JDCS
디지털콘텐츠학회논문지
Journal of Digital Contents Society
Vol. 19, No. 4, pp. 815-819, Apr. 2018

FPE 방식을 활용한 이족 로봇 균형 유지 3차원 시뮬레이션 연구

장 태 호[1] · 김 영 식[2*] · 류 봉 조[2]
[1]한밭대학교 생산융합기술 연구소
[2]한밭대학교 기계공학과

3D Simulation Study of Biped Robot Balance Using FPE Method

Tae-ho Jang[1] · Youngshik Kim[2*] · Bong-Jo Ryu[2]
[1]Institute for Fusion Technology for Production, Hanbat National University, Daejeon, Korea
[2]Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon, Korea

[요 약]

본 논문에서는 Foot Placement Estimator (FPE)를 사용하여 point foot을 갖는 이족 로봇의 3차원 시뮬레이션을 진행하고 이족로봇의 균형유지를 연구하였다. FPE 방법은 에너지 보존에 근거한 제어 방법으로서 보행 중인 로봇의 모든 에너지가 위치 에너지로 변환되는 지점에 로봇이 발을 디뎌 몸체가 넘어지지 않고 균형을 유지하며 이동하도록 하는 제어방법이다. 본 연구에서는 로봇이 이동하지는 않고 제자리에서 균형을 유지하며 서 있는 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 위해 point foot을 갖는 6자유도 이족 로봇을 모델링하였으며 바닥과의 접촉 및 마찰 환경을 구현하였다. 로봇의 무게는 1kg이며 지면과 무게 중심점과의 거리는 1m로, 무게 중심점은 로봇 몸체의 정 중앙에 위치하도록 설계하였다. 다음으로 로봇 몸체의 각속도와 직선속도 그리고 무게 중심점의 높이로부터 FPE 지점을 계산하고 로봇이 해당 지점을 디뎌 균형을 유지하게 끔 하였다. 몸체의 초기 각도를 5°, -5°로 변화시키며 시뮬레이션 한 결과, 모든 초기 조건에서 로봇이 쓰러지지 않고 자세의 균형을 유지하며 서 있는 것을 확인할 수 있었다.

[Abstract]

In this study, we investigate balance of a biped robot applying Foot Placement Estimator (FPE) in simulation. FPE method is used to determine a stable foot location for balancing the biped robot when an initial orientation of the robot body is statically unstable. In this case, the 6-DOF biped robot with point foot is modelled considering contact and friction between foot and the ground. For simulation, the mass of the robot is 1 kg assuming the center of robot mass (COM) is located at the center of the robot body. The height from the ground to the COM is 1 m. Robot balance is achieved applying stable foot locations calculated from FPE method using linear and angular velocities, and the height of the COM. The initially unstable angular postures, 5 ° and -5 °, of the robot body are simulated. Simulation results confirm that the FPE method provides stable balance of the robot for all given unstable initial conditions.

색인어 : 이족 로봇, 점접촉, 3차원 시뮬레이션, FPE, 균형 유지

Key word : Balancing, biped robot, FPE, point foot, 3D simulation

http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2018.19.4.815

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 17 April 2018; **Revised** 24 April 2018
Accepted 28 April 2018

***Corresponding Author; Youngshik Kim**

Tel: +82-42-821-1163
E-mail: youngshik@hanbat.ac.kr

Ⅰ. 서 론

이족 보행 로봇은 고위험군 임무 수행, 노인 보조 및 노동력 제공 등 사회적으로 많은 곳에 활용될 수 있는 잠재력이 있다[1]. 하지만 이를 위해서는 우선 이족 로봇의 보행 안정화 또는 균형 유지가 보장되어야 한다[1]. 그 동안 이족 로봇의 보행 안정화를 위한 많은 기술들이 연구되었으며 그 가운데에는 Zero Moment Point(ZMP)[2], Foot Rotation Indicator(FRI)[3], angular momentum[4], hybrid zero dynamics[5], virtual model control[6], foot place estimator(FPE)[7] 등이 있다. 이 중 ZMP는 1968년에 Vukobratovic[2]에 의해 제안된 방법으로 이족 로봇 연구에서 가장 널리 사용된 방법 중 하나이다. 하지만 ZMP에도 몇 가지 제약이 있는데 예를 들어, 로봇이 정적인 상태에서만 유효하고, 로봇의 발이 full foot이고 바닥에 평행하게 닿아있어야 한다[1,8]. 그리고 로봇이 불안정하고 발 모서리로 로봇이 회전하기 시작하는 상태에서 계산된 ZMP는 무의미하며[8], 또한 ZMP 방법은 외란에 취약하다[9]. ZMP의 이러한 제약을 해결하기 위해서 그 동안 많은 보행 기술들이 제시되었으며 그 중 하나가 FPE 이다[8]. FPE는 2007년에 Wight[7]에 의해 처음으로 제안되었으며 에너지 보존에 근거한 제어 방법이다. FPE는 보행 중인 로봇의 모든 에너지가 위치 에너지로 변환되는 지점에 로봇이 발을 디뎌 몸체가 넘어지지 않고 균형을 유지하며 이동하도록 하는 제어방법이다.

본 연구에서는 FPE 방법을 적용하여 point foot을 갖는 이족 로봇의 균형 유지 시뮬레이션을 진행한다. 기존에 FPE를 point foot을 갖는 2차원 이족 로봇[7]이나 평평한 발을 갖는 3차원 이족로봇[1]에 적용하여 시뮬레이션한 연구가 있으며 본 연구에서는 point foot을 갖는 3차원 이족 로봇에 FPE 방법을 적용하여 시뮬레이션 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서 FPE 3차원 제어 방법에 대해 소개하고 3절에서 시뮬레이션 결과를 설명하고 4절에서 본 연구의 결론을 논한다.

Ⅱ. 본 론

본 절에서는 FPE 방법에 대해 자세히 논하며 이를 위해 우선, 2차원 상에서 이족 로봇의 보행 모션을 고려한다. 이족로봇이 지면을 딛기 전과 디딘 후의 2차원 자유물체도를 그림 1에서 볼 수 있다. 그림 1에서 θ는 몸체의 회전각, $\dot{\theta}_1$과 $\dot{\theta}_2$는 각각 로봇이 지면을 딛기 전과 디딘 후의 몸체의 회전속도이며 m, I_{COM}, h는 각각 로봇의 무게, 질량관성모멘트, 무게중심점의 높이이다. 로봇의 무게중심점(COM)은 몸체의 중앙에 위치한다고 가정한다. v_{t1}은 로봇이 지면을 딛기 전, 무게 중심점의 접선 방향 선 속도이며 절대좌표계에서 v_x, v_z로 나눠진다. v_x,v_z는 각각 x, z축 방향 선 속도이다. L은 다리 길이이며 β는 다리 사이각, ϕ는 지면을 디딜 다리와 수직축 사이의 각도이다. h_{peak}은 로봇 COM의 최대 높이이다.

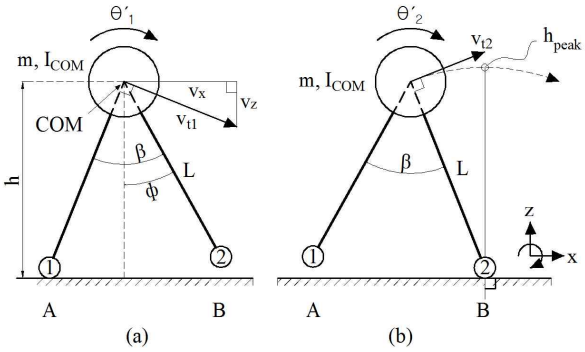


그림 1. 2차원에서 간략화된 이족 로봇의 자유물체도 (a)지면 접촉 전, (b)지면 접촉 후

Fig. 1. Free body diagram of a biped robot simplified in 2D (a) Before ground contact (b) after ground contact

FPE 방식은 그림 1(a)와 같이, 로봇의 발이 지면을 딛기 전에 로봇이 갖는 모든 에너지(운동에너지, 위치 에너지를 포함)가 그림 1(b)처럼 로봇의 발이 지면을 디딘 후 로봇의 최대 위치 에너지와 같아지는 지점 B를 로봇이 딛도록 하는 제어방식이다.

FPE 지점을 계산하기 위해 우선, 로봇이 지면을 딛기 전의 상태(그림 1(a))와 디딘 후의 상태(그림 1(b))를 각운동량의 보존 식으로 통합한다. 두 상태를 각운동량의 보존 식으로 정리하면 식 1과 같다.

$$mL(v_x\cos\phi+v_z\sin\phi)+I_{COM}\dot{\theta}_1=(mL^2+I_{COM})\dot{\theta}_2 \qquad (1)$$

위 식에서 L= h/cosϕ 이며 $\dot{\theta}_2$에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\theta}_2=\frac{mh(v_x\cos\phi+v_z\sin\phi)\cos\phi+I_{COM}\dot{\theta}_1 cos^2\phi}{mh^2+I_{COM}\cos^2\phi} \qquad (2)$$

로봇이 지면을 디딘 후 모든 시스템 에너지가 최대 위치 에너지와 같아지는 ϕ 값에 FPE가 위치하므로, 지면 접촉 후의 모든 시스템 에너지와 최대 위치 에너지를 등가 관계로 정리하면 아래와 같다.

$$T_2+V_2=mgh_{peak} \qquad (3)$$

$$\frac{1}{2}(I_{COM}+mL^2)\dot{\theta}_2^2+mgLcos\phi=mgL \qquad (4)$$

위 식에서 L= h/cosϕ 이므로 정리하면 아래와 같다.

$$(I_{COM}\cos^2\phi+mh^2)\dot{\theta}_2^2+2mghcos\phi(\cos\phi-1)=0 \qquad (5)$$

식 5에서 $\dot{\theta}_2$를 식 2로 대체하면 다음과 같다.

$$A+B=0$$

여기서,

$$A=\frac{\left[mh(v_x\cos\phi+v_z\sin\phi)\cos\phi+I_{COM}\dot{\theta}_1 cos^2\phi\right]^2}{mh^2+I_{COM}\cos^2\phi} \quad (6)$$

$$B=2mghcos\phi(\cos\phi-1)$$

식 6을 수치계산법을 사용하여 ϕ에 대해 풀면 그 ϕ값이 FPE를 향하는 다리와 수직축 사이의 각도이다(그림 1 참조). 그러므로 지면을 딛는 로봇 다리를 이 ϕ값으로 제어하면 로봇이 균형을 유지할 수 있다. 본 연구에서는 식 6으로부터 ϕ에 대한 해를 구하기 위하여 이분법(bisection method)을 사용하였다[8]. 식 6의 더 자세한 유도 과정은 참조자료[7,8]를 참고한다.

더 나아가서, 식 6을 3차원 이족보행로봇에 적용하기 위해서는 속도성분을 벡터적으로 고려하여야 한다[10]. 우선, 로봇 몸체의 선 속도와 각속도 벡터는 다음과 같다.

$$\vec{v}=[v_x\, v_y\, v_z]^T \quad (7)$$

$$\vec{\omega}=[\omega_x\, \omega_y\, \omega_z]^T \quad (8)$$

여기서 v_x, v_y, v_z와 ω_x, ω_y, ω_z는 각각 x, y, z축 방향의 선 속도와 각속도이다. 그리고 속도 벡터 를 x-y평면과 z축으로 분해하면 식 9, 10과 같고 각속도는 식 11과 같다.

$$v_{xy}=\vec{v}\cdot\hat{u} \quad (9)$$

$$v_z=\vec{v}\cdot\hat{k} \quad (10)$$

$$\dot{\theta}_1=\vec{\omega}\cdot(\hat{u}\times\hat{k}) \quad (11)$$

여기서 $\hat{u}$, $\hat{k}$ 는 단위벡터이고 아래와 같다.

$$\hat{u}=\begin{bmatrix}\left|\dfrac{I_{COM}\omega_y}{\sqrt{(I_{COM}\omega_x)^2+(I_{COM}\omega_y)^2}}\right| \\ \left|\dfrac{I_{COM}\omega_x}{\sqrt{(I_{COM}\omega_x)^2+(I_{COM}\omega_y)^2}}\right| \\ 0\end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\hat{k}=[0\,0\,1]^T \quad (14)$$

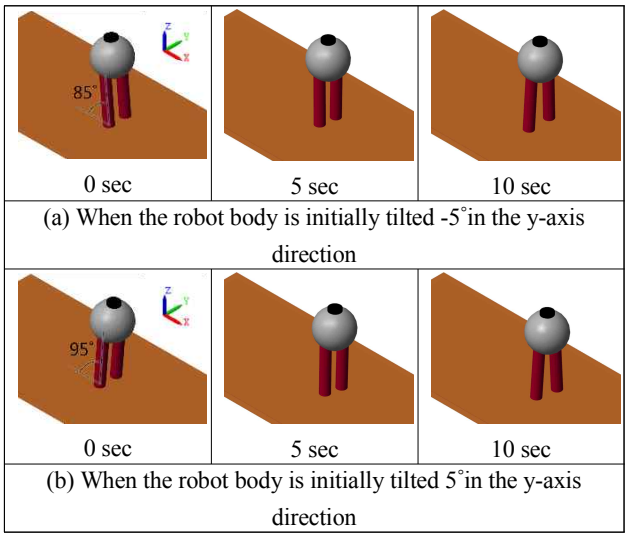
위 식들 9-11을 식 6에 적용하여 계산된 ϕ에 방향벡터 $\hat{u}$를 곱한 후 그 결과값의 x, y성분을 사용하여 로봇 다리를 제어한다(식 6의 v_x는 식 9의 v_{xy}로 대체되어 계산됨).

Ⅲ. 시뮬레이션

FPE 방법이 point foot을 갖는 이족 로봇의 3차원 공간 상의 균형 유지에 잘 동작하는지 확인하기 위하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 MATLAB 소프트웨어로 진행하였으며 시뮬레이션 파라미터와 지면 접촉 계수는 표 1 과 같다. 그림 2는 로봇의 시뮬레이션 모습이다. 그림 3은 시뮬레이션 동안 로봇 몸체의 각도 변화 그래프와 무게중심점의 높이 변화 그래프이다. 양쪽 방향에서의 로봇의 균형 유지 성능을 확인하기 위해, y축을 회전축으로 하여 로봇 몸체의 초기 기울기를 z-y평면 기준 ±5° 로 설정하고 시뮬레이션하였다. 여기서 초기 기울기를 ± 5°로 정한 이유는 보행 시 사람 몸체의 기울어지는 각도가 대략 5°이기 때문이다[11]. 시뮬레이션 결과(그림 2 참조), 그림 3에서 볼 수 있듯이 y축 각도가 시간이 지나면서 0으로 수렴하여 안정화되었으며 로봇의 무게 중심점 높이도 10초 동안 1 m를 유지하였다. 이는 로봇이 10초 동안 쓰러지지 않고 균형을 잡고 서 있었음을 보여준다. 따라서 FPE 방법이 3차원 공간 상에서 point foot을 갖는 이족 로봇이 균형을 유지하도록 잘 동작하였음을 알 수 있다. 로봇이 균형을 유지하기 위해 3차원 공간 상에서 좌우 발을 번갈아 가며 계속 지면에 디뎠고, 그 때 로봇

표 1 시뮬레이션 파라미터 및 지면 접촉 계수
Table 1. Parameters for simulation and Contact Coefficients

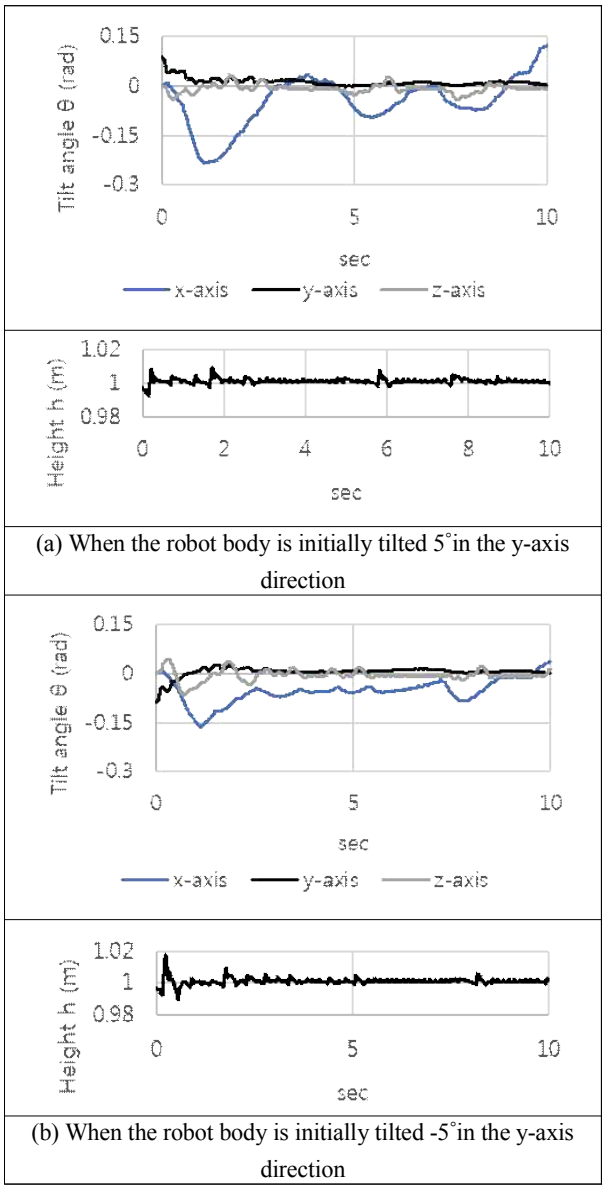
로봇의 몸체 무게	1 kg
로봇의 다리 무게	0 kg
로봇의 다리 길이	1 m
지면 접촉 stiffness 상수	$1x10^4$ N/m
지면 접촉 Damping 상수	$1x10^2$ N/(m/s)
정마찰 계수	0.7
동마찰 계수	0.5



(a) When the robot body is initially tilted -5°in the y-axis direction

(b) When the robot body is initially tilted 5°in the y-axis direction

그림 2. 로봇 균형 시뮬레이션
Fig. 2. Simulation for biped robot balance



(a) When the robot body is initially tilted 5°in the y-axis direction

(b) When the robot body is initially tilted -5°in the y-axis direction

그림 3. 밸런싱 시뮬레이션 결과: 로봇 몸체의 회전각과 높이 변화

Fig. 3. Balancing simulation results: tilt angles and height of the robot body as a function of time

의 몸체가 좌우로 흔들리게 되어 그림 3에서 x축 각도는 비교적 크게 요동하였다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 FPE 방법을 적용한 이족 로봇 3D 균형 유지 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 위해 point foot을 갖는 이족 로봇을 디자인하였으며 시뮬레이션 환경을 설정하고 ±5° 두 개의 초기 각도에서 로봇을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과, 초기에 몸체가 기울어져 있던 로봇이 10초 동안 쓰러지지 않고 균형을 유지하며 서 있는 것을 확인하였다.

추후에는 실제 point foot을 갖는 이족 로봇을 제작하고 본 연구에서 검증한 FPE 방식을 적용하여 제어할 계획이다.

참고문헌

[1] B. J. DeHart and D. Kulić, "Push recovery and online gait generation for 3D bipeds with the foot placement estimator," in 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014, pp. 1937-1942.

[2] M. Vukobratovic and D. Juricic, "Contribution to the Synthesis of Biped Gait," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. BME-16, pp. 1-6, 1969.

[3] A. Goswami, "Foot rotation indicator (FRI) point: a new gait planning tool to evaluate postural stability of biped robots," in Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C), 1999, pp. 47-52 vol.1.

[4] A. Goswami and V. Kallem, "Rate of change of angular momentum and balance maintenance of biped robots," in Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on, 2004, pp. 3785-3790 Vol.4.

[5] E. R. Westervelt, C. Chevallereau, J. H. Choi, B. Morris, and J. W. Grizzle, Feedback control of dynamic bipedal robot locomotion: CRC press, 2007.

[6] J. Pratt, P. Dilworth, and G. Pratt, "Virtual model control of a bipedal walking robot," in Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on, 1997, pp. 193-198.

[7] D. L. Wight, E. G. Kubica, and D. W. Wang, "Introduction of the Foot Placement Estimator: A Dynamic Measure of Balance for Bipedal Robotics," Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, vol. 3, pp. 011009-011009-10, 2007.

[8] D. L. Wight, "A foot placement strategy for robust bipedal gait control," 2008.

[9] P. v. Zutven, D. Kostić, and H. Nijmeijer, "Foot placement for planar bipeds with point feet," in 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012, pp. 983-988.

[10] M. Millard, J. McPhee, and E. Kubica, "Foot Placement and Balance in 3D," Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, vol. 7, pp. 021015-021015-14, 2012.

[11]Imai, Takao, et al. "Interaction of the body, head, and eyes during walking and turning." Experimental brain research 136.1 (2001): 1-18.

장태호(Taeho Jang)

2013년 : 한밭대학교 (학사)
2015년 : 한밭대학교 (석사)

2015년~현 재: 한밭대학교 생산융합기술연구소
※관심분야 : 기계 설계(mechanical design), 모션제어(motion control), 생체모방로봇(bio-inspired robot), 센서융합(sensor fusion) 등

김영식(Youngshik Kim)

2003년 : University of Utah 대학원 (공학석사)
2008년 : University of Utah 대학원 (공학박사-제어 및 로보틱스)

2008년~2009년: University of Utah
2009년~2009년: 방위사업청
2009년~2011년: DGIST
2011년~현 재: 한밭대학교 기계공학과 교수
※관심분야 : 스마트 액추에이터(smart actuator), 모션제어(motion control), 생체모방로봇(bio-inspired robot), 센서융합(sensor fusion) 등

유봉조(Bong-Jo Ryu)

1981년 : 연세대학교 기계공학과 (공학사)
1983년 : 연세대학교 대학원 (공학석사)
1988년 : 연세대학교 대학원 (공학박사-추력을 받는 보구조물의 탄성안정성)

1989년~1989년: 삼성종합기술원
1991년~1992년: 일본 대판부립대학 해외-Post. Doc.
1989년~현 재: 한밭대학교 기계공학과 교수
※관심분야 : 구조물 진동해석, 제어, 탄성안정성