

로봇 매니플레이터의 독립관절 적응퍼지슬라이딩모드 제어

김영태*, 이동욱*

Independent Joint Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control of Robot Manipulator

Young-Tae Kim*, Dong-Wook Lee*

ABSTRACT

Robot manipulator has highly nonlinear dynamics. Therefore the control of multi-link robot arms is a challenging and difficult problem. In this paper an independent joint adaptive fuzzy sliding mode scheme is developed for control of robot manipulators. The proposed scheme does not require an accurate manipulator dynamic model, yet it guarantees asymptotic trajectory tracking despite gross robot parameter variations. Numerical simulation for independent joint control of a 3-axis PUMA arm will also be included.

Key Words : Fuzzy control (퍼지제어), Adaptive control (적응제어), Independent joint control (독립관절제어), Sliding mode control (슬라이딩모드제어), Robot control (로봇제어).

1. 서론

지난 10 년간 로봇 매니플레이터의 제어기 설계에 관한 문제는 많은 연구자들에 의하여 다루어져 왔다. 흥미롭게 논의되는 분야 중 하나는 대형 시스템 제어(large-scale system control)에 유용한 분산 제어(Decentralized Control) 방법이다. 로봇 매니플레이터의 물리적 형상과 복잡한 비선형 모델 때문에 집중 제어(Centralized Control) 방법을 적용하기에는 경제적이지 않다. 특히 퍼지 이론은 다관절 로봇 매니플레이터에 집중 제어 방법을 적용할 경우 입력 변수들의 증가에 의하여 퍼지 규칙이 지수적으로 상당히 증가하기 때문에 실시간 제어에 대한 구현은 매우 어려워지게 된다.

이러한 문제점들을 해결하는 차원으로서 계산 시간을 줄일 수 있으며 간단하게 구현할 수 있는

분산 제어 방법은 많은 연구자들에 의하여 관심의 대상이 되고 있다¹⁻⁹⁾.

최근 몇몇 연구자들이 퍼지 논리, 슬라이딩모드 이론, 그리고 적응 이론을 하나로 조합하여 시스템의 습득 능력, 보편 근사 능력, 적응 능력, 그리고 외란을 제거할 수 있는 적응퍼지슬라이딩모드 제어방법을 제안하였다.

퍼지 논리 제어는 시스템의 수학적 모델 얻기가 어렵거나 불가능한 것을 보완하기 위하여 전문가의 지식과 경험을 이용할 수 있는 제어 방법이다.

최근 퍼지 제어 시스템의 체계적인 분석과 설계 방법을 살펴보면, Wang¹⁰⁾은 퍼지 기저 함수의 개념을 도입하여 비선형 시스템에 대한 적응퍼지 제어기의 안정도 해석에 대한 수학적 틀을 구축하였으며 퍼지 논리 시스템은 콤팩트(compact) 입

2001년 12월 3일 접수

* 동국대학교 전기공학과

력공간에서 어떤 정도의 정확성에 대하여 모든 비선형 함수를 균일하게 근사화 할 수 있음을 보였다. Jin^[11]은 유전 알고리즘과 gradient 방법을 조합하여 로봇 매니퓰레이터를 분산 적응퍼지제어 할 수 있는 방법을 제시하였으며, Zhang 과 Feng^[12]은 슬라이딩모드 제어와 퍼지 집합을 근거로 한 분산 적응퍼지 제어방법을 제안하였다. Lo 와 Kuo^[13]는 단지 5 개의 퍼지 제어 규칙으로 4 차 비선형 시스템을 점근적으로 안정시킬 수 있는 비결합(decoupling) 방법을 개발하였다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 문제점들을 해결하기 위한 분산 이론, 퍼지 논리, 슬라이딩모드 제어, 그리고 적응 제어 개념을 조합한 제어방법을 제시하였다. 퍼지슬라이딩모드 제어를 할 경우 시스템에 외란이 있을 때 정상 상태에서 오차를 일으키게 되는데 본 논문은 시스템 외란에 대하여서도 좀 더 강인함을 갖는 제어방법을 소개하였다. 제안된 제어 이론은 로봇 매니퓰레이터의 정확한 동적 모델을 요구하지 않으며 정상 상태에서의 오차를 줄이기 위하여 슬라이딩 표면에 적분항을 포함시켰으며, 퀘환 미분항(feedback derivative term)은 Lyapunov 함수의 일차 미분값이 확실히 음의 부호를 갖게 하기 위하여 고려하였고 결과적으로 점근적으로 안정됨을 수학적 증명을 통하여 보여주었다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서 퍼지 논리 시스템의 기본적인 구조를 보여 주었으며^[10], 3 절에서는 독립관절 적응퍼지슬라이딩모드 제어이론을 소개하였다. 4 절에서는 2 절에서 제안한 제어방법을 3 관절 PUMA 로봇팔에 적용하여 그 효율성을 모의 실험을 통하여 입증하였다.

2. 퍼지 논리 시스템과 퍼지 기저함수

퍼지 논리 지식의 기본은 AND 와 OR 같은 퍼지 연산자들이 입출력들과 관련이 있는 언어적 변수들과의 집합으로 구성된 퍼지 IF-THEN 규칙들의 집합으로 되어 있다. 다중 출력 시스템은 보편적으로 단일 출력 시스템들의 그룹으로 항상 나뉘어질 수 있으므로 다음과 같은 MISO(Multi-Input Single-Output) 규칙을 고려할 수 있다.

$$R^{(l)} : \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^l, \text{ THEN } y \text{ is } B^l \quad (1)$$

여기서, $\underline{x}=(x_1, \dots, x_n)^T \in V \subset R^n$ 와 $y \in R$ 은 퍼지

논리 시스템의 입력과 출력을 나타낸다. A_i^l 와 B^l 은 V 와 R 의 공간에서의 퍼지 집합이며 $i = 1, 2, \dots, n$ 은 퍼지 입력의 수, $l=1, 2, \dots, m$ 은 퍼지 규칙의 수를 나타낸다.

퍼지 규칙의 구현에는 여러 방법이 있으나 본 논문에서는 t-노움 퍼지 함의(fuzzy implication)를 사용하였다.

$$A_1^l \times A_2^l \times \dots \times A_n^l \rightarrow B^l \quad (2)$$

그리고

$$\begin{aligned} \mu_{A_1^l \times \dots \times A_n^l \rightarrow B^l}(\underline{x}, y) \\ = \mu_{A_1^l}(x_1) \star \dots \star \mu_{A_n^l}(x_n) \star \mu_{B^l}(y) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, \star 은 t-노움 적연산자(product operator)이며 언어 규칙 표현에서의 conjunction “and”를 의미한다.

A_x 을 벡터 V 안에 있는 임의의 퍼지 집합이라고 하자. 그러면 각각의 퍼지 규칙은 다음과 같은 sup-star 복합 추론 규칙에 근거하여 $A_x \circ R^{(l)}$ 로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_{A_x \circ R^{(l)}}(y) \\ = \sup_{x \in U} [\mu_{A_x}(x) \star \mu_{A_1^l \times \dots \times A_n^l \rightarrow B^l}(\underline{x}, y)] \end{aligned} \quad (4)$$

퍼지 disjunction으로 m 개의 퍼지 규칙을 통합하면 다음과 같다.

$$\mu_{A_x \circ (R^{(1)}, \dots, R^{(m)})}(y) = \mu_{A_x \circ R^{(1)}}(y) \dot{+} \dots \dot{+} \mu_{A_x \circ R^{(m)}}(y) \quad (5)$$

여기서, $\dot{+}$ 은 t-코노움(conorm)이며 주로 퍼지 함집합, 대수합, 혹은 한계함으로 정의되며 평균중심값 비퍼지화(center-average defuzzification) 방법을 이용하면 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^m \bar{y}^l (\mu_{A_x \circ R^{(l)}}(\bar{y}^l))}{\sum_{l=1}^m (\mu_{A_x \circ R^{(l)}}(\bar{y}^l))} \quad (6)$$

여기서, \bar{y}^l 은 멤버쉽 함수 $\mu_{A_l^l}(y)$ 를 최대로 하는 값이다. 식 (6)에서 평균중심 비퍼지화(center-average-defuzzifier), 적추론(product inference), 단일 퍼지화(singleton fuzzifier)방법을 사용하면 식 (7)로 표현할 수 있다^[10].

$$y^* = f(x) = \frac{\sum_{l=1}^m \bar{y}^l (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i))}{\sum_{l=1}^m (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i))} \quad (7)$$

만일 $\mu_{A_i^l}(x_i)$ 를 고정시키고 \bar{y}^l 을 조정 가능한 변수로 보면, 식 (7)은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$f(x) = \varphi^T \xi(x) \quad (8)$$

여기서, $\varphi = (\bar{y}^1, \dots, \bar{y}^m)^T$ 은 변수 벡터이며, $\xi(x) = (\xi^1(x), \dots, \xi^m(x))^T$ 은 다음과 같은 형태의 회귀 벡터(regressive vector)로 볼 수 있다.

$$\xi^l(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^m (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i))} \quad (9)$$

식 (7)과 같은 형태의 퍼지 논리 시스템은 보편적 근사기임을 알 수 있으며^[10,14] 콤팩트(compact) 입력 공간에서 어떤 정도의 정확성에 대하여 모든 비선형 함수를 균일하게 근사화 할 수 있다.

3. 독립관절 적응퍼지슬라이딩모드 제어기 설계

일반적으로 n 차 자유 매니퓰레이터의 Lagrange-Euler 운동 방정식을 행렬 벡터 표기로 표시하면 다음과 같다^[6].

$$M(\theta)\ddot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + H(\dot{\theta}) = \tau \quad (10)$$

여기서, $\theta(t)$ 는 $n \times 1$ 관절각 위치 벡터, $\tau(t)$ 는 $n \times 1$ 적용 토크 벡터, $G(\theta)$ 는 $n \times 1$ 중력 벡터, $M(\theta)$

는 $n \times n$ 대칭 양한정(symmetric positive-definite) 관성 벡터, $N(\theta, \dot{\theta})$ 는 $n \times 1$ Coriolis와 원심력 벡터, 그리고 $H(\dot{\theta})$ 는 $n \times 1$ 마찰력 벡터이다. $M(\theta)$, $N(\theta, \dot{\theta})$, $G(\theta)$, 그리고 $H(\dot{\theta})$ 은 $\alpha(t)$ 와 $\dot{\theta}(t)$ 로 결합된 비선형 함수이다.

매니퓰레이터의 동적 방정식 (10)은 각각의 관절 운동 사이에 매우 밀접한 상호 작용이 있으므로 Coriolis 와 원심력은 매니퓰레이터가 빠른 속도로 움직일 경우 무시할 수 없는 부분이다. 매니퓰레이터의 제어문제는 관절각 벡터 $\alpha(t)$ 가 기준이 되는 각 벡터 $n \times 1$ $\theta_d(t)$ 를 가능한 정확하게 추적할 수 있도록 관절 토크 $\tau(t)$ 를 얻을 수 있는 제어방법을 개발하는 것이다. 다관절 로봇 시스템은 각각의 관절이 결합력(coupling force)에 의해 상호 연결된 종속 시스템(subsystem)들로 구성된 대형 시스템(large-scale system)으로 생각할 수 있다. 여기서, 결합력(coupling force)은 식 (10)에서 볼 수 있듯이 관성력, Coriolis, 원심력, 마찰력, 그리고 중력에 의하여 생기게 된다. 그러므로 매니퓰레이터의 동적 방정식 (10)은 다음과 같은 n개의 2차 비선형 스칼라 미분 방정식으로 표현할 수 있다.

$$m_{ii}(\theta)\ddot{\theta}_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n m_{ij}(\theta)\ddot{\theta}_j(t) + n_i(\theta, \dot{\theta}) + g_i(\theta) + h_i(\dot{\theta}) = \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

여기서, 관성 행렬 $M(\theta)$ 는 양한정(positive-definite)이기 때문에 $m_{ii}(\theta)$ 는 항상 양수이며 i번째 관절에서의 시변 유효 관성으로 볼 수 있다.

결과적으로 식 (11)은 다음과 같다.

$$m_{ii}(\theta)\ddot{\theta}_i(t) + d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \tau_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

여기서,

$$d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \sum_{j=1, j \neq i}^n m_{ij}(\theta)\ddot{\theta}_j(t) + n_i(\theta, \dot{\theta}) + g_i(\theta) + h_i(\dot{\theta}) \quad (13)$$

식 (12)는 관절 토크 $\tau_i(t)$ 를 가진 i번째 종속 시스템(subsystem)의 입출력 동적 모델이다. d_i 는 i번째 관절에 대한 중력, 마찰력, Coriolis, 원심토크 등을 포함하는 외란 토크로 고려할 수 있다. 이러한 견해로부터 d_i 은 i번째 종속 시스템과 나머지 다른 종속 시스템들 사이의 결합(coupling)을 나타

낸다. 따라서 관절 제어를 분산화 할 수 있으며 분산 매니플레이터 제어문제는 i 번째 관절 토크 $\tau_i(t)$ 를 독립적으로 얻을 수 있는 관절 제어를 설계하는 것이다.

식 (12)를 다음과 같이 표현하자.

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_i &= -\frac{1}{m_{ii}(\theta)} d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) + \frac{1}{m_{ii}(\theta)} \tau_i(t) \\ &= f_i + b_i \tau_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (14)$$

f_i 는 정확하게 모델링하기가 어려운 함수이며 $m_{ii}(\theta)$ 의 값은 각 관절의 기준경로가 주어지면 정확한 값을 알 수 없으나 최대 한계값을 얻을 수 있으므로 제어이득 b_i 의 최소 한계값을 b_{ii} 라 하면, $0 < b_{ii} \leq b_i$, $b_i = b_{ii} + \Delta b_i$ 이다.

$\ddot{\theta}_{d_i}(t)$ 을 기준이 되는 변위각이라고 할 때 $e_i(t) = \theta_i(t) - \theta_{d_i}(t)$ 이다. 그러면 다음과 같은 슬라이딩 표면을 고려하자.

$$s_i(t) = \dot{e}_i(t) + k_{i1}e_i(t) + k_{i2}v_i(t) \quad (15)$$

여기서

$$v_i(t) = \int_0^t e_i(\tau) d\tau$$

$v_i(t)$ 는 정상 상태 오차를 줄이기 위한 적분 항이다. 식 (15)의 양변을 미분하면,

$$\begin{aligned} \dot{s}_i(t) &= \ddot{e}_i(t) + k_{i1}\dot{e}_i(t) + k_{i2}v_i(t) \\ &= \ddot{\theta}_i(t) - \ddot{\theta}_{d_i}(t) + k_{i1}\dot{e}_i(t) + k_{i2}e_i(t) \\ &= f_i + b_i \tau_i - \ddot{\theta}_{d_i}(t) + k_{i1}\dot{e}_i(t) + k_{i2}e_i(t) \end{aligned} \quad (16)$$

만일 유효 관성 $m_{ii}(\theta)$ 와 외란 토크 $d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ 을 정확히 알 수 있다면, 최적 슬라이딩모드 제어를 쉽게 설계할 수 있다^[15]. f_i 와 b_i 에 대한 부족한 지식 때문에, f_i 를 식(8)의 형태인 퍼지 논리 시스템 $\hat{f}_i(\theta | \varphi_i)$ 로 대체할 수 있고, 미지의 외란(unknown disturbance)을 감소시키기 위해 $k_{i3} \cdot \text{sgn}(s_i)$ 항을 고려하면 결과적으로 i 번째 관절에서의 적응퍼지슬라이딩모드 제어기(adaptive fuzzy sliding mode controller)는 다음과 같이 제안할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_i(t) &= \frac{1}{b_{ii}} [-\hat{f}_i(\theta | \varphi_i) \\ &\quad + \ddot{\theta}_{d_i}(t) - k_{i1}\dot{e}_i(t) - k_{i2}e_i(t) - k_{i3} \cdot \text{sgn}(s_i) - k_{i4}s_i] \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 $k_{i4}s_i$ 항은 $v_i(t)$ 을 더 큰 음수로 만들기 위하여 고려되었다. Fig. 1은 매니플레이터의 i 번째 관절에 제안된 적응퍼지슬라이딩모드 제어의 구현을 나타낸다. $k_{i3} \cdot \text{sgn}(s_i)$ 항은 슬라이딩 표면에서의 빠른 스위칭을 나타내며, 이것은 샘플링 주파수에 의해 변화한다. 각각의 관절모터는 이러한 샘플링 주파수에서 많은 채터링을 발생시키는데 이것을 줄이기 위해서 $\text{sgn}(s_i)$ 을 다음과 같은 형태의 연속 함수로 고려하자.

$$\text{sgn}(s_i) \rightarrow \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i} \quad (18)$$

여기서, δ_i 은 매우 작은 양수값이다.

식(17)을 식(16)에 대입하면,

$$\begin{aligned} \dot{s}_i(t) &= f_i - \hat{f}_i(\theta | \varphi_i) \\ &\quad - k_{i4}s_i + \frac{\Delta b_i}{b_{ii}} F_i - \frac{b_i}{b_{ii}} k_{i3} \cdot \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서

$$\begin{aligned} F_i &= -f_i(\theta | \varphi_i) \\ &\quad + \ddot{\theta}_{d_i}(t) - k_{i1}\dot{e}_i(t) - k_{i2}e_i(t) - k_{i4}s_i \end{aligned} \quad (20)$$

다음과 같이 최소 근사 오차(minimum approximation error) ω_i 를 정의하자.

$$\omega_i = f_i - \hat{f}_i(\theta | \varphi_i^*) \quad (21)$$

여기서, φ_i^* 는 퍼지 논리 시스템의 최적 변수다. 그러면,

$$\begin{aligned} \dot{s}_i(t) &= \hat{f}_i(\theta | \varphi_i^*) - \hat{f}_i(\theta | \varphi_i) \\ &\quad + \omega_i + \frac{\Delta b_i}{b_{ii}} F_i - \frac{b_i}{b_{ii}} k_{i3} \cdot \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i} - k_{i4}s_i \end{aligned} \quad (22)$$

만일 \hat{f}_i 을 식 (8)과 같은 형태의 퍼지 논리 시스템으로 생각하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{s}_i &= \phi_i^T \xi_i(\theta) + \omega_i \\ &+ \frac{\Delta b_i}{b_{ii}} F_i - \frac{b_i}{b_{ii}} k_{i3} \cdot \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i} - k_{i4} s_i \end{aligned} \quad (23)$$

여기서, $\phi_i = \varphi_i^* - \varphi_i$ 그리고 $\xi_i(\theta)$ 은 식 (9)와 같은 퍼지 기저 함수이다.

안정도 해석을 위하여 다음과 같은 Lyapunov 함수를 고려하면,

$$v_i = \frac{1}{2} s_i^2 + \frac{1}{2r_i} \phi_i^T \phi_i \quad (24)$$

여기서, s_i 는 식 (15)이며 r_i 는 양의 상수이다. 슬라이딩 표면을 따라 v_i 를 미분하면,

$$\begin{aligned} \dot{v}_i &= s_i \dot{s}_i + \frac{1}{r_i} \phi_i^T \dot{\phi}_i \\ &= s_i [\phi_i^T \xi_i(\theta) + \omega_i + \frac{\Delta b_i}{b_{ii}} F_i - \frac{b_i}{b_{ii}} k_{i3} \cdot \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i} - k_{i4} s_i] + \frac{1}{r_i} \phi_i^T \dot{\phi}_i \\ &= \frac{1}{r_i} \phi_i^T [r_i s_i \xi_i(\theta) - \dot{\phi}_i] - \frac{1}{b_{ii}} (k_{i3} b_i \frac{s_i^2}{|s_i| + \delta_i} - \Delta b_i \cdot s_i \cdot F_i - b_i \cdot s_i \cdot \omega_i) - k_{i4} s_i^2 \\ &\leq \frac{1}{r_i} \phi_i^T [r_i s_i \xi_i(\theta) - \dot{\phi}_i] - \frac{1}{b_{ii}} (k_{i3} b_i \frac{s_i^2}{|s_i| + \delta_i} - b_i |s_i \cdot F_i| - b_i |s_i \cdot \omega_i|) - k_{i4} s_i^2 \end{aligned} \quad (25)$$

다음과 같은 부등식 (26)을 만족시키는 이득 (gain) k_{i3} 와 δ_i 를 선택하자.

$$k_{i3} \frac{s_i^2}{|s_i| + \delta_i} > |s_i| (|F_i| + |\omega_i|) \quad (26)$$

그러면 식(25)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{v}_i < \frac{1}{r_i} \phi_i^T (r_i s_i \xi_i(\theta) - \dot{\phi}_i) - k_{i4} s_i^2 \quad (27)$$

$s_i \omega_i$ 은 최소 근사 오차와 비슷한 값이며 보편적 근사 정리^[10]에 의하여 ω_i 는 매우 작은 값이 됨을 알 수 있다. 만일 식 (28)과 같은 적응 법칙을 선택하면,

$$\dot{\phi}_i = r_i s_i \xi_i(\theta) \quad (28)$$

그러면 식 (29)를 항상 만족시키는 양수 k_{i3} 을 얻을 수 있다.

$$\dot{v}_i < 0 \quad (29)$$

Barbalat의 정리^[16]를 사용하면, s_i 가 영으로 수렴함을 알 수 있다. 식 (15)로부터 s_i 가 영(zero)으로 수렴하면 위치 추종 오차 e_i 도 영(zero)으로 수렴하게 된다. 그래서 i 번째 종속 시스템은 점근적으로 안정하게 된다. 전체적인 점근적 안정함(global asymptotic stability)을 보이기 위하여 식 (14)와 같은 n 개의 종속 시스템을 통합하고 Lyapunov 함수 v_i 를 합한 Lyapunov 함수 v 를 고려하면 $v > 0$ 와 $\dot{v} < 0$ 임을 알 수 있다. 따라서 시스템은 독립관절 적응퍼지슬라이딩 제어기로 전체적인 점근 안정하게 된다.

4. 모의 실험

앞 절에서 제안한 독립관절 적응퍼지슬라이딩 모드 제어기의 효율성을 보여주기 위하여 실제적인 환경 조건에서 시스템의 성능을 조사하였다. 본 논문에서는 PUMA 로봇팔의 첫번째 3개의 연결 관절인 베이스, 어깨, 팔꿈치를 고려하였다. 모든 관절들은 모터에 의해 토크로 회전한다.

기존 궤적 경로를 추적하기 위하여 3관절 PUMA 로봇팔의 동적 방정식을 MATLAB 명령어 "ode45"를 사용하여 1ms의 샘플링 주기로 모의 실험을 하였다. 모의 실험에 사용되어진 변수 값들은 다음과 같다.

- 기준 궤적 경로
 - $\theta_{d1}(t) = \sin(t)$
 - $\theta_{d2}(t) = \cos(t)$
 - $\theta_{d3}(t) = \sin(t)$
- 3관절 초기 위치
 - $\theta_1(0) = 0.8 \text{ rad}$,
 - $\theta_2(0) = 0.0 \text{ rad}$,
 - $\theta_3(0) = -0.6 \text{ rad}$
- $m_1 = 2.27 \text{ kg}$, $m_2 = 15.91 \text{ kg}$, $m_3 = 11.36 \text{ kg}$
- $k_{11} = 8$, $k_{12} = 20$, $k_{13} = 0.9$, $k_{14} = 1$

- $k_{21} = 8, \quad k_{22} = 20, \quad k_{23} = 0.5, \quad k_{24} = 1$
- $k_{31} = 12, \quad k_{32} = 40, \quad k_{33} = 0.2, \quad k_{34} = 1$
- $b_{11} = 2.2, \quad b_{21} = 3.2, \quad b_{31} = 0.3$
- $\delta_1 = 0.01, \quad \delta_2 = 0.01, \quad \delta_3 = 0.01$
- $r_1 = 100000, \quad r_2 = 1000000, \quad r_3 = 10000$

Fig. 2는 3관절각 $\theta_1(t), \theta_2(t)$, 그리고 $\theta_3(t)$ 의 시간에 대한 응답을 나타내며 초기 위치가 큰 차이가 있을 경우에도 빠른 시간 안에 기준 궤적 경로를 아주 잘 추적 함을 알 수 있다. Fig. 3는 오차 각에 대한 시간에 대한 응답이다.

제어기의 적응성(adaptability)을 보기 위하여 로봇 운반체(payload)의 질량변화를 $t = 1.5$ 초 후에 주었다. 이러한 변화에도 불구하고 논문에서 제시한 제어기는 잘 수행됨을 볼 수 있다(Fig. 3). Fig. 4는 관절각 $\theta_1(t)$ 의 궤적에 대한 phase trajectory를 보였다. Fig. 5는 시간에 따른 관절각 $\theta_1(t)$ 의 토오크 $\tau_1(t)$ 을 보였다. 모의 실험을 통하여 본 논문에서 제안된 제어방법은 부하 관성(load inertia)이나 점성 마찰(viscous friction)의 변화로 인하여 매니퓰레이터의 정확한 모델을 얻을 수 없는 경우에도 제어할 수 있음을 보였다.

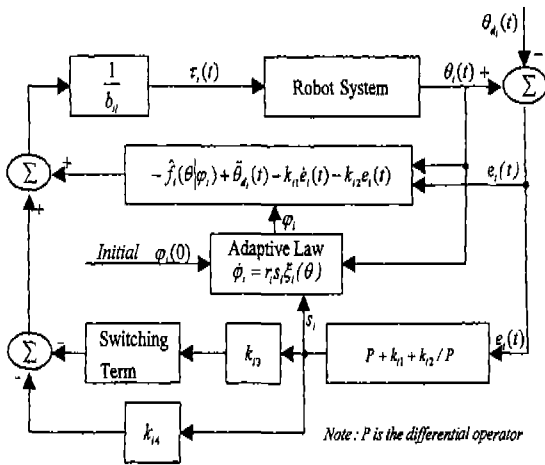


Fig. 1 Robot control system with independent joint adaptive fuzzy sliding mode controller.

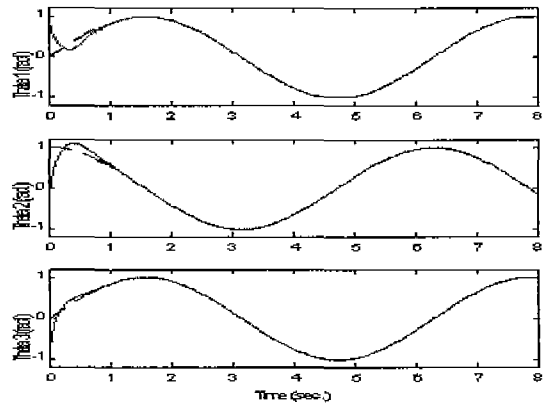


Fig. 2 Response of the joint angles with initial position (0.8, 0, -0.6)

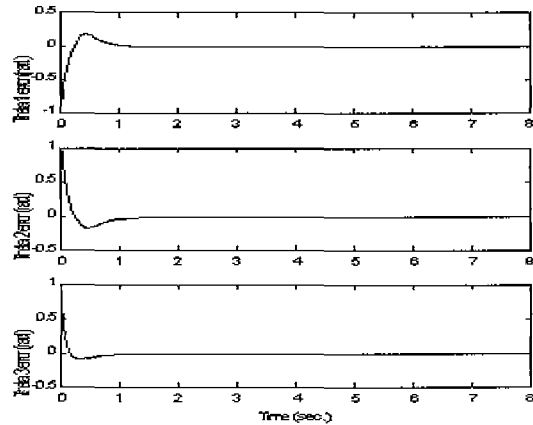


Fig. 3 Response the error of the joint angles with sudden load change at $t=1.5$ sec.

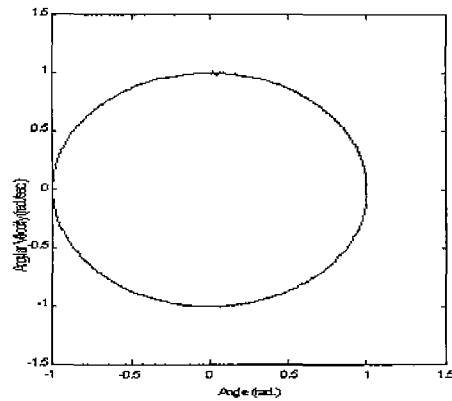


Fig. 4 Phase portrait of the trajectory of joint $\theta_1(t)$.

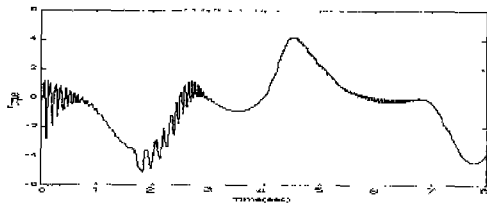


Fig. 5 The input torque $\tau(t)$ for the proposed controller with initial position (0.0, 1.0, 0.0).

5. 결론

본 논문에서는 로봇 매니퓰레이터의 적응퍼지 슬라이딩모드 이론을 이용하여 독립관절 제어기를 제안하였다. 입력 변수들의 증가에 의하여 퍼지규칙이 지수적으로 상당히 증가하기 때문에 독립관절 제어 알고리즘은 집중 제어 방법보다 실시간 제어하는데 있어서 계산 시간을 많이 줄일 수 있으며 간단하게 구현 할 수 있는 커다란 장점이 있음을 알 수 있다.

슬라이딩 표면에 적분항을 고려함으로써 정상 상태 오차를 줄일 수 있으며 본 논문에서 제안한 제어방법은 시스템의 정확한 수학적 모델 없이도 제어 할 수 있음을 보였다. 또한 모의 실험을 통해 제어기의 효율성을 보였다.

참고문헌

1. U. Ozguner and H. Hemami, *Decentralized control of interconnection physical system*, Int. J. Control 41, pp. 1445-1459, 1985.
2. D.T.Gavel and T.C.Hsia, *Decentralized adaptive control of robot manipulator*, Proc. IEEE Int. Conf on Robotics and Automation, pp. 1230-1235, 1987.
3. Y.K. Choi and Z.Bien, *Decentralized adaptive control scheme for control of a multi-arm-type robot*, Int. J. Control 48, pp. 1715-1722, 1988.
4. M. Vukobratovic and N. Kircanski, *Decoupled control of robots via asymptotic regulators*, IEEE Trans. Automatic Control AC-28, 1983.
5. B.J.Oh, M.Jamshidi, and H. Seraji, *Decentralized adaptive control*, Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 1016-1021, 1988.
6. H. Seraji, *Decentralized adaptive control of*

- manipulators : theory, simulation, and experimentation*, IEEE Trans. Robotic and Automation 5, pp. 183-201, 1989.
7. M. Jamshidi, H. Seraji, and Y.T.Kim, *Decentralized control of nonlinear robot manipulator*, Robotics 3, pp. 361-370, 1987.
8. P.A. Ioannou, *Decentralized adaptive control of interconnected system*, IEEE Trans. Automatic control AC-31, pp. 291-298, 1986.
9. R.G.Morgan and U.Ozguner, *Decentralized variable structure control algorithm for robot manipulator*, IEEE Journal of Robotics and Automation, 1985
10. L. X. Wang, and J. M. Mendel, "Fuzzy Basis Functions, Universal Approximation, and Orthogonal Least Squares Learning," IEEE Trans. Neural Networks, Vol. 3, pp. 807-814, 1992
11. Y. Jin, "Decentralized adaptive fuzzy control of Robot manipulator," IEEE Trans. SMC, Vol. 28, pp. 47-57, Feb. 1998.
12. T. P. Zhang and C. B. Feng, "Decentralized adaptive fuzzy control for large-scale nonlinear system," Fuzzy sets and Systems, pp. 61-70, 1997
13. J. Lo and Y. H. Kuo, "Decoupled Fuzzy sliding-mode control," IEEE Trans. on Fuzzy system, Vol. 6, pp. 426-435, Aug. 1998
14. L. X. Wang, *Adaptive Fuzzy systems and control : Design and Stability Analysis*, Prentice-Hall, 1994
15. Sastry, S. and M. Bodson, *Adaptive Control : Stability, Convergence, and Robustness*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989
16. J.J.E. Slotine and W.Li, *Applied Nonlinear Control*, Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1991