

일반논문-09-14-3-04

비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 이용한 비디오 영상에서의 줌-렌즈 왜곡 보정

김 대 현^{a)}, 신 형 철^{a)}, 오 주 현^{b)}, 남 승 진^{b)}, 손 광 훈^{a)‡}

Zoom Lens Distortion Correction Of Video Sequence Using Nonlinear Zoom Lens Distortion Model

Daehyun Kim^{a)}, Hyoungchul Shin^{a)}, Juhyun Oh^{b)}, Seungjin Nam^{b)}, Kwanghoon Sohn^{a)‡}

요 약

본 논문은 줌-렌즈로 취득한 비디오 영상에 대해서 줌-렌즈의 왜곡을 자동으로 보정할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 먼저, 초점거리의 증가에 따라 렌즈의 왜곡 계수가 비선형적으로 단조 감소하는 특징으로부터 초점거리와 렌즈 왜곡 계수로 표현되는 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 정의하였다. 그리고 취득한 비디오 영상으로부터 몇 장의 샘플 영상을 선정하고, 이 샘플 영상에 대한 초점거리와 렌즈 왜곡 계수는 기존의 방법들을 이용하여 측정하였다. 이렇게 측정한 초점거리와 렌즈 왜곡 계수들로부터 줌-렌즈 왜곡 모델을 최적화 시켰다. 최적화된 줌-렌즈 왜곡 모델은 각 비디오 영상의 초점거리를 입력으로 하여 렌즈 왜곡 계수를 자동으로 계산할 수 있다. 본 논문에서 제안한 방법은 다양한 실사 영상과 비디오 영상에 적용하여 그 성능을 검증하였으며, 화질의 열화 없이 영상의 왜곡을 보정할 수 있었다.

Abstract

In this paper, we proposed a new method to correct the zoom lens distortion for the video sequence captured by the zoom lens. First, we defined the nonlinear zoom lens distortion model which is represented by the focal length and the lens distortion using the characteristic that lens distortion parameters are nonlinearly and monotonically changed while the focal length is increased. Then, we chose some sample images from the video sequence and estimated a focal length and a lens distortion parameter for each sample image. Using these estimated parameters, we were able to optimize the zoom lens distortion model. Once the zoom lens distortion model was obtained, lens distortion parameters of other images were able to be computed as their focal lengths were input. The proposed method has been made experiments with many real images and videos. As a result, accurate distortion parameters were estimated from the zoom lens distortion model and distorted images were well corrected without any visual artifacts.

Keywords: camera calibration, camera pose estimation, 3D reconstruction, mixed reality

a) 연세대학교 전기전자공학부
School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

b) KBS 방송기술연구소
KBS Broadcast Technical Research Institute

‡ 교신저자 : 손광훈(khsohn@yonsei.ac.kr)
· 접수일(2008년12월4일), 수정일(2009년4월9일), 게재확정일(2009년4월27일)

1. 서론

컴퓨터 비전 (computer vision)과 사진측량법 (photogrammetry) 분야에서 렌즈 왜곡 보정 (lens distortion correction)은 매우 중요한 연구 주제 중 하나이다. 특히, 방사

형 렌즈 왜곡 (radial lens distortion)은 광각 렌즈에서 가장 심각하게 발생할 뿐만 아니라 줌-렌즈의 경우에는 초점거리의 변화에 따라 왜곡이 변하기 때문에 카메라 위치 추적이나 3차원 모델링과 같은 분야에서는 방사형 렌즈 왜곡을 매우 중요하게 다루고 있다¹¹.

일반적으로 렌즈 왜곡 보상은 크게 측량법 (metric method)과 비측량법 (nonmetric method)으로 구분한다. 측량법은 3차원 좌표를 알 수 있는 특징점을 갖는 교정 격자 (calibration grid)를 이용한다. 교정 격자는 카메라의 내부/외부 계수를 측정할 때 사용하는 패턴 영상이다. 따라서 교정 격자를 이용하면 카메라의 계수뿐만 아니라 렌즈의 왜곡 계수를 동일한 알고리즘 틀 안에서 동시에 측정할 수 있다^{12,31}.

비측량법은 직선 또는 소실점 (vanishing points)과 같은 기하학적으로 불변하는 영상 특징들을 사용한다^{4,5,6,7,8}. 기존의 비측량법들은 이상적인 핀홀 (pinhole) 카메라 모델에서 3차원 공간상의 직선은 영상에서도 직선으로 투영되어야 한다는 사실에 기반 하여 연추선 (plumb line) 검출에 집중하였다. 이 외의 다른 비측량법으로는 다시점 영상에서 영상간의 대응점만을 이용하는 방법 등이 있다^{9,10,11}.

지금까지 언급한 기존의 렌즈 왜곡 보정 방법들은 모두 렌즈의 초점거리가 일정한 카메라로부터 취득한 영상에 대해서 적용이 가능하다. 그러나 최근 비전 시스템 분야에서는 초점거리를 변화시키면서 영상을 확대하거나 축소할 수 있는 기능을 갖는 줌-렌즈의 사용이 점차 확대되고 있다. 특히, 방송 영상 콘텐츠 대부분은 줌-렌즈를 이용해서 다양한 초점거리에서의 영상을 취득한 다음, 증가현실 및 혼합현실과 같은 비전 기술을 활용하여 영상을 편집하고 있다. 또한 대부분의 방송용 콘텐츠는 광각 렌즈를 사용하기 때문에 렌즈 왜곡의 정도가 심각하다. 따라서 보다 고품질의 영상 합성을 위해서는 영상을 편집하기 전에 렌즈의 왜곡의 보상은 필수적인 절차이다.

줌-렌즈를 이용해서 취득한 비디오 영상은 초점거리가 수시로 변할 뿐만 아니라 초점거리의 변화에 따라 렌즈의 왜곡 정도도 함께 변한다. 그러나 위에서 설명한 기존의 렌즈 왜곡 보정 방법들은 단초점 렌즈에 대해서만 적용 가능한 방법들이기 때문에 초점거리가 변할 때마다 해당 영상

의 렌즈 왜곡 계수를 다시 계산해야 한다. 따라서 기존의 렌즈 왜곡 보정 방법들을 줌-렌즈로부터 취득한 비디오 영상에 직접 사용하는 것은 불가능하다¹²¹.

본 논문에서 우리는 줌-렌즈로부터 취득한 비디오 영상에 대해서 초점거리의 변화에 따른 줌-렌즈의 왜곡을 자동으로 보정할 수 있는 방법을 제안하였다. 일반적으로, 렌즈의 왜곡 계수는 렌즈의 초점거리가 증가할 때 단조 감소하는 특성을 나타낸다. 본 논문은 이러한 줌-렌즈의 왜곡 특성을 이용해서 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 정의하였다.

그림 1은 비선형 줌-렌즈 모델을 구성하기 위한 단계를 보여주고 있다. 그림과 같이 줌-렌즈를 통해 취득한 비디오 영상은 카메라 자동보정 (camera autocalibration)에 의해 각 영상의 초점거리를 먼저 측정한다²¹. 그리고 취득한 영상 중 초점거리가 다른 몇 장의 샘플 영상을 선택하고 각각의 샘플 영상의 렌즈 왜곡 계수를 측정한다. 렌즈 왜곡 계수의 측정의 기존의 다양한 방법들을 사용할 수 있다. 본 논문에서는 Photoshop CS²⁰와 epaperpress.com에서 제공하는 PTLens²²를 이용하여 렌즈 왜곡 계수를 측정하였다. 이렇게 측정된 샘플 영상의 초점거리와 렌즈 왜곡 계수들을 이용해서 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 구성한다. 본 논문에서는 다항식 모델을 이용하여 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 표현하였고, 최소자승법 (least square technique)을 이용하여 최적화 하였다. 일단 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델이 구성되면,

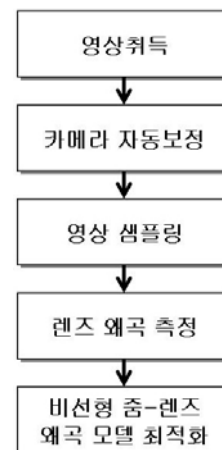


그림 1. 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델 구성 방법

Fig. 1. Construction of nonlinear zoom lens distortion model

카메라 자동보정을 통해 측정한 초점거리를 입력으로 하여 초점거리가 다른 비디오 영상의 렌즈 왜곡 계수를 자동으로 계산하여 영상을 보정할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 우선 방사형 렌즈 왜곡 모델에 대해서 간략히 살펴본다. 그리고 3장에서는 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 소개하고, 다항식 형태의 모델을 유도한다. 4장에서는 다양한 영상에 대한 실험결과를 보여주고, 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 방사형 렌즈 왜곡 모델

컴퓨터 비전 응용분야에서는 일반적으로 핀홀 카메라 모델을 가정한다. 핀홀 카메라 모델에서는 3차원 공간의 한 점과 이 점이 영상 평면에 투영된 점, 그리고 카메라의 중심이 일직선상에 있기 때문에 그림 2(a)와 같이 3차원 공간의 직선은 영상 평면에 직선으로 그대로 투영된다. 그러나 실제로 사용하는 렌즈에서는 그림 2(b)와 같이 렌즈 표면의

굴곡으로 인해 렌즈에서 빛의 왜곡이 발생해 위와 같은 가정이 더 이상 성립하지 않는다. 이러한 왜곡을 방사형 왜곡 (radial distortion)이라 하며, 초점거리가 작을수록 방사형 왜곡은 그 정도가 심각해진다^[4].

방사형 왜곡에 의해서 주어진 영상의 점은 이상적인 위치로부터 그 점의 안쪽 또는 바깥쪽으로 변위를 일으킨다. 안쪽으로 변위를 일으키는 것을 음의 방사 변위라 하고 바깥쪽으로 변위를 일으키는 것을 양의 방사 변위라 한다. 이런 종류의 왜곡은 주로 렌즈의 구면 수차에 의해서 발생한다. 영상의 점들의 음의 방사 변위는 배럴 왜곡 (barrel distortion)이라 일컬어지며 이것은 바깥쪽 점들을 점차적으로 뭉쳐지게 하며 크기는 감소시킨다. 양의 방사 변위는 핀-쿠션 (pincushion distortion)이라 일컬어지며 이것은 바깥쪽 점들을 펼치며 크기는 증가시킨다. 이러한 종류의 왜곡은 렌즈의 광학축에 대하여 정확히 대칭적이다^[3]. 그림 3은 방사형 왜곡의 예를 보여주고 있다.

렌즈 왜곡 보상은 왜곡된 영상의 한 점 $x_d=[x_d, y_d]^T$ 를 왜곡되지 않은 점 $x_u=[x_u, y_u]^T$ 로 변환하는 것으로 식 (1)과 같이

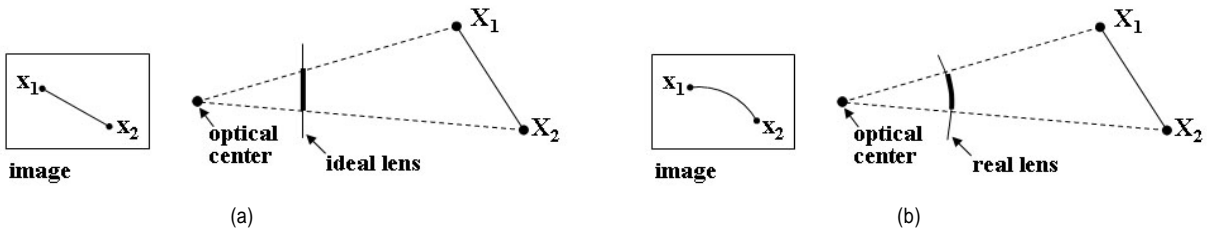


그림 2. 렌즈의 왜곡 현상. (a) 핀홀 모델, (b) 실제 렌즈 모델.
Fig. 2. Lens distortion. (a) pinhole camera model, (b) real lens model

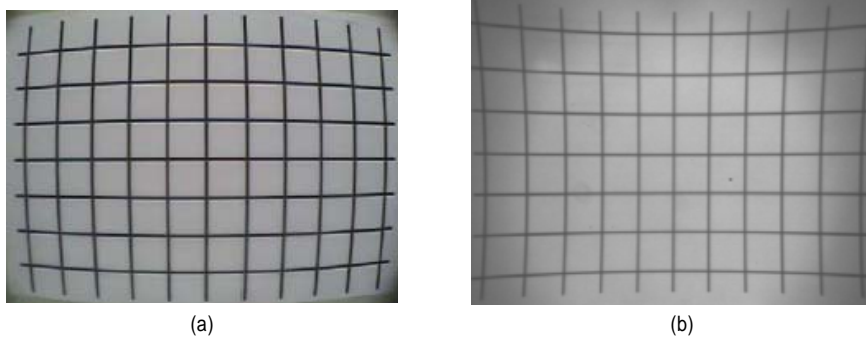


그림 3. 방사형 렌즈 왜곡의 예. (a) 배럴 왜곡, (b) 핀-쿠션 왜곡
Fig. 3. Radial lens distortion. (a) barrel distortion, (b) pin-cushion distortion

무한급수 형태로 표현한다.

$$x_u = x_d \cdot (1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6 + \dots) \tag{1}$$

식 (1)에서 k_1, k_2, k_3, \dots 는 방사형 왜곡의 계수이고, r_d 는 왜곡의 중심 (distortion center)에서 영상의 한 점 x_d 까지의 거리이다. 일반적으로, 식 (1)은 k_1 만으로도 렌즈의 방사형 왜곡을 0.1회소 미만의 오차 범위 안에서 측정할 수 있다^[2,13,14]. 따라서 본 논문에서는 k_1 만을 이용하는 식 (2)의 방사형 왜곡 모델을 렌즈 왜곡 모델로 채택하였다.

$$x_u = x_d \cdot (1 + k_1 r_d^2) \tag{2}$$

III. 줌-렌즈 왜곡 모델

줌-렌즈는 기존의 초점거리가 고정된 단초점 렌즈와 반대로 렌즈의 초점거리 또는 화각 (angle of view)을 변화시킬 수 있는 렌즈들이 기계적으로 결합된 구조를 갖는다. 줌-렌즈가 확대되거나 축소될 때 초점이 맞춰진 영상이 선명함을 유지하기 위해서는 렌즈의 위치를 기계적으로 이동시킨다. 이와 같이 렌즈들의 위치 변경으로 인해 렌즈의 전체적인 초점거리는 변하고, 이것은 마치 새로운 단초점 렌즈를 카메라에 장착하는 것과 같은 현상을 나타낸다^[15,16,17,18].

기존의 렌즈 왜곡 보정 방법은 렌즈가 바뀔 때마다 새롭게 렌즈의 왜곡 계수를 측정하였다. 줌-렌즈의 경우에는 초점거리가 바뀔 때마다 왜곡 계수를 반복해서 측정해야 한다. 따라서 줌-렌즈의 왜곡을 보정하기 위해서 기존의 방법을 그대로 사용하는 것은 불가능하다. 특히 비디오 영상의 경우에는 줌-렌즈의 초점거리가 수시로 변하기 때문에 기존 방법을 적용하는 것은 부적합하다.

3장에서는 줌-렌즈의 구조를 간략하게 살펴본 다음, 줌-렌즈의 왜곡 계수를 자동으로 측정할 수 있는 줌-렌즈 왜곡 모델을 정의하고, 이 모델을 획득하는 방법을 설명한다.

1. 줌-렌즈의 구조

일반적으로 줌-렌즈는 그림 4와 같이 초점 렌즈 (focus-

ing lens)와 무한 초점 렌즈 (afocal lens system)로 구성된다. 초점 렌즈는 초점거리가 고정된 렌즈로써, 단초점 렌즈와 유사한 특징을 갖는다. 무한 초점 렌즈는 위치가 고정된 렌즈 하나와 이동할 수 있는 렌즈 두 개로 구성되어 있으며, 빛의 방향성을 변경시키는 기능을 한다. 즉, 줌-렌즈의 전체적인 확대와 축소 기능을 수행한다.

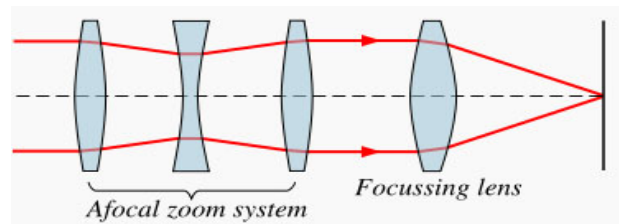


그림 4. 간단한 줌-렌즈의 구조^[15]
Fig. 4. Structure of simple zoom lens

무한 초점 렌즈는 그림 5와 같이 초점거리가 동일한 두 개의 볼록 렌즈 (L_1, L_3)와 그 사이에 하나의 오목 렌즈 (L_2)로 구성된다. L_3 는 위치가 고정되어 있고, L_1, L_2 는 축을 따라 이동할 수 있다^[15,18]. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 오목 렌즈 L_2 가 앞뒤로 이동할 때, L_1 은 포물선을 그리며 앞뒤로 이동한다. 이 때, 줌-렌즈의 전체적인 화각이 변하면서 초점

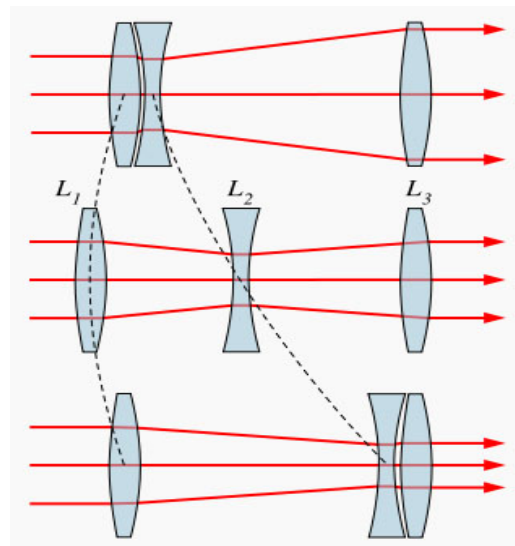


그림 5. 무한 초점 렌즈의 동작^[15]
Fig. 5. Operation of afocal lens system

거리 역시 변하게 된다. 그리고 무한 초점 렌즈의 초점 거리는 무한대를 유지하고 있어 초점 렌즈에 그대로 입사된다.

2. 렌즈 왜곡 계수의 측정

본 논문에서 우리는 그림 4에서 초점 렌즈의 위치는 고정되어 있고, 무한 초점 렌즈가 줌-렌즈의 초점거리를 결정하는 유일한 렌즈로 가정한다. 따라서 우리는 그림 6과 같이 렌즈 L₁과 L₂의 위치의 변화에 따라 줌-렌즈의 초점거리가 결정된다.

그림 6에서 렌즈 L₃ 위의 고정된 한 점 x₂를 지나는 빛은 초점거리에 따라 L₁을 통과하는 빛 x와 x₁의 위치가 달라진다. 렌즈 L₁, L₃는 동일한 렌즈이기 때문에 같은 렌즈 왜곡 계수 k₁을 갖는다. 따라서 우리는 x₁, x₂의 위치를 식 (3)과 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$x_1 = x \cdot (1 + k_1 r_1^2) \tag{3}$$

$$x_2 = x_1 \cdot (1 + k_1 r_2^2) \tag{4}$$

렌즈 L₂는 렌즈 L₁을 통과한 빛 x₁의 방향만을 바꾸기 때문에 렌즈 L₁에서 왜곡된 빛이 그대로 L₃에 도달하게 된다. 따라서 식 (3)의 x₁을 식 (4)에 대입이 가능하고, 이 때 x와 x₂ 사이의 관계식은 식 (5)와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} x_2 &= x \cdot (1 + k_1 r_1^2) \cdot (1 + k_1 r_2^2) \\ &= x \cdot (1 + k_1 r_1^2 + k_1 r_2^2 + k_1^2 r_1^2 r_2^2) = x \cdot (1 + \delta) \end{aligned} \tag{5}$$

그리고 그림 6에서 초점 렌즈의 렌즈 왜곡 계수가 k₂라고 하면, x₃에서의 좌표는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다. 식 (6)에서 k₂ 또한 상수이기 때문에 전체적인 줌-렌즈의 왜곡 계수는 δ에 따라 달라진다.

$$x_3 = x_2 \cdot (1 + k_2 r_3^2) = x \cdot (1 + \delta) \cdot (1 + k_2 r_3^2) \tag{6}$$

식 (5)와 식 (6)에서 δ는 렌즈의 왜곡 계수를 변화시키는 유일한 파라미터이고, δ는 식 (7)과 같이 표현할 수 있다. 식 (7)에서 렌즈 왜곡 계수는 r₁이 증감함에 따라 비선형적으로 단조 증가하는 것을 의미한다. 그러나 초점거리는 반대로 감소한다. 따라서 렌즈 왜곡 계수는 초점거리가 증가함에 따라 비선형적으로 단조감소 한다고 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta &= k_1 r_1^2 + k_1 r_2^2 + k_1^2 r_1^2 r_2^2 = k_1 r_2^2 + (k_1 + k_1^2 r_2^2) \cdot r_1^2 \\ &= c_1 + c_2 \cdot r_1^2 \end{aligned} \tag{7}$$

3. 줌-렌즈 왜곡 모델

2절에서 우리는 줌-렌즈의 왜곡 계수는 렌즈의 초점거리가 증가함에 따라 비선형적으로 단조 감소하는 것을 증명하였다. 특히, 상용의 광각 렌즈의 경우에는 렌즈의 중심 부분에서 핀-쿠션 왜곡이 발생하기 때문에, 렌즈가 확대됨에 따라 왜곡 계수는 음수를 갖는다.

본 논문에서 우리는 식 (7)의 결과를 기반으로 다항식 형태의 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 식 (8)와 같이 정의한다. 식 (8)에서 f는 렌즈의 초점거리이고, c₀, c₁, c₂,...는 비선형

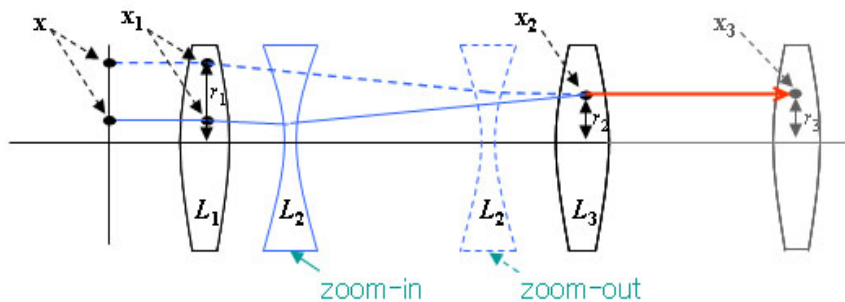


그림 6. 무한 초점 렌즈에서의 빛의 왜곡
Fig. 6. Light distortion in afocal lens system

줌-렌즈 왜곡 모델의 계수들이다.

$$\Psi(f) = c_0 + c_1 f^{-1} + c_2 f^{-2} + \dots + c_n f^{-n} \quad (8)$$

본 논문에서는 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 구성하기 위해서 우선 서로 다른 초점거리를 갖는 몇 장의 영상을 샘플 영상으로 취득한다. 그리고 각각의 샘플 영상의 초점거리와 렌즈 왜곡 계수는 기존 방법을 이용하여 측정한다. 이렇게 측정한 샘플 영상의 왜곡 계수들과 식 (8)에 의해서 예측한 계수들에 대해서 식 (9)와 같이 오차함수를 정의할 수 있다. 그리고 이 오차함수를 최소화시키는 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델의 계수를 계산한다. 본 논문에서는 최소자승법을 이용하여 오차함수를 최소화 하였다.

$$E_k = \frac{1}{N} \sum_i^N |\Psi(f_i) - k_i| \quad (9)$$

IV. 실험 결과

본 논문에서 제안한 방법의 성능을 객관적으로 평가하기 위해서 우리는 한국방항공사에서 제작한 POVIS (POst

Virtual Imaging System)에 의해 제공되는 실측 데이터를 사용하였다. POVIS는 렌즈에서 출력되는 파라미터를 갖고 초점거리와 왜곡 계수와 같은 정보를 실시간으로 측정할 수 있는 장비이다^[19]. POVIS는 초점거리는 7.6~137mm인 Fujinon HA18x7.6 BERD-S480 렌즈를 사용한다. 우리는 POVIS를 이용해서 924개의 영상에 대한 초점거리와 렌즈 왜곡 계수를 취득하였다.

1. 줌-렌즈 왜곡 모델의 최고 차수

그림 7은 식 (8)에서 최고 차수 n 의 값에 따라서 E_k 의 변화 추이를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 초기에 E_k 는 $n=3$ 까지 감소한다. 그리고 $n>3$ 에서 E_k 는 급격하게 증가한다. 뿐만 아니라, 그림 8과 같이 $n=3$ 에서 줌-렌즈 왜곡 모델은 실측치와 가장 유사한 모습을 보이고 있으며, $n>3$ 에서 심하게 벗어나는 것을 알 수 있다. 따라서 POVIS의 실측 데이터는 $n=3$ 에서 E_k 는 최소화된다. 그러나 이 값은 렌즈에 따라서 변하기 때문에 가장 선행되어야 할 작업이다.

2. 유효 샘플 데이터의 개수

그림 9는 샘플 데이터의 개수 N 에 따른 E_k 를 보여주고

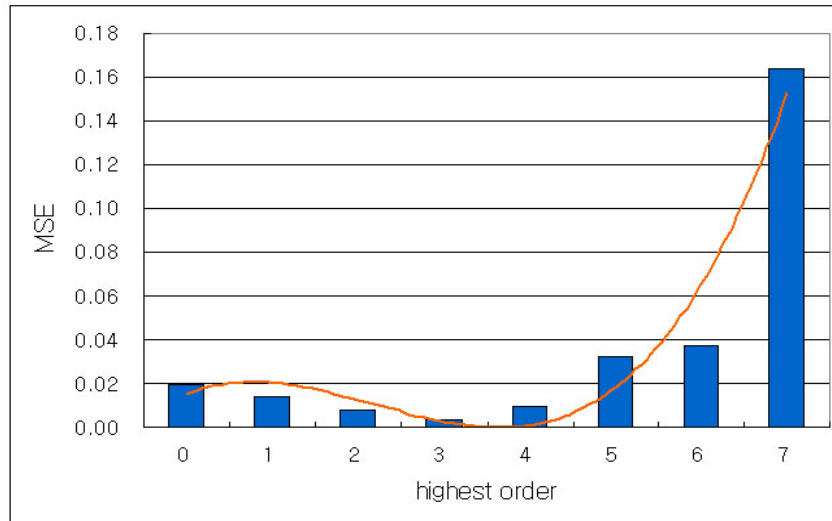


그림 7. 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델의 최고 차수에 따른 평균제곱오차

Fig. 7. Mean square error according the highest order of nonlinear zoom lens distortion model

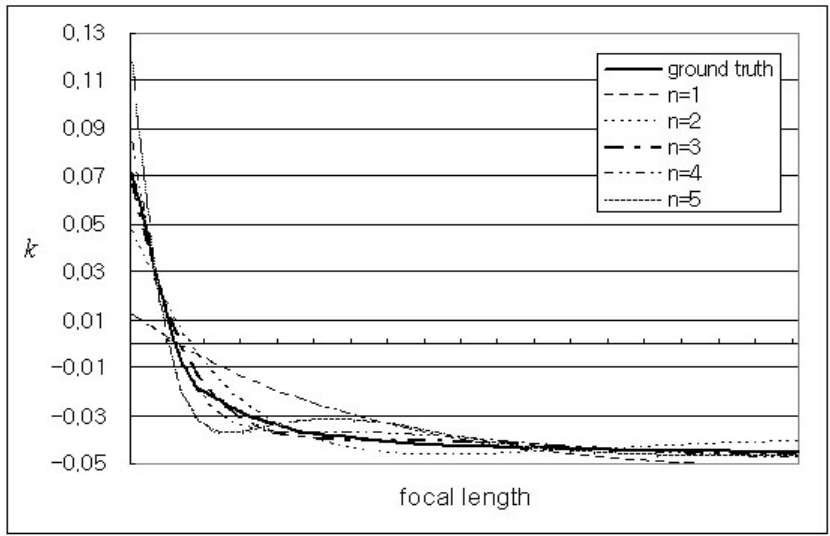


그림 8. 최고 차수에 따른 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델의 형태
 Fig. 8. Shape of the zoom lens distortion model according to the highest order

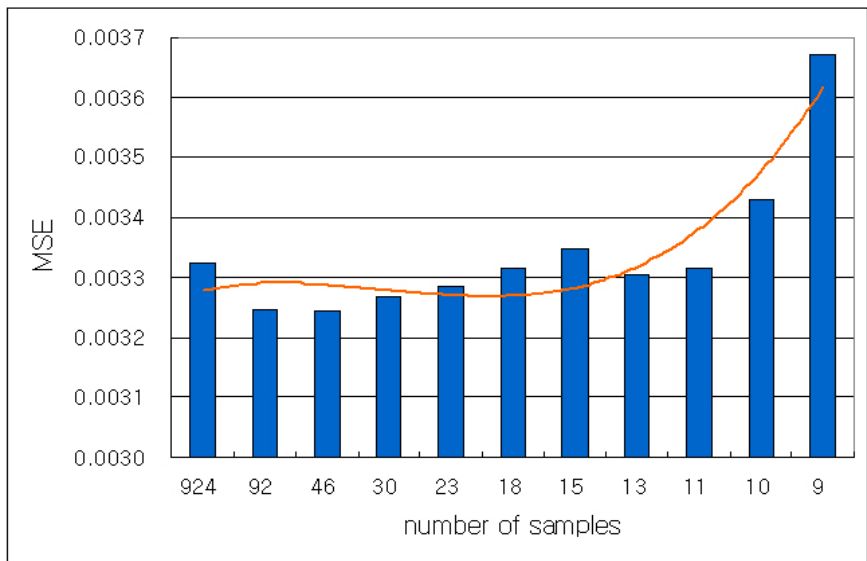


그림 9. 샘플 데이터 개수에 따른 평균제곱오차
 Fig. 9. Mean square error according the number of samples

있다. 그림에서 알 수 있듯이, 샘플 데이터의 개수가 감소함에 따라 E_k 는 증가하고 있지만, 그 크기는 충분히 작은 값을 보이고 있다. 그림 8은 샘플 데이터의 개수에 따른 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 도식한 것이다. 이 모델의 최고 차수는

1절의 결과인 $n=3$ 을 사용하였다. 그림 10에서 알 수 있듯이, 샘플 데이터의 개수에 상관없이 모두 유사한 형태를 나타내고 있다. 즉, 적은 수의 샘플 데이터를 이용하여도 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 구성하는 것이 가능함을 알 수 있다.

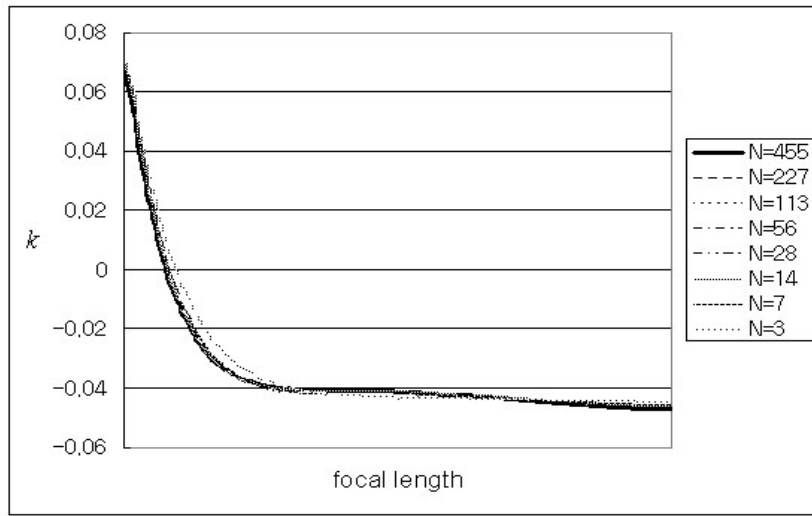


그림 10. 샘플 데이터의 개수에 따른 줌-렌즈 왜곡 모델의 형태
 Fig. 10. Shape of the zoom lens distortion model according to the number of samples

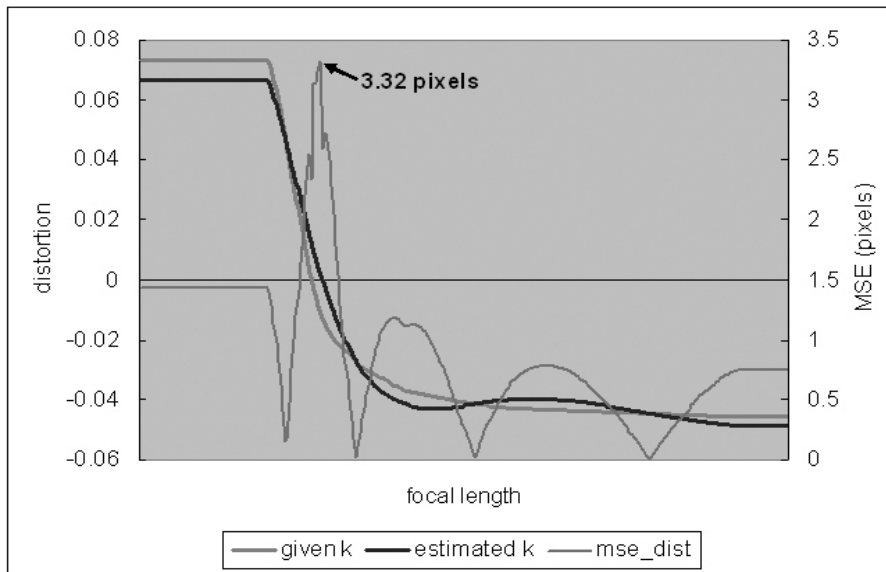


그림 11. 줌-렌즈 왜곡 모델의 픽셀 단위 평가
 Fig. 11. Evaluation of the zoom lens distortion model

3. 화질 평가

본 논문에서 제안한 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 이용해서 측정된 렌즈의 왜곡 계수의 정확성을 평가하기 위해서 식 (10)의 평균제곱오차를 사용한다. 즉, POVIS에 의해 제

공된 실측 데이터를 이용해서 왜곡 보상된 점 x_i^u 와 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 통해 측정된 계수를 이용해서 왜곡 보상된 점 \hat{x}_i^u 사이의 평균 거리 오차이다. 따라서 식 (10)을 이용하면 제안한 방법의 성능을 픽셀 단위로 평가할 수 있으며, 왜곡 보상된 영상의 화질 평가에도 활용할 수 있다.

$$E_p = \frac{1}{N} \sum_i^N \| x_i^u - \hat{x}_i^u \| \quad (10)$$

앞에서 POVIS의 데이터에 대해 최적화된 줌-렌즈 왜곡 모델은 $n=3$, $N=20$, $c_0=-9.263$, $c_1=106.872$, $c_2=165.908$, $c_3=-3393.725$ 이다. 그림 11은 POVIS의 실측 데이터와 줌-렌즈 왜곡 모델을 도식한 결과와 식 (11)의 오차를 동시에 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 대부분의 초점거리에

서 1.5픽셀 이하의 오차를 보이고 있다. 최대 오차는 3.32픽셀을 보이고 있지만, POVIS에서는 1920×1080의 Full HD 영상을 사용하기 때문에 3픽셀 정도의 오차는 영상의 해상도와 비교해서 충분히 작은 값이다. 그림 12(a)와 그림 12(b)는 최대 오차가 발생한 프레임에서 실측 데이터와 줌-렌즈 왜곡 모델을 통해 계산한 렌즈 왜곡 계수를 이용해서 왜곡을 보정한 영상들을 보여주고 있다. 그림 12(c)는 이 두 영상간의 차이를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이,

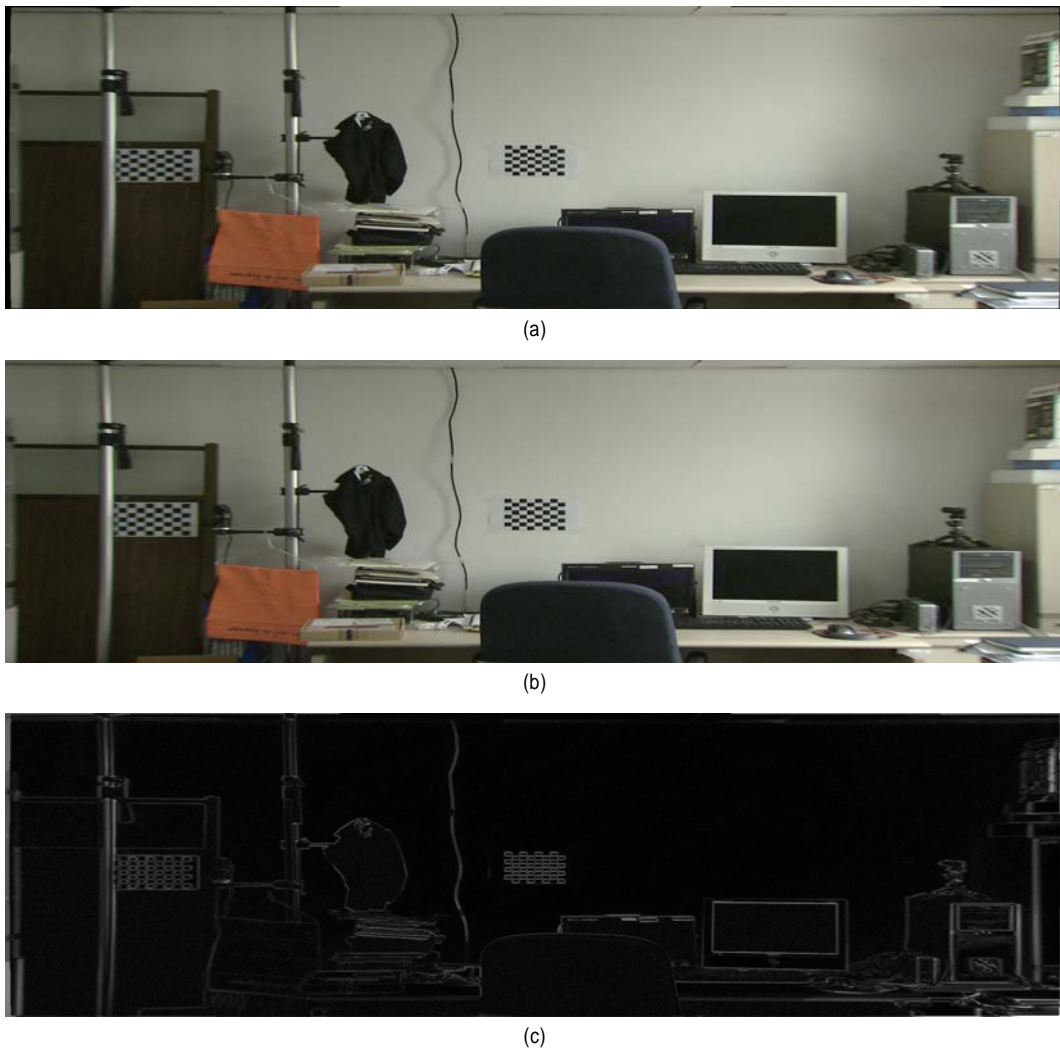


그림 12. 렌즈 왜곡 보정한 영상의 비교. (a) 실측 데이터를 이용해서 보정한 영상, (b) 줌렌즈 왜곡 모델을 이용해서 보정한 영상, (c) (a)와 (b)의 차영상
 Fig. 12. Comparison between lens distortion corrected images. (a) using the given distortion parameter, (b) using the zoom lens distortion model, (c) difference image between (a) and (b)

두 영상 사이에는 큰 차이가 나타나지 않는다. 즉, 3픽셀의 오차는 화질 측면에서 허용 가능한 오차 범위라고 할 수 있다.

4. 정지 영상에서의 실험

정지 영상에 대한 성능을 평가하기 위해서 우리는 Canon EOS 350D 카메라에 EF-S 17-85mm 줌-렌즈를 장착하여 취득한 16장의 정지 영상을 이용해서 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 구성하였다. 그림 13은 실제 촬영한 16장의 영상을 보여주고 있으며, 각 영상의 초점거리는 렌즈 데이터를 직

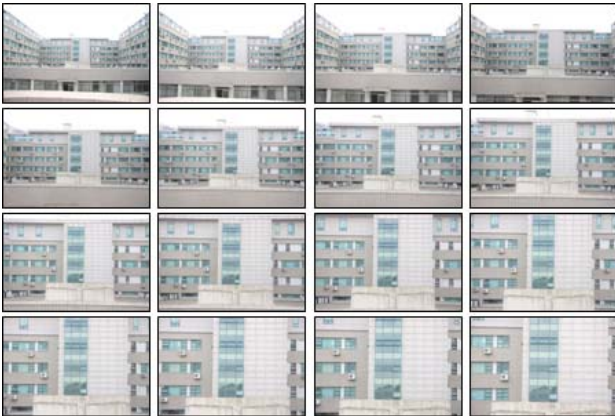


그림 13. Canon EOS 350D와 EF-S 17-85mm 줌-렌즈를 이용해서 취득한 실사 영상
 Fig. 13. Captured images using both Canon EOS 350D and EF-S 17-85mm zoom lens

접 이용하였다. 그리고 각 영상의 렌즈 왜곡 계수는 Photoshop CS의 렌즈 왜곡 필터를 이용하여 측정하였다^[20]. 그 결과, 사용한 렌즈의 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델은 $n=2$, $c_0=-4.609$, $c_1=8.825$, $c_2=3977.447$ 이다.

그림 14(a)는 초점거리가 20mm인 영상으로, 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델식에 의해 렌즈 왜곡 계수가 5.776으로 계산된다. 그림 14(b)는 이 값을 이용해서 그림 14(a)의 왜곡을 보정한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 화단의 중심에서 휘어진 돌벽이 정확하게 펴지는 것을 볼 수 있다. 그림 14는 PTLens 상용 툴을 이용해서 렌즈 왜곡을 보정한 영상이다. 그림 14(b)와 (c)를 비교하면 차이가 없음을 알 수 있다. 즉, 본 논문에서 제안한 줌-렌즈 왜곡 모델은 몇 장의 영상으로 측정된 초점거리와 렌즈 왜곡 계수를 이용해서 초점거리의 변화에 따른 렌즈 왜곡 계수를 정확하게 예측할 수 있음을 증명하는 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 정의하여 줌-렌즈로부터 취득한 비디오 영상에 대해서 렌즈 왜곡을 자동으로 보상하는 새로운 방법을 제안하였다. 비선형 줌-렌즈 모델을 구성하기 위해서 우선 취득한 영상 중 서로 다른 초점거리를 갖는 몇 장의 영상을 선택하여, 기존의 방법들을 이용하여 선택한 영상들의 초점거리와 렌즈 왜곡 계수



그림 14. 렌즈 왜곡 보정 영상. (a) 초점거리가 20mm인 원 영상, (b) 렌즈 왜곡 계수 5.776을 이용해서 렌즈 왜곡 보정한 영상, (c) PTLens를 이용해서 렌즈 왜곡 보정한 영상
 Fig. 14. Lens distortion correction. (a) original distorted image of focal length 20mm, (b) corrected image using the distortion parameter 5.776, (c) corrected image using PTLens

를 구하였다. 그리고 이렇게 측정한 계수들에 대해서 최소 자승법을 이용하여 줌-렌즈 왜곡 모델을 최적화 하였다. 샘플 영상 이외의 다른 비디오 영상들은 영상의 초점거리를 최적화된 줌-렌즈 왜곡 모델에 입력하여 입력 영상의 렌즈 왜곡 계수를 계산하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 다양한 실험 영상에 적용한 결과 비선형 줌-렌즈 왜곡 모델을 이용해서 매우 정확한 렌즈의 왜곡 계수를 계산할 수 있었고, 화질 열화 없이 렌즈의 왜곡을 제거할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] S. W. Shih, Y. P. Hung, and W.S. Lin. When should we consider lens distortion in camera calibration. *Pattern Recognition*, 28(3):447-461, 1995.

[2] R. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robot. Autom.*, 3(4):1165 - 1172, Aug. 1987.

[3] J. Weng, P. Cohen, and M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(10):965 - 980, Oct. 1992.

[4] D. Brown. Close-range camera calibration. *Photogrammetry Engineering*, 37(8):855 - 866, Aug. 1971.

[5] S. Kang. Semi-automatic methods for recovering radial distortion parameters from a single image. *Cambridge Research Laboratory, Technical ReportCRL97/3*, May1997.

[6] F. Devernay and O. Faugeras. Straight lines have to be straight: automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments. *Machine Vision Application*, 1:14 - 24,2001.

[7] S. Becker and V. Bove. Semi-automatic 3D model extraction from uncalibrated 2D camera views. *Visual Data Exploration and Analysis II (SPIE)*, 2:447 - 461, Feb. 1995.

[8] M. Penna. Camera calibration: a quick and easy way to determine the scale factor. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(10):1240 - 1245, Oct. 1991.

[9] Z. Zhang. On the epipolar geometry between two images with lens distortion. *Int. Conf. on Pattern Recognition*, 1:407 - 411, Aug. 1996.

[10] G. Stein. Lens distortion calibration using point correspondences. *IEEE Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1:143 - 148, Jun. 1997.

[11] A.W. Fitzgibbon, Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion. *IEEE Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2001.

[12] M. Li and J.M. Lavest. Some aspects of zoom lens camera calibration. *IEEE Trans. on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, 18(11), Nov. 1996.

[13] H. A. Beyer. Accurate calibration of CCD-cameras. *Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 1992.

[14] O. Faugeras and G. Toscani. Structure from Motion using the Reconstruction and Reprojection Technique. *IEEE Workshop on Computer Vision*, 345-348, 1987.

[15] http://en.wikipedia.org/wiki/Zoom_lens

[16] R. Kingslake. The development of the zoom lens. *Journal of the SMPTE* 69, 534.

[17] D. Clark. *ZoomLenses*, Monographson *AppliedOptics*, 7, Adam-Hilddger(London).

[18] <http://www.adaptall-2.com/articles/InsideZoomLens/InsideZoomLens.html>

[19] S. J. Nam. Development of POVIS (POst Virtual Imaging System). *KBS Technical Report*, pp.248-256, 2007.

[20] http://www.photoshopcafe.com/tutorials/lens_distortion/lens.htm

[21] B. Triggs. The Absolute Quadric. *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 609-614, 1997.

[22] <http://epaperpress.com/ptlens/>

저 자 소 개



김 대 현

- 1995년 ~ 1999년 : 중앙대학교 전자공학과 공학사
- 1999년 ~ 2001년 : 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 공학석사
- 2001년 ~ 2005년 : 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 공학박사
- 2005년 ~ 2008년 : 삼성전자 책임연구원
- 2008년 ~ 2009년 : 연세대학교 전기전자공학부 BK21 연구교수
- 주관심분야 : 컴퓨터 비전, 컴퓨터 그래픽스, 영상처리, 가상현실

 저 자 소 개



신 형 철

- 2000년 : 연세대학교 전파공학과 공학사
- 2006년 : 연세대학교 생체인식협동과정 공학석사
- 2006년 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
- 주관심분야 : 컴퓨터 비전, 3차원 영상 처리, 얼굴인식



오 주 현

- 1993년 ~ 1997년 : 부산대학교 전자공학과 공학사
- 1997년 ~ 1999년 : 부산대학교 공과대학원 전자공학과 공학석사
- 2005년 ~ 현재 : 연세대학교 공과대학원 전기전자공학과 박사과정
- 1999년 ~ 현재 : 한국방송공사 방송기술연구소, 선임연구원
- 주관심분야 : 컴퓨터 비전, 그래픽스



남 승 진

- 1985년 ~ 1989년 : 연세대학교 전자공학과 공학사
- 1989년 ~ 1991년 : 연세대학교 공과대학원 전자공학과 공학석사
- 1991년 ~ 현재 : 한국방송공사 방송기술연구소, 차장
- 주관심분야 : 기상현실



손 광 훈

- 1983년 : 연세대학교 전자공학과 공학사
- 1985년 : University of Minnesota, MSSE
- 1991년 : North Carolina State University, Ph.D
- 1992년 ~ 1993년 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 1994년 : Georgetown University, Post Doctoral Fellow
- 1995년 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자공학부 교수
- 2002년 9월 ~ 2003년 8월 : Nanyang Technological University, Visiting Professor
- 주관심분야 : 3차원 영상처리, 영상통신