

스테레오 카메라로부터 실시간 가상 착용을 위한 발동작 검출

정다운^{*}, 윤용인^{**}, 최종수^{***}

요 약

본 논문에서는 스테레오 카메라로부터 신체 중 발의 3차원 가상 모델을 실시간으로 합성할 수 있도록 동작을 검출하는 새로운 방법을 제안한다. 발에 가상 모델을 같은 위치에 합성하려면 관절의 움직임을 일정하게 추적하는 움직임 검출 과정이 필수적이다. 복잡한 움직임 속에서의 정확한 정합 이 기술이 해결해야 할 가장 중요한 문제이다. 본 논문에서는 두 가지 형태의 마커 그룹을 사용한 동적 정합을 제안한다. 바닥의 평면 정보는 발과 3차원 가상 발 모델의 관계를 조정하고 발의 자세와 위치를 측정한다. 발의 회전은 발등의 중심 골격에 따라 부착한 두 개의 마커(Marker) 그룹을 사용하여 추정했다. 이 논문에서는 제안한 시스템을 직접 구현하고, 다양한 실험을 통해 시스템에 적용된 각 알고리즘의 정확도를 측정했다.

Capture of Foot Motion for Real-time Virtual Wearing by Stereo Cameras

Da Un Jung^{*}, Yong-In Yun^{**}, Jong-Soo Choi^{***}

ABSTRACT

In this paper, we propose a new method detecting foot motion capture in order to overlap in real-time foot's 3D virtual model from stereo cameras. In order to overlap foot's virtual model at the same position of the foot, a process of the foot's joint detection to regularly track the foot's joint motion is necessary, and accurate register both foot's virtual model and user's foot in complicated motion is most important problem in this technology. In this paper, we propose a dynamic registration using two types of marker groups. A plane information of the ground handles the relationship between foot's virtual model and user's foot and obtains foot's pose and location. Foot's rotation is predicted by two attached marker groups according to instep of center framework. Consequently, we had implemented our proposed system and estimated the accuracy of the proposed method using various experiments.

Key words: Human Motion Analysis(인체 움직임 분석), Pose Estimation(자세 추정), Motion Capture(모션 캡처), Stereo Camera(스테레오 카메라)

1. 서 론

인체 움직임 추적(Human Motion Tracking)은 컴퓨터 비전에서 가장 활발하게 연구되는 분야 중의 하나이다. 대표적인 기술로는 모션 캡처(Motion

Capture)가 있으며, 이 기술의 주요 목적은 실제에 가까운 움직임을 취득하는 것이다[1,2]. 센서(Sensor)가 부착된 특수 장비를 착용하고 실시간으로 움직임을 3차원으로 기록한다. 장치를 통해 기록하기 때문에 정확도가 높아 상업용 기술로 많이 활용

* 교신저자(Corresponding Author) : 최종수, 주소 : 서울특별시 동작구 흑석동 221(156-756), 전화 : 02)820-5295, FAX : 02)826-2505, E-mail : jschoi@cau.ac.kr

접수일 : 2008년 7월 16일, 완료일 : 2008년 9월 24일

^{*} 준회원, 중앙대학교 첨단영상대학원 첨단영상학과 박사과정 (E-mail : crisia@imagelab.cau.ac.kr)

^{**} 정회원, 중앙대학교 첨단영상대학원 연구교수 (E-mail : yoonyi@imagelab.cau.ac.kr)

^{***} 정회원, 중앙대학교 첨단영상대학원 첨단영상학과 교수
* 본 연구는 2단계 BK21, 서울시산학협력사업 및 SFCC의 지원으로 수행된 연구결과임.

되고 있다. 그러나 장비의 착용으로 사용자의 동작을 부자연스럽게 유도하며, 미관적 활용도가 매우 떨어진다[3-5]. 이러한 문제점을 극복하기 위해 카메라 기반의 모션 캡처 연구가 등장했다[6]. 카메라를 사용하게 되면 자유로운 움직임이 보장되기 때문에 보다 자연스러운 움직임 정보를 취득할 수 있다.

본 논문에서는 여타의 신체 부위(머리, 손, 얼굴, 전신)가 카메라 기반 모션 캡처 연구에 적용되는 것과 달리 연구 사례가 매우 드문 발을 대상으로 한다. 최근까지 발을 대상으로 하는 연구로는 신발 제작용 3차원 스캐너(3D Scanner) 개발이나 인체 측정학(Anthropometric) 연구를 위한 3차원 재구성 기술이 주류를 이룬다[7-10]. 왜냐하면 발은 카메라 기반 연구에서 적용하기에 형태학적 제한 조건이 많기 때문이다. 영상에서 움직임을 검출할 때 사용할 수 있는 유일한 특징은 색상과 2차원 좌표정보이며, 이들을 바탕으로 인체와 유사한 기하학적 형태(스틱, 사각형, 원)로 해석하여 검출한다. 그러나 발은 다른 신체 부위에 비해 관절의 수가 많고 이들이 서로 맞물려져 있어 표면이 자유롭게 변형(Deformation)된다. 그래서 발을 기하학적 형태로 단순화하려면 무수한 형태학적 제한 조건을 갖춰야만 하며, 그 수식은 매우 복잡하다[11,12].

카메라 기반 모션 캡처의 기술은 전반적으로 카메라 교정(Camera Calibration), 특징점 검출(Feature Detection), 그리고 자세 추정(Pose Estimation)의 세 가지 과정으로 구성한다.

카메라 교정에는 소실점(Vanishing Point)을 이용한 방법과 자동 교정 방법, 그리고 호모그래피(Homography)를 이용한 방법이 있다. 첫 번째 방법은 영상에서 소실점을 계산해내는 것이 중요한데, 건물 같은 박스 형태의 물체에 대해서만 소실점의 계산이 가능하다. 두 번째 방법은 시퀀스 영상으로부터 에피폴(Epipole) 기하관계에 따라 대응점들의 관계를 계산한다. 이 방법은 비선형 방정식으로 구성되어 있어 복잡한 계산을 요구한다. 마지막 방법은 평면 패턴 영상의 호모그래피를 이용하여 카메라 정보를 계산하는 방법이다. 수식이 매우 간단하고 계산량이 적어서 실시간 시스템에 적합하다. 본 논문에서는 영상 교정의 과정을 간소화하기 위해 호모그래피를 이용한 영상 교정 방법 중의 하나인 장의 방법(Zhang's Camera Calibration)을 적용했다[13-15].

특징점 검출은 영상에서 취득되는 가장 초기 단계의 정보로 조명이나 그림자, 반사 등에 의해 발생하는 불필요한 정보의 최소화에 따라 실시간 알고리즘의 성능을 좌우한다. Wren은 특정 색상 영역을 검출하여 실시간으로 자세를 추정하는 방법을 연구했다[16]. 인체 영역이라고 판단되는 특정 색상만을 취득하기 때문에 불필요한 정보를 줄일 수 있다. 피부색 영역을 검출하여 자세를 추정하는 방법도 이와 같은 맥락에서 많이 이용된다. YUV나 HSV로 피부색을 검출하기 때문에 빛에 덜 민감하다[17,18]. 최근에는 피부색을 말단(End-effector)으로 각 관절의 관계를 수식으로 추정하는 역 운동학(Inverse Kinematics) 방법도 등장했다[19,20]. 그러나 이 방법들은 막대(Stick figure)형태로 표현이 가능한 신체부위(전신, 팔, 다리)를 대상으로 하기 때문에, 표면 합성을 하고자 하는 연구에는 적합하지 않다. 그래서 최근 많은 연구들은 정확한 합성을 위해 마커(Marker)를 부착하여 움직임을 추정한다[21]. 몸의 각 관절에 직접 마커를 부착하거나 마커 패턴으로 특수 제작된 가상 의복을 착용함으로써 인체의 표면이 변형되는 정보를 일정하게 제공받는다[22-24]. 마커를 사용하면 움직임을 일정하게 검출하는 것이 가능해지므로, 보다 정교하고 사실적인 가상 착용이 가능하다. 본 논문에서는 발의 일정한 움직임 검출을 위해 마커를 사용하여 명확한 움직임 정보를 제공했다.

인체의 자세 추정(Pose Estimation)은 인체 모델의 활용 방법에 따라 3가지로 분류된다[6]. 먼저, 모델을 사용하지 않는(Model-Free) 경우는 검출 영역을 2차원 기하 형태로 단순화하여 위치나 자세를 추정하는 연구가 대부분으로, 감시 시스템(Surveillance)을 대표적인 예로 들 수 있다[25-27]. 모델을 사용하는(Direct Model Use) 경우는 검출된 자세에 맞게 미리 준비한 인체 모델을 변형하는 연구들이다. 예를 들어, Delamarre와 Rosenhahn은 인체 모델과 영상에서 취득한 각각의 실루엣이 서로 유사해지도록 ICP(Iterative Closest Point)를 적용하여 자세를 추정했다[28,29]. 마지막으로 모델을 참조하는(Indirect Model Use) 경우는 몇 가지 움직임에 대해 인체 모델을 미리 제작하여 이와 유사한 자세를 검출하는 방법을 적용했다[4,20,30]. 앞서 발은 움직임에 따라 표면이 자유롭게 변형되기 때문에, 움직임을 구속할 수 있는 모델 참조 방법이 가장 적합하다.

본 논문에서 제안하는 방법과 가장 유사한 연구로, 가상 거울을 통해 신발을 실시간으로 착용하는 시스템이 있다[31]. 이 시스템은 한 대의 카메라를 사용하며, 미리 저장한 신발 패턴을 특징으로 하여 템플릿 매칭으로 자세를 추정하고, 가상 거울을 통해 신발이 착용된 모습을 실시간으로 보여준다. 실제로 프랑스 파리의 ADIDAS 상제리제 매장에 직접 설치하여 운용되고 있다. 그러나 이 시스템은 발의 자세를 2차원으로 추정하기 때문에 발꿈치를 들어 올리는 등의 복잡한 움직임이나 가려지는 영역에 대한 대처가 부족하다. 또한, 고비용의 가상 거울을 사용하기 때문에 특정 장소가 아니면 활용도가 매우 떨어진다.

본 논문에서는 스테레오 카메라로부터 발의 3차원 가상 모델을 실시간으로 합성할 수 있도록 동작을 검출하는 새로운 방법을 제안한다. 우리는 두 가지 형태의 마커 그룹을 사용하여 동적 정합을 가능하게 한다. 바닥의 평면 정보는 발과 3차원 가상 발 모델의 관계를 조정하고 발의 자세와 위치를 측정한다. 발의 회전은 발동의 중심골격에 따라 부착한 두 개의 마커 그룹을 사용하여 추정했다. 우리는 제안한 시스템을 직접 구현하고, 다양한 실험을 통해 시스템에 적용된 각 알고리즘의 정확도를 측정했다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안한 알고리즘의 환경과 전체 구성을 간단하게 설명한다. 그리고 3장에서는 발의 자세를 추정하기 위해 사용된 알고리즘을 소개한다. 또한 4장에서는 다양한 자세의 영상으로 실험한 결과를 보여준다.

2. 전체 구성도

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 몇 가지 환경 조건을 가진다. 먼저, 발의 위치와 자세는 바닥의 평면 정보를 기준으로 계산하기 때문에 두 대의 카메라는 바닥으로 향하도록 설치했다. 두 번째로 발을 이동할 때 발바닥의 전체 또는 일부는 항상 바닥과 접한다. 발이 어떤 자세로든 항상 바닥과 접해있다면, 바닥의 평면을 기준으로 이동 거리와 회전각을 계산할 수 있다. 마지막으로 조명이나 기타 환경에 의해 발생되는 불필요한 영역을 최소화하기 위해 색상을 지정했다. 시스템의 배경과 원형 마커는 검정색이고 4개의 원형 마커를 가지는 평면과 발은 흰색이다. 그



그림 1. 환경조건

림 1은 환경조건을 구체적으로 보여준다.

제안하는 알고리즘의 상세 흐름은 그림 2에서 나타낸다. 알고리즘은 원형 마커 검출과 3차원 복원, 그리고 자세추정 순서로 진행한다. 초기 작업으로 카메라 교정을 수행한다. 평면패턴 영상을 3장 이상 취득하고 각 영상에서 코너점을 검출(Corner detection)하여 각 코너점에 대한 호모그래피를 통해 카메라 정보를 얻는다.

두 대의 카메라에 대한 교정이 모두 끝나면, 미리 저장한 배경 영상과 이후에 연속으로 입력받은 영상을 차분한다. 차분된 영상은 토폴로지(Morphology)를 수행하여 그림자나 반사에 의해 생성된 잡음을 제거한다. 남은 영역에 대해 타원 검출 알고리즘을 수행하여 타원 형태의 원형 마커 영역을 모두 검출한다. 각 원형 마커의 중심점을 대응점(Correspondence Point)으로 지정하고 선형 삼각기법(Linear Triangulation)에 대입하여 3차원 값으로 계산한다.

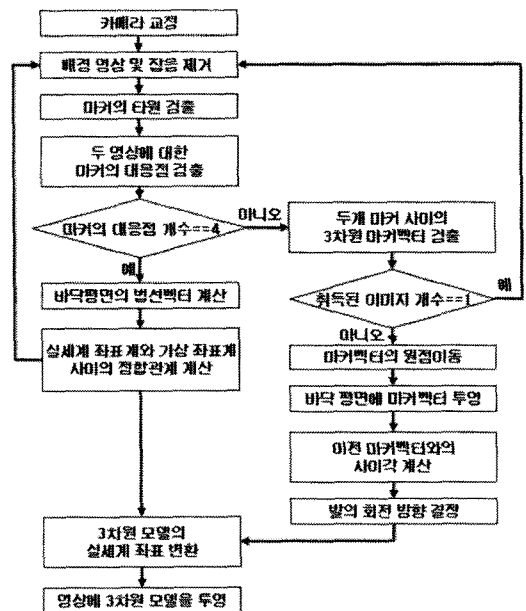


그림 2. 흐름도

원형 마커의 중심점에 대한 3차원 복원이 완료되면, 발의 위치와 자세를 취득하기 위한 기준 좌표계를 구한다. 기준 좌표계는 바닥 평면의 2차원 좌표계와 법선 벡터로 구성되며, 이를 구현하기 위해 총 4개의 원형 마커를 평면이 되도록 하고 4개의 중심으로 부터 평면방정식과 법선 벡터를 계산한다.

이동과 회전은 자세 추정을 위한 성분이다. 이전 영상을 기준으로 현재 영상과의 이동, 회전 관계로 자세를 추정한다. 발등에 부착한 2개의 원형 마커는 방향이 발끝으로 향하는 마커 벡터를 구성한다. 마커 벡터의 시작점을 원점으로 이동하고 평면에 투영하면, 이전 영상과 현재 영상의 투영 마커 벡터들을 내적하여 사이각을, 외적으로 회전 방향을 계산한다.

최종 합성을 위해 가상 모델은 가상 좌표계의 y축을 종아리로 기준하여 제작하는데, 기준 좌표계의 법선 벡터가 y축과 같으므로, 두 개의 축이 서로 일치되는 각 축(x, y, z)의 회전각을 구한다. 회전각을 가상 모델에 적용하여 변환하면, 기준 좌표계로 복귀하여 사영변환을 통해 영상에 투영한다.

3. 제안된 알고리즘

본 장에서는 원형 마커를 검출하고 3차원 복원하는 순차적인 과정과 함께 이 과정에 적용된 전처리 기법과 기본적인 3차원 복원 알고리즘에 대해 간략하게 서술한다.

3.1 원형 마커의 검출

원형 마커를 검출하는 첫 단계로 입력된 영상에서 원형 마커를 포함하는 흰색의 주변 영역을 검출한다. 고정된 카메라에서 객체를 검출하는 가장 기본적인 방법은 전경 영상($frame_i$)과 배경 영상($background_i$)의 그레이 스케일(Gray scale)을 화소 단위로 차분하는 것이다. 배경 영상과 전경 영상의 차분을 구하는 식은 다음과 같다.

$$|frame_i - background_i| > Threshold \quad (1)$$

전경 영상과 배경 영상의 차이값이 임계치(Threshold)이상이면 전경 영역으로 인정한다. 차분에 의해 검출된 전경 영역을 이진화하고, 침식(Erosion)과 팽창(Dilation) 마스크를 연산하여 객체 영역에 포함되는 화소인가의 여부를 결정한다[32].

배경이 제거된 영상은 원형 마커의 형체와 중심점을 검출하기 위해 DLS(Direct Least Square)로 타원을 검출하였다[33]. 타원을 검출하는 방정식은 다음과 같다.

$$F(\vec{a}, \vec{x}) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n F(\vec{a}, \vec{x})^2 \quad (3)$$

DLS 타원 검출법은 간단한 알고리즘으로 타원의 방정식 $F(\vec{a}, \vec{x})$ 에 최소 제곱법(Least Square)을 적용하여 타원 형태에 근사하는 영역을 검출한다. 그림 3은 원형 마커를 검출한 최종 결과이다.

검출된 마커가 3차원으로 복원 되려면, 두 영상에 각각 대응되는 2차원 위치를 알고 있어야만 한다. 그림 4는 대응점을 결정한 결과이다. 먼저 바닥의 마커는 4개의 마커가 정사각형으로 배치되는데, 정사각

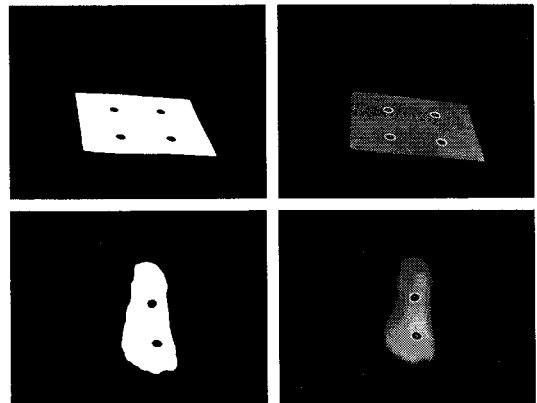


그림 3. 마커의 검출

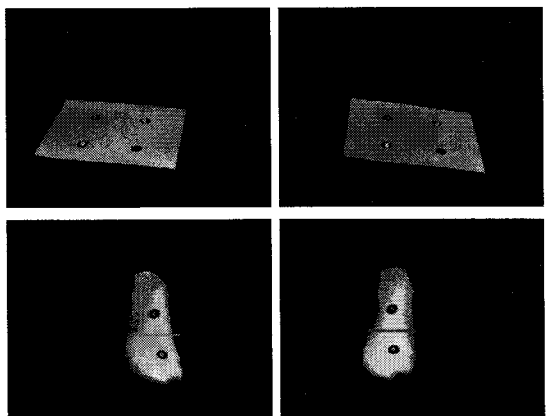


그림 4. 대응점 결정

형의 중심을 기준으로 왼쪽 상단, 오른쪽 상단, 왼쪽 하단, 오른쪽 하단의 4영역으로 나누어 대응점을 지정했다. 발동의 마커는 발이 항상 바닥에 붙어있어야 한다는 제약 조건을 가지고 있기 때문에 영상의 가로 축을 기준으로 상단, 하단으로 나누어 대응점을 지정했다.

3.2 3차원 복원

3.2.1 사영 행렬(Projection Matrix)

3차원 공간상의 한 점 $X=(X, Y, Z, 1)$ 이 이미지 평면의 한 점 $x=(x, y, 1)$ 에 대응되는 관계를 사영(Projection)이라고 한다. 사영 관계에 포함되는 모든 점들은 다음의 식을 만족한다.

$$x = PX \tag{4}$$

수식에서 P 는 사영 행렬이며, 3×4 행렬로 구성된다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

사영 행렬은 카메라의 내부 파라미터(Intrinsic parameter)와 3차원 공간 좌표계를 카메라 좌표계로 변환하는 외부 파라미터(Extrinsic parameter)로 구성된다.

$$P = K[r_1, r_2, t] \tag{6}$$

K 는 카메라의 내부 파라미터를, r_1, r_2, t 는 외부 파라미터를 나타낸다. 각 파라미터는 SVD 분해법(Singular Value Decomposition)을 이용하여 계산할 수 있다. 본 논문에서 사용한 장의 카메라 보정 방법 또한 이와 유사한 형태로 카메라의 사영 행렬을 계산했다[13]. 이 방법은 실제 좌표계의 평면 패턴의 Z축을 0으로 가정하고 각 영상에서 검출한 패턴의 코너 점을 구성하는 호모그래피(Homography)를 성분 분해하여 사영 행렬을 추정한다.

3.2.2 선형 삼각기법(Linear Triangulation)

두 카메라의 사영 행렬에 대해 3차원 공간상의 한 점과 두 카메라의 사영 관계는 에피폴라의 구속 조건에 따라 다음과 같은 관계를 가진다.

$$p'^T F p = 0 \tag{7}$$

수식에서 F 는 에피폴라 구속 조건을 만족하는 행렬이며, p, p' 는 두 카메라에 대한 사영 행렬이다. 이 조건에 따라 3차원 공간상의 점은 두 카메라의 사영 행렬, 그리고 대응점과 함께 평면 삼각형을 이룬다. 다시 말해, 카메라의 중심에서 사영 행렬을 통해 영상에 맺힌 점들을 3차원 공간으로 역으로 사영시켰을 때 평면 삼각형 위에 존재하는 교차점이 3차원 공간의 점이된다. 사영 행렬 p 에 대한 선형 삼각 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(p'^3 X) - (p^1 X) &= 0 \\ y(p'^3 X) - (p^2 X) &= 0 \\ x(p^2 X) - y(p^1 X) &= 0 \end{aligned} \tag{8}$$

이 식에서 X 는 공간상의 한 점이며 (x, y) 는 영상에 투영된 점을 나타낸다. 공간상의 점을 구하기 위해 p' 와 함께 선형 방정식으로 묶어서 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} xp'^3 T - p^1 T \\ yp'^3 T - p^2 T \\ xp'^3 T - p^1 T \\ yp'^3 T - p^2 T \end{bmatrix} = 0 \tag{9}$$

이 행렬을 SVD로 분해하여 해를 계산하면 각 영상에 대응하는 3차원 점 X 를 구할 수 있다.

3.3 발의 자세 추정

3차원 공간 좌표에서 객체의 자세는 세 개의 축(pitch, yaw, roll)에 대한 회전으로 결정된다. 따라서 세 개의 축에 대한 각각의 회전 각도를 취득하면 발의 자세를 추정할 수 있다. 3차원 공간에서 회전 변환을 수행하려면, 다음과 같은 진행 순서를 따라야한다[34].

1. 3차원 객체의 회전축을 결정하고 원점으로 이동한다.
2. x, y, z중 하나의 축이 회전축과 관계될 때까지 회전한다.
3. 1번 에서 이동한 만큼 반대로 다시 이동한다. 회전축은 회전 변환을 결정하는 주요 요소이며, 공간 내의 어떠한 선이라도 회전축으로 사용할 수 있다. 여기에서 우리가 상기할 사항은 발은 항상 바닥에 있어야 한다는 가정이다.

이는 초기에 가상 좌표계의 평면과 바닥의 평면 정보를 일치시키고 바닥 평면을 구성하는 두 개의 축에 대한 회전 정보만 알아내면, 이후부터는 두 개

의 축에 대한 회전각을 고정적으로 사용하면 된다. 따라서 발의 자세 추정 시 모든 축에 대해 복잡하게 회전각을 계산하지 않고 바닥과 접하지 않는 축, 즉 발목에 대해서만 회전각을 계산하면 된다. 발목은 바닥 평면에 대해 수직이기 때문에 바닥 평면의 법선 벡터와 일치한다. 우리는 바닥 평면의 법선 벡터와 가상 좌표계의 y축을 발의 자세를 결정하는 주요 회전축으로 지정했다.

우리가 제안하는 발의 자세 추정 알고리즘은 그림 5에서 보는 바와 같이, 크게 3단계로 나누어 순차적으로 수행한다. 첫 번째 단계에서는 4개의 마커로 구성된 평면의 중심점으로 부터 카메라 좌표계의 원점까지의 이동(T1)과 카메라 좌표계와 가상 좌표계 사이의 관계(M)를 구한다. 이 때 평면의 중심점은 기준점이 되어 발이 이동한 위치와 가상 모델이 합성되는 기준점이 된다. 카메라 좌표계와 가상 좌표계 사이의 관계가 완성되면, 발등에 부착된 2개의 마커로 부터 기준점까지의 이동 위치(T2)를 구한다. 이미 첫 단계에서 좌표계 사이의 관계를 알고 있기 때문에 2개의 마커를 가상 좌표로 변환할 수 있다. 마지막 단계로 가상 좌표로 변환 된 2개의 마커를 벡터로 구성하여 이전 프레임의 벡터와의 내적으로 회전각을 구한다. 가상 좌표에서 실제 발이 위치하는 좌표까지 모든 변경 과정(T1, T2, M)을 알고 있으므로 회전 정보와 함께 모델의 자세를 변경하여 영상에 복귀한다. 이 모든 과정은 마커의 3차원 정보에서 비롯되며, 연속

영상에서 마커를 강건하게 검출하기 위한 부가 과정이 필요하다.

3.3.1 바닥의 평면 정보 조정

공간 좌표계에서 취득한 마커를 원점으로 이동하기 위해 4개의 마커를 평면으로 하는 중심을 구한다. 바닥 평면의 중심은 x, y, z 성분의 총합을 정규화하여 구할 수 있다. 다음의 수식은 바닥 평면의 중심을 구하는 공식이다.

$$M_c(x_{m_c}, y_{m_c}, z_{m_c}) = \left(\sum_{i=0}^{n-1} x_i, \right) / n \tag{10}$$

수식에서 n은 해당되는 점의 총 개수이며, $M_c(x_{m_c}, y_{m_c}, z_{m_c})$ 는 바닥 평면의 중심점을 나타낸다. 중심점을 기준으로 이전 영상과 현재 영상간의 발의 자세를 측정할 것이기 때문에, 원형 마커와 중심점을 원점으로 이동한다.

$$T_{m_c} = \begin{pmatrix} 100 - x_{m_c} \\ 010 - y_{m_c} \\ 001 - z_{m_c} \\ 000 \quad 1 \end{pmatrix} \tag{11}$$

여기에서 T_{m_c} 는 평면 중심이 원점으로 이동하는 변환행렬을 나타낸다. 마찬가지로 4개의 원형 마커를 T_{m_c} 거리만큼 이동하고 평면의 중심점으로부터 각 원형 마커의 중심점까지의 벡터를 생성한다. 이 벡터들을 서로 외적(Cross product)하면 평면의 법선 벡터가 생성된다. 법선 벡터를 구하는 공식은 다음과 같다.

$$V_n = T_{m_c} M_1 \times T_{m_c} M_2 \tag{12}$$

M_1 과 M_2 는 영상에서 3차원 재구성한 원형 마커의 중심점이며, V_n 은 법선 벡터이다. 그림 6은 법선 벡터를 y축으로 일치시키는 과정 변형 관계를 구하는 과정을 보여준다. 원점으로 이동된 마커가 구성하는 평면을 보면, 바닥을 바라보는 시점으로 상단에 있는 카메라에서 원점을 가지기 때문에 이동된 바닥의 3차원 점들이 구성하는 정사각형 평면은 원점에서 약간 기울어진 형태를 보인다.

바닥 평면의 법선 벡터를 y축과 평행하도록 변형해야하는데, 각 좌표축은 이 평행 조건에 만족하도록 회전해야한다. 회전 변환 각도를 구하는 방정식은 다

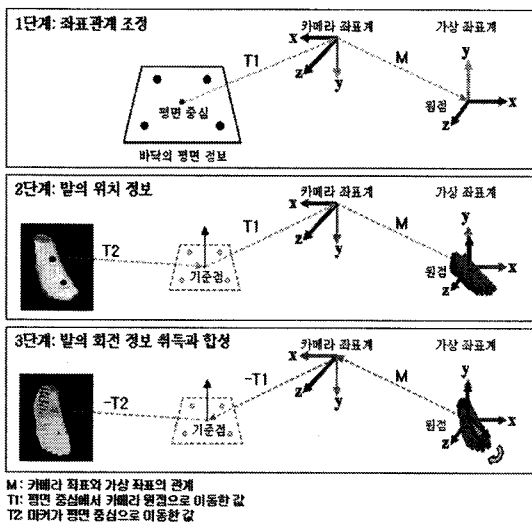


그림 5. 자세 추정 단계

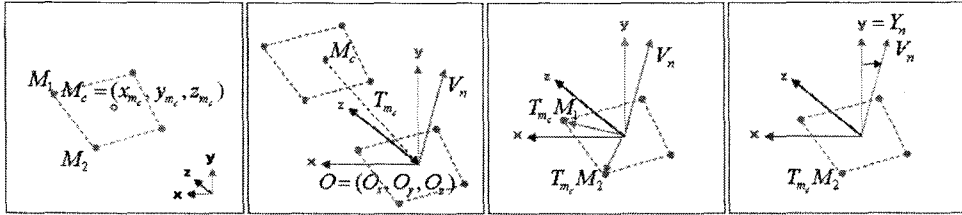


그림 6. 바닥의 평면 정보를 사용한 좌표계의 크기와 위치 조정

음과 같다.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{c}{\sqrt{b^2 + c^2}}\right) \quad (13)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{b^2 + c^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}\right) \quad (14)$$

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right) \quad (15)$$

(a, b, c)는 법선 벡터에 포함되는 임의의 한 점이며, α, β, γ 는 법선 벡터를 y축에 일치시키기 위한 x, y, z축의 회전각이다. 그림 7은 위 과정을 통해 취득한 법선 벡터와 3차원 바닥 평면을 영상에 다시 그려준 결과이다.

3.3.2 회전 정보의 취득

발의 자세를 추정하는 두 번째 조건으로 발목을 축으로 회전한 각도와 방향을 취득한다. 발 자체에서 움직임 정보를 취득하기 때문에 마커 위치의 선정은 매우 중요하다. 많은 경우 주요 관절에 마커를 부착하여 자세를 추정하는데, 발은 수많은 관절이 서로 맞물려있기 때문에 특정 관절에 대해 자세를 검출하려면 복잡한 수식을 사용하므로 실시간 시스템의 성능을 저하시킨다. 움직임을 결정하는 주요 부위는 형태학적으로 가려짐이 적고 카메라에 항상 취득될 수 있는 위치여야 한다. 그래서 우리는 표면이 대체적으로 매끈하고 가려지는 영역이 거의 없는 발등을 움직

임 추정 위치로 선택했다. 발등을 선택한 또 다른 장점은 발꿈치를 기준으로 일정한 기울기로 이동하는 움직임의 제한을 가진다.

우리는 이러한 발등의 움직임 제한에 따라 바닥 평면 정보와 함께 벡터의 방향 성질을 응용하여 회전 정보를 계산했다. 임의의 벡터를 바닥 평면에 투영하면, 공간상의 기울기는 잃어버리되 방향 성분은 유지하게 된다. 두 개의 마커를 벡터로 생성하고 바닥 평면에 투영하면, 바닥 평면 정보를 활용할 수 있다. 그래서 카메라 영역 내 어느 곳에 발이 위치해도 발의 회전 정보를 구할 수 있는 장점을 가지게 된다. 우리는 두 개의 마커에 대하여 발목을 축으로 회전한다는 가정과 함께 발목에 가까운 마커로부터 발끝으로 향하는 방향으로 벡터를 생성했다.

회전 정보는 다음의 세 단계를 통해 순차적으로 취득된다.

A. 원점으로의 이동

그림 8과 같이, 바닥 평면 정보와 마찬가지로 평면 중심이 원점 O로 이동한 거리(T_{m_c})만큼 발등의 마커들도 이동한다.

이동하는 두 개의 마커에 대한 수식 구성은 다음과 같다.

$$F'_h = F_h \cdot T_{m_c} \quad (16)$$

$$F'_l = F_l \cdot T_{m_c} \quad (17)$$

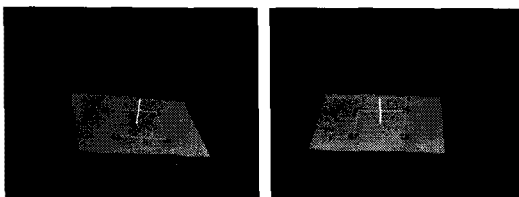


그림 7. 바닥의 평면 정보

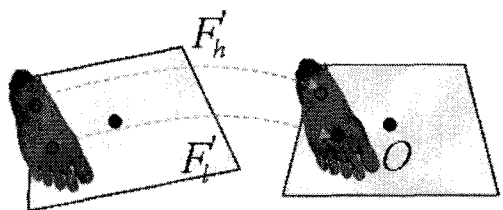


그림 8. 원점으로 이동

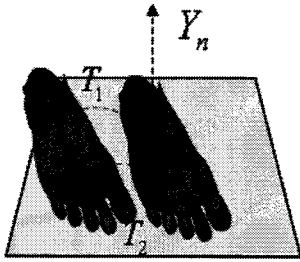


그림 9. 위쪽 마커의 원점이동

F_h 는 발목에 가까운 원형 마커이며, F_l 는 발끝에 가까운 원형 마커이다. 바닥의 평면 정보와 같이 T_m 만큼 이동한 것이 F'_h 와 F'_l 이다. F'_h 는 발의 회전에 대한 주축이 되어야하므로, y 값이 0이 되도록 Y_n 에 평행하게 이동한다. 그림 9는 두 개의 원형 마커를 이동하는 모습을 나타낸다.

F'_h 의 y 값을 0으로 하여 평행 이동하는 수식은 다음과 같다.

$$T_{F_h} = \begin{pmatrix} 100 - x_{F_h} \\ 010 & 0 \\ 001 - z_{F_h} \\ 000 & 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$T_1 = F'_h \cdot T_{F_h} \quad (19)$$

$$T_2 = F'_l \cdot T_{F_l} \quad (20)$$

x_{F_h} 와 y_{F_h} 는 발목의 원형 마커의 중심점인 F_h 의 x, y 값이며, T_1 과 T_2 는 마커 F'_h 와 F'_l 를 각각 T_{F_h} 만큼 평행 이동하는 수식이다.

B. 벡터의 평면 사영

발목을 축으로 한 회전에 대한 정보만 필요하다. 발이 항상 바닥에 붙어있으므로, 바닥의 평면과 이동 벡터를 알면 발등의 벡터에 대한 회전각과 방향은 기하학적 투영 방법에 의해 계산할 수 있다. 그림 10과 같이, 바닥 평면을 기반으로 하고 있기 때문에 공간의 어떠한 벡터라도 평면에 사영하면 벡터의 방향 성분은 유지하므로 이전 프레임의 사영 벡터를 기준으로 한 이동 각도와 회전 방향을 알아낼 수 있다.

F 와 F' 사이의 벡터를 A 라 하면, A 는 평면과 직교 관계이고, F 와 F' 사이의 벡터 차 관계를 성립한다. 이는 $F - V_1 F' = 0$ 또는 $F - V_2 F' = 0$ 를 만족하므로,

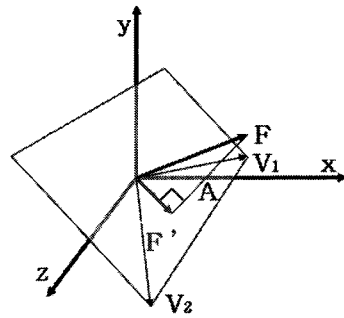


그림 10. 벡터의 사영

V_1, V_2 에 의해 성립되는 수식은 다음과 같다.

$$[V_1|V_2]^T F - [V_1|V_2]^T [V_1|V_2] \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$F'(v_1, v_2)$ 에 대해 식은 구성하면 다음과 같다.

$$([V_1|V_2]^T [V_1|V_2])^{-1} [V_1|V_2]^T F = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

이때, $[V_1|V_2] = V$ 로 정의하면, F' 를 구하기 위한 수식은 다음과 같이 구성된다.

$$proj_v(F) = F' = VA = V(V^T V)^{-1} V^T F \quad (23)$$

C. Rotation Calculation

그림 11과 같이, 바닥 평면에 사영이 된 두 벡터는 회전각과 방향을 취득한다.

벡터의 내적 공식을 적용하여 이전 프레임의 벡터와 현재의 벡터 사이의 각을 계산하면 다음과 같다.

$$\theta = \cos^{-1} \frac{F'_c \cdot F'_r}{\|F'_c\| \|F'_r\|} \quad (24)$$

F'_c 는 현재 영상의 마커 벡터를, F'_r 은 이전 영상의 마커 벡터를 나타낸다. 두 마커 벡터의 내적에 의해 계산할 수 있는 회전각은 θ 이다. 발의 회전각을 구하

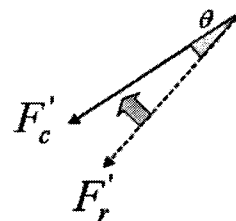


그림 11. 발의 회전각

는 것만큼 중요한 것은 회전 방향을 알아내는 것이다. 모든 움직임은 항상 바닥 위에서 이루어지므로, 이전 영상의 마커 벡터와 현재영상의 마커 벡터 사이의 외적을 구하면, 수직 벡터의 방향에 따라 두 벡터 간의 방향 관계를 알아낼 수 있다. 두 마커 벡터를 외적하여 y값이 +면 이전 영상으로부터 반시계 방향, -면 시계방향이다.

3.3.3 가상 모델의 자세 합성

가상 모델이 실세계 좌표로 변환되는 과정을 그림 12에서 보여준다. 발의 자세 정보가 영상에서 취득되어 가상 좌표계로 변환하기까지의 모든 과정을 3.3에서 언급한 순서의 반대로 역변환 한다.

먼저, 영상에서 취득한 회전각만큼 가상 모델의 회전축인 y축을 회전한다. 다음에 y축과 평면의 법선 벡터 사이의 변환 관계에 대입하여 평면과 같은 기울기로 변환한다. 이 때 변환관계는 3.3.1에서 계산한 각축의 회전각 α, β, γ 을 사용한다. y축을 법선 벡터와 같은 기울기로 변환하는 수식은 다음과 같다.

$$T_R = [T_x^\alpha][T_y^\beta][T_z^\gamma] \quad (25)$$

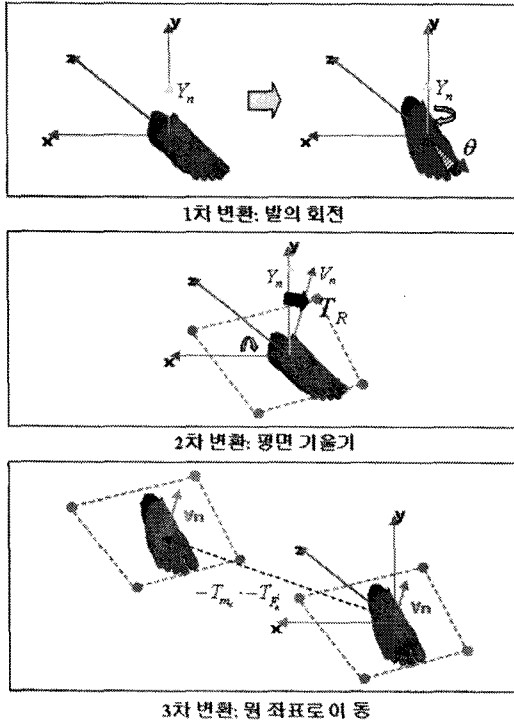


그림 12. 가상 모델의 자세 합성과정

T_R 은 y축을 법선 벡터와 같은 기울기로 변환하는 수식이며, $[T_x^\alpha]$ 는 x축을 각도 α 만큼 회전하는 것을, $[T_y^\beta]$ 는 y축을 각도 β 만큼 회전하는 것을, $[T_z^\gamma]$ 는 z축을 γ 만큼 회전하는 것을 나타낸다. 각각의 회전행렬은 다음과 같다.

$$[T_x^\alpha] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$[T_y^\beta] = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$[T_z^\gamma] = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

발의 자세 변환이 모두 끝나면, 실제 좌표계에서 가상 좌표계로 이동해온 만큼 변환한다. 발의 회전축을 계산할 때 발목 쪽 마커를 회전축으로 지정했으므로, 발목 쪽 마커를 원위치로 복귀한다. 발목 쪽 마커가 복귀한 거리만큼 발끝 마커도 이동한다. 가상 좌표계 상에서 자세 변환이 모두 끝난 가상 모델을 실제 좌표계로 이동하기 위해 원점과 마커 평면 기준점 사이의 거리만큼 이동한다. 위에서 설명한 순서대로 가상 모델을 실세계로 되돌리는 수식 U 는 다음과 같다.

$$U = \begin{pmatrix} \cos(-\theta) & 0 & \sin(-\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-\theta) & 0 & \cos(-\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} T_R \begin{pmatrix} 100x_{F_h} \\ 100x_{m_c} \\ 0100 \\ 001z_{F_h} \\ 001z_{m_c} \\ 0001 \\ 0001 \end{pmatrix} \quad (29)$$

이 수식에서 θ 는 발의 회전각을, F_h 는 발등에 부착된 원형 마커 중 발목 마커의 Y축 평행이동 값이며, $(x_{m_c}, y_{m_c}, z_{m_c})$ 는 실세계에서의 평면의 중심점이다. 변형이 완료된 모델은 사영 행렬과 곱하여 영상에 합성할 수 있다. 모델의 자세를 실제 발의 자세로 업데이트하고 영상에 투영한 최종 결과를 그림 13에서 보여준다.

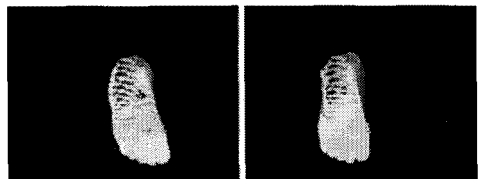


그림 13. 모델을 투영한 영상

4. 실험결과

4.1 실험 환경

본 논문에서 제안된 방법에 대한 실험을 위해 1394b타입의 CCD카메라에서 초당 15프레임, 해상도 640X480의 영상을 취득했다. 실험 환경은 Intel Core2 Quad 2.4GHz의 CPU와 3GB메모리 사양의 컴퓨터를 사용하였으며, Visual C++를 기반으로 OpenCV 라이브러리를 사용하여 프로그램을 제작했다[35]. 또한 본 논문의 최종 목표인 가상 모델 합성을 위해 우리는 3차원 모델 제작 툴 중의 하나인 Maya를 사용하여 obj파일 형식의 가상 모델을 제작했다. 이 가상 모델은 총 1200여개의 점으로 구성되어 있으며, 가상 좌표계의 y축이 회전축이다.

4.2 마커의 3차원 복원 정확도 측정

장의 카메라 교정 방법을 사용하여 취득한 카메라 정보를 그림 14에서 보여준다. 회전 성분과 이동 성분은 카메라 외부 정보(Extrinsic Information)로 사영행렬의 외부 파라미터에 포함되며, 내부 정보(Intrinsic Information)는 사영행렬의 내부 파라미터로 입력된다.

위의 카메라 정보를 바탕으로 우리는 3차원 복원의 정확도 측정 실험을 했다. 카메라 교정에 사용된 평면 패턴의 8행 6열의 총 48개의 점에 대해 선형 삼각 기법으로 3차원으로 재구성하고 카메라 정보를 바탕으로 구성된 사영행렬에 대입하여 재투영(Back projection)을 실시했다. 그림 15의(b)에서 보는바와 같이 각 점의 번호는 1에서 48까지로 왼쪽 상단에서 아래로 그리고 오른쪽으로 배치했다.

그림 16에서 보이는 바와 같이 3차원 복원이 완료

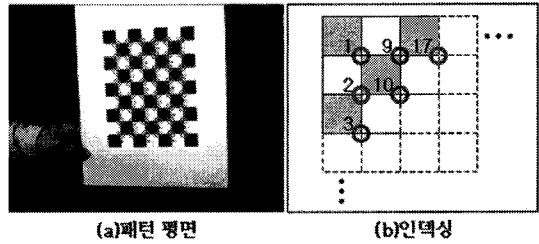
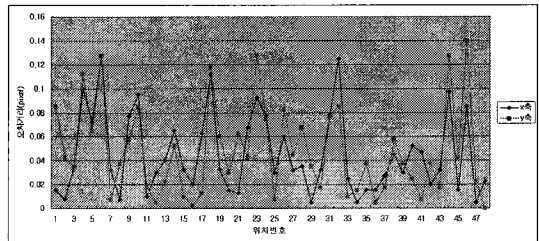
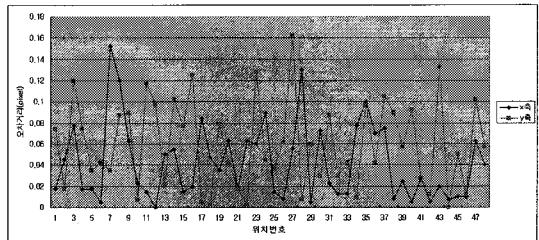


그림 15. 평면 패턴



(a) 왼쪽 카메라



(b) 오른쪽 카메라

그림 16. 카메라 정보 정확도

입력영상	왼쪽 카메라			오른쪽 카메라		
회전성분	-0.97	-0.04	-0.25	-0.98	-0.08	-0.15
	0.01	-0.99	0.11	0.07	-1.00	0.07
	-0.25	0.10	0.96	-0.16	0.05	0.99
이동성분	177.23	52.40	961.14	-4.09	-15.53	978.27
내부정보	Ox	236.20		Ox	336.59	
	Oy	197.74		Oy	277.92	
	fx	1259.68		fx	1307.92	
	fy	1263.78		fy	1307.67	

그림 14. 카메라의 내부, 외부 정보

된 48개의 점을 영상에 재투영한 화소 값과 실제 화소 값과의 거리 오차(Error distance)를 측정한 결과, 최대값이 0.16mm 였으며, 전체 평균 오차율은 0.04mm~0.06mm이내였다.

영상에서 마커를 강건하게 검출하려면 이상적인 환경을 조성해야 한다. 그러나 조명이나 그림자 같은 빛의 영향으로 잡음이 발생하므로 보조적인 전처리 과정이 필요하다. 그림 17은 여러 환경변화에서 마커를 검출해본 결과이다. 본 논문에서 제안한 알고리즘

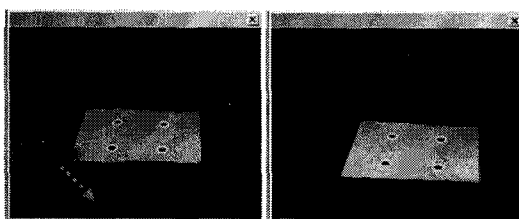


그림 17. 환경 변화에 따른 마커의 검출

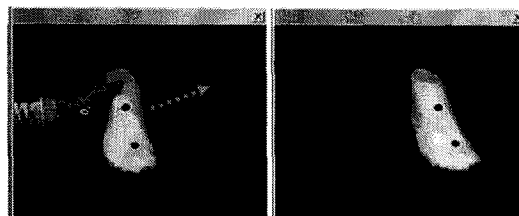
은 임계치(Threshold)를 그레이 스케일 값 120~150 사이에서 마커를 검출하였다. 그림 18은 마커가 이동이 될 때 강건하게 검출되는 것을 보여주고 있다.

검출된 마커는 3차원 복원을 위해 양쪽 영상 사이의 대응점을 지정하게 되는데 실제 구현한 결과는 그림 19와 그림 20에서 볼 수 있다.

강건하게 검출된 마커를 기준으로 바닥의 3차원 평면 정보와 함께 평면의 법선 벡터를 계산한 결과는 다음 그림 21과 같다. 마커 위치가 변경될 때 마다, 바닥 평면 정보와 법선 벡터도 정확하게 연산되는 것을 볼 수 있다.

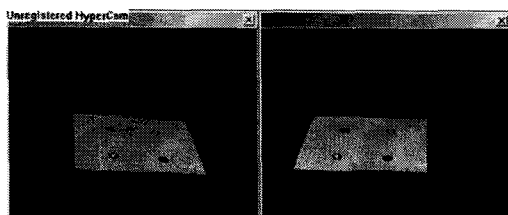


(a)4개의 바닥평면 마커

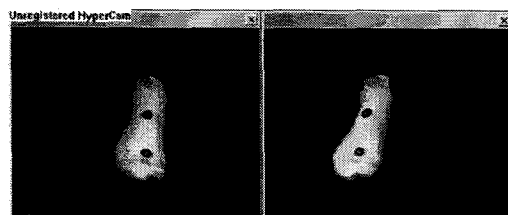


(b)2개의 발등 위 마커

그림 18. 변경된 위치에 따라 강건하게 검출되는 마커



(a)바닥 평면 마커의 대응점

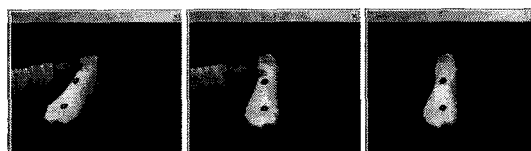


(b)발등 마커의 대응점

그림 19. 대응점 결정



(a) 바닥 평면 마커의 대응점



(b) 발등 위 마커의 대응점

그림 20. 변경된 위치에 따라 대응점 생성

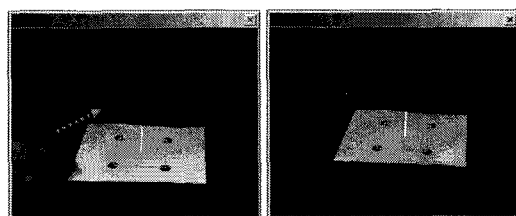


그림 21. 변경된 위치에 따른 3차원 바닥 평면과 법선 벡터

4.3 자세 추정 오차 측정

제안한 방법의 자세 추정의 정확도는 실제 측정된 데이터에 대해 발의 알고리즘을 통해 취득된 데이터들과의 이동과 회전의 오차값을 측정하여 검증했다.

이동의 경우, 카메라 영역에 포함되는 바닥에 대하여 가로와 세로 방향으로 각각 5mm의 간격으로 총 49개의 이동 포인트 사이의 이동 거리에 대한 측정이 이루어졌다. 그림 22는 이동간격 오차 측정 방법을 보여준다.

발꿈치를 올리고 이동하는 경우에 대한 실험도 함께했다. 그림 23과 그림 24는 이동 실험을 통한 오차 측정 그래프를 보여준다. 각 그래프는 이동 실험을 통해 취득된 49개 포인트에 대한 평균 오차 값을 보여준다.

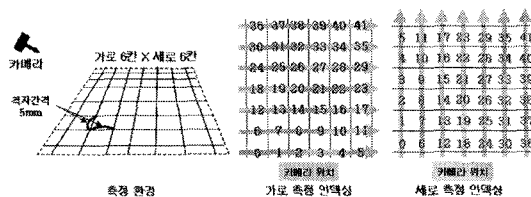


그림 22. 이동 오차 측정 방식

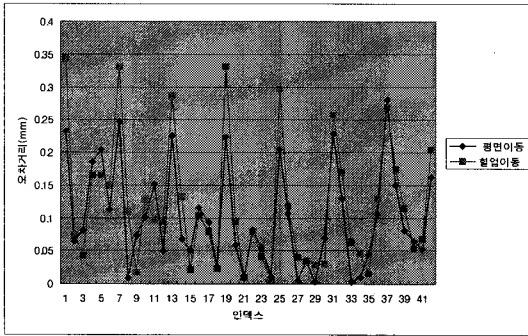


그림 23. 마커의 가로측정 이동에 대한 오차측정

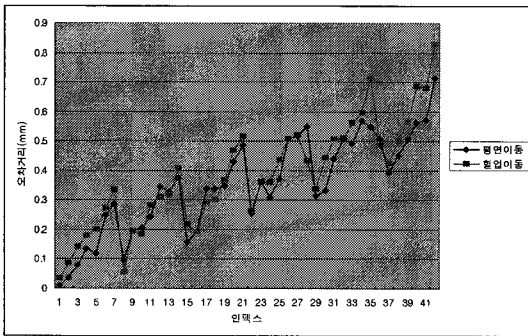


그림 24. 마커의 세로측정 이동에 대한 오차측정

발꿈치를 바닥에 둔 경우와 올린 경우를 나누어 그림 23은 가로로 이동하여 오차를 측정하였고, 그림 24는 세로로 이동하여 오차를 측정했다. 이동 오차의 전체 평균은 1.1mm이고 최고 9mm 이내의 오차 값을 나타냈다. 여기에서 가장 자리로 이동할수록 오차 값이 커지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 선형 방정식에 적용되는 카메라의 길이의 차로 인해 발생하는 현상으로 최소 0.8mm에서 최고는 3mm까지의 오차 값을 나타낸다. 이는 추후 외곡 보정 알고리즘과 역사영(Back-projection) 등을 통해 오차를 줄일 수 있다.

발목 회전의 정확한 측정을 위해 직접 마커를 일정한 각도로 돌려보고 턴테이블을 사용하여 부가적으로 오차 측정을 실험했다. 그림 25는 실험한 방법을 보여준다.

카메라에서 바라보는 기준으로 발의 바깥쪽 면으로부터 안쪽 면으로 10도씩 180도를 회전하면서 오차를 측정하였다. 특히 회전의 경우 발꿈치를 들어 올렸을 때에 대한 실험도 병행하였다. 이는 바닥 평면에 벡터를 투영하는 정확도의 검증과 함께 발이

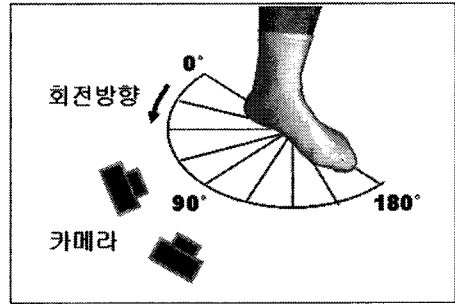


그림 25. 회전측정 실험방법

바닥에 접해있는 한 자세를 취득할 수 있음을 증명하기 위함이다.

우리는 발꿈치를 바닥으로부터 0, 5, 10, 15도로 들어 올린 발 모델을 사용하여 각각에 대해 회전 오차를 측정하였다. 그림 26과 그림 27은 회전 오차를 측정한 그래프를 보여준다. 그래프에서 가로축은 10도씩 180도까지 회전각을 측정한 횟수이고, 세로축은 회전각의 오차를 나타낸다. 여기에서 모든 회전 실험 결과는 공통적으로 카메라를 향하는 정면을 중심으로 좌우 영역에 대해 오차가 큰 것을 볼 수 있다. 이는 이동과 마찬가지로의 경우로 볼 수 있는데, 카메라

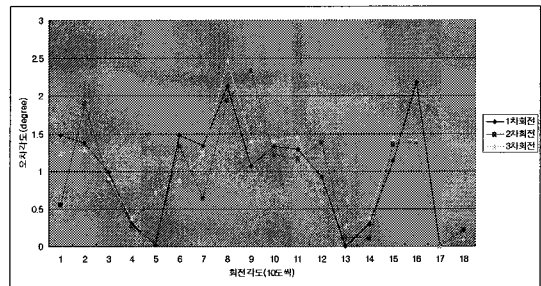


그림 26. 마커의 회전 측정

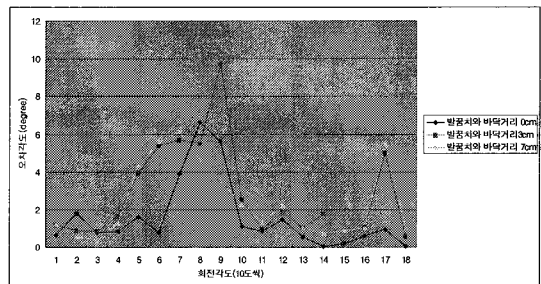


그림 27. 턴테이블을 사용하여 회전한 오차각도 측정

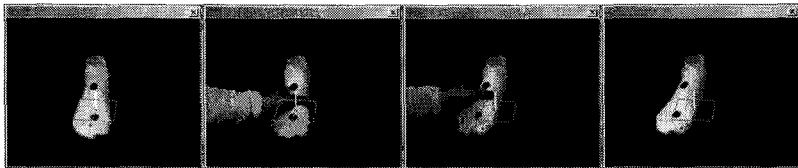
라의 정면으로 마커가 향하면, 영상의 하단 부분에 위치하므로 렌즈 왜곡에 의한 영향을 크게 받는다.

또한 발의 바깥쪽 면에 대해 취득하는 경우도 오차가 공통적으로 커지는데, 이는 카메라에서 발의 바깥쪽을 바라보는 경우 발등의 굴곡으로 인해 완벽하게 마커를 취득할 수 없는 영역이 발생한다. 마커 영역이 명확하지 않으므로 그 중심점도 정확하게 취득하지 못해 오차를 발생시킨다. 실험 결과 회전 오차

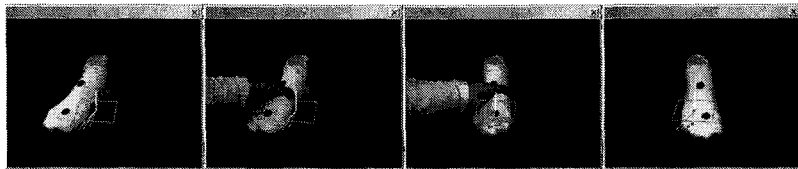
는 평균 1.6도를 나타낸다.

방향과 각도를 자유롭게 변형하면서 취득한 결과를 그림 28에서 보여준다. 그림에서 사각형은 3차원 바닥 평면이며, 회전 각도의 자취를 영상마다 표시했다.

그림 29는 3.3.3에서 설명한 합성 수식에 따라 가상 모델의 자세 정보를 변경하여 사영 행렬을 통해 영상에 투영한 결과이다. 급격한 이동과 회전의 변화에도 대체적으로 영상의 발과 가상 모델이 유사한



(a) 왼쪽 회전



(b) 오른쪽 회전

그림 28. 발의 회전

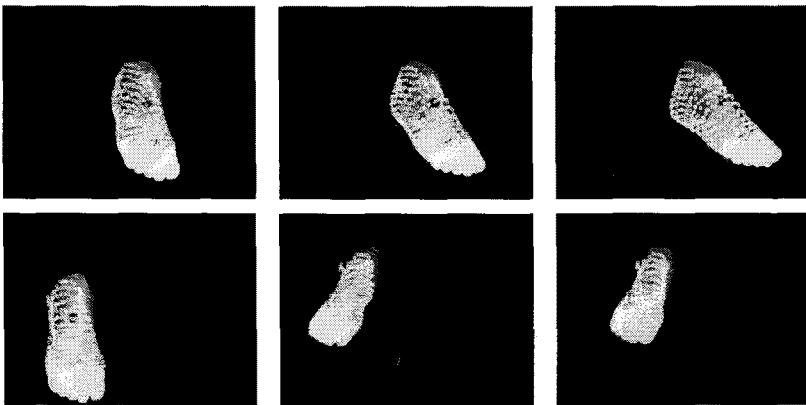


그림 29. 다양한 위치에서 모델을 투영한 결과

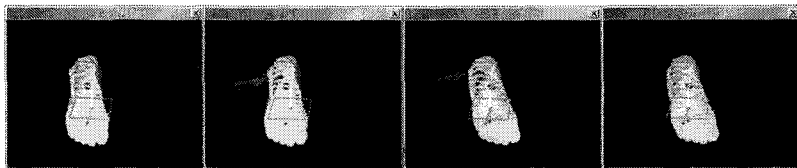
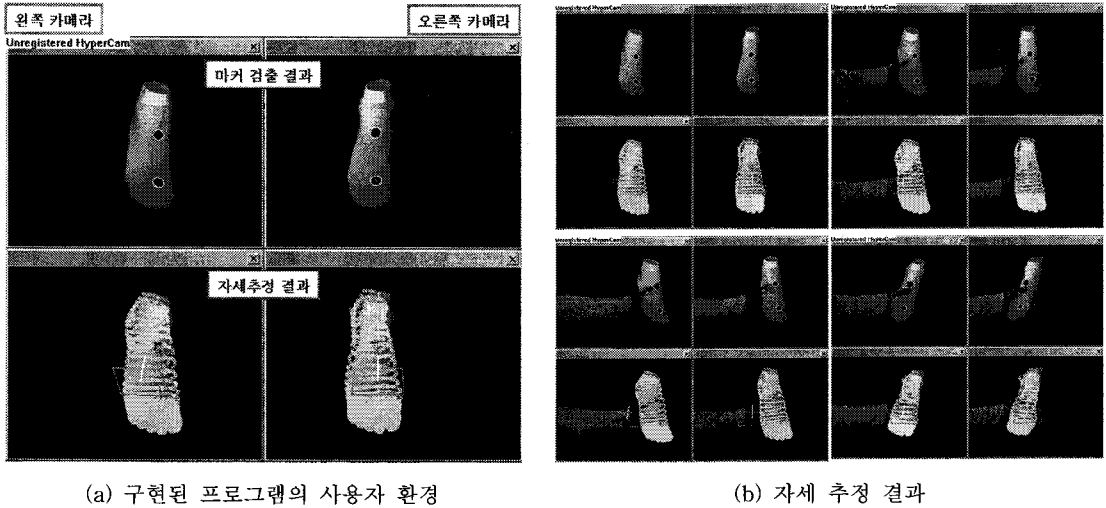


그림 30. 실시간 위치 변경 결과



(a) 구현된 프로그램의 사용자 환경

(b) 자세 추정 결과

그림 31. 실시간 자세 추정 영상

자세로 합성되는 모습을 확인할 수 있으며, 총 1200여개로 구성된 점을 일괄적으로 처리하는 시간은 약 0.5초 내외이다. 그림 30은 직접 구현한 프로그램에서 실시간으로 위치를 변경하면서 가상 모델을 합성한 결과를 보여준다.

그림 31은 실제 프로그램에서 제안한 알고리즘의 모든 과정을 각각 보여준다. 그림에서 보여주는 실험 영상은 발꿈치를 7cm 들어 올린 석고 발을 사용했다.

마지막으로 자세추정을 할 때, 7-8프레임정도 필요하다. 따라서 자세추정을 할 때, 지연시간이 존재한다.

5. 결 론

본 논문에서는 스테레오 영상을 교정하고 원형 마커를 사용하여 발의 움직임을 추정하는 새로운 카메라 기반 모션 캡처 기술을 제안했다. 카메라를 사용하게 되면 자유로운 움직임이 보장되기 때문에 보다 자연스러운 움직임 정보를 취득할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 기술의 궁극적인 목표는 실사에 가상 모델을 실시간으로 합성할 수 있도록 빠르고 정확하게 발의 자세를 추정하는 것이다. 비전 기반 모션 캡처의 기술은 카메라 교정과 특징점 검출, 그리고 자세 추정의 순서로 알고리즘이 구성된다. 먼저, 카메라 교정은 장의 알고리즘을 적용했다. 장의 알고리즘은 평면 패턴 영상에서 계산해낸 호모그래피로 카메

라 정보를 계산하기 때문에 수식이 매우 간단하고 정확하다. 발의 움직임을 표현하는 특징으로 원형 마커를 사용하였다. 원형 마커는 빛이나 그림자 등의 환경에 의해 부가적으로 생성되는 불필요한 정보를 최소화 할 수 있다. 원형 마커는 바닥의 평면 정보와 발등에 각각 4개와 2개로 그룹지어 부착되어 발의 움직임과 자세를 추정하는데 이용된다.

우리는 각 과정에 적용된 방법들에 대한 정확도와 타당성을 검증하기 위해 각각의 결과물을 보여주었으며, 최종 합성영상으로 가능성을 확인했다. 최종 결과에 대한 정확도 검증을 위해 알고리즘을 통해 계산된 값을 실제 측정된 값과의 오차를 측정했다. 그 결과 이동은 평균 1mm내외, 회전은 1도 내외의 오차를 나타냈다. 또한 가상 모델을 합성하여 정합의 정도를 가시화한 결과 거의 동일한 자세로 합성됨을 확인할 수 있었다. 그러나 발등에 부착한 원형 마커의 위치는 정확도에 많은 영향을 주기 때문에, 향후 연구는 발의 자세를 좀 더 뚜렷하게 검출할 수 있는 방법에 대해 많은 연구와 분석을 진행하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] J.K. Aggarwal and Z. Cai, "Human Motion Analysis: a review," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.73, No.3, pp. 428-440, Mar. 1999.

- [2] D.M. Gavrilu, "The Visual Analysis of Human Movement: A Survey," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.73, No.1, pp. 82-98, Jan. 1999.
- [3] T.B. Moeslund, A. Hilton, and V. Krüger, "A Survey of Advances in Vision-based Human Motion Capture and Analysis," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.104, No.2, pp. 90-126, Nov. 2006.
- [4] B. Rosenhahn, U. Kersting, K. Powell, R. Klette, G. Klette, and H.P. Seidel, "A System for Articulated Tracking Incorporating a Clothing Model," *Machine Vision and Applications*, Vol.18, No.1, pp. 25-40, Jan. 2007.
- [5] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Motion_capture
- [6] T.B. Moeslund, A. Hilton, and V. Krüger, "A Survey of Computer Vision-Based Human Motion Capture," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.81, No.3, pp. 231-268, Mar. 2001.
- [7] J. Wang, H. Saito, M. Kimura, M. Mochimaru, and T. Kanade, "Human Foot Reconstruction from Multiple Camera Images with Foot Shape Database," *IEICE Transactions*, Vol. 89-D, No.5, pp. 1732-1742, May 2006.
- [8] T. Asai and H. Murakami, "Development and Evaluation of a Finite Element Foot Model," *Proc. of the 5th Symp. on Footwear Biomechanics 2001*, pp. 10-11, 2001.
- [9] J.T.M. Cheung and M. Zhang, "Finite Element Modeling of the Human Foot and Footwear," *Abaqus Users' Conference 2006*, pp. 145-159, 2006.
- [10] E. Switonski, J. Jurkojc, P. Jureczko, and R. Michnik, "Modelling of Elements of Human Lower Limb Joint Structures with the Help of FEM," *The 6th International Scientific Conference*, pp. 265-270. 2004.
- [11] W.J. Wang and R.H. Compton, "Analysis of the Human and Ape Foot during Bipedal Standing with Implications for the Evolution of the Foot," *Journal of Biomechanics*, Vol.37, No.12, pp. 1831-1836, 2004.
- [12] G. Peter, H. Steven, and D. Arthur, "The Advantages of a Rolling Foot in Human Walking," *Journal of Experimental Biology*, Vol.209, No.20, pp. 3953-3963, Oct. 2006.
- [13] Z. Zhang, "A Flexible New Technique for Camera Calibration," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, pp. 1330-1334, 2000.
- [14] B. Caprile and V. Torre, "Using Vanishing Points for Camera Calibration," *International Journal of Computer Vision*, Vol.4, pp. 127-140, 1990.
- [15] M. Pollefeys, R. Koch and L.V. 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.
- [16] C. Wren, A. Azarbayejani, T. Darrell, and A. Pentland, "Pfinder: Real-time Tracking of the Human Body," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.19, No.7, pp. 780-785, July 1997.
- [17] A.A. Argyros and M.I.A. Lourakis, "Real time Tracking of Multiple Skin-Colored Objects with a Possibly Moving Camera," *Proc. of the European Conference on Computer Vision 2004*, LNCS 3023, pp. 368-379, May 2004.
- [18] V. Vezhnevets, V. Sazonov, and A. Adreeva, "A Survey on Pixel-Based Skin Color Detection Techniques," *Proc. Graphicon-2003*, pp. 85-92, 2003.
- [19] D. Tolani, A. Goswami, and N.I. Balder, "Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs," *Graphical Models*, Vol. 62, No. 5, pp. 353-388, Sep. 2000.
- [20] S.E. Kim, R.H. Lee, C.J Park, and I.H. Lee, "MIMIC: Real-time Marker-free Motion Capture System to Create an Agent in the Virtual Space," *Proc. of the International*

- Conference of Consumer Electronics 2002*, Vol.1, pp. 48-49, Dec. 2002.
- [21] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre, "Recent Advances in Augmented Reality," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.21, No.6, pp. 34-47, 2001.
- [22] K. Kjaerside, K.J. Kortbek, H. H. Møller, and K. Grønbaek, "ARDressCode: Augmented Dressing Room with Tag-based Motion Tracking and Real-Time Clothes Simulation," *Proc. of Central European Multimedia and Virtual Reality Conference*, 2005.
- [23] J. Ehara and H. Saito, "Texture Overlay onto Deformable Surface for Virtual Clothing," *International Conference on Artificial Reality and Telexistence 2005*, Vol.157, pp. 172-179, Dec. 2005.
- [24] V. Scholz and M. Magnor, "Texture Replacement of Garments in Monocular Video Sequences," *Proc. of the 17th Eurographics Symposium on Rendering*, pp. 305-312, June 2006.
- [25] T.B. Moeslund and E. Granum, "Multiple Cues used in Model-Based Human Motion Capture," *The 4th International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, pp. 362-367, Mar. 2000.
- [26] A. Nakazawa, H. Kato, and S. Inokuchi, "Human Tracking using Distributed Video Systems," *International Conference on Pattern Recognition*, Vol.1, pp. 593-596, Aug. 1998.
- [27] T. Darrell, P. Maes, B. Blumberg, and A.P. Pentland, "A Novel Environment for Situated Vision and Behavior," *In Workshop for Visual Behaviors at Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 319-331, 1994.
- [28] Q. Delamarre and O. Faugeras, "3D Articulated Models and Multiview Tracking with Physical Forces," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.81, No.3, pp. 328-357, Mar. 2001.
- [29] B. Rosenhahn, R. Klette, and G. Sommer, "Silhouette Based Human Motion Estimation," *26th Pattern Recognition Symposium 2004*, LNCS 3175, pp. 294-301, 2004.
- [30] H. Saito and J. Hoshino, "A Match Moving Technique for Merging CG and Human Video Sequences," *Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2001*, Vol.3, pp. 1589-1592, 2001.
- [31] E. Peter, R. Jurgens, and F. Philipp, "Virtual Mirror-Real time Tracking of Shoes in AR Environments," *Proc. of International Conference of Image Processing 2007*, Vol. 2, pp. 557-560, Oct. 2007.
- [32] M. Piccardi, "Background Subtraction Techniques: a Review," *International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 4, pp. 3099-3104, 2004 .
- [33] A.W. Fitzgibbon, M. Pilu, and R.B. Fisher, "Direct Least-squares Fitting of Ellipses," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.21, No.5, pp. 476-480, May 1999.
- [34] F.S. Hill, *Computer Graphics using OpenGL*, Prentice Hall Publishers, University of Massachusetts, 2000.
- [35] OpenCV. <http://www.intel.com/technology/computing/opencv>



정 다 운

2001년 2월 덕성여자대학교 전산학과 학사 졸업

2007년 2월 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 석사 졸업

2007년 3월 ~ 현재 중앙대학교 첨단영상대학원 첨단영상학과 박사과정

관심분야 : 컴퓨터비전, 컴퓨터 그래픽스, 증강 현실



윤 용 인

1986년 2월 중앙대학교 전자공학과 학사 졸업.
1988년 2월 중앙대학교 전자공학과 석사 졸업.
2003년 8월 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 박사 졸업.

1991년 7월~1993년 2월 대우 고등기술연구원.
2003년 9월~2005년 8월 중앙대학교 첨단영상대학원 Post-Doc.
2006년 5월~2006년 7월 중앙대학교 문화컨텐츠연구원 선임연구원
2006년 8월~현재 중앙대학교 첨단영상대학원 연구교수
관심분야 : 증강현실, 신호처리, 컴퓨터비전, 영상처리



최 종 수

1975년 인하대학교 전기공학과 학사 졸업
1977년 서울대학교 대학원 전자공학과 석사 졸업.
1981년 Keio University(일본) 전기공학과 박사 졸업.
1981년 2월~1981년 9월 Aloka Co. Ltd 연구소 연구원

1981년 9월~1999년 8월 중앙대학교 전자공학과 교수
1999년 9월~현재 중앙대학교 첨단영상대학원 첨단영상학과 교수
관심분야 : 영상신호처리, 컴퓨터 비전, 증강현실, 영상합성, 영상통신