

논문 2005-42SC-5-2

이족 보행 로봇 제어에 대한 새로운 적응 퍼지 접근방법

(A New Adaptive Fuzzy Approach for Control of a Bipedal Robot.)

황 재 필*, 김 은 태**

(Jae Pil Hwang and Euntai Kim)

요 약

최근 수 년 동안 이족보행 로봇 제어는 로봇 분야에서 각광을 받는 분야인 한편, 어려운 분야이기도 하다. 본 논문에서는 이족보행 로봇을 위한 적응 퍼지 논리를 이용한 새로운 강인한 제어 방법을 제안한다. 적응 퍼지 논리는 알려지지 않은 불확실성을 제거하기 위한 시스템 추정기로 사용된다. 우선 발바꿈과 불확실성, 외란 등의 영향을 포함한 로봇 모델을 제안한다. 다음, 관절의 속도 측정을 하지 않는 제어를 설계한다. 퍼지 논리를 튜닝하기 위하여 퍼지 추정 오차 관측기를 시스템에 포함시켰다. 마지막으로 제어방법의 타당성을 보이기 위하여 시뮬레이션 결과를 보여준다.

Abstract

Over the last few years, the control of bipedal robot has been considered a promising but difficult research field in the community of robotics. In this paper, a new robust output control method for a bipedal robot is proposed using the adaptive fuzzy logic. The adaptive fuzzy logic is used as a system approximator to cancel the unknown uncertainty. First, a model for a bipedal robot including switching leg influence, uncertainty and disturbance is presented. Second, a controller is designed in which the joint velocity measurement is not required. Fuzzy approximation error estimator is inserted in the system for tuning the fuzzy logic. Finally, the result of the computer simulation is presented to show the validity of the suggested control method.

Keywords : Biped Robot, Adaptive Fuzzy Control, Controller-Observer Design

I. 서 론

이족 보행 로봇에서 가장 중요한 문제들 중 하나가 제어에 관한 문제이다. 인간과 생활하면서 로봇은 다른 장비를 장착하거나 물건을 들며, 이때 로봇의 파라미터들은 변화하게 된다. 또한 로봇의 파라미터를 정확하게 구하는 것은 불가능하며, 관절의 속도에 측정하는 것도 어려운 일이다.

인공 신경 회로망을 이용한 제어^[1]와 퍼지를 이용한 제어^[2]에 관한 연구가 이루어 졌다. 이외에도 계산 토크 방식의 제어^[3]와 H_∞ 기법을 이용한 제어^[4] 등 다양한 방법의 제어기법이 도입되었다. 이들은 각 관절의 속도에 관한 정보도 필요로 한다. 하지만 속도를 측정할만

한 신뢰성 있는 방법이 없다는 문제가 있다.

관측기-제어기 구조는 오늘날까지 다양한 연구자들에게 의하여 연구가 진행되었다. Nicosia 등은 이 위치 추적 오차의 안정성이 보장되도록 비선형 관측기가 피드백 루프에 삽입된 관측기-제어기 구조를 만들어냈다^[5]. Canudas de Wit 등은 적응 제어기, 강인 제어를 위한 가변 구조 모델 기반 관측기를 설계하였다^[6-7]. 이처럼 안정적인 관측기-제어기 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 로봇의 모델이 불확실한 경우, 관측기-제어기를 설계하기 위한 일반적인 방법은 구축되어있지 못하다.

적절한 관측기-제어기를 설계하고, 비선형 시스템을 모델링 하는 문제에 대한 대안으로 퍼지 논리가 각광받고 있다. Wang 의 퍼지 적응 제어에 대한 선구적인 연구들^[8-10] 이후, Chen et al. 은 H_∞ 와 적응 퍼지 제어 기법을 결합하였고^[11], Leu 는 관측기 기반의 적응 퍼지-뉴로 시스템을 개발하였다^[12].

본 논문에서는 불확실한 모델을 가진 이족 보행 로봇에 적합하도록 관절에서 측정되는 각도 값만을 이용한

* 학생회원, ** 평생회원, 연세대학교 전기전자공학부 (School of Electrical and Electronic Engr., Yonsei Univ.)

※ 이 논문은 2005학년도 연세대학교 학술연구비 및 중소기업청 산학연 공동기술개발 컨소시엄사업의 지원에 의하여 이루어졌습니다.

접수일자: 2005년2월4일, 수정완료일: 2005년9월14일

적응 퍼지 관측기-제어기를 설계한다. 퍼지 논리를 이용하여 비선형인 부분을 추론하고, 로봇의 불확실한 부분을 추정한다. 본 논문에서는 동일한 궤적에 대하여 기존에 계산 토크 방식을 사용한 경우와 비교해보고, 제안한 방법의 장점을 논하도록 하겠다.

II. 시스템 모델링

본 논문에서는 단순화를 위하여 5관절로 이루어진 발바닥이 없는 이족보행 로봇(그림 1.)을 사용한다. 로봇의 동역학식은 다음과 같은 라그랑지안 공식으로 표현되어진다.^[3]

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

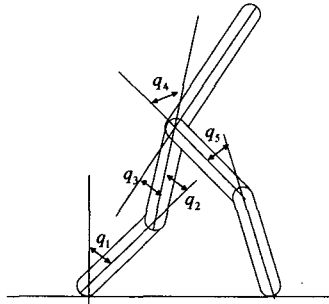


그림 1. 5-관절 이족 로봇
Fig. 1. 5-link biped robot.

2.1 이족로봇 발바꿈에 대한 모델.

본 논문에서는 단순화를 위하여 한 발만이 지면에서 지탱한다고 가정을 한다. 두 다리가 함께 지면에 닿는 경우 바로 다음 다리로 촉발이 이동한다고 가정을 한다. 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 다음과 같다.

$$(M_R(q)\ddot{q} + C_R(q, \dot{q}) + G_R(q))(1-\delta) + (M_L(q)\ddot{q} + C_L(q, \dot{q}) + G_L(q))\delta = \tau \quad (2)$$

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

이 우측 디딤과 좌측 디딤의 파라미터의 차를 각각

$$\begin{aligned} \bar{M}(q) &= M_L(q) - M_R(q) \\ \bar{C}(q, \dot{q}) &= C_L(q, \dot{q}) - C_R(q, \dot{q}) \end{aligned} \quad (3)$$

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

이라고 하면

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + \Lambda(q, \dot{q}, \ddot{q})\delta = \tau \quad (4)$$

이다.

$$\Lambda(q, \dot{q}, \tau) = \bar{M}(q)M_L^{-1}(q) (\tau - C_L(q, \dot{q}) - G_L(q)) + \bar{C}(q, \dot{q}) + \bar{G}(q) \quad (5)$$

$$M(q) = M_R(q)$$

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

$$G(q) = G_R(q)$$

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

여기서 $\Lambda(q, \dot{q}, \tau)$ 를 발 교환에 의한 모델오차라고 한다. 실제 로봇에서는 발에 바뀔 때 따른 모델의 변화를 직접 측정하지 못하므로, 이를 모델링 오차로 계산할 수 있다.

2.2 이족로봇 불확실성에 대한 모델

본 논문에서는 실제 로봇과 우리가 사용하는 로봇의 모델의 오차가 존재한다고 가정한다. 식 (4)의 파라미터의 실제 값을 각각 $\hat{M}(q)$, $\hat{C}(q, \dot{q})$, $\hat{G}(q)$ 이라고 하며 외부에서의 가해지는 마찰력, 로봇의 발 변화에 따른 외부 힘의 변화 등을 τ_d 로 가정하자. 그러면 식 (4)는 다음과 같이 변한다^[13].

$$\hat{M}(q)\ddot{q} + \hat{C}(q, \dot{q}) + \hat{G}(q) + \tau_d = \tau \quad (6)$$

식 (6)은 우리가 알고 있는 파라미터 값 $M(q)$, $C(q, \dot{q})$, $G(q)$ 을 이용하여 아래와 같이 변형할 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + \Psi(q, \dot{q}, \tau) = \tau \quad (7)$$

$$\Psi(q, \dot{q}, \tau) = -M(q) \{ \hat{M}^{-1}(q)\tau - \tau_d - \hat{C}(q, \dot{q}) - \hat{G}(q) \} + \{ \tau - C(q, \dot{q}) - G(q) - \Lambda(q, \dot{q}, \tau)\delta \} \quad (8)$$

여기서 $\Psi(q, \dot{q}, \tau)$ 는 로봇 시스템의 불확실한 파라미터들이다. 분석에 용이하도록 위 식 (7)을 단순화 시켜서 상태 방정식 형태로 바꿔보도록 한다. $x_1 = q$, $x_2 = \dot{q}$ 이라고 하면 로봇 동역학은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \Omega(x_1, x_2, \tau) + M^{-1}(q)\tau \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 $M_{-1}(q)$ 는 우리가 알고 있는 값이지만, $\Omega(x_1, x_2, \tau)$ 는 불확실하고 외란이 가해진 정보이다. 따라서 이를 정확하게 추종하는 것이 시스템의 성능에 크게 영향을 준다. 본 논문에서는 $\Omega(\cdot)$ 을 추정하기 위하여 퍼지 시스템 $\hat{\Omega}(\cdot)$ 을 이용한다.

2. 3. 퍼지시스템

본 논문에서는 Mamdani 가 제안한 퍼지 모델을 사용한다. Mamdani의 퍼지 시스템은 그림 2처럼 크게 4가지 부분으로 구분할 수 있다^[8]. 싱글톤 퍼지화, 곱추론 엔진, 무게중심법 비퍼지화를 사용한 퍼지 논리 시스템은 다음과 같은 식으로 나낼수있다^[9].

$$y(x) = \Omega(x|\Theta) = \frac{\sum_{i=1}^r y^i (\prod_{j=1}^p \mu_{A_j^i}(x_j))}{\sum_{i=1}^r (\prod_{j=1}^p \mu_{A_j^i}(x_j))} = \Theta \xi(x) \quad (10)$$

여기서 $\mu_{A_j^i}(x_j)$ 는 퍼지 멤버십 변수의 값이다. r 은 퍼지 규칙의 수이다. ξ 는 퍼지 기저 함수라고 하며 다음과 같이 정의된다.

$$\xi^T = (\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^r) \quad (11)$$

$$\xi(x^i) = \frac{\prod_{j=1}^p \mu_{A_j^i}(x_j)}{\sum_{i=1}^r (\prod_{j=1}^p \mu_{A_j^i}(x_j))} \quad (12)$$

또 Θ 는 적응 파라미터 벡터로서 다음과 같이 정의된다.

$$\Theta = \begin{pmatrix} y_1^1 & y_1^2 & \dots & y_1^r \\ y_2^1 & y_2^2 & \dots & y_2^r \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_q^1 & y_q^2 & \dots & y_q^r \end{pmatrix} \quad (13)$$

이러한 퍼지 시스템은 범용적 근사성을 가진다^[8].

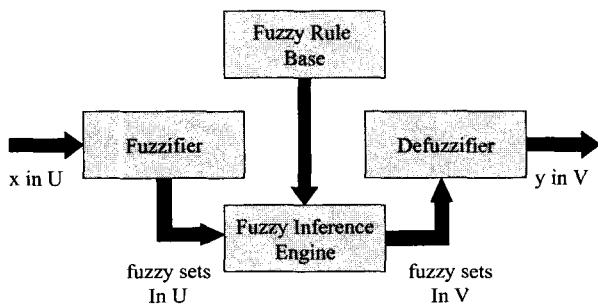


그림 2. 퍼지 시스템 개념도.
Fig. 2. Fuzzy Logic System.

III. 출력피드백을 이용한 관측기-제어기 구조설계

본 논문의 관측기-제어기는 속도를 관측하기 위한 관측기, 실제 제어기, 그리고 퍼지를 이용한 시스템 추정의 오차를 구하기 위한 퍼지 추정 오차 관측기로 구성된다.

3.1 비선형 관측기 설계

출력 피드백 제어를 위해 로봇의 관절 상태를 관측하기 위한 관측기를 설계 한다. $z_1 = q - \hat{z}_1$ 로 정의 하고, 다음과 같이 관측기를 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}_1 &= \hat{z}_2 + K_{vz} z_1 \\ \dot{\hat{z}}_2 &= \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) + M^{-1}(q)\tau + K_{pz} z_1 \end{aligned} \quad (14)$$

: 속도 관측오차 이득
: 위치 관측오차 이득

관측된 상태변수 \hat{x}_1, \hat{x}_2 를 다음과 같이 정의한다^[5].

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \hat{z}_1 \\ \hat{x}_2 &= \hat{z}_2 + K_{vz} z_1 \end{aligned} \quad (15)$$

관측오차의 상태방정식은 식(16)과 같다.

$$\dot{x} = A_0 x + B_0 \{ \Omega(q, \dot{q}, Q_d) - \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) \} \quad (16)$$

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, A_0 = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -K_p & -K_v \end{pmatrix}, B_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ I \end{pmatrix}$$

3.2 제어기 설계

추정된 값을 이용한 제어기를 설계한다. 본 논문에서는 계산 토크 방식의 제어기를 변형하여 측정된 속도 \hat{x}_2 값과 Ω 의 추정치인 $\hat{\Omega}$ 을 이용하여 변형한 제어기를 사용한다.

$$\begin{aligned} \tau &= M(q) \ddot{q}_d - H_v(\hat{x}_2 - \dot{q}_d) - \\ &H_p(q - q_d) - \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) \end{aligned} \quad (17)$$

q_d : 추종하는 궤적

H_v : 제어기 속도오차 이득

H_p : 제어기 위치오차 이득

제어 오차를 $e = q - q_d$ 라고 할 때 제어 입력 τ 는 식 (18)과 같다.

$$\tau = M(q) \left\{ \ddot{q}_d - H_v (\dot{e} - \ddot{x}_2) - H_p e - \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) \right\} \quad (18)$$

이다. 이를 이용하여 제어 오차 η 의 상태방정식을 구하면

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= A_C \eta + B_C \left\{ \Omega(q, \dot{q}, Q_d) - \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) \right\} \\ &\quad + B_C H_v B_C^T x \\ \eta &= \begin{pmatrix} e \\ \dot{e} \end{pmatrix}, \quad A_C = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -H_p & -H_v \end{pmatrix}, \quad B_C = \begin{pmatrix} 0 \\ I \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

이다.

3.3 퍼지 추정 오차 관측기 설계

퍼지 논리로 추정된 시스템과 관측기를 이용하여 추정된 상태를 이용하여 시스템의 결과로 예측되는 상태 변수를 y 이라고 하면 시스템은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{y} &= \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) + M^{-1}(q)\tau \\ y(0) &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

새로운 변수 μ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \mu &= y + \sigma(q - \mu_I) \\ \dot{\mu}_I &= \mu, \quad \mu_I(0) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 σ 는 양의 정수이다. 새로운 변수 μ 를 이용한 방정식은

$$\begin{aligned} \dot{\mu} &= \dot{y} + \sigma(\dot{q} - \dot{\mu}) \\ &= \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) + M^{-1}(q)\tau + \sigma(\dot{q} - \dot{\mu}) \end{aligned} \quad (22)$$

이다. \dot{q} 는 측정이 불가능하기 때문에 이 방정식을 실제 사용할 수 없다. 퍼지 시스템의 오차 ζ 를 다음과 같이 잡으면

$$\zeta = \dot{q} - \dot{\mu} \quad (23)$$

ζ 를 미분하여 식 (6)과 (22)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} &= \ddot{q} - \dot{\mu} \\ &= -\sigma\zeta + \left\{ \Omega(q, \dot{q}, Q_d) - \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

이 결과에서 살펴볼 수 있는 것은 만약 적응 퍼지 시스템 $\hat{\Omega}(\cdot)$ 이 주어진 불확실한 비선형 시스템 $\Omega(\cdot)$ 을 추종한다면 ζ 는 0으로 근접해감을 알 수 있다. 본 논문에서는 ζ 를 퍼지 추정 오차라고 하며, 식 (20)과 식 (21), 식 (22)를 이용한 식 (24)을 퍼지 추정 오차 관

측기라고 한다.

IV. 적응 퍼지 시스템의 튜닝

지금까지 관측기와 제어기 그리고 추정오차 관측기에 대하여 살펴보았다. 전체 시스템을 도식적으로 나타내면 그림 3와 같다. 모든 시스템들은 각각 $\bar{\theta}$ 의 값에 따라서 그 추종성이 결정된다. 따라서 갱신 법칙은 속도 관측기의 성능과 제어기의 성능 그리고 퍼지 추정 오차 관측기 3가지 부분의 성능 모두를 좋게 해야 한다. 이번 장에서는 시스템의 불확실성과 외력 등을 모델링하는 퍼지 시스템의 적응 방법에 대하여 알아보고, 이의 수렴성에 대하여 살펴보기로 하겠다.

III장에서 각각의 시스템의 오차에 관한 식(16), (19) (24)와 퍼지시스템을 결합하여 정리하면 다음과 같은 형태로 정리된다.

$$\dot{\Xi} = \Pi \Xi + \bar{B} \bar{\theta} \xi(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) + \bar{B} \epsilon(z, \bar{z}) \quad (25)$$

$$\Xi = \begin{pmatrix} x \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix}, \quad \Pi = \begin{pmatrix} A_o & 0 & 0 \\ B_C H_v B_C^T & A_C & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma I \end{pmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{pmatrix} B_o \\ B_C \\ I \end{pmatrix}$$

여기서 Ξ 는 전체 오차이고, $\epsilon(z, \bar{z})$ 는 퍼지시스템의 추정오차로써 유계하다. $\bar{\theta}$ 는 최적화된 퍼지 파라미터와 현재 퍼지 파라미터의 오차이다. Π 가 모든 고유치들이 복소평면의 좌 반면에 위치하도록 관측기의 이득 (K_p, K_v)와 제어기의 이득 (H_p, H_v), 그리고 퍼지 오차 추정기의 이득 σ 를 적절히 선택할 수 있다. 그러면 다음 식을 만족시키는 임의의 양 한정 행렬 Q 에 대하여 다음과 같은 양 한정 행렬 P 가 존재한다.

$$\Pi^T P + P \Pi = -Q \quad (26)$$

정리 1: 모델 불확실성이 있는 로봇이 관측기 식 (14), 식(15)와 제어기 식 (17)에 의하여 제어되고, 퍼지 추정 오차 관측기를 이용할 때, 퍼지 적응 시스템은 다음에 따라 다음 식에 따라 조정한다.

$$\dot{\theta} = \Gamma \bar{B}^T P \Xi \xi^T(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) \quad (27)$$

그리고 θ 가 유계하면, 총 오차 Ξ 는 균일하고 궁극적으로 유계하다(Uniformly Ultimately Bounded)^[13].

위 정리 1에 따라서 시스템은 우리가 원하는 만큼 충분히 작은 범위내로 추종하는 것을 알 수 있다. 하지만

식 (27)에 따른 방식은 $\Theta(\cdot)$ 를 필요로 하기 때문에 실제 적용시킬 수는 없다. 이를 극복하기 위하여 식 (27)을 [14]처럼 적분하면 다음과 같다.

$$\Theta(t) = \Gamma \bar{B}^T P E \int_0^t \xi^T(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) - \int_0^t \{ \Gamma \bar{B}^T P E \int_0^\tau \xi^T(\hat{z}_1(\tau), \hat{z}_2(\tau), Q_d(\tau)) \} d\tau \quad (33)$$

$$E_I = \int_0^t E(\tau) d\tau = \begin{pmatrix} \int_0^t q(\tau) d\tau - \int_0^t \hat{x}_1(\tau) d\tau \\ q - \int_0^t \hat{x}_2(\tau) d\tau \\ \int_0^t q(\tau) d\tau - \int_0^t q_d(\tau) d\tau \\ q - q_d \\ q - \int_0^t \mu(\tau) d\tau \end{pmatrix}$$

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

여기서 $d\hat{z}_1/dt = \hat{z}_1$, $d\hat{z}_2/dt = \hat{z}_2$ 는 관측기 식 (14)을 이용하여 구할 수 있으며, $dQ_d/dt = \dot{Q}_d$ 는 원하는 값을 임의로 줄 수 있으므로, 이미 구해져있다고 가정할 수 있다. 또한 $\partial \xi / \partial \hat{z}_1$, $\partial \xi / \partial \hat{z}_2$, $\partial \xi / \partial Q_d$ 는 기저함수가 이미 주어졌으므로, 분석적인 방법을 통하여 쉽게 구할 수 있다. 그러므로 퍼지 추정 시스템은 다음과 같이 E 를 사용하지 않아도 식 (34)와 같이 계산 할 수 있다.

$$\Theta(t) = \Gamma \bar{B}^T P E \int_0^t \xi^T(\hat{z}_1, \hat{z}_2, Q_d) - \rho \quad (34)$$

$$\dot{\rho} = \Gamma \bar{B}^T P E \dot{\xi}^T(\hat{z}_1(\tau), \hat{z}_2(\tau), Q_d(\tau))$$

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

V. 시뮬레이션

이번 장에서는 제안된 방법을 계산 토크 방식 (Computed Torque)을 사용했을 때의 결과와 비교하였다. 모델이 불확실할 때의 경우 로봇의 평균 제곱 오차는 위치 추적의 오차의 경우 계산 토크 방식보다 83%가 줄었고, 속도 추적 오차는 30%가 줄었다.

외란이 가해진 경우 그림 4와 그림 5에서 볼 수 있듯이 계산 토크 제어 방식의 결과는 외란의 영향으로 넘어지는 것을 볼 수 있다. 하지만 제안된 방식의 안정된 결과를 보여준다. 평균 제곱 오차를 구해본 결과 위치 추정의 경우 오차가 91%가 감소하였으며, 속도 추정의

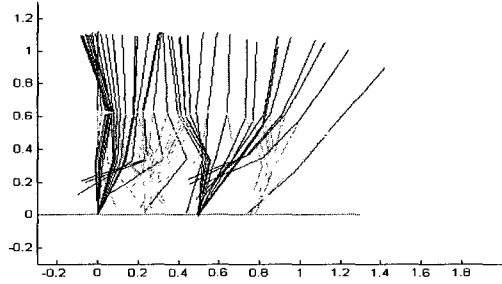


그림 3. 외란이 가해졌을 때 계산토크제어에서의 결과
Fig. 3. Simulation result using computed torque control with disturbance.

표 1. 모델이 불확실할 때의 평균 제곱 오차

Table 1. Mean-square-error with model uncertainty.

	계산 토크 방식의 위치 평균 제곱 오차 rad ² sec	제안된 방식의 위치 평균 제곱 오차 rad ² sec	계산 토크 방식의 속도 평균 제곱 오차 rad ² /sec	제안된 방식의 속도 평균 제곱 오차 rad ² /sec
q ₁	0.0063	0.0017	8.5392	7.3715
q ₂	0.0139	0.0006	3.1341	0.9611
q ₃	0.0112	0.0011	3.4951	1.3069
q ₄	0.0082	0.0020	7.2539	5.9930

표 2. 외란이 가해졌을 때의 평균제곱오차

Table 2. Mean-square-error with disturbance.

	계산 토크 방식의 위치 평균 제곱 오차 rad ² sec	제안된 방식의 위치 평균 제곱 오차 rad ² sec	계산 토크 방식의 속도 평균 제곱 오차 rad ² /sec	제안된 방식의 속도 평균 제곱 오차 rad ² /sec
q ₁	0.0466	0.0146	12.4120	15.1722
q ₂	0.0258	0.0030	3.1026	3.0889
q ₃	0.0949	0.0050	5.8138	3.2175
q ₄	0.3903	0.0241	30.3220	19.5573

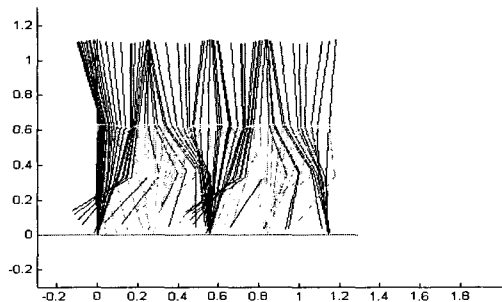


그림 4. 외란이 가해졌을 때 제안된 방법에서의 결과
Fig. 4. Simulation result using suggested method with disturbance.

오차는 20% 감소한 것을 볼 수 있다. 하지만 첫 관절에서 오차가 증가한 모습을 볼 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 모델이 불확실한 이족보행 로봇을 위한 관측기 기반의 적응 퍼지 출력 피드백 제어 방법을 제안하였다. 하나의 퍼지 논리의 결과를 제어기와 관측기에 동시에 사용함으로써 각각의 퍼지 논리를 사용하여 추정하는 것보다 적은 계산 량으로 원하는 성능을 얻을 수 있다. 또 속도를 측정하기 위한 관측기와 제어기 그리고 제어기와 관측기에서 불확실성을 제거하기 위하여 사용된 퍼지 시스템의 오차를 추정할 수 있도록 퍼지 추정 오차 관측기를 사용하였다.

추후 연구 과제로 본 논문에서 제안한 방법을 디지털 시스템에 적용할 수 있도록 이산 제어 시스템으로 구성하여 로봇에 적용시켜 보겠다. 또한 입력 토크가 큰 경우 실제로 구현하기 힘들 수 있기 때문에, 토크가 제한된 경우에 대한 연구도 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] W. T. Miller III, "Real-time neural network control of a biped walking robot," IEEE Contr. Syst. Magazine, Vol. 1, April 1996, vol. 14, pp 41-48
- [2] C. Zhou and D. Ruan, "Integration of linguistic and numerical information for biped control," Robotics and Autonomous Syst., vol. 28, 31 July 1999, pp. 53-70
- [3] H. K. Lum, M. Zribi and Y. C. Soh, "Planning and control of a biped robot" Intern. Jour. of Eng. Sci., vol. 37, Issue 10, August 1999, pp 1319-1349
- [4] Z. Liu and C. Li, "Fuzzy neural network quadratic stabilization output feedback control for biped robots via H^∞ approach" IEEE Trans. Syst. Man and Cybern., Part B, Vol. 33, Issue: 1, Feb. 2003 pp. 67 - 84
- [5] S. Nicosia and P. Tomei, "Robot control by using only joint position measurements," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 35, pp. 1058-1061, Sept. 1990.
- [6] C. C. C. Canudas deWit and N. Fixot, "Adaptive control of robot manipulators via velocity estimated feedback," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 37, pp. 1234-1237, Sept. 1992.
- [7] ———, "Robot control via robust estimated state feedback," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 36, pp. 1497-1501, Oct. 1991.
- [8] L.-X. Wang, A Course in Fuzzy Systems and Control. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [9] ———, "Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 1, pp. 146-155, Feb. 1993.
- [10] ———, Adaptive Fuzzy Systems and Control. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1994.
- [11] B. S. Chen, C. H. Lee, and Y. C. Chang, "H1 tracking design of uncertain nonlinear SISO systems: adaptive fuzzy approach," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 4, pp. 32-43, Feb. 1996.
- [12] 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.
- [13] A. T. Vemuri, M. Polycarpou, and S. A. Diakourtis, "Neural network based fault detection in robotic manipulators," IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 14, pp. 342-348, Feb. 1998.
- [14] M. S. De Queiroz, J. Hu, D. Dawson, T. Burg, and S. Donepudi, "Adaptive position/force control of robot manipulators without velocity measurements: Theory and experimentation," IEEE Trans. Syst. Man Cybern. B, vol. 27, pp. 796-809, Oct. 1997.

저 자 소 개



황재필(학생회원)
2003년 연세대학교 기계전자공학부 학사졸업.
2005년 연세대학교 전기전자공학 석사졸업.
2005년~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 이족로봇, 로봇비전>

김 은 태(정회원)

전자공학회 논문지 제 41권 CI편 제 4호 참조
현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수.