

# 퍼지 모델을 이용한 이족 로봇의 동적 보행 설계

## Dynamic Walking for a Biped Robot Using Fuzzy Model

장 권규\*, 주 영훈\*, 두 평수\*\*, 박 현빈\*\*

Kwon Kyu Jang, Young Hoon Joo, Pyoung Soo Doo, and Bin Hyun Park

\* 군산대학교 전자정보공학부, \*\* 호원대학교 전기공학과

### 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. 하지만 이를 위한 기구학적 해석이나 동역학적 해석이 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.

Keyword: 이족 로봇, 퍼지 모델, 동적 보행, 횡 제적, 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]

이족 로봇의 보행에 있어서, 스윙하는 다리의 발목의 궤적과 엉덩이의 궤적은 중요하게 작용한다. 대부분의 앞선 논문들은 발 궤적을 생성하기 위하여 다항 보간법을 사용하였다. 하지만 지면의 조건이나 다양한 발의 움직임 같은 구속 조건을 가질 때, 다항식의 차수가 너무 높고, 계산이 어렵고, 궤적이 진동한다. 이런 문제를 피하기 위해, shin은 스윙하는 다리의 발 궤적 생성을 위하여 3차 스플라인 보간법을 이용하였다. 본 논문은 발 궤적을 생성하기 위하여 3차 스플라인 보간법을 사용한다 [1,2,3].

보행의 동적인 안정성을 확보하기 위하여, 로봇의 상체의 움직임과 엉덩이의 궤적은 매우 중요하다. Qiang Huang 등은 엉덩이의 궤적 생성을 위하여 3차 스플라인 보간법을 제안하였다. 하지만 그 수학적 모델이 너무 복잡하고, ZMP의 궤적 없이

엉덩이의 궤적을 획득하였다[1,2,3]. 본 논문에서는 로봇의 동적인 안정성과 관련하여, 퍼지 로직을 사용하여 엉덩이의 궤적을 획득하고, 시뮬레이션을 통하여, 로봇이 보행시 동적인 안정성을 확보하고 있음을 확인한다.

### 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. 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  $(k+1)T$ 까지 이다. 여기에서,  $k = 1, 2, 3...$ 이고, 걸음의 수이다.  $k$ 번째 보

행 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.

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

단,  $T_d$ 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.

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

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

(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.

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

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

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

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

$\dot{x}_a(t)$ ,  $\dot{z}_a(t)$ ,  $\theta_a(t)$ 는 모든 절점에서 연속이어야 한다. 이상의 구속 조건을 이용하여, 3차 스플라인 보간법으로 발목의 궤적을 생성한다.[1,2]

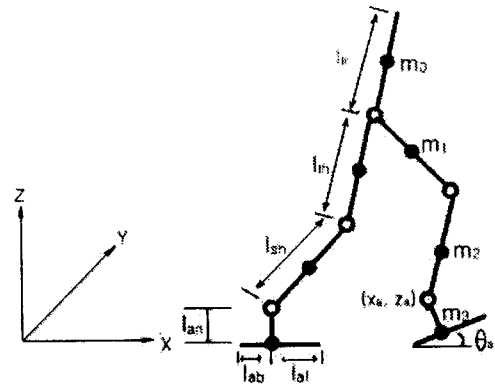


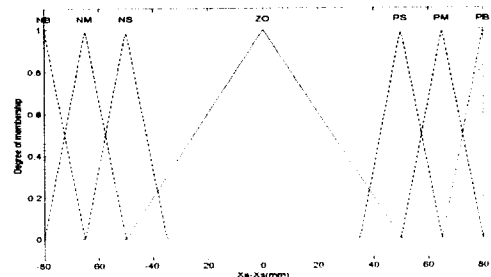
그림 1. biped robot의 모형

### 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 가정하고, 3차 스플라인 보간법으로  $z_h(t)$ 를 생성한다 [1].  $x_h(t)$ 의 변화는 시상면에서 이족 로봇의 안정성에 가장 중요한 요인이다. 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 보행 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 2와 같고, 출력을 위한 멤버함수는 그림 3과 같다. 퍼지 논리의 기본 규칙은 표 1에서 보여준다.



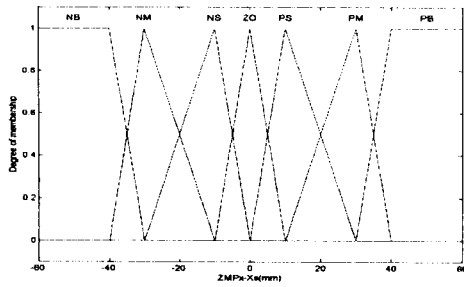


그림 2. 입력변수의 멤버십 함수

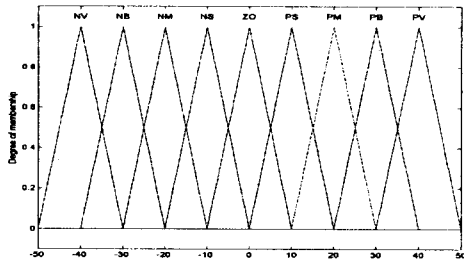


그림 3. 출력 변수의 멤버십 함수

표 1. 흰 궤적에 대한 퍼지 규칙

ZMP -X	$X_o - X_s$						
	NB	M	NS	ZO	PS	M	PB
NB	NV	NB	NB	M	ZO	PS	PB
NM	NB	M	M	NS	ZO	PS	PB
NS	NB	NS	NS	NS	PS	M	PB
ZO	NB	NS	NS	ZO	M	M	PB
PS	NB	NS	NS	PS	M	M	PB
PM	NB	NS	ZO	M	M	PB	PB
PB	NB	NS	ZO	PB	M	PB	PV

논리는 ZMP와 스윙하는 다리의 변화에 맞추어 ZMP의 이동에 따라, 엉덩이의 위치도 같이 이동해야 함을 보인다. 비대칭성은 발목에서 뒤꿈치와 발가락까지의 거리가 다르기 때문이다. 비퍼지화는 무게중심법을 사용하였다.

#### 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.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i(\dot{z}_i + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i \dot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{iy} \Omega_{iy}}{\sum_{i=1}^n m_i(\dot{z}_i + g)} \quad (7)$$

여기에서,  $m_i$ 는  $i$ 번째 링크의 질량이고,  $I_{ix}$ 와  $I_{iy}$ 는 관성항이고,  $\Omega_{ix}$ 와  $\Omega_{iy}$ 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

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	
$l_{af}$	40	

#### 5. 실험 및 결과 고찰

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

그림 4는 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 앞쪽으로 움직인다고 가정하였다. 그림 5는 이를 가지고 실험한 보행 시뮬레이션을 보여준다. 그림 6은 로봇이 한걸음을 걷는 동안의 ZMP의 변화를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 로봇이 한걸음을 걷는 동안, ZMP가 항상 안정영역 이내에 존재하므로, 로봇이 넘어지지 않고, 안정하게 걸을 수 있다.

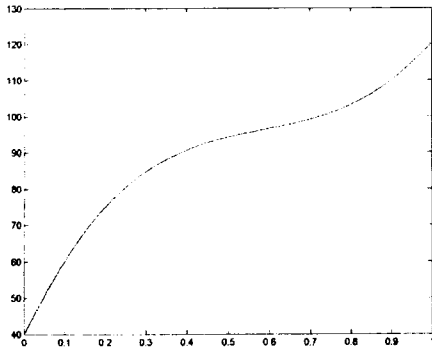


그림 4. 힘 궤적 시뮬레이션 결과

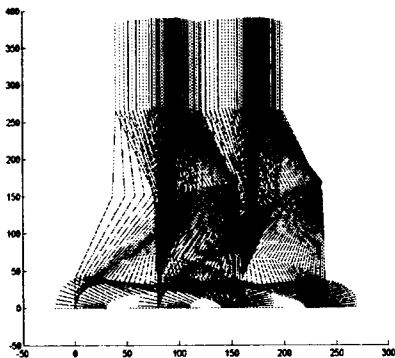


그림 5. 걷는 동작 시뮬레이션

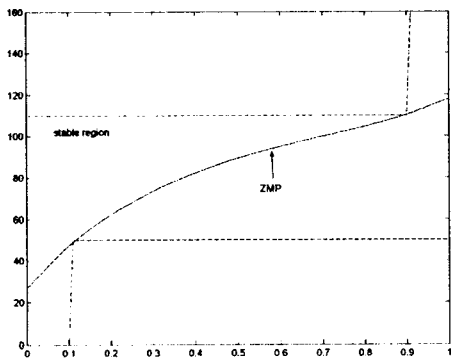


그림 6. ZMP 궤적

## 6. 결론

본 논문에서는 이족 로봇의 동적인 보행을 위하여, 3차 스플라인 보간법을 이용하여 발목의 움직임을 산출하고, 인간의 보행과 유사한, 움직이는 ZMP에 대하여, 퍼지 논리를 이용하여 보행 패턴을 계획하고, 그 결과를 시뮬레이션으로 확인하였다.

결과는 이족 로봇의 보행시 동적인 안정성 확보에 있어서, 엉덩이의 움직임이 매우 중요하며, 퍼지 논리를 사용하여 이를 부드럽게 제어할 수 있다는 것이다.

## 참고문헌

- [1] Qiang Huang and Kazuhito Yokoi, Planning Walking Patterns for a Biped Robot, IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 17, NO.3, JUNE 2001
- [2] H. Miura and I. Shimoyama, Dynamic walking of a biped, 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, in proceedings of the IEEE International Conference 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, in Proceedings of the IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robotics and Systems, (Raleigh, NC), pp. 597-603, 1992.
- [6] K. Sorao, T. Murakami, and K. Ohnishi, A unified approach to ZMP and gravity center control in biped dynamic stable walking, in Proceedings of Advanced Intelligent Mechatronics, (Tokyo, Japan), 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] Ching-Long Shih, William a. Gruver, Yun Xhu, "Fuzzy logic Force Control for a Biped Robot", IEEE International Sympos on Intelligent Control, vol .1, pp. 269, 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.