

퍼지 모델을 이용한 이족 로봇의 동적 보행 설계

Dynamic Walking for a Biped Robot Using Fuzzy Model

장권규*, 주영훈*, 박현빈**

Kwon Kyu Jang, Young Hoon Joo, Hyun Bin Park

* 군산대학교 전자정보공학부, ** 호원대학교 전기전자공학과

요 약

이족 로봇은 기존의 바퀴로 움직이는 로봇에 비해 더 큰 이동성을 가지고 있다. 하지만 현실적으로는 쉽게 넘어지는 경향이 있어서, 보행시 동적인 안정성을 확보해야 할 필요성이 있다. 이를 위해서는 다양한 지면 조건에 대해 로봇 발의 움직임과 몸체의 움직임을 일치시키고, 기구학적 해석이나 동역학적 해석을 통하여 안정성을 확보해야 한다. 하지만 그 수학적 모델이 너무 난해하다는 단점이 있다. 본 논문에서는, 이족 로봇의 동적 보행에 있어서 안정성을 확보하기 위해 퍼지 모델을 설계하고, 시뮬레이션을 실행함으로써 본 논문에서 제안된 보행 알고리즘이 실현가능한 것임을 확인한다.

Abstract

The biped robot has the better mobility than the conventional wheeled robot. Since a biped robot tends to tip over easily, it is necessary to take stability into account when determining a walking pattern. To ensure the dynamic stability of the biped robot, we have to adapt the ground conditions with a foot motion and maintain motion, and ensure its stability through the kinematics and dynamics analysis. But its mathematic model is not too easy. In this paper, in order to ensure the dynamic stability of a biped robot, we design the fuzzy model and confirm the realization possibility of the proposed method through some simulations

Key words : 이족 로봇, 퍼지 모델, 동적 보행, 힙 궤적, ZMP

1. 서 론

이족 로봇은 기존의 바퀴로 움직이는 로봇에 비해 더 큰 이동성을 가진다. 하지만 쉽게 넘어지고, 거친 지대나 가파른 계단, 그리고 장애물이 있는 지역 등에서 로봇의 안정성을 확보하기가 어렵다. 안정성 확보를 위한 동적인 분석과 관련된 많은 연구가 진행중이다. 많은 연구들의 초점은 로봇의 보행 패턴 분석과 동적 보행을 위해 요구되는 궤적을 생성하는 것이다 [1,2.]

Zerrugh 등은 사람의 기구학적인 데이터에 따른 이족 로봇의 보행 패턴에 대해 연구하였다. McGeer는 내리막길에서 중력과 관성의 상호작용으로 수동적으로 생성되는 자연적인 보행 패턴에 대해 기술하였다. 최소 에너지 보행 기법을 평면과 오르막길에 확장하기 위하여, Channon과 Rostami, Roussel등은 에너지 소비의 최소화를 위한 게이트 생성 방법을 제안했다.

이족 로봇은 쉽게 넘어지기 때문에, 보행 패턴을 결정할 때, 안정성을 고려하는 것은 필수적이다. Zheng등은 정적인 안정성을 위한 게이트 생성 방법을 제안하였다. Chevallereau는 적은 에너지와 관련한 궤적을 기술할 때 동적인 안정성에 대하여 논의 하였다. 유감스럽게도, 낮은 에너지 관련 궤적은 안정성에 대한 제약을 완전히 충족시키지 못한다.

이족 로봇의 보행에 있어서, 스윙하는 다리의 발목의 궤적과 엉덩이의 궤적은 중요하게 작용한다. 대부분의 앞선 논문들은 발 궤적을 생성하기 위하여 다항 보간법을 사용하였다. 구러나, 지면의 조건이나 다양한 발의 움직임 같은 구속 조건을 가질 때, 다항식의 차수가 너무 높고, 계산이 어렵고, 궤적이 진동한다. 이런 문제를 피하기 위해, Shin[8]은 스윙하는 다리의 발 궤적 생성을 위하여 3차 스플라인 보간법을 이용하였다. 본 논문은 발 궤적을 생성하기 위하여 3차 스플라인 보간법을 사용한다 [1-3].

보행의 동적인 안정성을 확보하기 위하여, 로봇의 상체의 움직임과 엉덩이의 궤적은 매우 중요하다. Qiang Huang등은 엉덩이의 궤적 생성을 위하여 3차 스플라인 보간법을 제안하였다. 하지만 그 수학적 모델이 너무 복잡하고, ZMP의 궤적 없이 엉덩이의 궤적을 획득하였다 [1,-3]. 발과 엉덩이 궤적을 모두 알고 있다면, 기구학에 의해 이족 로봇의 모든 관절 궤적을 결정할 수 있다. 따라서 보행 패턴은 발과 엉덩이의 궤적에 의해 유일하게 결정된다.

본 논문에서는 로봇의 동적인 보행을 위하여, 3차 스플라인 보간법에 의해 스윙하는 발의 궤적을 산출하고, 퍼지 로직을 사용하여 엉덩이의 궤적을 획득하고, 시뮬레이션을 통하여, 로봇이 보행시 동적인 안정성을 확보하고 있음을 확인한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 스윙하는 이족 로봇의 발의 궤적 생성에 대해 설명하고, 3장에서는 엉덩이 궤적 생성에 대해 논한다. 4장에서는 ZMP 정의 및 보행의 안정성 확보에 관해 논하며, 5장에서는 시뮬레이션

접수일자 : 2004년 5월 15일
완료일자 : 2004년 7월 1일

및 결과 고찰을 통해 6장에서는 결론을 맺는다.

2. 스윙하는 발의 궤적 생성

그림 1에서 보는 것과 같이, 상체를 가진 인간 형태의 로봇을 고려하여, 각 다리는 3자유도의 엉덩이 관절과 1자유도의 무릎 관절, 2자유도의 발목 관절의 총 6자유도를 가지고 있다.[9] 먼저 보행 주기를 설정하면, 두발 지지와 한발 지지의 두 단계로 나눌 수 있다. 여기에서 한발 지지는 한쪽 발이 지면에 고정되어 있을 때, 다른 한발은 뒤에서 앞으로 스윙한다.[1]

두발 지지는 순간적이라 가정하고, 전체 보행 주기의 20%로 한다. 그림 2에서 보는 것처럼, 시상면에서 스윙하는 발의 궤적은 다음과 같이 결정할 수 있다.[1]

$$X_a = [x_a(t), z_a(t), \theta_a(t)]^T$$

여기서, $(x_a(t), z_a(t))$ 는 발목의 위치 좌표이고, $\theta_a(t)$ 는 발의 각도이다.

한 걸음을 걷는데 필요한 시간을 T 라 하면, k 번째 걸음의 시간은 kT 부터 $(k+1)T$ 까지이다. 여기에서, $k = 1, 2, 3, \dots$ 이고, 걸음의 수이다. k 번째 보행 단계를 $t = kT$ 에서 스윙하는 발의 뒤꿈치가 지면을 떠나는 순간에 시작하고, $t = (k+1)T$ 에서 스윙하는 다리의 뒤꿈치가 지면에 닿는 순간에 끝난다고 가정한다.

q_b 와 q_f 는 스윙하는 발이 지면을 떠날 때와 도착할 때의 발바닥의 각도이다. 발바닥 전체가 지면에 닿는 시간은 $t = kT$ 와 $t = (k+1)T + T_d$ 라 하면, 다음의 구속 조건을 얻을 수 있다.

$$\theta_a(t) = \begin{pmatrix} q_b & t = kT + T_d \\ -q_f & t = (k+1)T \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, T_d 는 두발 지지의 간격이고, 지면은 평평하다고 가정한다.

장애물이 있는 환경을 고려하여, 스윙하는 발의 최고점에서의 위치를 (L_{ao}, H_{ao}) 라 하면, (1)과 기구적인 조건으로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$x_a(t) = \begin{cases} kD_s, & t = kT \\ kD_s + l_{an} \sin q_b + l_{af}(1 - \cos q_b), & t = kT + T_d \\ kD_s + L_{ao}, & t = kT + T_m \\ (k+2)D_s - l_{an} \sin q_f - l_{ab}(1 - \cos q_f), & t = (k+1)T \\ (k+2)D_s, & t = (k+1)T + T_d \end{cases} \quad (2)$$

(2)와 (3)에서, D_s 는 한 걸음의 길이이고, l_{an} 은 발목의 높이이고, l_{af} 는 발목 관절로부터 발가락까지의 길이이고, l_{ab} 는 뒤꿈치까지의 길이이다.

$$z_a(t) = \begin{cases} l_{an}, & t = kT, (k+1)T + T_d \\ l_{af} \sin q_b + l_{an} \cos q_b, & t = kT + T_d \\ H_{ao}, & t = kT + T_m \\ l_{ab} \sin q_f + l_{an} \cos q_f, & t = (k+1)T \\ l_{an}, & t = (k+1)T + T_d \end{cases} \quad (3)$$

또한, $t = kT$ 와 $t = (k+1)T$ 에서 발 전체가 지면에 접촉하므로, 구속 조건은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \theta_a(kT_c) = 0 \\ \theta_a((k+1)T + T_d) = 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_a(kT_c) = 0 \\ \dot{x}_a((k+1)T + T_d) = 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

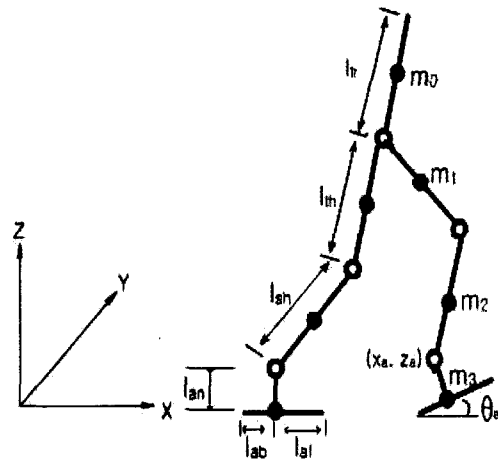


그림 1. biped robot의 모형
Fig. 1. Model of biped robot

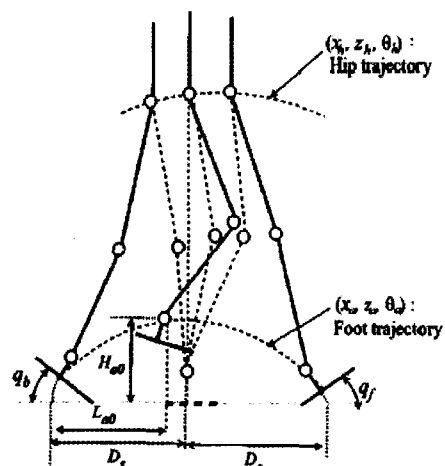


그림 2. 보행 파라미터
Fig. 2. Walking parameters

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_a(kT_c) = 0 \\ \dot{z}_a((k+1)T_c + T_d) = 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$\dot{x}_a(t)$, $\dot{z}_a(t)$, $\dot{\theta}_a(t)$ 는 모든 절점에서 연속이어야 한다. 이상의 구속 조건을 이용하여, 3차 스플라인 보간법으로 발목의 궤적을 생성한다.[1,2] 다양한 지면 조건에 대해서는 q_b 와 q_f , (L_{ao}, H_{ao}) 등을 바꾸어 줌으로써 간단하게 궤적을 생성할 수 있다.

3. 엉덩이 궤적 생성

안정성의 관점으로 볼 때, 엉덩이의 움직임은 매우 중요하다. 수평면에서 허리는 지면에 수직이고, 엉덩이의 높이는 고정된 범위 내에서 변한다. 본 논문에서는 한발 지지의 중간에서 가장 높은 위치이고, 두발 지지의 중간에서 가장 낮은 위치라 가정하면, $z_h(t)$ 는 다음과 같다.

$$z_h(t) = \begin{cases} H_{\min}, & t = kT_c + 0.5T_d \\ H_{\max}, & t = kT_c + 0.5(T_c - T_d) \\ H_{\min}, & t = (k+1)T_c + 0.5T_d \end{cases} \quad (7)$$

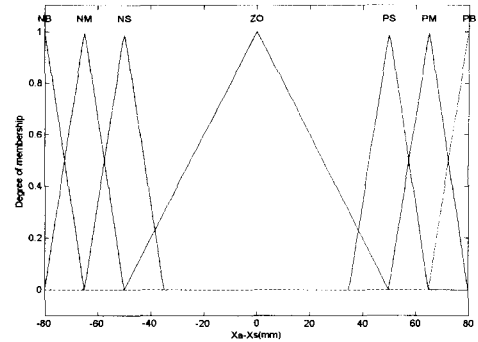
식 (7)이 만족되고, 2차 도함수들이 연속일 때, $z_h(t)$ 의 궤적 또한 3차 스플라인 보간법으로 생성할 수 있다 [1].

$x_h(t)$ 의 변화는 시상면에서 이족 로봇의 안정성에 가장 중요한 요인이다. 앞선 연구들에서는 요구된 ZMP를 실행할 수 있는 엉덩이 궤적을 구동하는 기법들을 발표했다. 하지만 이 기법들의 단점은 엉덩이의 가속이 매우 커야하며, 그 수학적 모델이 너무 복잡하다. 본 논문에서는 로봇이 한걸음을 걷는 사이에 $x_h(t)$ 의 변화를 생성하기 위하여 퍼지 모델을 사용하였다.

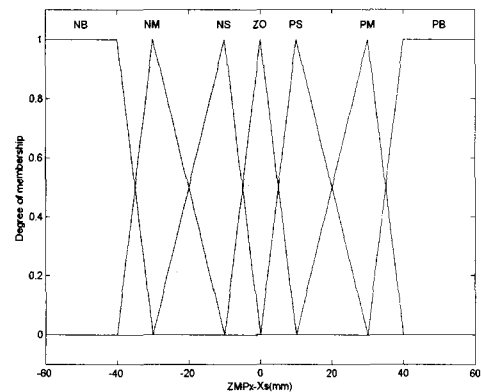
인간은 보행시 ZMP를 계속해서 앞으로 움직이는 기법을 사용한다.[4] 이런 인간의 보행을 기반으로 하여, ZMP가 계속해서 앞으로 움직인다 가정하고, 이를 만족하는 $x_h(t)$ 를 위한 퍼지 모델을 사용한다. ZMP는 엉덩이의 위치와 스윙하는 발의 위치에 의해 크게 영향을 받는다. 퍼지 모델의 입력은 스윙하는 발과 지지하는 다리 X_s 의 차와 ZMP와 지지하는 다리의 차이로 하고, 출력은 엉덩이의 x 축 궤적으로 하였다.

입력을 위한 멤버함수는 그림 3과 같고, 출력을 위한 멤버함수는 그림 4와 같다. 퍼지 논리의 기본 규칙은 표 1에서 보여준다. 그림 3-(a)는 스윙하는 다리와 지지하는 다리와의 차이에 대한 퍼지 멤버함수이고, 그림 3-(b)는 움직이는 ZMP와 지지하는 다리와의 차이에 대한 퍼지 멤버함수이다.

논리는 ZMP와 스윙하는 다리의 변화에 맞추어 ZMP의 이동에 따라, 엉덩이의 위치도 같이 이동해야 함을 보인다. 두발 지지의 중간에서 엉덩이의 위치는 두 다리의 중간에 있다고 가정하였다. 논리의 비대칭성은 로봇의 발목에서 뒤꿈치의 거리와 발목에서 발가락까지의 거리가 서로 다르기 때문이다. 비퍼지화는 무게중심법을 사용하였다.



(a) 입력변수 1의 소속함수



(b) 입력변수 2의 소속함수

그림 3. 입력변수들의 멤버쉽 함수
Fig. 3. Input membership functions

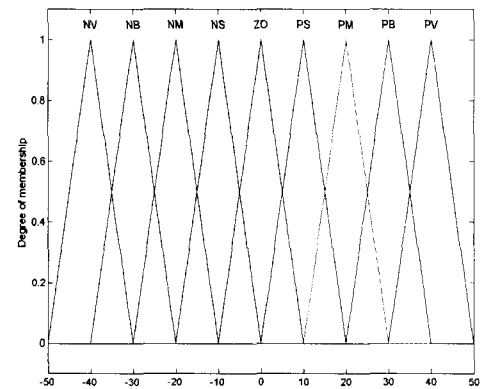


그림 4. 출력 변수의 소속함수
Fig. 4. Output membership function

표 1. 힙 궤적에 대한 퍼지 규칙
Table 1. Fuzzy rule about hip trajectory

$ZMP_x - X_s$	$X_a - X_s$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NV	NB	NB	NM	ZO	PS	PB
NM	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PB
NS	NB	NS	NS	NS	PS	PM	PB
ZO	NB	NS	NS	ZO	PM	PM	PB
PS	NB	NS	NS	PS	PM	PM	PB
PM	NB	NS	ZO	PM	PM	PB	PB
PB	NB	NS	ZO	PB	PM	PB	PV

4. ZMP 정의 및 보행의 안정성 확보

ZMP는 모든 관성항의 합이 0이 되는 점으로, 이족 로봇을 안정시키기 위해서 지지하는 다리의 발 내부에 존재해야 한다[1,2,3].

ZMP는 다음의 방정식으로 계산할 수 있다.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i(\dot{z}_i + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i \dot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{iy} \Omega_{iy}}{\sum_{i=1}^n m_i(\dot{z}_i + g)} \quad (8)$$

여기서, m_i 는 i 번째 링크의 질량이고, I_{ix} 와 I_{iy} 는 관성항이고, Ω_{ix} 와 Ω_{iy} 는 i 번째 링크 무게 중심에서의 절대 각속도이고, g 는 중력가속도이다. 본 논문에서는 로봇이 한걸음을 걷는 과정에서 y 방향으로의 움직임은 없다고 가정하였다.

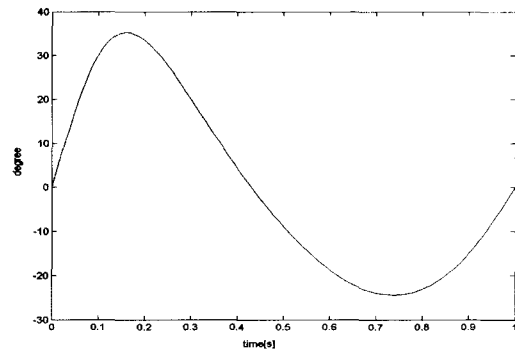
표 2. 이족 로봇의 링크 파라미터
Table 2. Link parameter of a biped robot

Link	Length(mm)	Mass(kg)
l_{tr}	120	1.2
l_{th}	115	0.3
l_{sh}	115	0.3
l_{an}	40	0.2
l_{ab}	30	
l_{of}	40	

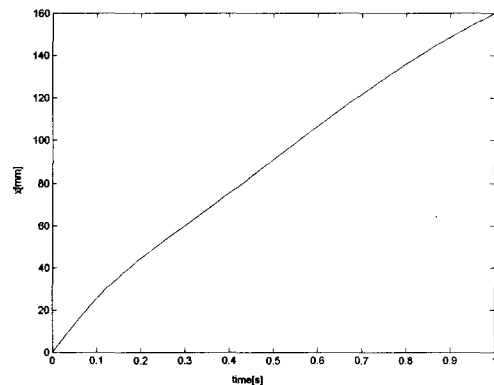
5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서는 인간의 보행을 기반으로, 로봇이 걷는 동안 ZMP가 계속해서 움직이고, 상체는 고정되어 있다고 가정하고, 한걸음에 대해서만 실험하였다. 시뮬레이션에 사용된 각 링크의 무게와 길이는 표 2에서 보여준다.

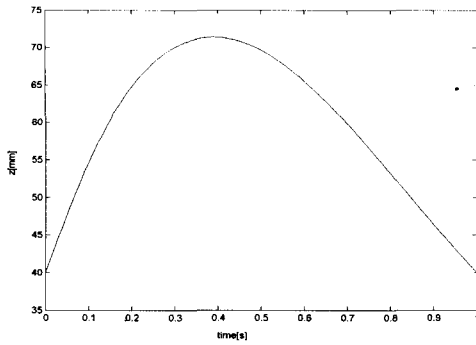
그림 5는 평평한 지면에서의 스윙하는 발의 궤적을 보여준다. 그림 5-(a)로부터 발의 각도가 요구된 각도로 지면을 떠나고 도착함을 볼 수 있다. 또한 그림 5-(b)와 5-(c)로부터 스윙하는 발의 궤적이 부드럽게 변함을 볼 수 있다. 그림 6은 퍼지 논리를 통하여 생성한 엉덩이의 x 축 변화이다. 퍼지 논리에 사용한 ZMP는 로봇이 두발로 지지하고 있을 때는 두발의 중간에 위치하고, 한발 지지일 때는 지지하는 발의 끝에서 앞으로 움직인다고 가정하였다. 이는 인간의 보행과 유사한 걸음을 만들기 위해 가정한 것이다. 그림 7은 이를 가지고 실험한 보행 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 8은 로봇이 한걸음을 걷는 동안의 ZMP의 변화를 보여준다. 그림에서 로봇이 한걸음을 걷는 동안, 한발지지를 시작할때와 끝날때에는 ZMP가 안정영역의 경계에 위치하여 로봇이 다소 불안하지만 이는 순간적으로 일어나며, 여전히 ZMP는 안정영역 이내에 존재하므로, 로봇이 넘어지지 않고, 안정하게 걸을 수 있다.



(a) 발 각도



(b) 발의 x축 움직임



(c) 발의 z축 움직임

그림 5. 발 궤적
Fig. 5. Foot trajectories

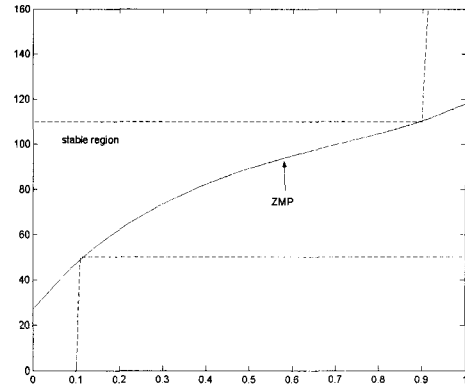


그림 8. ZMP 궤적
Fig. 8. ZMP trajectory

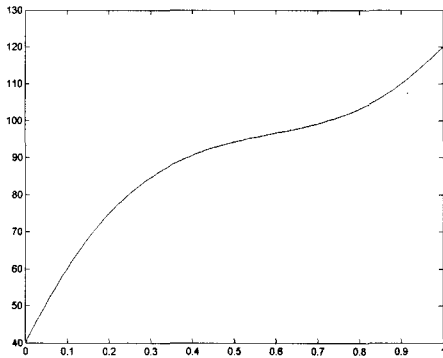


그림 6. 힙 궤적 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation result of hip trajectory

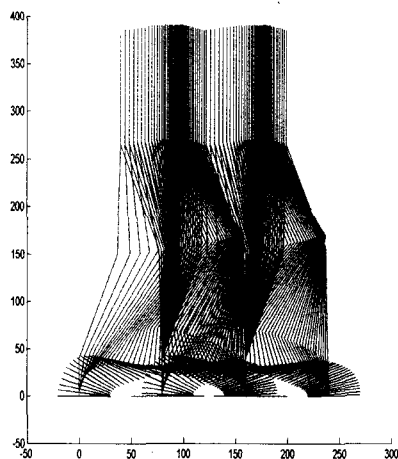


그림 7. 걷는 동작 시뮬레이션
Fig. 7. Walking simulation

6. 결 론

본 논문에서는 이족 로봇의 동적인 보행 패턴을 계획하고, 그에 따른 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 첫 번째로, 3차 스플라인 보간법을 이용하여 발목의 움직임을 산출하고, 두 번째로, 인간의 보행과 유사한 움직이는 ZMP에 대하여, 퍼지 논리를 이용하여 보행 패턴을 계획하고, 마지막으로, 그 결과를 시뮬레이션으로 확인하였다. 시뮬레이션 결과, 이족 로봇의 보행시 동적인 안정성 확보에 있어서, 엉덩이의 움직임이 매우 중요하며, 퍼지 논리를 사용하여 이를 부드럽게 제어할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Q. Huang and K. Yokoi, "Planning walking patterns for a biped robot", IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 17, No.3, pp. 234-239, 2001, 6.
- [2] H. Miura and I. Shimoyama, "Dynamic walking of a biped robot", Int. J. Robot. Tes., Vol.3, No. e, pp. 60-64, 1984.
- [3] F. Gubina, H. Hemami, and R. B. McGhee, "On the dynamic stability of biped locomotion", IEEE Trans. Bio-Med. Eng., vol BME-21, No. e, pp. 102-108, 1974.
- [4] Jong H. Park and K. D. Kim, "Biped robot walking using gravity-compensated inverted pendulum mode and computed torque control", Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (Lueven, Belgium), 1998.
- [5] Q. Li, A. Takanish, and I. Kato, "Learning control of compensative trunk motion for biped walking robot based on ZMP stability criterion", Proc. of the IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robotics and Systems, pp. 597-603, 1992.
- [6] K. Sora, T. Murakami, and K. Ohnishi, "A unified approach to ZMP and gravity center control in biped dynamic stable walking", Proc. of

Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 246-252, 1997.

- [7] J. Gurusho and M. Masubuchi, "A theoretically motivated reduced order model for the control of dynamic biped locomotion", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. DSMC-109, pp. 155-163, 1987
- [8] C. L. Shin, W. A. Gruver, and Y. Xhu, "Fuzzy logic force control for a biped robot", IEEE Int. Symposium on Intelligent Control, vol. 1, pp. 269-274, 1991
- [9] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, "The development of honda humanoid robot," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automations, pp.1321-1326, 1998.
- [10] S. M. Song and K. J. Waldron, "An analytical approach for gait and its application on wave gaits," Int. J. Robot. Automat., vol. 7, pp. 289-298, June 1991.
- [11] J. H. Park and H. A. Chung, "Hybrid control for biped robots using impedance control and computed-torque control", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1365-1370, 1998

저 자 소 개



장권규(Kwon Kyu Jang)

2003년: 군산대학교 전자정보공학부졸업
2003년~현재: 동 대학원 전자정보공학과 석사과정

관심분야 : 지능 로봇, 지능형 보행 로봇,
퍼지 제어, 신경회로망, 유전알고리즘

Phone : 063-469-4706

Fax : 063-469-4706

E-mail : lucifer@kunsan.ac.kr

주영훈(Young Hoon Joo)

제 14권 3호 (2004년 6월호 참조)

박현빈(Hyun Bin Park)

제 13권 5호 (2003년 10월호) 참조