

◆특집◆ 지능형로봇 평가기술

적응 백스테핑 방법을 이용한 이족보행 로봇의 퍼지 논리 제어

황재필*, 주정호**, 김은태*, 이희진***

Fuzzy Logic Control of a Biped Robot Using Adaptive Backstepping Method

Jaepil Hwang*, Jung Ho Joo**, Euntai Kim* and Heejin Lee***

Key Words : Biped Robot(이족보행로봇), Adaptive Fuzzy Control(적응퍼지제어), Backstepping Method(역추적법)

1. 서론

이족 보행 로봇 분야는 최근 몇 년간 수많은 연구자들에게 주목을 받아왔고, 그에 따른 연구도 많이 진행되고 있는 분야이다. 이족 보행 로봇에서 가장 중요한 문제들 중 하나가 제어에 관한 문제이다. 이를 위해 모델의 내부적인 불확실성과 외란을 포함한 수많은 적응 제어 방법과 강인 제어 방법들이 연구되었다. 하지만 이러한 방법들의 첫 번째 문제점은 정확한 위치, 속도, 가속도에 대한 정보가 필요하다. 또한 로봇의 동역학식 뿐만 아니라 모터의 동역학식도 더해져서, 로봇이 3 차 동역학식으로 표현된다. 하지만 대부분의 제어기는 2 차 로봇의 경우에 맞게 설계되었기 때문에 모터의 동역학식이 무시된다.

위에서 언급한 제어의 약점들을 보완하기 위하여 많은 연구들이 개발되어 왔다. Nicosia et al.이 위치 추적 오차의 안정성이 보장되도록 비선형 관측기가 되먹임 루프에 삽입된 관측기-제어기 구조를 만들어 냈다.¹ 이후, Lim et al. 이 동일한 문제를 백스테핑 관점에서 다루어 동일한 결과를 얻었

다.² 설계를 위하여 변수 구조 모델 기반의 관측기를 개발하였다. 하지만 이 방법들은 로봇의 모델이 불확실한 경우, 매끄러운 관측기-제어기를 설계하기가 어렵다. 또한 모터의 동역학식을 포함하고 있지 않다.

본 논문에서는 전기적으로 구동되는 로봇에 대해 적응 퍼지 논리와 적응 퍼지 백스테핑 방법을 이용하여 제어기³를 이족 보행 로봇 모델⁹에 적용하여 더 안정된 시스템을 구축하고자 한다

2. 이론적 배경

2.1 이족보행로봇 모델링

본 논문에서는 단순화를 위하여 5 관절로 이루어진 발바닥이 없는 이족보행 로봇(Fig. 1)을 사용한다.

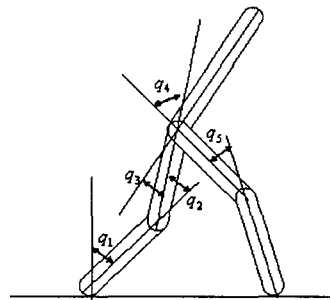


Fig. 1 이족보행로봇 모델

* 연세대학교 전기전자공학부

** 삼성전자 반도체사업부

*** 국립 환경대학교 정보제어공학과

본 연구는 2004년도 연세대학교 연구처 정책연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) &= \mathbf{K}_T \mathbf{I}_C & (1.a) \\ \mathbf{L} \dot{\mathbf{I}}_C + \mathbf{R} \mathbf{I}_C + \mathbf{K}_B \dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{u} & (1.b) \end{aligned}$$

여기서 $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ 는 관절의 위치, 속도, 가속도이며, $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 는 관성 행렬이고, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 는 코리올리스의 힘과 회전력에 의한 영향을 포함한 행렬이며, $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 는 중력 행렬을 나타낸다. 그리고 \mathbf{K}_T 는 전류와 토크 사이의 전자기계적인 변환을 결정짓는 모터의 토크 상수이다. \mathbf{I}_C 는 n 개의 DC 모터들의 전기자 전류이다. $\mathbf{L}, \mathbf{R}, \mathbf{K}_B$ 는 차례로 전기적 자기유도, 전기적 저항 그리고 역 전기유도 힘 상수를 나타내는 양 한정 행렬이다.

5 축 이족 보행로봇의 보행시에는 한발만 지면에 닿는다고 가정을 한다. 이때 좌우측 디딤발의 차이에 따라 $\mathbf{M}(\mathbf{q}), \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \mathbf{G}(\mathbf{q})$ 가 변화하게 된다. 이러한 변화를 모델링하면 (1.a)는 (2)와 같이 식이 바뀐다.⁹

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{\Lambda}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{I}_C)\delta = \mathbf{K}_T \mathbf{I}_C \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{\Lambda}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{I}_C) &= \tilde{\mathbf{M}}(\mathbf{q})(\tilde{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) + \mathbf{M}(\mathbf{q}))^{-1} \\ &+ (\mathbf{K}_T \mathbf{I}_C - (\tilde{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) - (\tilde{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}))) \\ &+ \tilde{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \tilde{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{aligned}$$

여기서 $\tilde{\mathbf{M}}(\mathbf{q}), \tilde{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{q})$ 는 각각의 파라미터들의 발바꿈에 따른 오차를 나타내며, $\mathbf{\Lambda}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{I}_C)$ 는 발교환에 따른 모델 오차라고 한다. 이를 직접 측정하지는 못하므로 이를 모델링 오차로 계산할 수 있다.

로봇의 실제 모델과 이상적인 모델 사이에는 내부적인 모델의 불확실성과 로봇의 하중의 변화로 인한 약간의 오차가 생긴다. 이는(1)의 양변을 \mathbf{K}_T 로 나누어준 로봇의 이상적인 파라미터를 $\mathbf{M}(\mathbf{q}), \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \mathbf{G}(\mathbf{q})$ 라고 하면 로봇의 이상적인 모델은 식(3)와 같다.⁸

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{\Psi}_r(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{I}_C) &= \mathbf{I}_C \\ \mathbf{I}_C &= -\mathbf{R}_L \mathbf{I}_C - \mathbf{K}_L \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{L}^{-1} \mathbf{u} + \mathbf{\Psi}_m(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{I}_C) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{R}_L = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{R}, \mathbf{K}_L = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{K}$ 이며, $\mathbf{\Psi}_r,$

$\mathbf{\Psi}_m$ 은 실제와 이상적인 모델의 차이에서 발생되는 오차로서 그리고 발교환에 따른 오차를 포함한다.

이족보행 로봇 시스템의 단순화된 모델을 단순화하면 불확실성과 비선형성을 가진, DC 모터에 의해 구동되는 로봇의 동역학식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\{-\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \mathbf{\Psi}_r(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{I}_C)\} + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) \mathbf{I}_C \\ &= \mathbf{\Omega}_r(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{I}_C) + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) \mathbf{I}_C \\ \mathbf{I}_C &= -\mathbf{R}_L \mathbf{I}_C + \mathbf{L}^{-1} \mathbf{u} + \mathbf{\Upsilon}_m(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{I}_C, \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} \mathbf{\Omega}_r(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{I}_C) &= \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\{-\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \mathbf{\Psi}_r(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{I}_C)\} \\ \mathbf{\Upsilon}_m(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{I}_C, \mathbf{u}) &= -\mathbf{K}_L \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{\Psi}_m(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{I}_C, \mathbf{u}) \end{aligned}$$

이다. 상태 변수 $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q}, \mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}}$ 그리고 $\mathbf{x}_3 = \mathbf{I}_C$ 을 도입하면 식 (3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 &= \mathbf{\Omega}_r(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3) + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{x}_3 \\ \dot{\mathbf{x}}_3 &= -\mathbf{R}_L \mathbf{x}_3 + \mathbf{L}^{-1} \mathbf{u} + \mathbf{\Upsilon}_m(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (5)$$

다음 장부터는 $\mathbf{q}_d \in \mathbf{R}^n$ 로 표현되는 원하는 관절 위치 벡터가 주어지게 된다. 본 논문의 목표는, 와 $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q}$ 을 $\mathbf{x}_3 = \mathbf{I}_C$ 이용하여 관측기 제어기 구조를 개발하여 내부의 불확실한 요소와 외란이 가해지고 있는 상황에서 \mathbf{x}_1 이 원하는 관절 궤적인 \mathbf{q}_d 을 쫓아가도록 하는 것이다. 관측기 제어기 구조를 개발하기 위해 두 개의 적응 퍼지 시스템 $\hat{\mathbf{\Omega}}_r(\cdot | \Theta_r)$ 과 $\hat{\mathbf{\Omega}}_m(\cdot | \Theta_m)$ 을 이용하여 하여 로봇의 불확실하고 비선형적인 요소인 $\mathbf{\Omega}_r(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3)$ 와 $\mathbf{\Upsilon}_m(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{u})$ 를 근사화한다.

2.2 퍼지시스템

본 논문에서는 Mamdani 가 제안한 퍼지 모델을 사용한다. Mandani 의 퍼지 시스템은 이는 다음과 같은 식으로 나낼 수 있다.¹

$$y(\mathbf{x}) = \Omega(\mathbf{x} | \Theta) = \frac{\sum_{i=1}^r y^i \left(\prod_{j=1}^p \mu_{A_j^i}(x_j) \right)}{\sum_{i=1}^r \prod_{j=1}^p \mu_{A_j^i}(x_j)} = \Theta \xi(\mathbf{x}) \quad (6)$$

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

$$\xi^T = (\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^r) \quad (7)$$

$$\xi(x^i) = \frac{\prod_{j=1}^p \mu_{A_j^i}(x_j)}{\sum_{i=1}^r \prod_{j=1}^p \mu_{A_j^i}(x_j)} \quad (8)$$

또 Θ 는 적응 파라미터 벡터로서 다음과 같이 정의된다.

$$\Theta = \begin{pmatrix} y_1^1 & y_1^2 & \dots & y_1^r \\ y_2^1 & y_2^2 & \dots & y_2^r \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_q^1 & y_q^2 & \dots & y_q^r \end{pmatrix} \quad (9)$$

3. 비선형 상태의 관측기와 퍼지 근사화 오차 추정기

3.1 비선형 관측기 설계

로봇이 원하는 궤적을 쫓아가게 하기 위한 제어기를 설계하기 위하여 첫 번째 단계로서 비선형 관측기를 설계해야 한다. 다음과 같은 관측기를 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{z}}}_1 &= \hat{\mathbf{z}}_2 + \mathbf{K}_v \tilde{\mathbf{z}}_1 \\ \dot{\hat{\mathbf{z}}}_2 &= \hat{\Omega}_r(\hat{\mathbf{z}}_1, \hat{\mathbf{z}}_2, \mathbf{z}_{3f} | \Theta) + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{x}_3 + \mathbf{K}_p(\mathbf{q} - \hat{\mathbf{z}}_1) \end{aligned} \quad (10)$$

\mathbf{z}_{3f} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{z}_{3f} \equiv \mathbf{G}_L(s) \mathbf{x}_3 = \mathbf{G}_L(s) \mathbf{I}_c \quad (11)$$

물리적인 모터들은 낮은 주파수 성질을 가지고 있기 때문에 여기서 $\mathbf{G}_L(s)$ 는 2차 이상의 단위 DC 이득을 갖는 Butterworth 저주파 통과 필터를 사용한다. 여과된 신호인 \mathbf{z}_{3f} 는 나중에 분석과 설계 시 적응 퍼지 시스템에서 사용된다.

3.2 퍼지 근사화 오차 추정기 설계

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

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{y}} &= \hat{\Omega}_r(\hat{\mathbf{z}}_1, \hat{\mathbf{z}}_2, \mathbf{z}_{3f} | \Theta_r) + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{x}_3 \\ \mathbf{y}(0) &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

만약 새로운 변수를 다음과 같이 정의 하면,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu} &= \mathbf{y} + \boldsymbol{\sigma}_1(\mathbf{q} - \boldsymbol{\mu}_1) \\ \boldsymbol{\mu}_1 &= \boldsymbol{\mu}, \quad \boldsymbol{\mu}_1(0) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

새로운 변수를 이용한 방정식은

$$\dot{\boldsymbol{\mu}} = \hat{\Omega}_r(\hat{\mathbf{z}}_1, \hat{\mathbf{z}}_2, \mathbf{z}_{3f} | \Theta_r) + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{x}_3 + \boldsymbol{\sigma}_1(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\boldsymbol{\mu}}) \quad (14)$$

과 같이 주어진다. 이를 활용 가능한 형태로 바꾸기 위하여 다음과 같이 정의되는 새로운 변수 $\boldsymbol{\varsigma} = \dot{\mathbf{q}} - \dot{\boldsymbol{\mu}}$ 를 잡자. 그러면

$$\dot{\boldsymbol{\varsigma}} = -\boldsymbol{\sigma}_1 \boldsymbol{\varsigma} + \{ \Omega_r(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3) - \hat{\Omega}_r(\hat{\mathbf{z}}_1, \hat{\mathbf{z}}_2, \mathbf{z}_{3f} | \Theta_r) \} \quad (15)$$

본 논문에서는 이를 퍼지 근사화 오차라고 하며, 식 (12)과 식 (13), 식 (14)를 이용한 식 (15)을 퍼지 추정 오차 관측기라고 한다.

4. 적응 퍼지 백스테핑 방법을 이용한 제어기 설계

본 논문에서 Hwang³이 사용한 방식을 이쪽으로 붓에 적용한다. 자세한 유도과정은³와 비슷하다.

4.1 제어기 설계 및 적응 매개 변수 조정

STEP 1.

이족 보행 로봇의 각 관절들이 원하는 궤적을 쫓아가도록 가상의 입력을 위한 안정화 제어신호를 설계한다. 이족 보행 로봇의 각 관절들의 실제 속도 대신에 추정 속도들이 되먹임 될 때, 안정화 제어기는 다음과 같은 형태가 된다.

$$\begin{aligned} \dot{\Xi} &= \Pi \Xi + \bar{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{O}}_r \xi_r(\hat{z}_1, \hat{z}_2, z_{3f}) + \bar{\mathbf{B}} \epsilon_r(z, \hat{z}) + \bar{\mathbf{M}}(x_1) \tilde{x}_3 \\ \Xi &= \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \boldsymbol{\eta} \\ \varsigma \end{pmatrix}, \Pi = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_v & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_c \mathbf{H}_v \mathbf{B}_c^T & \mathbf{A}_c & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\sigma_1 \mathbf{I} \end{pmatrix} \\ \bar{\mathbf{B}} &= \begin{pmatrix} \mathbf{B}_v \\ \mathbf{B}_c \\ \mathbf{I} \end{pmatrix}, \bar{\mathbf{M}}(x_1) = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}(x_1) \end{pmatrix} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 Ξ 는 시스템에서 사용되는 모든 오차들(관측 오차, 제어 오차, 퍼지 근사 오차)을 포함하고 있으며, 지금부터 본 논문에서는 이 오차를 총 오차라고 부른다. 시스템 행렬인 Π 는 관측기 이득 ($\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_v$), 제어기 이득 ($\mathbf{H}_p, \mathbf{H}_v$), 그리고 퍼지 근사화 추정기의 이득 (σ_1)을 적절히 선택하게 되면 모든 고유값들이 복소평면의 좌 반면에 놓이게 된다. 따라서 퍼지 조정법칙은 다음과 같이 할 수 있다.

$$\dot{\Theta}_r = \frac{1}{\lambda_{\max}(\mathbf{P})} \Gamma_1 \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \Xi \xi_r^T(\hat{z}_1, \hat{z}_2, z_{3f}) \quad (17)$$

STEP 2.

이 시스템의 가상 안정화 제어 신호는 다음과 같다.

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{M}(q) \{ \ddot{q}_d - \mathbf{H}_v(\dot{e} - \tilde{x}_2) - \mathbf{H}_v e - \hat{\Omega}(\hat{z}_1, \hat{z}_2, z_{3f}) \} \quad (18)$$

이제 로봇의 동역학식 (5)을 생각해 보자. \mathbf{x}_3 와 $\boldsymbol{\alpha}$ 의 오차를 가능한 최소로 하도록 제어신호 \mathbf{u} 에 대한 안정화 제어를 다음과 같이 설계한다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{L} \mathbf{R}_L \mathbf{I}_c - \mathbf{L} \hat{\Omega}_m(\hat{z}_1, \hat{z}_2, z_{3f}, \mathbf{Q}_d, \dot{\hat{z}}_1, \dot{\hat{z}}_2, \dot{\mathbf{Q}}_d, \mathbf{u}_f | \Theta_m) - \sigma_2 \tilde{\mathbf{L}}_c \quad (19)$$

여기서 $\hat{\Omega}_m$ 은 적응 퍼지 시스템이다. \mathbf{u}_f 는 \mathbf{u} 의 여과된 신호로서 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{u}_f \equiv \mathbf{G}_L(s) \mathbf{u} \quad (20)$$

여기서 $\mathbf{G}_L(s)$ 는 2 차 이상의 단위 DC 이득을 가진 Butterworth 저주파 통과 필터이다. 여과된 신호의 목적은 z_{3f} 와 같다. 여과된 신호는 식 (19)을 설계할 때 발생하는 대수적 순환을 피할 수 있게 해준다.⁶ 이 여과된 신호의 사용이 가능한 것은 대부분의 물질적인 모터들은 저주파의 성질을 가지고 있고, 저주파 범위에서 $\mathbf{u}_f \approx \mathbf{u}$ 이기 때문이다.

퍼지 규칙은 다음과 같이 업데이트 시킨다.

$$\dot{\Theta}_m = \Gamma_2 \tilde{x}_3 \xi_m^T(\hat{z}_1, \hat{z}_2, z_{3f}, \mathbf{Q}_d, \dot{\hat{z}}_1, \dot{\hat{z}}_2, \dot{\mathbf{Q}}_d, \mathbf{u}_f) \quad (21)$$

4.2 속도 정보를 사용하지 않는 조정 법칙

제안된 제어 기술은 두 가지 퍼지 시스템 과를 포함하고 있다. 그리고 그들의 변수 조정방법은 식 (21)과 식 (17)에 주어져 있다. 의 경우 와의 변수로 쓰이는 모든 신호들은 유용하고 조정 법칙 식 (21)은 직접적으로 설계가 가능하다. 식 (21)에서는 다음에 의해 쉽게 구해질 수 있다.

$$\dot{z}_{3f} = s \mathbf{G}_L(s) \mathbf{x}_3 \quad (22)$$

왜냐하면 $\mathbf{G}_L(s)$ 는 2 차원 이상의 Butterworth 저주파 통과 필터이고 $s \mathbf{G}_L(s)$ 는 여전히 적합하기 때문이다. 그러나 $\hat{\Omega}_r(\bullet)$ 의 경우, 조정법칙인 식 (17)은 속도 측정치가 필요하기 때문에 직접적으로 설계될 수 없다. Ξ 에서 관절 속도항인 \dot{q} 가 포함되어 있다. 이 문제를 풀기 위하여⁷에서와 같이 식 (17)의 오른쪽 변에 부분적분을 해야 한다. 이를 풀어서 조정법칙 식 (17)은 다음과 같은

Ξ -자유 등가 형식으로 다시 쓸 수 있다.

$$\Theta_r(t) = \frac{1}{\lambda_{\max}(\mathbf{P})} \Gamma_1 \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \Xi \xi_r^T(\hat{\mathbf{z}}_1, \hat{\mathbf{z}}_2, \mathbf{z}_{3f}) - \rho$$

$$\dot{\rho} = \frac{1}{\lambda_{\max}(\mathbf{P})} \Gamma_1 \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \Xi \xi_r^T(\hat{\mathbf{z}}_1, \hat{\mathbf{z}}_2, \mathbf{z}_{3f}) \quad (23)$$

5. 실험결과

로봇 시스템이 불확실한 모델을 가지고 있을 때와 외란이 있을 때 본 논문에서 제안한 방법을 이용해서 컴퓨터 시뮬레이션 한 결과와 로봇 시스템에 흔히 쓰이는 계산 토크 방식과 비교한다.

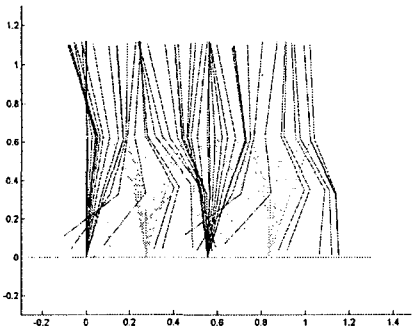


Fig. 2 이족보행로봇 모델

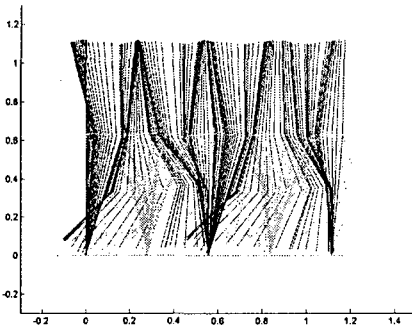


Fig. 3 이족보행로봇 모델

Fig 2.은 계산 토크 방식을 사용했을 때의 실제 로봇의 움직임이고 Fig. 3 는 본 논문에서 제안된 방식을 사용했을 때의 실제 로봇의 움직임이다.

제안된 방식이 계산 토크 방식보다 뛰어난 성능을 가지고 있다는 것을 수치적으로 보기 위해, 실제 로봇의 평균 제곱 오차를 계산해본 결과가 Table 1 에 나와 있다. Table 1 에서 위치 평균 제곱 오차를 보면 계산토크 방식을 사용할 때보다 제안된 방식을 사용했을 때 로봇이 원하는 궤적을 잘 추적하고 있음을 알 수 있다.

Table 1 불확실한 모델에서의 오차

	위치평균제곱오차		속도평균제곱오차	
	계산 토크	제안된 방식	계산 토크	제안된 방식
q_1	0.0029	0.0018	12.2600	9.9702
q_2	0.0073	0.0004	2.5363	0.9124
q_3	0.0064	0.0005	2.8586	1.0674
q_4	0.0043	0.0014	11.6279	3.7943

Table 2 외란이 주어졌을 때의 오차

	위치평균제곱오차		속도평균제곱오차	
	계산 토크	제안된 방식	계산 토크	제안된 방식
q_1	0.0634	0.0193	15.0619	13.7541
q_2	0.0829	0.0100	3.3512	6.2530
q_3	0.1257	0.0170	5.0232	5.5479
q_4	0.1875	0.0527	18.2170	21.8452

Fig. 4 은 로봇에 외란이 가해졌을 경우 계산 토크 방식을 이용한 제어의 결과를 나타내고 있다. 이 그림에서 보면 로봇에 외란이 가해졌을 경우 그 영향으로 로봇이 넘어지는 것을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 5 에서 본 논문에서 제안된 방식으로 제어를 했을 경우에는 로봇이 넘어지지 않는다는 것을 알 수 있다. Table 2 을 보면 각 방식으로 제어된 결과의 평균 제곱 오차가 나와있다. 이를 보면 위치 평균 제곱 오차는 제안된 방식이 원하는 궤적을 잘 추적함을 알 수 있다.

참고문헌

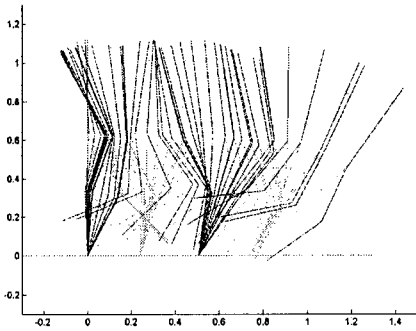


Fig. 4 이족보행로봇 모델

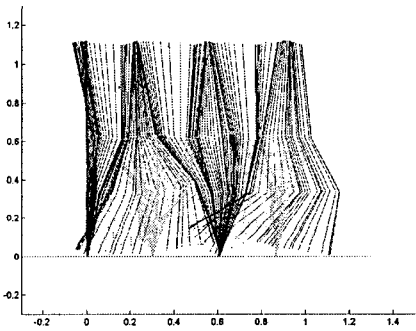


Fig. 5 이족보행로봇 모델

6. 결론

본 논문에서는 불확실한 시스템을 가지고 있는 이족 보행 로봇을 제어하기 위하여 관측기 기반의 적응 퍼지 백스테핑 방법을 제안하였다. 이족 보행 로봇은 내부적인 모델의 불확실성을 가지고 있고, 또한 발이 지면에 고정되어 있지 않기 때문에 외란의 영향을 많이 받는다. 이러한 로봇을 잘 제어하기 위해서 고전적인 방법에서는 로봇 관절의 속도 값을 되먹임하는 방법을 사용했다. 하지만 잡음으로 인해 속도 값이 큰 오차 값을 가지게 되어 결국 로봇을 제어하는 것이 힘들다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 본 논문에서는 적응 퍼지 논리를 사용하여 로봇의 불확실한 모델을 근사화하고, 백스테핑 기법을 통해 퍼지 매개 변수 값을 조정하는 방법을 제시하였다..

1. Nicosia, S. and Tomei, P., "Robot control by using only joint position measurements," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 35, pp. 1058-1061, 1990.
2. Lim, S., Dawson, D. and Anderson, K., "Re-examining the Nicosia-Tomei robot observer-controller from a backstepping perspective," IEEE Trans. Contr. Sys. Tech., Vol. 4, pp. 304-310, 1996.
3. Hwang, J. and Kim, E., "Robust Tracking Control of an Electrically Driven Robot : Adaptive Fuzzy Logic Approach," IEEE Trans. Fuzzy Sys, Vol. 14, pp. 232-247, 2006.
4. Wang, L., "Adaptive Fuzzy Systems and Control," Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1994.
5. Jagannathan, S. and Lewis, F., "Robust backstepping control of a class of nonlinear systems using fuzzy logic," Information Sciences, Vol. 123, pp. 223-240, 2000.
6. Kim, E. and Park, C., "Fuzzy Disturbance Observer Approach to Robust Tracking Control of Nonlinear Sampled Systems With the Guaranteed Suboptimal H_{∞} Performance," IEEE Trans. Sys. Man and Cyber., -Part B: Cybernetics, Vol. 34, pp. 1574-1581, 2004.
7. De Queiroz, M., Hu, J., Dawson, D., Burg, T. and Donepudi, S., "Adaptive position/force control of robot manipulators without velocity measurements: Theory and experimentation," IEEE Trans. Sys. Man and Cyber., -Part B: Cybernetics, Vol. 27, pp. 796-809, 1997.
8. Vemuri, A., Polycarpou, M. and Diakourti, S., "Neural network based fault detection in robotic manipulators," IEEE Trans. Robot. and Automat., Vol. 14, pp. 342-348, 1995.
9. Hwang, J., "Output Control of a Biped Robot via Adaptive Fuzzy Logic," master's thesis, Yonsei Univ., Dept. of Electric and Electronic Engineering, 2005.