

# 이족 휴머노이드 로봇의 유연한 보행을 위한 학습기반 뉴로-퍼지시스템의 응용

## Use of Learning Based Neuro-fuzzy System for Flexible Walking of Biped Humanoid Robot

김동원\*, 강태구\*, 황상현\*\*, 박귀태\*\*\*

Dongwon Kim, Tae-Gu Kang, Sang-Hyun Hwang, Gwi-Tae Park

**Abstract** - Biped locomotion is a popular research area in robotics due to the high adaptability of a walking robot in an unstructured environment. When attempting to automate the motion planning process for a biped walking robot, one of the main issues is assurance of dynamic stability of motion. This can be categorized into three general groups: body stability, body path stability, and gait stability. A zero moment point (ZMP), a point where the total forces and moments acting on the robot are zero, is usually employed as a basic component for dynamically stable motion. In this paper, learning based neuro-fuzzy systems have been developed and applied to model ZMP trajectory of a biped walking robot. As a result, we can provide more improved insight into physical walking mechanisms.

**Key Words** :Biped humanoid robot, flexible walking, learning based neuro-fuzzy system

### 1. 서론

이족 보행로봇은 인간 생활환경에 적용이 용이하며 계단이나 문턱과 같은 거친 지면에서도 이동이 가능한 장점이 있다. 1960년대 후반 Vukobratovic이 인간형 이족 보행로봇에 관한 모델링을 처음 제시한 이후 이족 보행로봇에 관한 많은 이론적 혹은 실험적 연구가 진행되었다 [1]. 1998년에는 일본의 혼다사에서 인간형 이족 보행로봇 P3가 발표되어 산업 및 인간 생활에서의 이족 보행로봇의 활용 가능성을 입증하였다 [2]. 이족 휴머노이드 로봇은 높은 자유도로 인해 다양한 일을 수행할 수 있으며, 엔터테인먼트 로봇, 인력 보조 로봇, 서비스 로봇 등 많은 분야에서 활용되고 있다. 그러나 이족 보행로봇은 높은 자유도와 직렬형 링크 구조로 인해 안정도 해석과 제어가 어렵다. 또한 이족 구조에 포함된 다이나믹은 매우 비선형성적이며 복잡하고 불안정하다. 그러므로 인간과 같은 자연스런 보행움직임을 구현하는 것은 쉽지 않다. 하지만, 최근들어 이족 휴머노이드 로봇의 유연한 보행에 있어 중요한 기준이 되는 균형점(Zero Moment Point: ZMP)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다 [3]. ZMP를 통하여 이족 보행로봇의 보행패턴을 합성할 수 있으며 실제 로봇의 보행모션을 검증할 수도 있다. 따라서 보행로봇의 안정도를 확신하기 위해 매우 중요한 기준이 된다 [4-5].

본 논문에서 이족 휴머노이드 로봇을 구현하고 움직임을 통해 각 관절에 대한 모션 데이터를 얻는다. 모션 데이터는 학습기반 뉴로-퍼지 시스템에 인가되어 보행패턴을 생성하는

데 이용된다. 생성된 보행패턴은 휴머노이드 로봇의 유연한 보행을 위한 중요한 기준으로 적용될 수 있다.

### 2. 이족 휴머노이드 로봇

그림 1은 실제적으로 제작된 이족 휴머노이드 로봇이다. 19개의 관절로 이루어 졌으며, 길이는 308mm이고 배터리를 포함한 전체 무게는 1700g이다. 알루미늄 소재로 몸체를 구성했으며 각각의 관절은 DC 모터와 기어 그리고 제어기로 이루어진 RC 시보 모터에 의해 구동된다. 보행로봇의 하체 구조와 상체 구조에 대한 19자유도의 구조를 그림 2에서 나타내었다.

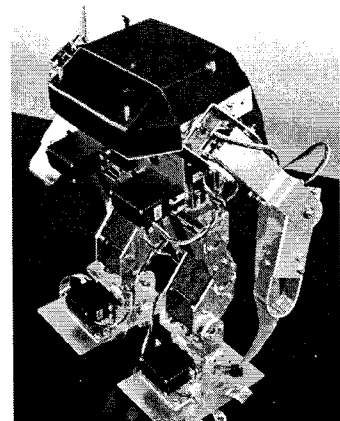


그림 1. 제작된 이족 휴머노이드 로봇

Fig. 1. Designed biped humanoid robot

\*김동원, 강태구: 高麗大學校 電氣電子電波工學科 博士課程

\*\* 황상현: 高麗大學校 電氣電子電波 碩士課程

\*\*\* 박귀태: 高麗大學校 電氣電子電波 正教授 · 工博

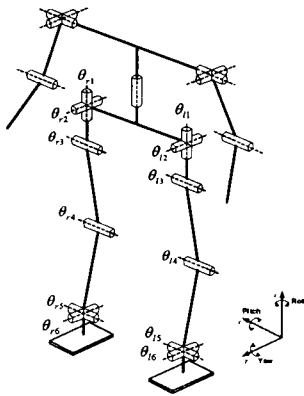


그림 2. 이족 휴머노이드 로봇의 자유도  
Fig. 2. Degree of freedom of the biped humanoid robot

그림 2와 같은 구조로 인해 제작된 이족 휴머노이드 로봇은 인간의 외형과 유사하게 보이며, 인간의 보행 동작을 따라 하며 넘어지지 않고 평지에서 48mm/1.4s 조건으로 걸을 수 있다. 보행시 각 관절의 움직임데이터는 컴퓨터와 연결된 센서를 통하여 저장되고 학습기반 뉴로-퍼지 시스템에 인가되어 균형점 궤적을 생성하게 된다.

### 3. 학습기반 뉴로-퍼지 시스템

전통적인 수학적 방식으로는 만족할만한 결과를 얻지 못했던 복잡하고, 불확실한 시스템에 대하여 뉴로-퍼지 시스템은 추론기능과 학습능력을 기반으로 강력한 근사화 능력을 가지므로, 매우 우수한 결과를 보여주고 있다 [6]. 본 논문에서 사용된 뉴로-퍼지 시스템의 구조를 살펴보면 그림 3과 같다.

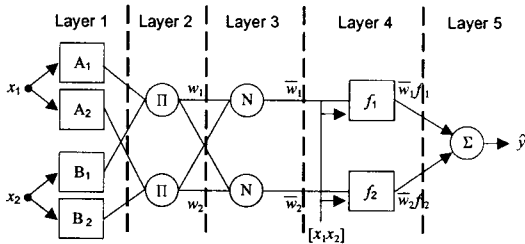


그림 3. 뉴로-퍼지 시스템 구조  
Fig. 3. Neuro-fuzzy system architecture

그림 3에 해당되는 뉴로-퍼지 시스템의 구조를 간단히 살펴보면 다음과 같다.

[Layer 1] 모든 입력변수는 퍼지집합에 대한 소속도를 포함하는 퍼지변수가 된다. 즉,

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x)$$

여기서,  $O_i^1$ 는 layer 1의 노드  $i$ 에 대한 출력이며, 멤버쉽함수  $A$ 에 대한 소속도를 계산한 것이다.

[Layer 2] 적합도를 계산하며, 1층에서의 출력값에 대한 product 연산이며, 다음과 같다.

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i=1, 2$$

[Layer 3] 각 규칙의 적합도에 대한 정규화를 계산한다.

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i=1, 2$$

[Layer 4]  $i$  노드에서의 연산은 다음과 같다.

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)$$

여기서,  $\bar{w}_i$ 는 전층의 출력값이며,  $p, q, r$ 은 퍼지규칙의 후반부 파라미터이다.

[Layer 5] 최종적인 출력값을 계산하는 노드로, 출력값은 다음과 같다.

$$O_i^5 = \text{overall output}, f = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i \bar{w}_i f_i}{\sum_i \bar{w}_i}$$

### 4. 보행궤적 생성

학습기반 뉴로-퍼지 시스템을 이용하여 추정모델을 구성하고 이족 휴머노이드 로봇의 보행궤적을 생성하였다. 퍼지규칙의 전반부에서는 삼각형 형태의 멤버쉽 함수를 사용했으며, 각 관절당 2개의 멤버쉽 함수를 할당하여 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

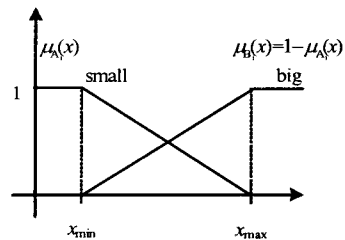


그림 4. 퍼지시스템에서 사용된 삼각형 멤버쉽 함수  
Fig. 4. Triangular membership functions used in the neuro-fuzzy system

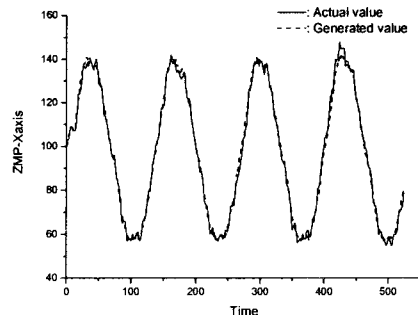


그림 5. 보행하는 휴머노이드 로봇의 x축 값  
Fig. 5. Values of x-axis of walking humanoid robot

휴머노이드 로봇의 평지 보행에 대한 결과를 그림 5-9에서 나타내었다. 그림 5는 보행하는 휴머노이드 로봇의 x축에 대한 실제 측정값과 뉴로-퍼지 시스템을 통하여 생성된 값을 비교한 것이다. 실제 측정된 값과 뉴로-퍼지 시스템을 통하여 생성된 값과의 비교를 위해 두 값의 오차를 그림 6에서 나타내었다.

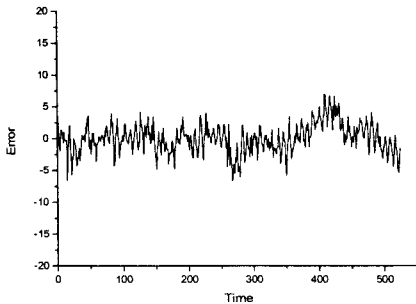


그림 6. 실제 측정된 x축 값과 생성된 값 사이의 오차  
Fig. 6. Difference of actual and generated values

보행하는 휴머노이드 로봇의 y축에 대한 실제 측정값과 뉴로-퍼지 시스템을 통하여 생성된 값을 그림 7에서 비교하였으며, 이에 대한 오차를 그림 8에서 나타내었다.

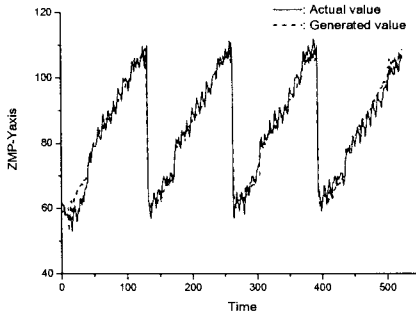


그림 7. 보행하는 휴머노이드 로봇의 y축 값  
Fig. 7. Values of y-axis of walking humanoid robot

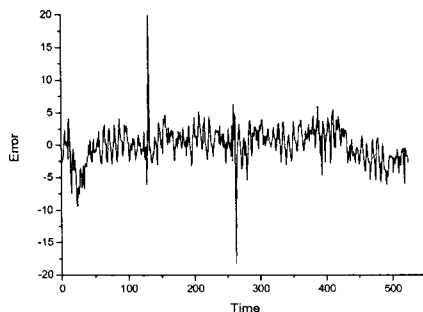


그림 8. 실제 측정된 y축 값과 생성된 값 사이의 오차  
Fig. 8. Difference of actual and generated values

그림 9에서는 뉴로-퍼지 시스템을 통하여 생성된 이족 휴

머노이드 로봇의 보행계획적인 균형점을 나타낸다.

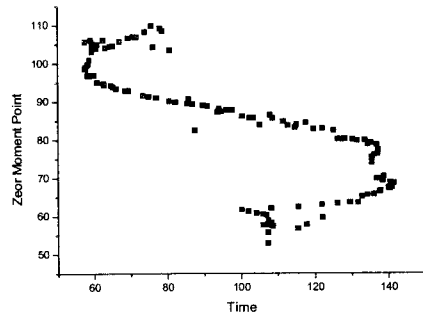


그림 9. 뉴로-퍼지 시스템을 통해 생성된 균형점  
Fig. 9. ZMP generated from neuro-fuzzy system

## 5. 결론

본 논문에서는 실제적인 이족 휴머노이드 로봇을 제작하여 움직임 데이터를 추출했다. 또한 추론기능과 학습능력이 우수한 학습 기반 뉴로-퍼지 시스템을 이용하여 로봇의 움직임 데이터로 균형점을 생성하였으며, 생성된 균형점을 통하여 휴머노이드 로봇의 유연한 보행을 위한 보행계획을 분석할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구(R01-2005-000-11044-0) 지원으로 수행된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] M. Vukobratovic, A. A. Frank, and D. Juricic, "On the Stability of BipedLocomotion" Proc. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. BME-17, No.1, pp. 25-36, 1970.
- [2] Hirai, K., et al, "The development of Honda humanoid robot", Proceedings of ICRA 2:1321-1326, 1998.
- [3] M. Vukobratovic, and B. Borovac, "Zero-Moment Point Thirty Five Years of Its Life," Int. J. Humanoid Robotics, vol. 1, no. 1, pp. 157-173, 2004.
- [4] 김동원, 박귀태, "이족 휴머노이드 로봇의 안정적인 보행 패턴 분석: 퍼지 모델링 접근방법", 전기학회논문지, vol. 54D, no. 6, pp. 376-382, Jun, 2005.
- [5] 김동원, 박귀태, "안정적인 보행을 위한 이족 휴머노이드 로봇에서의 서포트 벡터 머신 이용", 제어, 자동화, 시스템공학 논문지, 12권, 4호, pp. 315-319. April. 2006.
- [6] J.R. Jang, C. Sun, and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Softcomputing*, Prentice hall, 1997