

휴머노이드 로봇을 위한 다양한 환경에서의 걸음새 생성 기술 연구

I. 서론

오늘날 휴머노이드 로봇에 관한 연구는 하드웨어의 개발과 함께 다양한 움직임을 위해 빠르게 발전되어 왔다. 그리하여 안정적 보행이 가능한 다양한 휴머노이드 로봇들이 개발되어 왔다.^[1-4] 대부분 휴머노이드 로봇들의 걸음새 생성 알고리즘들에서는 지면이 평평하다고 가정하였다. 그러나 실제 환경에는 평지뿐만 아니라 경사, 계단, 비평탄 지형 또한 존재한다. 그러므로 휴머노이드 로봇을 위한 다양한 환경에서의 걸음새 생성에 관한 연구 또한 로봇틱스 분야의 핵심 연구 주제 중 하나이다.

본 논문에서는 다양한 환경에서의 휴머노이드 로봇의 가변적인 보행을 위한 걸음새 생성기를 소개한다. 경사, 계단, 비평탄 지형에서의 걸음새 생성에 관한 이전 연구들에서의 휴머노이드 로봇들은 무게 중심의 움직임 조정을 위한 추가 발걸음 없이 한발/양발지시 시간, 정면/측면 방향으로의

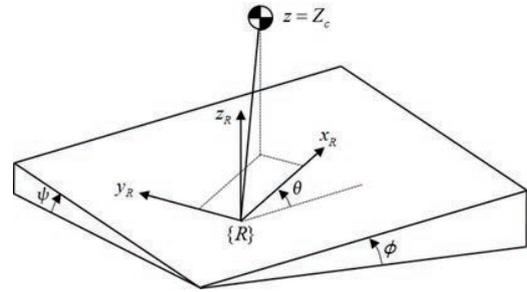
실제 환경에서의 휴머노이드 로봇의 보행을 위해서는 다양한 환경에서의 걸음새 생성 알고리즘의 개발이 필요하다.

보폭, 발의 높이, 발의 방향과 같은 걸음새의 요소들을 독립적으로 변경하는 것이 불가능하였다.^[5-7] 계다가 앞뒤 방향으로만 기울어진 경사에서의 보행만을 고려하였다. 그러나 실제 인간 환경에는 앞뒤뿐만 아니라 좌우로도 기울어진 경사가 존재한다. 본 논문에서 소개하는 가변적 걸음새 생성기에서는 실시간으로 zero moment point (ZMP) 변화를 가능하게 하여 무게 중심의 움직임 조정을 위한 추가 발걸음 없이 경사, 계단, 비평탄 지형에서 걸음새의 요소들을 독립적으로 변경할 수 있도록 하였다.^[8,9,10]



홍영대
아주대학교 전자공학과

2장에서는 이러한 가변적 걸음새 생성기에 대해서 구체적으로 알아본다. 1절에서는 가변적 걸음새 생성기의 입력인 3차원 걸음새 입력을 소개하고 2절에서는 다양한 환경에서 안정적으로 보행하기 위한 휴머노이드 로봇의 무게 중심 궤적 생성에 대해서 설명한다. 3절과 4절에서는 걸음새 입력의 보행 상태로의 전환과 발의 궤적 생성에 대해 설명하고 5절에서는 걸음새 생성기의 전체 과정에 대해서 설명한다. 3장에서는 가변적 걸음새 생성기를 이용한 경사, 계단, 비평탄 지형에서의 시뮬레이션과 실험 결과를 확인하고 마지막으로 4장에서 결론으로 끝을 맺는다.



〈그림 1〉 앞뒤 좌우로 기울어진 경사 위의 3-D LIPM

실시간 ZMP 변화를 통해 휴머노이드 로봇이 매 발걸음마다 독립적인 걸음새 변경이 가능하게 된다.

보행을 위해 〈그림 1〉과 같이 모델링하였다.

그리고 수직 방향으로의 무게 중심의 움직임은 없다고 가정하여 위 모델의 동역학 방정식을 유도하면 다음과 같다.

II. 걸음새 생성 기술

1. 3차원 걸음새 입력

경사, 계단, 비평탄 지형 등 다양한 환경에서의 가변적 보행을 위해 다음과 같이 한발지지 시간, 양발지지 시간, 정면 보폭, 측면 보폭, 발의 높이, 발의 방향을 3차원 걸음새 입력으로 정의하였다.

정의 1: 3차원 걸음새 입력

$$c = [T_{l/r}^{ss} \quad T_{l/r}^{ds} \quad S_{l/r} \quad L_{l/r} \quad H_{l/r} \quad \theta_{l/r}]$$

$T_{l/r}^{ss}$: 한발지지 시간

$T_{l/r}^{ds}$: 양발지지 시간

$S_{l/r}$: 정면 보폭

$L_{l/r}$: 측면 보폭

$H_{l/r}$: 발의 높이

$\theta_{l/r}$: 발의 방향

2. 무게 중심 궤적 생성

휴머노이드 로봇의 보행은 한발지지 상태와 양발지지 상태로 구성된다. 한발지지 상태의 휴머노이드 로봇은 3차원 선형 역진자 모델(3-dimensional linear inverted pendulum model, 3-D LIPM)로 근사화 할 수 있다.^[11]

이는 지지하는 다리가 무게가 없는 막대이고 모든 질량이 수직 운동이 없는 한 점에 모여 있다고 가정한다. 앞뒤 좌우로 모두 기울어진 경사 위에서의 휴머노이드 로봇의

$$\begin{bmatrix} \ddot{y} - \frac{g C_\phi C_\psi}{Z_c} y - g S_\phi S_\theta + g S_\psi C_\theta \\ \ddot{x} - \frac{g C_\phi C_\psi}{Z_c} x - g S_\phi C_\theta + g S_\psi S_\theta \\ = - \frac{g C_\psi C_\theta}{Z_c} \begin{bmatrix} y_{zmp} \\ x_{zmp} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

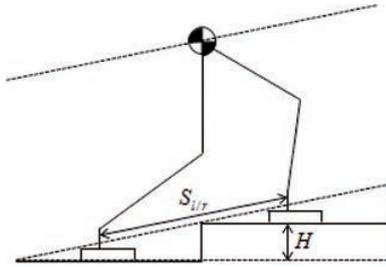
여기서 $[x \ y \ z]$ 는 무게 중심의 위치이고, $[x_{zmp} \ y_{zmp}]$ 는 zero moment point(ZMP) 이다. ϕ 와 ψ 는 경사의 앞뒤 좌우로의 기울어진 각도이다. S_θ 와 C_θ 는 각각 $\sin\theta$ 와 $\cos\theta$ 를 나타낸다. 위 식은 ZMP와 앞뒤 좌우로 기울어진 경사 위의 3-D LIPM의 무게 중심 움직임 간의 관계를 나타내고 이로부터 다음과 같은 정면과 측면 방향으로 무게 중심의 움직임 방정식을 얻을 수 있다.

정면 방향:

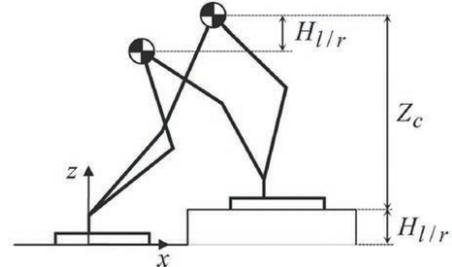
$$\begin{bmatrix} x_f \\ v_f T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ch(t) & Sh(t) \\ Sh(t) & Ch(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ v_i T_c \end{bmatrix} - \frac{1}{T_c} \begin{bmatrix} Sh(t)*p(t) \\ Ch(t)*p(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -g T_c^2 (S_\phi C_\theta + S_\psi S_\theta) (-1 + Ch(t)) \\ -g T_c^2 (S_\phi C_\theta + S_\psi S_\theta) Sh(t) \end{bmatrix}$$

측면 방향:

$$\begin{bmatrix} y_f \\ w_f T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ch(t) & Sh(t) \\ Sh(t) & Ch(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_i \\ w_i T_c \end{bmatrix} - \frac{1}{T_c} \begin{bmatrix} Sh(t)*q(t) \\ Ch(t)*q(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -g T_c^2 (S_\phi S_\theta + S_\psi C_\theta) (-1 + Ch(t)) \\ -g T_c^2 (S_\phi S_\theta + S_\psi C_\theta) Sh(t) \end{bmatrix}$$



〈그림 2〉 계단 위의 3-D LIPM



〈그림 3〉 비평탄 지형 위의 3-D LIPM

여기서 $(x_i, v_i)/(x_f, v_f)$ 와 $(y_i, w_i)/(y_f, w_f)$ 는 각각 정면과 측면 방향으로의 무게 중심의 시작과 끝의 위치와 속도를 나타낸다. $Sh(t)$ 와 $Ch(t)$ 는 각각 $\sinh(t/T_c)$ 와 $\cosh(t/T_c)$ 로 정의되고 T 는 남아 있는 한발지지 시간을 의미한다. $p(t)$ 와 $q(t)$ 는 각각 정면과 측면 움직임을 위한 ZMP 함수들로 각각 상수 함수와 계단 함수로 선정되었다.

위 식의 오른쪽 첫 번째 항과 두 번째 항은 각각 동역학 방정식의 일반해와 특수해에 해당한다. 고정된 ZMP가 아닌 ZMP 함수와 함께 특수해를 고려함으로써, ZMP 궤적을 변화시켜 제한되지 않고 확장된 무게 중심의 움직임이 가능하게 한다. 그 결과 휴머노이드 로봇이 실시간으로 매 발걸음마다 걸음새를 독립적으로 변경하는 것이 가능하게 된다. 그리고 마지막 항은 경사의 앞뒤 좌우로 기울어진 각도와 로봇의 발의 방향에 따라 경사에서의 보행을 위해 무게 중심을 이동시켜주는 역할을 한다.

계단 위에서 휴머노이드 로봇의 모델링은 앞뒤로 기울어진 경사 위에서와 비슷하다 (〈그림 2〉). 계단에서의 3-D LIPM의 무게 중심의 움직임 방정식은 경사에서의 3-D LIPM의 동역학 방정식으로부터 얻어지고 모든 다리 관절의 궤적은 발목 관절의 피치(pitch) 각도를 제외하고 경사에서의 것과 동일하다. 계단을 올라가거나 내려가기 위해서는 발바닥이 계단과 평행하도록 발목이 돌아가면 된다. 이 때의 발목 각도는 경사에서의 정면 방향으로의 보폭과 계단의 높이를 통해서 얻을 수 있다.

또한 비평탄 지형에서의 보행을 위해, 일정한 무게 중

심의 높이 대신, 양발지지 상태에서의 수직 방향으로의 무게 중심 궤적을 발의 높이 $H_{l/r}$ 를 만족하도록 다음과 같이 생성한다.

$$z(t) = -2 \frac{H_{l/r}}{T_{l/r}^{ds^3}} t^3 + 3 \frac{H_{l/r}}{T_{l/r}^{ds^2}} t^2 + Z_c$$

수직 방향으로의 무게 중심 궤적은 〈그림 3〉과 같이 한발지지 상태에서는 일정한 값을 유지하고 있다가 양발지지 상태 동안 발의 높이만큼 3차 스플라인 보간법에 의해 이동하게 된다.

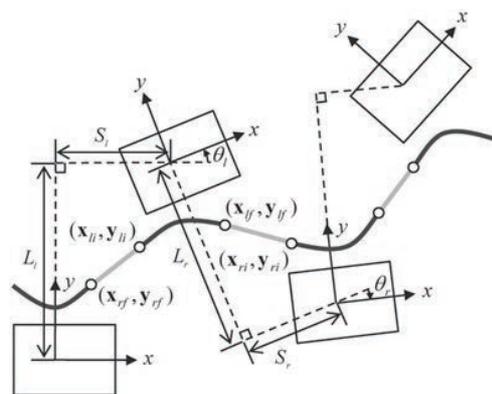
경사, 계단, 비평탄 지형 위에서의 휴머노이드 로봇을 3-D LIPM으로 모델링하여 안정적 보행이 가능한 무게 중심 궤적을 생성한다.

3. 걸음새 입력의 보행 상태로의 전환

3-D LIPM의 상태를 나타내기 위해 다음과 같이 무게 중심의 위치와 속도를 보행 상태로 정의하였다.

정의 2: 보행 상태

$$\mathbf{x} = [x \ T_c v]^T \text{ 정면 방향 보행 상태}$$



〈그림 4〉 걸음새 입력에 따른 보행 상태

$y = [y \ T_c w]^T$ 측면 방향 보행 상태

그리고 <그림 4>와 같이 걸음새 입력으로부터 그에 대응하는 보행 상태가 다음과 같이 얻어진다.

$$\zeta_{lf} = (A_r^* A_l^* - I)^{-1} (A_r^* b_l^* - A_r^* e_r + b_r^* - e_l)$$

$$\zeta_{rf} = (A_l^* A_r^* - I)^{-1} (A_l^* b_r^* - A_l^* e_l + b_l^* - e_r)$$

여기서 $\zeta_{l/rf}$ 는 보행 상태의 벡터 형태이고 $A_{l/r}^*$, $b_{l/r}^*$, $e_{l/r}$ 에는 걸음새 입력에 관한 정보가 포함되어 있다.

4. 발 궤적 생성

스윙 다리의 정면과 측면 방향으로의 궤적 (x_{foot} , y_{foot})은 3차 스플라인 보간법에 의해 다음과 같이 생성한다.

$$x_{foot}(t) = -2 \frac{S_{l/r} + S_{r/l}^{pre}}{T_{l/r}^{ss^3}} t^3 + 3 \frac{S_{l/r} + S_{r/l}^{pre}}{T_{l/r}^{ss^2}} t^2 + S_{r/l}^{pre}$$

$$y_{foot}(t) = -2 \frac{L_{l/r} + L_{r/l}^{pre}}{T_{l/r}^{ss^3}} t^3 + 3 \frac{L_{l/r} + L_{r/l}^{pre}}{T_{l/r}^{ss^2}} t^2 + L_{r/l}^{pre}$$

여기서 $S_{r/l}^{pre}$ 와 $L_{r/l}^{pre}$ 은 각각 이전 발걸음에서의 정면과 측면 보폭을 나타낸다. 그리고 스윙 다리의 수직 방향으로의 궤적 $z_{foot}(t)$ 는 싸이클로이드 함수와 3차 스플라인 보간법에 의해 다음과 같이 생성한다.

$$z_{foot}(t) = R \left\{ 1 - \cos \left(\frac{2\pi t}{T_{l/r}^{ss}} \right) \right\} + \Delta z_{foot}(t)$$

with

$$\Delta z_{foot}(t) = -2 \frac{H_{l/r} + H_{r/l}^{pre}}{T_{l/r}^{ss^3}} t^3 + 3 \frac{H_{l/r} + H_{r/l}^{pre}}{T_{l/r}^{ss^2}} t^2 + H_{r/l}^{pre}$$

여기서 R 은 싸이클로이드 원의 반지름을 나타내고 $H_{r/l}^{pre}$ 는 이전 발걸음에서의 발의 높이를 나타낸다.

5. 전체 과정

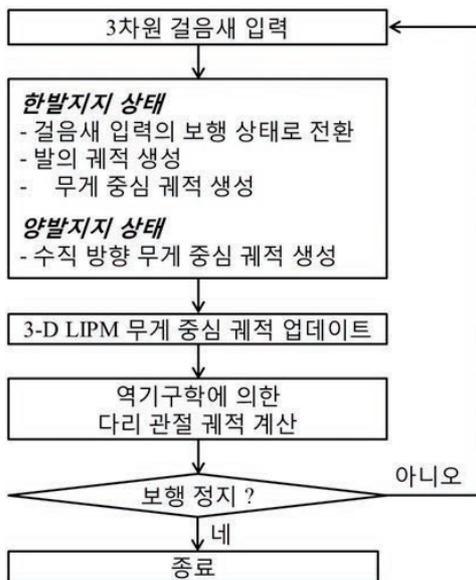
<그림 5>는 가변적 걸음새 생성기의 전체 과정을 나타낸다. 3차원 걸음새 입력이 매 제어 주기마다 걸음새 생성기에 입력된다. 한발지지 상태에서는 걸음새 입력이 보행 상태로 전환되어 무게 중심의 궤적이 생성되고 발의 궤적이 생성된다. 양발지지 상태에서는 정면과 측면 방향으로의 무게 중심의 궤적은 일정 속도로 이동하고 수직 방향으로의 무게 중심의 궤적은 발의 높이에 따라 생성된다. 결과적으로 3-D LIPM의 무게 중심 궤적이 업데이트되고 역기구학에 의해 모든 다리 관절의 궤적이 계산된다. 이 과정은 휴머노이드 로봇의 보행이 정지될 때까지 반복된다.

III. 시뮬레이션 및 실험

1. 경사 위의 가변적 보행

앞뒤 좌우로 기울어진 경사 위에서의 가변적인 보행은 시뮬레이션과 실험을 통해 수행되었다. 시뮬레이션 환경에서는 경사의 기울어진 각도가 각각 앞뒤로는 $-20.0^\circ \sim 20.0^\circ$, 좌우로는 $-8.0^\circ \sim 8.0^\circ$ 의 범위에서 로봇의 일직선 보행이 가능하였다. 그리하여 시뮬레이션은 앞뒤와 좌우로 각각 15.0° 와 $5.0^\circ / -15.0^\circ$ 와 -5.0° 로 동시에 기울어진 경사 위에서 수행되었고 (<그림 6>) 로봇이 일정한 보행 주기로 정면, 측면 보폭, 발의 방향을 매 발걸음마다 변경하면서 안전하게 걷는 것을 확인하였다 (<그림 7>).

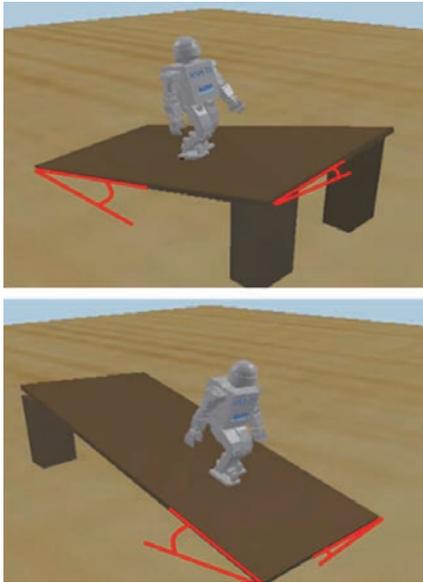
실험 환경에서는 경사의 기울어진 각도가 각각 앞뒤로



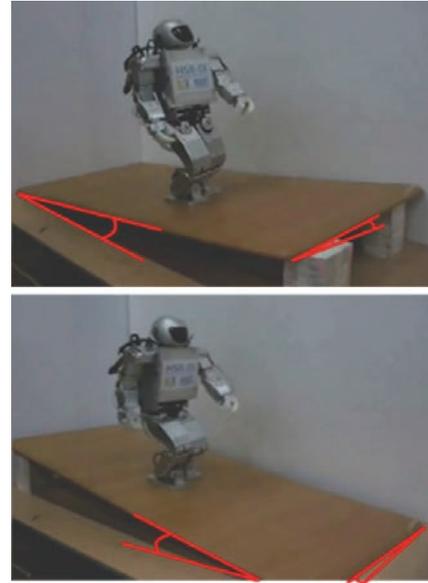
<그림 5> 걸음새 생성기 전체 과정

는 $-12.0^{\circ} \sim 12.0^{\circ}$, 좌우로는 $-6.0^{\circ} \sim 6.0^{\circ}$ 의 범위에서 로봇의 일직선 보행이 가능하였다. 그리하여 실험은

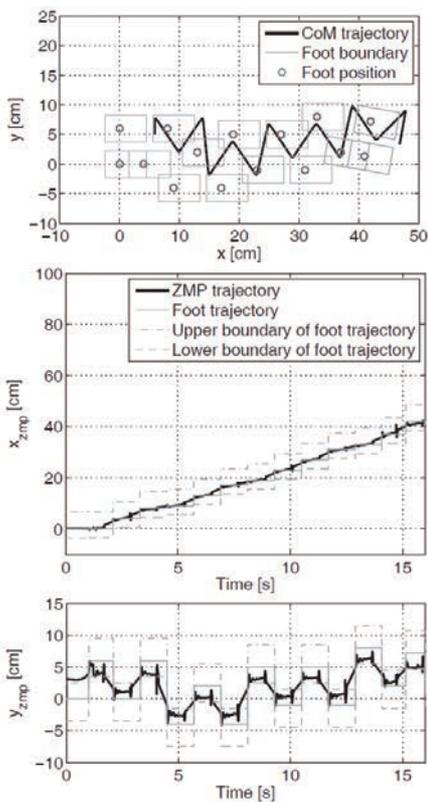
앞뒤와 좌우로 각각 8.0° 와 4.0° 로 동시에 기울어진 경사 위에서 수행되었고 (<그림 8>) 로봇이 일정한 보행 주



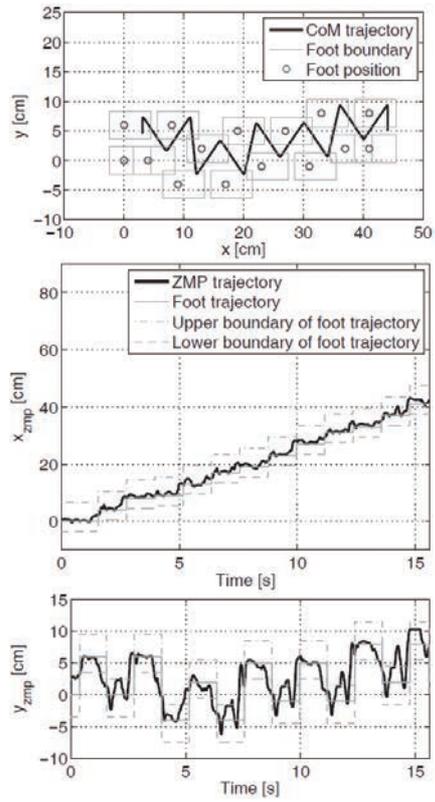
<그림 6> 시뮬레이션: 앞뒤 좌우로 기울어진 경사 위의 가변적 보행



<그림 8> 실험: 앞뒤 좌우로 기울어진 경사 위의 가변적 보행



<그림 7> 시뮬레이션: 앞뒤 좌우로 기울어진 경사 위의 가변적 보행 시 생성된 걸음새 및 무게 중심 궤적, 측정된 ZMP 궤적

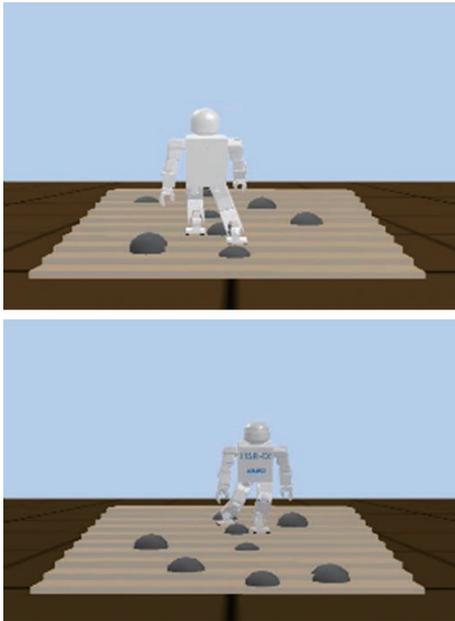


<그림 9> 실험: 앞뒤 좌우로 기울어진 경사 위의 가변적 보행 시 생성된 걸음새 및 무게 중심 궤적, 측정된 ZMP 궤적

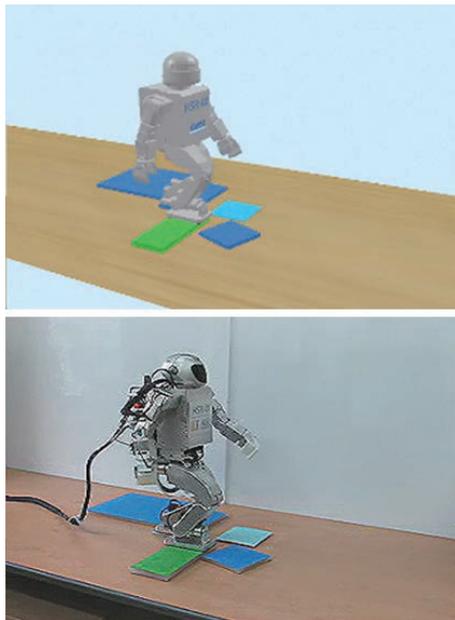
기로 정면, 측면 보폭, 발의 방향을 매 발걸음마다 변경하면서 안전하게 걷는 것을 확인하였다 (<그림 9>).

2. 계단 위의 가변적 보행

계단 위에서의 가변적 보행은 시뮬레이션을 통해 수행되었다. 시뮬레이션 환경에서는 높이 2.0 cm, 깊이 9.0



<그림 10> 계단 위의 가변적 보행



<그림 11> 비평탄 지형 위의 가변적 보행

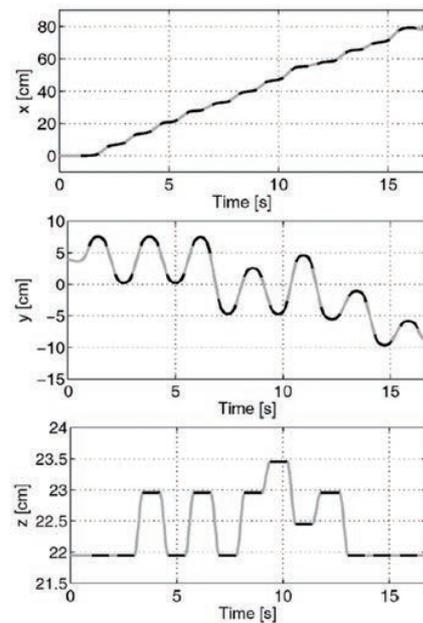
cm의 계단 위에 가변적 보행의 성능을 검증하기 위해 장애물들을 배치하였다. 시뮬레이션 결과, 로봇이 일정한 보행 주기로 측면 보폭을 매 발걸음마다 변경하면서 장애물들과 충돌 없이 계단 위를 안전하게 걷는 것을 확인하였다 (<그림 10>).

3. 비평탄 지형 위의 가변적 보행

비평탄 지형 위에서의 가변적 보행은 시뮬레이션과 실험을 통해 수행되었다. 시뮬레이션과 실험은 서로 높이 (0.5, 1.0, 1.5 cm), 크기, 방향이 다른 다섯 개의 판이 존재하는 비평탄 지형에서 수행되었다 (<그림 11>). 그 결과, 로봇이 매 발걸음마다 정면, 측면 보폭, 발의 높이, 발의 방향을 변경하면서 안정적으로 걷는 것을 확인하였고 <그림 12>은 이 때 생성된 무게 중심의 궤적들을 나타낸다.

VI. 결론

인간 환경에 존재할 수 있는 경사, 계단, 비평탄 지형에서 매 발걸음마다 한발, 양발지지 시간, 정면, 측면 방향으로의 보폭, 발의 높이, 발의 방향 등 걸음새의 요소들을



<그림 12> 비평탄 지형 위의 가변적 보행을 위한 무게 중심 궤적



독립적으로 변경할 수 있는 가변적 걸음새 생성기를 살펴 보았다. 소개된 걸음새 생성기는 실시간 ZMP 변화를 이용하여 가변적 보행이 가능하게 하였고 시물레이션과 실험을 통해 그 성능을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: system overview and integration," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., 2002, pp. 2478–2483.
- [2] K. Akachi, K. Kaneko, N. Kanehira, S. Ota, G. Miyamori, M. Hirata, S. Kajita, and F. Kanehiro, "Development of humanoid robot HRP-3P," in Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, 2005, pp. 50–54.
- [3] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H.-O. Lim, and A. Takanishi, "Development of a new humanoid robot WABIAN-2," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 2006, pp. 76–81.
- [4] I.-W. Park, J.-Y. Kim, J. Lee, and J.-H. Oh, "Online free walking trajectory generation for biped humanoid robot KHR-3(HUBO)," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 2006, pp. 1231–1236.
- [5] W. Huang, C.-M. Chew, Y. Zheng, and G.-S. Hong, "Pattern generation for bipedal walking on slopes and stairs," in Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robot., 2008, pp. 205–210.
- [6] J.-Y. Kim, I.-W. Park, and J.-H. Oh, "Realization of dynamic stair climbing for biped humanoid robot using force/torque sensors," J. Intell. Robot. Syst., vol. 56, no. 4, pp. 389–423, 2009.
- [7] T. Aoyama, K. Sekiyama, Y. Hasegawa, and T. Fukuda, "3-D biped walking over rough terrain based on the assumption of point-contact," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., 2010, pp. 3163–3168.
- [8] B.-J. Lee, D. Stonier, Y.-D. Kim, J.-K. Yoo, and J.-H. Kim, "Modifiable Walking Pattern of a Humanoid Robot by Using Allowable ZMP Variation," IEEE Trans. Robot., vol. 24, no. 4, pp. 917–925, Apr. 2008.
- [9] Y.-D. Hong, B.-J. Lee, and J.-H. Kim, "Command state-based modifiable walking pattern generation on an inclined plane in pitch and roll directions for humanoid robots," IEEE/ASME Trans. Mechatron., vol. 16, no. 4, pp. 783–789, Aug. 2011.
- [10] Y.-D. Hong and J.-H. Kim, "3-D command state-based modifiable bipedal walking on uneven terrain," IEEE/ASME Trans. Mechatron., vol. 18, no. 2, pp. 657–663, Apr. 2013.
- [11] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "A realtime pattern generator for biped walking," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 2002, vol. 1, pp. 31–37.



홍영대

- 2007년 2월 한국과학기술원(KAIST) 학사 졸업
- 2009년 1월 한국과학기술원(KAIST) 석사 졸업
- 2013년 2월 한국과학기술원(KAIST) 박사 졸업
- 2013년 2월~2014년 8월 현대자동차 중앙연구소 책임연구원
- 2014년 9월~현재 아주대학교 전자공학과 조교수

〈관심분야〉

휴머노이드 로봇, 착용식 근력증강/보행보조 로봇, 생체모방 제어, 진화최적화