

간단한 기구부와 결합한 공간증강현실 시스템의 샘플 기반 제어 방법

이아현^{1,2} · 이주호³ · 이주행^{2,1†}

¹과학기술연합대학원대학교대학원 컴퓨터소프트웨어전공, ²한국전자통신연구원 HRI연구팀
³리츠메이칸 대학교 정보이공학부

Sampling-based Control of SAR System Mounted on A Simple Manipulator

Ahyun Lee^{1,2}, Joo-Ho Lee³, and Joo-Haeng Lee^{2,1†}

¹Computer Software, Korea University of Science and Technology

²HRI Lab., Electronics and Telecommunications Research Institute

³College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

Received 30 July 2014; received in revised form 1 September 2014; accepted 1 September 2014

ABSTRACT

A robotic spatial augmented reality (RSAR) system, which combines robotic components with projector-based AR technique, is unique in its ability to expand the user interaction area by dynamically changing the position and orientation of a projector-camera unit (PCU). For a moving PCU mounted on a conventional robotic device, we can compute its extrinsic parameters using a robot kinematics method assuming a link and joint geometry is available. In a RSAR system based on user-created robot (UCR), however, it is difficult to calibrate or measure the geometric configuration, which limits to apply a conventional kinematics method. In this paper, we propose a data-driven kinematics control method for a UCR-based RSAR system. The proposed method utilized a pre-sampled data set of camera calibration acquired at sufficient instances of kinematics configurations in fixed joint domains. Then, the sampled set is compactly represented as a set of B-spline surfaces. The proposed method have merits in two folds. First, it does not require any kinematics model such as a link length or joint orientation. Secondly, the computation is simple since it just evaluates a several polynomials rather than relying on Jacobian computation. We describe the proposed method and demonstrates the results for an experimental RSAR system with a PCU on a simple pan-tilt arm.

Key Words: Computer vision, Pro-cam system, Spatial augmented reality, Calibration, Kinematics, B-spline surface fitting

1. 서 론

로봇 공간증강현실(Robotic Spatial Augmented

Reality, RSAR)은 프로젝터를 디스플레이 장치로 사용하는 공간증강현실(Spatial Augmented Reality, SAR)과 로봇을 접목한 기술이다^[1]. SAR 시스템은 프로젝터와 카메라의 위치가 고정되어 사용자 제어 환경이 비교적 제한된다. 이에 비해 RSAR 시스템은 로봇을 사용하여 프로젝터와 카메라의 위

[†]Corresponding Author, joohaeng@etri.re.kr
©2014 Society of CAD/CAM Engineers

치를 상황에 따라 이동시킬 수 있어 사무실 책상, 회의실, 식당 등 다양한 환경에서 응용이 가능하다. RSAR 시스템은 프로젝터와 카메라가 결합된 프로젝터-카메라 유닛(Projector-Camera Unit, PCU)과 PCU의 위치와 방향을 제어하는 로봇 기구부로 구성된다. 카메라는 사용자나 사물 및 상황을 인지하고, 프로젝터는 사물의 표면 위에 정보, 콘텐츠, 사용자 인터페이스 등의 가상 이미지를 정합하기 위해 사용된다^[2,4].

로봇 공간증강현실 시스템은 로봇 기구부를 사용해 PCU를 이동시킬 수 있는 장점을 갖지만, 로봇 기구부 제어를 위한 별도의 절차가 필요하다. 즉, 기준 좌표계에 대한 로봇 기구부의 엔드이펙터의 위치 및 자세를 계산하는 것과 엔드이펙터를 원하는 곳으로 이동시키기 위한 기구학(kinematics)이 요구된다. 기존 연구^[5]에서는 CAD 모델 기반으로 제작된 로봇의 변하지 않는 링크(link)의 길이와 주어진 일련의 관절각을 사용한 기구부 제어 방법을 사용하였다^[6].

로봇 제작 키트 등을 사용해 비교적 적은 비용으로 간단하게 제작할 수 있는 사용자 제작 로봇(User Created Robot, UCR)의 경우, 일반적으로 CAD 모델없이 제작되어 로봇의 링크 정보를 정확히 측정하기 어렵다. 또한 CAD 모델 기반으로 제작되었다더라도 조립 오차가 쉽게 발생하기 때문에 기존 연구^[5]에 사용된 기구부 제어 방법을 사용하는데 제한적이다.

본 논문은 UCR 기반의 RSAR 시스템의 효율적인 로봇 제어를 위한 데이터 기반의 기구부 제어 방법을 제안한다. 제안된 방법은 기구부의 링크 정보를 사용하지 않고, 카메라 캘리브레이션을 사용해 취득한 샘플 데이터 세트와 실시간 측정 가능한 로봇 기구부의 관절각만을 사용한다. 때문에 사용자 의도에 따라 다양한 형태를 갖는 UCR 기반의 RSAR 시스템에서 범용적으로 사용될 수 있다. 또한 기존 연구의 역기구학 방정식이 초월함수로 이루어진 비선형 방정식이기 때문에 해를 구하기 어렵거나 가능하지 않는 경우가 생긴다. 하지만 제안된 방법은 미리 계산된 데이터를 사용하기 때문에 보다 빠른 수행 속도로 역기구학을 수행할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구 및 ETRI RSAR 시스템을 소개한다. 3장에서는 RSAR 시스템 및 프로젝터-카메라 모델에 대

해서 설명하고, RSAR 시스템에서 로봇 기구부 제어 방법 사용시 한계점을 제시한다. 4장에서는 RSAR 시스템을 위한 데이터 기반의 기구부 제어 방법을 제안한다. 5장에서는 제안된 방법의 실험 결과를 제시하고, 6장에서는 본 논문을 맺으며 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 관련 연구

SAR 기술은 AR 기술과는 달리 실세계 객체 표면에 프로젝터를 통해 직접 가상의 이미지를 투사한다^[7,8]. 또한 투사된 가상의 정보가 사용자 인터페이스로 사용되면 보다 직관적인 사용자 환경을 구성할 수 있다^[9,10]. 최근 모바일 컴퓨팅 능력의 향상과 프로젝터의 소형화로 인해 누구나 자신만의 시스템을 구축할 수 있어 다양한 분야로의 응용 가능성을 높였다^[11,12]. 특히 웨어러블 장치(wearable device)와 접목된 SAR 기술은 실외 활동에서도 활용된다^[13,14].

SAR 기술의 특징은 프로젝터를 사용한 가상 이미지 증강 및 정합이다. 예를 들어 South Australia 대학에서는 시제품 디자인 검증을 위해 프로젝터를 이용하여 가상으로 디자인된 제품의 표면 이미지를 실제 제품 모형에 투사 및 정합하여, 실제 제작될 제품의 디자인을 미리 볼 수 있도록 SAR 기술을 응용하였다^[15].

마이크로소프트에서 개발한 IllumiRoom^[16]은 방한 쪽 벽면의 기하학 정보를 취득한 후, 벽면 전체에 모니터의 게임 화면에서 보다 확장된 이미지를 프로젝터를 사용해 투사하였다. 그 결과 사용자 몰입감이 증대하여 보다 적극적이고 실질적인 SAR 기술 사례로 주목을 받았다.

MIT 미디어 랩에서 개발된 LuminAR^[17]의 경우 SAR 시스템에 PCU를 이동시킬 기구부를 추가한 대표적인 사례이다. 책상 위 흔히 볼 수 있는 스탠드의 전구 대신 프로젝터를 장착하여 사용자가 원하는 공간에서 이미지가 투사되게 하였다.

한국전자통신연구원(ETRI)에서 개발된 미래형 로봇 컴퓨터(Future Robotic Computer, FRC)^[1]는 Fig. 1(a)와 같이 로봇 기구부는 2쌍의 PCU와 5개의 액츄에이터(actuator)로 구성된다. FRC는 응용 상황에 따라 PCU의 위치 및 자세를 이동할 수 있어, 본격적으로 로봇과 SAR 시스템이 결합된 RSAR 시스템 사례이다.

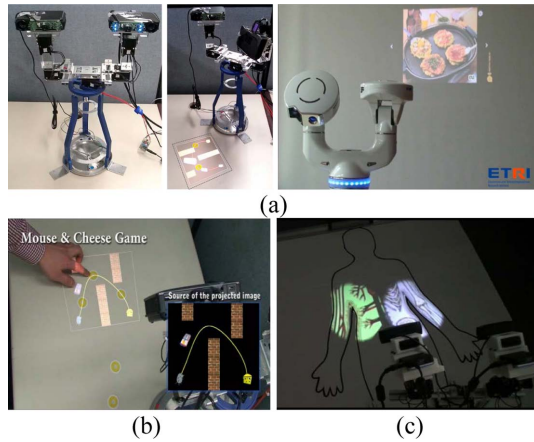


Fig. 1 An example of RSAR system: (a) FRC system^[1], (b) mouse & cheese game^[18], (c) application of dual PCU^[5]

FRC 시스템은 책상 위 사물이나 환경을 카메라로 인지한 것을 바탕으로 증강된 정보를 프로젝터를 사용해 사용자에게 제공한다. 때문에 실제 만질 수 있는 실감 객체를 사용한 다양한 응용이 가능하다. Fig. 1(b)는 실감 객체를 사용해서 쥐가 벽을 피해 치즈를 찾아가는 경로를 디자인하는 게임이다^[18]. 이때 PCU와 실세계 좌표계의 변환 관계에 따라 프로젝터에서 투사되는 증강 이미지가 사영변환(projective transformation)된다. 하지만 기구부의 움직임에 따라 PCU의 위치 및 자세 계산이 자동적으로 수행되지 않아, PCU의 위치가 변경될 때마다 카메라와 마커를 사용한 캘리브레이션 수행 단계가 요구된다.

리츠메이칸 대학 AIS 랩에서 개발된 FRC 시스템^[5]은 CAD 모델 기반으로 제작된 로봇의 엔드이펙터에 장착된 PCU를 사용한 능동적인 RSAR의 예를 보여준다. 움직이는 PCU의 기하학 정보를 계산하기 위해 로봇의 링크 및 관절 정보를 이용한 기구부 제어 방법을 사용하여, Fig. 1(c)와 같이 PCU의 위치 및 자세가 변경되어도 실세계 좌표계 기준으로 투사된 프로젝터 이미지를 안정적으로 유지한다.

최근 복잡성을 줄이고 최저 비용, 최소 개발 시간을 추구하는 미니멀리즘 기반의(minimalism-based) UCR이 주목받고 있다^[19]. 시중에 판매되는 로봇 제작 키트를 통해 누구나 쉽게 다양한 형태의 로봇을 제작할 수 있다. UCR의 엔드이펙터에 PCU가 부착되면 UCR 기반의 RSAR 시스템이 구

성된다. 하지만 CAD 모델 기반으로 비교적 조립 오차 없이 제작된 시스템과 달리 UCR 기반의 RSAR 시스템은 기구부의 링크 및 관절의 회전축 정보가 정확하지 않다. 때문에 본 논문에서는 로봇의 링크 및 관절의 회전축 정보를 사용하지 않는 데이터 기반의 기구부 제어 방법을 시도하였다.

3. RSAR 시스템

본 논문에서 제안된 UCR 로봇 기반의 RSAR 시스템을 위한 데이터 기반의 기구부 제어 방법은 프로젝터-카메라 모델을 기반으로 하고 있다. 이번 장에서는 먼저 프로젝터와 카메라 모델의 기하학 관계에 대해서 다루고, 이후 로봇 기구부 제어 방법을 소개한다. 마지막으로 UCR 기반의 RSAR 시스템에서 로봇 기구부 제어 방법의 한계점을 서술한다.

3.1 프로젝터-카메라 모델

프로젝터와 카메라 모델은 Fig. 2와 같이 핀홀 카메라(pinhole camera) 모델 기반의 프로젝터와 카메라, 실세계 좌표계가 위치한다. 각각의 좌표계는 프로젝터와 카메라 캘리브레이션으로 서로의 기하학 관계가 정의된다^[2-4].

캘리브레이션 된 카메라와 프로젝터의 호모그래피 행렬은 내부와 외부 파라미터 행렬로 구성된다. 내부 파라미터 M 는 3×3 행렬로

$$M = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

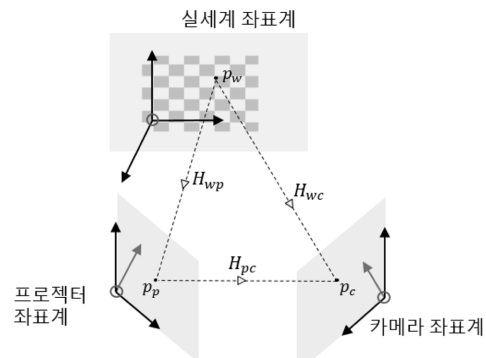


Fig. 2 A projector-camera model: world, camera and projector coordinates

α, β 는 이미지 u, v 축의 스케일 팩터(scale factor)이고, u_0, v_0 는 좌표계의 주점(principal point)이다. γ 는 이미지 상의 스큐 파라미터(skew parameter)이다. 외부 파라미터 X 는 4×4 행렬이고 x, y, z 축의 이동 벡터 t , 회전 행렬 R 로 구성된다.

$$X = [R|t] \quad (2)$$

카메라 캘리브레이션은 Zhang^[20]의 방법을 사용하였다. Fig. 2에서 p_c 가 캘리브레이션된 카메라 좌표계상의 한 점이고 대응되는 실세계 좌표계상의 점을 p_w 라고 하면, 서로의 관계는 카메라 내부 파라미터 M_c 와 외부 파라미터 X_{wc} 가 결합된 카메라 호모그래피 행렬 H_{wc} 로 정의된다.

$$p_c = M_c X_{wc} p_w = H_{wc} p_w = H_{cw}^{-1} p_w \quad (3)$$

프로젝터 캘리브레이션 수행시 오프셋 렌즈(offset lens) 프로젝트^[2]와 기구부의 움직임 때문에 미리 해상도를 알아야 하는 Zhang^[20]의 방법을 사용할 수 없고, 대신 Tsai^[21]의 방법을 사용하였다. Fig. 2의 p_p 가 캘리브레이션된 프로젝트 좌표계상의 한 점이고 대응되는 실세계 좌표계상의 점을 p_w 라고 하면, 서로의 관계는 프로젝트의 내부 파라미터 M_p , 외부 파라미터 X_{wp} 가 결합된 프로젝트 호모그래피 행렬 H_{wp} 로 정의된다.

$$p_p = M_p X_{wp} p_w = H_{wp} p_w = H_{pw}^{-1} p_w \quad (4)$$

프로젝터와 카메라의 관계 행렬인 X_{cp} 는 프로젝트와 카메라의 외부 파라미터 행렬을 사용하여 계산한다.

$$X_{wp} X_{wc}^{-1} = X_{wp} X_{cw} = X_{cp} = X_{pc}^{-1} \quad (5)$$

프로젝터 호모그래피 행렬 H_{wp} 은 카메라 캘리브레이션을 수행한 뒤, 계산된 카메라 외부 파라미터 행렬 X_{wc} , 미리 계산된 프로젝트 내부 파라미터 행렬 M_p 와 식(5)에서 계산된 프로젝트-카메라 관계 행렬 X_{cp} 를 이용해 계산된다.

$$M_p X_{cp} X_{wc} = M_p X_{wp} = H_{wp} = H_{pw}^{-1} \quad (6)$$

Fig. 2의 p_c 가 캘리브레이션된 카메라 좌표계상의 한 점이고 대응되는 캘리브레이션된 프로젝트 좌표계상의 점을 p_p 라 할 때, 프로젝트와 카메라의 관계 행렬을 H_{pc} 로 정의한다. H_{pc} 는 카메라와 프로

젝터의 내부 파라미터가 포함된 호모그래피 행렬을 사용해 계산된다.

$$p_c = H_{wc} H_{pw} p_p = H_{cw}^{-1} H_{wp}^{-1} p_p = H_{pc} p_p \quad (7)$$

3.2 로봇 기구부 제어 방법

RSAR 시스템은 프로젝트-카메라 모델 기반의 SAR 시스템에 로봇 기구부가 결합된 형태이다. 로봇에서 환경과 상호작용을 하는 엔드이펙터는 일반적으로 Fig. 3(a)에서 일련의 관절과 링크로 연결된 기구부의 말단 장치를 의미한다. 반면에 RSAR 시스템의 엔드이펙터는 유연하게 정의될 수 있다. 예를 들어, Fig. 3(b)과 같이 기구부의 말단 장치 부분에 부착된 PCU에서 투사된 투사영역의 중심점을 엔드이펙터로 사용할 수 있다. 프로젝트 투사 영역의 중심점 c_w 는 프로젝트 호모그래피 역행렬인 H_{pw} 를 사용해 식 (8)과 같이 계산된다. w, h 는 프로젝트 해상도 너비(width)와 높이(height)이다.

$$c_w = H_{pw} \left(\frac{w}{2}, \frac{h}{2}, 1 \right)^T \quad (8)$$

로봇 기구부 제어 방법 중 정기구학은 일련의 관절각이 주어졌을 때 엔드이펙터의 직교좌표상 위치 및 자세를 구하는 문제이다. 기구부의 링크와 관절의 기하학 정보를 사용하여 정기구학의 해를 구한다. 역기구학은 엔드이펙터의 목표 위치 및 자세가 주어졌을 때, 해당 위치로 엔드이펙터를 위치시키기 위해 관절의 회전각을 결정하는 방법이다. 역기구학은 정기구학과 달리 해가 존재하지 않거나 동시에 많은 해가 존재할 수 있다. 때문에 역기구학의 계산은 대부분의 경우 기구학 모델의 자코비안의 역행렬을 이용하여 수치적으로 계산한다^[6].

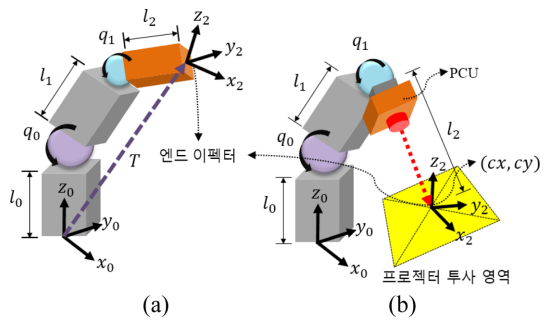


Fig. 3 Comparison of end-effectors (a) robotics arms, (b) a RSAR system

3.3 로봇 기구학의 한계점

로봇 기구부 제어 방법은 정해진 링크 길이와 관절의 회전 각도 등의 기하학 정보를 사용한다. 때문에 CAD 모델과 제작된 로봇의 링크 정보가 다를 경우 로봇 기구부 제어 방법 사용시 오류가 발생한다. 때문에 3.2에서 설명된 방법을 적용하기 위해서는 CAD 모델 기반으로 로봇 기구부가 정확히 제작되어야 한다.

로봇 제작 키트 등으로 비교적 적은 비용으로 간단하게 제작할 수 있는 UCR의 경우, 일반적으로 CAD 모델 없이 제작되어 로봇의 링크 및 회전축 정보를 정확히 측정하기 어렵다. CAD 모델 기반으로 제작되었다더라도 조립 오차가 쉽게 발생하기 때문에 기존 연구^[5]에 사용된 기구부 제어 방법을 사용하는데 제한적이다.

4. RSAR 시스템의 기구부 제어 방법

이번 장에서는 UCR 기반의 RSAR 시스템을 위한 데이터 기반의 기구부 제어 방법을 제안한다. 먼저 제안된 방법을 샘플 데이터 세트 취득, 샘플 데이터에 대한 B-spline 곡면 표현, 응용 단계에서의 출력 데이터 추정 단계로 서술한다. 그리고 RSAR 시스템의 응용 프로그램에서 제안된 정기구학과 역기구학 방법이 사용되는 예시를 보여준다.

가상 이미지 증강을 목적으로 카메라 좌표 상의 점에 대응하는 프로젝터 좌표 상의 점을 찾기 위해서는 식 (7)과 같이 프로젝터와 카메라의 호모그래피가 필요하다. 때문에 제안된 정기구학 방법에서는 엔드이펙터로 투사영역의 중심점 대신 PCU를 사용한다. 이 경우 식 (6), (8)을 이용하여 투사영역의 중심점을 계산할 수 있다. 하지만 투사영역의 중심점만을 사용하는 경우 프로젝터와 프로젝터 호모그래피를 취득할 수 없어, PCU의 위치 및 자세 계산이 불가능하다. Table 1에서는 엔드이펙터가 PCU일 경우와 투사영역의 중심점을 사용하는 경우 입출력 데이터로 사용되는 값을 보인다. 본 논문에서는 정기구학 제어를 위해 엔드이

펙터를 PCU로 사용하고, 역기구학 제어의 경우 투사영역의 중심점을 사용한다.

4.1 샘플 데이터 세트 취득 방법

샘플 데이터 세트는 기구부 제어를 위해 시스템 초기화 단계에서 미리 취득한 기구부의 기하학적 정보이다. Fig. 4와 같이 로봇 기구부와 평면 패턴은 바닥에 고정되고, 특정 간격으로 pan, tilt 모터 회전각 θ , φ 를 변경시키면서 샘플 데이터 세트를 취득한다. 모터의 회전 구간은 Fig. 4(c)와 같이 먼저 pan 모터를 회전시키고, 정해진 구간을 벗어나면, pan 모터 값을 처음의 위치로 이동시킨 후 tilt 모터를 회전시킨다.

Fig. 5는 샘플 데이터 취득 방법의 흐름도를 보인다. 먼저 pan과 tilt 모터를 회전시켜 PCU의 위

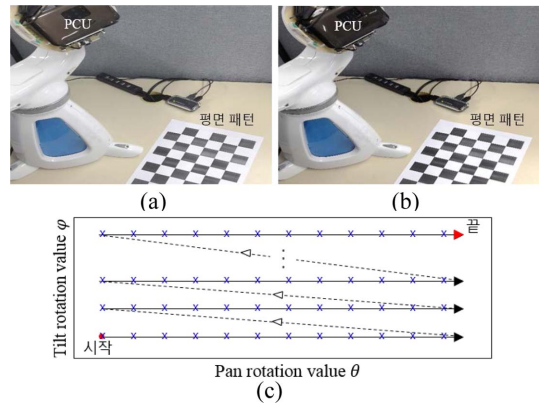


Fig. 4 A sample data set is acquired at regular intervals of the specific area on the tabletop environment: (a) θ : 148°, φ : 228° (b) θ : 160°, φ : 240° (c) a sampling sequence of pan and tilt motors. A blue x means camera calibration

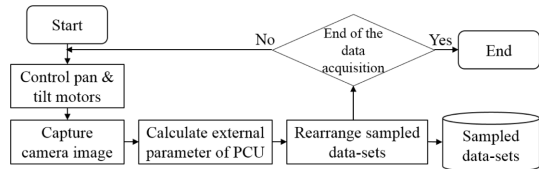


Fig. 5 Flow chart of the sample set acquisition

Table 1. Input and output data in the sample according to the end-effector type

엔드이펙터	PCU		투사영역의 중심점	
	정기구학	역기구학	정기구학	역기구학
입력	관절각	카메라 외부 파라미터	관절각	투사영역의 중심점
출력	카메라 외부 파라미터	관절각	투사영역의 중심점	관절각

치를 이동시키고 카메라 캘리브레이션을 수행한 뒤, 카메라 외부 파라미터 및 엔드이펙터의 위치를 취득한다. 계산된 데이터는 제안된 정기구학과 역기구학에서 사용되는 데이터 형태에 맞게 배열된다.

샘플 데이터 세트는 입력과 출력 데이터로 구분된다. 입력 데이터는 응용 단계에서 취득이 가능한 데이터이고, 출력 데이터는 입력 데이터를 사용해 계산된 값이다. 예를 들어 역기구학의 경우, 응용 단계에서 투사영역의 중심점인 엔드이펙터 위치를 기반으로 PCU가 이동될 목표 위치를 지정한다. 이때 제안된 역기구학 방법으로 엔드이펙터의 위치를 입력 데이터로 사용해 출력데이터인 pan, tilt 모터의 회전각을 계산한다.

4.1.1 정기구학 제어를 위한 샘플 데이터 세트

제안된 정기구학에 사용되는 샘플 데이터 세트는 입력 데이터인 pan, tilt 모터의 회전 각도와 출력 데이터인 카메라 외부 파라미터로 구성된다. RSAR 시스템의 엔드이펙터는 프로젝터의 투사 이미지 중심점 c_w 이지만, 해당 위치를 계산하기 위해서는 프로젝터 호모그래피 행렬 H_{wp} 가 필요하다. H_{wp} 은 미리 계산되어 고정된 프로젝터-카메라 변환 행렬 H_{cp} 와 카메라 외부 파라미터 행렬 H_{wc} 을 사용해 식 (6)과 같이 계산된다. 때문에 제안된 정기구학 방법에서는 입력데이터로 투사영역의 중심점 대신에 카메라 외부 파라미터를 사용한다.

샘플 데이터 세트는 일정 간격의 pan, tilt 모터 회전 값 θ, φ 에 따라 취득된다. 취득되지 않는 θ, φ 의 위치에서 외부 파라미터 행렬을 추정하기 위해서는 보간법을 사용한다. 하지만 non-linear 형태의 4×4 의 외부 파라미터 행렬은 보간법을 사용하기 어려워, linear 형태로 보간하기 위해 오일러 성분을 이용한다^[22]. 카메라 외부 파라미터 행렬은 x, y, z 축의 회전 값 rx, ry, rz 와 이동 변위값 tx, ty, tz 총 6개의 인수로 구성된다. R_j 는 R 행렬의 i 행의 j 열의 인자를 의미한다.

$$X_{wc} = [R|t] = [R(rx, ry, rz)|(tx, ty, tz)^T] \quad (9)$$

$$rx = \tan^{-1}(R_{21}, R_{11})$$

$$ry = \tan^{-1}(-R_{31}) \quad (10)$$

$$rz = \tan^{-1}(R_{32}, R_{33})$$

Table 2와 같이 분해된 6개의 인수들은 카메라 캘리브레이션을 수행한 위치의 θ, φ 값과 함께 정기구학을 위한 샘플 데이터 세트를 구성한다.

4.1.2 역기구학 제어를 위한 샘플 데이터 세트

역기구학은 엔드이펙터를 목표 위치로 이동시키기 위해 기구부의 관절 회전각을 계산하는 방법이다. RSAR 시스템에서의 엔드이펙터는 Fig. 6과 같이 프로젝터에서 투사된 투사 영역의 중심점이다. 때문에 역기구학을 위한 샘플 데이터 세트의 입력 데이터인 실세계 좌표 상의 프로젝터 투사영역의 중심점 c_w 와 출력 데이터인 pan, tilt 모터의 회전 각도로 구성된다. 제안된 역기구학 방법을 위한 샘플 데이터 세트는 Table 3과 같이 입력 데이터인 프로젝터 투사영역의 중심점 c_x, c_y 과, 출력 데이터인 θ, φ 로 구성된다.

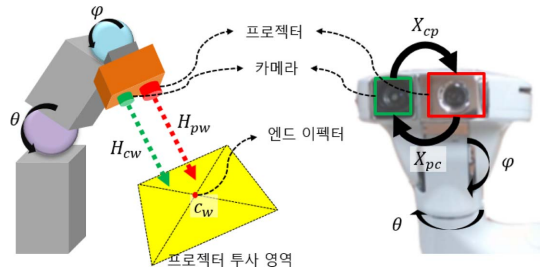


Fig. 6 PCU geometry in RSAR system: a camera and a projector are fixed each other physically

Table 3 An instance of the sampled data for the proposed inverse kinematics method

Index	Input data	Output data
i	c_x, c_y	θ_i, φ_i

Table 2 An instance of sampled data for the proposed forward kinematics method

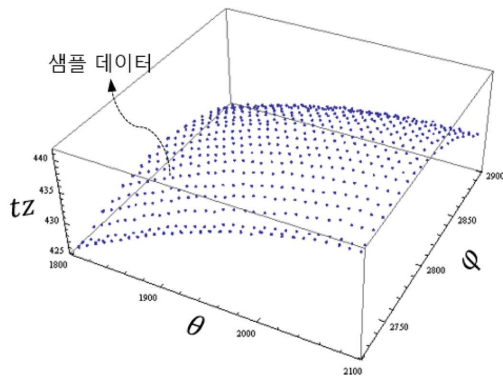
index	Input data		Output data					
			rotation			translation		
i	θ_i	φ_i	rx_i	ry_i	rz_i	tx_i	ty_i	tz_i

4.2 샘플 데이터의 B-spline 곡면 표현 방법

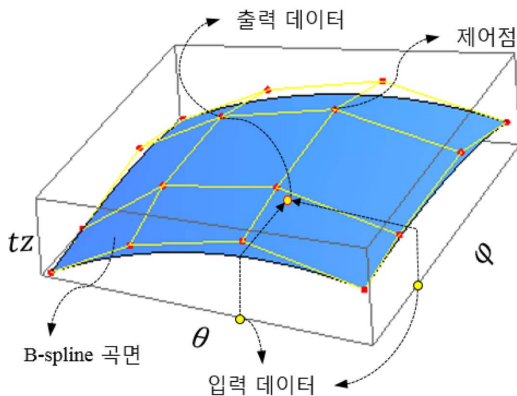
샘플 데이터 세트에서 취득되지 않은 입력 데이터에서 출력 데이터를 추정 및 보간하기 위해 B-spline surface fitting 방법을 사용한다. B-spline 곡면 $B(u, v)$ 생성을 위해서 2세트의 basis 함수 $N_{d_0,i}(u), N_{d_1,j}(v)$ 를 사용한다. d_0 과 d_1 은 곡면의 차수(degree)이고, 2차원 $(n \times m)$ 배열과 제어점(control point) 행렬 $Q_{i,j}$ 로 구성된다^[23,24].

$$B(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{d_0,i}(u) N_{d_1,j}(v) Q_{i,j} \quad (11)$$

제안된 방법을 위한 b-spline 곡면으로 표현하기 위해서는 먼저 샘플 데이터 세트를 재배열해야 한다. 배열 방법은 2개의 입력 데이터와 1개의 출력 데이터로 3차원 좌표로 구성하는 것이다. 예를 들어 입력 데이터가 u, v 이고, 출력 데이터가 b 이면 (u, v, b) 와 같이 배치한다.



(a) plot of a sampled data set: (θ, ϕ, tz)



(b) B-spline surface fitting of (a)

Fig. 7 The sampled data set and its B-spline surface form

4.2.1 정기구학 제어를 위한 B-spline 곡면

제안된 정기구학을 위한 입력 데이터는 pan, tilt 모터의 회전 각도 θ, ϕ 이고, 출력 데이터는 4.1.1에서 분해된 인수 rx, ry, rz, tx, ty, tz 이다. 6개의 출력 데이터를 추정 및 보간하기 위해서는 총 6개의 B-spline 곡면이 필요하다. 곡면 생성에 사용되는 3차원 좌표는 예를 들어 x 축의 회전 값인 rx 의 경우 (θ_i, ϕ_i, rx_i) 와 같이 구성된다. 각각의 인수가 동일한 형태로 재배열 되어 6개의 B-spline 곡면으로 표현된다.

Fig. 7(a)는 재배열된 데이터를 3차원 좌표계로 표현된 결과이다. x, y 축은 pan, tilt 모터의 회전 값 θ, ϕ 이고, z 축은 tz 이다. 2개의 관절인 pan, tilt 모터로 구성된 기구부를 사용해 취득된 샘플 데이터 세트로 표현된 곡면의 결과는 Fig. 7(b)처럼 부드러운 곡면 형태를 갖는다.

4.2.2 역기구학 제어를 위한 B-spline 곡면

제안된 역기구학을 위한 입력 데이터는 프로젝트 투사영역의 중심점이고 출력 데이터는 pan, tilt 모터의 회전 값 θ, ϕ 이다. 2개의 출력 데이터를 계산하기 위해서는 2개의 B-spline 곡면이 요구된다. 곡면 표현에 사용되는 3차원 좌표는 예를 들어 출력 데이터가 pan 모터의 회전 값인 θ 일 경우 (cx_i, cy_i, θ_i) 와 같이 구성된다. tilt 모터의 회전 각인 ϕ 도 동일하게 배열 되어 B-spline 곡면을 표현한다.

4.3 응용 단계에서 출력 데이터 계산 방법

응용 단계에서 출력 데이터를 계산하는 방법은 먼저 입력 데이터를 측정하고, 미리 표현된 B-spline 곡면으로부터 입력 데이터에 해당되는 출력 데이터 값을 계산한다. 예를 들어 Fig. 7(b)의 경우 입력 데이터는 곡면의 x, y 축의 값이 θ, ϕ 일 때, 해당 x, y 축의 값에 해당되는 z 축의 값 tz 를 출력 데이터로 계산 한다.

4.3.1 정기구학 제어를 위한 출력 데이터 계산

응용 단계에서 제안된 정기구학 방법은 로봇 기구부의 측정 가능한 모터의 회전 각도를 사용해, 기구부의 말단에 부착된 PCU의 위치 및 자세를 계산하는 방법이다. 먼저 pan, tilt 모터의 회전 각도를 측정하고, 4.2.1에서 표현된 6개 B-spline 곡면에서 측정된 회전 값 θ, ϕ 값에 해당되는 z 축의

값 rx, ry, rz, tx, ty, tz 을 계산한다. 6개의 인수를 식 (12)과 같이 하나의 카메라 외부 파라미터 X_{wc} 로 재구성한다. 계산된 카메라 외부 파라미터를 사용해 식 (6)과 같이 프로젝터 호모그래피를 계산할 수 있다.

$$X_{wc} = \begin{bmatrix} \cos ry \cos rz & \sin rx \sin ry \cos rz - \cos ry \sin rz & \\ \cos ry \sin rz & \sin rx \sin ry \sin rz + \cos ry \cos rz & \\ -\sin ry & \sin rx \cos ry & \\ 0 & 0 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos rx \sin ry \cos rz + \sin rx \sin rz & tx \\ \cos rx \sin ry \sin rz - \sin rx \cos rz & ty \\ \cos rx \cos ry & tz \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

4.3.2 역기구학 제어를 위한 출력 데이터 계산

응용 단계에서 제안된 역기구학 방법은 프로젝터 투사 영역의 중심점을 특정 위치로 이동시키기 위한 pan, tilt 회전각을 계산하는 방법이다. 4.2.2에서 설명한 2개의 B-spline 곡면에서 목표 위치 좌표 c_x, c_y 에 해당되는 z 축의 값 θ, ϕ 를 계산한다. 계산된 pan, tilt의 회전 각도를 로봇 기구부의 관절에 적용하게 되면 프로젝터 투사영역의 중심점을 목표 위치로 이동시킬 수 있다.

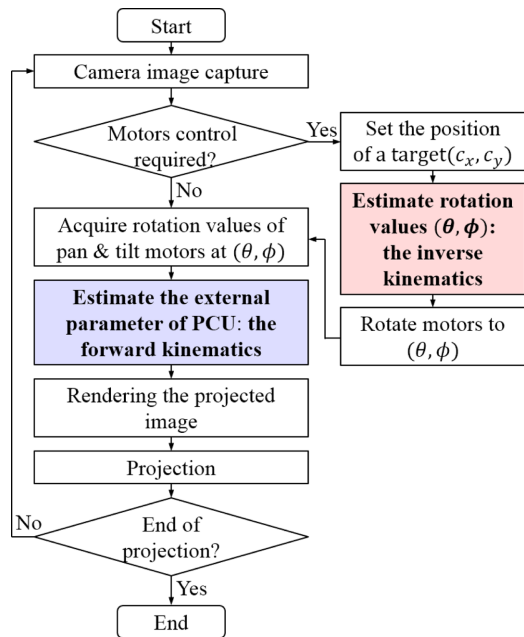


Fig. 8 Usage of the proposed methods in a typical control flow of a RSAR application

4.4 제안된 기구부 제어 방법의 적용

제안된 데이터 기반의 기구부 제어 방법을 적용한 응용 프로그램의 예를 Fig. 8에서 보인다. 목적에 따라 사용자는 로봇 기구부를 사용하여 PCU의 위치를 이동시킨다. 이동시 목표 위치는 시스템의 엔드이펙터인 프로젝터 투사 영역의 중심점을 기준으로 결정된다. 엔드이펙터가 이동하면 제안된 정기구학 방법을 사용해 PCU의 위치 및 자세를 계산한다. 계산된 프로젝터 호모그래피는 카메라로 검출한 실세계 객체의 표면에 가상의 이미지를 정합하기 위한 변환 행렬로 사용된다.

Fig. 9는 제안된 방법을 사용한 실험 결과를 보인다. 제안된 역기구학을 사용해 프로젝터 투사영역의 중심점을 기준으로 PCU의 위치를 이동시키고, 제안된 정기구학을 사용해 동일한 실세계 좌표에 투사 이미지가 정합될 수 있도록 이미지의 변환 행렬을 계산한다^[18]. (a-c)는 각각 관절의 회

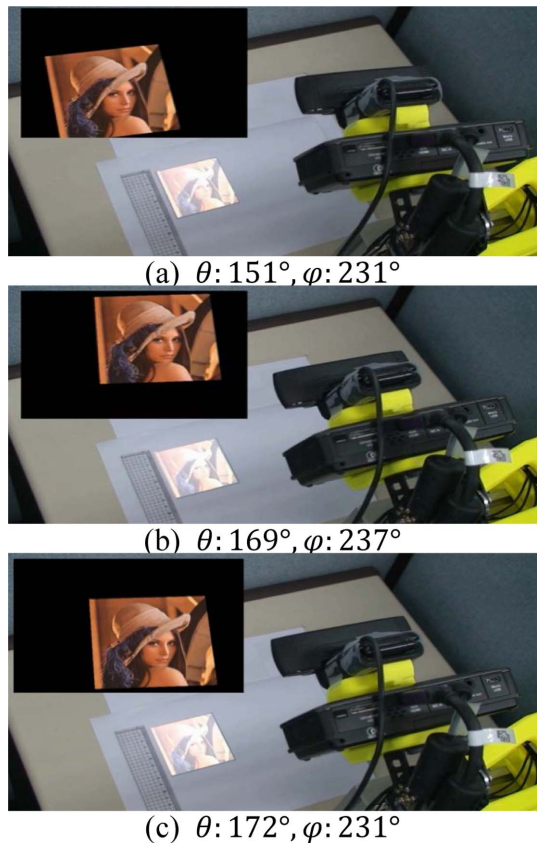


Fig. 9 An example of inverse control. For a varying center of projection (c_x, c_y) , specified by the user, joint angles are computed. Moreover, the projected image is anamorphically corrected

전각이 달라 PCU의 위치가 다르지만, 제안된 정기구학 방법으로 변환된 이미지를 투사해 실세계 좌표 기준으로 특정 위치에 고정되어 투사되는 것을 확인할 수 있다. 좌측 상단의 이미지는 프로젝터 호모그래피를 사용해 투영 변환된 프로젝터 투사 이미지이다.

5. 실험 결과

본 논문에서의 실험은 Intel® core™ i7 2.67HHz CPU, 4 GB Ram, USB 카메라 Logitech C920 해상도 640 × 480, Optoma 프로젝터 P320 해상도 1280 × 720, Robotis Dynamixel MX-28를 사용해 수행하였다. RSAR 시스템의 로봇 기구부와 평면 패턴을 지면에 고정시키고, pan 모터를 145~181°, tilt 모터를 210~246°에서 3° 간격으로 총 12 × 12 개의 샘플 데이터 세트를 취득하였다. 3 × 3차의 B-spline 곡면을 정기구학 제어를 위해 6개, 역기구학 제어를 위해 2개 이용하였다.

5.1 제안된 정기구학 방법의 실험결과

제안된 정기구학 방법의 정확도 측정을 위해 pan, tilt 모터의 회전 간격을 1°로 설정하고, 각각의 모터를 회전하면서 카메라 캘리브레이션과 제안된 정기구학을 수행하여 참조 데이터를 얻었다. 카메라 캘리브레이션 결과와 제안된 방법으로 계산된 카메라 외부 파라미터의 RMSE(Root Mean Square Error)를 비교하였다. B-spline 곡면 표현시 제어점의 개수를 5²~11²로 조정하였다. RMSE 계산시 카메라 외부 파라미터 행렬을 6개의 인수로 분해해 비교하였다. Table 4는 B-spline 곡면의 제어점 개수에 따른 RMSE 결과를 보인다. Fig. 10(a)은 Table 4의 *rx*, *ry*, *rz*를 Fig. 10(b)는 *tx*, *ty*, *tz*를 그래프로 표현한 것이다. 제어점의 개수가 증가할수록 RMSE가 감소하지만, 8 × 8를 기점으로 RMSE가 오히려 증가함을 확인할 수 있다.

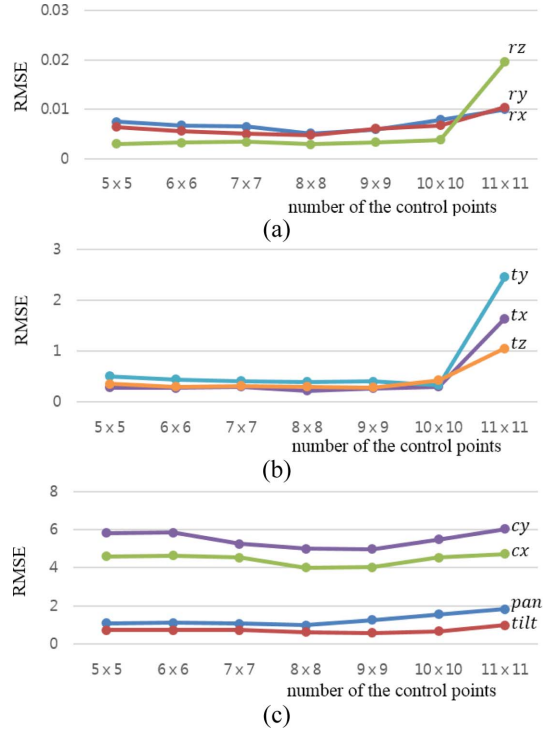


Fig. 10 Plots of RMS errors: (a) rotation factors of forward kinematics, (b) translation factors of forward kinematics, (c) inverse kinematics

5.2 제안된 역기구학 방법의 실험결과

5.1과 동일한 조건으로 pan, tilt 모터를 특정 간격으로 회전하면서 카메라 캘리브레이션을 수행하고 프로젝터 외부 파라미터를 계산하였다. 프로젝터의 외부 파라미터 값을 사용해 투사영역의 중심점 *cx*, *cy*를 계산하고, 제안된 역기구학 방법을 사용해 중심점에 해당되는 pan, tilt 모터의 회전 각도를 추정하였다. 그리고 계산된 회전 각도로 pan, tilt 모터를 회전시킨 이후에 다시 카메라 캘리브레이션을 수행해 *cx*, *cy*를 계산하였다.

최초 카메라 캘리브레이션 수행 위치의 pan, tilt 모터의 회전각과 제안된 역기구학 방법의 결과인

Table 4 RMSE of the proposed forward kinematics

Numbers of control points	Extrinsic Parameter					
	<i>rx</i>	<i>ry</i>	<i>rz</i>	<i>tx</i>	<i>ty</i>	<i>tz</i>
(5, 5)	0.0075	0.0064	0.0030	0.2809	0.5041	0.3583
(7, 7)	0.0065	0.0050	0.0034	0.2961	0.4071	0.3116
(9, 9)	0.0059	0.0061	0.0033	0.2712	0.3988	0.2841
(11, 11)	0.0100	0.0104	0.0196	1.6383	2.4541	1.0551

Table 5. RMSE of the proposed inverse kinematics

Numbers of control points	Rotation error (°)		Distnace error (mm)	
	<i>pan</i>	<i>tilt</i>	<i>cx</i>	<i>cy</i>
(5, 5)	1.0979	0.7359	4.6018	5.8193
(7, 7)	1.0710	0.7310	4.5412	5.2583
(9, 9)	1.2512	0.5837	4.0365	4.9863
(11, 11)	1.8374	0.9891	4.7327	6.0415

모터 회전각의 RMSE를 비교하였다. 또한 *pan*, *tilt* 모터 이동 전 계산된 *cx*, *cy*와 제안된 역기구학 방법의 결과대로 *pan*, *tilt* 모터 이동 후 계산된 *cx*, *cy*의 RMSE를 비교하였다. B-spline 생성시 제어점의 개수를 $5^2 \sim 11^2$ 로 조정하여 결과를 비교하였다. 표5는 B-spline 곡면의 제어점 개수에 따른 RMSE 결과를 보인다. *pan*, *tilt* 모터의 오차에 따른 *cx*, *cy*의 거리 오차가 비교적 크지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 10(c)은 Table 5의 결과를 그래프로 표현한 것이다. 제어점 개수가 8×8 일 때 가장 낮은 RMSE 결과를 확인할 수 있다.

6. 결 론

로봇 기구부 제어 방법은 CAD 모델 기반으로 제작되어 로봇 기구부의 링크 및 관절의 기하학 정보를 사용한다. 최근 주목받는 미니멀리즘 기반의 UCR의 경우 CAD 모델이 없는 경우가 많고, CAD 모델 기반으로 제작되었다더라도 조립 오차가 커서 로봇의 링크 정보를 정확히 측정하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 UCR 기반의 RSAR 시스템을 위한 데이터 기반의 기구부 제어 방법을 제안하였다.

제안된 데이터 기반의 기구부 제어 방법은 먼저 기구부의 관절을 특정 구간에서 회전시켜 샘플 데이터 세트를 취득한다. 그리고 취득한 샘플 데이터 세트를 각각 정기구학과 역기구학 방법에 맞게 출력과 입력 데이터로 배열한뒤 B-spline 곡면으로 표현한다. 응용 단계에서 기구학을 위한 출력 데이터를 추정하는 방법은 먼저 입력 데이터를 측정하고, B-spline 곡면으로 표현된 데이터로부터 출력 데이터를 계산한다. 출력 데이터를 사용해 엔드이펙터의 위치를 계산하는 정기구학이나 엔드이펙터를 목표 위치로 옮기는 역기구학을 수행한다.

제안된 방법은 UCR 기반의 다양한 RSAR 시스템에서 사용될 수 있다. 이전 연구^[13]의 경우, PCU

의 위치가 변경될 때마다 카메라 캘리브레이션 수행이 요구되었다. 하지만 이전 연구와 달리 제안된 방법은 미리 취득한 데이터와 실시간 측정이 가능한 관절 정보만을 사용하기 때문에 수행 속도와 사용자 편의성 측면에서 장점을 갖는다.

제안된 방법은 샘플 데이터 세트를 취득한 관절의 회전 반경 영역 내에서만 사용이 가능하다는 단점을 갖는다. 또한 관절 회전각에 따라 출력 데이터가 중복되지 않는 상황에서만 사용이 가능하다. 관절이 3개 이상일 경우, 관절의 회전각들이 달라도 엔드이펙터가 동일한 위치에 있는 경우가 발생할 수 있다. 때문에 본 논문에서는 관절의 회전각에 따라 엔드이펙터의 위치가 중첩되지 않도록, 2개의 관절이 *pan*, *tilt* 방향으로 구성된 시스템으로 환경을 제한하였다.

차후 연구에서는 제안된 기구부 제어 방법의 출력 데이터 오차를 줄이고, 다축의 로봇 팔에 제안된 방법을 적용할 것이다. 또한 협소한 동작 영역 문제를 개선하기 위하여, 샘플 데이터 취득 시 두 개 이상의 평면 패턴을 사용하는 연구도 추가될 것이다. 그리고 제안된 방법을 적용한 UCR 기반의 RSAR 시스템에서의 다양한 응용을 통해 효용성을 검증할 계획이다.

References

1. Lee, J.H., Kim, H., Suh, Y.H. and Cho, J., 2011, Issues in Control of a Robotic Spatial Augmented Reality System, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 16(6), pp.437-448.
2. Lee, J.-H., Maegawa, K., Park, J.-S. and Lee, J.-H., 2012, Calibration Issues in FRC: Camera, Projector, Kinematics Based Hybrid Approach, *In Proc. URAL*, pp.218-219.
3. Lee, J.-H., 2012, An Analytic Solution to Projector Pose Estimation Problem, *ETRI Journal*, pp.978-981.
4. Lee, J.-H., 2012, Camera Calibration from a Single Image based on Coupled Line Cameras and Rectangle Constraint, *In Proc. ICPR 2012*, pp.758-762.
5. Lee, J.H., Maegawa, K., Iwamoto, K., Park, J., Lee, J.H. and Kim, H., 2013, FRC Based Augment Reality for Aiding Cooperative Activities. *In RO-MAN, IEEE*, pp.294-295.
6. Corke, P., 2011, *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*, Springer.
7. Bimber, O. and Raskar, R., 2005, *Spatial Aug-*

- mented Reality: Merging Real and Virtual Worlds, *AK Peters*.
8. Lee, J. H., 2014, Trends in Projector-based User Interaction Techniques, *CAD/CAM Review*, 20(1), pp.8-13.
 9. Martinez Plasencia, D., Knibbe, J. and Haslam, A.D., 2014, ReflectoSlates: Personal Overlays for Tabletops Combining Camera-projector Systems and Retroreflective Materials, *CHI'14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. ACM*. pp.2071-2076.
 10. Laviolle, J. and Hachet, M., 2012, Spatial Augmented Reality to Enhance Physical Artistic Creation, *Adjunct Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology. ACM*. pp.43-46.
 11. Huber, J., Steimle, J., Liao, C. and Liu, Q., 2012, LightBeam: Nomadic Pico Projector Interaction with Real World Objects, *CHI'12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. ACM*. pp.2513-2518.
 12. Kim, T., Jang, J. and Park, J., 2013, The Journey of a White Rhinoceros: Sculpture Augmentation for Gallery Exhibition, *Mixed and Augmented Reality-Arts, Media, and Humanities (ISMAR-AMH), IEEE International Symposium on. IEEE*. pp.39-43.
 13. Dancu, A., Franjic, Z. and Fjeld, M., 2014, Smart Flashlight: Map Navigation Using a Bike-mounted Projector, *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM*. pp.3627-3630.
 14. Morishim, S., Mashita, T., Kiyokawa, K. and Takemura H., 2012, A Waist-mounted ProCam System for Remote Collaboration, *Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2012 IEEE International Symposium on. IEEE*. pp.301-302.
 15. Itzstein, G.S.V., Thomas, B.H. and Smith, R.T., 2011, Using Spatial Augmented Reality for Appliance Design, *Pervasive Computing and Communications Workshops, IEEE International Conference on*, pp.316-318.
 16. Jones, B.R., Benko, H., Ofek, E. and Wilson, A.D., 2013, IllumiRoom: Peripheral Projected Illusions for Interactive Experiences, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM*. pp.869-878.
 17. Linder, N. and Maes, P., 2010, LuminAR: Portable Robotic Augmented Reality Interface Design and Prototype, *Adjunct Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. ACM*. pp.395-396.
 18. Lee, A., Suh, J.D. and Lee, J.H., 2013, Interactive Design of Planar Curves Based on Spatial Augmented Reality. *In Proceedings of the Companion Publication of the 2013 International Conference on Intelligent User Interfaces Companion, ACM*, pp.53-54.
 19. Park, I.-W. and Kim, J.-O., 2011, Philosophy and Strategy of Minimalism-based User Created Robots (UCRs) for Educational Robotics-education, Technology and Business Viewpoint, *International Journal of Robots, Education and Art* 1.1, pp.26-38.
 20. Zhang, Z., 2000, A Flexible New Technique for Camera Calibration. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 22(11), pp.1330-1334.
 21. Tsai, R.Y., 1987, A Versatile Camera Calibration Technique for High-accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 3(4), pp.323-344.
 22. Shoemake, K., 1994, Euler Angle Conversion. *Graphics Gems IV*, pp.222-229.
 23. Farin, G., 2001, Curves and Surfaces for CAGD, 5th Ed., *Morgan Kaufmann*.
 24. Park, H.J. and Lee, J.H., 2006, B-spline Curve Approximation Based on Adaptive Selection. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 11(1), pp.1-10.



이 아 현

2008년 광운대학교 미디어영상학부
학사
2011년 중앙대학교 첨단영상대학원
영상공학 석사
2011년~2012년 LG전자 모니터연
구소
2012년~현재 과학기술연합대학원
대학교 컴퓨터소프트웨어전공
박사과정
관심분야: Computer Vision,
Augmented Reality, Pro-cam
System



이 주 행

1994년 포항공과대학교 전자계산
학과 학사
1996년 포항공과대학교 전자계산
학과 석사
1999년 포항공과대학교 전자계산
학과 박사
1999년~현재 한국전자통신연구원
융합기술연구소 책임연구원
2008년~현재 과학기술연합대학원대
학교 컴퓨터소프트웨어전공 부
교수
관심분야: Geometric Modeling and
Processing, Computer Graphics,
HCI, Computer Vision, Robotics



이 주 호

1993년 고려대학교 전기공학과 학사
1995년 고려대학교 전기공학과 공
학석사
1999년 University of Tokyo 공학계
연구과 전자정보전공 공학박사
관심분야: Intelligent Space,
Intelligent Robot, HRI, Computer
Vision, Machine Learning