Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2011) 17(7):659-667
DOI:10.5302/J.ICROS.2011.17.7.659 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

인체운동학에 기반한 이족로봇의 인간형 걸음새 설계

Kinesiology Based Human-like Walking Pattern Design for a Bipedal Robot

박 진 희, 권 상 주*
(Jinhee Park[1] and SangJoo Kwon[1])
[1]Korea Aerospace University

Abstract: The study of bipedal robot is towards similar shape and function with human. In this paper, we propose a human-like walking pattern compatible to the flexible foot with toe and heel structure. The new walking pattern for a bipedal robot consists of ZMP, center of mass (CoM), and ankle trajectory and is drawn by considering human kinesiology. First, the ZMP trajectory moves forward without stopping at a point even in the single support phase. The corresponding CoM trajectory to the ZMP one is derived by solving differential equations. As well, a CoM trajectory for the vertical axis is added by following the idea of human motion. The ankle trajectory closely mimics the rotational motion of human ankles during taking off and landing on the ground. The advantages of the proposed walking pattern are demonstrated by showing improved stability, decreased ankle torque, and the longer step length capability. Specifically, it is interesting to know that the vertical CoM motion is able to compensate for the initial transient response.

Keywords: biped, humanoid, robot foot, human-like walking, ZMP trajectory, CoM trajectory, ankle trajectory

I. 서론

인간과 같이 안정적이고 보행에 소요되는 에너지를 최소화하는 보행 로봇을 개발하기 위해서는 불규칙한 지면과 접촉하는 로봇 발에 대한 연구가 동시에 이루어져야 한다. 최근에는 인간 발에 대한 생체 모방형(bio-mimetic) 설계를 바탕으로 이족 로봇에 인간형 걸음새를 적용하기 위한 연구가 점차 활발해지고 있다.

먼저 인간의 발이 갖는 기능적 효율성을 다룬 연구의 예로서 Kim & Voloshin [1]은 인간 발에 대한 해부학적 분석을 통해 하중을 효과적으로 흡수하기 위한 메커니즘을 규명하였다. 그리고 Eom & Kazunori [2]는 시뮬레이션 연구를 통해 인간의 발이 에너지 소비, 관절 피로도, 골격 부하가 최소화되는 방향으로 진화되었음을 주장하였다.

인간의 발이 가지는 구조적인 장점과 기능을 로봇 발 설계에 응용한 예를 들면, Ouezdou et al. [3]은 로봇 발에 앞꿈치 발가락(toe)를 추가하면 에너지 소모가 감소하고 각 관절의 운동이 더 유연해진다고 하였다. Kagami et al. [4]은 앞꿈치(ball)와 뒤꿈치(heel)가 구분되는 발을 설계하고 발 바닥이 받는 압력을 인간의 발과 비교 분석하였다. Seo and Yi [5]는 인간 발과 흡사한 골격을 갖는 로봇 발을 설계하고 불규칙한 지면에서의 안정성을 보였다. 이 밖에도 발가락 부분을 분리시키고 발바닥 전체에 스프링을 장착한 발[6], 직렬-병렬 복합 기구를 이용하여 두 발가락이 독립적으로 회전할 수 있게 설계한 발[7], 평평한 발에서 발가락 부분을 분리함으로써 보행 동작 시에 무릎 조인트의 변위는 감소시키고 무게중심의 속도는 증가시키는 발[8], 착지 때의 충격력 감소를 위해 바닥면에 고무를 부착하고 자세 측정 센서를 장착한 발[9], 네 개의 기둥이 독립적으로 움직임으로써 불규칙한 지면에서 발이 수평을 유지할 수 있도록 설계된 발[10] 등 인간의 발과 같은 유연성과 기능을 갖는 로봇 발 설계에 관한 연구가 지속적으로 이어지고 있다.

위와 같은 유연한 로봇 발의 기능을 이용하여 인간처럼 자연스러운 걸음새를 실현하기 위한 보행 패턴 생성에 관한 연구도 활발하다. Ogura et al. [11]은 평평한 발에 발가락 조인트를 추가하여 안간과 같이 뒤꿈치를 들어올리면서 보행하는 방식을 적용하였고 이 때 발에 작용하는 힘의 분포가 인간과 유사해짐을 보였다. Erbatur & Kurt [12] 및 Sellaouti et al. [8]은 인간의 보행에서는 ZMP가 발바닥의 뒤꿈치에서 발가락 방향으로 자연스럽게 이동한다는 사실에 착안하여 개선된 ZMP패턴을 제시하였다. 또한 Huang et al. [13]은 인간 발목 관절의 운동 패턴을 분석하고 이와 유사한 궤적을 유도하였다.

이 논문에서는 발가락과 뒤꿈치 구조의 인간 발이 갖는 기능적인 장점을 구현하기 위한 유연한 로봇 발을 제안하고 이에 적합한 인간형 걸음새를 설계한다. 이족로봇의 보행 궤적으로서 기본적인 보행 안정성을 확보하기 위한 ZMP 궤적, 주어진 ZMP 궤적에 대하여 로봇 관절들의 운동을 결정하기 위한 무게중심 궤적, 지면과 접촉하는 발의 자세를 정의하는 발목 궤적을 제시한다. 본 논문은 로봇 발 설계와 보행 궤적 생성을 인체운동학적인 근거를 바탕으로 통합적인 관점에서 다룬다는 점에서 의미를 갖는다.

먼저 II 장에서는 세 개의 발가락과 두 개의 뒤꿈치를 갖는 유연한 구조의 로봇 발을 제시한다. III 장에서는 각각의 보행 궤적을 생성하며 IV 장에서는 보행 시뮬레이션을 통하여 제시한 인간형 걸음새가 갖는 장점을 밝힌다. 마지막으로 V 장에서 결론을 맺는다.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2010. 10. 4., 수정: 2011. 3. 28., 채택확정: 2011. 5. 17.
박진희, 권상주: 한국항공대학교 항공우주기계공학부
(s40202116@naver.com/sjkwon@kau.ac.kr)

Copyright© ICROS 2011

II. 발가락과 뒤꿈치를 갖는 유연한 로봇 발

이족 로봇에 인간형 걸음새를 적용하기 위해서는 로봇 발 역시 기능적으로는 인간의 발과 유사해야 한다. 본 논문에서 제시하는 발은 그림 1과 같이 발 바닥의 앞 부분에 발가락에 해당하는 세 개의 원통형 필러(pillar)와 뒤 부분에는 뒤꿈치에 해당하는 두 개의 필러(pillar)를 갖는다[14,15]. 그림과 같이 세 발가락이 삼각대 형태가 되도록 기울기를 줌으로써 [1]에서 언급한 바와 같이 인간의 발을 구성하는 골격이 상호 아치(arch) 형태를 이룸으로써 댐핑 효과를 높이는 것과 유사한 효과를 가져올 수 있다. 또한 모든 방향에서 인가되는 지면 충격력을 효과적으로 흡수할 수 있다.

그림 1의 로봇 발에서 각 발가락과 뒤꿈치의 위치, 각 필러 사이의 간격, 발바닥 부위에 따른 각 필러의 강성(스프링 상수), 발목 위치 등이 주요 설계 파라미터가 된다. 로봇 발의 파라미터 값을 결정하기 위해서는 주어진 로봇의 제원(중량, 높이 무게중심 위치 등)과 보행 조건(보폭, 보행 속도, 보행 패턴 등)에 대하여 역학적인 관점과 보행 안정성 측면에서 최적의 값을 산출하는 과정이 요구된다. 한편, 그림 1의 유연 로봇 발에 대한 인체역학적 고찰과 동역학 시뮬레이션을 통한 설계 파라미터 결정 과정은 [15]에서 제시하였다.

인간은 발바닥이 지면과 접촉하는 순서에 따라 그림 2와 같이 대략 4단계의 과정을 거친다. 먼저 오른발의 뒤꿈치가 지면에 착지한 후(heel-strike), 접촉 부위가 앞꿈치 쪽으로 이동하면서 발바닥이 지면과 평행을 이룬다(foot-flat). 이어서 발이 한 걸음 앞으로 나아가기 위해 오른 발 뒤꿈치가 먼저 들리고(heel-off), 왼발이 지면에 닿은 직후에 오른발 발가락 부분이 지면에서 떨어진다(toe-off). 이와 같이 자연스러운 걸음새를 이족 로봇에 구현하기 위해서는 그림 1과 같이 뒤꿈치와 발가락이 구분되는 유연한 발이 요구된다.

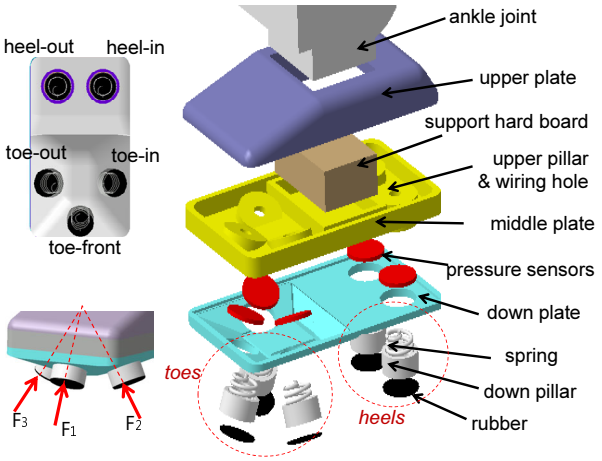


그림 1. 발가락-뒤꿈치 구조의 유연한 로봇 발.
Fig. 1. Flexible robot foot with toes and heels.

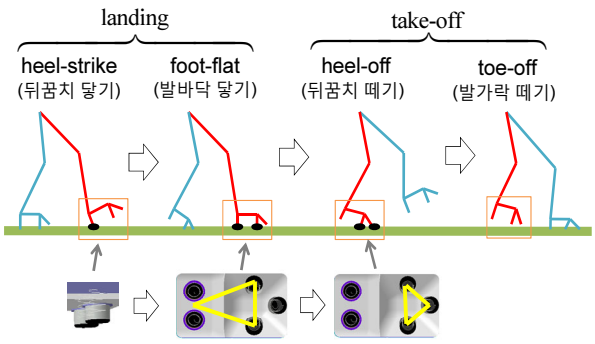


그림 2. 인간의 보행 단계에 따른 발의 자세 변화.
Fig. 2. Walking phase of a human and the change of foot pose.

III. 인간형 걸음새 설계

1. 유연 로봇 발을 위한 ZMP 궤적

기존의 이족 로봇에 적용되었던 발은 주로 발가락(toe)과 뒤꿈치(heel)의 구분이 없고 평평한 바닥을 갖기 때문에 대부분 바닥 면이 지면과 수평을 이루는 보행 방식을 적용하였다. 이러한 평발(flat foot)의 경우에는 보통 안정한 보행을 위해서 ZMP가 지지다리 발의 한 점에서 머무르다 다른 발의 한 점으로 급격히 이동하는 방식의 따른다. 반면에 그림 2와 같은 인간형 보행에서는 ZMP가 단일 지지다리 구간(single support phase)에서 발 뒤꿈치에서 발가락 부분으로 연속적으로 이동한다. 따라서 본 논문에서 제시하는 유연한 발을 이용하여 인간형 보행을 구현하기 위해서는 이에 합당한 ZMP 패턴이 필요하다.

그림 3은 평발 보행(flat walking)과 인간형 보행(human-like walking)에 대한 ZMP 패턴을 비교한다. 인간형 보행의 경우에는 ZMP가 발 내부의 한 점에 머물지 않고 이동한다는 점이 다르다. 그러나 이것은 한가지 예에 해당하며 설계자의 의도에 따라 다양한 형상이 패턴이 가능하다.

여기서는 유연한 로봇 발을 이용하여 그림 2와 같은 인간형 보행을 하기 위한 ZMP 패턴을 제시한다. 그림 4에서 SSP(single support phase)는 외다리 지지 구간으로서 로봇의 한 쪽 발만이 지면에 닿고 이 때는 ZMP가 로봇의 발바닥 안에 머물게 된다. DSP (Double Support Phase)는 양다리 지지 구간으로서 로봇의 양 발이 모두 지면에 닿아 있을 때이며 ZMP가 다른 쪽 발로 이동하는 시간대이다. 또한 B 와 A 는 그림 3에 표시한 바와 같이 각각 양 발목 사이 X, Y 방향 거리의 절반, l_f, l_b, l_s 는 발목에서 뒤꿈치와 발가락까지의 거리를 정의한다. 그림 4의 ZMP 궤적을 수식으로 정리하면 (1), (2)와 같다.

그림 4에서 ZMP 궤적은 DSP 구간에서 선형적으로 증가하다가 SSP 구간에서 지지 발 내부의 한 점으로 점프한다. SSP

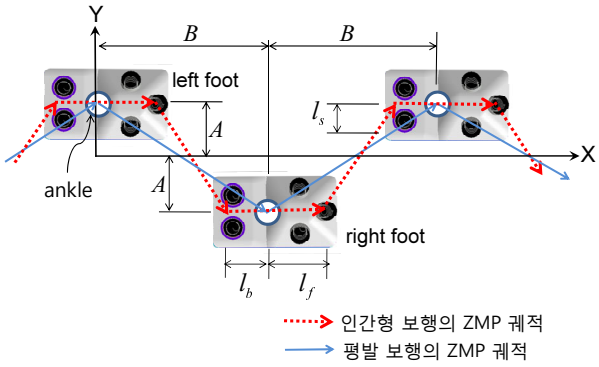


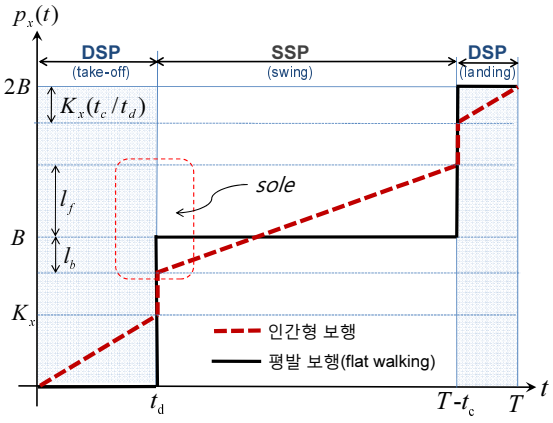
그림 3. 로봇 발의 종류에 따른 ZMP 궤적 비교.
Fig. 3. ZMP trajectory according to the type of robot foot.

구간에서 X-방향 ZMP는 후방 뒤꿈치에서 전방 발가락(toe-front) 끝까지 이동하는 반면 Y-방향은 한 점에서 고정되는데 이것은 그림 3과 같이 양 발이 평행하게 움직이는 십일자형 걸음을 가정하기 때문이다. 만일 팔자 걸음(toeing out walking) 형태의 보행을 가정하면 SSP에 대한 Y-방향의 ZMP 패턴을 적절하게 수정할 수 있다. 한편 DSP에서 t_d는 스윙하는 발이 지면에서 이탈(take-off)하는 시간, t_c는 지면에 착지(landing)하는 시간으로서 서로 같은 값을 가질 필요는 없으며 인체운동학적 근거에 의해 적절한 비율을 정하는 것이 필요하다.

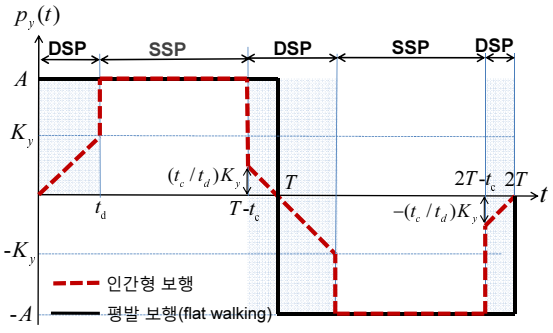
인간형 보행과 관련된 최근 연구결과로서 [12]에서는 X-방향의 SSP 구간에 대하여 그림 4(a)와 같이 이동하는 ZMP 패턴을 적용하였으나 평발 보행의 경우에 국한하였다. 한편 [16]에서는 SSP 구간에서 ZMP를 고정시켰지만 DSP 구간에서는 그림 4와 같이 선형적으로 이동하는 ZMP 패턴을 적용하였다. 결국 그림 4는 [12]와 [16]에서 제시된 ZMP 패턴의 장점을 취합한 것이며, 다음 절에서 제시되는 무게중심(CoM) 궤적, 발목(ankle) 궤적과 함께 그림 1과 같은 유연 발에 적용하기에 적합하다.

$$p_x(t)=\begin{cases} p_x(nT)+(K_x/t_d)t, & \text{for } nT\le t<nT+t_d,\\ p_x(nT)+\big((l_f+l_b)/(T-t_d-t_c)\big)(t-t_d)+B-l_b, & \\ \qquad \text{for } nT+t_d\le t<(n+1)T-t_c & \\ p_x(nT)+2B-K_x(t_c/t_d)+(K_x/t_d)\big(t-(T-t_c)\big), & \\ \qquad \text{for } (n+1)T-t_c\le t\le(n+1)T \end{cases} \quad (1)$$

where $n=0,1,2,\cdots$



(a) X-방향 ZMP 패턴



(b) Y-방향 ZMP 패턴

그림 4. 인간형 보행을 위한 유연 로봇 발의 ZMP 패턴.
Fig. 4. ZMP pattern of the flexible foot for human-like walking.

$$p_y(t)=\begin{cases} (K_y/t_d)t, \text{ for } 2nT\le t<2nT+t_d,\\ A, \qquad \text{for } 2nT+t_d\le t<(2n+1)T-t_c\\ (t_c/t_d)K_y-(K_y/t_d)(t-(T-t_c)),\\ \qquad \text{for } (2n+1)T-t_c\le t<(2n+1)T\\ -(K_y/t_d)(t-T),\\ \qquad \text{for } (2n+1)T\le t<(2n+1)T+t_d\\ -A, \qquad \text{for } (2n+1)T+t_d\le t<2(n+1)T-t_c\\ -(t_c/t_d)K_y+(K_y/t_d)(t-(2T-t_c)),\\ \qquad \text{for } 2(n+1)T-t_c\le t<2(n+1)T \end{cases} \quad (2)$$

where $n=0,1,2\cdots$

2. 무게중심(CoM) 궤적

이족 로봇은 인간과 같이 관절의 움직임을 통해서 보행 운동을 발생시키기 때문에 목표 ZMP 패턴을 추종하기 위해서는 모든 관절에 대한 운동 궤적이 주어져야 한다. 이를 위하여 최근에 많이 사용되는 무게중심 자코비안 분해(CoM Jacobian Resolution) [16] 방법을 적용하기 위해서는 무게중심 궤적이 요구된다.

한편, ZMP와 무게중심(CoM)과의 동역학적 관계를 규정하기 위해서 선형 역진자 모델[12,15]을 이용하는 것이 일반적이다. 그림 5 이족 로봇 모델에서 ZMP 피봇(pivot)에 대한 모멘트의 합이 영이 된다는 조건으로부터 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\ddot{c}_i-\left(\frac{g+\ddot{c}_z}{c_z}\right)c_i=-\left(\frac{g+\ddot{c}_z}{c_z}\right)p_i,\ i=x,y \quad (3)$$

여기서 수직 Z-방향에 대한 CoM 운동이 상대적으로 작기 때문에 무시할 수 있으므로 위 식을 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\ddot{c}_i(t)-\omega_n^2c_i(t)=-\omega_n^2p_i(t),\ i=x,y,\ \omega_n^2=\frac{g}{c_z} \quad (4)$$

본 논문에서는 [16]에서 제시한 절차를 따라 ZMP 입력 (1)과 (2)에 대한 위 방정식의 해를 구함으로써 CoM 궤적을 결정한다. 첫째, X-방향의 DSP 구간은 ZMP가 1차 함수로 표현되어 $c_x(t)\equiv p_x(t)$ 가 (4)를 만족하므로 CoM 궤적과 ZMP 궤적을 동일하게 설정할 수 있다. SSP 구간 역시 ZMP가 1차 함수로 주어지지만 모든 구간에 걸쳐 미분 연속인 CoM 궤적을 만들기 위해서 다음 미분방정식의 해를 구한다.

$$\ddot{c}_x(t)-\omega_n^2c_x(t)=-\omega_n^2\left(a_1(t-t_d)+a_2\right)\ \text{for}\ t_d\le t<T-t_c$$
$$\text{where}\ \begin{pmatrix} a_1=\big((l_f+l_b)/(T-t_d-t_c)\big)(t-t_d)\\ a_2=B-l_b \end{pmatrix} \quad (5)$$

먼저 초기(initial) 조건: $c_x(t_d)=K_x,\ c_x'(t_d)=K_x/t_d$ 에 대하여 라플라스 변환 방법을 이용하면 다음과 같은 일반해를 구할 수 있다.

$$c_x(t)=a_2+a_1(t-t_d)+(K_x-a_2)\cosh(\omega_n(t-t_d))+(1/\omega_n)\left(K_x/t_d-a_1\right)\sinh(\omega_n(t-t_d)) \quad (6)$$

위 식이 종말(terminal) 조건: $c_x(T-t_c)=2B-K_x(t_c/t_d)$,

$c_x'(T-t_c)=K_x/t_d$ 을 만족하기 위해서는 그림 4(a) SSP 구간의 중간 시점에서 변곡점이 존재해야 하므로,

$$c_x''(t=(T+t_d-t_c)/2)=0 \tag{7}$$

따라서 아래 구속 조건(constraint)이 함께 주어진다.

$$K_x=\frac{a_2\omega_n t_d+a_1 t_d\tanh\left(\omega_n(T-t_d-t_c)/2\right)}{\omega_n t_d+\tanh\left(\omega_n(T-t_d-t_c)/2\right)} \tag{8}$$

X-방향 CoM 궤적을 정리하면,

$$c_x(t)=\begin{cases}c_x(nT)+(K_x/t_d)t\equiv p_x(t), & \text{for } nT\le t<nT+t_d,\\ c_x(nT)+(6) & \text{for } nT+t_d\le t<(n+1)T-t_c\\ c_x(nT)+2B-K_x(t_c/t_d)+(K_x/t_d)\left(t-(T-t_c)\right) & \\ \quad\equiv p_x(t), & \text{for } (n+1)T-t_c\le t\le(n+1)T\end{cases} \tag{9}$$

where $n=0,1,2,\cdots$

Y-방향의 경우, ZMP 값이 일정한 SSP 구간 중에서 좌우 대칭이 되는 $t_d\le t<T-t_d$ 에 대하여는 [16]과 같이 초기 조건: $c_x(t_d)=K_y, c_x'(t_d)=K_y/t_d$ 과 종말 조건: $c_x(T-t_d)=K_y$, $c_x'(T-t_d)=-K_y/t_d$ 에 대하여 다음 미분방정식의 해를 CoM 궤적으로 설정한다.

$$\ddot{c}_y(t)-\omega_n^2 c_y(t)=-\omega_n^2 A \quad \text{for } t_d\le t<T-t_d \tag{10}$$

따라서 다음 CoM 궤적과 함께

$$c_x(t)=A+(K_y-A)\cosh(\omega_n(t-t_d))+\frac{1}{\omega_n t_d}\sinh(\omega_n(t-t_d)) \tag{11}$$

아래와 같은 구속 조건이 주어진다.

$$K_y=\frac{A\omega_n t_d\tanh\left(\omega_n(T-2t_d)/2\right)}{1+\omega_n t_d\tanh\left(\omega_n(T-2t_d)/2\right)} \tag{12}$$

ZMP가 1차 함수로 주어지는 DSP 구간은 CoM 궤적을 ZMP 궤적과 동일하게 설정하고, SSP 구간의 나머지 부분 $(T-t_d\le t<T-t_c)$ 은 DSP 구간 $(T-t_c\le t<T)$ 과 같은 기울기로 연결한다. 홀수 주기에 대한 Y-방향의 CoM 궤적을 정리하면 다음 식과 같고 짝수 주기의 궤적은 시간 축에 대하여 이와 대칭이다.

$$c_y(t)=\begin{cases}(K_y/t_d)t, & \text{for } 2nT\le t<2nT+t_d,\\ (11), & \text{for } 2nT+t_d\le t<(2n+1)T-t_d\\ -(K_y/t_d)(t-T), & \text{for } (2n+1)T-t_d\le t<(2n+1)T\end{cases} \tag{13}$$

where $n=0,1,2\cdots$

이족 로봇의 걸음새 생성과 관련된 기존의 연구들은 대부분 수직 Z-방향에 대한 무게중심 위치를 상수 값으로 설정하여 중력 방향의 상하 운동이 최소화되도록 로봇을 제어함으로써 안정성을 확보하려고 하였다. 그러나 인간은 보행할 때 그림 6과 같이 무게중심이 일정한 진폭을 갖고 수직 운동하는 패턴을 보인다. 이것은 인체 다리의 스윙 동작과 함께 무게중심이 자연스럽게 상하로 운동할 때 에너지 소비나 안정성의 측면에서 유리하고 보폭을 더 크게 할 수 있기 때문이다[17].

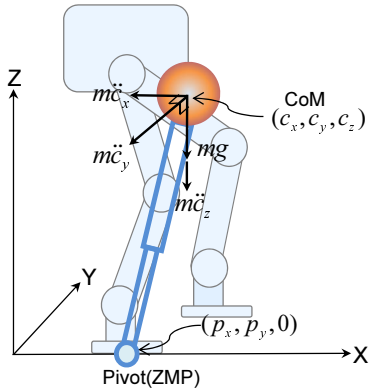


그림 5. 선형 역진자 모델.
Fig. 5. Linear inverted pendulum model.

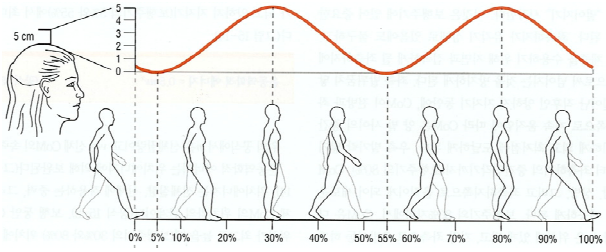


그림 6. 인간의 수직 방향 무게중심(CoM) 궤적[17].
Fig. 6. Human being's CoM trajectory in vertical direction.

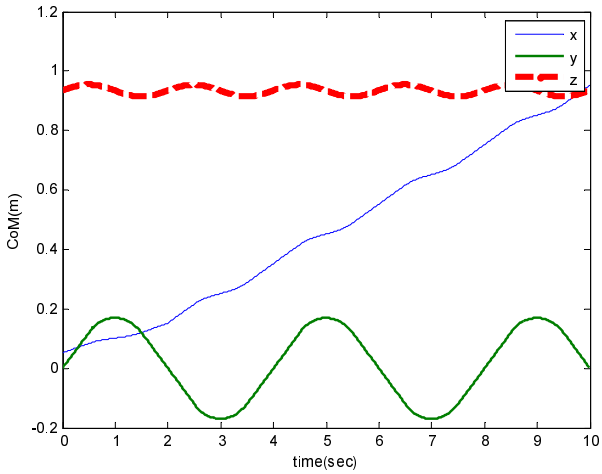


그림 7. 인간형 보행을 위한 무게중심(CoM) 궤적.
Fig. 7. CoM trajectory for a human-like walking.

따라서 본 논문에서는 수직 방향의 무게중심 궤적을 인간의 보행 패턴과 유사하게 정현파 함수로 설정한다.

$$c_z(t)=c_z(0)+\left(1-D\cos(2\pi t/T)\right)$$
$$\text{for } nT\le t\le(n+1)T, \text{ where } n=0,1,2,\cdots \tag{14}$$

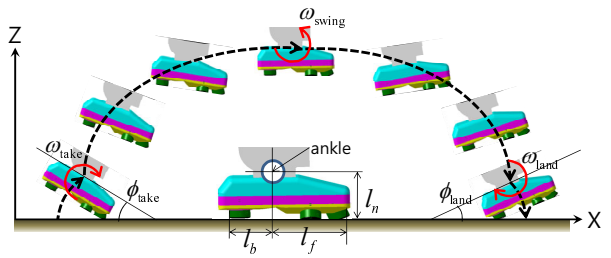
위에서 $c_z(0)$ 는 수직 방향 무게중심의 초기값이며 로봇이 정지해 있을 때의 초기 자세에 따라 결정된다. D 는 무게중심 상하 운동의 진폭으로써 그림 6과 같이 성인 남성의 경우 평균 2.5 cm 정도이다.

결론적으로 보행 주기, 보폭, 지면 이탈/착지 시간, 발 앞꿈치/뒤꿈치 거리, 무게중심 평균 수직거리 등이 주어지면 구속

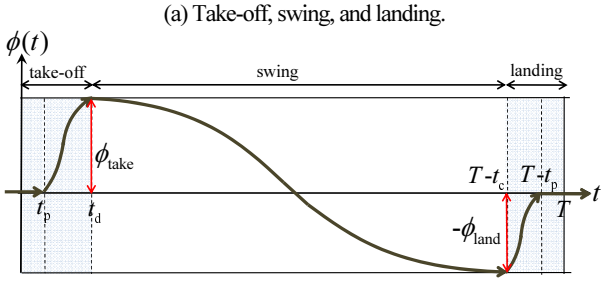
조건 (8), (12)에 의해 DSP 구간에 대한 X, Y 방향 ZMP 이동거리가 결정되고 (9), (13), (14)에 의해 X, Y, Z 방향의 무게중심 궤적이 산출된다. 그림 7은 A = 0.2 m, B = 0.1 m, D = 2.5 cm, l_f = 0.18 m, l_b = 0.115 m, T = 2 sec, t_d = 0.5 sec, t_c = 0.4 sec에 대하여 계산된 무게중심 궤적을 나타낸다.

3. 발목의 스윙 궤적

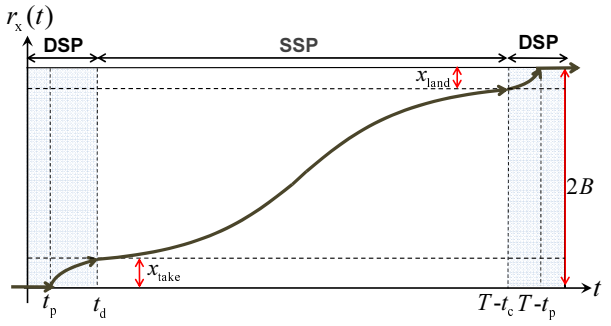
인간은 보행할 때 그림 2와 같이 발 뒤꿈치 부분이 먼저 지면과 닿으면서 하중의 2/3가량을 지탱하고[1], 무게중심이 앞으로 나아가면서 발의 나머지 부분이 지면과 닿게 된다. 이어서 발가락 부분으로 하중이 옮겨질 때 반대편 발은 스윙 동작을 시작한다. 측면(sagittal plane)에서 바라볼 때 스윙하는 다리의 발목은 대략 그림 8(a)와 같은 자세 변화를 일으키며 곡선 형태로 이동한다. 이러한 보행 패턴은 충격 흡수 측면에서 유리하고 발목의 자세 변화가 없는 평발 보행에 비해 보폭을 더 크게 가져갈 수 있다.



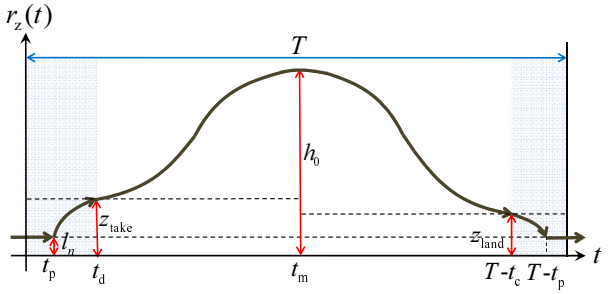
(a) Take-off, swing, and landing.



(b) Ankle posture variation.



(c) Horizontal trajectory.



(d) Vertical trajectory.

그림 8. 인간형 보행을 위한 스윙 다리의 발목 궤적.

Fig. 8. Ankle trajectory of the swing leg in sagittal plane.

본 논문에서는 이러한 인간의 보행 방식을 모방하여 발목의 피치 운동, 전방 및 수직 방향 운동에 대한 시간 궤적을 그림 8과 같이 제안한다. 그림에 보인 바와 같이 발이 지면을 이탈(take-off), 착지(landing)할 때의 궤적을 스윙 궤적과 구분한 것이 평발 보행과 다른 점이다. 그림 8에서 각 기호에 대한 정의는 다음과 같다.

t_p : 발 뒤꿈치 이탈(heel-off) 시점

t_d : 앞꿈치 지면 이탈(toe-off) 시점

$T - t_c$: 뒤꿈치 착지(heel-strike) 시점

$T - t_p$: 착지 완료(foot-flat) 시점

$\phi_{take}, \omega_{take}, x_{take}, z_{take}$: 지면 이탈(take-off) 구간에서의 발목의 회전각, 각속도, X-방향 및 Z-방향 위치

$\phi_{land}, \omega_{land}, x_{land}, z_{land}$: 착지(landing) 구간에서의 발목의 회전각, 각속도, X-방향 및 Z-방향 이동거리

h_0 : 지면에 대한 발목의 최대 높이

l_n, l_f, l_b : 발목의 높이, 발목과 앞꿈치 사이, 발목과 뒤꿈치 사이의 수평거리

먼저 한 주기 걸음 동안 발목은 지면 이탈각(take-off angle)과 착지각(landing angle) 만큼의 자세 변화를 일으키므로 발목의 자세 궤적은 그림 8(b)와 같이 변한다. 여기서 지면 이탈, 스윙, 착지 전 구간에 걸쳐 자세 궤적이 미분 연속이 되도록 각 구간을 3차 스플라인(cubic spline) 함수로 연결한다. 각 구간을 지나가면서 자세각의 부호 역전이 일어나므로 경계에서의 각속도는 영이 된다.

일반적으로 다음 초기 조건과 종말 조건에 대하여

$$\text{(I.C.) } \phi(t_0) = \phi_0, \dot{\phi}(t_0) = 0, \text{ (T.C.) } \phi(t_f) = \phi_f, \dot{\phi}(t_f) = 0 \qquad (15)$$

3차 다항식이 해는 다음과 같다.

$$\phi(t) = c_0 + c_1(t-t_0) + c_2(t-t_0)^2 + c_3(t-t_0)^3$$
$$\text{where } c_0 = \phi_0, c_1 = 0, c_2 = \frac{3(\phi_f - \phi_0)}{(t_f - t_0)^2}, c_3 = -\frac{2(\phi_f - \phi_0)}{(t_f - t_0)^3} \qquad (16)$$

따라서 매 걸음 주기에 대한 발목의 자세 궤적은 다음(17)식과 같이 주어진다.

$$\phi(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } (0 \le t < t_p) \\ \dfrac{3\phi_{take}}{(t_d - t_p)^2}(t-t_p)^2 - \dfrac{2\phi_{take}}{(t_d - t_p)^3}(t-t_p)^3 & \text{for } (t_p \le t < t_d) \\ \phi_{take} - \dfrac{3(\phi_{land} + \phi_{take})}{(T - t_c - t_d)^2}(t-t_d)^2 + \dfrac{2(\phi_{land} + \phi_{take})}{(T - t_c - t_d)^3}(t-t_d)^3 & \text{for } (t_d \le t < T - t_c) \\ -\phi_{land} + \dfrac{3\phi_{land}}{(t_c - t_p)^2}(t-(T-t_c))^2 - \dfrac{2\phi_{land}}{(t_c - t_p)^3}(t-(T-t_c))^3 & \text{for } (T - t_c \le t < T - t_p) \\ 0 & \text{for } (T - t_p \le t < T) \end{cases} \qquad (17)$$

한편, 발목이 지면 이탈과 착지 동작을 하는 동안, 발목의 수평 X-방향과 수직 Z-방향의 궤적은 자세 궤적과 상호 구속되어 있다. 발이 공중에서 스윙하는 구간 $(t_d \le t < T - t_c)$ 은 지면 이탈 및 착지 구간과 연속이 되도록 초기 속도와 종말 속도를 영으로 하여 수평, 수직 방향의 궤적을 자유롭게 결정할 수 있다. 본 논문에서는 그림 8(c), (d)와 같이 전 구간에서 미분 연속인 궤적을 다음 (18), (19)식과 같이 단순한 정현파 함수들을 이용하여 산출한다.

그림 8(d) Z-방향 궤적에서 지면에 대한 발목의 최대 높이는 고관절(hip joint)과 슬관절(knee joint)의 운동 범위를 고려하여 결정한다. 그리고 발이 지면에서 최대 높이가 되는 시간을 (19)식에서는 스윙 구간의 중간으로 설정하였으나 역시 적절하게 변경할 수 있다. 인간의 경우, 일반적으로 보행 주기의 70%(유각기) 시점에서 발이 가장 높은 위치에 오르며 이 때 수직에 대하여 슬관절은 15~25도, 고관절은 50~60도 정도를 나타낸다[18].

$$r_x(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } (0 \le t < t_p) \\ l_n \sin\phi(t) + l_f\left(1-\cos\phi(t)\right) & \text{for } (t_p \le t < t_d) \\ x_{\text{take}} + M\left(1-\cos(\omega_r(t-t_d))\right) & \text{for } (t_d \le t < T-t_c) \\ 2B - x_{\text{land}} + l_n \sin\phi(t) + l_b\left(1-\cos\phi(t)\right) & \\ & \text{for } (T-t_c \le t < T-t_p) \\ 2B & \text{for } (T-t_p \le t < T) \end{cases} \quad (18)$$

$$r_z(t) = \begin{cases} l_n & \text{for } (0 \le t < t_p) \\ l_n \cos\phi(t) + l_f \sin\phi(t) & \text{for } (t_p \le t < t_d) \\ z_{\text{take}} + N\left(1-\cos(2\omega_r(t-t_d))\right) & \text{for } (t_d \le t < t_m) \\ z_{\text{land}} + Q\left(1-\cos(2\omega_r(t-t_d))\right) & \text{for } (t_m \le t < T-t_c) \\ z_{\text{land}} - \left[l_n\left(\cos\phi(t)-1\right) + l_b \sin\phi(t)\right] & \\ & \text{for } (T-t_c \le t < T-t_p) \\ l_n & \text{for } (T-t_p \le t < T) \end{cases} \quad (19)$$

단, $x_{\text{take}} = r_x(t_d) = l_n \sin\theta_{\text{take}} + l_f\left(1-\cos\theta_{\text{take}}\right)$,

$x_{\text{land}} = r_x(T-t_c) = l_n \sin\theta_{\text{land}} + l_b\left(1-\cos\theta_{\text{land}}\right)$,

$z_{\text{take}} = r_z(t_d) = l_n \cos\theta_{\text{take}} + l_f \sin\theta_{\text{take}}$,

$z_{\text{land}} = r_z(T-t_c) = l_n \cos\theta_{\text{land}} + l_b \sin\theta_{\text{land}}$,

$\omega_r = \pi/(T-t_d-t_c)$, $M = B - (x_{\text{take}} + x_{\text{land}})/2$,

$N = (h_0 - z_{\text{take}})/2$, $Q = (h_0 - z_{\text{land}})/2$, $t_m = (T + t_d - t_c)/2$.

IV. 보행 시뮬레이션

1. 로봇 모델링 및 조인트 궤적 결정

시뮬레이션을 위해 설정한 이족 로봇 모델은 그림 9와 같이 두 다리가 각각 골반(pelvis) 3자유도, 무릎(knee) 1자유도, 발목(ankle) 2자유도로 구성되어 전체 12자유도를 갖는다. 로봇의 기타 제원은 표 1과 같다. 그림 9에서 로봇의 초기 자세에 대한 무게중심 위치는 0.935 m, 발목의 최대 높이는 0.15 m이다. 그림 1에 제시된 유연 로봇발에서 각 발가락과 뒤꿈치는 최대 변위가 5 mm인 스프링으로 가정한다.

로봇 보행에 대한 동역학 시뮬레이션은 MRS(Marilou Robotic Studio) [19] 패키지를 이용한다. MRS의 그래픽 모델링 기능을 이용하여 로봇 링크 메커니즘, 보행 상태를 검출하기 위한 각종 센서(F/T 센서, 관절각 센서, 자세 센서), 및 지면을 포함한 외부 환경을 모델링한다. 앞 절에서 제시한 보행 궤적과 기구학 및 제어 알고리즘을 C++ 코드로 작성하여 MRS의 동역학 엔진과 연동하여 계산한다.

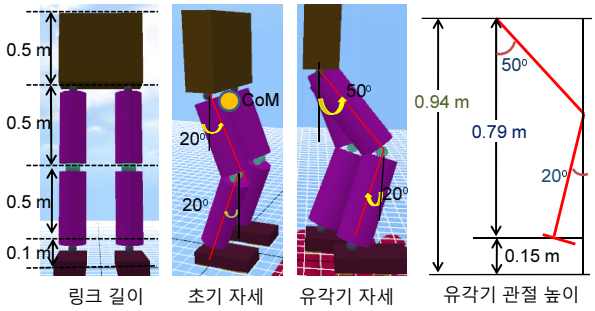


그림 9. 이족 보행로봇 시뮬레이션 모델.
Fig. 9. Biped simulation model.

표 1. 이족로봇 모델 파라미터.
Table 1. Biped model parameters.

Link	Dimension [m]	Mass [kg]
Trunk	0.2(폭) x 0.6(너비) x 0.5(높이)	10
Thigh	0.5(길이) x 0.2(지름)	4
Calf	0.5(길이) x 0.2(지름)	3
Foot	0.1(높이) x 0.2(폭) x 0.3(길이) $l_f = 0.2, l_b = 0.1$	1

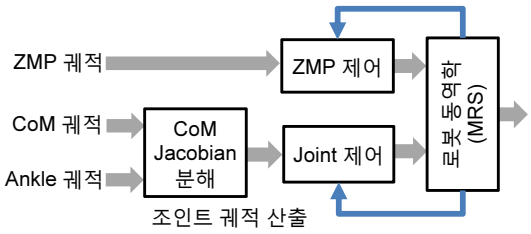


그림 10. 보행 시뮬레이션 절차.
Fig. 10. Walking simulation process.

보행 로봇이 주어진 ZMP 궤적을 추종하기 위해서는 보행과 관련된 조인트들에 대한 시간 궤적이 요구된다. 보통 발목 궤적과 힙 조인트 궤적을 먼저 결정하고 나머지 관절들의 궤적은 기구학적 구속 조건에 의해 결정하는 방법[13]을 고려할 수 있다. 한편, 무게중심 자코비안 분해(CoM Jacobian resolution) [16] 방법은 무게중심 궤적과 로봇 팔, 다리의 말단부 궤적이 주어지면 두 다리뿐만 아니라 로봇을 구성하는 모든 관절의 궤적을 일관성 있게 결정할 수 있는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 무게중심 자코비안 분해에 기반한 역기구학 계산을 통해 각 관절의 기준 궤적을 생성한다. 이어서 주어진 기준 궤적에 대하여 그림 10과 같은 절차에 따라 보행 제어 시뮬레이션을 수행한다.

본 절에서는 ZMP, CoM, 발목(ankle)의 기준 궤적을 생성하기 위해 관련 파라미터 값들을 T = 2 sec, B = 0.15 m, A = 0.2 m, D = 0.2 cm, t_d = 0.5 sec, t_c = 0.4 sec, l_f = 0.18 m, l_b = 0.115 m, $\phi_{\text{land}} = \phi_{\text{take}} = 15^0$ 와 같이 설정하고 유연 로봇 발에 대한 인간형 보행 궤적의 타당성을 검증한다.

2. 인간형 걸음과 평발 걸음의 성능 비교

유연 로봇발에 인간형 궤적을 적용하면 인간의 보행에서 나타나는 보행 속도 증가, 보폭 증가, 관절 충격력 감소 등 운동학 측면에서의 장점을 기대할 수 있다. 먼저 ZMP, CoM, 발목에 대한 인간형 보행 궤적을 적용한 경우와 다른 궤적은 동일하지만 발목의 자세 변화가 없는 평발 걸음을 비교한다. 그림 11은 인간형 보행을 적용하면 평발 보행에 비해 상대적으로 무게중심에 대한 추종 오차가 감소하는 것을 보여준다. 또한 보폭과 보행 속도가 증가할수록 평발 걸음 방식은 보행

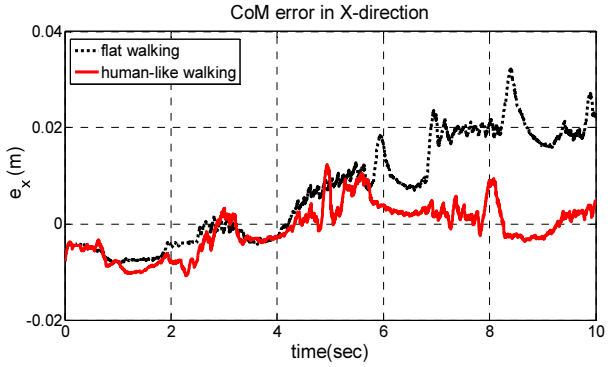


그림 11. 전방 X-방향 CoM 추종 오차 비교.
Fig. 11. CoM tracking error in forward direction.

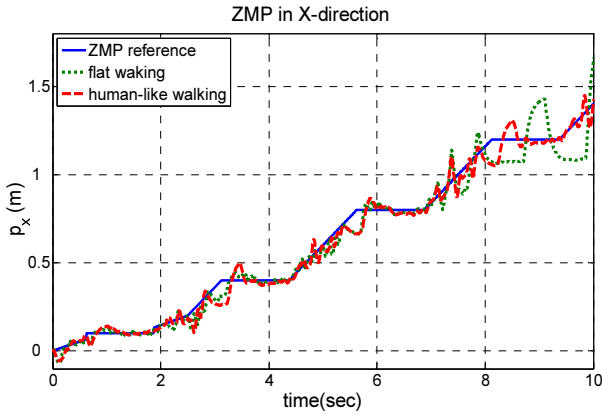


그림 12. 보폭 증가에 따른 안정성 비교.
Fig. 12. Stability according to the step length increase.

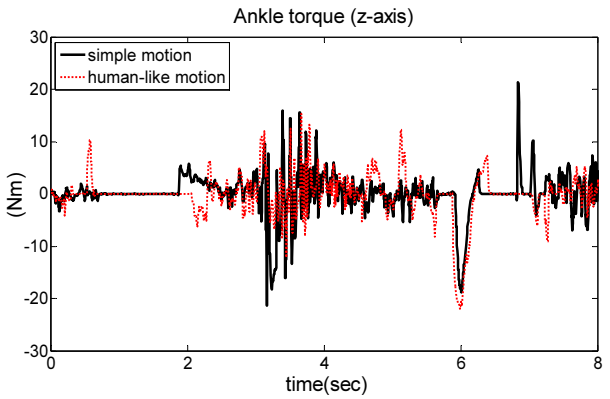


그림 13. 발목 토크(Z-방향) 비교.
Fig. 13. Comparison of the ankle torque (Z-axis).

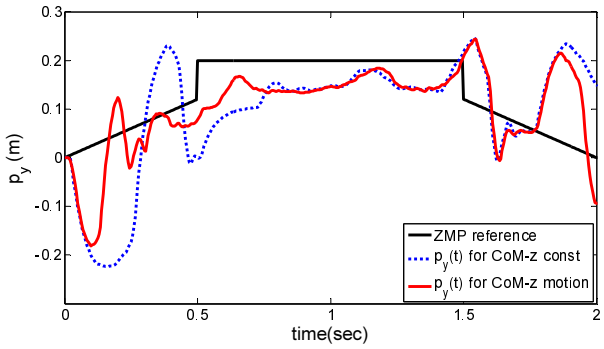
을 실패하는 빈도수가 증가하였다. 그림 12는 주기를 2초로 고정시킨 상태에서 보폭을 0.3 m에서 0.4 m로 증가시켰을 때, 두 걸음 방식의 ZMP 거동을 비교한다. 그림에서 평발 걸음(flat walking)은 주기가 반복될수록 목표 ZMP 궤적에서 벗어나 결국 넘어지는 예를 나타낸다.

인간은 체중을 전방으로 이동시키는 보행 동작을 할 때, 체중에 의해 발목에 걸리는 토크를 최소화하기 위해 지렛대 원리를 이용한다[17]. 즉, 발이 지면을 이탈할 때 뒤꿈치가 먼저 들리는 heel-off 동작을 함으로써 역학적 이득을 얻는다. 그림 13은 인간형 보행 동작을 할 때 다른 모든 조건이 동일한 상황에서 평발 보행에 비해 발목에 작용하는 토크 수준이 감소한다는 것을 보여준다. 발목의 토크가 감소하면 로봇의 구동 메커니즘 설계 측면에서 유리하고 로봇의 동력 소비를 감소시킨다는 장점을 가져온다.

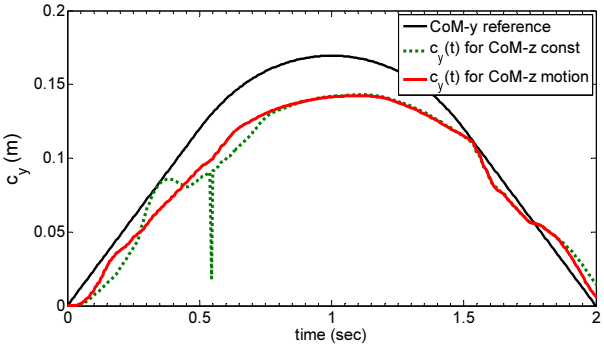
결국, 유연한 발을 장착한 인간 모방형 이족로봇을 구현하기 위해서는 지면 이탈과 착지 동작 구간에서 발목의 자세 변화를 고려한 인간형 보행 궤적을 적용하는 것이 타당하다고 할 수 있다. 이상의 시뮬레이션 결과는 발목의 회전동작 유무에 의한 차이만을 검토한 것이지만 인간형 보행이 갖는 장점을 뒷받침한다.

3. 무게중심 수직운동의 효과

본 논문에서는 인체운동학에 근거하여 무게중심 궤적에 수직방향 성분을 추가한 점이 기존의 연구와는 차별화된다. 그림 6을 살펴보면 인간은 보행을 시작할 때 발목의 회전 양만큼 무게중심이 수직 방향으로 상승했다가 착지 동작과 함께 자연스럽게 원 위치로 내려온다는 것을 알 수 있다. 인간은 발목의 회전동작과 함께 무게중심 상하운동을 함으로써



(a) ZMP behavior in lateral direction.



(b) CoM behavior in lateral direction.

그림 14. 무게중심 수직 운동에 따른 초기 안정성 개선.
Fig. 14. Effect of the CoM vertical motion.

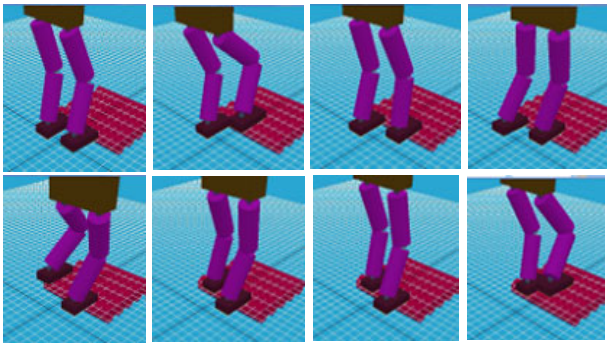


그림 15. 그래픽 보행 시뮬레이션 스냅샷.
Fig. 15. Snapshots for the lateral motion.

보행 속도와 보폭을 크게 할 수 있다.

여기서는 수직방향 무게중심(CoM) 위치를 초기값으로 고정시킨 경우와 (14)식과 같은 수직 운동을 추가한 경우를 비교한다. 그림 14는 초기 보행 동작 시의 횡방향 ZMP와 CoM의 거동을 나타낸다. 그림에서 무게중심 수직 운동은 초기 과도응답의 크기를 감소시켜 보행 안정성을 개선하는 효과를 가져온다는 알 수 있는데 이것은 매우 흥미로운 사실이다. 단, 초기 안정성 측면에서 바람직한 지면 이탈시간, 발목의 회전각, 무게중심 수직운동 궤적의 진폭을 결정하기 위해서는 보다 면밀한 분석과 고찰이 필요하다. 그림 15는 그래픽 보행 시뮬레이션에 대한 스냅샷이다.

이족로봇은 보행을 시작하는 초기 구간에서 특히 횡방향에 대하여 과도응답에 의한 불안정 현상이 발생한다고 알려져 있지만 그 원인에 대해서는 아직 확실한 규명이 이루어지지 않고 있다. 보통 로봇공학적 접근 방법에서는 이족로봇의 목표 ZMP 궤적을 정한 후에 이에 대응되는 무게중심의 운동을 예측하여 제어하는 방식을 선택하고 있다. 한편, 재활공학 분야에서는 인간의 보행 운동을 관찰한 결과, “인간은 무게중심 속도를 조절하기 위해 지면 반발력의 작용점(즉, ZMP)을 무게중심 운동 방향과 반대로 움직인다”고 보고하고 있다[20]. 그림 12, 14를 보면 실제로 ZMP가 초기에 뒤로 약간 물러났다가 앞으로 전진하는 것을 알 수 있다. 현재까지는 ZMP 패턴 생성에 이러한 이족보행 메커니즘의 근원적인 성질이 반영되지 않고 있다.

여기서 ZMP와 무게중심(CoM)의 역학적 관계를 나타내는 (3)식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{c}_y = \left(\frac{g + \ddot{c}_z}{c_z} \right) (c_y - p_y) \tag{20}$$

따라서 가속도 변화를 통해 무게중심 속도를 증가시키려면 현재 위치(c_y)에 대하여 ZMP(p_y)를 반대로 움직여서 c_y - p_y 값을 크게 해야 한다. 또한 무게중심 수직방향 가속도가 중력가속도 방향과 일치하면(그림 5 참조) 상대적으로 ZMP(p_y) 이동 양이 감소하여 과도응답의 진폭을 줄이는 효과를 가져온다고 해석할 수 있다. 결국 인간이 보행할 때 무게중심의 수직 운동은 보행 안정성을 확보하는 방향으로 모멘트를 일으키며 이족로봇에 적용할 경우에도 같은 효과를 기대할 수 있다.

V. 결론

이족보행 로봇이 인간과 같이 뛰어난 보행 성능을 나타내기 위해서는 우선 로봇 발이 인간 발과 같은 기능을 갖추어야 하며 이러한 기능적 장점을 이용하기에 적합한 보행 궤적이 주어져야 한다. 본 논문에서는 인간 발의 뒤꿈치와 발가락에 해당하는 조인트를 갖는 로봇 발을 제시하고 인체운동학적 관점에서 타당한 보행궤적을 설계하였다. 본 논문에서 제시하는 인간형 보행 궤적은 항상 전방으로 이동하는 ZMP 궤적, 수직 운동을 포함하는 무게중심 궤적, 그리고 지면 이탈과 착지 때 발목의 회전을 고려한 발목 궤적으로 이루어진다. 시뮬레이션 결과, i) 유연 발에 인간형 보행을 적용하면 보폭과 보행 속도가 증가하고 발목 토크는 감소한다. ii) 무게중심의 주기적 수직운동은 초기 과도응답 크기를 감소시켜 보행 안정성을 개선한다.

한편, 본 논문에서 제시한 유연한 로봇 발과 인간형 보행 궤적은 많은 설계 파라미터를 포함하고 있으므로 실제 로봇에 적용하기 위해서는 이족 로봇의 스펙과 보행 환경에 따라 최적의 파라미터 값을 산출하는 작업이 요구된다.

참고문헌

[1] W. Kim and A. S. Voloshin, “Role of plantar in the load bearing capacity of the human foot,” *Journal of Biomechanics*, vol. 28, pp. 1025-1033, 1995.

[2] G. M. Eom and K. Hase, “Evolution of human locomotion: A computer simulation approach,” *Journal of Korean Society of Precision Engineering (in Korean)*, vol. 21, no. 5, pp. 188-202, May 2004.

[3] F. B. Ouezdou, S. Alfayad, and B. Almasri, “Comparison of several kinds of feet for humanoid robot,” *Proc. of 2005 IEEE-RAS Conf. on Humanoid Robots*, pp. 123-128, 2005.

[4] S. Kagami, M. Mochimaru, Y. Eharac, N. Miyata, K. Nishiwaki, T. Kanade, and H. Inoue, “Measurement and comparison of humanoid H7 walking with human being,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 48, pp. 177-187, 2004.

[5] J.-T. Seo and B.-J. Yi, “Modeling and analysis of a biomimetic foot mechanism,” *Proc. of 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1472-1477, Oct. 2009.

[6] H. Minakata, H. Seki, and S. Tadakuma “A study of energy-saving shoes for robot considering lateral plane motion,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 1271-1276, Mar. 2008.

[7] J. Yoon, H. Nandha, D. G. Lee, and G-S. Kim “A novel 4-DOF robotic foot mechanism with multi-platforms for humanoid robot,” *Proc. of SICE-ICCAS International Joint Conference 2006*, pp. 3500-3504, Oct. 2006.

[8] R. Sellaouti, O. Stasse, S. Kajita, K. Yokoi, and A. Kheddar, “Faster and smoother walking of humanoid HRP-2 with passive the joints,” *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005.

[9] J. Li, Q. Huang, W. Zhang, Z. Yu, and K. Li, “Flexible foot design for a humanoid robot,” *2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pp. 1414-1419, Sep. 2008.

[10] K. Hashimoto, Y. Sugahara, A. Hayashi, M. Kawase, T. Sawato,

N. Endo, A. Ohta, C. Tanaka, H.-O. Lim, and A. Takanishi "New foot system adaptable to convex and concave surface," *Proc. of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1869-1874, Apr. 2007.

[11] Y. Ogura, K. Shinomura, H. Kondo, A. Moroshima, T. Okubo, S. Momoki, H.-O. Lim, and A. Takanishi, "Human-like walking with Knee Stretched, Heel-contact and Toe-off Motion by a Humanoid Robot," *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3976-3981, Oct. 2006.

[12] K. Erbatur and O. Kurt, "Natural ZMP trajectories for biped robot reference generation," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 835-844, Mar. 2009.

[13] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, and K. Tanie, "Planning walking patterns for a biped robot," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 3, pp. 280-289, Jun. 2001.

[14] H. Kim, J. Park, and S. J. Kwon, "New robotic foot design with toes and heel joints," *2009 6th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2009)*, pp. 780-782, Oct. 2009.

[15] J. Park, H. Kim, and S. J. Kwon, "Design of a Flexible robot foot with toes and heel joints," *Journal of Korean Society of Precision Engineering (in Korean)*, vol. 28, no. 4, pp. 446-454, Apr. 2011.

[16] Y. Choi, D. Kim, Y. Oh, and B.-J. You, "Posture/walking control for humanoid robot based on kinematic resolution of CoM jacobian with embedded motion," *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 23, no. 6, pp. 1285-1293, Dec. 2007.

[17] D. A. Neumann, *Kinesiology of the Musculoskeletal System*, Mosby, 2002. (한글판, 정담미디어 2009)

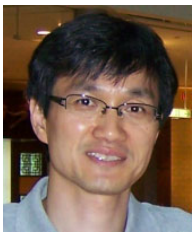
[18] J. Perry, *Gait analysis: Normal and pathological function*, Slack Inc., 1992. (한글판, 영문출판사 2006)

[19] AnyKode co., http://www.anykode.com/marilou.php

[20] Y. Ehara, "인간의 보행, 로봇의 보행," 월간 자동화기술, 2007년 8월호, pp. 74-80.

박 진 희

2010년 2월 한국항공대학교 항공우주기계공학부(공학사). 2010년 3월~2010년 7월 한국항공대학교 로봇시스템제어연구실 연구원. 2011년 3월~현재 서울대학교 의류학과 의복인간공학연구실 석사과정. 관심분야는 휴머노이드, 인간공학, 3D 인체형상, 3D CAD 설계.



권 상 주

1989년 서울대학교 조선공학과(공학사). 1991년 POSTECH 기계공학과(공학석사). 1991년~1997년 국방과학연구소 연구원. 2002년 POSTECH 기계공학과(공학박사). 2003년~2004년 한국과학기술연구원, 한국생산기술연구원 선임연구원. 2004년 9월~현재 한국항공대학교 항공우주기계공학부 부교수. 관심분야는 강인제어 및 추정 이론, 밸런싱 모바일 로봇, 초정밀로봇, 휴머노이드, 비행로봇.