

단일 카메라와 평면거울을 이용한 하지 운동 자세 추정

(Human Legs Motion Estimation by using a Single Camera and a Planar Mirror)

이 석 준 [†] 이 성 수 ^{**}
 (Seokjun Lee) (Sung Soo Lee)

강 선 호 ^{***} 정 순 기 ^{****}
 (Sun Ho Kang) (Soon Ki Jung)

요약 본 논문에서는 고정시킨 평면거울을 바라보는 단일 카메라에서 얻어진 영상을 이용하여 훈련자 양 하지의 자세를 3차원으로 추정하는 방법을 제안한다. 이를 위해, 카메라 입력영상으로부터 평면거울에 부착된 네 개의 적외선 마커를 탐색하여 단일 카메라의 자세를 추정한다. 추정된 카메라 자세를 통해 거울평면을 기준으로 하는 훈련공간을 정의하고, 압력 센서를 사용하여 공간 내의 훈련자의 양 하지 위치를 측정한다. 양 하지의 마커는 직접적으로, 또는 거울을 통해 카메라 영상으로 투영되고, 정의된 훈련공간에서 3차원 위치로 변환된다. 변환된 마커들의 3차원 위치관계에 의해 최종적으로 양 하지의 자세를 얻고 연속적인 움직임에 대해 운동 상태를 추정한다.

키워드 : 모션캡처, 하지재활훈련시스템, 컴퓨터비전

- 본 연구는 민간겸용기술개발사업 지원으로 이루어졌음
- 본 연구는 한국장학재단 이공계국가연구장학생 장학지원으로 이루어졌음
- 이 논문은 2010 한국컴퓨터종합학술대회에서 '단일 카메라와 평면거울을 이용한 하지 운동 자세 추정'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

- [†] 비 회 원 : 경북대학교 컴퓨터공학과
sukjuni@vr.knu.ac.kr
- ^{**} 학 생 회 원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부
sslee@vr.knu.ac.kr
- ^{***} 비 회 원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부
shkang@vr.knu.ac.kr
- ^{****} 중 신 회 원 : 경북대학교 컴퓨터학부 교수
skjung@knu.ac.kr
- 논문접수 : 2010년 8월 10일
- 심사완료 : 2010년 10월 5일

Copyright©2010 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨터의 실제 및 레터 제16권 제11호(2010.11)

Abstract This paper presents a method to capture the posture of the human lower-limbs on the 3D space by using a single camera and a planar mirror. The system estimates the pose of the camera facing the mirror by using four coplanar IR markers attached on the planar mirror. After that, the training space is set up based on the relationship between the mirror and the camera. When a patient steps on the weight board, the system obtains relative position between patients' feet. The markers are attached on the sides of both legs, so that some markers are invisible from the camera due to the self-occlusion. The reflections of the markers on the mirror can partially resolve the above problem with a single camera system. The 3D positions of the markers are estimated by using the geometric information of the camera on the training space. Finally the system estimates and visualizes the posture and motion of the both legs based on the 3D marker positions.

Key words : Motion Capture, Rehabilitation System, Computer Vision

1. 서론

하지재활운동이란 하지에 마비가 생긴 사람의 근육을 강제로 움직여 마비 증세를 완화시키기 위한 운동이다. 이러한 운동의 대표적인 예로는 무릎 굽히기, 보행, 체중이동 등을 들 수 있다. 이를 수행하는 훈련자의 움직임 정보를 획득하고 분석하여 정상인의 움직임 정보와 대조함으로써 훈련자의 증세 완화 정도를 예측할 수 있다. 마비 증세를 치료하기 위한 시스템의 종래의 기술로는 "동작분석을 이용한 보행훈련 장치"[1]가 있다. 이 장치는 환자의 보행 운동에 초점을 둔 시스템이기 때문에 다양한 기계적 장치가 필요하고 복잡한 장치의 구성에 비해 정확한 하지 상태를 파악하기에는 부족하다. 하지의 정확한 운동 상태를 측정하기 위한 연구에서는 하지관절각도 측정을 위하여 모션캡처를 이용한 하지 재활 훈련 시스템을 제안하였다[2]. 그러나 이 시스템은 훈련자의 한쪽 편에만 설치된 단일 카메라로부터 입력된 한쪽 하지에 대한 운동 상태를 추정하는 정도에 그칠 수밖에 없었다. 이는 편마비 환자에 대한 증상개선을 위한 훈련시스템으로 이용될 수는 있었으나 양 하지의 운동 상태 측정이 필요한 다른 증상의 환자나 재활 시스템에 응용되기에는 부족한 점이 존재했다.

본 논문에서는 이와 같은 문제점을 보완하기 위해 양 하지의 움직임과 무릎관절의 각도를 동시에 측정하기 위하여 단일 카메라와 평면거울을 사용한다. 평면거울은 카메라가 직접 관측할 수 없는 부분을 거울에 반사된 상을 통해 카메라가 관측할 수 있도록 함으로써 양 하지의 움직임 정보를 하나의 영상에서 답을 수 있게 한

다. 단일 영상에서 훈련자의 3차원 정보를 추정하기 위해서는 평면상의 네 점 기반의 카메라 자세추정 알고리즘[5,6]의 결과인 카메라 위치정보와 압력 센서의 정보를 복합적으로 사용한다. 이 방법은 여러 대의 카메라를 사용한 경우[4]에 비해 시스템 구축비용이 저렴하고 카메라 간의 동기화 작업이 불필요하고 단일 영상만을 사용 하므로 빠른 처리가 가능하다. 따라서 실시간으로 훈련자의 모습과 훈련자의 상태 데이터를 동시에 가시화할 수 있다. 훈련자를 촬영 중인 카메라 영상위에 훈련자의 하지자세에 대한 3차원 객체나 무릎각도 등의 데이터를 증강현실 기법으로 가시화하면 훈련자는 자신의 움직임과 자세를 실시간으로 확인하며 훈련할 수 있다. 훈련하는 동안 생성된 움직임 정보는 저장되고 이후 운동 분석가로 하여금 훈련자의 훈련시의 상태를 파악하고 추후 이루어질 훈련에 대한 계획을 수립하는데 도움을 준다.

본 논문에서 제시하고 있는 시스템의 구성은 2절에서 기술하고, 3절에서는 자세추정 과정에 대해 기술한다. 4절은 실험 결과, 5절은 결론 및 향후 연구에 대해 살펴본다.

2. 시스템 개요

고정된 카메라를 훈련자 좌측에 설치하고 평면거울은 훈련자의 우측에 설치한다. 그리고 압력센서는 평면거울에서 일정거리 떨어진 지점에 위치한다. 평면거울에 부착된 네 개의 적외선 마커는 카메라 영상에 투영되며, 이를 이용하여 카메라 자세를 추정하고, 훈련 공간을 초기화 한다. 이때 평면거울 면은 훈련 공간의 기준면이 된다. 본 논문에서 제안하는 단일 카메라와 평면거울을 이용한 훈련자의 3차원 자세 추정 시스템의 개요는 그림 1과 같다.

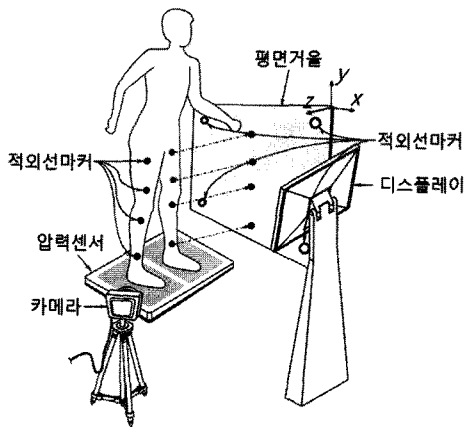


그림 1 시스템 개요

훈련자의 움직임은 양 하지 외측에 부착된 적외선 마커의 움직임을 추적하여 카메라의 관점에서 3차원상의 위치를 추정한다. 처음 훈련자가 나타난 영상에서는 영상에서의 상하좌우의 상대적인 마커 위치에 따라 마커의 라벨순서를 지정하며, 다음 프레임 영상부터는 마커의 위치를 추적한다. 추적된 결과는 초기화된 3차원 훈련공간에 증강현실 기법을 사용하여 실시간으로 나타낸다.

3. 자세 추정

본 논문에서 제안하는 시스템은 단일카메라와 평면거울을 이용하여 훈련자의 자세를 추정하기 위해 그림 2와 같은 흐름으로 데이터의 획득과 처리과정을 거친다. 본 절에서는 연속적인 영상처리와 3차원 공간에서 훈련자의 양하지 상태를 추정하는 과정을 설명한다.

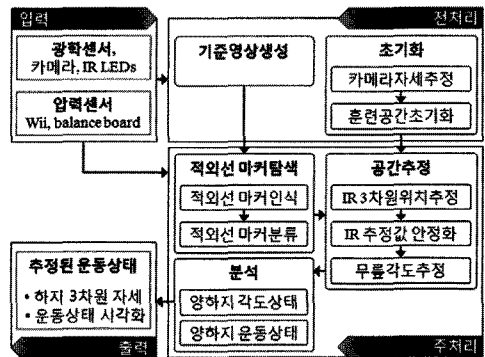


그림 2 시스템 흐름도

3.1 전처리

기준영상 생성을 위해 카메라로부터 n개의 배경화면을 입력받는다. 배경화면은 훈련자와 적외선 마커가 없는 영상을 사용한다. 그림 3과 같이 n개의 배경 영상의 각 화소의 휘도에 대한 확률적 특성을 이용하여 휘도 평균 영상과 휘도 분산 영상을 생성하고 이를 기준영상으로 사용한다. 각 화소에 대한 휘도 평균 $m(x, y)$ 과 휘도 표준편차 $\sigma(x, y)$ 는 식 (1)에 의해 계산된다.

$$m(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(x_i, y_i),$$

$$\sigma(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(I(x_i, y_i) - m(x, y))^2}.$$
(1)



그림 3 기준영상 생성

초기화 과정은 거울면을 중심으로 카메라와 거울 사이에 있는 훈련자 하지의 3차원 자세를 추정하는 방법에서 주요한 과정이다. 이 과정은 카메라의 자세를 추정하고, 이후의 공간추정을 수행하기 위한 훈련공간을 초기화하는 과정이다. 정확한 카메라 보정과 거울평면에 대한 카메라의 자세를 추정하기 위해서는 거울에 부착된 네 개의 적외선 마커를 정확히 인식하고, 인식된 마커간의 거리와 카메라 영상에 입력된 마커간의 거리의 비율을 이용하여 카메라의 자세를 추정한다[5,6]. 이 과정은 카메라 영상에 훈련자가 등장하지 않았을 때 시행하며, 평면거울 상에 위치한 네 개의 적외선 마커가 포함된 영상에서 이전에 획득한 기준 영상을 이용하여 배경을 분리한 후 정확한 네 개의 마커 영역만을 획득하여 사용한다. 카메라의 자세를 추정한 결과는 그림 4와 같다. 거울면의 네 개의 적외선 마커를 네 꼭짓점으로 하는 거울평면을 3차원 상에 격자평면으로 표현하였고 초기화된 훈련공간의 바닥면을 사각평면으로 표현하여 현재 카메라가 촬영하는 영상에 중첩하였다.

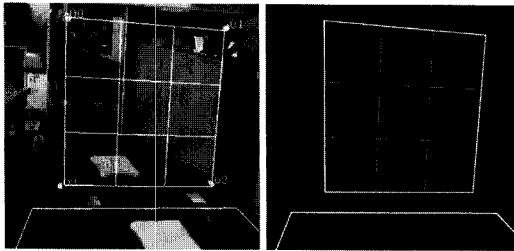


그림 4 카메라 자세 추정을 통한 훈련공간 초기화

3.2 적외선 마커탐색

전처리 과정 이후에 훈련자가 포함된 영상이 들어오면 기준 영상을 사용하여 배경을 분리하고 적외선 마커를 탐색한다. 영상의 각 화소는 해당 화소의 값이 평균 m 을 기준으로 표준편차 σ 범위 사이에 있으면 배경으로 인식하여 제거된다. 배경을 제외하고 남은 부분에 대해서 라벨링[3]기법으로 적외선 마커를 탐색한다. 처음 탐색된 적외선 마커의 위치는 카메라 영상상의 좌우기 기준으로 그림 5의 f_1, f_2 가 평면거울에 이루는 수선과의 교점(C)을 기준으로 어느 쪽 하지에 해당되는지 분류된다. 이후부터 마커는 이를 둘러싸는 일정 범위의 관심 영역 내에서 자동적으로 탐색된다.

주변 환경에 의해서 배경이 조금씩 변화하는 경우 배경 분리가 잘 되지 않는다. 이를 보완하기 위해 식 (2)를 사용하여 배경의 휘도 평균과 표준편차를 갱신한다. α 는 배경 변화를 갱신하는 속도를 나타내고, $\Delta\sigma$ 는 표준편차의 변화량을 나타낸다.

$$m(x,y) = (1-\alpha) \cdot m(x,y) + \alpha I(x,y),$$

$$\Delta\sigma(x,y) = \sum_{i \leq n} \sqrt{(I(x_i, y_i) - m(x,y))^2},$$

$$\sigma(x,y) = (1-\alpha) \cdot \sigma(x,y) + \alpha \Delta\sigma(x,y).$$

3.3 공간 추정

공간추정을 위해서는 전처리 단계에서 초기화를 통하여 카메라의 자세를 추정하고 이를 기반으로 훈련 공간을 초기화 하는 과정이 필요하다. 이는 이미 3.1절의 전처리과정에서 수행한 훈련공간 초기화에서 거울평면에 부착된 네 개의 적외선 마커를 통해 거울평면에 대한 카메라의 자세를 초기화 하였다. 카메라로 입력되는 훈련자 하지에 부착된 적외선 마커는 영상에 투영된 2차원 위치지만, 그림 5와 같은 공간정의를 통해 두 발이 위치한 공간으로의 3차원 위치로 변환할 수 있다.

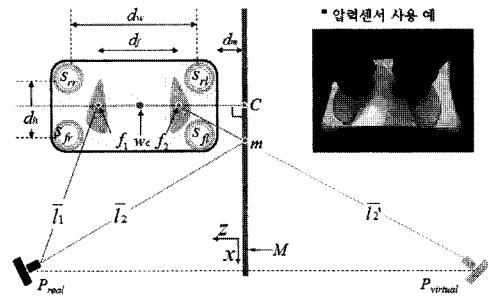


그림 5 두 발의 위치를 통한 훈련공간 정의

기준면에서 일정한 거리 d_m 만큼 떨어진 위치에 설치한 압력 센서를 이용하여 양 발 사이의 거리를 측정한다. 이때 사용된 압력 센서는 사각형 보드의 각 모서리에 부착되어 있다. 각 센서에서 측정되는 압력 값은 무게 중심과 거리에 반비례하는 값을 가진다는 점을 이용하여 식 (3)에 의해 한쪽 발을 올렸을 때의 무게 중심 좌표(f_{first})를 먼저 구한다. 그 후에 다음 발을 올려 위치를 계산한 후 양 발 사이의 거리를 계산하여 이를 하지 사이의 거리로 사용한다.

$$f_{second} = 2 \times f_{both} - f_{first},$$

$$f = \frac{d_w}{2} \left(\frac{w_r - w_l}{w_r + w_l} + 1 \right) + d_m,$$

여기서 w_r 은 오른쪽 압력센서로부터 얻은 값이고, w_l 은 왼쪽 압력센서로부터 얻은 값이다. d_w 는 양쪽 압력센서간의 거리를 나타낸다. 다음 발을 센서위에 올려놓으면 양 발에 가해지는 무게비율이 동일하다는 가정 하에 양 발을 모두 올린상태의 무게중심을 구한 후, 한 발을 올렸을 때 얻은 값과 양 발을 올렸을 때 얻은 값의 차이에 의해 양 발의 좌표를 구한다. f_{second} 는 나중에 올린 발

의 좌표이고, f_{first} 는 처음 한 발을 올렸을 때 무게중심이며, f_{both} 는 양 발을 올렸을 때의 무게중심을 나타낸다. 이를 기반으로 양 발 사이의 거리를 측정한다.

두 발의 위치가 구해지면 그림 5와 같은 공간적 정의를 통해서 하지 마커의 3차원 위치 추정이 가능하게 된다. 입력 영상에 나타난 훈련자 양 하지의 적외선 마커는 3차원 공간상의 두 선 \bar{l}_1 과 \bar{l}_2 상에 놓일 것이다. 카메라에 보이는 점 m 은 f_2 가 거울에 반사되어 보이는 점이다. 따라서 f_2 는 실제로 거울에 반사된 \bar{l}_2 선상에 존재하게 된다. 이는 거울을 기준으로 실제카메라의 맞은편에 존재하는 가상카메라가 f_2 를 바라보는 시선과 일치한다. f_1 과 f_2 는 거울에 수직인 선 위에 존재한다. 따라서 \bar{l}_1 과 \bar{l}_2 선 위의 점 가운데 압력센서에 의해 추정된 양 발 사이의 거리 d_f 와 일치하는 거리에 있는 두 점이 실제 3차원 상의 마커위치이다.

이후 하지가 움직이면서 생기는 무릎의 각도를 구하기 위해 훈련자 하지에 부착된 8개의 마커를 좌측과 우측의 각각 네 개씩의 마커로 분류하고, 이를 각각 아래-위로 2개씩 묶어 분류한다. 이렇게 분류된 네 쌍의 마커들은 각각 벡터로 정의될 수 있고, 좌우의 상부 벡터와 하부 벡터가 이루는 각을 무릎의 각(θ)으로 정의하여 사용한다(식 (4)).

$$\begin{aligned} \theta &= \cos^{-1} \frac{A \cdot B}{|A||B|} \\ &= \cos^{-1} \left(\frac{x_1 y_1 + x_2 y_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

만약 마커를 탐색하는 중에 마커가 소실되거나 잘못 추정된 경우에는 하지의 움직임이 급격하게 변하지 않는다고 가정하고, 소실된 마커를 포함한 두 마커 사이의 거리와 움직임 변화를 나타내는 모션벡터에 의해 마커가 있음직한 위치를 예측하여 사용한다. 그림 6은 라벨-03의 마커가 소실된 경우를 예측한 경우이다. 그림 6에서 정상적으로 인식된 마커는 밝은 원으로 표시하였는데, 좌측으로부터 첫째와 둘째 장면에서는 라벨-03마커가 인식되어 나타남을 확인할 수 있다. 하지만 세 번째

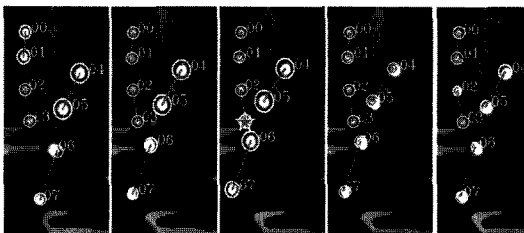


그림 6 마커 추적 결과와 소실된 마커 예측결과

장면에서는 반대편 하지에 가려져 보이지 않게 된다. 따라서 앞서 기술한 방법으로 라벨-03마커 위치를 예측하였고, 그 예측결과와 위치는 그림 6에서 별표로 표시하였다.

3.4 분석

추정된 적외선 마커의 3차원 위치에서 하지 각각의 무릎각도를 이용하여 양 하지의 자세와 운동 상태를 관찰할 수 있다. 다시 말해, 훈련자의 굽혀진 무릎각도 크기와 3차원 상의 위치를 분석하여 현재 훈련자가 취하는 자세를 알 수 있다. 더불어, 무릎각도의 변화($\Delta\theta$)가 이 정상인의 변화량과 어느 정도 일치하는지 비교하여 하지 운동능력의 정도를 분석하는데 사용할 수 있다.

4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 자세 추정방법을 이용하여 추정된 결과를 가시화한 예는 그림 7과 같다. 카메라를 통해 얻은 실제 훈련 영상과 추정된 훈련자의 3차원 움직임을 동시에 한 화면에 나타낸다. 이를 통해 훈련자는 실시간으로 자신의 훈련 상황을 확인할 수 있다. 훈련자의 움직임을 3차원 상에 나타내므로 카메라와 다른 시각에서 움직임을 관찰하는 것이 가능하다. 그림 7은 본 논문에서 제안된 훈련시스템에서 적외선마커를 인식하고, 인식된 마커의 3차원 위치를 추정한 결과를 나타낸다. 그림 8은 연속된 훈련동작을 추정하여 3차원 상에 표현한 결과를 나타낸다. 3차원 상에서 훈련자의 하지는 육각기 등으로 나타내고, 적외선 마커는 구 모양으로 나타낸다. 그림 8은 좌에서 우로 시간변화에 따른 훈련자의 움직임 변화를 나타낸다. 그림 8의 공간상에 그려진 선은 카메라가 훈련자를 바라보는 방향을 나타내고, 각 훈련 상황은 실제 카메라가 바라보는 방향과 다른 방향에서 훈련자의 움직임을 관찰할 수 있음을 나타내기 위해 거울을 기준으로 좌에서 우로 카메라를 이동하며 세 방향에서 관찰한 그림이다. 이는 실제 카메라 영상에서 잘 보이지 않는 움직임을 관찰하고자 할 때 유용하다.

5. 결론 및 향후 연구

현재의 시스템은 훈련자의 하지 모션을 단일 카메라를 이용하여 캡처하고 이를 3차원 공간상에서 해석할 수 있음을 보여주었다. 평면거울에 부착한 마커의 위치를 카메라 관점에서 해석하여 거울 면을 기준으로 하는 3차원 공간을 구성할 수 있고, 이를 통해 카메라를 통해 입력되는 마커의 3차원 움직임을 예측할 수 있었다. 이는 기존의 여러 대의 카메라를 사용하는 방식보다 빠른 추정이 가능하고 저렴한 비용으로 시스템 구축이 가능한 장점이 있으므로 효율적인 활용이 가능하다. 더불어 저렴하고 구하기 쉬운 장치를 사용함으로써 장치구성의

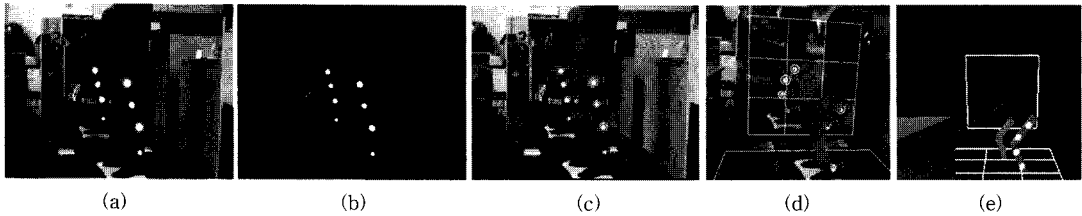


그림 7 영상에서 인식된 마커의 3차원 추정결과, (a) 실제훈련 영상, (b) 전처리를 통한 배경제거와 마커추출, (c) 마커인식과 탐색, (d) 추정된 3차원 자세의 중강, (e) 3차원 그래픽스를 통한 결과표현

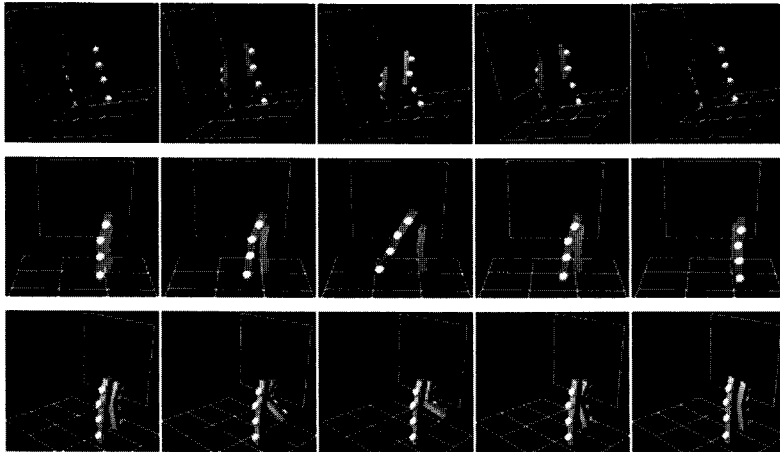


그림 8 세 가지 훈련자세에 대한 시간의 변화에 따른 자세 변화과정 추정결과
(상) 양 무릎 굽히기, (중) 왼쪽 다리 앞으로 들기, (하) 오른쪽 다리 뒤로 굽히기

복잡도가 낮고 비교적 손쉽게 설치할 수 있으므로 홈-케어(home-care) 재활시스템으로 활용가능하다.

간혹 훈련자의 훈련 시나리오의 진행 중에 양 하지간의 간섭이나 카메라 각도에 의해 움직임 추적이 되지 않는 경우에 대한 향후연구가 필요하다. 특히 양 하지의 움직임 특징을 분석하고 이를 데이터베이스화 하여 활용할 수 있도록 사람의 직립자세와 보행 자세에 대한 움직임 특징 분석이 필요하고, 이 데이터와 더불어 자세에 따른 압력센서의 압력분포와 변화량을 분석하여 소실된 움직임을 예측하는 방법에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 이양수, 정순기, "동작분석을 이용한 보행훈련 장치", (출원번호)10-0702898. 경북대학교 산학협력단, 2007.
 [2] 김상운, 정승대, 김상호, 정순기, 이양수, 김철현, "하지 재활을 위한 모션캡처 기반 재활훈련 시스템 개발", *HCI2007 학술대회 논문집*, no.1, pp.109-114, 2007.
 [3] J. M. Park, C. G. Looney and H. C. Chen, "Fast connected component labeling algorithm using a divide and conquer technique," *Conf. on Computers*

and Their Applications, pp.373-376, 2000.

[4] T. Darrel, G. Gordon, M. Harville, and J. Woodfill, "Integrated person tracking using stereo color and pattern detection," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.601-609, June 1998.
 [5] L. Zhi, J. Tang, "A Complete Linear 4-Point Algorithm for Camera Pose Determination," *MMRC, AMSS, Academia, Sinica, Beijing*, no.21, pp.239-249, December 2002.
 [6] K. H. Jang, D. H. Lee and S. K. Jung, "A moving planar mirror based approach for cultural reconstruction," *Computer animation & Virtual worlds*, vol.15, no.3-4, pp.415-424, July, 2004.