

퍼지추론의 스위칭 특성을 이용한 적응제어기 설계 및 산업용 자동화 설비에의 응용

(Design of Adaptive Controller using Switching Mode with Fuzzy Inference
and its application for Industry Automation Facility)

이 형 찬*

(Hyong-Chan Rhee)

요 약

본 논문은 미지이거나 변화하는 산업용 로봇 매니플레이터의 추종문제를 다룬다. 제시된 방법은 간접적용 제어기 구조를 근거로 퍼지추론에 의한 스위칭 구조를 통해 다중모델 적응제어기를 설계 하고자한다. 매니플레이터 한개의 식별기를 이용한 다중 식별기들은 미지 관성 파라미터와 부하무게의 초기 추정치를 제외하고는 동일하다. 관절 액추에이터에 가해진 토크입력은 매순간 로봇 동적시스템의 가장 근접한 식별기 모델에 의해 결정된다. 제시된 방법을 이용하여 용접라인 및 부품조립 자동화 설비등의 적용 예로서 산업용 로봇 매니플레이터의 추종성능이 개선됨을 컴퓨터 모의 실험을 통해 보인다.

Abstract

This paper deals with the tracking control problem of industrial robotic manipulators with unknown or changing dynamics. The proposed method makes use of multiple models and switching mechanism by fuzzy inference of the manipulator in an indirect adaptive controller architecture. The models used for the identification of the manipulator are identical, except for the initial estimates of the unknown inertial parameters of the manipulator and its load. The torque input that is applied to the joint actuators is determined at every instant by the identification model that best approximates the robot dynamics. Simulation results are also included to demonstrate the improvement in the tracking performance when the proposed method is used.

1. 서 론

생산 현장에서의 공장 자동화가 활발히 진행됨에 따라 산업용 로봇 매니플레이터의 활용 범위가 점차 증가하고 있다. 이에 따라 용접라인 및 부품조립 자

*정회원 : 대전대학교 전기공학과 조교수
접수일자 : 1998. 6. 29.

동화 설비등의 산업용 로봇 매니플레이터의 빠르고 정확한 동작을 위한 제어기의 구성이 활발히 연구되고 있다. 일반적으로 기존의 제어 알고리즘은 비교적 정확한 수학적 모델링을 필요로 하지만 매니플레이터의 동적 모델은 비선형 특성을 보임으로써 좋은 제어 성능을 얻기에는 어려움이 따른다. 특히 고성능 직접 구동 팔(Direct Drive Arm)을 사용할 때 비선

형에 대한 영향은 더욱 잘 나타난다. 관절의 관성 파라미터들이나 부하 무게의 변화에 대한 부정확한 추정치로 부터 생기는 불확실성을 보상하기 위한 대책으로 적응 제어가 바람직한 제어기법으로 생각된다. 비록 그것이 비선형 일지라도 매니플레이터의 동적 모델은 미지이거나 부분적으로 알고 있는 관성 파라미터에 대해 선형으로 모델링이 가능하다. 이러한 특성을 통해 많은 연구자들이 로봇 매니플레이터의 부하, 관절의 링크의 크기와 질량 등이 운행에 독립된 파라미터임에 착안하여 매니플레이터의 동역학식을 이들 파라미터에 대한 선형식으로 풀이하여 좋은 추정 속도 및 계통의 대국적 안정성을 입증하였다[1]. 그러나 변화가 클 경우 제어대상시스템의 실제 파라미터와 식별기 모델을 설계한 이들 파라미터의 초기 추정치 사이의 초기 불일치로 인해 큰 진동이 생겨 전반적으로 시스템 성능이 좋지 않음을 알 수 있다. 그러한 과도 진동은 정밀성을 요구하는 작업에 있어서 바람직하지 못한 현상이다. 또한 다중모델 시스템에서의 무한히 빠른 스위칭을 요구하지 않는 한 스위칭 구조와 관계없이 전체 시스템의 안정성은 증명될 수 있다. 스위칭 개념은 Martensson[2]에 의해 처음 소개 되었으며 스위칭 기법은 직접스위칭[3,4]과 간접스위칭 방법이 있다. 본 논문에서는 간접스위칭 방법을 이용하였으며 이는 추정된 모델의 안정도 문제를 완화시키기 위해 Middleton등[5]에 의해 연구를 해왔으며, 후에 플랜트의 상대차수를 모를 때 기준모델 적응제어에 대해 Morse등[6]이 적용하게 되었다. 이들은 적응제어에 있어서 최소한의 사전정보로 전반적인 안정도 문제를 해결하기 위해 스위칭 기법을 다루어 왔으므로 본 논문에서는 이를 근거로 안정성 보다는 시스템의 성능개선을 위한 스위칭 구조를 선정하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 간접 적응 제어기 구조에 있어서 산업용 매니플레이터 하나의 모델을 근거로 하여 다중 동적 모델을 이용한 제어 방법과 매 순간 상황에 따라 인간의 사고방식을 모방한 퍼지추론 기법을 도입하여 성능 지수를 결정한 후 이에 따라 적절한 토크입력이 선정되는 스위칭 기법을 제시하고자 한다.

2. 산업용 로봇 매니플레이터의 제어기법

n 개의 관절을 갖는 강체 매니플레이터 동특성의 벡터 표현은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

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

여기서 $q \in R^n$ 는 관절 위치 벡터, $\tau(t) \in R^n$ 는 관절 토크 벡터, $M(q) \in R^{n \times n}$ 는 정정 관성 행렬, $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 는 마찰력과 구심력을 나타내는 행렬 그리고, $g(q) \in R^n$ 는 중력 벡터이다. 유한한 원하고자 하는 궤적 $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ 가 주어진다 면 제어 목적은 좋은 과도 특성을 가지면서 가능한 한 원하는 궤적을 근접하게 따라가도록 제어기를 설계하는 것이다. 또한 매니플레이터 동적 모델의 구조적 형태는 이용 가능하며, 부하 변동을 갖는 pick-and-place형태의 작업을 실행한다고 가정한다. 그러므로 부품조립 및 용접라인 자동화설비에 사용되는 산업용 로봇이 동작하는 동안 발생하는 불확실성은 로봇 팔과 부하의 관성 특성에 의하여 선형적으로 파라미터화 될 수 있다. 다른 구조화되지 않는 불확실성, 예를들면 Coulomb과 Viscous friction, 비모형화된 고주파특성 등은 여기서 고려하지 않는다. 만일 매니플레이터의 정확한 모델이 이용 가능하다 면 토크입력은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = M(q)(\underbrace{\ddot{q}_d + K_v \dot{e} + K_p e}_V) + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (2)$$

따라서 식(2)를 식(1)에 대입하면 다음과 같다.

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \quad (3)$$

여기서 $e = q_d - q$, $\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$ 그리고 $K_p, K_v \in R^{n \times n}$ 는 정정 대각 이득행렬이다. 이러한 제어기법은 일반적으로 Computed Torque 방법이라고 한다. 식(3)에서와 같이 오차 방정식은 전반적으로 안정하고 K_p 와 K_v 의 선택으로 바람직한 성능을 얻는다. 이와같은 방법은 매니플레이터의 동적 모델을 근거로 하였지만 만일 부하의 변화가 발생되었을 때 식(3)의 오차 방정식은 제차 방정식으로 더 이상 성립되지 않는다. 따라서 산업용 로봇 매니플레이터를 제어하기 위해서는 적응제어가 바람

직한 방법이라 할 수 있다.

2.1 간접 적응제어

로봇 매니플레이터의 적응제어 문제는 두 가지 다른 방법이 있다. 직접 적응제어와 간접 적응제어이다. 두 방법은 많은 연구가들에 의해 연구되어 왔으며 어떤 가정들이 타당하다면 전반적으로 안정성이 보장 된다고 보였다. 본 논문에서 다루고자 하는 다중식별기 모델과 스위칭을 이용한 적응제어 방법은 사실상 간접 적응제어 방법을 이용하였기 때문에 간단히 서술하기로 한다. 자주 이용되는 매니플레이터의 동적모델은 다음과 같이 3가지 중요한 성질을 갖는다.

- 1) 식(1)의 $M(q)$ 행렬은 正定이다.
- 2) 매니플레이터의 동특성은 선형적으로 파라미터화 될 수 있다.
- 3) $C(q, \dot{q})$ 행렬은 적절하게 선택함으로써 $\dot{M}(q)\dot{q} - 2C(q, \dot{q})$ 가 역부호 대칭 행렬이 되도록 정해 줄 수 있다[7].

이 방법은 산업용 매니플레이터의 식별기를 통해 추정오차 모델을 이용하게 되며 추정된 파라미터들은 관절토크를 발생시키는데 사용된다. 실제 제어 대상 시스템을 제어하기 위해 식별기 모델을 이용해 야 되므로 certainty equivalence를 근거로 하였다. 따라서 추종오차 대신에 토크 추정오차가 파라미터를 적용한다는 의미에서 직접 적응제어 방법과 다르다. 만일 가속도 정보를 이용할 수 있다면 식별기 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{\tau}(t) &= \hat{M}(q)\dot{q} + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{g}(q) \\ &= Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\hat{p} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 \hat{p} 는 파라미터 추정치 벡터이고 q 와 \dot{q} 는 시스템의 이용 가능한 상태들이다. 그러나 이 방법은 가속도 정보에 대한 계산이 필요하기 때문에 단점으로 지적된다. 이에 대한 대책으로 Middleton과 Goodwin은 가속도에 대한 문제를 해결하였다[8]. 이는 1차를 갖는 strictly proper 한 필터

$[H(s) = \frac{\alpha}{s + \alpha}, \alpha > 0]$ 에 의해 식(4)의 식별기 모델을 아래와 같이 필터링 한다.

$$\hat{\tau}_f = H(s)\hat{\tau} = \underbrace{H(s)Y(\ddot{q}, \dot{q}, q)}_{Y_f}\hat{p} = Y_f(\dot{q}, q)\hat{p} \quad (5)$$

따라서 필터링된 regressor 행렬 $Y_f(\dot{q}, q)$ 는 위치와 속도만의 함수로 재구성된다.

다음은 식별기 오차에 대해 다음과 같이 정의된다.

$$e_f = \tau_f - \hat{\tau}_f = Y_f(\dot{q}, q)\hat{p} \quad (6)$$

여기서 $\tau_f = H(s)\tau$ 는 식 (2)를 실제적으로 필터링한 토크이다. 그러면 간단한 추정알고리즘으로 gradient방법을 이용한다.

$$\dot{\hat{p}} = -\Gamma Y_f^T(q, \dot{q})e_f \quad (7)$$

여기서 Γ 는 대칭 정정 행렬이다. 식 (7)에서 정의된 파라미터 적응 알고리즘에 대해 Lyapunov function $V = \frac{1}{2}\hat{p}^T\Gamma^{-1}\hat{p}$ 를 이용하고 따라서

$\dot{V} = -e_f^T\Gamma e_f$ 가 되므로 $\hat{p} \in L_\infty$ 이고 $e_f \in L_2$ 가 됨을 알 수 있다.

이때 필터링된 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 의 \ddot{q} 가 제거 됨으로써 생기는 문제는 추종오차 e 와 필터링된 토크 식별오차 e_f 가 관련된다. 여기서 미지의 파라미터가 convex영역내에 제한된다는 가정하에서 $\hat{M}(q)$ 는 정정 행렬이라고 다시 가정한다[4]. 그러면 토크벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \hat{M}(q)(\ddot{q}_d + K_v\dot{e}) + \hat{C}(q, \dot{q}) + \hat{g}(q) \\ &+ \frac{1}{\alpha} Y_f\dot{\hat{p}} + \frac{\hat{M}(q)}{\alpha} \left[\frac{d}{dt}(\hat{M}^{-1}(q)) \right] e_f \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 식(8)의 마지막 항을 간단하게 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{\hat{M}(q)}{\alpha} \left[\frac{d}{dt}(\hat{M}^{-1}) \right] e_f = -\frac{1}{\alpha} \left[\frac{d}{dt}(\hat{M}) \right] \hat{M}^{-1}(q) e_f \quad (9)$$

식(8)의 제어칙을 식(1)에 대체시킨 결과 오차 방정식은 다음과 같다.

$$H^{-1}(s) \hat{M}^{-1}(q) e_I = (\dot{e} + K_v e + K_p e) \quad (10)$$

여기서 $\hat{M}^{-1}(q)$ 는 정칙이며, $e_I \in L_2$ 라고 가정하였기 때문에 그것은 $t \rightarrow \infty$ 에 따라 $e \rightarrow 0$ 됨을 알 수 있다.

지금까지는 추종오차의 과도특성을 제어하고자 하는 직접적인 방법에 대해 설명되지 않았다. 따라서 다중 식별기모델과 스위칭을 이용하여 과도 추종오차가 만족할 만한 성능을 보이기 위해 다음절에서 설명하기로 한다.

2.2 다중모델을 근거로한 적응제어

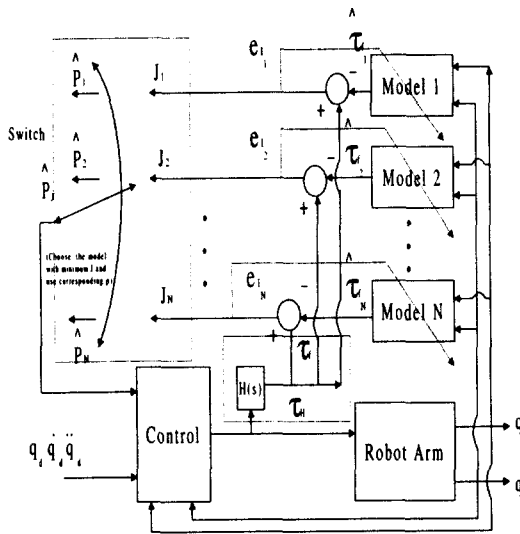


그림 1. 전체적인 다중제어기의 구성도
Fig. 1. Block diagram of the overall control architecture

그림1 에서와같이 많은 식별기모델을 갖는 간접 적응제어기 알고리즘을 이용한다. 이 구조에 있어서 각각의 모델에 대한 식별기 파라미터들은 매 순간 추정되며 이때 발생된 토크 벡터들 중에 하나만이 액츄에이터에 가해진다. 먼저 가속도 정보 \ddot{q} 가 이용가능하다면 각 식별기모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{\tau}_j = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \hat{p}_j; \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (11)$$

여기서 \hat{p}_j 는 j 번째 모델에 대한 파라미터 추정치 벡터이며, $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 는 비선형 regressor 행렬이다. regressor 행렬 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 는 모든 모델들에 대해 동일하지만 파라미터 벡터 \hat{p}_j 는 주어진 Compact 파라미터 집합으로부터 선택된 다른 초기값을 갖는다.

각각의 모델에 대한 파라미터 벡터 \hat{p}_j 는 식(5)에서 정의된 오차모델 즉

$$e_{Ij} = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \tilde{p}_j \quad (12)$$

를 근거로 다음과 같은 gradient알고리즘을 이용한다.

$$\dot{\hat{p}}_j = -\Gamma Y^T(q, \dot{q}, \ddot{q}) \tilde{\tau}_j \quad (13)$$

여기서 $\tilde{p}_j = p - \hat{p}_j$ 이고 $\tilde{\tau}_j$ 는 j 번째 모델에 대한 토크 식별오차이다. j 번째 식별기모델에 대응되는 토크벡터 $\hat{\tau}_j$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_j = \hat{M}_j(q)(\ddot{q}_d + K_v \dot{e} + K_p e) + \hat{C}_j(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{g}(q) \quad (14)$$

앞에서 언급한 바와 같이 임의의 주어진 순간에 N 개의 모델들에 대한 식별 오차들은 이용 가능하지만 토크벡터들 중에 τ_j 하나만이 매니플레이터의 입력으로 선택될 것이다. 그러므로 식별기모델들의 성능을 근거로 한 스위칭에 대한 성능지수는 전반적인 제어시스템의 안정도를 유지하면서 과도성능을 개선시키는 하나의 방법으로 선정되어야 한다. 과도특성을 개선시키기 위한 스위칭 지수를 선정하기 위해 우선 스위칭 열(switch sequence)과 스위칭 법칙(switching rule)을 정의해야 된다. 이에 제어기에서 사용되는 특정한 스위칭 기법은 Narendra 와 Balakrishnan[9]에 의해 입증되었다. 결과적으로 스위칭 허용칙(permissible switching rule)를 이용하여 식(14)에서 정의된 토크입력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau_j = \tau_{h(t)}(t) \quad t \geq 0 \quad (15)$$

2.3 관절 가속도를 이용하지 않은 알고리즘

적응제어기는 그림1. (필터 $H(s)$ 를 이용)에서 보는 바와같이 병행해서 실행되는 N 개의 식별기모델들로 구성된다.

각각의 식별기에 대한 모델들은 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\hat{\tau}_j = Y_f(q, \dot{q}) \hat{p}_j \quad j=1, 2, \dots, N \quad (16)$$

여기서 $Y_f(q, \dot{q}) = H(s)Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 는 필터링된 regressor 행렬이고, $H(s) = \frac{\alpha}{s + \alpha}$ 이다. 앞에서와 같이 regressor 행렬 $Y_f(q, \dot{q})$ 는 모든 모델들이 동일하며 파라미터 벡터 \hat{p}_j 는 다른 초기값을 갖는다. 각각의 모델에 대한 \hat{p}_j 는 다음과 같이 오차모델을 근거로 하여 적응된다.

$$\dot{\hat{p}}_j = -\Gamma Y_f^T(q, \dot{q}) e_{I_j} \quad (17)$$

$$e_{I_j} = \tau_j - \hat{\tau}_j = Y_f(q, \dot{q}) \hat{p}_j \quad (18)$$

여기서 e_{I_j} 는 필터링된 식별오차 벡터이다. 각각의 이용 가능한 모델들에 대한 토크출력이 미리 발생될 수 있기 때문에 permissible switching rule $h(t)$ 에서 토크벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \tau_{h(t)} &= \hat{M}_{h(t)}(q) (\ddot{q}_d + K_v \dot{e} + K_p e) \\ &+ \hat{C}_{h(t)}(q, \dot{q}) \dot{q} + \hat{g}_{h(t)}(q) + \frac{1}{\alpha} y_f \hat{p}_{h(t)} \\ &+ \frac{\hat{M}_{h(t)}(q)}{\alpha} \left[\frac{d}{dt} (\hat{M}^{-1}) \right]_{h(t)} e_{I_{h(t)}} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 $\frac{\hat{M}_{h(t)}(q)}{\alpha} \left[\frac{d}{dt} (\hat{M}^{-1}) \right]_{h(t)} e_{I_{h(t)}} = -\frac{1}{\alpha} \left[\frac{d}{dt} (\hat{M}) \right] \hat{M}^{-1}(q) e_I$ 이므로 우측항을 사용하면 구현이 용이하다.

3. 성능개선을 위한 스위칭 구조

로봇 매니플레이터의 다중 모델을 근거로한 적응 제어 시스템은 무한히 빠른 스위칭을 요구하지 않는 한 스위칭 구조와 관계없이 전체 시스템의 안정성은 증명될 수 있기 때문에 안정성보다는 성능 개선을 위한 스위칭 구조를 선정할 수 있다. 그러나 매 순간 토크입력을 어떻게 결정하는지에 대한 뚜렷한 방법이 없기 때문에 기존의 스위칭 구조는 실제적인 오차들의 측정될 양을 알기 위해 성능지수

$J(e_I(t)) = \alpha e_I(t) + \beta \int_0^t \dot{e}_I^2(\xi) d\xi$ 를 제안하여 매 순간 가장 작은 J 값을 선정하였다[10]. 이의 성능 지수는 순간적이며 장기적으로 정확한 측정량을 제공해 주지만 매니플레이터의 부하 변동이 생겼을 때나 작은 식별오차가 존재할 때 스위칭 동작을 제대로 하지 못하는 경우가 생긴다. 이에 대한 대책으로 식별기의 성능에 대한 지수는 전문가의 경험이나 지식을 바탕으로 인간의 의사 결정 과정을 모방한 퍼지추론 기법을 스위칭 구조에 도입하여 결정하고자 한다. 이는 식별기의 현재 오차 e_I 와 오차의 변화량 \dot{e}_I 를 [-1 1]로 정규화(Normalization)하고, 그 값이 7가지 전진부 소속함수(PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB)에 포함된다면, 그에 따른 if-then 형태의 49개의 언어적 제어규칙을 얻을 수 있다[11],[12]. 따라서 본 논문에서 제시한 스위칭 구조를 결정짓는 성능지수 J_j 는 다음과 같이 정의한다.

$$h_{kl_j} = \min(\mu_{A_k}(e_{I_j}), \mu_{B_l}(\dot{e}_{I_j})) \quad (20)$$

$$J_j = \frac{\sum_{k,l=1}^7 L_{kl} h_{kl}}{\sum_{k,l=1}^7 h_{kl}} \quad (21)$$

여기서, $\mu_{A_k}(e_{I_j})$ 및 $(\mu_{B_l}(\dot{e}_{I_j}))$ 는 입력신호인 e_{I_j} 및 \dot{e}_{I_j} 값이 언어적 변수 값에 소속하는 정도를 나타내며, 이는 [0, 1]의 값을 갖는다. $h_{k,l}$ 는 k,l 번째 규칙에 대한 입력신호의 적합도를 나타내는 값이다. 또한 $L_{k,l}$ 는 {B(=1), M(=0.6), S(=0.3), Z(=0)}의

싱글톤(Singleton) 소속함수를 갖는 출력단의 값이며, 성능지수 J_j 를 결정하기 위해 사용된 퍼지규칙은 표1.과 같다.

표 1. 제어 규칙 작성표
Table 1. Control Rule tablet

e_I	\dot{e}_I	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B	B
NM	B	B	B	M	M	M	M	B
NS	B	B	B	S	S	M	M	B
ZO	B	M	S	Z	S	M	M	B
PS	B	M	S	S	B	B	B	B
PM	B	M	M	M	B	B	B	B
PB	B	B	B	B	B	B	B	B

퍼지추론 과정을 통해서 나온 성능지수 J_j 는 N개의 식별기 모델에서 각각 나오게되며 이때 매 순간 식별오차가 가장 작은 J_j 값을 선택하게 된다. 따라서 여러개의 식별기 모델 중에 선택되어진 J_j 는 실제 플랜트를 근사시켰다는 의미가 되므로 플랜트에 가해지는 입력 τ_j 는 실제 플랜트에 적용하게 되어 좋은 성능을 발휘하게된다.

4. 모의실험 결과

모의 실험을 하기 위해 2 자유도를 갖는 SCARA형 매니플레이터에 적용하고자 한다. 수평선상에서 이동하는 산업용 로봇 매니플레이터라고 가정하면 중력 항은 무시된다. 즉 식 (1)에서 $g(q)$ 는 0이다. 그러면 파라미터화된 형태에서 로봇동적모델은 다음과 같다[7].

$$\begin{aligned} \tau_1 = & [\ddot{q}_1]p_1 + [\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2]p_2 \\ & + [2\cos(q_2)\ddot{q}_1 + \cos(q_2)\ddot{q}_2 - \sin(q_2)\dot{q}_1\dot{q}_2 \\ & - \sin(q_2)\dot{q}_1\dot{q}_2 - \sin(q_2)\dot{q}_2^2]p_3 \end{aligned}$$

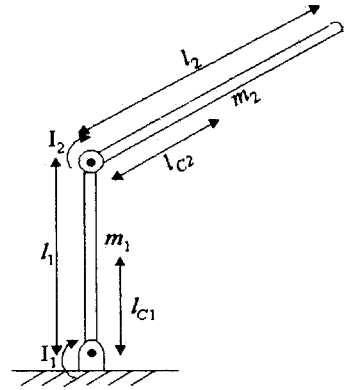


그림 2. 수평 다관절 로봇 매니플레이터
Fig. 2. Planer robot manipulator

$$\begin{aligned} \tau_2 = & [0]p_1 + [\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2]p_2 \\ & + [\cos(q_2)\ddot{q}_1 + \sin(q_2)\dot{q}_1^2]p_3 \end{aligned}$$

여기서 대괄호 속의 항들은 파라미터벡터 (즉, $\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})p$) $p = [p_1, p_2, p_3]^T$ 를 곱한 비선형 regressor 행렬의 요소들이다.

관성 파라미터들에 대한 공칭값들은 다음과 같이 선택된다.

$$\begin{aligned} \ell_1 = \ell_2 = & 0.3m, \quad m_1 = 0.7kg, \quad m_2 = 0.5kg, \\ \ell_{c1} = \ell_{c2} = & 0.15m, \quad I_1 = 0.14kgm^2 \quad \text{그리고} \\ I_2 = & 0.10kgm^2 \text{이다.} \end{aligned}$$

그림 2에서와 같이 수평 다관절 로봇 매니플레이터가 작업 공간상에서 물건을 집고 이동하는 작업이 수행될 때 링크 2의 질량은 집은 물건의 질량을 포함하는 것으로서 시변이라고 가정한다. 이 때 링크 2에 미치는 질량은 무부하시 0.5kg, 부하 1의 경우 1.0kg, 부하 2의 경우는 2.0kg 으로 설정하였으며 또한 부하의 질량에 대한 대략적인 추정치는 사전에 알고 있다고 가정한다. 그러면 파라미터 공간 $P \in R^3$ 에서 3개의 다른 영역으로 나타낼 수 있으며 각각의 영역에서 임의로 선정된 8개의 식별기 모델(8개의 다른 초기 파라미터 추정치)을 선택함으로써 파

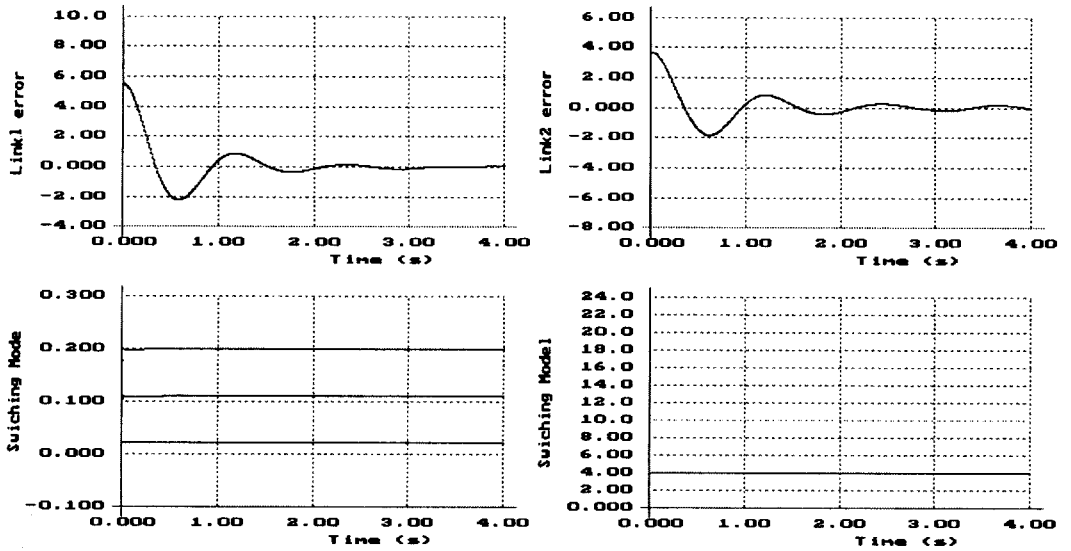


그림 3. 기존의 성능지수 $(J(e_I(t)) = \alpha e_I(t) + \beta \int_0^t \dot{e}_I^2(\zeta)d\zeta)$ 에 대한 플랜트 응답특성

Fig. 3. Response of plant to performance index $(J(e_I(t)) = \alpha e_I(t) + \beta \int_0^t \dot{e}_I^2(\zeta)d\zeta)$

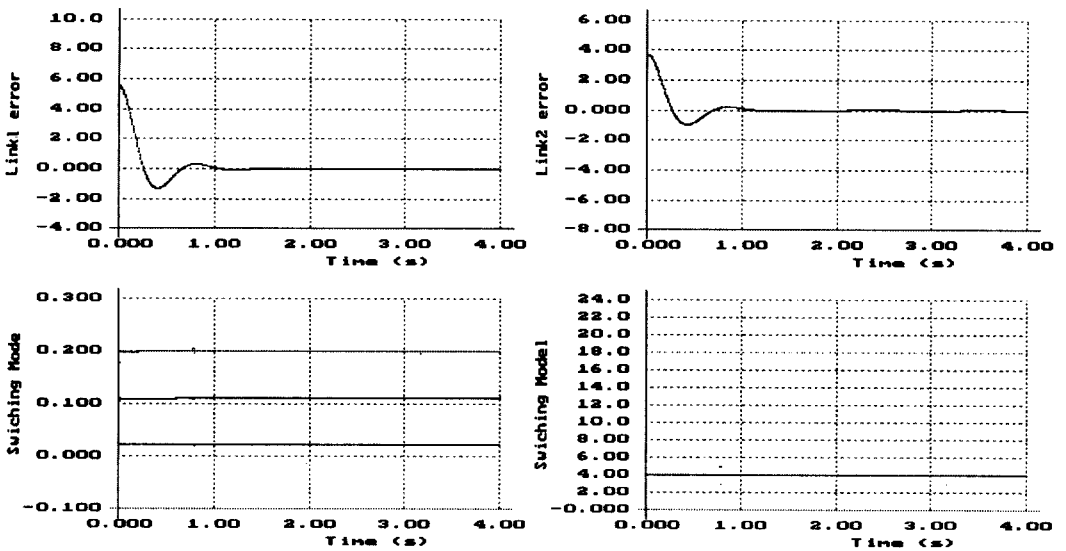


그림 4. 퍼지추론의 성능지수를 이용한 플랜트 응답특성

Fig. 4. Response of plant to performance index with fuzzy inference

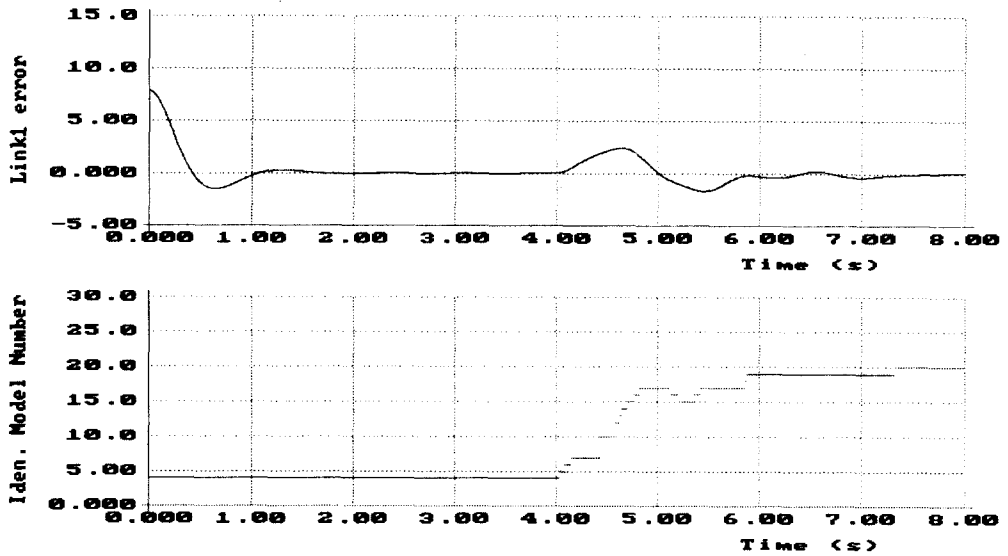


그림 5. 4초에서 질량 m_2 가 2kg으로 변할 때 기존의 성능지수에 대한 플랜트 응답특성
 Fig. 5. Response of plant to conventional performance index when is changed the mass m_2 to 2kg at the 4-second mark

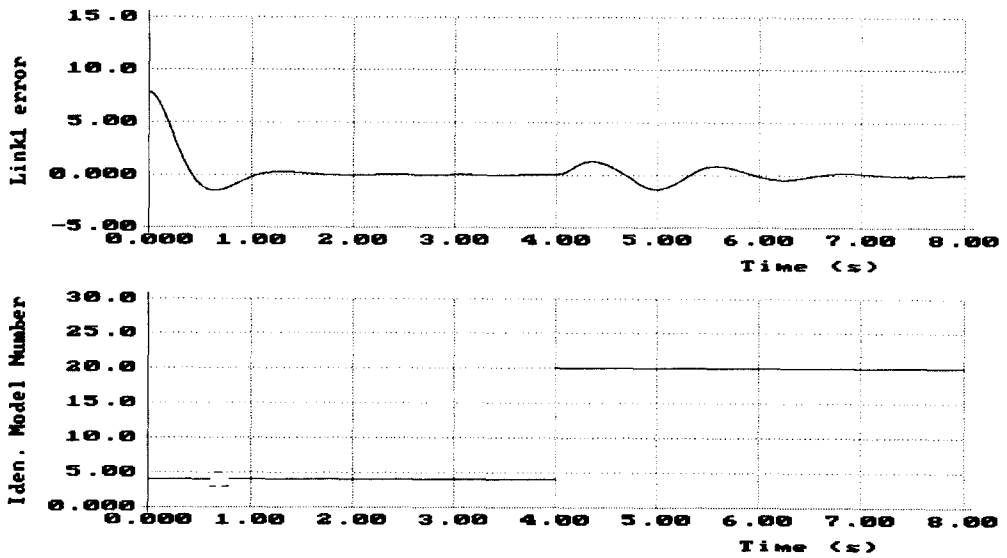


그림 6. 4초에서 질량 m_2 가 2kg으로 변할 때 퍼지추론의 성능지수에 대한 플랜트 응답특성
 Fig. 6. Response of plant to performance index with fuzzy inference when is changed the mass m_2 to 2kg at the 4-second mark

라미터 공간상에서 모두 24개의 모델로 주어짐을 알 수 있다. 제한한 알고리즘의 효용성을 보이기 위해 기존의 알고리즘과 추종오차를 비교하고자 한다. 원하고자하는 궤적은

$$q_{1d} = \frac{\pi}{4.0} + 2(1 - \cos(3t)),$$

$$q_{2d} = \frac{\pi}{6.0} + (1 - \cos(5t))$$

이며 각각 1차와 2차 도함수를 갖는다. 위치 오차와 속도 오차의 초기는 0이며, 초기 파라미터 추정치는 모두 0으로 하였으며 또한 적응 이득은 모든 경우에 0으로 놓았다. 시뮬레이션 결과 그림3과 그림4에서 보는 바와 같이 과도추종오차에 있어서 우수한 성능 개선을 보였다. 또한 원하는 궤적이 파라미터 추정치가 제 값으로 수렴하기 위한 필요충분조건인[8] P.E.(Persistently Exciting)조건을 만족하므로 각각 파라미터 p_1, p_2, p_3 는 실제값인 0.200, 0.112, 0.022로 점근적으로 수렴됨을 보였다. 그림[5]와 그림[6]은 4초에서 갑작스런 부하변동으로 인해 m_2 가 0.2에서 0.5의 공칭값으로 변할 경우에 대해 24개의 고정된 모델을 갖는 적응알고리즘을 적용하여 보였다. 이때 추종오차와 스위칭구조를 각각 보였다. 그 결과 제시한 알고리즘이 기존의 알고리즘에 비해 좋은 추종성능이 개선됨을 보였으며 또한 스위칭 함수에 대해서도 큰 변화가 있었음을 보였다.

5. 결론

다중모델을 근거로 한 적응제어 알고리즘은 로봇 매니플레이터의 전반적인 추종성능을 개선시키기 위해 제시하였다. 제안된 알고리즘은 매니플레이터의 다중식별기 모델과 관절 액추에이터를 구동시키기 위해 특정한 토크입력을 결정하는 스위칭 기법을 이용하였다. 특히 스위칭 구조는 퍼지추론 기법을 이용함으로써 매니플레이터의 동특성을 가장 근사화시킨 식별기 모델을 근거로 매 순간 토크벡터를 발생시켰다. 임의의 허용 가능한 스위칭 하에서 제시한 알고리즘은 컴퓨터 모의실험 결과 과도추종 성능이 개선되었음을 보였다. 이와 같이 제안된 제어기법은 부품 조립 및 용접라인 그리고 엘리베이터용 인버터등의 자동화설비 계통의 정확한 수학적 모델을 모르더라도

도 기존설비의 구조변경 없이 쉽게 적용이 될 것으로 보며 더욱이 주차빌딩, 자동창고등의 공간이동을 필요로 하는 자동화설비에도 제시한 알고리즘으로 응용가능 하리라 생각된다.

본 논문은 1997학년도 대전대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참고 문헌

- [1] J. E. Slotine and W. Li, " Adaptive Manipulator Control : A Case Study," IEEE Trans. Aut. Control, AC-33, pp. 995-1003, Nov., 1988.
- [2] B. Martensson, " Adaptive Stabilization," Ph. D. dissertation, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1986.
- [3] M. Fu and B. R. Barmish, " Adaptive Stabilization of Linear Systems via Switching Control," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 31, pp. 1097-1103, Dec, 1986.
- [4] D. E. Miller and E. J. Davison, " An Adaptive Controller which Provides Lyapunov Stability," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 34, pp. 599-609, June 1999.
- [5] R. H. Middleton, G. C. Goodwin, D. J. Hill, and D. Q. Mayne, " Design Issues in Adaptive Control," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-33, pp. 50-58, Jan. 1988.
- [6] A. S. Morse, D. Q. Mayne, and G. C. Goodwin, " Applications of Hysteresis Switching in Parameter Adaptive Control," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 37, pp. 1343-1354, Sept.1992.
- [7] M. W. Spong and M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control", Niley, 1989.
- [8] R. H. Middleton, G. C. Goodwin, D. J. Hill, and D. Q. Mayne, " Design Issues in Adaptive Control," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-33, pp. 50-58, Jan. 1988.
- [9] K. S. Narendra and Jeyendran Balakrishnan, "Improving Transient Response of Adaptive Systems using Multiple Models and Switching," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-39, no. 9, pp. 1861-1866, Sep., 1994
- [10] K. Ciliz and Kumpati S. Narendra, " Multiple Model Based Adaptive Control of Robotic manipulators," in Proc. IEEE Conference on Robotics and Auto., pp. 1305-1310, 1994

◇ 저자 소개 ◇

이형찬 (李炯燦)

1959년 7월 4일생. 1979년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1988년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 1994년~현재 대전대학교 공대 전기공학과 조교수.