적외선 LED 랜드마크를 이용한 보행분석 시스템

Gait Analysis System Using Infrared LED Landmarks

도 치 윣, 서 영 수*

(Do Tri Nhut¹ and Young Soo Suh¹)

¹University of Ulsan

Abstract: A low cost gait analysis system, which can measure stride length, walking speed, and ground reaction force, is proposed. A gait analysis system is used for medical evaluation of patients and rehabilitation assistance. Low cost cameras are attached to a shoe and movement of a shoe is estimated using infrared LED landmarks. Ground reaction force is measured from pressure sensors, which are installed inside a shoe. Through experiments, it is shown that the proposed system can be used to obtain stride length, walking speed, and ground reaction force.

Keywords: gait analysis, motion tracking, vision system

I. 서론

보행분석 시스템은 사람의 걸음걸이를 분석하는 시스템이다[1]. 걸음걸이 분석을 통해서, 환자의 증상을 판별하거나 또는 재활정도를 알 수 있다[13,14]. 보행분석에서는 관절각도, 보폭, 보행속도, 지면반력(ground reaction force) 등의 정보를 얻는다.

관절각도는 각도계를 이용하여 관절사이의 각도차를 측정하거나, 경사계나 관성센서를 이용하여 직접 각도를 측정한다[2]. 보폭 및 보행속도는 범용 모션캡처시스템으로 측정할 수 있다[3]. 최근에는 주로 비전을 이용한 방식이 많이 사용되고 있다[4]. 비전을 이용한 방법은 정밀한 움직임의 측정이 가능하나, 제한된 공간에서의 측정만이 가능하고 일반적으로 장치들이 고가인 단점이 있다. 관성센서를 사용해 보폭 및 보행속도를 측정하는 방법도 개인용 항법시스템에서 사용되고 있다[5]. 하지만, 시간이 지남에 따라서 오차가 누적되는 단점을 가지고 있다. 지면반력은 바닥에 압력센서를 설치하는 방식과 신발에 압력센서를 설치하는 방식으로 나뉘어진다.

본 논문에서는 보폭, 보행속도, 지면반력을 측정할 수 있는 저가격의 시스템을 제작하였다. 3개의 적외선 LED로 구성된 막대를 일정간격으로 설치하여 위치 측정을 위한 랜드마크로 사용한다. 신발에 카메라를 설치하고 적외선 LED가 찍힌 영상에서 신발의 위치를 계산한다. 지면반력은 신발의 안에 설치한 압력센서에서 측정한다. 보행용 항법장치[6]의 테스트 등을 위해서는 정확한 보폭 및 보행속도를 측정할 필요가 있는데, 제안하는 시스템을 사용하면 저가격으로 보폭 및 보행속도를 측정하는 시스템을 구축할 수 있다.

반면에 [7]에서와 같이 관절각도 등의 정보는 제공하지 못하는 단점도 가지고 있다.

비전과 랜드마크를 이용한 경우, 움직이는 물체에 표식을 설치하고 외부의 카메라를 이용하는 outside-looking-in 방식과 움직이는 물체에 카메라를 설치하고 외부에 랜드마크를 설치하는 inside-looking-out 방식으로 나눌 수 있다[8].

본 논문에서는 카메라를 움직이는 신발에 장착한 inside-looking-out 방식을 사용하였다. 적외선 LED 막대는 수천원의 저가격으로 제작이 가능하고, 긴 길이의 보행분석이 필요할 때에도 쉽게 확장이 가능한 장점이 있다. 보폭의 측정오차가 수cm 이하가 되도록 하는 정밀도를 갖는 시스템을 구축하는 것이 목표이다.

II. 시스템 구성

신발에 카메라를 그림 1과 같이 설치하였다. 카메라 모듈은 4개의 적외선 랜드마크를 100Hz의 속도로 추정할 수 있고, 해상도는 128×96이다. 그림 1과 같이 3개의 카메라 모듈을 설치하였는데, 3개의 서포트(볼트 및 너트)를 사용하여 신발에 고정하였다.

그림 1. 신발에 설치된 카메라.

Fig. 1. Cameras installed on a shoe.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 4. 14., 수정: 2011. 5. 19., 채택확정: 2011. 5. 26.

도치윣, 서영수: 울산대학교 전기공학부

(trinhutdo@gmail.com/yssuh@ulsan.ac.kr)

※ 이 논문은 현대중공업 지원에 의한 울산대학교 전기공학부 일류화 연구비에 의하여 연구되었음.

그림 2. 적외선 LED 랜드마크.

Fig. 2. Infrared LED landmark.

그림 3. 신발에 설치된 압력센서 위치.

Fig. 3. Pressure sensor location installed on a shoe.

적외선 LED는 3개의 LED를 설치한 막대를 일정간격으로 그림 2와 같이 배치하였다. 막대 사이의 간격은 20cm이고, 25개의 막대를 사용하여 걸음걸이가 측정가능한 길이는 총 5m이다. 측정 가능거리는 LED 막대를 추가함으로써 쉽게 증가시킬 수 있다. LED는 특정 LED를 온오프하는 제어를 하지 않고, 모든 LED를 항상 켜 놓은 방식을 사용하였다.

압력센서는 Tekscan사의 FlexiForce를 사용하였고, 4개의 압력센서를 신발의 안창에 그림 3과 같이 설치하였다. 신발의 안창의 재질 및 지면바닥의 종류에 따라서 측정되는 힘의 크기가 달라져서, 정확한 압력의 측정은 가능하지 않다. 따라서 지면반력의 대략적인 경향을 아는데 사용될 수 있고, 또한 신발의 지면접촉여부를 판단하는데도 사용될 수 있다.

III. 신발의 움직임 추적

세계 좌표계 (world coordinate)와 카메라 좌표계(camera coordinate)의 두 개의 좌표계가 사용된다. 적외선 LED 랜드마크는 세계좌표계의 $x-y$ 평면상에 놓이는 것으로 가정한다(그림 2 참조). 즉, 적외선 LED 랜드마크의 z 좌표값(세계좌표계)은 전부 동일하고, 0으로 한다.

1. 위치 계산

카메라 모듈은 4개의 적외선 LED를 인식할 수 있다.

i 번째 적외선 LED의 세계좌표계 상에서 위치를 $p_{i,w}$ ($i=1,2,3,4$)라고 하고, 카메라좌표계 상에서 위치를 $p_{i,c}$ 라고 하면, 둘 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$p_{i,w} = C p_{i,c} + r_w \quad (1)$$

여기서 회전행렬 C 는 카메라좌표계와 세계좌표계 사이의 회전을 나타내고, 벡터 $r_w \in R^3$ 는 카메라좌표계의 원점을 세계좌표계로 나타낸 벡터이다. 즉, 신발의 위치는 r_w 로 알 수 있다.

i 번째 적외선 LED의 이미지 좌표계에서의 좌표값 $[u_i, v_i]'$ 와 카메라좌표계에서의 좌표값 $p_{i,c}$ 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$p_{i,c} = s_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 s_i 는 카메라좌표계의 원점과 i 번째 적외선 LED 사이의 거리를 나타낸다. 보행분석에서는 발의 움직임이 적외선 LED 랜드마크와 거의 평행하게 움직이기 때문에, $s = s_i$ 로 두는 약한-투시근사화 (weak perspective approximation)을 사용하였다.

$[u_i, v_i]'$ 와 $p_{i,w}$ ($i=1,2,3,4$)가 알려져 있을 때, s , C 및 r_w 를 구하는 문제는 다음의 최적화 문제에서 구할 수 있다.

$$\min_{s, C, r_w} \sum_{i=1}^4 \left\| p_{i,w} - s C \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} - r_w \right\|_2^2 \quad (3)$$

이 최적화 문제의 해는 잘 알려져 있는데[9,10], 결과를 정리하면 다음과 같다.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 \|\widetilde{p}_{i,w}\|_2^2}{\sum_{i=1}^4 \|\widetilde{q}_{i,w}\|_2^2}} \quad (4)$$

$$\widetilde{p}_{i,w} = p_{i,w} - \overline{p_w}, \quad \widetilde{q}_{i,w} = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} - \overline{q}$$

$$\overline{p_w} = 0.25 \sum_{i=1}^4 p_{i,w}, \quad \overline{q} = 0.25 \sum_{i=1}^4 \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C = V \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \det U \det V \end{bmatrix} U^T \quad (5)$$

여기서, 직교행렬 U 와 V 는 다음 행렬의 특이치 분해에서 얻어진다.

$$\sum_{i=1}^4 \widetilde{q}_i \widetilde{p}_{i,w}' = U \Sigma V'$$

마지막으로 r_w 는 다음 식에서 계산된다.

$$r_w = \overline{p_w} - s C \overline{q} \quad (6)$$

2. 랜드마크의 인식

카메라 모듈은 자체 영상처리를 통해 임의로 4개의 적외선 LED를 선택한다. 본 시스템에서는 총 78개의 적외선 LED를 사용하였는데, 78개의 적외선 LED 중 어떤 4개의 적외선 LED를 카메라 모듈이 선택하였는지 알 필요가 있다. 한가지 해결 방법은 적외선 LED의 온오프를 제어하여 카메라 모듈이 볼 수 있는 적외선 LED를 항상 4개가 되도록 하는 방법이 있다. 이 방법은 적외선 LED 인식문제를 쉽게 만드는 장점이 있으나, 시스템이 복잡해지고 카메라와 랜드마크 간에 통신이 필요한 단점이 있다. 본 논문에서는 모든 LED를 항상 켜 놓고, 카메라 모듈이 어떤 적외선 LED를 선택하였는지를 초기 위치에서부터 순차적으로 추정해 나가도록 하였다.

사용된 적외선 LED에 그림 2와 같이 번호를 붙였다. 보행분석의 초기위치에서는 1~9까지의 9개의 적외선 LED가 카메라모듈에서 보이는데, 카메라 모듈은 이 중 임의로 4개의 적외선 LED를 선택한다.

초기위치에서는 s , C , r_w 의 근사치를 신발과 랜드마크의 위치에서 알 수 있다. 이 값을 이용해 9개의 적외선 LED가 이미지좌표계의 어느 부분에 나타날 지를 예측할 수 있고, 실제 영상과 비교해서 카메라모듈이 어떤 적외선 LED를 선택했는지 알 수 있다.

s , C , r_w 가 알려져 있을 때, i 번째 LED의 이미지좌표계에서의 좌표는 식 (1)에서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$q_{i,predicted} = \frac{1}{p_{i,predicted}(3)} \begin{bmatrix} p_{i,predicted}(1) \\ p_{i,predicted}(2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서

$$p_{i,predicted} = C'p_{i,w} - C'r_w \quad (8)$$

k 번째 시각에서, 카메라가 포착한 4개의 LED의 이미지좌표를 각각 q_j ($j=1,2,3,4$)라고 할 때, q_j 가 78개의 LED 중 어떤 LED에 해당하는지를 인식하는 방법은 다음과 같다. k 번째 시각에서 C , r_w 은 알려져 있지 않기 때문에, 이전 시각에서의 값을 이용한다. 약한 투시근사화 모델을 사용하기 때문에, 회전행렬 C 는 z 축 회전각 θ 로 결정될 수 있다. k 번째 시각에서의 θ_k 와 r_k 은 다음과 같이 이전 시각의 값을 이용해 추정한다.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_k &= \theta_{k-1} + \alpha_{\theta,k}(\theta_{k-1} - \theta_{k-2}) \\ \hat{r}_k &= r_{k-1} + \alpha_{r,k}(r_{k-1} - r_{k-2}) \end{aligned} \quad (9)$$

(9)식에서 계산된 $\hat{\theta}_k$ 와 $\hat{r}_k$ 를 이용하여, 78개 LED의 이미지좌표계에서 예상위치 $q_{i,predicted}$ 를 식 (7)을 이용해 계산한다. 기본적인 아이디어는 만약에 카메라에 포착된 LED 좌표 q_j 가 $q_{56,predicted}$ 와 가장 가까이 있으면, q_j 는 56번째 LED에 해당한다고 판정한다. 카메라에 포착된 4개의 LED 중 j 번째 LED ($j=1,2,3,4$)가 78개 LED 중 어디에 해당하는지를 나타내는 기호로 f_j 를 사용한다. 조금 전의 예에서, f_j 는 56의 값을 가진다. f_j 를 찾는 문제는 다음의 최적화 문제로 나타낼 수 있다.

그림 4. 적외선 LED 번호 추정.

Fig. 4. Infrared LED number estimation.

$$\min_{f_j} \sum_{j=1}^4 \|q_j - q_{f_j,predicted}\|_2^2 \quad (10)$$

4개의 LED q_j 는 각각 다른 LED에 해당하므로, $j \neq l$ 일 때 $f_j \neq f_l$ 의 조건을 만족해야 한다. 최적화 문제 (9)번을 풀 때, 78개의 LED에 대해서 모두 확인할 필요는 없고, 주어진 C , r_w 상태에서 카메라에 보일 수 있는 LED에 대해서만 확인하면 된다.

그림 4에서 (10)식의 최적화 과정을 보이고 있다. 그림 4에서 '*' 표시된 부분이 카메라에 포착된 4개의 LED를 이미지좌표계에서 표시한 것이다. 1~10까지 번호가 붙여진 원이 (7)식에서 계산된 LED 1~10번의 예상 위치이다. 주어진 C , r_w 에서 이 카메라 볼 수 있는 LED가 1~10번 LED임을 알 수 있다. (10)식의 최적화 과정을 통해서, 4개의 LED가 각각 5, 6, 7, 8번 LED라고 인식함을 알 수 있다.

식 (9)에서 α_{θ} 및 α_r 의 값은 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5의 값 중에서 사용하였다. 사람이 정지해 있을 때에는 0의 값을 사용하는 것이 좋고, 빠르게 움직일 때에는 큰 값을 사용하는 것이 일반적으로 좋은 결과를 가져온다. 본 논문에서는 36가지 결합 (α_{θ} 6가지 경우 $\times$ α_r 6가지 경우)에 대해서 각각 (10)식을 풀고, 그 중에서 가장 작은 (10)식 값을 가지는 α_{θ} 및 α_r 값을 사용하였다.

만약에 장애물 등에 의한 가림으로 한 번 적외선 LED를 놓치고 나면 적외선 LED 번호 추정이 어려운 단점이 있다. 따라서, 제안하는 방법은 보행자와 적외선 LED 사이에 장애물이 없는 환경에서만 사용할 수 있다.

3. 3개의 카메라 값의 결합

3개의 카메라를 사용하여 위치를 계산한 후 평균값을 사용하였다. 또한 2개의 카메라에 의한 위치값과 나머지 1개의 카메라에 의한 위치값의 차가 일정값 이상일 때에는 노이즈 또는 LED 번호의 오인식에 의한 것으로 생각하고, 2개의 카메라 값만을 사용하였다.

4. 보폭계산

보폭을 r_w 의 x 좌표의 변화량으로 측정하였다. 카메라에 포착된 LED의 값이 일정시간 이상 변화가 없으면, 발이 움직이지 않는 영속도 구간으로 판정하였다. 보폭은 영속도구간과 영속도구간사이의 r_w 의 x 좌표차로 계산하였다.

IV. 실험

카메라 모듈의 보정은 25개의 적외선 LED를 설치한 보드를 사용하여 실시하였다[11,12]. 카메라의 픽셀값 (x, y) 와 이미지좌표 (u, v) 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned}\tilde{u} &= \frac{x - x_0}{\alpha} \\ \tilde{v} &= \frac{y - y_0}{\beta}\end{aligned}\quad (11)$$

여기서 $(\tilde{u}, \tilde{v})$ 는 렌즈왜곡에 의해서 왜곡된 좌표이고, 왜곡되지 않은 이미지좌표 (u, v) 와는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \Delta \quad (12)$$

여기서 r 및 Δ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}r &= \sqrt{u^2 + v^2} \\ \Delta &= \begin{bmatrix} 2k_3 uv + k_4(r^2 + 2u^2) \\ k_3(r^2 + 2v^2) + 2k_4 uv \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

3대의 카메라 중 한개 카메라 보정 계수값을 참고로 다음과 같이 제시한다.

$$\begin{aligned}\alpha &= 1350.31545 \pm 46.51273 \\ \beta &= 1349.09020 \pm 45.88522 \\ x_0 &= 509.72845 \pm 36.69607 \\ y_0 &= 381.07013 \pm 37.50036 \\ k_1 &= 0.01211 \pm 0.12309 \\ k_2 &= 0.35156 \pm 1.63888 \\ k_3 &= -0.00243 \pm 0.01031 \\ k_4 &= -0.00516 \pm 0.01021.\end{aligned}$$

카메라 보정에서 픽셀 오차는 $[0.71671, 0.65096]$ 으로 계산되었다.

LED 랜드마크와 카메라를 장착한 실험장치가 그림 5에 주어졌다. 더 긴 거리의 보행실험이 필요하다면, LED 막대를 추가함으로써 쉽게 확장할 수 있음을 알 수 있다.

먼저 신발을 사람이 신지 않고, 손으로 움직여 보았다. 바닥에 1m 간격으로 표시를 하고, 신발을 손으로 정확히 1m씩 움직였다. 그림 6에서 3개의 카메라가 측정한 r_w 의 x 축 움직임을 보이고 있다.

1m씩 4번 움직였는데, 각각 움직인 거리가 1.0089, 1.0238, 0.9745, 1.0319m 인 것으로 추정되었다. 오차가 최대 3cm 정도로서 고가의 모션트래킹 시스템의 정밀도에는 미치지 못하지만 보행분석에는 사용할 수 있는 정도인 것으로 판단된다.

그림 5. 실험장치 사진.

Fig. 5. Picture of experiment device.

그림 6. 1m 움직임.

Fig. 6. 1m movement.

다음에는 사람이 신발을 신고 보행을 한 데이터가 그림 7에 주어졌다. 사람이 걸어 감에 따라 r_w 의 x 축 좌표값이 변화함을 알 수 있다. 보폭은 0.5923, 0.5931, 0.7367, 0.7123, 0.6257m로 계산되었다. z 축값은 신발과 LED 사이의 거리를 나타낸다. 이 실험은 그림 2에서 보듯이, 0.9m의 거리에 직선을 표시하고, 그 직선을 따라서 걸었다. 측정한 z 축 값이 0.9m 근처에 있음을 알 수 있다. 카메라는 마이크로 프로세서의 인터럽트를 사용하여 100Hz의 속도로 샘플링하였으므로, 보행속도도 그림 6에서 보폭과 시간데이터를 이용하여 계산할 수 있다. 계산된 보행속도는 0.6369, 1.0784, 1.2077, 1.2962, 1.1587 m/sec이다.

움직임이 위치 오차에 미치는 영향을 보기 위하여, 신발을 지면에서 거의 수직으로 올렸다가 내리는 실험을 하였다. 제안한 시스템으로 추정된 위치값을 그림 8에 제시하였다. x 및 z 축값은 거의 변화없이 y 축 위치값만 변화하여야 되는데, 그림 8에서 보듯이 x 및 z 축 위치값도 1~2cm 정도 변화하고 있음을 알 수 있다. 이것은 신발이 움직일

그림 7. 보행 실험.

Fig. 7. Walking experiment.

그림 8. 움직임에 의한 위치 오차.

Fig. 8. Position error due to the movement.

그림 9. 압력센서 출력.

Fig. 9. Pressure sensor output.

때 보드에 발생하는 진동에 의한 영향 및 영상처리과정에서 적외선 LED의 중심점의 흔들림에 의한 것으로 판단된다. 보폭의 계산에는 신발이 지면에 접촉되어 움직이지 않는 순간의 값을 이용함으로써, 보폭의 정밀도에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

그림 9는 다른 보행 실험에서 저장된 압력센서의 값을 나타내고 있다. 이 데이터는 발이 땅에 닿기 직전으로부터 걷기 시작하기까지의 데이터를 나타낸 것이다. 보행 시 뒤꿈치가 먼저 닿기 때문에, 뒤꿈치에 설치한 4번 센서의 압력이 먼저 증가하고, 걷기 시작할 때에는 앞부분에 설치한 2번 센서에 압력이 걸리는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 저가형 카메라 모듈과 적외선 LED를 랜드마크로 사용한 보행분석시스템을 제안하였다. 상용의 고가 모션캡처시스템에 비해서는 정밀도가 다소 떨어지지만, 저가적으로 보행분석을 할 수 있는 장점이 있다. 적외선 LED 막대를 간단하게 추가하면, 보행분석이 가능한 거리를 얼마든지 확장 가능하여, 긴 거리의 보행분석도 가능한 장점이 있다.

참고문헌

- [1] M. W. Whittle, *Gait Analysis: An Introduction*, Elsevier, New York, 2008.
- [2] P. A. Oberg, T. Togawa, and F. A. Spelman, *Sensors in Medicine and Health Care*, Wiley-VCH, 2004.
- [3] J. Zhao, Y. Wei, and Z. Wang, "Estimating human body segment parameters using motion capture data," *Proc. of 4th International Universal Communication Symposium*, pp. 243-249, Oct. 2010.
- [4] T. B. Moeslund, A. Hilton, and V. Kruger, "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.
- [5] S. K. Park and Y. S. Suh, "Pedestrian navigation system using inertial sensors and vision," *The Transactions of KIEE(in Korean)*, vol. 58, no. 5, pp. 2048-2057, Nov. 2009.
- [6] S. H. Shin, H. W. Kim, C. G. Park, and S. Choi, "Map-matching algorithm for MEMS-based pedestrian dead reckoning system in the mobile device," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 14, no. 11, pp. 1189-1195, Nov. 2008.
- [7] A. M. Sabatini, C. Martelloni, and F. Cavallo, "Assessment of walking features from foot inertial sensing," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 52, no. 3, pp. 486-494, March 2005.
- [8] G. Welch and E. Foxlin, "Motion tracking: no silver bullet, but a respectable arsenal," *IEEE Computer Graphics*, vol. 22, no. 6, pp. 24-38, Nov. 2002.
- [9] B. K. P. Horn, H. M. Hilden, and S. Negahdaripour,

- "Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 5, no. 7, pp. 1127-1135, July 1988.
- [10] C. Lu, G. D. Hager, and E. Mjolsness, "Fast and globally convergent pose estimation from video images," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 6, June 2009.
- [11] I. F. Rickard and J. E. Davis, "Self-calibrating optical object tracking using Wii remotes," *Proc. SPIE (Sensors, Cameras, and Systems for Industrial/Scientific Application X)*, vol. 7249, pp. 72490W-72490W11, 2009.
- [12] J.-Y. Bouguet, "Camera calibration toolbox for matlab," (http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)
- [13] D. Lee, J. Jung, D. W. Lee, and H. Lee, "Development of gait assisting rehabilitation robot for SCI (Spinal Cord Injury) patient," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 9, pp. 860-865, Sep. 2010.
- [14] H. J. Choi, S. J. Kang, C. Y. Kwon, J. C. Rhu, S. M. Lee, and M. S. Mun, "Research of elderly gait-assistant-robot control system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 9, pp. 823-826, Sep. 2010.

도치욱

2002년 호치민시 University of Technology 학사. 2005년 동 대학원 석사. 2008년~현재 울산대학교 대학원 박사 과정. 관심분야는 모션트래킹.

서영수

1990년 서울대학교 제어계측과 졸업. 1992년 동 대학원 석사. 1997년 동경대학교 공학박사. 2000년~현재 울산대학교 전기공학부 교수. 관심분야는 모션트래킹 및 네트워크 기반 제어시스템.