

논문 2012-49SC-1-4

# 단일 카메라를 이용한 동역학 기반의 보행 동작 추적

## ( Tracking a Walking Motion Based on Dynamics Using a Monocular Camera )

유태근\*, 최재림\*\*, 김덕원\*\*\*

( Tae Keun Yoo, Jae Lim Choi, and Deok Won Kim )

### 요 약

보행을 관찰하고 객관적인 정보를 추출하여 그 기능을 평가하는 것을 보행 분석이라고 한다. 최근 사용되는 보행 측정 장비들은 다수의 카메라, 지면 반력 측정 장치로 구성되어 고가이며, 이를 설치할 넓은 장소를 필요로 한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 단일 카메라를 통해 얻은 영상에서 마커 없이 인체의 3차원 보행 동작을 측정하는 기법을 제안한다. 파티클 필터를 사용하여 혼란 데이터와 보행에 관한 사진 정보 없이 사람의 동작을 추적한다. 인체와 지면에 관한 동역학을 통해 물리적으로 합당한 인체의 동작들을 생성하였다. 보행 영상에서 계산한 모든 관절의 평균 에러는 제안한 방법에서 12.4°로, 기존 파티클 필터의 에러 34.6°보다 작았다. 이러한 결과를 바탕으로 단일 카메라만으로 보행을 정량적으로 측정하여 기존 복잡한 장비를 대체할 수 있는 가능성을 제시하였다.

### Abstract

Gait analysis is an examination which extracts objective information from observing human gait and assesses the function. The equipments used recently for gait analysis are expensive due to multiple cameras and force plates, and require the large space to set up the system. In this paper, we proposed a method to measure human gait motions in 3D from a monocular video. Our approach was based on particle filtering to track human motion without training data and previous information about a gait. We used dynamics to make physics-based motions with the consideration of contacts between feet and base. In a walking sequence, our approach showed the mean angular error of 12.4° over all joints, which was much smaller than the error of 34.6° with the conventional particle filter. These results showed that a monocular camera is able to replace the existing complicated system for measuring human gait quantitatively.

**Keywords** : motion tracking, monocular camera, walking motion, particle filter, dynamics

## I. 서 론

인체의 운동 중 보행을 관찰하고 객관적인 정보를 추

출하여 그 기능을 평가하는 것을 보행 분석(gait analysis)이라고 한다<sup>[1]</sup>. 여러 장비를 통해 보행에 이상이 있는 사람의 운동을 측정하여 여러 지표를 얻을 수 있고, 이를 통해 정량화된 정보를 제공받고 효과적인 치료를 선택하며, 객관적인 예후 평가가 가능하다. 특히 신경계 질환과 근골격계 질환을 갖고 있는 환자들을 대상으로 한 보행 분석 연구들이 진행되어 왔다<sup>[2~4]</sup>. 보행 분석은 주로 Vicon Motion Analysis System (Oxford Metrics Inc, Oxford, U.K)과 같은 3차원 모션 캡처(motion capture) 장비를 사용한다<sup>[5~6]</sup>. 이 시스템은 다수의 적외선 카메라, 적외선 마커(marker), 지면 반력 측정 장치인 힘 측정판(force plate)으로 구성된 고가의

\* 학생회원, 연세대학교 의학전문대학원  
(College of Medicine, Yonsei University)

\*\* 학생회원, 연세대학교 생체공학협동과정  
(Graduate Program in Biomedical Engineering,  
Yonsei University)

\*\*\* 평생회원, 연세대학교 의과대학 의학공학교실  
(Dept. of Medical Engineering, Yonsei University  
College of Medicine)

※ 본 연구는 2011년 연세대학교 의과대학교 학생 연구비 지원으로 이루어졌음.

접수일자: 2011년8월18일, 수정완료일 2011년12월15일

장비와 소프트웨어로 구성되어 있으며, 이를 설치하기 위해서 넓은 공간을 확보해야 한다. 또한 측정에 많은 시간과 동작 분석을 위한 전문 인력이 필요하다는 단점이 있다. 따라서 임상적으로 사용하기 위해서 기존 장비보다 더 간편하게 환자의 보행 이상을 검사하는 장비의 필요성이 증가되고 있다<sup>[7]</sup>.

단일 카메라로 촬영된 영상도 보행을 해석 할 수 있는 정보를 충분히 담고 있다. 이 영상에서 운동을 추출하여 분석 할 수 있다면, 복잡한 동작 분석 기기의 사용 없이 환자들의 병적 보행을 선별검사 할 수 있을 것이다. 단일 영상에서 사람의 동작을 복원하는 것은 인체의 많은 자유도(degrees of freedom)와 가려져 보이지 않는 부분으로 인해 상당히 어려운 문제로 인식되고 있다<sup>[8]</sup>. 지금까지 개발된 방법은 다음과 같이 두 가지로 나눌 수 있다. 입력 영상에서 여러 자세를 대조해 최적의 자세를 찾는 모델기반 탐색 방법(model-based approach)과 기계 학습 방법을 사용하는 학습기반 방법(learning-based approach)이다<sup>[8-9]</sup>. 모델기반 탐색 방법은 학습 데이터가 필요 없다는 장점이 있지만, 운동을 추적하는데 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 대표적인 방법으로 파티클 필터(particle filter)가 있다<sup>[10]</sup>. 학습기반 방법은 학습 시간이 오래 걸리고 많은 학습 데이터가 필요하다는 단점이 있으나 일단 학습을 마치면 비교적 빠른 시간에 자세를 찾아주는 시스템을 구축할 수 있다<sup>[9]</sup>. 이 외에 발이 지면 높이에 있다는 가정 하에 발목 높이에서의 다리를 추적하는 방법<sup>[7]</sup>, 보폭과 보행 주기에 관한 사전 정보를 사용하는 방법<sup>[11]</sup>, 훈련 데이터를 결합한 시뮬레이터<sup>[12]</sup> 등을 사용하였으나 근본적인 해결책을 제시하지 못했다. 특히 지면과 인체의 접촉 관계가 설정되지 않은 채로 영상 안에서 인체 추적을 하기 때문에 미끄러지거나 공중에 떠있는 추적 결과가 나와 보행 분석에 사용하기에는 부적절하였다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 동역학을 결합한 파티클 필터를 제안한다. 단일 카메라로 동작을 추적할 때, 움직임과 접촉의 관계를 고려하는 방법으로 동역학을 제안하였으며 이를 파티클 필터에 결합하였다. 이를 이용하여 단일 카메라에서 사람의 보행 분석을 시도하였다. 다물체 동역학(multi-body dynamics)을 사용하여 인체의 지면에 대한 반발력을 계산하고 지면과 인체의 접촉 관계를 설정하여 파티클 필터 내에서 지면 접촉에 합당한 인체 자세들을 생성하여 추적하였다. 저사양의 캠코더를 사용하여 얻은 영상

에서 사람의 자세를 복원할 수 있으며, 이를 바탕으로 관절에 걸리는 모멘트와 같은 운동역학적 지표를 추정하였다.

## II. 본 론

### 1. 영상 처리 및 인체 모델링

단일 카메라에서 얻은 2차원 영상에서 3차원의 인체 운동을 측정하기 위해서는 영상과 투영된 인체 모델간의 유사도(likelihood)를 평가하는 것이 중요하다<sup>[8]</sup>. 따라서 적절한 영상 처리의 방법과 인체 모델의 선택이 동작 추적의 성능에 큰 영향을 끼친다. 본 연구에서는 인체의 주요 관절들의 회전각을 운동을 서술하는 변수로 두고 그림 1과 같은 실루엣(silhouette) 영상과 엣지(edge) 영상에서 운동을 추적하였다.



그림 1. 원영상, 엣지 영상, 실루엣 영상의 예  
Fig. 1. An example of original, edge, and silhouette images.

#### 가. 인체 모델의 설계

사용된 3차원 인체 모델은 인체의 주요 관절의 19 자유도와 몸의 이동과 회전을 고려한 6 자유도를 합하여 25차원의 상태 벡터  $X$ 로 표기하였다. 주요 관절은 목 관절 2자유도, 허리 관절 1 자유도, 다리는 각각 고관절 2 자유도, 무릎관절 1 자유도, 발목관절 1 자유도 총 4 자유도로 설정하였고, 팔은 각각 어깨관절 3 자유도, 팔꿈치관절 1 자유도로 구성하였다. 동작 추정에 사용된 인체 모델은 각 신체 부위를 원통과 타원으로 모델링하였다. 인체 모델은 미리 구해놓은 카메라 투영 행렬(projection matrix)을 통해 입력 영상에 투영되어 유사도를 구할 수 있다.

#### 나. 실루엣 및 엣지 영상

영상에서 인체 영역을 추출하고 추정한 동작을 평가하는 방법에는 여러 가지가 있는데, 실루엣 영상과 엣지 영상을 가장 널리 사용한다<sup>[8-10]</sup>. 실루엣은 미리 준비해놓은 배경 영상과 입력 영상과 차이를 구한 것이

다. 따라서 배경과 상관없이 인체 영역을 추출할 수 있으며, 옷의 무늬나 색에 영향 없이 사람의 형상 정보를 얻을 수 있다. 엣지 영상은 영상 안에서의 경계선을 나타내는 영상으로 실루엣 영상에서 제거된 정보를 복구하는 역할을 한다<sup>[13]</sup>. 원통과 타원으로 구성된 인체 모델이 투영되어 실루엣 영상의 인체 영역을 많이 덮을수록 유사도는 증가한다. 또한 인체 모델의 가장자리가 엣지 영상의 인체 영역과 많이 겹칠수록 유사도는 증가한다. 인체 모델과 인체 실루엣이 겹치는 픽셀의 수를  $N_{sh}$ , 인체 모델의 가장자리와 인체의 엣지 영역과 겹치는 픽셀의 수를  $N_{ed}$ 라 하면, 입력 영상  $I$ 에 대한 상태 벡터  $X$ 의 유사도  $p(I|X)$ 는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\log p(I|X) = \alpha N_{sh} \times (1 - \alpha) N_{ed} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\alpha$ 는 실루엣 영상과 엣지 영상에 대한 가중치를 의미한다. 이렇게 계산된 유사도는 상태  $X$ 에 대한 관측을 의미하므로 뒤에 나올 파티클 필터의 각 상태들의 가중치를 대체하게 된다.

## 2. 동역학 기반 파티클 필터

모든 이상 동작을 보이는 환자들의 영상 데이터를 확보 할 수 없기 때문에, 훈련 데이터나 사전 정보 없이 보행 동작을 측정해야 한다. 본 연구에서는 이에 가장 대표적인 방법인 파티클 필터 방법을 사용한다. 동역학을 사용하여 다물체로 구성된 인체 모델과 바닥의 접촉을 고려하였고<sup>[14]</sup>, 이를 통해 물리적인 조건들을 만족시키는 동작을 생성하여 추적하였다. 그림 2에서 기존 파티클 필터는 지면 접촉과 상관없이 샘플을 생성하는데 반해, 제안한 동역학 기반 파티클 필터는 동역학을 통해 바닥에 접촉된 샘플들을 생성하는 것을 볼 수 있다.

### 가. 동역학 해석

본 연구에서는 동역학을 이용해 지면 접촉 여부를 결정하고 관절의 모멘트를 구한다. 인체 모델이 자세를 나타내는 상태 벡터  $X$ 의 자세로 지면에 접촉해 있을 때, 운동을 해석하는 동역학 방정식은 아래와 같이 쓸 수 있다<sup>[14~15]</sup>.

$$M\ddot{X} + C + G + J_c^T F_c = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 1} \\ \tau \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 인체 모델에 대한  $M$ 은 관성 행렬(inertia

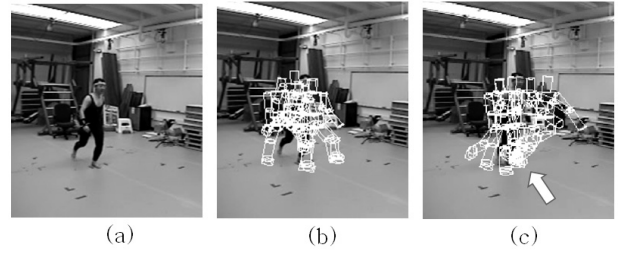


그림 2. (a) 원영상, (b) 기존 파티클 필터의 전신 모델 파티클 분포, (c) 왼쪽 다리가 지면에 접촉한(화살표) 동역학 기반 파티클 필터의 파티클 분포

Fig. 2. (a) original image, (b) particle distribution for a full body model with a conventional particle filter, (c) particle distribution in contact between left leg and base (arrow) with a particle filter based on dynamics.

matrix)이며,  $C$ 와  $G$ 는 코리올리(Coriolis)의 힘과 중력에 의한 힘을 의미한다.  $J_c$ 는 접촉점의 자코비안(jacobian)으로 인체의 자세  $X$ 와 지면의 접촉을 나타내는 행렬이며  $F_c$ 는 접촉면으로 지면에서 받는 힘을 나타낸다. 오른쪽 항의  $0_{6 \times 1}$ 은 몸의 이동과 회전에는 힘이나 모멘트가 없다는 것을 나타낸다. 전체 25 자유도에서 몸의 이동과 회전에 해당되는 6 자유도를 제외한 19개의 관절의 모멘트를  $\tau$ 로 나타내었으며, 이는 사람이 관절에 주는 힘을 의미한다. 식 (2)에서 반력에 의해 다리의 접촉점에서의 속도와 가속도가 0이라는 조건을 고려하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$N_c^T \begin{bmatrix} 0_{6 \times 1} \\ \tau \end{bmatrix} = M\ddot{X} + N_c^T(C + G) + J_c^T A_c J_c \dot{X} \quad (3)$$

$$F_c = \bar{J}_c^T \begin{bmatrix} 0_{6 \times 1} \\ \tau \end{bmatrix} - \bar{J}_c^T(C + G) + A_c J_c \dot{X} \quad (4)$$

식 (3, 4)에서  $N_c$ 는 지면 접촉에 대한 영공간 행렬(null space matrix)로  $N_c = I - \bar{J}_c J_c$ 로 정의된다. 여기서  $\bar{J}_c$ 는 일반 역행렬(generalized inverse matrix)이다.  $A_c$ 는 접촉점에서 관측된 인체 모델의 관성 행렬이며  $A_c = (J_c M J_c^T)^{-1}$ 이다. 식 (3)에서 수치적인 방법으로 관절의 모멘트  $\tau$ 를 구하면 식 (4)에 대입하여 접촉면의 반력  $F_c$ 를 구할 수 있다. 양쪽 발이 모두 지면에 닿았다 가정했을 때, 한쪽의  $F_c$ 가 기준 크기보다 크다면 그 발의 접촉면은 지면에 고정된 것으로 볼 수 있다.

### 나. 파티클 필터

확률 분포를 해석적으로 구하는 칼만 필터(Kalman filter)와는 달리 파티클 필터는 다음과 같은 과정을 거친다. 파티클 필터는 다수의 파티클 혹은 샘플 상태를 만들고 이들을 평가하고 선택한다. 이를 바탕으로 확률 분포를 근사하게 추정하여 다음 상태를 예측한다<sup>[10~12]</sup>. 인체의 운동과 같이 다음 상태를 예측할 수 없는 경우에는 다양한 상태의 파티클을 만들기 위해 가우시안 노이즈(Gaussian noise)를 사용한다. 영상의  $k$ 번째 프레임에서 생성되는 파티클의 추정 상태  $\overline{X}_k$ 는 이전 상태인  $X_{k-1}$ 에 분산  $\sigma$ 를 갖는 가우시안 노이즈  $\Sigma(\sigma)$ 를 더한 것으로 볼 수 있다.

$$\overline{X}_k = X_{k-1} + \Sigma(\sigma) \quad (5)$$

그러나 이러한 가우시안 노이즈에 의해 물리적인 조건들이 무시되는 파티클 상태들이 만들어지게 된다. 이

를 극복하기 위해 앞서 동역학에서 정의 했던 영공간 행렬  $N_c$ 를 노이즈  $\Sigma(\sigma)$ 에 곱하여 발과 지면이 접촉하는 새로운 자세들을 생성할 수 있다.

$$\overline{X}_k = X_{k-1} + N_c \times \Sigma(\sigma) \quad (6)$$

일반 가우시안 노이즈를 통해 생성된 샘플들과 영공간 행렬을 통해 생성된 샘플들의 차이의 예는 그림 2에 나타내었다. 동역학을 결합하여 동작 탐색 영역을 축소하여 더 높은 확률로 실제 동작과 유사한 동작에 샘플을 만들 수 있다는 것을 보여준다. 지면에 접촉한 다리는 고정된 상태로 가우시안 노이즈에 의해 다양한 자세의 파티클을 생성하게 된다. 동역학을 기반으로 한 파티클 필터 알고리즘은 그림 3에 나타내었다. 최종 영상 추적의 결과는 각 프레임 별로 생성한 모든 파티클의 평균 상태인 인체 모델들의 평균 자세로 채택하였다.

## III. 실험

### 1. 실험 방법

마커를 사용하지 않고 고정된 저사양의 캠코더로 촬영된 보행 동작들을 분석하였다. Carnegie Mellon University motion capture database<sup>[16]</sup>의 평지에서 정상인의 일반 보행 및 넓은 보폭 보행 동영상과 실내에서 직접 촬영한 동영상을 분석하였다. 각각 영상에서 Gold Standard algorithm<sup>[17]</sup>을 이용하여 카메라의 투영 행렬을 추정하였다. 분석을 해석하기 쉽게 하기 위해 첫 프레임에서 인체가 서있는 바닥 위치를 원점으로 하여 투영 행렬을 결정하였다. 영상 분석 및 동역학 및 파티클 필터를 사용하기 위해 MATLAB version R2010a (Mathworks Inc, Natick, USA)을 사용하였다. 모든 실험에서 파티클의 숫자는 2000으로 하여 실험을 진행하였다. 초기 상태에는 지면 접촉 여부를 파악 할 수 없으므로 처음 두 프레임은 동역학적 구속조건 없이 파티클 필터를 통해 동작을 추적하였으며, 그 이후에는 동역학 해석 결과를 반영한 파티클 필터를 사용하였다.

본 연구의 보행 분석 알고리즘의 성능을 측정하기 위해 동영상 촬영과 동시에 진행된 Vicon Motion Analysis System의 모션 캡처 데이터를 동작의 참값으로 보고 보행 분석 결과를 비교하였다. 비교 지표로 인체 모델의 19개 관절 각도와 몸의 회전 각도에 대한 평균 에러<sup>[9]</sup> 값  $\epsilon$ 을 다음과 같이 계산하였다.

### Algorithm

#### (1) Initialization

- Set  $k = 0$ .
- Set number of particle as  $N$ .
- Set initial state (pose)  $X_0$ .

#### (2) Sampling step

- Set  $k = k + 1$ .
- Analysis  $X_{k-1}^{mean}$  using dynamics and check contact between base and body via (4).
- For  $i = 1, \dots, N$ ,  
if  $X_{mean}^{(i)}$  in contact, draw  $\overline{X}_k^{(i)}$  via (6),  
else draw  $\overline{X}_k^{(i)}$  via (5).
- For  $i = 1, \dots, N$ , calculate the weights  $w_k^{(i)} \propto p(I_k | X_k)$  via (1).
- For  $i = 1, \dots, N$ , normalize the weights.

#### (3) Selection step

- Resample from  $\{\overline{X}_k^{(1)}, \dots, \overline{X}_k^{(N)}\}$  with probability proportional to  $w_k^{(i)}$  to produce random samples  $\{X_k^{(1)}, \dots, X_k^{(N)}\}$ .

#### (4) Save the mean value $X_k^{mean}$ .

#### (5) Go to sampling step

그림 3. 인체 운동 추적을 위한 동역학 기반 파티클 필터의 알고리즘

Fig. 3. Algorithm of particle filter based on dynamics for human motion tracking.

$$\epsilon = \left[ \int_{t_0}^{t_0+T} \left( \sum_{k=1}^J |\theta_{result}^k - \theta_{Vicon}^k| / J \right) dt \right] / T \quad (7)$$

식 (7)에서  $t_0$ 는 측정 시작 시간,  $T$ 는 보행 주기,  $J$ 는 관절의 수,  $\theta_{result}^k$ 는  $k$ 번째 관절에서의 추적 결과 관절 각도,  $\theta_{Vicon}^k$ 은 모션 캡처의 관절 각도이다. 평균 에러 값은 Vicon의 운동 추적 결과와 얼마나 유사한가를 나타내는 지표라 볼 수 있다. 계산을 위해 모션 캡처 데이터의 62개 관절 각도에서 인체 모델의 관절에 해당되는 19개의 관절 각도를 추출하였다. 제안된 방법을 평가하기 위해 모델기반 탐색 방법 중 가장 널리 사용되는 Deutscher<sup>[10]</sup> 등이 제안한 파티클 필터로 동작추적을 하였다<sup>[8]</sup>. 이 경우 앞서 서술한 방법과 동일한 인체 모델과 가우시안 노이즈를 사용하였고, 이 결과를 제안한 방법의 동작 추적 결과와 비교하였다.

2. 실험 결과

그림 4는 일반적인 보행을 보이는 영상에서 운동을 복원한 결과이다. 기존 파티클 필터를 사용하여 운동추적을 한 결과, 양쪽 발과 지면과의 접촉이 떨어지고 이에 따라 연속적으로 잘못된 자세를 취하게 된다. 지면 접촉과 상관없이 영상과 유사도가 높은 자세를 찾기 때문에 실제 자세와 다른 자세에 과잉 적합(over-fitting)이 발생하였다. 이 경우 왼쪽 발을 접지한 것과 유사한 자세로 계속 동작을 추적하여 제대로 보행 동작을 추출하지 못했다. 이에 반하여 제안한 방법을 사용하여 얻은 동작은 보행 시 지면과의 접촉이 고려되어 실제 보행과 유사였다. 발이 지면에 닿아 있는 입각기(stance)와 지면에 떨어지는 유각기(swing)가 교대로 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 5에는 정상적인 보행이 아닌 인위적으로 큰 보폭을 보이는 영상을 추적한 결과를 나타내었다. 보폭이 큰 경우 정상보다 더 빠른 주기로 부자연스러운 움직임의 보행 양상을 보인다. 카메라와 가까운 발을 내딛음으로 두 발의 교차가 이루어지는데, 기존 파티클 필터를 사용하였을 경우 한쪽 발이 가려지는 동작을 추적하지 못한다. 결국 카메라와 가까운 발이 계속 앞쪽에 위치하여 주기적인 보행이 나타나지 않고 미끄러져 나가는 운동을 보였다. 그러나 제안된 방법에서는 접지된 발이 고정되어 두 발이 교차된 운동을 추적하였다.

표 1은 이 두 가지 방법을 이용한 정상 보행 영상의

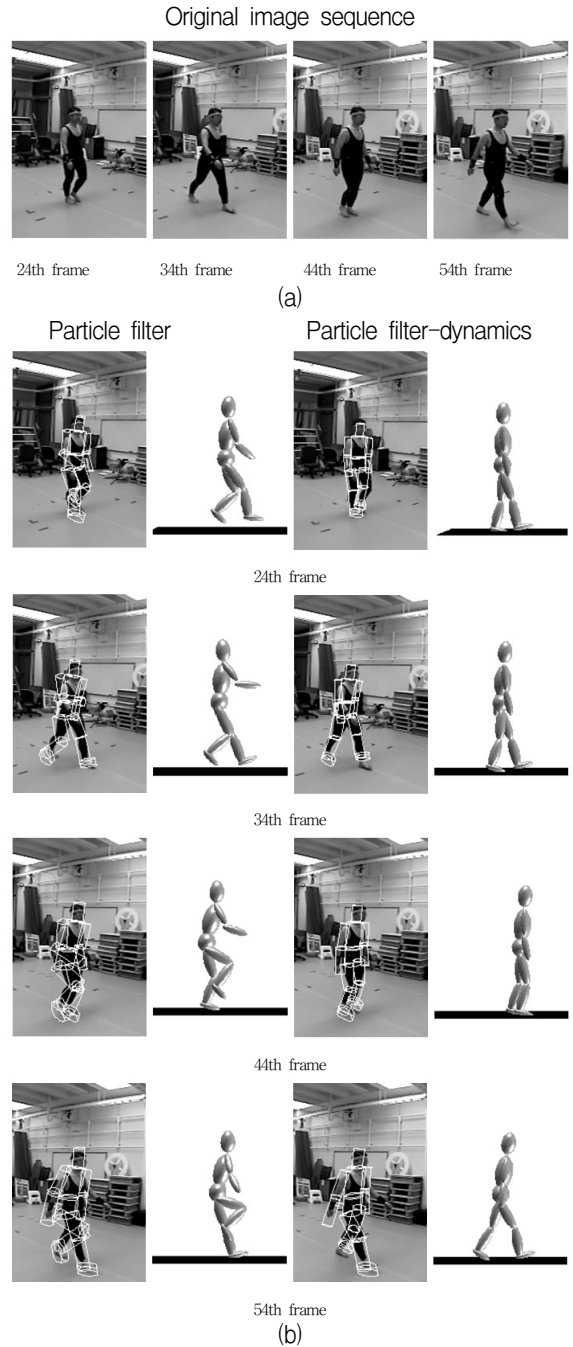


그림 4. 단일 보행 영상에서의 3차원 운동 복원, (a) 원 영상, (b) Deutscher가 제안한 파티클 필터(왼쪽)와 제안한 동역학 기반 파티클 필터(오른쪽)의 비교, 추적된 인체 모델을 투영한 영상과 측면에서 본 3차원 모델

Fig. 4. 3D motions reconstructed from a monocular sequence of walking, (a) original image sequence, (b) comparison between particle filter proposed by Deutscher (left) and proposed particle filter based on dynamics (right), illustrated projection of the tracked model into image and 3D model from side-view.

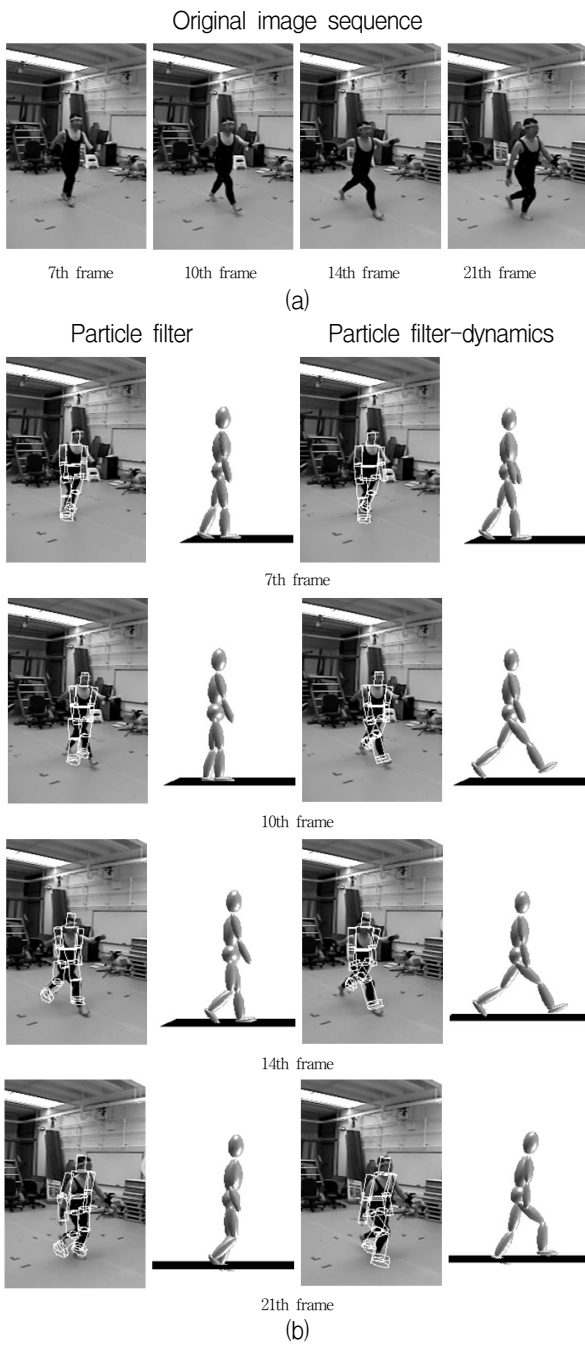


그림 5. 큰 보폭의 단일 보행 영상에서의 3차원 운동 복원, (a) 원영상, (b) Deutscher가 제안한 파티클 필터(왼쪽)와 제안한 동역학 기반 파티클 필터(오른쪽)의 비교, 추적된 인체 모델을 투영한 영상과 측면에서 본 3차원 모델

Fig. 5. 3D motions reconstructed from a monocular sequence of walking with big stride, (a) original image sequence, (b) comparison between particle filter proposed by Deutscher (left) and proposed particle filter based on dynamics (right), illustrated projection of the tracked model into image and 3D model from side-view.

표 1. 모든 관절 각도에서의 평균 추정 에러, Deutscher가 제안한 파티클 필터와 제안한 동역학 기반 파티클 필터간의 비교

Table 1. Comparison of the mean estimation error over all joint angles between the particle filter proposed by Deutscher and our proposed particle filter based on dynamics.

		Mean ± Standard Deviation	
		Particle filter	Particle filter -dynamics
Average error (in degrees)	full body joint	34.63 ± 46.30	12.38 ± 10.42
	upper body	3.81 ± 2.93	4.35 ± 4.73
	left arm	28.75 ± 19.12	24.44 ± 17.40
	right arm	10.41 ± 18.94	17.17 ± 18.97
	lower body	10.59 ± 6.03	6.97 ± 5.48
	left leg	23.84 ± 17.10	15.17 ± 12.14
	right leg	69.47 ± 64.86	15.01 ± 10.26

동작 추적 성능을 Vicon을 이용한 모션 캡처 데이터와 비교한 결과이다. 제안한 방법은 몸 전체의 관절에 대해 평균 추정 에러 12.38°를 보였다. 이는 기존 파티클 필터의 34.63°보다 작은 값이므로 보다 우수한 성능을 나타낸다. 기존 파티클 필터의 경우 보행 중 다리의 교차가 이뤄지지 않아 한쪽 발이 계속 접지하게 되고, 이로 인해 접지된 다리에서 높은 에러를 보인다. 그러나 동역학 기반의 파티클 필터에서는 실제 보행과 유사한 움직임을 보였으며 왼쪽, 오른쪽 다리에서 각각 15.17°, 15.01°의 균일한 평균 에러를 보였다. 동역학 기반 파티클 필터에서 팔과 상체는 지면과의 접촉이 없기 때문에 추적에 다리 접촉에 의한 동역학의 영향을 거의 받지 않는다. 팔 동작 추적에서는 기존 파티클 필터가 동역학 기반 파티클 필터보다 더 좋은 결과를 보였다. 그러나 그림 4과 그림 5에서 볼 수 있듯 두 방법 모두 빠르게 움직이고 몸과 겹쳐지는 팔을 실제 동작과 유사하게 추적하지 못하였다.

정상 보행 영상에서 얻은 다리 운동의 프레임별 운동형상학적(kinematic) 변수들을 Vicon을 이용한 모션 캡처 데이터와 함께 그림 6에 나타내었다. 고관절의 경우 거의 유사하게 움직임을 추적해내었다. 무릎 관절은 영상에서 카메라와 멀리 떨어져 있던 초기에는 그 움직임을 정확히 얻지 못했으나 카메라와 가까워지면서 모션 캡처 데이터와 유사한 결과를 나타내었다. 그러나 그에 따른 오차도 더욱 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 발목의 경우 그 움직임을 잘 얻어내지 못했다. 이는 옛지 영상과 실루엣 영상을 만들면서 세부적인 정보들이 소실

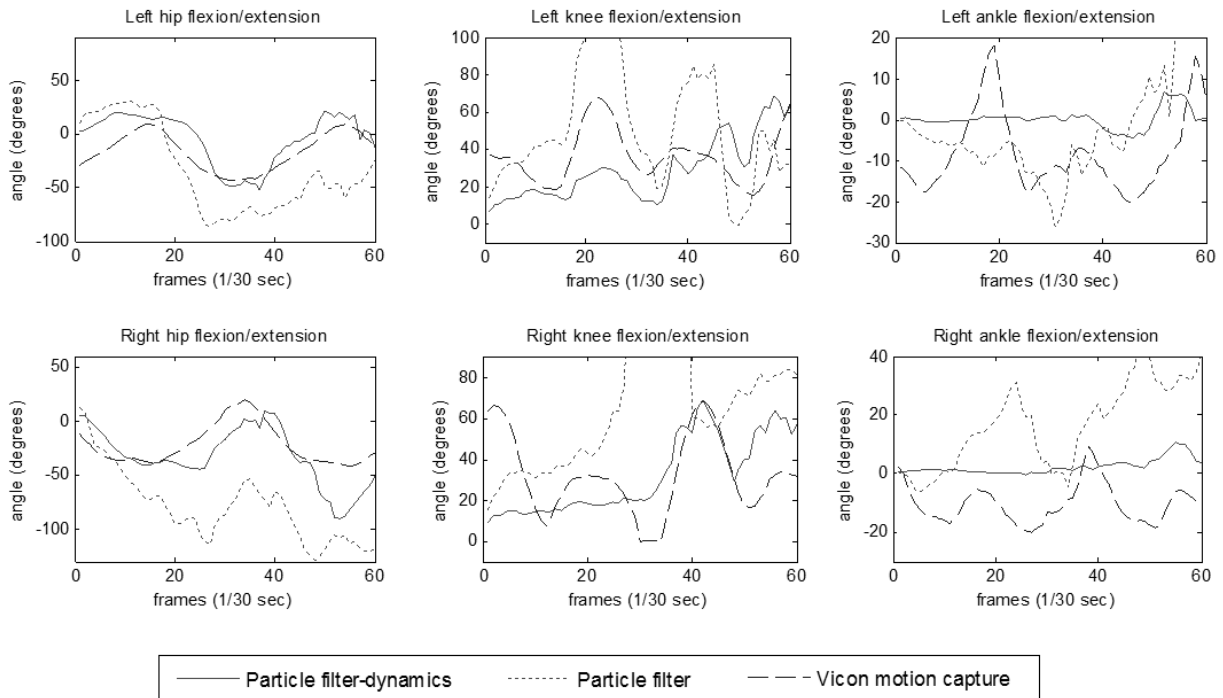


그림 6. 단일 보행 영상을 복원하여 얻은 운동형상학적 데이터로 고관절, 무릎관절, 발목관절의 관절 각도  
 Fig. 6. Kinematic data from motions reconstructed from a monocular sequence of walking, joint angles of the hip, knee and ankle.



그림 7. 실내에서의 보행 영상(위)과 제안한 방법을 통한 3차원 보행 동작 추정 결과(아래)  
 Fig. 7. Original indoor image sequence (top) and 3D walking motion estimated by the proposed method (bottom).

되는데, 상대적으로 작은 발목의 움직임이 함께 사라져 나타난 것으로 생각된다. 이와 반대로 기존 파티클 필터의 경우 동작 추적의 실패로 실제 발이 영상의 발과 다른 곳에 있어 추적에 실패하여 발목 관절의 움직임이 큰 오차를 보였다.

그림 7은 정상인이 일반적인 실내 환경에서 촬영한

보행 영상을 분석한 결과이다. 고정된 카메라로 지면과 발의 접촉을 모두 담을 수 있도록 전신 동작을 촬영하였다. 복잡한 배경과 평범한 복장을 한 경우에도 제안한 방법을 통해 보행 동작을 얻을 수 있었다. 그러나 동역학적 정보가 부족한 양팔의 교차는 정확한 해석에 실패한 것을 확인 할 수 있다.

#### IV. 결 론

지금까지 동작 추적 연구에서는 영상에서 동작을 찾거나 검출하는 알고리즘 개발에 집중되어왔다. 본 연구의 의의는 이와 달리 동역학을 결합하여 동작 탐색 영역을 물리적으로 타당한 동작 영역으로 제한하여 더 좋은 동작 추적 성능을 얻은 데 있다. 이를 바탕으로 단일 영상에서 파티클 필터에 동역학을 결합하는 방법을 제안하였고, 이를 사용하여 3차원 동작을 추적함으로써, 보행 동작을 분석할 수 있는 방법을 연구하였다. 동역학 해석을 통해 파티클 필터에서 지면 접촉의 구속 조건을 만족하는 파티클을 생성하였고, 보행 분석에 사용할 수 있는 물리적으로 타당한 동작을 복원하였다. 제안한 방법을 검증하기 위해 정상 보행 영상 및 큰 보폭의 비정상 보행 영상에서의 보행 분석을 하였다. 이때 모든 관절에서의 평균 예러는  $12.38^\circ$ 로 기존 파티클 필터의  $34.63^\circ$ 보다 우수한 성능을 보였다. 그러나 여전히 운동 복원의 정확도가 떨어져 계산된 운동형상학적 데이터를 실제 임상에서 보행 분석에 적용하기에는 한계가 있었다. 또한 동역학 기반 파티클 필터는 기존 파티클 필터에 동역학 연산을 추가하였기 때문에 같은 영상을 처리하는데 2배 정도의 시간이 걸리는 단점이 있었다.

추후 더 많은 파티클 숫자를 사용하여 정교하게 교정(calibration)된 고해상도의 카메라 영상에서 더 짧은 프레임 간격으로 동작을 추적한다면 향상된 성능을 얻을 것이다. 또한 미리 피험자의 신체를 계측하여 정확한 인체 모델을 사용한다면 더욱 정확한 추적 결과를 얻을 수 있을 것이다. 현재 많은 보행 분석 및 동작 측정에 사용되고 있는 마커 기반의 모션 캡처 장비들은 다수의 카메라, 힘 측정판 등의 고가의 장비로 구성되며, 동작 측정에 전문 인력과 많은 시간을 필요로 한다는 단점이 있다. 추후 단일 카메라에서 얻는 정보를 통해 사람의 동작 측정이 가능하다면, 이러한 단점들을 극복하여 기존 모션 캡처 장비들을 대신할 수 있을 것이다. 이를 바탕으로 임상에 적용되어 보행에 어려움을 겪는 환자들의 운동을 간편하고 효과적으로 분석하여, 치료와 예후 평가에 도움이 될 것이다.

#### 참 고 문 헌

[1] M. W. Whittle, "Clinical gait analysis: A

review", *Human Movement Science*, Vol. 15, no. 3, pp. 369-387, 1996.

- [2] 김덕용, 박창일, 안소영, 나상일, 박태훈, "정상 성인에서의 모의 뺨정다리 보행", *대한재활의학회지*, 제31권 제3호, pp.310-316, 2007.
- [3] E. S. Park, C. Park, H. J. Lee, D. Y. Kim, D. S. Lee and S. R. Cho, "The characteristics of sit-to-stand transfer in young children with spastic cerebral palsy based on kinematic and kinetic data", *Gait & Posture*, Vol. 17, no. 1, pp. 43-49, 2003.
- [4] 이재영, 이경중, 김영호, 이성호, 박시운, "가속도계를 이용한 편마비 환자의 보행 분석 알고리즘 개발", *전자공학회논문지*, 제 41권 SC편, 제4호, 177-240쪽, 2004년, 7월
- [5] 정진엽, 박문석, 최인호, 조태준, 유원준, 김진영, "정상 한국인의 3차원 보행분석", *대한정형외과학회지*, 제40권, 제1호, pp. 83-87, 2005.
- [6] M. W. Whittle, *Gait analysis: an introduction*, Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 127-161, 1996.
- [7] J. Courtney and A. M. de Paor, "A monocular marker free gait measurement system", *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, Vol. 18, no. 4, pp. 453-460, 2010.
- [8] R. Poppe, "Vision-based human motion analysis: An overview", *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 108, no. 1, pp. 4-18, 2007.
- [9] A. Agarwal and B. Triggs, "Recovering 3D human pose from monocular images", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 28, pp. 44-58, 2006.
- [10] J. Deutscher and I. Reid, "Articulated body motion capture by stochastic search", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1, no. 2, pp. 185-205, 2004.
- [11] M. A. Brubaker, J. Fleet, and A. Hertzmann, "Physics-Based Person Tracking Using the Anthropomorphic Walker", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 87, no. 1-2, pp. 140-155, 2010.
- [12] M. Vondrak, L. Sigal and O. C. Jenkins, "Physical simulation for probabilistic motion tracking", in *Proceedings IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Los Alamitos, USA, pp. 1-8, 2008.
- [13] G. Shakhnarovich, P. Viola and T. Darrell, "Fast pose estimation with parameter sensitive hashing", In *Conference on Computer Vision*,

Nice, France, pp. 750 - 757, 2003.

[14] L. Sentis, J. Park and O. Khatib, "Compliant Control of Multi-Contact and Center of Mass Behaviors in Humanoid Robots", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 26, no. 3, pp. 483-501, 2010.

[15] D. Baraff, "Issues in computing contact forces for non-penetrating rigid bodies", *Algorithmica*, Vol. 10, no. 2-4, pp. 292-352, 1993.

[16] R. Gross and J. Shi, *The CMU motion of body (mobo) database, Technical Report CMU-RI-TR-01-18*, Carnegie Mellon University, pp. 3-9, 2001.

[17] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 178-182, 2000.

— 저 자 소 개 —



유태근(학생회원)  
 2008년 서울대학교  
 기계·항공공학부(공학사)  
 2010년 서울대학교 대학원  
 기계·항공공학부  
 (공학석사)  
 2010년~현재 연세대학교  
 의학전문대학원

<주관심분야: 생체신호 계측 및 분석, 의료기기>



김덕원(평생회원)-교신저자  
 1976년 서울대학교 공과대학  
 (공학사)  
 1980년 Northwestern University  
 전자공학(MS)  
 1986년 The Univ. of Texas at  
 Austin 의공학(Ph.D)

1987년~현재 연세대학교 의과대학 의학공학교실  
 (조교수, 부교수, 교수)

2006년~현재 연세대학교 의과대학 BK21 의과학  
 과 교수

2008년 대한전자공학회 부회장 겸 시스템 및  
 제어소사이어티 회장

<주관심분야: 생체신호계측, 의료기기, 전자파 유  
 해성>



최재림(학생회원)  
 2010년 연세대학교  
 의용전자공학과(공학사)  
 2010년~현재 연세대학교 대학원  
 생체공학협동과정  
 (석사과정)

<주관심분야: 생체신호 계측 및 분석, 의료기기>