

다중 센서 융합을 통한 이족 보행 로봇 발의 자세 추정

Attitude Estimation of a Foot for Biped Robots Using Multiple Sensors

류계훈^{*†}, 유범재^{*}, 박민용^{*}, 김도윤^{*}, 최영진^{*}, 오상록^{*}
 Je-Hun Ryu^{*†}, Bun-Jae You^{*}, Min-Yong Park^{*}, Do Yoon Kim^{*}, Youngjin Choi^{*}, Sang-Rok Oh^{*}

Abstract - Although stable control algorithm has been implemented to the biped robot, the stability is not guaranteed because of encoder errors and/or rigid body elastics. Hence precise body pose estimation is required for more natural and long term walk. Specially pelvis sloping by gravity or uneven ground on landing place are most critical reason for undulated motion. In order to overcome these difficulties an estimation system for foot position and orientation using PSD sensors and Gyro sensors is proposed along with calibration algorithm and experimental verification..

Key Words : foot sensor, pose estimation, biped robot, walking stability, PSD sensors

1. 서 론

로봇의 어원에서 찾을 수 있듯이 인간은 오래전부터 인간과 닮은 기계를 만들려고 노력해 왔다. 1990년대에 여러 연구소의 성공적인 이족 보행 로봇의 소개에 힘입어 이족 보행 로봇에 대한 관심이 집중되고 있다. 기존의 바퀴 굴림 형태의 이동 로봇이 위치 추종(localization)과 주행(navigation)에 연구가 주종을 이루었지만, 이족 보행 로봇의 경우는 이동 수단인 두 발의 걸음새가 불안정한 시스템의 제어에 해당하기 때문에 안정적인 자세를 유지하며 보행하는 연구에 집중되어 있다.

이족 보행 로봇의 자세는 각 관절에 장착되어 있는 모터의 회전량을 측정하는 엔코더를 통해 측정할 수 있지만, 관절 기어나 풀리의 미끄러짐 현상, 링크의 휨 현상 등으로 측정 오차가 발생하게 된다. 이러한 오차는 다음 관절로 전달되기 때문에 이족 보행의 발목에서 발생하는 작은 오차는 전체 시스템의 안정성에 큰 영향을 미친다.

이족 보행 로봇에서 발생하는 자세 오차의 원인은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째로는 로봇의 무게에 의해 각 링크가 휘거나 벨트의 늘어짐, 풀리의 미끄러짐 등이 발생하는 경우이다. 이 경우 기구 오차는 최종적으로 중력에 의한 처짐 현상으로 나타난다. 즉, 한발을 지면에서 들었을 때 실제 발의 위치는 엔코더에서 측정되는 값에 의한 발의 위치보다 낮게 나타난다. 이러한 현상은 발을 착지하기 위한 경로 계획에 오류를 발생하게 되며, 실제 계획한 착지 시간보다 빨리 발이 지면에 닿게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 새로운 착지 제어(landing control) 방법을 제안하거나, 자이로 센서를 이용해 상체의 기울어짐을 측정해 이를 보상하는 방법이 제안되었다.[1][2][3]. 두 번째는 지면이 평평하지 않은 경우에 발생한다. 경사면이나 비평탄면을 보행할 때 로봇의 자세를 추종하는 연구는 접촉식과 비접촉식 방법으로 나누어져

진행되고 있다. 접촉식은 발바닥이 지면에 닿을 때의 시간이나 힘의 차이를 측정하여 위치를 추정하는 방식이다. 접촉 스위치를 사용하는 방법과 FSR(force sensing resistor)를 사용하는 방법이 주종을 이룬다.[4][5][6]. 이 밖에 발바닥에 충격 흡수(damping) 장치와 포텐쇼미터(potentiometer)를 장착하여 지면에 접촉한 후 높이 값에 따라 부드럽게 착지를 유도하는 방법이 소개되었다.[7]. 비접촉식 방법으로는 로봇 상체에 경사계를 부착하거나[2] 비전을 이용해 지면을 탐색하거나[8], 초음파센서를 로봇의 앞부분에 설치해 Ground Profile을 생성하는 방법[9] 등이 제안되었다. 하지만 접촉식의 경우 발의 일부분이 지면에 닿은 후부터 제어가 시작하기 때문에 대응시간이 충분하지 못하고 자연스런 보행이 어렵다. 비접촉식의 경우 착지 위치에 대한 정보보다 전체 지면의 Profile을 이용하기 때문에 굴곡이 많이 존재하는 실제 환경에서 적용하기는 어려운 점이 있다.

본 논문에서는 이족 보행 로봇의 안정적 보행을 위해 보행시 하체의 처짐 현상을 분석하고 비접촉식으로 발바닥의 착지 자세 제어를 위한 센서 시스템을 개발하고 이를 운용하는 알고리즘을 제안한다. 그리고 제안한 시스템의 타당성을 검증하기 위해 높은 정밀도를 가지는 햅틱 장치의 측정치와 비교 평가 하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 휴머노이드 발의 자세를 추정하는데 적합한 센서 시스템을 제안하고 캘리브레이션 방법과 지면과의 위치 관계를 정의한다. 3장에서 실험을 통해 제안한 시스템의 타당성을 검증, 분석하고 4장에서 결론을 맺는다.

2. 휴머노이드 발 자세 추정 시스템

2.1 센서 인터페이스 보드 및 기구부 설계

실험 결과 여러 개의 PSD를 인터페이스 할 때 아날로그 멀티플렉서(analog multiplex, MUX)를 통한 한 개의 아날로그-디지털 변환기(analog-digital converter, ADC)를 사용할 경우 각 센서의 노이즈들이 서로 영향을 미쳤다. 또한 센서

[†] 연세대학교 전기전자공학과, Dept. of Electrical and Electronic Eng. Yonsei Univ..

^{*} 한국과학기술연구원 지능로봇센터, ^{*} IRC, Korea Institute of Science and Technology.

와 ADC가 같은 전원을 쓰면 센서 노이즈가 디지털로 변환된 값에 영향을 주었다. 따라서 센서별로 ADC를 할당하고 그라운드(ground)가 분리된 직류-직류 변환기(DC-DC converter)를 사용해 센서 인터페이스 회로를 설계 하였다.

거리 센서는 발을 들어 올리는 높이가 일반적으로 5cm 정도인 것을 고려해 측정 거리가 4cm~30cm인 SHARP사의 GP2D120를 사용하였다. 그림 2,(a)의 센서 전압-거리 그래프에서 거리 4cm 미만에서는 정상 출력을 보장하지 않으므로 지면으로부터 4cm이상 높게 센서를 배치하였다. 또한 PSD의 길이 방향으로 발광이 일어나기 때문에 인접 센서와 간섭을 일으킨다. 따라서 실험을 통해 적절한 위치를 결정 하였다.

2.2 PSD 거리 측정 및 발바닥의 자세 추정 알고리즘

PSD는 물체의 거리에 따라 반사광의 위치가 달라지는 원리를 이용해 수직 거리를 전압으로 출력하는 장치이다. (그림 1) 실험에 사용한 PSD의 출력 전압과 측정 거리는 다음식으로 근사화 할 수 있다.

$$V \cong \frac{128}{L-50} \quad \text{식(1)}$$

(V:센서 출력 전압[v], L: 지면과의 거리[mm])

PSD센서가 바닥에서 약 50mm 높게 배치되어 있기 때문에 이 값을 빼주어야 실제 로봇의 발바닥면과 지면과의 거리를 구할 수 있다. 그림 2,(b)에서는 실제 측정된 값과 식(1)의 값이 오차 범위 내에서 일치하고 있음을 보이고 있다. 또한 사용한 PSD는 센서를 리셋하고 신호를 안정화하기 위해 38.3ms±9.6ms이 소요되므로 25Hz 주기로 거리 측정이 가능하다. 로봇이 보폭 30cm, 주기 0.5초로 보행할 경우 한 걸음당 12개의 데이터 밖에 얻지 못하기 때문에 선형 보간법(interpolation)을 통해 로봇 제어 주기와 동기를 맞췄다.

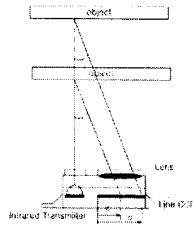


그림 1. PSD 센서의 거리 측정 원리.

본 논문에서 제안한 센서 시스템을 통해 측정할 수 있는 위치 정보는 바닥면과의 수직 높이 z, roll(ϕ), pitch(ψ) 각이다. 이 변수들을 다음과 같이 벡터 \vec{P}_{psd} 로 정의 한다.

$$\vec{P}_{psd} = (z, \phi, \psi)^T$$

발바닥과 수평면에 고정된 5개의 PSD로부터 측정된 거리 값은 측정 벡터 L 로 정의 한다.

$$L = (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5)^T$$

두 벡터의 관계식을 5×3 행렬 Q 로 놓으면,

$$L = Q \cdot \vec{P} \quad \text{식(2)}$$

$$Q = L \cdot \vec{P}^+ \quad (+ : \text{pseudo inverse})$$

따라서 알고 있는 벡터 L 과 \vec{P} 로부터 캘리브레이션 행렬 Q 를 계산할 수 있고 이렇게 얻어진 Q 를 이용해 측정된 거리 벡터 L 로부터 현재 발의 위치 \vec{P} 를 추정 한다.

2.3 자이로 센서 및 지면, 발의 위치 관계

PSD를 이용한 센서 시스템으로는 발바닥과 지면과의 상대적인 관계만을 알 수 있기 때문에 경사면을 보행 할 경우 발

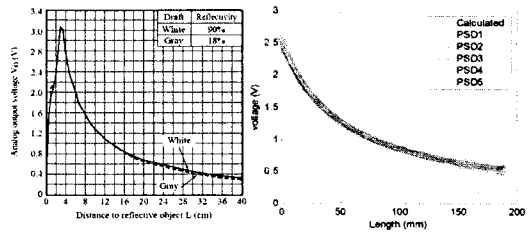


그림 2. PSD 센서의 출력 전압과 측정 거리의 관계 그래프 사양서(datasheet, 왼쪽)와 실제 5개의 PSD센서를 이용해 실험한 결과 및 식(1)을 비교 그래프(오른쪽)

은 경사면에 평행하게 착지하지만 로봇은 중력방향에 대해 기울어지게 된다. 따라서 본 논문에서는 중력 방향에 대한 기울기 측정을 위해 MicroInfinty사의 MI-Marion-A3350M 자이로 센서를 사용하였다. 자이로센서의 위치를 벡터 \vec{P}_{gyro} 로 정의 하면 다음과 같다.

$$\vec{P}_{gyro} = (z, \phi, \psi)^T$$

본 논문에서 제안한 센서 시스템에서 측정 가능한 위치 정보는 수직 높이 z, roll, pitch 정보 이므로 이 세 파라미터를 표현식으로 갖는 좌표계를 정의 한다.

$$\{M\} = \{M_z, M_\phi, M_\psi\}$$

이족 보행 로봇이 처음에 중력 방향에 수직인 자세로 놓여진 상태에서 초기화가 이루어 졌다고 가정 했을 때 수평한 지표면을 기준 좌표계 $\{U\}$ 로 정의하고, PSD 센서로부터 추정된 지면을 $\{H\}$, 발바닥의 위치를 $\{F\}$ 로 정하면 다음에 관계를 정의 할 수 있다.

$$\{U\} = \{0, 0, 0\}$$

$$H_z = 0, H_\phi = -P_{psd}^\phi + P_{gyro}^\phi, H_\psi = -P_{psd}^\psi + P_{gyro}^\psi$$

$$F_z = P_{psd}^z, F_\phi = P_{psd}^\phi + P_{gyro}^\phi, F_\psi = P_{psd}^\psi + P_{gyro}^\psi$$

또한 발바닥의 크기를 알고 있으므로 좌표계 $\{F\}$ 에서의 발바닥의 크기와 $\{H\}$ 의 관계를 이용해 발바닥의 어느 면이 지면과 접촉을 했는지 알 수 있다.

3. 실험 및 분석

캘리브레이션을 위해서는 높은 정밀도로 현재 발바닥의 위치 벡터를 구해야 한다. 본 논문은 VnV사의 4D4M-HIS36 햅틱(haptic)장치를 이용하였다. 6자유도를 가지며 각 엔코더의 분해능은 0.025°이다. 수평한 두 평면에 햅틱 장치와 엔드-포인트(end-point)에 고정된 발바닥 센서 시스템을 놓고 캘

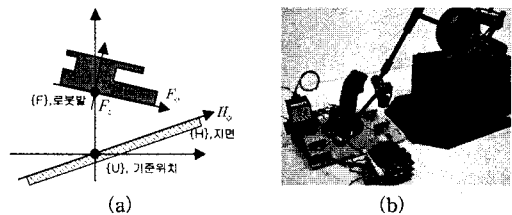


그림 3. (a) 기준 좌표 $\{U\}$, 추정된 지면 좌표 $\{H\}$, 발바닥 좌표 $\{F\}$ 의 위치 관계. (b) 캘리브레이션 실험 환경

리브레이션을 수행한다. 다양한 자세에서 얻은 위치 벡터 \vec{P} , PSD로부터 거리 벡터 \vec{L} 를 통해 캘리브레이션 행렬 Q 를 계산한다. Q 를 통해 추정된 위치 벡터 $\hat{\vec{P}}$ 와 실제 위치 \vec{P} 를 비교 실험 하였다. 그림 4는 PC에서 15ms 간격으로 7.5초 동안 얻은 500개의 샘플을 분석한 결과이다. 실험에 사용한 캘리브레이션 행렬 Q 는 250개의 \vec{L} , \vec{P} 를 이용해 구하였다.

발을 30mm 높이 까지 올렸다 내렸을 때 최대 -3.66mm ~ +4.6mm 정도의 오차(그림 4,(b))를 보이고 있다. 그림 4,(a)에서 기준 높이 보다 추정 높이가 지연되어 나타는 것을 알 수 있듯이, 이 오차는 PSD의 노이즈를 제어하기 위해 사용한 10차 FIR 필터에 의해 생긴 지연 오차(lagged delay)이다. 따라서 센서 데이터 획득 주기(sampling rate)를 높이고 노이즈 필터를 IIR로 바꾸면 해결이 가능할 것으로 예상된다.

발바닥이 지면에 닿을 때 roll각에 대한 정확한 착지는 몸체의 좌우 가속도 성분에 대해 빠른 상쇄 가능성을 높여주며, pitch각에 대한 정확한 착지는 앞뒤로 흔들리는 전진 가속도를 제어하는데 도움을 줄 수 있다. roll, pitch를 비교한 그래프를 보면 pitch(최대 -1.14° ~ +1.18°, 그림 4,(f))보다 roll(최대 -1.08° ~ +3.64°, 그림 4,(d))에서 큰 에러를 보이고 있다. 이유는 PSD센서의 배치가 발바닥의 앞뒤 길이 방향으로는 간격이 넓고(170mm) 발바닥의 폭 방향으로는 짧기(75mm) 때문에 pitch 회전에서 센서값 변화가 좀더 민감(sensitivity)하기 때문이다. 따라서 식(2)에서 캘리브레이션 행렬 Q 를 구할 때 가중 행렬을 이용해 민감도 차이를 반영해 오차를 줄이는 연구가 필요하다.

roll, pitch 비교 결과에서 공통적으로 나타나는 현상은 발바닥이 일부 지면과 접촉한 상태의 회전(0초~4초)보다 발바닥이 완전히 지면과 분리된 상태(4초~)에서의 회전에서 오차가 커진다는 점이다. 이유는 그림 2에서 보듯이 측정면에서 멀리 떨어질수록 PSD가 측정하는 거리에 대한 분해능이 급격히 떨어지기 때문이다. 하지만 이 문제는 실제로 로봇의 발이 공중에 떠 있을 때의 자세 보다 착지하는 순간의 위치가 중요하기 때문에 지면과 가까운 거리에서 작은 오차(높이 10mm 이내에서 roll 약±2°, pitch 약±0.8°)를 보이는 본 실험 결과로부터 실제 적용이 충분하다고 판단된다.

자이로 센서의 오차 결과(그림 4,(e),(f))를 보면 표1의 센서 사양에 나타낸 것처럼 dynamic error인 ±3° 범위 내에서 기준값과의 오차를 보이고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 이족 보행 로봇의 불안정한 걸음새를 유발하는 원인을 기구적 오차와 평탄하지 않은 지면을 걸을 때 발생하는 불안정한 착지로 가정 하였다. 이러한 원인을 분석하고 안정된 착지를 제어하기 위해 로봇의 발바닥에 5개의 PSD 거리센서를 부착하고 햅틱 장비를 이용해 캘리브레이션 한 뒤 높이, roll, pitch를 추정할 수 있도록 하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 착지할 지면의 경사도와 상대적인 발바닥의 위치를 파악하기 위해 자이로 센서를 사용하여 기준점, 추정된 지면, 발의 위치에 대한 변환 관계를 유도 하였다. 또한 실험을 통해 제안한 시스템의 타당성을 검증하고 성능을 분

석하였다. 앞으로 PSD센서의 지연현상과 자이로 센서의 drift에 의한 오동작을 방지하기 위해 자이로와 PSD 센서 시스템을 같은 필터로 모델링 하면 더욱 빠르고 정확한 자세 추정 시스템을 설계 할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 제안한 시스템을 이족 보행 로봇에 장착하여 보행시 나타나는 기구학적 오차를 보정하고 안정된 착지를 할 수 있는 제어기를 설계할 예정이다.

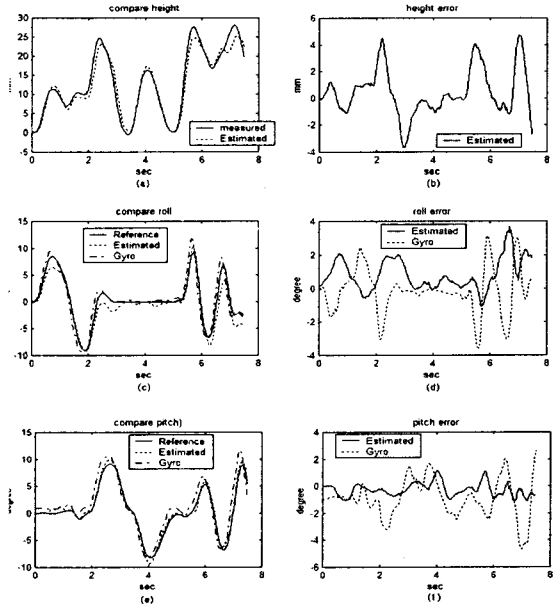


그림 4. Haptic을 이용한 기준값, PSD를 이용한 추정값, 자이로 센서 출력값 비교 및 오차. (a) 지면으로부터 수직 높이에 대한 기준치와 추정치. (b) (a)의 오차. (c) 기준치, PSD 추정치, 자이로 출력치의 roll 회전 비교 (d) (c)의 오차 (e) 기준치, PSD 추정치, 자이로 출력치의 pitch 회전 비교 (f) (e)의 오차

참 고 문 헌

- [1] Jung-Hoon Kim, "Walking control of the humanoid platform KHR-1 based on torque feedback control", IEEE Proc. ICRA, Volume: 1, pp623 - 628, April, 2004.
- [2] K. Loffler, "Sensors and Control Concept of Walking 'Johnnie'", The International Journal of Robotics Research. vol. 22. No. 3-4, pp229-239, March 2003.
- [3] Kazuo Jirai, "The Development of Honda Humanoid Robot", IEEE, Proc. ICRA, May 1998.
- [4] T. Ono, "An Approach to Biped Robot Control According to Surface Condition of Ground", IEEE, Proc. AMC, pp129-134, 1998.
- [5] Chee-Meng Chew, "Blind Walking of a Planar Bipedal Robot on Sloped Terrain", IEEE, Proc. ICRA, pp381-386, May 1999.
- [6] YUAN F. ZHENG, "Gait Synthesis for the SD-2 Biped Robot to Climb Sloping Surface". IEEE, Trans. Robotics and Automation. Vol6, No1. Feb. 1990.
- [7] Jin'ichi Yamaguchi, "Multisensor Foot Mechanism with Shock Absorbing Material for Dynamic Biped Walking Adapting to Unknown Uneven Surfaces", IEEE, Proc. International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System, pp233-240, 1996
- [8] Masaaki Kumagai, "Vision Based Walking of Human Type Biped Robot on Undulating Ground". IEEE/RSJ, Proc. ICIRS, pp 1352-1357, 2000.
- [9] Shuuji Kajita, "Adaptive Gait Control of a Biped Robot based on Realtime Sensing of the Ground Profile", IEEE, Proc. ICRA, pp570-577, April 1996.