

논문 2013-50-7-23

방사왜곡을 고려한 보정 영상 위 최근접 화소 이용 보간법

(An Interpolation Method for a Barrel Distortion
Using Nearest Pixels on a Corrected Image)

최 창 원*, 이 준 환**

(Changwon Choi and Joonhwan Yi[Ⓢ])

요 약

본 논문에서는 어안렌즈의 방사왜곡을 고려한 개선된 양선형 보간법을 제안한다. 어안렌즈에서 발생하는 방사왜곡의 보정은 크게 좌표 변환과 보간 작업의 두 단계를 통해 진행된다. 본 논문은 방사왜곡을 고려한 보간법에 대한 연구이다. 기존 기술과 달리 왜곡 영상이 아닌 보정 영상에서 근접한 좌표 4개를 사용한 보간법을 제안한다. 실험결과는 주관적인 화질과 객관적인 화질(PSNR)이 향상되는 것을 보여준다.

Abstract

We propose an interpolation method considering barrel distortion of fisheye lens using nearest pixels on a corrected image. The correction of barrel distortion comprises coordinate transformation and interpolation. This paper focuses on interpolation. The proposed interpolation method uses nearest four coordinates on a corrected image rather than on a distorted image unlike existing techniques. Experimental results show that both subjective and objective image qualities are improved.

Keywords : Fisheye lens, correction of barrel distortion, interpolation

I. 서 론

어안렌즈 또는 초광각렌즈는 광각 렌즈와 비교하여 화각이 넓다는 장점을 가지고 있기 때문에 최근 자동차^[1], 항법 장치^[2], 로봇^[3], 영상 의학^[4] 등의 다양한 머신 비전 분야에서 다양하게 활용되고 있다. 하지만 화각이 넓어짐에 따라 광축으로부터 멀어지는 외곽으로 갈수록

방사왜곡이 심해진다. 이러한 방사왜곡을 보정하기 위해 두 단계^[6]를 거치게 된다. 첫 번째는 어안렌즈로부터 획득한 영상을 보정할 영상으로 좌표 변환하는 것이다. 두 번째는 보정할 영상 위에서 해당 좌표의 화소 값을 결정하는 보간법에 대한 것이다.

좌표 변환은 렌즈 왜곡의 수학적 모델을 기반으로 한다. II장 1절에서 설명한 렌즈 왜곡의 수학적 모델은 일반적으로 다항식 모델^{[7],[8]}이나 기하학적인 모델^{[3],[9]}로 표현된다. 이때 수학적 모델의 파라미터를 정확하게 예측하기 위하여 II장 2절에서 설명되어 있는 교정(calibration)을 수행한다. 지금까지 기존 많은 연구들이 렌즈 왜곡의 보정에서 교정에 대하여 진행되었다. 하지만, 실제 화소 값을 결정하는 보간법에 대한 연구는 많이 진행되지 않았다.

좌표 변환이 완료되면 해당 좌표의 화소 값을 결정

* 학생회원, ** 평생회원, 광운대학교 컴퓨터공학과
(Dept. of Computer Engineering, Kwangwoon University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: joonhwan.yi@kw.ac.kr)

※ 본 논문은 지식경제부 출연금으로 수행한 ETRI SW-SoC 융합 R&BD센터의 연구결과입니다.

※ 본 논문은 한국연구재단에서 지원하는 2012년도 일반연구자지원사업(No. 2012-0008329)의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

접수일자: 2013년2월21일, 수정완료일: 2013년6월22일

하는 보간법을 수행하여야 한다. 일반적인 영상 처리에서 보간법은 입력 영상의 크기를 변경할 때, 화소 값이 결정되지 않는 화소들에 대하여 주변 좌표의 화소 값을 참조하여 해당 좌표의 화소 값을 결정하여 보간된 영상을 생성하는 것이다. 기존 대표적인 보간법에는 최근접 보간법, 선형 보간법, 3차 회선 보간법 등이 있다^[10]. 마찬가지로, 방사왜곡 보정에서 보간법은 왜곡된 영상에 대하여 보정 영상을 생성할 때, 방사 왜곡으로 인하여 화소 값이 결정되지 않는 화소에 대한 화소 값을 결정하는 것이다^[1]. 기존 대부분 방사왜곡 보정의 경우, 선형 보간법^{[11],[12]}이나 3차 회선 보간법^[13]을 사용하였다. 하지만 어안 렌즈로 촬영한 영상의 경우, 방사 왜곡으로 인하여 기존에 좋은 성능을 보이는 보간법이 좋은 성능을 보이지 않는 경우가 발생한다. 따라서 이러한 방사 왜곡을 고려하여 보정 영상에서 길이의 비를 적용한 개선된 선형 보간법이 제안되었다^[14].

앞서 설명한 보간법들은 왜곡 영상 위에서 인접한 화소들을 이용하여 보간법을 수행하였다. 하지만 영상의 외곽으로 갈수록 방사 왜곡이 심해짐에 따라 왜곡 영상에서 인접한 화소가 보정 영상에서는 인접한 화소가 아닐 수 있다. 그래서 본 논문에서는 왜곡 영상이 아닌 보정 영상에서의 최근접 화소를 이용한 보간법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 관련 연구에 대하여 살펴보고, III장에서는 제안하는 보간법을 설명한다. 그리고 IV장에서는 이전 보간법들과 제안하는 보간법에 대한 실험 결과를 보이고, V장에서는 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

해당 장에서는 렌즈 왜곡, 교정, 구형 사상 모델, 그리고 사상 방향에 대하여 알아본 후, 보정 영상에서 길이의 비를 적용한 선형 보간법^[14]을 포함한 기존 보간법들에 대하여 설명한다.

1. 렌즈 왜곡(Lens distortion)

렌즈 왜곡은 방사 왜곡^[5]과 약간의 뒤틀림 왜곡^[15]으로 이루어진다. 방사 왜곡(radial distortion 또는 curvilinear distortion)은 광선이 렌즈를 통해 굴절되면서 발생하는 대칭적인 비선형 왜곡이며, 광축(optical axis)에서 영상의 외곽으로 갈수록 심해진다. 방사 왜곡은 다시 크게 술통형 왜곡(barrel distortion)과 바늘꽃

이 왜곡(pincushion distortion)으로 나눌 수 있다. 술통형 왜곡은 광축으로부터 거리가 멀어질수록 영상의 배율이 감소하는 것을 의미하며, 어안렌즈에서 주로 나타난다. 바늘꽃이 왜곡은 광축으로부터 거리가 멀어질수록 영상의 배율이 확대되는 것을 의미하며 전방위 렌즈(catadioptric lens 또는 mirror lens)에서 주로 나타난다. 뒤틀림 왜곡(tangential distortion 또는 decentering distortion)은 광축이 이탈하여 발생하는 물리적인 왜곡으로 렌즈 제조 과정에서 렌즈와 영상 평면이 완벽하게 평행을 이루지 않기 때문에 발생한다.

렌즈 왜곡의 수학적 모델은 방사 왜곡과 뒤틀림 왜곡을 수학적으로 정의하는 것이다. 이러한 렌즈 왜곡은 일반적으로 다항식 모델(polynomial model)^{[7],[8]}이나 기하학적인 모델(geometric model)^{[3],[10]}로 표현된다. 이 두 모델은 상호 보완적이다^[16]. 이때 기존 많은 연구들^{[2]-[4],[6]-[8],[12]-[14]}이 방사 왜곡만 고려하고 뒤틀림 왜곡을 고려하지 않는 데, 이는 뒤틀림 왜곡은 영상에 영향을 거의 주지 않아 이에 대한 변수를 줄여서 수학적 모델의 복잡도를 단순하게 하기 위함이다^{[8],[17]}.

2. 교정(Calibration)

교정은 II장 1절에서 설명한 렌즈 왜곡의 수학적 모델의 파라미터들을 정확하게 예측하는 것이다^[11]. 파라미터들은 크게 외부 파라미터(extrinsic parameter)들과 내부 파라미터(intrinsic parameter)로 나눌 수 있다^[7]. 외부 파라미터^[18]는 카메라와 장면간의 기하학적인 관계를 예측하는 데 사용된다. 반면, 내부 파라미터는 초점 거리, 광축, 왜곡 계수와 같은 카메라의 특성을 예측하는 데 사용된다. 즉, 어안렌즈로 촬영하여 왜곡된 영상을 보정된 영상으로 보정하기 위해서는 내부 파라미터를 알아야 한다. 외부 파라미터와 달리 내부 파라미터는 같은 카메라 설정에 대하여 한번 계산한 후 LUT와 같은 메모리에 저장하여 사용가능하기 때문에 재계산이 필요가 없다^[12].

교정은 일반적으로 측량적 방법과 비측량적 방법으로 나눌 수 있다. 측량적 방법(metric method 또는 photogrammetric calibration)는 교정판과 같은 미리 알려진 객체를 이용한다^{[4],[9],[11],[17]}. 반면, 비측량적 방법(non-metric method 또는 self-calibration)는 미리 알려진 객체가 아닌 영상 내에서 직선과 같은 특징을 이용한다^{[7],[8],[12],[19]}. 이러한 교정이 필요한 이유는 대량 생산으로 인해 렌즈의 특성이 렌즈마다 다양하기 때문이며, 초점이나 줌 설정에 따라 달라질 수 있기 때문이다^[8].

3. 구형 사상 모델(Spherical projection model)

본 논문에서는 좌표 변환을 위하여 기하학적인 모델 중 하나인 구형 사상 모델^[9]을 사용하였다. 해당 방법은 렌즈를 완전한 구로 가정하기 때문에 다른 방법들에 비하여 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 하지만, 좌표 변환과 보간법은 독립적으로 수행이 가능하며, 본 논문에서는 보간법에 초점을 맞췄기 때문에 구형 사상 모델을 사용하였으나 다른 좌표 변환 방법을 사용해도 제안하는 보간법의 효과는 동일하다.

구형 사상 모델은 좌표 변환을 위하여 구에서 평면으로 사상 연산을 수행한다. 그림 1은 어안렌즈를 완전한 구로 가정하였을 때, 영상 평면 위의 왜곡되지 않은 좌표 $P(x_c, y_c)$ 가 방사 왜곡으로 인해 센서 평면 위의 왜곡된 좌표 $S(x_d, y_d)$ 로 사상이 되는 것을 나타낸다. 그리고 F 는 초점 거리를 나타낸다. 이때 삼각형의 닮음비를 이용하면 식 (1)과 같이 $S(x_d, y_d)$ 를 계산할 수 있다.

$$(x_d, y_d) = \left(\frac{x_c F}{\sqrt{F^2 + x_c^2 + y_c^2}}, \frac{y_c F}{\sqrt{F^2 + x_c^2 + y_c^2}} \right) \quad (1)$$

또한, 식 (1)을 $P(x_c, y_c)$ 에 대하여 다시 정리하면 식 (2)와 같다.

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{x_d F}{\sqrt{F^2 - (x_d^2 + y_d^2)}}, \frac{y_d F}{\sqrt{F^2 - (x_d^2 + y_d^2)}} \right) \quad (2)$$

어안렌즈의 왜곡 보정을 위하여 식 (1)과 식(2)를 이용하여 왜곡 영상에서 보정 영상으로 변환되는 좌표를 계산할 수 있다.

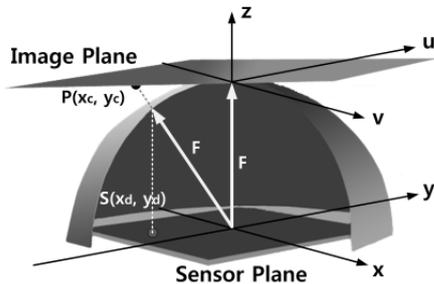


그림 1. 영상 평면과 센서 평면의 사상 관계
Fig. 1. Mapping relation between image plane and sensor plane.

4. 사상 방향(Direction of mapping)

왜곡 보정을 위한 좌표 변환을 수행할 때, 사상이 되는 방향에 따라 전방향 사상과 역방향 사상으로 나눌 수 있다. 전방향 사상은 식 (2)를 이용하여 왜곡 영상에서

보정 영상으로 변환되는 좌표를 계산한 후, 왜곡 영상 위의 좌표 화소 값을 보정 영상 위의 변환되는 좌표 화소 값으로 사상시키는 것이다. 전방향 사상은 왜곡 영상과 보정 영상 간의 다대일 사상 관계로 인하여 겹침 현상과 구멍 현상이 발생하기 때문에 이를 예방하기 위한 추가적인 방법이 필요하다. 역방향 사상은 식 (1)을 이용하여 보정 영상에서 왜곡 영상으로 변환되는 좌표를 계산한 후, 보정 영상 위의 좌표 화소 값을 왜곡 영상 위의 좌표 화소 값으로 사상시키는 방법이다. 역방향 사상은 왜곡 영상과 보정 영상 간의 일대다 사상 관계로 인하여 겹침 현상과 구멍 현상은 발생하지 않지만, 식 (1)을 통하여 변환되는 좌표가 정수 좌표로 떨어지지 않는 경우가 발생하기 때문에 왜곡 영상 위의 주변 좌표로부터 보정 영상 위의 해당하는 좌표 화소 값을 결정하기 위한 보간법이 필요하다.

그림 2는 전방향 사상과 역방향 사상을 설명하기 위한 예이다. 그림 2(b)는 식 (1)을 이용하여 그림 2(a)를 어안영상으로 변환한 그림이다. 그림 2(c)는 그림 2(b)를 전방향 사상을 통하여 생성된 보정 영상이다. 영상 내에 구멍이 발생하여 추가적인 방법이 필요함을 확인할 수 있다. 특히 그림 2(c)를 통해 영상의 외곽에서 구멍이 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 방사 왜



그림 2. 전방향 사상과 역방향 사상의 예: (a) 원본 영상, (b) 왜곡 영상(어안 영상), (c) 전방향 사상을 이용한 보정 영상, (d) 역방향 사상을 이용한 보정 영상

Fig. 2. Example image of forward mapping and backward mapping: (a) original image, (b) distorted image, (c) corrected image by forward mapping, (d) corrected image by backward mapping.

곡으로 인하여 영상 외곽의 정보가 영상의 중심보다 많이 없음을 보여준다. 그림 2(d)는 그림 2(b)에 대하여 역방향 사상 중 선형 보간법을 적용한 예를 나타낸다. 보간법에 대하여서는 다음 절에서 설명한다.

5. 보간법(Interpolation)

역방향 사상을 통하여 화소 값을 결정하기 위하여 보간법이 필요하다. 영상처리에서 대표적인 보간법에는 최근접 화소 보간법(nearest neighborhood interpolation), 선형 보간법(bilinear interpolation), 3차 회선 보간법(cubic interpolation) 등이 있다^[10]. 최근접 화소 보간법은 보간 시 가장 인접한 좌표의 화소 값을 대입하는 방법이다. 선형 보간법은 보간 시 이웃한 4개 좌표의 화소 값에 대하여 거리에 반비례하는 가중치를 적용하여 화소 값을 계산한다. 3차 회선 보간법은 보간 시 이웃한 16개 좌표의 화소 값에 대하여 양의 가중치와 음의 가중치를 주어 화소 값을 계산한다. 일반적인 영상 처리에서는 보간 시 사용하는 보간 함수가 복잡할수록 연산량이 많은 반면 좋은 성능을 보인다. 하지만, 방사 왜곡의 보정에 사용되는 보간법의 경우, IV장 실험 결과에 있는 표 1에서 볼 수 있듯이 방사 왜곡에 의해 기존 영상 처리에서는 좋은 성능을 보이는 보간법이 좋은 성능을 보이지 않는다. 그렇기 때문에 방사 왜곡을 고려하여 보정 영상 위에서 거리에 가중치를 주어 보간을 수행하는 개선된 선형 보간법^[14]이 제안되었다.

개선된 선형 보간법은 먼저 보간할 좌표인 $C(x_c, y_c)$ 에 대하여 식 (1)을 이용하여 왜곡 영상 위에서의 좌표인 $D(x_d, y_d)$ 를 구한다. 그리고 이때 $D(x_d, y_d)$ 에 인접한 4개의 정수 좌표 $D_k(x_d^k, y_d^k)$ ($k=0,1,2,3$)에 대하여 다시 식 (2)를 이용하여 보정 영상 위에서의 실수 좌표 $C_k(x_c^k, y_c^k)$ ($k=0,1,2,3$)를 계산한다. 이에 대한 그림 3에

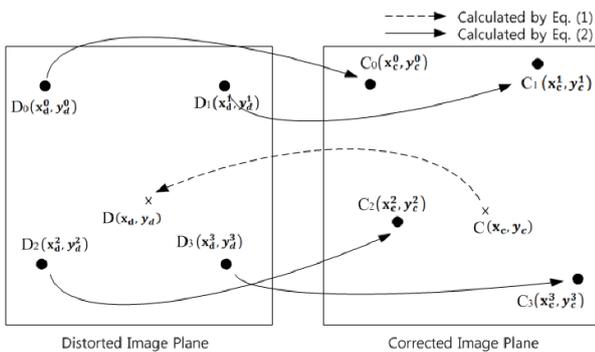


그림 3. 좌표 변환의 예
Fig. 3. Example of coordinate transformation.

보인다. 기존 선형 보간법은 $D_k(x_d^k, y_d^k)$ 를 사용하여 보간을 수행하였으나, 개선된 선형 보간법은 $C_k(x_c^k, y_c^k)$ 를 사용하여 보간을 수행한다.

그림 4는 보정 영상 위에서 $C_k(x_c^k, y_c^k)$ 를 사용하여 보간하는 방법을 나타낸다. 먼저 수평방향인 $C_0(x_c^0, y_c^0)$ 와 $C_1(x_c^1, y_c^1)$ 의 사이의 좌표인 T_1 과 $C_2(x_c^2, y_c^2)$ 와 $C_3(x_c^3, y_c^3)$ 의 사이의 좌표인 T_2 에 대한 화소 값을 계산한 후 보간할 좌표의 화소 값을 계산한 후, 보간할 좌표인 $C(x_c, y_c)$ 의 화소 값을 결정한다. 삼각함수를 이용하면 T_1 과 T_2 의 좌표를 각각 계산할 수 있으며 이는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} T_1(x_c, y_c^0 \pm |x_c - x_c^0| \tan \alpha) \\ T_2(x_c, y_c^2 \pm |x_c - x_c^2| \tan \beta) \end{aligned} \quad (3)$$

이때 $C_0(x_c^0, y_c^0)$ 과 T_1 사이의 거리인 d_1 은 식 (4)와 같다.

$$d_1 = \sqrt{(x_c^0 - x_c)^2 + (|x_c - x_c^0| \tan \alpha)^2} \quad (4)$$

식 (4)와 같은 방법으로 그림 4에 있는 $d_2 \sim d_6$ 까지의 거리를 계산할 수 있으며 이때 $C(x_c, y_c)$ 의 화소 값은 다음 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} P(T_1) &= \frac{d_2}{d_1 + d_2} P(x_d^0, y_d^0) + \frac{d_1}{d_1 + d_2} P(x_d^1, y_d^1) \\ P(T_2) &= \frac{d_4}{d_3 + d_4} P(x_d^2, y_d^2) + \frac{d_3}{d_3 + d_4} P(x_d^3, y_d^3) \\ P(x_c, y_c) &= \frac{d_6}{d_5 + d_6} P(T_1) + \frac{d_5}{d_5 + d_6} P(T_2) \end{aligned} \quad (5)$$

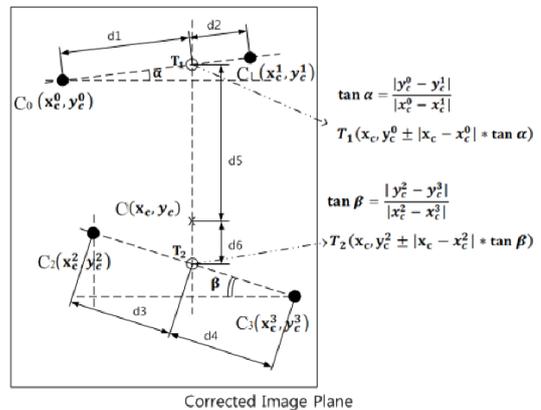


그림 4. 보정 영상 위에서의 개선된 선형 보간법
Fig. 4. Modified bilinear interpolation on corrected image.

위의 식 (5)에서 $P(\cdot)$ 는 해당 좌표의 화소 값이다.

III. 제안하는 보간법

앞서 설명한 보간법들은 왜곡 영상에서 보간할 좌표에 인접한 화소들을 이용하여 보간법을 수행하였다. 비록 개선된 보간법^[14]의 경우, 보정 영상에서 거리를 반영하여 보간을 수행하였지만, 보간에 사용된 좌표는 왜곡 영상에서의 인접한 좌표들이다. 하지만, 어안렌즈를 통하여 촬영된 왜곡 영상은 영상의 외곽으로 갈수록 방사 왜곡이 심해짐에 따라 왜곡 영상에서 근접한 화소들이 보정 영상에서는 근접한 화소가 아닌 경우가 발생하게 된다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 왜곡 영상이 아닌 보정 영상에서 최근접 좌표들을 이용한 보간법을 제안한다.

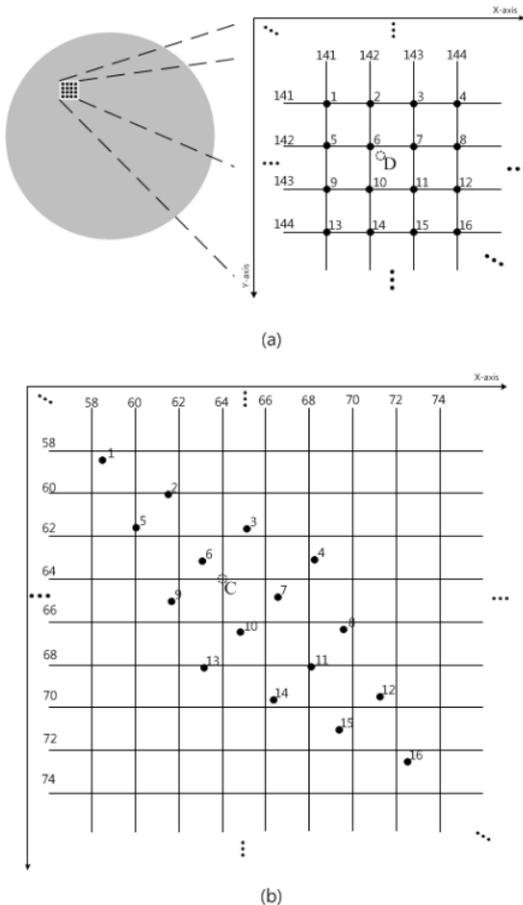


그림 5. 왜곡 영상과 보정 영상 간의 좌표 관계: (a) 왜곡 영상의 좌측 상단, (b) 그림 5(a) 위의 좌표에 대한 보정 영상으로 좌표 변환

Fig. 5. Coordinate relationship between distorted image and corrected image: (a) Enlarging the upper left of distorted image, (b) Coordinate transformation of Fig. 5(a) on corrected image.

그림 5(a)는 영상 크기가 512x512이고, 초점 거리가 20mm일 때, 어안 렌즈를 통해 획득한 왜곡 영상에서 좌측 상단의 좌표를 확대하여 직각좌표계에 나타낸 것이다. 이때 빈 원로 나타난 좌표 $D(142,13,142,13)$ 는 보간을 수행할 좌표인 $(64,64)$ 에 대하여 식 (1)을 이용하여 변환한 실수형 좌표이다. 이때 좌표 D 의 주변 16개 정수 좌표에 대하여 1에서 16부터까지의 ID를 부여하였다. 기존 선형 보간법이나 개선된 선형 보간법^[14]은 D 의 주변 좌표인 ID가 6, 7, 10, 11을 사용하여 보간을 수행하였다.

그림 5(b)는 그림 5(a)에 있는 좌표들을 보정 영상으로 식 (2)를 이용하여 변환된 좌표들을 보여준다. 그림 5b에서 방사 왜곡에 의하여 C 에 최근접한 좌표의 ID는 3, 6, 7, 9가 됨을 확인할 수 있다. 즉, 이는 보간할 좌표인 C 에 대한 정보를 ID가 6, 7, 9, 11인 좌표보다 ID가 3, 6, 7, 9가 더 많이 가지고 있음을 의미한다. 본 논문에서는 ID가 3, 6, 7, 9와 같이 C 에 최근접한 4개의 좌표들을 보정 영상에서의 최근접 좌표라 하고 $C_k(k=0,1,2,3)$ 로 정의하겠다. 또한, ID가 6, 7, 10, 11과 같이 왜곡 영상에서 인접한 좌표들을 왜곡 영상에서의 인접 좌표라 하고 $D_k(k=0,1,2,3)$ 로 정의한다. 이때 가까운 좌표에 작은 k 값을 할당한다. 즉, $D_0=6, D_1=7, D_2=10$, 그리고 $D_3=11$ 이며, $C_0=6, C_1=9, C_2=3$, 그리고 $C_3=7$ 이다. 제안하는 보간법에서는 C_k 를 이용하여 보간을 수행한다.

그림 6은 그림 5(b)에서 근접한 4개의 좌표를 확대한 것이다. 해당 그림에서 $C(x_c, y_c)$ 는 보간을 수행할 정수

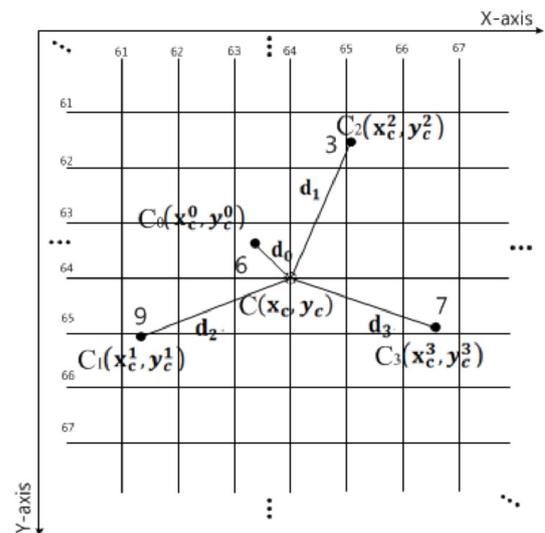


그림 6. 그림 5b에서 C로부터 최근접 좌표 4개
Fig. 6. Nearest four coordinates from C in Fig. 5b.

좌표를 나타내고, $C_k(x_c^k, y_c^k)$ ($k=0,1,2,3$)은 보정 영상 위에서 근접한 4개의 실수 좌표를 나타낸다. 보간할 좌표 C 와 근접한 좌표들 C_k 의 거리 d_k ($k=0,1,2,3$)를 피타고라스 정리를 이용하여 계산할 수 있다. 거리 d_k 가 계산이 되면 거리에 반비례하는 가중치를 줄 수 있도록 식 (6)에 대입한다.

$$\begin{aligned}
 ic_0 &= \frac{d_1 d_2 d_3}{d_1 d_2 d_3 + d_0 d_2 d_3 + d_0 d_1 d_3 + d_0 d_1 d_2} \\
 ic_1 &= \frac{d_0 d_2 d_3}{d_1 d_2 d_3 + d_0 d_2 d_3 + d_0 d_1 d_3 + d_0 d_1 d_2} \\
 ic_2 &= \frac{d_0 d_1 d_3}{d_1 d_2 d_3 + d_0 d_2 d_3 + d_0 d_1 d_3 + d_0 d_1 d_2} \\
 ic_3 &= \frac{d_0 d_1 d_2}{d_1 d_2 d_3 + d_0 d_2 d_3 + d_0 d_1 d_3 + d_0 d_1 d_2}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

위의 식 (6)에서 ic_k ($k=0,1,2,3$)은 보간을 위해 사용되는 보간 계수이다. 예를 들어 $d_0=1, d_1=2, d_2=3, d_3=4$ 라고 한다면, 이때 ic_k 는 각각 $24/50, 12/50, 8/50, 6/50$ 이 되어 거리에 반비례하는 가중치가 적용되는 것을 확인할 수 있다. 식 (6)의 값이 구해지면 보간할 좌표의 화소 값을 식 (7)에 대입하여 계산할 수 있다. 식 (7)은 다음과 같다.

$$P(x_c, y_c) = \sum_{k=0}^3 ic_k P(x_c^k, y_c^k)
 \tag{7}$$

식 (7)에서 (x_c, y_c) 는 보간할 좌표를 의미하며, (x_c^k, y_c^k) 는 보간에 사용하는 최근접 좌표의 왜곡 영상에서 정수 좌표를 의미한다. $P(\cdot)$ 는 해당 좌표에서의 화

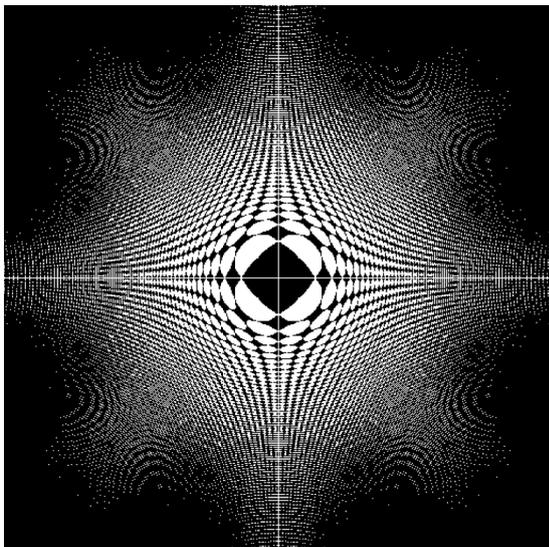


그림 7. D_k 와 C_k 가 다른 경우를 보여주는 이진화 영상
Fig. 7. Binary image which D_k and C_k are different.

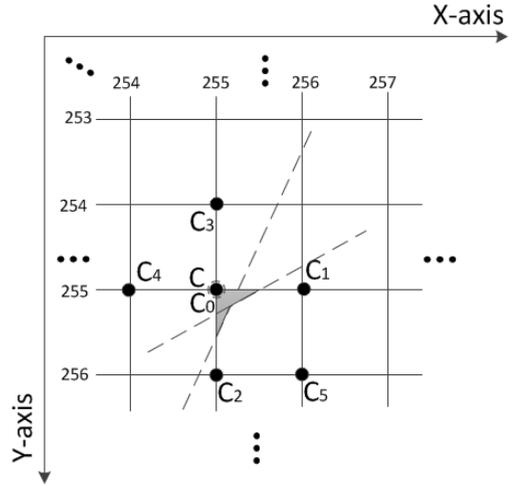


그림 8. 영상 중심의 좌표 변환
Fig. 8. Coordinate transformation of image center.

소 값을 의미한다. 식(6)과 식 (7)는 거리에 반비례하는 가중치를 줄 수 있도록 선형 보간법 수식을 수정한 것이다.

앞선 그림 5를 통해 왜곡 영상에서 근접한 좌표가 보정 영상에서는 근접한 좌표가 아닐 수 있음을 보였다. 그림 7은 영상 크기가 512x512일 때, 보정 영상에서 D_k ($k=0,1,2,3$)와 C_k ($k=0,1,2,3$)가 같을 경우에는 흰 점으로, 다를 경우에는 검은 점으로 나타낸 이진화 영상이다. 영상의 외곽으로 갈수록 방사 왜곡에 의하여 검은 점들이 많음을 확인할 수 있다. 영상의 중심부에서 나타나는 검은 점들은 방사 왜곡이 영상의 중심에는

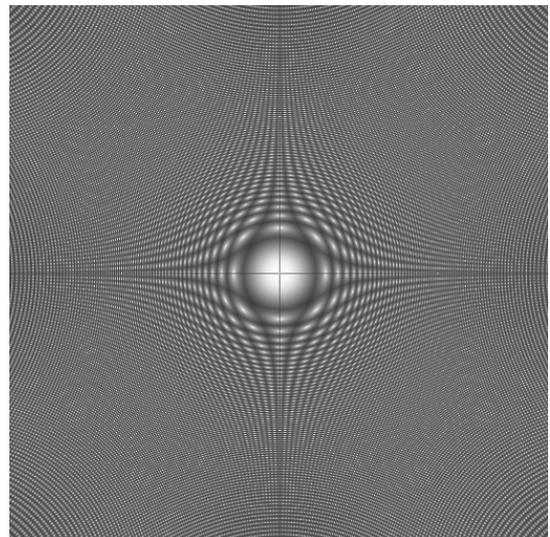


그림 9 보간 계수 ic_0 값의 분포에 따른 그레이 영상
Fig. 9. Gray image of distribution according value of ic_0 .

영향을 거의 미치지 않아 좌표 변환 결과 정수 좌표에 근접하여 대각선에 위치한 좌표가 선택되지 않았기 때문이다. 그림 8은 이에 대한 예로 영상 중심 부분의 좌표 변환 결과이다. 보간 좌표 C 에 대하여 보정 영상 위에서 최근접 좌표를 찾은 결과 C_3 이나 C_4 가 대각선 좌표인 C_5 보다 C 에 근접함을 확인할 수 있다. 즉, 기존 선형 보간법에서 사용한 $\{C_0, C_1, C_2, C_5\}$ 가 아닌 $\{C_0, C_1, C_2, C_3\}$ 이나 $\{C_0, C_1, C_2, C_4\}$ 가 선택됨을 알 수 있다. 그림 8에서 회색 영역은 C_3 나 C_4 가 C_5 보다 C 에 거리상 가까이 위치하는 영역을 보여준다.

제안하는 보간법은 보정 영상에서 최근접 좌표 4개를 선택하여 보간을 수행한다. 이때 C_k 는 짧은 거리 순으로 정렬되기 때문에 거리에 반비례하게 계산된 보간 계수 ic_k 는 k 가 작을수록 더 큰 값을 가지게 된다. 이때 ic_0 이 1에 가까울수록 이는 C_0 가 C 에 근접함을 의미한다. 그림 9는 ic_0 의 크기에 따른 분포를 보여주는 그레이 영상으로, ic_0 이 클수록 밝게 나타나며 작을수록 어둡게 나타난다. 그림 9에서 영상 중심이 영상 외곽에 비하여 밝은 것을 확인할 수 있다. 이는 영상의 중심에서는 최근접 좌표 중에서도 하나의 화소 값을 많이 참조하는 것을 의미한다. 즉, 그림 8에서 보간 시 $\{C_0, C_1, C_2, C_3\}$ 이나 $\{C_0, C_1, C_2, C_4\}$ 을 사용하지만 이때 ic_0 이 1에 가깝기 때문에 보간 시 C_0 을 제외한 다른 좌표의 화소 값은 거의 참조하지 않음을 의미한다. 반면, 영상의 외곽으로 갈수록 방사 왜곡으로 거리가 멀어져서 모든 최근접 좌표의 화소 값을 포함하여 보간을 수행하여야 한다.

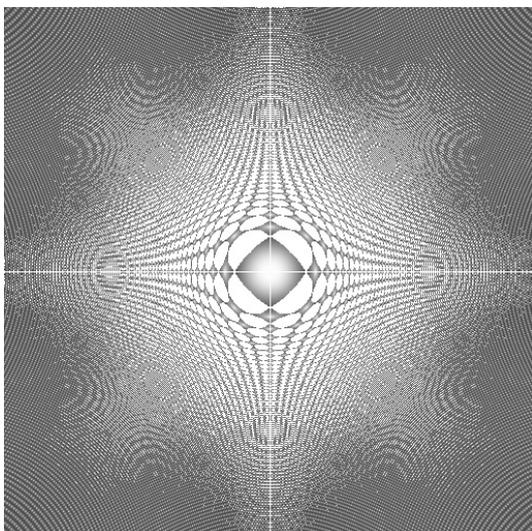


그림 10. 그림 7과 그림 9를 조합한 그레이 이미지
Fig. 10. Combined gray image of Fig. 7 and Fig. 9.

표 1. 전체 영상에 대한 PSNR 비교(단위: dB)

Table 1. PSNR comparison of entire images(unit: dB).

Image	Near	Bilinear	Cubic	[14]	Propose
kodim01	21.106	22.845	22.556	23.239	23.490
kodim02	28.678	30.614	30.350	30.928	31.131
kodim03	29.060	31.033	30.811	31.182	31.413
kodim04	26.711	28.794	28.501	29.025	29.342
kodim05	20.995	23.085	22.978	23.393	23.712
kodim06	24.096	25.854	25.730	25.895	25.783
kodim07	26.116	28.542	28.516	28.898	29.486
kodim08	18.101	19.836	19.539	20.184	20.494
kodim09	26.306	28.305	28.049	28.742	29.300
kodim10	25.502	27.449	27.161	27.858	28.329
kodim11	25.310	27.097	26.977	27.470	27.645
kodim12	29.413	31.494	31.385	31.792	32.072
kodim13	19.491	21.174	20.880	21.462	21.517
kodim14	24.151	26.047	25.878	26.377	26.597
kodim15	26.705	28.973	28.817	29.343	29.961
kodim16	27.342	28.983	28.683	29.182	29.205
kodim17	26.845	29.013	28.837	29.242	29.564
kodim18	23.252	24.948	24.674	25.333	25.492
kodim19	23.985	25.992	25.897	26.221	26.667
kodim20	26.184	28.285	28.130	28.622	28.905
kodim21	23.549	25.434	25.212	25.659	25.764
kodim22	25.477	27.244	26.961	27.651	27.935
kodim23	29.391	32.257	32.355	32.272	32.730
kodim24	21.158	22.925	22.574	23.271	23.448
Average	24.955	26.926	26.727	27.218	27.499

표 2. 영상 우측 상단(16분의 1)에 대한 PSNR 비교 (단위: dB)

Table 2. PSNR comparison about sixteen part of upper right(unit: dB).

Image	Near	Bilinear	Cubic	[14]	Propose
kodim01	14.934	16.639	16.265	17.276	17.468
kodim02	23.422	25.059	24.654	25.428	25.535
kodim03	22.868	24.605	24.230	24.510	24.526
kodim04	23.566	26.386	26.330	26.413	27.149
kodim05	17.586	19.639	19.515	19.909	20.246
kodim06	21.845	23.691	23.494	23.943	24.339
kodim07	22.605	24.878	24.829	25.098	25.438
kodim08	16.636	18.474	18.223	18.848	19.171
kodim09	35.681	37.390	36.520	37.401	37.598
kodim10	21.502	23.185	22.790	23.230	23.329
kodim11	22.760	24.872	24.561	25.155	25.248
kodim12	23.900	25.965	25.679	26.312	26.851
kodim13	18.668	20.407	19.958	20.789	20.963
kodim14	20.896	22.728	22.495	23.201	23.631
kodim15	21.162	23.796	23.350	24.416	25.004
kodim16	26.310	28.694	28.588	28.863	29.596
kodim17	34.580	35.956	35.333	36.662	39.593
kodim18	20.974	22.857	22.588	23.429	24.013
kodim19	32.928	35.326	35.083	35.707	36.596
kodim20	28.059	31.164	31.071	31.818	33.917
kodim21	36.379	37.904	37.121	37.914	38.034
kodim22	20.924	22.590	22.206	23.052	23.233
kodim23	31.394	37.482	37.401	36.344	38.751
kodim24	14.590	16.166	15.681	16.517	16.547
Average	23.924	26.077	25.749	26.343	26.949

그림 10은 그림 7와 그림 9를 조합한 그레이 이미지로, 그림 7에서 하얀 색은 0으로, 검은 색은 1로 한 후, 그림 9와 곱한 영상이다. 그림 10에서 밝은 영역은 D_k 와 C_k 가 같거나 ic_0 이 1에 가깝다는 것을 의미하며 어두운 영역은 그 반대의 경우이다. 결론적으로 그림 10에서 볼 수 있듯이 방사 왜곡이 영상의 외곽으로 갈수록 심해지기 때문에 영상 중심이 영상 외곽에 비하여 밝음을 확인할 수 있다.

결론적으로 제안하는 보간법은 방사 왜곡을 고려하여 보정된 이미지에서 최근접한 4개의 좌표를 선택하여 보간을 수행하기 때문에 영상의 외곽에서 특히 많은 성능이 향상됨을 예상할 수 있다. 이에 대해 IV장 실험 결과에서 볼 수 있듯이 제안하는 보간법이 영상 전체적으로도 성능 향상을 보이지만 특히 영상 외곽에서 화질이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

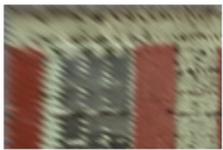
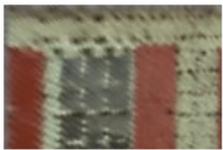
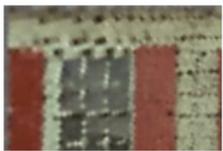
IV. 실험 결과

실험은 왜곡되지 않은 테스트 영상(768x512 또는 512x768)에 대하여 초점 거리를 20mm로 적용 후, 식 (1)을 이용하여 왜곡 영상으로 변환하고 이를 보정 영상으로 변환할 때, 다른 보간법들에 따른 성능을 비교하는 방식으로 진행하였다. 테스트 영상은 Kodak Lossless True Color Image^[20]에서 획득한 24장의 영상을 사용하였다. 비교에 사용한 보간법은 최근접 보간법, 선형 보간법, 3차 회선 보간법, 개선된 선형 보간법^[14]이다. 3차 회선 보간법의 경우, 영상에 독립적으로 최적의 결과를 내는 -0.5를 상수로 사용하였다^[21].

객관적 화질을 비교하기 위해 표 1은 제안하는 보간법과 기존 보간법들의 전체 영상에 대한 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)을 보인다. 제안하는 보간법의

표 3. 보간법들에 따른 영상 외곽(16분의 1)

Table 3. Image outside (sixteen part) according to different interpolation methods.

영상	Kodak01 (좌측 상단)	Kodak24 (좌측 하단)	Kodak12 (우측 상단)	Kodak13 (우측 하단)
원본				
최근접 보간법				
선형 보간법				
3차 회선 보간법				
개선된 선형 보간법 ^[14]				
제안하는 보간법				

평균 PSNR이 27.499 dB로, 다른 보간법들보다 높음을 확인할 수 있다. 제안하는 보간법은 영상의 외곽에 대하여 더 좋은 성능을 보이며, 표 2는 서로 다른 보간법들 간의 영상 우측 상단의 16분의 1에 대한 PSNR을 보여준다. 제안하는 보간법의 평균 PSNR이 26.949로, 다른 보간법들보다 높음을 확인할 수 있다.

객관적 화질뿐만 아니라 육안으로 판단이 가능한 주관적 화질을 비교하기 위하여 표 3을 보인다. 표 3는 서로 다른 보간법에 따른 영상 외곽을 보여준다. 기존 보간법에서는 계단 현상(staircase phenomenon)이 심하게 나타나는 데 반하여 제안하는 보간법에서는 계단현상이 많이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

기존 어안 렌즈의 방사 왜곡에서는 왜곡 영상에서의 근접 좌표를 이용하였다. 하지만, 방사 왜곡이 심해지는 영상의 외곽으로 갈수록 왜곡 영상에서의 근접 좌표가 보정영상에서는 근접좌표가 아닐 수 있다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 어안 렌즈의 방사 왜곡을 고려하여 보정 영상 위에서 최근접 좌표를 이용한 보간법을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 기존 왜곡 보정을 위하여 많이 사용되었던 선형 보간법과 비교하여 PSNR이 평균 0.574 dB만큼 향상되는 것을 보였으며, 영상의 외곽에서 계단 현상이 많이 줄어드는 것도 확인할 수 있었다. 본 논문에서 어안 렌즈의 방사 왜곡에 대한 내용을 다루었지만, 전방위 렌즈에 대하여서도 동일한 방법으로 보간이 가능하다.

REFERENCES

[1] C. Hughes, M. Glavin, E. Jones, and P. Denny, "Wide-angle camera technology for automotive applications: a review," *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 19-31, Mar. 2009.

[2] E. Royer, M. Lhuillier, M. Dhome, and J. Lavest, "Monocular vision for mobile robot localization and autonomous navigation," *Int. Jour. Computer Vision*, vol. 74, no. 3, pp. 237-260, Sep. 2007.

[3] J. Courbon, Y. Mezouar, L. Eck, P. Martinet, "A generic fisheye camera model for robotic applications," *IEEE/RSJ Int. Conf. IROS 2007*, pp. 1683-1688, Oct. 2007.

[4] K. V. Asari, S. Kumar, and D. Radhakrishnan, "A new approach for nonlinear distortion

correction in endoscopic images based on least squares estimation," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 18, no. 4, pp. 345 - 354, Apr. 1999.

[5] R. E. Jacobson, S. F. Ray, G. G. Attridge, and N. R. Axford, *The manual of photography: photographic and digital imaging*, Focal Press, Massachusetts, 2000.

[6] S. Chen, H. Huang, and C. Luo, "Time multiplexed VLSI architecture for real-time barrel distortion correction in video-endoscopic images," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 21, no. 11, pp. 1612-1621, Nov. 2011.

[7] 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.

[8] M. Ahmed, A. Farag, "Nonmetric calibration of camera lens distortion: differential methods and robust estimation," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 14, no. 8, pp. 1215-1230, Aug. 2005.

[9] K. Johnson, P. W. Smith, and M. A. Abidi, "A quadric surface projection model for wide-angle lenses," *Proc. SPIE*, vol. 3522, Boston, MA, pp. 424-434, Nov. 1999.

[10] T. M. Lehmann, C. Gonner, and K. Spitzer, "Survey: interpolation methods in medical image processing," *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol. 19, no. 11, pp.1049-1075, Nov 1999.

[11] S. Shah and J.K. Aggarwal, "Intrinsic parameter calibration procedure for a (high-distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation," *Pattern Recognition*, vol. 29, no. 11, pp. 1775-1788, Nov. 1996.

[12] J. C. A. Fernandes, M.J.O. Ferreira, J.A.B.C. Neves and C.A.C. Couto, "Fast correction of lens distortion for image applications," *IEEE ISIE*, vol. 2, pp. 708 - 712, 1997.

[13] K. Daloukas, C. D. Antonopoulos, N. Bellas, and S. M. Chai, "Fisheye lens distortion correction on multicore and hardware accelerator platforms," *IEEE IPDPS 2010*, pp. 1-10, Apr. 2010.

[14] J. Y. Han, *Fisheye image correction and low-power scaler design*, master's thesis, Kwangwoon University, 2010.

[15] D. C. Brown, "Decentering distortion of lenses," *Photogrammetric Engineering*, vol. 32, no. 3, pp. 444-462, 1966.

[16] D. Schneider, E. Schwalbe, and H. -G. Maas, "Validation of geometric models for fisheye lenses," *Jour. ISPRS*, vol. 64, no. 3, pp.

- 259-266, May. 2009.
- [17] R. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses," *IEEE J. Robot. Autom.*, vol. RA-3, no. 4, pp. 1165 - 1172, Aug. 1987.
- [18] 황용호, 홍현기, "투영곡선의 자동정합을 이용한 전방향 카메라 보정," 전자공학회 논문지, 제 45권 SP편, 제 6호, 125-132쪽, 2008년 11월
- [19] 김선영, 윤인혜, 김동균, 백준기, "나선형 패턴을 사용한 어엔란즈 영상 교정 및 기하학적 왜곡 보정," 전자공학회 논문지, 제 49권 SP편, 제 4호, 16-22쪽, 2012년 7월
- [20] Kodak Lossless True Color Image
<http://r0k.us/graphics/kodak/>
- [21] R. G. Keys, "Cubic convolution interpolation for digital image processing," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. 29, no. 6, pp. 1153-116, Dec. 1981.

 저 자 소 개



최 창 원(학생회원)
2011년 광운대학교 컴퓨터공학과
학사 졸업.
2011년~현재 광운대학교 컴퓨터
공학과 석박사통합과정.
<주관심분야 : Computer Vision,
SoC 구조설계>



이 준 환(평생회원)
1991년 연세대학교 전자공학과
학사 졸업.
1998년 Univ. of Michigan, EECS
석사졸업.
2002년 Univ. of Michigan, EECS,
박사졸업.

1991년~1995년 삼성전자 시스템LSI 연구원.
2003년~2008년 삼성전자 통신연구소 수석연구원.
2008년~현재 광운대학교 컴퓨터공학과 부교수.
<주관심분야 : Computer Vision, SoC 구조설계,
저전력 설계, 반도체 설계>