수식 (1)과 (2)를 통해 영상평면상으로 투영하여 N 개의 이상점들을 얻고, 이 점들 각각에 대해 왜곡중심에서 이 점들까지의 거리 r_u 를 얻는다. 그리고 이러한 표적점들의 왜곡이 된 디지털 영상점들 각각을 영상평면상으로 역투영한다.⁴ 이렇게 역투영된 점들 각각에 대해 왜곡중심에서 이 점들까지의 거리 r_d 를 얻고, p1 모델, p2 모델, p3 모델 각각에 대해 왜곡함수 R에 의해 $r'_u = R^{-1}(r_d)$ 를 얻는다. r_u 와 r'_u 의 차이는 왜곡모델의 오차로 볼 수 있다. 왜곡모델의 오차는 다음과 같이 정의한다.

$$e = \sum_{i=1}^N (r_{u_i} - r'_{u_i})^2 \quad (11)$$

원주방향의 어안왜곡 보정은 가장 작은 오차를 제공하는 모델을 선택하여 다음과 같이 행한다. 첫째, 왜곡된 영상과 선택된 모델의 왜곡상수의 차수에 부합되도록 식 (4)를 수정하여 왜곡보정후 구축될 영상의 가로, 세로 크기를 결정한다. 둘째, 보정후 영상의 각 픽셀의 위치에 채워질 밝기값을 입력된 왜곡영상으로부터 취한다. 이를 위해 보정후 영상의 임의의 픽셀의 위치를 (x_u, y_u) 라 할 때 이에 대응되는 왜곡영상의 위치 (x_d, y_d) 를 선택된 모델에 맞게 식 (10)을 수정하여 뉴턴법으로 구한다. 이렇게 구한 x_d, y_d 의 값이 정수가 보장되지 않으므로 가우스(Gauss) 보간법에 의해 (x_u, y_u) 에 채울 밝기값을 결정한다.

3. 원근왜곡

본 논문에서 고려하는 수직방향의 원근왜곡은 공간상에서 평행한 두 수직선이 이미지상에서 평행을 유지하지 않는 현상이다. 이러한 현상은 장면(scene)을 주시하는 카메라의 광축이 수평을 유지하지 않을 때 발생한다. Fig. 6은 장면내에 있는 건물의 수직선들이 기울어져 있는 원근왜곡을 보인 영상으로 영상위에 그려 놓은 보조선들을 통해 이를 쉽게 알 수 있다.

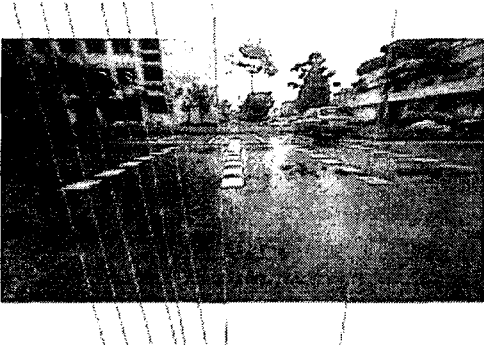


Fig. 6 Perspective distortion

공간상에서 수직방향으로 평행한 직선들이 한 점에서 만난다. 이 점을 소실점(vanishing point)이라 한다. 본 논문에서 원근왜곡의 보정은 영상의 소실점을 이용한다. 이를 위해 먼저 소실점을 구한다. 본 연구에서 월드좌표계의 Z 축을 수직 하 단으로 향하도록 할 때 수직선분의 소실점의 공간상의 위치는 Z 축이 무한대인 곳에 있다. 따라서 영상평면에서의 이 소실점의 위치 (v_x, v_y) 는 수식 (2)로부터 다음의 수식으로 표현한다.

$$v_x = \lim_{Z \rightarrow \infty} \frac{f \cdot x_c}{z_c}, \quad v_y = \lim_{Z \rightarrow \infty} \frac{f \cdot y_c}{z_c} \quad (12)$$

원근왜곡된 영상의 한 점을 (x_p, y_p) 라 하고 원근왜곡이 보정된 점을 (x_t, y_t) 라 하자. 이 때 (x_t, y_t) 는 다음과 같이 구한다. 이동(translation)을 고려하지 않고, $Z=0$ 인 평면에 투영이 계속되는 원근법으로 이루어진 변환행렬이 다음과 같다고 하자.⁸

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & p \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & p \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

이 변환관계하에서 제차좌표 $(x, y, z, 1)$ 를 가진 어떤 점의 투영은

$$\begin{aligned} [x, y, z, 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & p \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} &= [x, y, 0, yp+1] = \left[\frac{x}{yp+1} \quad \frac{y}{yp+1} \quad 0 \right] \\ &= [X, Y, 0, 1] \end{aligned} \quad (14)$$

이다. 여기에서 모수 p 는 영상의 Y 축상의 소실점을 이용하여 다음과 같이 추정된다.

$$[0 \ 1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & p \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [0 \ 1 \ 0 \ p] = [0 \ v_y \ 0 \ 1] \quad (15)$$

$$p = \frac{1}{v_y} \quad (16)$$

p 를 이용하여 원근왜곡을 보정하기 위해 수식 (14)를 다음과 같이 역변환한다.

$$x = \frac{X}{1 - Y \cdot p}, \quad y = \frac{Y}{1 - Y \cdot p} \quad (17)$$

수식 (17)을 이용하여 수직방향의 원근왜곡을 보정하기 위해 영상의 X 좌표의 원점을 Fig. 7에 보인 바와 같이 소실점의 X 좌표로 이동한다. 그리고 수식 (17)을 이용하여 보정을 한후 다시 원래 영상의 원점으로 이동시킨다. 이에 대한 수식이 다음과 같다.

$$x_t = \frac{x_p - v_x}{1 - p \cdot y_p} + v_x, \quad y_t = \frac{y_p}{1 - p \cdot y_p} \quad (18)$$

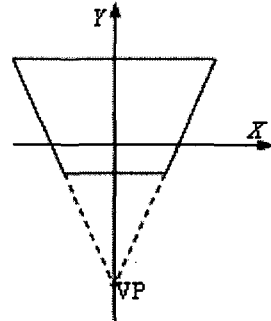


Fig. 7 Vanishing point

4. 실험결과

Fig. 8 에 보인 실험차량에 장착된 ②라고 표시된 CCD 카메라에 의해 촬영된 영상에 의해 왜곡 보정 실험이 진행되었다.

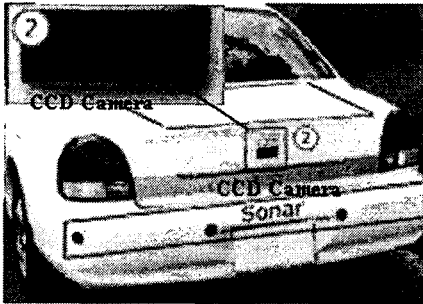
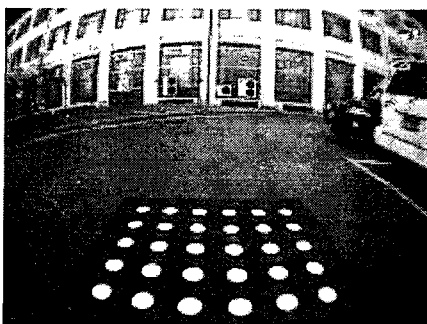
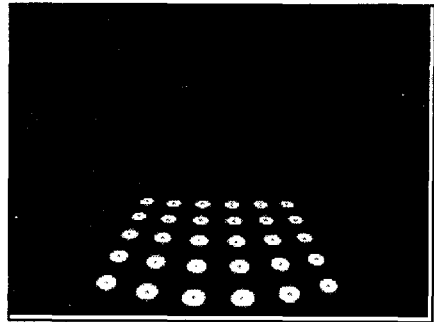


Fig. 8 Camera set-up and test vehicle

p1 모델, p2 모델, p3 모델에 사용할 왜곡상수들은 Tasi⁴의 카메라 캘리브레이션 방법을 통해 얻는다. 캘리브레이션에 사용한 영상은 Fig. 9(a)와 같다. 이 영상의 하단부에 규칙적으로 배열된 하얀 원들이 카메라 파라미터를 구하는데에 사용될 표적이다. 이진화⁶, 블럽칼라링⁶, Otsu의 문턱치 추출법⁶을 이용하여 캘리브레이션 표적점들의 중심좌표를 Fig. 7(b)와 같이 추출하여, 이를 입력으로 Table 1에 보인 카메라의 내·외부 파라미터를 얻었다.



(a) Raw image



(b) Extraction of target points

Fig. 9 Calibration target image

Table 1 Calibration parameters

$f = 2.2377264$
$\kappa_1 = 0.1532922$
$R = \begin{bmatrix} 0.9996807 & -0.0112395 & 0.0226300 \\ 0.0182643 & -0.2974554 & -0.9545610 \\ 0.0174602 & 0.9546696 & -0.2971551 \end{bmatrix}$
$t = \begin{bmatrix} -673.3828721 \\ 469.7949852 \\ 291.3625037 \end{bmatrix}$

Table 2는 캘리브레이션을 통해 구한 왜곡모델별 왜곡상수를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)에 보인 30개의 표적점들에 대해 Table 2에 제시된 데이터를 활용하여 수식 (11)의 에러를 계산한 결과 Table 3과 같은 데이터를 얻었다. 이에 따라 현재 사용중인 카메라와 렌즈에 의해 획득된 영상의 어안왜곡 보정시 κ_1, κ_2 를 사용한 p2 모델을 이용하는 것이 보정에러와 시간을 단축할 수 있다.

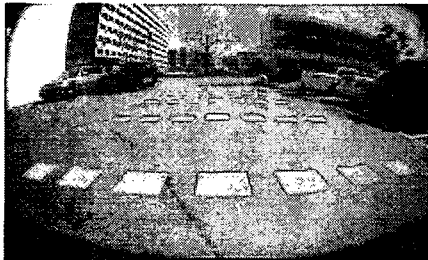
Table 2 Distortion coefficients

모델	왜곡상수
P1	$\kappa_1 = 0.1532922$
P2	$\kappa_1 = 0.0666348, \kappa_2 = 0.0278490$
P3	$\kappa_1 = 0.0663389, \kappa_2 = 0.0280948, \kappa_3 = -0.0000597$

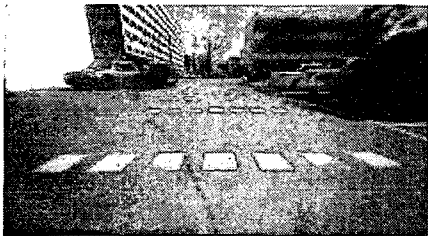
Table 3 Error of distortion models

모델	p1	p2	p3
에러	0.0033228	0.0001859	0.0001859

Fig. 10 은 Fig. 10(a)에 보인 왜곡영상에 대해 p2 모델을 기반으로 어안왜곡을 보정한 결과를 보인 것이다. 그림에 제시된 실험결과는 어안왜곡만을 보정한 결과이므로 공간상에서 수직선인 건물의 기둥들이 기울어져 보이는 원근왜곡은 제거되지 않았음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 원근왜곡의 보정은 어안왜곡이 보정된 영상에 대해 원근왜곡 보정 로직을 적용함으로써 구현된다.



(a) Distorted image



(b) Corrected image by p2 model
Fig. 10 Fisheye distortion Correction

Fig. 11 은 Fig. 6 에서 보인 원근왜곡을 보정한 결과를 보인 것이다. 공간상에서 평행한 수직선들이 영상에서도 평행한 수직선으로 보임에 따라 원근왜곡에 대한 보정이 성공적으로 수행되었음을 알 수 있다.

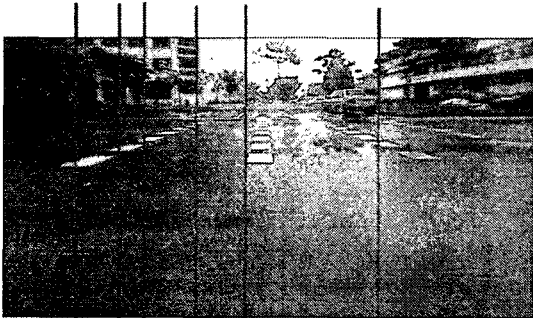
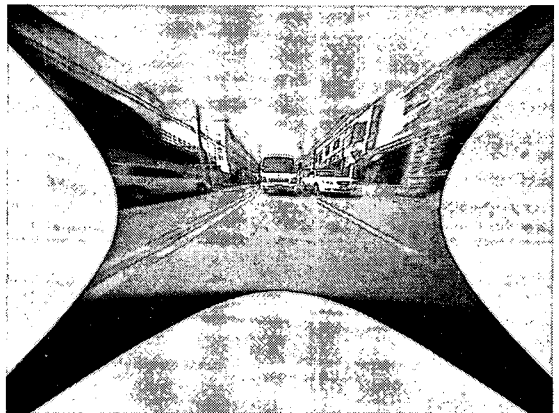


Fig. 11 Correction of perspective distortion

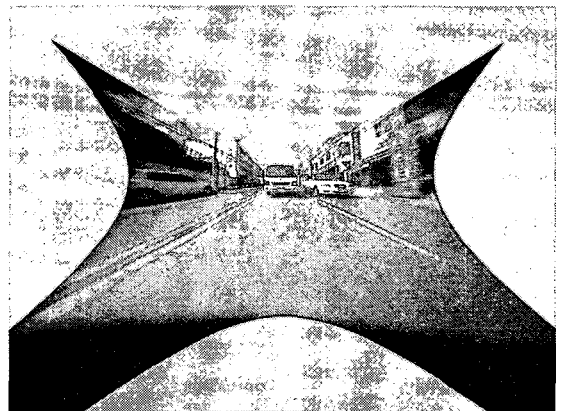
Fig. 12 는 왜곡보정 결과를 동일 스케일로 나타냈다. Fig. 12(a)에 보인 왜곡된 영상에 대해 먼저 Fig. 12(b)에 보인 바와 같이 어안왜곡을 보정하였다. 어안왜곡이 보정된 영상을 잘 관찰하면 공간상에서 수직선인 건물의 기둥들이 기울어져 보이는 원근왜곡은 제거되지 않았음을 알 수 있다. 따라서 원근왜곡의 보정은 Fig. 12(c)에 보인 바와 같이 어안왜곡이 보정된 영상에 대해 원근왜곡 보정 로직을 적용하여 구현하였다.



(a) Distorted image



(b) Fisheye distortion Correction

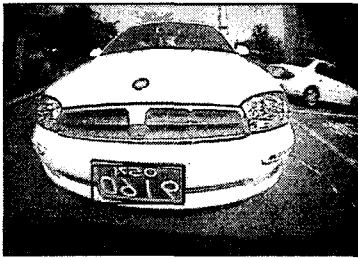


(c) Fisheye distortion and perspective distortion Correction

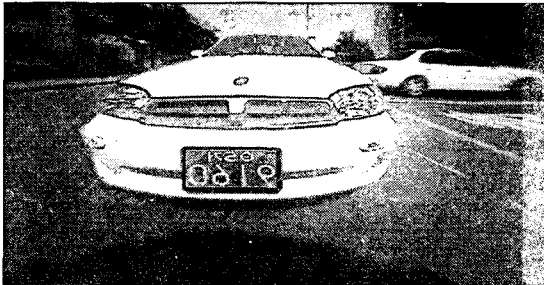
Fig. 12 Fisheye and perspective distortion Correction

어안렌즈는 대개 대각선방향으로의 시계는 180°에 이르고, 수평방향의 시계가 수직방향의 시계보다 크다. 이러한 특성으로 인해 왜곡이 보정된 영상의 모습이 Fig. 10(b)처럼 보인 것이다.

Fig. 13 은 카메라에 매우 근접한 물체의 경우 왜곡발생과 이에 대한 보정결과를 보인 것이다. Fig. 13(a)를 보면 근접되어 있는 차량의 사각형 번호판이 마치 구부러져 있는 것처럼 보인다. Fig. 13(b)는 이에 대한 보정결과로서 차량의 번호판 모양이 사각형으로 복원되었음을 알 수 있다.



(a) Distorted image



(b) Corrected image

Fig. 13 An example of distortion Correction for the close object

5. 결론

본 논문에서는 보다 넓은 시계 확보를 목적으로 사용되는 어안렌즈에 의해 촬영된 영상의 원주 방향의 왜곡 보정과 카메라 광축의 지향 방향에 따라 발생하는 수직방향의 원근왜곡을 보정할 수 있는 효과적인 방법을 제시하였다. 특히, 최근 자동차에 장착이 늘고 있는 후방주시 카메라의 어안 렌즈의 사용이 단순히 운전자에게 넓은 영역의 영상을 제공하는 수준에 머무르지 않는다는 점에 착안하여, 추가적인 응용목적에 부합되는 알고리즘 개발에 영상의 사용의 폭을 넓히는 계기가 될 수

있도록 하였다.

논문에서는 비교적 널리 알려진 무한급수 전개방식의 원주방향의 왜곡모델에 대해 이 모델에서 사용할 왜곡상수의 적절한 차원 선택을 위해서 세 가지의 모델을 제시하고 에러모델링을 통해 최적의 모델을 선택할 수 있는 방안을 제안하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 시행하는 부품·소재기술개발사업인 VISS(영상기반 지능형 조향장치)를 개발중인 ㈜만도 과제 ‘반자동 주차 모듈개발’의 위탁과제로 진행되었습니다.

참고문헌

1. Weng, J., Cohen, P., Herniou, M., "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation," IEEE PAMI, Vol. 14, No. 10, pp. 965-980, 1992.
2. Devernay, F., Faugeras, O., "Straight lines have to be straight," Machine Vision and Application, No. 13, pp. 14-24, 2001.
3. <http://www.photo.net/learn/fisheye/>, Fisheye to Rectilinear conversion: One way to obtain true wideangle images with small sensor DSLRs
4. Tsai, R. Y., "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses," IEEE Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323-344, 1987.
5. Song, K.Y, Lee, K.Y, Son, J.W, Lee, J.K, Lee, J.W, "A Distortion Correction of a Fish-Eye Lens to a Rear-View Camera for an Automobile," KSAE '05 Fall Proceeding, pp. 1175-1180, 2005.
6. Faugeras, O., "Three Dimensional Computer Vision," MIT Press, 1993.
7. Chapra, S. C., Canale, R. P., "Numerical Methods for Engineers," McGraw-Hill Higher Education, 2002.
8. Fangi, G, Gagliardini, G, Malinverni, E. S., "Photointerpretation and Small Scale Stereoplotting with Digitally Rectified Photographs with Geometrical Constraints," Proceedings of CIPA Congress, pp. 18-21, 2001.