

# 컴퓨터 기반 수술시 환부표시를 위한 직접투사형 증강현실 인터페이스

서병국, 강갑철, 박종일

한양대학교 전자통신컴퓨터공학과

## Direct-Projected Augmented Reality Interface for Marking Surgical Targets in Computer Aided Surgery

Byung-Kuk Seo, Gap-Chul Kang, Jong-Il Park

Department of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University

(Received August 17, 2007. Accepted October 19, 2007)

### Abstract

Up to now, surgeons have operated while peering at images which visualize the medical state of the patient such as MRI or CT images. On the other hand, direct-projected augmented reality technology liberates surgeons from the inconvenience by directly projecting medical information onto the patient's body. However surgeons still feel inconvenient when they mark surgical targets for planning an operation because they use an ink pen which is difficult to modify or delete and is also likely to be unsanitary. In this paper, we resolve these problems by proposing an interactive user interface based on direct-projected augmented reality technology and its validity is shown in experimental results.

Key words : direct-projected augmented reality, projector-camera system, computer aided surgery

### 1. 서론

비디오 투시형(video see-through) 또는 광학 투시형(optical see-through) HMD(head mounted display)처럼 증강현실(augmented reality) 기술을 구현하기 위해 사용해 왔던 기존의 디스플레이 장비들은 사용자가 직접 착용해야 하는 불편함이 있었다. 이런 문제점을 해결하기 위해 3차원의 실세계 공간에 현실성을 강조한 가상의 정보를 직접 투사하는 직접투사형(direct-projected) 증강현실 기술이 제안되었다 [1, 2]. 최근 들어 프로젝터 장비가 널리 보편화됨에 따라 직접투사형 증강현실에 대한 관심이 크게 증대되고, 관련된 기반 기술들도 많이 발전하게 되었는

데, 특히 대표적인 문제점으로 지적되어 왔던 스크린의 형태에 따른 기하학적, 광학적 투사 영상 왜곡에 대한 다양한 보상 기술들 [3, 4, 5, 6, 7, 8]은 직접투사형 증강현실 기술의 응용 범위를 넓힐 수 있는 원동력이 되었다.

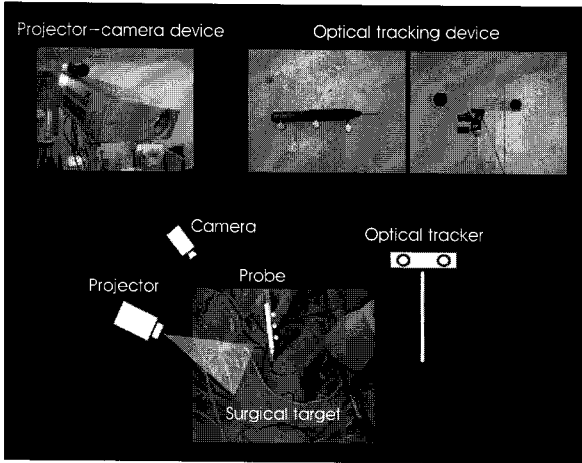
지금까지 직접투사형 증강현실 기술은 주로 인터랙티브(interactive) 시스템에 응용되어 왔다. Bérard [9]와 Rekimoto 등 [10]은 다중 사용자 간의 상호협력이 가능한 증강현실 공간을 제안하였다. 그리고 사용자와 시스템 간의 상호작용을 향상시키기 위해서 Kjeldsen 등 [11]은 사전에 정의된 인터랙티브한 메뉴를, Oka 등 [12]은 손가락 끝과 손동작을 실시간으로 인식하는 방법을 제안하였다. 또한 Zaeh 등 [13]은 직접투사형 증강현실 기술을 사용하여 산업용 로봇을 위한 인터랙티브 시스템을 제안하기도 하였다.

Grimson 등 [14]은 직접투사형 증강현실 기술을 수술용 네비게이션(navigation) 시스템에 적용하고 몸 속 뼈의 구조 영상을 환부에 중첩시켜 시각적 현실감을 높임으로써 의학 분야에서 직접투사형 증강현실 기술의 응용 가능성을 보여주었다. 본 논문에서는 의

본 연구는 보건복지부 보건의료기술진흥사업의 지원에 의하여 이루어진 것임 (02-PJ3-PG6-EV04-0003).

Corresponding Author : 박종일  
(133-791) 서울시 성동구 행당1동 한양대학교 공업센터 본관 304호  
가상현실 연구실

Tel : 02-2299-7820 / Fax : 02-2299-7820  
E-mail : jipark@hanyang.ac.kr



**그림 1.** 시스템은 기하학적 관계를 규명하기 위한 프로젝터-카메라 장치와 프로브의 위치와 방향을 실시간으로 추적하는 광추적 장치로 구성된다.

**Fig. 1.** A system consists of a projector-camera device for estimating relative geometry and an optical tracking device for measuring the position and orientation of a probe in real-time.

학 분야에서의 새로운 응용으로서, 직접투사형 증강현실 기술을 이용하여 컴퓨터 기반의 수술 시스템을 위한 사용자 인터페이스(interface)를 제안하고자 한다. 제안된 시스템은 수술시 환부를 표시하기 위해 사용되는 잉크펜을 대체하고 환부를 표시하는 가상의 영상을 환부에 직접 투사함으로써, 잉크펜을 사용하는 것보다 수정 및 삭제가 용이하고 위생적이며, 수술에 필요한 의료 정보나 수술 시스템을 제어할 수 있는 기능도 부여할 수 있기 있기 때문에 사용자와 시스템 간의 상호작용을 향상시킬 수 있다.

## II. 방법

### A. 시스템 구조

전체적인 시스템은 크게 프로젝터-카메라 장치와 광추적 장치로 구성된다(그림 1 참조). 프로젝터-카메라 장치는 실세계의 3차원 정보를 프로젝터와 카메라의 2차원 영상 정보를 이용하여 획득함으로써, 서로 간의 기하학적 관계들을 규명한다. 광추적 장치는 프로브의 위치와 방향을 실시간으로 추적한다. 특히 적외선 센서들을 이용하기 때문에 수술 조명의 영향을 적게 받으면서 정확하고 안정적으로 프로브를 추적할 수 있다.

### B. 시스템 캘리브레이션

서로 독립적인 좌표계를 가지고 있는 프로젝터, 카메라 그리고 광추적 장치를 캘리브레이션하기 위해서 평면의 격자패턴을 이용하고 서로 다른 좌표계들의 기준 좌표계로 정의한다. 카메라 캘리브레이션은 가장 대표적인 방법인 Zhang's calibration method [15]를 이용한다. 프로젝터는 핀-홀(pin-hole) 카메라 모델의 역투사 모델로 생각할 수 있기 때문에 수정된 Zhang's calibration

method [4]를 이용한다. 광추적 장치는 격자패턴 좌표계의 기준 벡터를 프로브를 사용하여 인위적으로 정의해 줌으로써 캘리브레이션이 이루어진다. 이 모든 과정은 초기에 한번 실시되며, 각 과정마다 격자패턴의 상태는 변하지 않고 모두 동일하다.

### C. Structured light 기술

3차원의 표면을 재구성하기 위해서는 우선 카메라 영상과 프로젝터 입력영상 간의 대응관계를 먼저 알아야 한다. 즉, 카메라 영상에서의 한 픽셀이 프로젝터 입력영상에서 어느 픽셀에 위치하는지를 규명하는 것을 말하는데 이런 대응관계는 structured light 기술을 통해 쉽게 찾을 수 있다.

Salvi 등 [16]은 부호화 되는 방식에 따라 다양한 structured light 기술들을 분류하였는데, 본 논문에서는 프로젝터를 이용해 3차원 표면 위로 일정한 패턴들을 순차적으로 투사하고 카메라를 이용해 캡처하는 temporal coding 방식을 사용한다. 이 방식에서 카메라에 캡처된 영상과 프로젝터를 통해 투사될 입력영상의 모든 픽셀들은 각각 고유의 부호(codeword)를 가지게 되고 이를 통해 추가적인 제약(constraint) 없이도 서로 간의 대응관계를 쉽고 명확하게 규정할 수 있다.

### D. 3차원 재구성

본 논문에서 3차원 재구성이라 함은 주어진 카메라의 기하관계와 프로젝터의 기하관계를 만족하는 3차원 표면의 한 점의 좌표를 구하는 것을 말하고, 이는 선형 삼각 방법(linear triangulation method) [17]을 이용하여 구한다. 따라서 선형 삼각 방법을 함수  $\tau$ 라 하면, 3차원 재구성 문제는 다음의 관계식을 만족하는 3차원 상의 점들의 좌표를 구하는 것이 된다.

$$X = \tau(x_c, x_p, P_c, P_p) \tag{1}$$

여기서  $x_c$ 는 카메라 영상의 한 점을,  $x_p$ 는 프로젝터 입력영상의 한 점을, 그리고  $P_c$ 와  $P_p$ 는 각각 카메라와 프로젝터의 프로젝션 행렬을 나타내며,  $X$ 는 3차원 표면상의 한 점을 나타낸다. 식 (1)의 미지수들 중에서 카메라 프로젝션 행렬  $P_c$ 와 프로젝터 프로젝션 행렬  $P_p$ 는 캘리브레이션을 통해, 카메라 영상과 프로젝터 입력영상 간의 대응관계  $x_c \leftrightarrow x_p$ 는 structured light 기술을 통해 구해진다.

3차원 표면과 2차원의 카메라-, 프로젝터-영상 간의 관계는 각각 식 (2)과 같이 표현되고,

$$x_c = P_c X, \quad x_p = P_p X \tag{2}$$

카메라 영상과 3차원 표면 간의 관계는  $x_c \times (P_c X) = 0$  이므로, 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} x(p_c^{3T}X) - (p_c^{1T}X) &= 0 \\ y(p_c^{3T}X) - (p_c^{2T}X) &= 0 \\ x(p_c^{2T}X) - y(p_c^{1T}X) &= 0 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서  $x_c = \{x, y, z\}$ ,  $X = \{X, Y, Z, W\}$  이고  $P_c^{iT}$ 는  $P_c$ 의 행을 나타낸다. 프로젝터 입력영상과 3차원 표면 간의 관계는 이와 동일한 방법으로 나타낼 수 있으며, 아래의 식 (4)의 형태로 정리할 수 있다.

$$AX = 0, \quad A = \begin{bmatrix} xp_c^{3T} - p_c^{1T} \\ yp_c^{3T} - p_c^{2T} \\ x'p_p^{3T} - p_p^{1T} \\ y'p_p^{3T} - p_p^{2T} \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서  $x_p = \{x', y', z'\}$ ,  $X = \{X, Y, Z, W\}$ 이고  $P_p^{iT}$ 는  $P_p$ 의 행을 나타낸다. 따라서 3차원 표면은 식 (4)의 해집합으로 결정된다. 여기서 실제 계산에 필요한 영상데이터가 잡음을 포함하고 있기 때문에 식(4)의 최적해를 구하기 위해 Linear Eigen Method를 사용하고, Singular Value Decomposition(SVD)을 이용해 계산한다.

### E. 경로 영상(Trajectory Image)

직접투사 증강현실을 이용해 환부를 표시한다는 것은 환부를 따라 움직인 프로브의 경로 영상을 환부 위치에 직접 투사하는 것을 말한다. 환부의 경로는 프로브가 가리키고 있는 방향의 직선(ray)과 재구성된 3차원 표면의 삼각형 메시(mesh)와의 교점들의 집합이라고 생각할 수 있다 (그림 2 참조). 교점을 구하기 위해 사용한 알고리즘 [18]은 다음의 두 가지 과정으로 수행된다. 우선 프로브가 가리키고 있는 방향벡터의 직선과 삼각형 메시와의 교점을 구하고, 다음으로 그 교점이 삼각형 메시의 내부에 존재하는지를 판단하게 된다.

먼저, 프로브의 방향벡터를 가지는 임의의 직선을 식 (5)와 같이 정의한다.

$$r(t) = O + \vec{D}t \tag{5}$$

여기서  $O$ 는 직선의 원점을,  $\vec{D}$ 는 직선의 방향벡터를, 그리고  $t$ 는 직선 위의 임의의 점을 나타낸다. 삼각형 메시는 구분적 평면 (piecewise planar)으로 구성되어 있기 때문에 임의의 평면의 방정식으로 나타낼 수 있으며, 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{N} \cdot p + d &= 0, \\ \text{where } \vec{N} &= \vec{V}_0 \vec{V}_1 \times \vec{V}_0 \vec{V}_2, \quad d = -\vec{V}_0 \cdot \vec{N} \end{aligned} \tag{6}$$

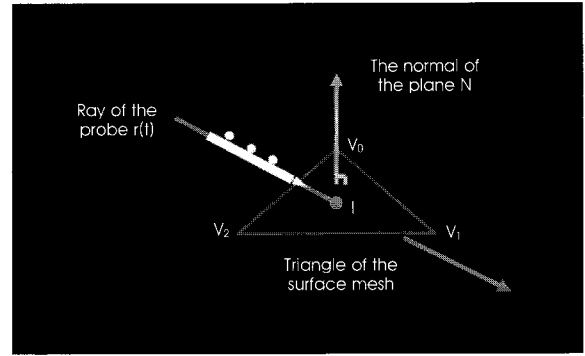


그림 2. 프로브의 경로 영상은 프로브가 가리키는 방향의 직선과 삼각형 메시의 교점들의 집합이라고 생각할 수 있다.

Fig. 2. Trajectory images of a probe can be considered as a set of intersection points of a ray and triangles of a surface mesh.

여기서  $p$ 는 평면 위의 임의의 한 점을,  $\vec{N}$ 는 평면의 법선벡터를, 그리고  $d$ 는 상수를 나타낸다. 따라서 프로브가 가리키는 방향으로의 직선과 삼각형 메시와의 교점은 식 (7)로 구할 수 있다.

$$I = -\frac{d + \vec{N} \cdot O}{\vec{N} \cdot \vec{D}} \tag{7}$$

단, 다음의 3가지 경우는 제외한다: (1)  $\vec{N} \cdot \vec{D} = 0$ , (2)  $I \leq 0$ , (3)  $I \geq t_{ray}$ .

다음으로, 구해진 교점이 삼각형 메시의 내부에 존재하는지에 대해서 판단을 해야 한다. 식 (7)에서 구해진 교점  $I$ 는 식 (8)과 같이 삼각형 메시의 정점들(vertices)로 표현할 수 있으며,

$$\vec{V}_0 I = \alpha \vec{V}_0, \vec{V}_1 + \beta \vec{V}_0, \vec{V}_2 \tag{8}$$

계수  $\alpha, \beta$ 는 식 (9)의 방정식들로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_p - x_0 &= \alpha(x_1 - x_0) + \beta(x_2 - x_0) \\ y_p - y_0 &= \alpha(y_1 - y_0) + \beta(y_2 - y_0) \\ z_p - z_0 &= \alpha(z_1 - z_0) + \beta(z_2 - z_0) \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 각 점들은  $I_0 = \{x_p, y_p, z_p\}$ ,  $V_0 = \{x_0, y_0, z_0\}$ ,  $V_1 = \{x_1, y_1, z_1\}$ ,  $V_2 = \{x_2, y_2, z_2\}$ 이다. 이때, 구해진 계수들이  $\alpha \geq 0, \beta \geq 0, \alpha + \beta \leq 1$ 를 만족할 경우 교점  $I$ 는 삼각형 메시 내부에 존재한다고 말할 수 있다. 따라서 프로브의 경로 영상은 위의 과정을 통해 구해진 교점들을 워핑(warping)함으로써 구해진다.

### III. 실험 결과

실험 환경은 DLP 프로젝터(TOSHIBA, TDP-T350), 카메라

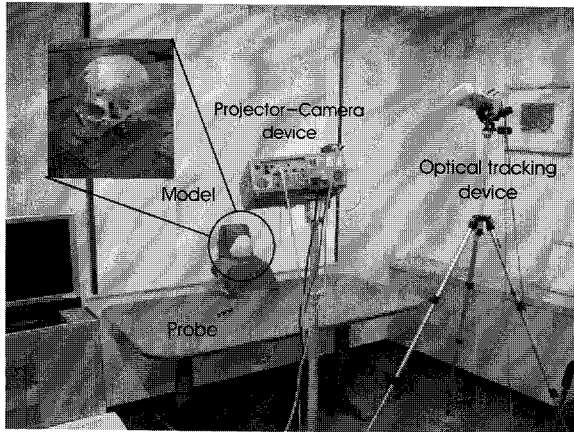


그림 3. 실험 환경과 실험에 사용된 머리 모형  
 Fig. 3. Experimental environment and a phantom of head

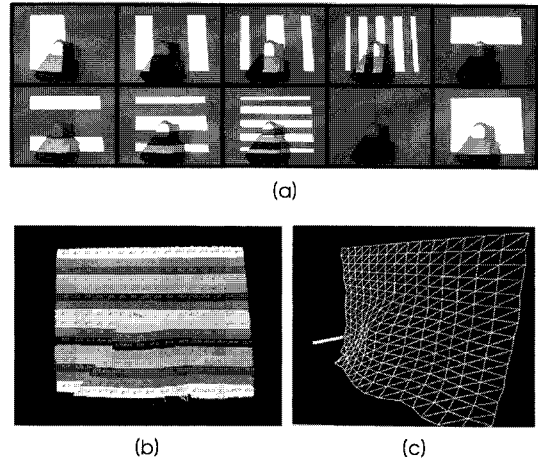


그림 4. (a) 순차적으로 투사된 패턴영상들을 캡처한 카메라 영상들, (b) 16x16 부호맵, (c) 재구성된 3차원 표면의 삼각형 메시 모델  
 Fig. 4. (a) Images captured by a camera while patterns are sequentially projected by a projector, (b) 16 by 16 codeword map, (c) A triangular mesh of a reconstructed 3-D surface

(Prosilica, EC655C), 광추적 장치(NDI, hybrid position sensor), 프로브(Traxtal Technologies, HP005 serie)로 구성하였다 (그림 3 참조). 광추적 장치의 측정 불륨은 모델을 중심으로 설정되었으며, 광추적 장치의 위치 센서의 측정 오차는 0.350mm 이내였다. 단, 위치 추적의 정확성과 안정성을 보장하기 위해서 프로브는 설정된 광추적 장치의 측정 범위 안에 놓여 있어야 하며, 프로브에 부착된 마커는 어떠한 물체에 의해서도 가려져서는 안 됨을 주의해야 한다. 본 논문에서는 머리 모형(phantom of head)을 사용하여 실험하였고, 실제 뇌수술 환경과 유사한 조건을 만들기 위해 환부를 제외한 나머지 부분은 수술포를 이용해 가려서 사용하였다.

그림 4는 머리 모형의 3차원 재구성 과정을 보여준다. 프로젝터를 이용해 이진 부호(0,1)로 할당된 패턴영상들을 순차적으로 투사한 후, 카메라로 획득된 영상의 각 픽셀에서의 부호를 정렬해 보면, 00000000~11111111까지 유일한 부호값들을 가지게 되고, 이는 그림 4-(b)와 같이 16x16의 부호맵 형태로 표현되었다. 또한, 동일한 부호값을 가지는 픽셀의 중심값(centroid)을 구하여 그림 4-(c)와 같은 삼각형 메시 형태로 나타내었다. 카메라 영상과 프로젝터 입력영상 간의 대응관계는 이런 부호관계를 이용해 정의하였고, 선형 삼각 방법을 이용해 머리 모형의 3차원 표면을 재구성하였다.

그림 5-(b~e)는 제안된 시스템을 사용하여 환부를 표시한 결과를 보여준다. 프로브의 방향 벡터는 실시간으로 추적되는 프로브의 좌표에 의해 구해졌고, 재구성된 3차원 표면의 삼각형 메시와 의 교점들을 워핑하여 구해진 경로 영상은 프로브가 움직이는 경로를 따라 실시간으로 정확히 투사되었다. 단, 실험에 사용된 머리 모형이 실제 뇌수술 환경에서 잉크펜을 이용해 환부를 표시하는 사례(그림5-(a))와 비교를 위해 사용하였기 때문에 그림 4-(c)에서

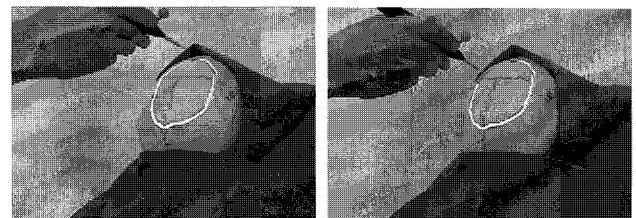


(a)



(b)

(c)



(d)

(e)

그림 5. (a) 실제 수술시 잉크펜을 이용한 환부 표시 영상, (b~e) 제안한 시스템을 이용한 환부 표시 영상 (순서는 시계방향임)  
 Fig. 5. (a) Marking onto a human head using an ink pen, (b~e) Marking onto a phantom of head using proposed system (The procedure is on clockwise)

보듯이 프로젝터의 전체 투사영역에서 머리 모형이 차지하는 영역이 작아서 삼각형 메시의 개수가 충분하지 않았다. 하지만, 실제 환부를 표시하는 행위 자체가 고정밀도를 요구하는 것이 아니고, 또한 사람의 몸은 대부분 완만한 곡선으로 이루어진 3차원 표면이기 때문에 본 논문에서 제안한 시스템이 기존의 잉크펜을 사용한 환부표시 방법의 문제점들을 해결하고 사용자에게 편의를 제공하는 데 어려움이 없었다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 의사가 수술시 환부를 표시하기 위해 사용해 왔던 잉크펜의 문제점들을 해결하기 위해 직접투사형 증강현실 기술을 이용한 사용자 인터페이스를 제안하고 실험적인 결과로 그 유용함을 검증하였다. 프로젝터-카메라 장치와 광추적 장치를 사용하여 환부의 3차원 표면을 재구성하고 환부를 표시하기 위한 프로브 경로 영상을 환부에 정확히 투사할 수 있었다. 또한 검증된 실험적 결과들을 통해 본 논문에서 제안한 시스템이 컴퓨터 기반의 수술을 위해 다양하게 응용될 수 있음을 확인하였다. 하지만, 시스템의 상호작용을 보다 향상시키기 위해서는 시스템의 디자인 측면에서 의사의 불필요한 행위를 최소화하는 방안도 고려해야 하겠다. 현재 이 시스템을 통합형 지능형 수술 시스템으로 발전시키기 위한 임상 실험을 진행 중에 있다.

#### 참고문헌

- [1] O. Bimber and R. Raskar, *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*, A K Peters Ltd, 2005.
- [2] R. Sukthankar, R.G. Stockton, and M.D. Mullin, "Smarter presentations: Exploiting homography in camera-projector systems," in *Proc. ICCV*, Nov. 2001, pp. 247-253.
- [3] H. Park and J.-I. Park, "Modern approaches to direct-projected augmented reality: A review," in *Proc. ISUVR*, Jul. 2006, pp. 113-114.
- [4] H. Park, M.-H. Lee, S.-J. Kim, and J.-I. Park, "Surface-independent direct-projected augmented reality," in *Proc. ACCV*, Jan. 2006, pp. 892-901.
- [5] H. Park, M.-H. Lee, B.-K. Seo, and J.-I. Park, "Undistorted projection onto dynamic surface," in *Proc. PSIVT*, Dec. 2006, pp. 582-590.
- [6] O. Bimber, A. Emmerling, and T. Klemmer, "Embedded entertainment with smart projectors," *IEEE Computer*, vol. 38, pp. 48-55, Jan. 2005.
- [7] S.K. Nayar, H. Peri, M.D. Grossberg, and P.N. Belhumeur, "A projection system with radiometric compensation for screen imperfections," in *Proc. Workshop on PROCMAS*, Oct. 2003.
- [8] A. Grundhöfer and O. Bimber, "Real-time adaptive radiometric compensation," in *Proc. SIGGRAPH*, 2006.
- [9] F. Bérard, "The magic table: Computer-vision based augmentation of a whiteboard for creative meetings," in *Proc. Workshop on PROCMAS*, Oct. 2003.
- [10] J. Rekimoto and M. Saitoh, "Augmented surfaces: A spatially continuous work space for hybrid computing environments," in *Proc. SIGCHI*, May. 1999, pp. 378-385.
- [11] R. Kjeldsen, A. Levas, and C. Pinhanez, "Dynamically reconfigurable vision-based user interface," *J. Machine Vision and Applications*, vol. 16, no 1, pp. 6-12, 2004.
- [12] K. Oka, Y. Sato, and H. Koike, "Real-time tracking of multiple fingertips and gesture recognition for augmented desk interface systems," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 22, no. 6, pp. 64-71, Nov. 2002.
- [13] M.F. Zaeh and W. Vogl, "Interactive laser-projection for programming industrial robots," in *Proc. ISMAR*, Oct. 2006, pp. 125-128.
- [14] W.E.L. Grimson, G.J. Ettinger, S.J. White, T. Lozanoperez, W.M. Wells, and R. Kikinis, "An automatic registration method for frameless stereotaxy, image guided surgery, and enhanced reality visualization," *Transactions on Medical Imaging*, vol. 15, no 2, pp. 129-140, Apr. 1996.
- [15] Z. Zhang, "Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations," in *Proc. ICCV*, Sep. 1999, pp. 666-673.
- [16] J. Salvi, J. Pagès, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems," *Pattern Recognition*, vol. 37, no 4, pp. 827-849, Dec. 2004.
- [17] R. Hartely and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, 2003.
- [18] D. Badouel, "An efficient ray-polygon intersection," *Graphics Gems*, e.d. A.S. Glassner, Academic Press, 1990.