

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제23권 제5호, 2018년 9월 (JBE Vol. 23, No. 5, September 2018)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2018.23.5.622>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

이동 투사를 통한 실제 공간에서의 증강현실 시스템

김 모 란^{a)}, 김 준 식^{b)†}

Augmented Reality System in Real Space using Mobile Projection

Moran Kim^{a)} and Jun-Sik Kim^{b)†}

요 약

본 논문에서는 소형 카메라와 프로젝터를 이용한 투사형 통합 증강현실 시스템에 대해 소개한다. 물체 인식을 위해 특징점 추출 알고리즘을 사용하며 물체의 깊이 정보는 구조광 방식을 이용해 추출한다. 인식된 물체에 대한 정보를 3차원 공간에 투사할 때, 가상카메라 개념을 이용한 투사 방법을 개발해 특정 점 집합간의 매핑(mapping)을 계산할 필요 없이 투사하고자 하는 대상의 메쉬(mesh)만을 가지고 원하는 위치에 영상을 투사할 수 있도록 일반화 시켰다. 따라서 단순한 평면뿐만 아니라 복잡한 곡면에 대해서도 복잡한 기하계산 없이 원하는 위치에 투사할 수 있게 되었다. 소개되는 내용에서는 소형 카메라와 프로젝터를 탑재한 로봇을 바탕으로 크게 프로젝터-카메라 시스템 캘리브레이션, 인식된 물체의 위치 계산 그리고 가상카메라 개념을 이용한 영상 투사 방법에 대해 설명한다.

Abstract

In this paper, we introduce an integrated augmented reality system using a small camera and a projector. We extract three-dimensional information of an object with a small portable camera and a projector by using a structured light system. We develop the concept of the virtual camera to generalize the projection method so that the image can be projected at a desired position with only the mesh of the object to be projected without computing the mapping between specific point sets. Therefore, it is possible to project not only simple planes but also complex curved surfaces to desired positions without complicated geometric calculation. Based on a robot with a small camera and a projector, it will largely explain the projector-camera system calibration, the calculation of the position of the recognized object, and the image projection method using the virtual camera concept.

Keyword : Projection-Based Augmented Reality, Virtual Camera

a) (재)실감교류인체감응솔루션연구단(Center of Human-centered Interaction for Coexistence)

b) 한국과학기술연구원 지능로봇연구단(Center for Intelligent and Interactive Robotics, KIST)

† Corresponding Author : 김준식(Jun-Sik Kim)

E-mail: junsik.kim@kist.re.kr

Tel: +82-2-958-5755

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9463-9520>

※ 이 논문의 연구결과 중 일부는 "IPIU 2018"에서 발표한 바 있음.

※ 본 논문은 한국과학기술연구원 로봇미디어연구소 플래그쉽 프로그램 (2E28250)에 의해 수행되었음.

※ This work was supported by the KIST Institutional Program - RMI Flagship Program (Project No. 2E28250).

· Manuscript received May 11, 2018; Revised August 20, 2018; Accepted September 14, 2018.

1. 서론

증강현실(Augmented Reality)이란 컴퓨터로 생성된 가상의 정보를 현실세계의 정보와 합쳐 하나의 영상을 사용자에게 보여주는 기술을 말하며 가상현실(Virtual Reality) 시스템은 실제와 유사하게 복제된 가상의 환경 안에서 사용자가 상호작용을 할 수 있게 하는 기술을 말한다. 현실을 완전히 가상으로 구현하였기 때문에 가상현실 속에서는 현존하는 공간적, 물리적 제약을 뛰어넘어 현실에서는 불가능한 체험을 할 수 있다. 이와 달리 증강현실 기술을 통해서는 사용자가 인식하는 실제 환경과 위치에 가상의 정보를 더하여 증강된 현실을 보여줌으로써 사용자에게 보다 더 나은 현실감을 제공한다.

증강현실 기술은 건축, 공학, 교육 그리고 광고 등 다양한 분야에 적용되고 있고 우리 삶에 큰 영향을 미치고 있다^[1]. 쉽게 찾아볼 수 있는 예로 여러 나라들에서 큰 인기를 끌었던 게임 포켓몬 고 (Pokémon GO)가 있는데, 이 게임은 위치정보시스템(GPS)을 이용해 사용자가 존재하는 실제 공간을 배경으로 하고 그 위에 애니메이션 캐릭터를 겹쳐서 보여주는 형태로 구현된 증강현실 개념이 적용된 모바일 게임이다. 가상세계 속에서만 존재했던 기존의 많은 게임들과 달리 증강현실을 기반으로 구축된 포켓몬 고는 현실과 가상의 경계를 허물고 사용자들에게 새로운 경험을 제공하여 큰 인기를 얻을 수 있었다. 오락적 측면 외에도 증강현실 기술이 현실 생활에 유용하게 사용되는 예로 쇼핑에 접목된 사례들이 있다. 가구를 구매하기 전에 현실 공간에 가상의 가구를 덧입혀 가구를 미리 배치해볼 수 있게 함으로써 사람들에게 편의를 제공했다. 이러한 예들은 증강현실이 우리 삶에 미칠 수 있는 영향력을 보여준다^[1,2].

본 논문에서는 투사형 증강현실(Projected Augmented Reality) 시스템을 탑재한 로봇이 물체를 인식하고 인식된 물체에 대한 정보를 투사하는 시스템에 대해 소개한다. 일반적인 증강현실은 실제 공간을 촬영한 영상에 가상 객체를 겹쳐 보여줌으로써 영상 내에서 현실의 증강이 일어나는데 반해 투사형 증강현실을 프로젝터를 통해 실제 공간에 가상의 물체를 덧입힘으로써 현실 증강을 이루는 방식이다. 증강현실의 질은 가상객체들이 원하는 자리에 얼마나 정확하게 위치하느냐에 따라 결정되는데, 투사형 증강

현실의 질은 실제 공간으로 투사되는 가상 객체 영상들이 얼마나 현실공간에 정확하게 위치되느냐에 따라 결정된다. 이를 위해서 본 논문에서는 프로젝터와 카메라를 이용해 물체의 3차원 정보를 추출하며 인식된 물체 위에 가상 객체들을 원하는 자리에 가깝게 투사하여 현실감 있는 증강현실을 구성하는 시스템 구성요소에 대해 논한다.

본 논문의 구성내용은 다음과 같다. 3장에서는 사물인식과 인식된 물체의 위치를 계산하기 위해 미리 구성되어야 할 데이터베이스에 대해 설명한다. 4장에서는 인식된 물체에 대한 정보를 투사하는 증강현실 시스템의 구성요소를 세 가지로 나누어 기술하였고 5장에서는 프로젝터-카메라 모바일 로봇 시스템을 설계하고 실험한 결과를 보인다.

II. 표기법

영상상의 2차원 점은 $m = [u, v]^T$ 그리고 3차원 점은 $M = [X, Y, Z]^T$ 와 같이 표기하며, \tilde{m} 은 m 을 homogeneous coordinate으로 표현한 점을 나타낸다. 즉 $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$ 그리고 $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$ 과 같다. 본 논문에서 다루지는 프로젝터와 카메라는 모두 프로젝터와 카메라는 값이 0인 비대칭계수 (zero-skew)를 가지며 왜곡변수를 포함하는 바늘-구멍 (pin-hole) 카메라로 모델, 식(1)을 따른다고 가정한다. 이 경우 영상 투영은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$s\tilde{m} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & t \\ \vec{0}^T & 1 \end{bmatrix} \tilde{M} \quad (1)$$

위 식의 s 는 임의의 상수 그리고 (R, t) 는 카메라 외부변수로써 각각 회전행렬 그리고 이동벡터를 나타내며 이어지는 장에서는 간단하게 Rt 로 표기한다. (f_x, f_y) 와 (c_x, c_y) 는 카메라 변수로써 각각 초점거리와 주점 좌표를 나타낸다.

프로젝터와 카메라의 상호 위치관계를 $Rt_{camTopro}$ 라고 할 때 이것은 아래의 식과 같다.

$$Rt_{camTopro} = \begin{bmatrix} R_{pro} & t_{pro} \\ \vec{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{cam} & t_{cam} \\ \vec{0}^T & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

$R_{pro}, t_{pro}, R_{cam}, t_{cam}$ 각각은 기준좌표계에서의 프로젝터 그리고 카메라의 회전 및 이동행렬을 나타낸다.

III. 물체인식

사물인식을 위한 특징점 검출에는 FAST (features from accelerated segment test) 코너 검출 방식^[4]을 사용하였으며 기술자 추출 방법에는 SIFT (scale invariant feature transform) 방식을 사용한다^[5]. SIFT 특징 기술자 알고리즘은 물체의 크기 변화에는 강인하지만 큰 시점 변화에 민감하기 때문에 여러 시점에서 같은 물체로 인식하기 위해 물체를 여러 각도에서 촬영한 이미지들을 사용했고 사전에 추출된 특징 기술자와 온라인 이미지에서 추출된 특징 기술자가 얼마나 비슷한가에 따라 물체의 인식 여부를 판단한다.

객체가 인식된 후 3차원 공간상의 물체의 위치를 추정하는 방법으로는 출력할 수 있는 깊이 범위가 넓으며 잡음에 강건한 구조광 (structured light) 방식을 통해 물체의 깊이 정보를 추출한다. 구조광 방식이란 프로젝터로 일련의 패턴을 3차원으로 복원하려는 대상에 투영하고, 이를 카메라로 촬영해 프로젝터와 카메라 이미지 사이의 대응관계를 찾아 3차원 복원하는 방법이다^[6]. 이 3차원 점들 중 대응되는 이미지 픽셀점들을 찾아 Perspective-n-Point (PnP) 문제를 풀면 카메라로부터 물체가 어디에 위치하는지 알 수 있다^[7]. 자세한 내용은 다음과 같다.

1. 데이터베이스 구성

물체인식을 위해 사전에 물체를 촬영한 이미지에서 SIFT 방식으로 추출한 기술자를 모델 기술자라고 하고 각 점에 대한 2차원 기술자와 물체의 3차원 정보를 쌍으로 가지는 물체 인식 데이터베이스를 구성한다.

프로젝터와 카메라를 이용해 물체의 3차원 점을 복원하기 위해 물체에 구조광을 투사하며 촬영한 일련의 이미지와 프로젝터, 카메라의 내부변수와 상호위치관계에 대한 정보가 필요하다. 포착된 일련의 이미지에 대한 구조광 분석을 통해서 카메라 이미지와 프로젝터 이미지 사이에 대

응점을 추출할 수 있으며 계산된 프로젝터와 카메라 변수를 이용해 삼각측량법(triangulation)으로 카메라 좌표계를 기준으로 하는 물체의 3차원 점을 추출할 수 있다^[9,10]. 특징점으로 추출된 각 점에 해당하는 3차원 점들을 물체 좌표계로 표현한 정보를 데이터베이스에 저장하게 되며, 물체 좌표계를 구성하는 내용은 아래와 같다.

2. 물체 좌표계 구성

3차원 공간에 정보 투사를 용이하게 하기 위해 사용자가 임의로 지정한 물체 좌표계를 사용한다. 지정된 물체 좌표계상의 3차원 점들과 이에 대응되는 이미지 픽셀점들을 세 개 이상 사용해 물체 자세정보를 PnP 알고리즘을 이용해 풀면 카메라 좌표계와 물체 좌표계 사이의 변환 $Rt_{CamToObj}$ 을 구할 수 있다. 본 실험에서는 실측한 물체의 크기를 바탕으로 6개의 3차원 점을 수동으로 지정해 사용하였다. 이제 3.1절에서 추출된 특징점에 대응되는 모든 3차원 점들에 $Rt_{CamToObj}$ 변환을 가하면 물체 좌표계 상의 3차원 점, M_{obj} 이 얻어지며, 식 $\tilde{M}_{obj} = Rt_{CamToObj} \tilde{M}_{cam}$ 로 나타낼 수 있다.

IV. 투사형 증강현실을 위한 단계

1. 프로젝터-카메라 캘리브레이션

카메라와 프로젝터를 이용한 물체의 3차원 복원이나 투사형 증강현실에는 유연성이 뛰어난 자동 (프로젝터-)카메라 캘리브레이션이 유용하게 쓰인다^[3]. 카메라-프로젝터 캘리브레이션의 결과에 따라 투사정밀도가 좌우되므로 투사형 증강현실의 질은 캘리브레이션에 크게 영향을 받는다. 본 논문에서는 특정한 캘리브레이션 물체나 특징점 추출 없이 임의의 3차원 물체들과 보조의 RGB-D 센서를 이용하여 한 번의 영상 획득만으로 프로젝터-카메라 캘리브레이션이 가능한 기술을 사용하였다^[8]. 캘리브레이션을 통해 프로젝터, 카메라 간의 위치관계를 나타내는 변환 $Rt_{CamToPro}$ 를 얻을 수 있다.



그림 1. 보조 RGB-D 카메라를 사용한 프로젝터-카메라 캘리브레이션
 Fig 1. Projector-Camera calibration using auxiliary RGB-D sensor

2. 인식된 사물의 위치 계산

3.1절에 소개된 데이터베이스를 구성하는 모델 기술자는 실시간 카메라 이미지에서 추출되는 특징 기술자와의 유사 정도를 따져 물체의 인식여부를 판단하는데 사용된다. 유사성이 높은 특징 기술자들에 대응되는, 3장 2절에서 계산한 물체 좌표계상의 3차원 점 M_{obj} 들과 온라인 영상의 픽셀 점들이 물체의 위치를 찾기 위해 사용된다. 이 두 점집합을 대상으로 PnP 문제를 풀어 얻어지는 변환 $Rt_{ObjToCam}$ 을 구하며 이는 $\tilde{M}_{cam} = Rt_{ObjToCam} \tilde{M}_{obj}$ 을 만족한다. 물체가 움직이면 온라인 영상의 2차원 특징점들의 위치가 바뀌므로 물체 또는 로봇이 이동하여 상대 자세가 변경될 때마다 $Rt_{ObjToCam}$ 를 다시 계산하여 카메라의 상대 위치를 업데이트 한다.

3. 투사 영상 생성

정확한 이미지를 투사하기 위해 모델 영상과 프로젝터 이미지 간의 변환을 얻고 영상 **warping**을 통해 프로젝터 영상을 생성하는 방법이 흔히 사용되는데, 특히 투사 대상 물체가 2차원의 평면인 경우 4개의 대응점만으로 영상 **warping**을 계산할 수 있으므로 비교적 쉽게 얻을 수 있다. 그러나 투사 대상 물체가 복잡한 곡면인 경우 해당 곡면을 이루는 모든 3차원 점의 투영위치를 계산하여야 하므로 영상 생성 과정이 복잡해진다. 본 논문에서는 이러한 문제에 대한 간편한 해결 방안으로 가상카메라 개념을 제안한다. 프로젝터 영상을 생성하기 위해 카메라로 인식된 현실의 공간을 복제한 가상 공간을 생성하고 프로젝터의 위치에

가상 카메라를 위치시켜 찍음으로써 대상면의 형태에 무관하게 적합한 프로젝터 영상을 생성할 수 있다. 가상카메라는 캘리브레이션으로부터 카메라 변수 및 위치를 결정하고 실제 환경에서의 카메라와 프로젝터 그리고 물체 사이의 관계를 그대로 연속적인 가상공간에 재현하였다.

가상공간에 먼저 카메라를 위치시킨 후 4.1절에서 계산된 변환 $Rt_{CamToPro}$ 만큼 이동한 자리에 프로젝터를 위치시킨다. 실시간 인식된 물체는 카메라로부터 $Rt_{ObjToCam}$ 만큼 이동한 위치에 있다. 이를 토대로 가상공간에 가상의 카메라 그리고 물체를 위치시키면 그림 2와 같다. 따라서 프로젝터로부터 물체의 위치는 $[Rt_{CamToPro} Rt_{ObjToCam}]^{-1}$ 이다. 물체의 3차원 점, 물체와 프로젝터 사이의 위치관계 그리고 4.1절에서 계산된 프로젝터 내부변수가 있으므로 각각의 \tilde{M} , 물체점에 대해 식(1)을 만족하는 이미지 픽셀 좌표, \tilde{m} 을 찾을 수 있다. 이와 같은 과정은 가상 공간에 물체와 카메라를 배치하고 취득하는 과정을 통해 별도의 영상 변환 없이 간단히 프로젝터 영상을 얻을 수 있다.

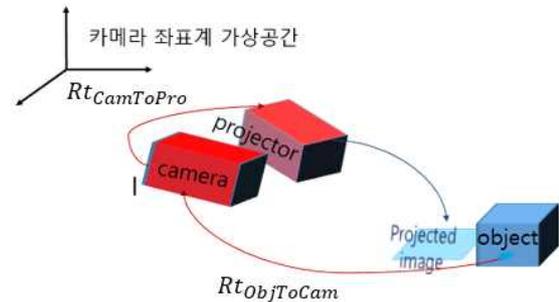


그림 2. 가상공간에 재현된 프로젝터, 카메라 그리고 물체
 Fig. 2. A projector, a camera and objects reproduced in a virtual space

V. 실험

실험을 위해 Point Grey BFLY-U3-23S6C 카메라와 Optoma ML750 프로젝터를 사용한 프로젝터 카메라 시스템을 이용하였다. 캘리브레이션에 사용되는 보조 RGB-D 카메라로는 Kinect2를 사용했다. 각각의 해상도는 카메라 1920x1200, 프로젝터 1280x800 그리고 키넥트 센서는 1920x1080이며, 그림 3과 같이 카메라와 프로젝터를 로봇

에 탑재해 인식된 물체의 위치추정 그리고 영상 투사를 진행하였다. 한 이미지 당 한 개의 물체만 담도록 촬영할 수도 있지만 본 논문의 실험에서는 한 이미지에 여러 개의 물체를 두고 촬영하기도 하였으며 이러한 경우는 각 물체 당 이미지에서 관심영역을 지정해 하나의 물체에 대응되는 특징 기술자 행렬과 물체의 3차원 점들을 따로 추출하여 사용했다. 그림 4는 인식된 물체 위에 영상을 투사한 모습이며 물체 위에 영상이 잘 정합된 것을 볼 수 있다. 단순한 영상도 투사할 수 있지만 가상카메라 개념을 이용하면 비정형 표면의 경우에도 2차원, 3차원 점들 간의 매핑을 따로 계산하지 않고도 물체에 대한 외형 정보를 가상 공간에 넣음으로써 쉽게 투사할 수 있다(그림 4, 6). 물체의 정보를 원하는 자리에 정확하게 투사하기 위해서는 먼저 사물의 위치가 비교적 정확하게 계산되어야 하며 이는 프로젝터-카메라 캘리브레이션 결과의 영향을 받는다.



그림 3. 모바일 로봇에 장착된 투사형 증강현실 시스템
Fig. 3. Projection based augmented reality system mounted on a mobile robot

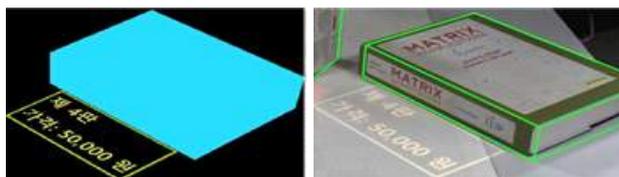


그림 4. (좌) 인식된 물체에 대한 정보를 가상공간에 재현한 이미지 (우) 왼쪽의 이미지에서 정보 영상만 바깥공간에 투사한 장면
Fig 4. (left) The image of the recognized object and its information are reproduced in the virtual space (right) the left scene is projected into the outer space where

이동 투사 시스템이 물체 앞에 영상을 정교하게 투사하는지 확인하기 위해 실험을 진행하였으며 카메라는 Blackfly S BFS-U3-13Y3C, 프로젝터는 Epson H4777C를 사용하였

다. 캘리브레이션 후, 프로젝터와 카메라 재투영 (re-projection) 오차는 각각 1.7, 2.2(pixel)이었다. 체스보드 패턴을 인식한 후 해당 위치에 가상카메라로 만든 프로젝터 영상을 투사하여 겹쳐져 투사된 영상이 그림 5이며 3차원 공간상 위치 오차는 최대 5mm이다.

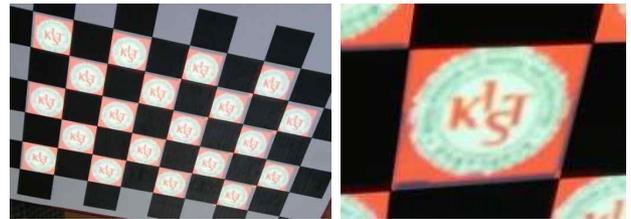


그림 5. (좌) 체스보드 패턴 위에 투사한 영상 (우) 겹쳐진 영상을 확대한 영상
Fig. 5. (left) A red chessboard pattern is projected on to a chessboard pattern (right) magnified image of the aligned image

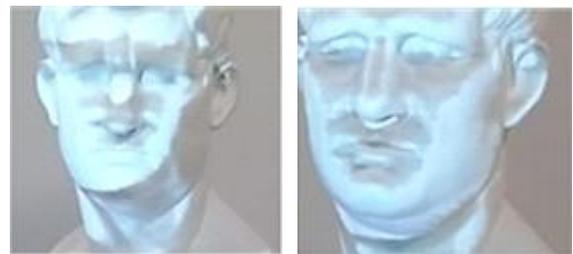


그림 6. (좌) 부정확하게 투사된 경우 (우) 복잡한 비정형 표면에서의 성공적인 투사
Fig 6. (left) Incorrect projection (right) Successful projections on complex irregular surfaces

VI. 결 론

본 논문에서는 모바일 로봇을 위한 투사형 증강현실 시스템 및 컴포넌트 기술인 카메라-프로젝터 캘리브레이션, 사물인식 및 인식된 물체의 위치계산 그리고 프로젝터를 이용한 정보 투사 방법을 소개하였다. 사물을 분별하여 인식하고 깊이 센서의 도움 없이 물체의 위치를 계산해 바깥 공간의 원하는 위치에 영상을 투사하기 위해 미리 주어져야 할 정보들을 추출해 데이터베이스로 구성했다. 또한 모바일 로봇에 탑재하는 투사형 증강현실 시스템에 빠르고 유연한 프로젝터-카메라 자동 캘리브레이션을 통해 인식된 물체의 위치를 비교적 정확히 계산해 영상을 투사하고

가상카메라 개념을 도입해 단순한 평면부터 복잡한 곡면까지 2차원, 3차원 점들 사이의 매핑을 계산할 필요 없이 투사 대상의 매쉬만을 이용해 투사를 일반화시켰다. 보조의 RGB-D 센서 한 대를 이용해 캘리브레이션 물체를 사용하지 않고 깊이센서를 이용해 임의의 물체에서 추출한 3차원 정보를 사용하는 완전자동 프로젝터-카메라 캘리브레이션을 이용하여 시스템 캘리브레이션을 30초이내에 간단히 수행할 수 있다.

실험결과를 통해 소형의 투사형 증강현실 시스템을 모바일 로봇에 탑재하였을 때 사물인식과 정보투사를 잘 수행함을 볼 수 있었다. 이와 같은 소형 투사형 증강현실 시스템은 다른 물체에 탑재가 비교적 쉽고 휴대하기 편리하기 때문에 다른 기술과 결합되어 다양한 응용분야에 적용될 수 있다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] H.L. Chi, S.C. Kang, and X. Wang, "Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction," *Automation in Construction*, Vol 33, pp.116-122, 2013.
- [2] R. Azuma, Y. Bailiot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre, "Recent Advances in Augmented Reality," *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp.34-37, 2001.
- [3] M. Pollefeys, R. Koch and L. Van Gool " Self-Calibration and Metric Reconstruction in Spite of Varying and Unknown Internal Camera Parameters," *International Journal of Computer Vision*, Vol.32, No.1, pp.7-25, 1999
- [4] E. Rosten, and T. Drummond, "Machine learning for high-speed corner detection," *European conference on computer vision*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 430 - 443, 2006.
- [5] D.G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," *International Journal of Computer Vision*, Vol 60, No 2, pp. 91-110, 2004.
- [6] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, and R. Scopigno, "A low cost 3D scanner based on structured light," *Computer Graphics Forum*, Vol. 20, No.3, pp.209-308, 2001.
- [7] F. Moreno-Noguer, V. Lepetit and P. Fua, "EPnP: An Accurate O(n) Solution to the PnP Problem," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 81, No. 2, pp. 155-166, 2009.
- [8] M.R. Kim, and J.-S Kim, "An Automatic Projector-Camera Calibration Method using an Auxiliary RGB-D Camera," *Image Processing and Image Understanding*, 2017.
- [9] Y. Xu, and D. Aliaga, "Robust pixel classification for 3D modeling with structured light," *Proceeding of Conference on Graphics Interface*, pp. 233-240, 2007.
- [10] S. Nayar, G. Krishnan, M. Grossberg, and R. Raskar, "Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol.25, No.3. pp.935 - 944, 2006.

저 자 소 개



김 모 란

- 2014년 : 이화여자대학교 수학과 학사
- 2016년 : 이화여자대학교 수학과 석사
- 2016년 ~ 2018년 : 한국과학기술연구원 인턴
- 2018년 ~ 현재 : (재)실감교류인체감응솔루션연구단 연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-8724-319X>
- 주관심분야 : 컴퓨터 비전, 3차원 복원, 영상처리



김 준 식

- 2001년 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
- 2006년 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사
- 2007년 ~ 2012년 : 카네기멜론대학교 연구원
- 2012년 ~ 현재 : 한국과학기술연구원 선임연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-9463-9520>
- 주관심분야 : 로봇 비전, 센서 융합, 3차원 복원, 가상현실 및 사용자 인터페이스