

# ANFIS를 이용한 이족보행로봇 제어

## The Control of a Bipedal Robot using ANFIS

황재필\*, 김은태\*\*, 박민용\*\*\*

Jae Pil Hwang, Euntai Kim, Mignon Park

**Abstract** - Over the last few years, the control of bipedal robot has been considered a promising research field in the community of robotics. But the problems we encounter make the control of a bipedal robot a hard task. The complicated link connection of the bipedal robot makes it impossible to achieve its exact model. In addition, the joint velocity is needed to accomplish good control performance. In this paper a control method using ANFIS as a system approximator is proposed. First a model biped robot of a biped robot with switching leg influence is presented. Unlike classical method, ANFIS approximation error estimator is inserted in the system for tuning the ANFIS. In the entire system, only ANFIS is used to approximate the uncertain system. ANFIS tuning rule is given combining the observation error, control error and ANFIS approximation error. But this needs velocity information which is not available. So a practical method is newly presented. Finally, computer simulation results is presented to show this control method has good position tracking performance and robustness without need for leg switching acknowledgement.

**Key Words** :Bipedal Robot, Output Control, ANFIS

### 1. 서론

이족 보행 로봇은 현재 각광 받고 있는 연구 분야이다. 하지만 이족 보행 로봇은 기본적으로 다관절 로봇으로서, 기구학적으로 정확한 해석이 복잡하고, 매우 어렵다. 발 바뀌는 이족의 특성 때문에 시스템은 도중에 동역학이 바뀌게 된다. 정확한 제어를 위해서는 각 관절의 위치 값만 아니라 관절의 속도에 대한 정보도 필요하지만, 이를 위한 가법고, 정확하고, 만족할만한 성능을 보이는 각속도 센서는 아직 시중에 없다. 또한 속도 센서는 위치 센서보다 잡음의 영향을 많이 받기 때문에 로봇의 신뢰성도 보장하기 힘들다. 또한 로봇의 소형화를 위해서 많은 센서를 사용하기는 어렵다. [1]

이족 보행 로봇에서 가장 중요한 문제들 중 하나가 제어에 관한 문제이다. 간단한 PD 제어를 이용한 연구도 이루어졌으며, Miller의 인공 신경 회로망을 이용한 제어 [2] 와 Zhou의 퍼지를 이용한 제어 [3]에 관한 연구가 이루어졌다. 이외에도 Lum은 계산 토크 방식의 제어 [4]를, Liu는  $H_{\infty}$ 기법을 이용한 제어[5] 등 다양한 방법의 제어기법이 도입되었다. Jang 이 처음으로 ANFIS를 제안하였고[6], Wang 은 퍼

지 인공신경망을 이용한 관측기-제어기 구조를 제안하였다.

본 논문에서는 이러한 특성을 가진 이족 보행 로봇에 적합하도록 관절의 값만을 이용한 관측기-제어기를 설계한다. ANFIS를 이용하여 발바뀔의 영향을 추정한다.

### 2. 로봇 모델링 및 ANFIS

#### 2.1 이족보행 로봇 모델

이족 보행 로봇의 동역학식은 다음과 같은 라그랑주의 공식으로 나타나진다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q}) + G(q) = \tau \quad (1)$$

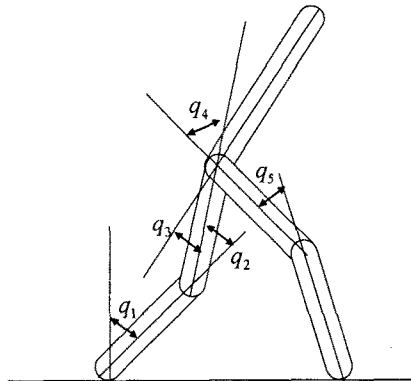


그림 1. 5-관절 이족 보행 로봇

본 연구는 중소기업청 산·학·연 공동기술개발 컨소시엄사업으로 지원되었습니다..

저자 소개

- \* 學生會員 : 延世大學 電氣電子工學科 碩士課程
- \*\* 正 會 員 : 延世大學 電氣電子工學科 助教授 · 工博
- \*\*\*正 會 員 : 延世大學 電氣電子工學科 正教授 · 工博

이족보행 로봇의 경우, 좌 우측 디딤 발의 차이에 따라  $M(q)$ ,  $C(q, \dot{q})$ ,  $G(q)$  가 변화하게 된다. 이를 표현하기 위하여 좌측 디딤과 우측 디딤의 파라미터 값들을 각각  $M_R(q)$ ,  $M_L(q)$ ,  $C_R(q, \dot{q})$ ,  $C_L(q, \dot{q})$ ,  $G_R(q)$ ,  $G_L(q)$  이라고 하자. 그러면 전체 식은 다음 과 같이 모델링 할 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + A(q, \dot{q}, \ddot{q})\delta = \tau \quad (2)$$

$$A(q, \dot{q}, \tau) = \bar{M}(q)M_L^{-1}(q)(\tau - C_L(q, \dot{q}) - G_L(q) + \bar{C}(q, \dot{q}) + \bar{G}(q)) \quad (3)$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{if right foot is on the ground} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$\bar{M}(q) = M_L(q) - M_R(q)$$

$$\bar{C}(q, \dot{q}) = C_L(q, \dot{q}) - C_R(q, \dot{q})$$

$$\bar{G}(q) = G_L(q) - G_R(q)$$

이다. 여기서  $A(q, \dot{q}, \tau)$ 를 발 교환에 의한 모델오차라고 한다. 실제 로봇에서는 이 발에 의한 변화를 직접 측정하지 못하므로, 이를 모델링 오차로 계산할 수 있다.

## 2.2 ANFIS

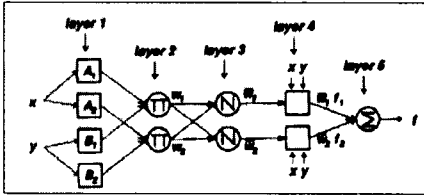


그림 2. ANFIS

인공 신경 회로망을 이용하여 퍼지시스템을 구축하는 여러 가지 방법 중에서 가장 널리 쓰이고 있는 방식중 하나가 ANFIS 이다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$f(x) = \Omega(x|\theta) = \frac{\sum_{i=1}^r f_i \left( \prod_{j=1}^p w_{A_j}(x_j) \right)}{\sum_{i=1}^r \left( \prod_{j=1}^p w_{A_j}(x_j) \right)} = \theta \xi(x) \quad (4)$$

여기서  $w_{A_j}(x_j)$ 는 전처리 부의 결과 값이다.  $r$ 은 퍼지 규칙의 수이다.  $\xi$ 는 퍼지 기저 함수이다.

## 3. 관측기-제어기 설계

### 3.1 비선형 관측기 설계

출력 되먹임 제어를 위해 우선 적절한 관측기를 설계한다.  $\hat{z}_1 = q - \hat{z}_0$ 로 정의 하고, 관측기를 다음과 같이 설계한다 [7].

$$\dot{\hat{z}}_1 = \hat{z}_2 + K_v \hat{z}_1 \quad (5)$$

$$\dot{\hat{z}}_2 = \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) + M^{-1}(q)\tau + K_v \hat{z}_1$$

새로운 상태변수  $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ 를 다음과 같이 정의 하자.

$$\hat{x}_1 = \hat{z}_1 \quad (6)$$

$$\hat{x}_2 = \hat{z}_2 + K_v \hat{z}_1$$

이를 이용하면 로봇의 관측 오차는 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{x} = A_0 x + B_0 \{ \Omega(q, \dot{q}, Q_d) - \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) \} \quad (7)$$

$$x = \begin{pmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{pmatrix}, A_0 = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -K_p & -K_v \end{pmatrix}, B_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ I \end{pmatrix} \quad (8)$$

## 3.2 제어기 설계

두 번째로 추정된 값을 이용한 제어기를 설계한다. 본 논문에서는 Computed Torque 방식의 제어기를 변형하여 측정된 속도  $\hat{x}_2$  값과  $\Omega$ 의 추정치인  $\hat{\Omega}$ 를 이용하여 변형한 제어기를 사용한다.

$$\tau = M(q) \{ \ddot{q}_d - H_v(\hat{x}_2 - \dot{q}_d) - H_p(q - q_d) - \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) \} \quad (9)$$

그러면 시스템 오차는 다음과 같다.

$$\dot{\eta} = A_C \eta + B_C \{ \Omega(q, \dot{q}, Q_d) - \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) \} + B_C H_v B_C^T x \quad (10)$$

$$\eta = \begin{pmatrix} e \\ \dot{e} \end{pmatrix}, A_C = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -H_p & -H_v \end{pmatrix}, B_C = \begin{pmatrix} 0 \\ I \end{pmatrix} \quad (11)$$

## 3.3 ANFIS 추정 오차 관측기 설계

ANFIS 으로 추정된 시스템과 관측기를 이용하여 추정된 상태를 이용하여 시스템의 결과로 예측되는 상태변수를  $y$  이라고 하면 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{y} = \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) + M^{-1}(q)\tau \quad (12)$$

$$y(0) = 0$$

새로운 변수  $\mu$ 와  $\zeta$ 를 다음과 같이 정의 하자

$$\mu = y + \sigma(q - \mu_f) \quad (13)$$

$$\mu_f = \mu \quad \mu_f(0) = 0$$

$$\zeta = \dot{q} - \mu \quad (14)$$

이를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} &= \dot{q} - \dot{\mu} \\ &= (\Omega(q, \dot{q}, Q_d) + M^{-1}(q)\tau) - (\hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) + M^{-1}(q)\tau + \sigma(\dot{q} - \mu)) \\ &= -\sigma\zeta + (\Omega(q, \dot{q}, Q_d) - \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d)) \end{aligned} \quad (15)$$

이 결과에서 살펴볼 수 있는 것은 만약 ANFIS  $\hat{\Omega}(\cdot)$ 이 주어진 불확실한 비선형 시스템  $\Omega(\cdot)$ 을 추종한다면  $\zeta$ 는 0으로 근접해감을 알 수 있다. 본 논문에서는  $\zeta$ 를 퍼지 추정 오차라고 하며, 식 (15)를 퍼지 추정 오차 관측기라고 한다.

## 4. ANFIS 시스템의 학습법

### 4.1 이론적인 ANFIS 시스템 학습법

3장에서 각각의 시스템의 오차에 관한 식(7), (10) (15)의 결과를 정리하면 다음과 같은 형태로 정리 된다.

$$\dot{\xi} = \Pi \xi + \bar{B} \bar{\Theta} \xi(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) + \bar{B} \epsilon(z, \hat{z}) \quad (16)$$

이며,  $\xi = \begin{pmatrix} x \\ \eta \end{pmatrix}$ ,  $\Pi = \begin{pmatrix} A_0 & 0 & 0 \\ B_C H_v B_C^T & A_C & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma I \end{pmatrix}$ ,  $\bar{B} = \begin{pmatrix} B_0 \\ B_C \\ I \end{pmatrix}$  이다.  $\bar{\Theta}$ 는 임

의 양한정 매트릭스  $Q$ 에 대하여  $P$ 가 다음 식의 결과값 이라고 할 때

$$\Pi^T P + P \Pi = -Q \quad (17)$$

모델 불확실성이 있는 로봇이 관측기(5), (6)와 제어기 (9)에 의하여 제어되고, 퍼지 추정 오차 관측기를 이용할 때, 퍼지 적용 시스템은 다음과 따라 다음 식에 따라 조정한다[9].

$$\dot{\theta} = \Gamma \bar{B}^T P \Xi \xi^T(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) \quad (18)$$

따라서  $\sigma$ 의 값을 충분히 크게 설정하고, 관측기의 이득  $K_v$ ,

$K_0$ 와 제어기의 이득  $H_p$ 와  $H_v$ 를 충분히 크게 하면 시스템은 우리가 원하는 만큼 충분히 작은 범위내로 추종하는 것을 알 수 있다. 하지만 위 식은 속도에 대한 정보를 필요로 하므로, 실제로 적용할 수 없다.

#### 4.2 실제 ANFIS 학습

식 (18)을 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \Gamma \bar{B}^T P \Xi \xi^T(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) - \rho \\ \dot{\rho} &= \Gamma \bar{B}^T P \Xi \dot{\xi}^T(\hat{z}_1(\tau), \hat{z}_2(\tau), Q_d(\tau)) \end{aligned} \quad (19)$$

이며,

$$\dot{\xi}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) = \frac{\partial \xi}{\partial \hat{z}_1} \frac{d\hat{z}_1}{dt} + \frac{\partial \xi}{\partial \hat{z}_2} \frac{d\hat{z}_2}{dt} + \frac{\partial \xi}{\partial Q_d} \frac{dQ_d}{dt} \quad (20)$$

이다[8]. 여기서 식 (20)의 값들은 알려져 있으므로, 이는 실제 적용할 수 있다.

#### 5. 실험결과

모델 불확실성과 외란을 가했을때 그림 3.은 제안된 방법, 그림 4.는 기존 방법을 이용한 시뮬레이션 결과이다.

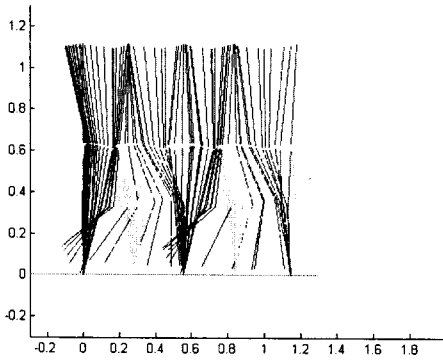


그림 3. 본 논문에서 제안한 방법

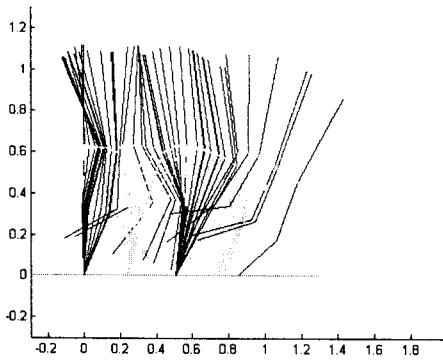


그림 4. 전통적인 방법

그림 3. 그림 4.에서 보듯이 제안된 방법에서 더 안정적이고 좋은 결과를 보여주는 것을 알 수 있다.

#### 6. 결론

본 논문에서는 이족보행의 발 바깥의 불확실성속에서도 로봇 모델을 정확하게 추종할 수 있도록 ANFIS 시스템을 이용한 관측기-제어기 구조를 제시하였다. 이는 그림 3.에서 볼 수 있는 것과 같이 발 바깥의 불확실성 속에서도 정확한 결과를 보여주는 것을 알 수 있다. 추후 실제 제작한 로봇에 실제로 적용될 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 황재필, 김은태, 박민용, "소형 이족보행 로봇 개발에 관한 연구" 대한 전자공학회 하계종합학술대회 제 26권, pp. 2791-2794, July 2003.
- [2] W.T., Miller, III, "Real-time neural network control of a biped walking robot," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 1 , April 1996, Vol. 14 ,pp 41 - 48
- [3] C. Zhou and D. Ruan, "Integration of linguistic and numerical information for biped control," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 28, 31 July 1999, pp. 53-70
- [4] H. K. Lum, M. Zribi and Y. C. Soh, "Planning and control of a biped robot" *International Journal of Engineering Science*, vol. 37, Issue 10, August 1999, pp 1319-1349
- [5] Z. Liu and C. Li, "Fuzzy neural network quadratic stabilization output feedback control for biped robots via  $H^\infty$  approach," *Systems, Man and Cybernetics, Part B*, IEEE Transactions on , Vol. 33 , Issue: 1 , Feb. 2003 pp. 67 - 84
- [6] J.-S.R. Jang, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system", *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, vol. 23, pp. 665 - 685, May-June 1993
- [7] Y. G. Leu, T. T. Lee, and W. Y. Wang, "Observer-based adaptive fuzzyneural control for unknown nonlinear dynamic systems," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. B*, vol. 29, pp. 583-591, 1999.
- [8] 황재필, "적용 퍼지 제어기를 이용한 이족 보행 로봇의 출력 제어," 연세대학교 석사논문, 2004년 (예정)