

# 수동 관절을 가진 로봇 매니플레이터를 위한 퍼지 슬라이딩 모드 기법을 이용한 제어기

(Fuzzy Sliding Mode Controller for a Robot Manipulator with Passive Joints)

김 원\* · 김민성\* · 신진호\*\* · 이주장\*\*\*

(Won Kim · Min-Soeng Kim · Jin-Ho Shin · Ju-Jang Lee)

## 요 약

본 논문에서는 수동 관절을 지니는 로봇 매니플레이터의 제어를 위하여 퍼지 슬라이딩 모드 기법을 제안하였다. 구동기가 장착되어 있지 않은 수동 관절을 지니는 로봇 매니플레이터는 언더액츄에이티드(Underactuated) 시스템의 일종이며 이러한 매니플레이터의 제어는 일반 로봇 매니플레이터의 제어에 비해 어려운 측면이 있다. 여기서는 불확실성 및 외란이 존재하는 매니플레이터 시스템에 대하여 퍼지 슬라이딩 모드 제어를 적용함으로써, 불확실성을 극복하며 채터링 현상이 없는 제어가 가능함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

## Abstract

In this paper, we proposed a fuzzy sliding mode controller for a robot manipulator with passive joints. A robot manipulator with passive joints which is not equipped with actuators is a kind of underactuated systems. The control of underactuated manipulators is more difficult than that of fully-actuated ones. Though the sliding mode control technique has a robust characteristics to parameter uncertainties and external disturbances, the chattering phenomena become one of the major problems in application to the real plant.

## 1. 서 론

일반적으로 로봇 매니플레이터(Manipulator)는 여러 개의 관절(Joints)을 가지고 있는데, 이 때 각 관절에는 구동기가 내장되어 있다. 만약 하나 이상 구

동기가 고장이 나서 적절히 동작을 하지 않은 경우 에이매니플레이터는 언더액츄에이티드(Underactuated) 상태에 있다고 할 수 있으며, 이 고장난 관절이 마찰력 등에 의해 전혀 움직일 수 없는 경우가 아니라면 이 부분은 구동기가 없는 수동관절(Passive Joint)로 간주될 수 있다. 한편 우주와 같은 특수한 환경에서 사용되는 매니플레이터의 경우, 에너지를 적게 사용하기 위해서나 부품 수를 최소화하기 위해 의도적으로 구동기가 없는 수동 관절을 가지도록 설계될 수 있다. 수동 관절을 가진 매니플레이터의 경우, 시스템의 구성공간(Configuration Space)의 차수보다 제어 입력공간(Input Space)의 차수가 작기 때문에 각

\*정회원 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정

\*\*정회원 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정

\*\*\*정회원 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수

접수일자 : 1998. 4. 18.

관절에 대한 제어가 비교적 쉽지 않은 것으로 알려져 있다.

이러한 언더액츄에이티드 매니플레이터의 중요성은, 사람이 접근하기 어려운 원자로 내부, 화재 현장, 폭발 현장 등에서 활용되는 매니플레이터의 고장 극복(Fault-tolerant)의 측면에서 부각되고 있다. 즉, 시스템의 일부 구동기의 고장이 발생했을 경우에도 동작이 되고 있는 다른 구동기와 동적 커플링(Dynamic Coupling) 특성을 이용하여 고장난 관절을 제어함으로써 주어진 임무를 완수해낼 수 있다는 측면에서 비용 절감 및 신뢰성 향상의 효과를 기대할 수 있다. 또한 언더액츄에이티드 시스템은 모든 관절에 구동기가 장착된 매니플레이터에 비해 상대적으로 부품 수가 적기 때문에 부품 고장 발생률이 적으며, 무게나 에너지 소비율이 낮은 시스템이 보다 유리할 수밖에 없는 우주환경에 적합하다.

언더액츄에이티드 시스템의 동적 방정식과 제어 기법 등은 1990년부터 연구되기 시작했으며, 전술한 바와 같이 일반적인 매니플레이터에 비해 제어가 쉽지 않기 때문에 이 분야에 대한 제어 기법 연구 결과는 그리 많지 않다. H. Arai와 S. Tachi, G. Oriolo와 Y. Nakamura, E. Papadopoulos와 S. Dubowsky[1~3] 등은 정확한 동적 방정식에 기초를 두고 제어를 설계하는 시도를 했다. 그러나, 대형 로봇 매니플레이터 등은 측정된 모델 파라미터가 정확하지 않을 수 있고, 부하(Load) 조건이 변동하는 문제가 있을 수 있기 때문에 Bergeman은 VSS(Variable Structure System) 제어 기법을 언더액츄에이티드 매니플레이터에 적용하여 강인한 제어기 설계를 시도하였다[4]. 한편 J. Shin과 J. Lee는 강인한 적응 제어를 설계하여 언더액츄에이티드 시스템에 적용하였다[5].

언더액츄에이티드 매니플레이터에 대하여 슬라이딩 모드 제어 기법을 적용하면 매니플레이터 시스템 모델의 불확실성 및 외란을 극복하는 제어기를 체계적인 접근 방법을 통해 설계할 수 있으나, 제어기 출력에 고주파 떨림 현상인 채터링이 발생하여 전반적인 성능이 좋지 않다. 본 논문에서는 슬라이딩 모드 제어기에서 오차 및 오차의 미분성분을 퍼지화하여 퍼지제어를 적용함으로써 이러한 채터링 문제를 개선하였다. 이때 퍼지 제어 규칙은 위상평면을 기반으로 하여 설계가 가능하다. 이 논문은 이와 같은 개

념에 입각하여 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였고, 시뮬레이션을 통해 그 효과를 확인하였다. 2장에는 언더액츄에이티드 매니플레이터의 시스템 동적 방정식에 대해 기술하였으며, 3장에는 수동 관절 및 능동 관절(Active Joints)의 제어 기법 및 퍼지 규칙 설계에 대해 기술하였고, 4장은 시뮬레이션 및 결과 분석에 대하여, 5장은 결론에 대해 기술하였다.

## 2. 시스템의 모델

$r$  개의 능동 관절 및  $p$  개의 수동 관절을 가진 총  $n (= r+p)$  개 링크의 언더액츄에이티드 매니플레이터의 동적 방정식을 라그랑지안(Lagrangian) 모델로서 표현해 보면 다음의 식 (1)과 같다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = u + d(t) = \begin{pmatrix} \tau_a + d_a \\ O_p + d_p \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, 관절 변수:  $q = (q_a^T q_p^T)^T \in R^{n=r+p}$ ,

능동 관절의 위치 벡터:  $q_a \in R^r$ ,

수동 관절의 위치 벡터:  $q_p \in R^p$ ,

총 관절 수:  $n = r + p$ ,

관성 행렬:  $M(q) \in R^{n \times n}$ ,

원심력 및 코리올리 토크 성분:  $C(q, \dot{q}) \in R^n$ ,

중력 토크 성분:  $G(q) \in R^n$ ,

제어 입력 토크 벡터:  $u = (\tau_a^T O_p^T)^T \in R^n$ ,

능동 관절 제어 입력 벡터:  $\tau_a \in R^r$ ,

수동 관절 제어 입력 벡터(0 벡터):  $O_p \in R^p$

외란의 경우는 다음과 같이 표현된다.

$$d(t) = (d_a^T d_p^T)^T \in R^n$$

여기서,  $d_a \in R^r$ ,  $d_p \in R^p$ 이며, 크기는  $\|d_a\| \leq d_{am}$ ,  $\|d_p\| \leq d_{pm}$

한편 방정식 (1)은 다음과 같이 분할될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} M_{aa} & M_{ap} \\ M_{pa} & M_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q}_a \\ \ddot{q}_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_a \\ F_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_a + d_a \\ O_p + d_p \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $M_{aa} \in R^{r \times r}$ ,  $M_{pp} \in R^{p \times p}$ , 그리고

$$F(q, \dot{q}) = (F_a^T \ F_p^T)^T = C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q)$$

### 3. 피지 슬라이딩 모드 제어기의 설계

언더액츄에이티드 매니플레이터에 대한 피지 슬라이딩 모드 제어기는 모든 관절을 정해진 각도로 제어하는 것을 제어 목표로 하며, 관련한 언더액츄에이티드 시스템에 대한 제어 절차는 다음과 같다.

**◎ 언더액츄에이티드 시스템 제어 절차**

- (1) 능동관절과 수동관절 사이의 동적 커플링(Dynamic coupling)에 의하여 모든 수동관절을 먼저 주어진 각도로 제어한다.
- (2) 수동관절이 주어진 각도로 진입할 때 각 수동관절에 장착된 브레이크를 이용하여 고정을 시킨다.
- (3) 수동관절 제어가 완료되면, 새로운 제어 법칙에 의하여 능동관절을 제어한다.

#### 3.1 수동관절의 제어

##### 3.1.1 슬라이딩 모드 제어기의 설계

수식 (2)에 주어진 언더액츄에이티드 매니플레이터의 동적 방정식은 다음 수식 (3), (4)와 같이 분할되어 표현될 수 있다.

$$\ddot{q}_a = -M_{aa}^{-1}(M_{ap} \ddot{q}_p + F_a - \tau_a - d_a) \quad (3)$$

$$\ddot{q}_p = -M_{pp}^{-1}(M_{pa} \ddot{q}_a + F_p - d_p) \quad (4)$$

이 때 수식(3)을 (4)에 대입하면,

$$M_p \ddot{q}_p = M_{\tau_a} \tau_a + M_{F_a} F_a + M_{F_p} F_p + M_{d_a} d_a + M_{d_p} d_p \quad (5)$$

여기서,  $M_p, M_{\tau_a}, M_{F_a}, M_{d_a}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_p &= M_{pp}^{-1} \hat{M}_{pp} = M_{pp}^{-1}(M_{pp} - M_{pa} M_{aa}^{-1} M_{ap}) \in R^{p \times p} \\ M_{\tau_a} &= -M_{pp}^{-1} M_{pa} M_{aa}^{-1} \in R^{p \times r} \\ M_{F_a} &= M_{pp}^{-1} M_{pa} M_{aa}^{-1} \in R^{p \times r}, M_{F_p} = -M_{pp}^{-1} \in R^{p \times p} \\ M_{d_a} &= -M_{pp}^{-1} M_{pa} M_{aa}^{-1} \in R^{p \times r}, M_{d_p} = M_{pp}^{-1} \in R^{p \times p} \end{aligned}$$

그러므로 동적 방정식은 다음 수식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\ddot{q}_p = M_{\tau_a} \tau_a + H_p \quad (6)$$

여기서,  $M_{\tau_a}, H_p$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_{\tau_a} &= M_p^{-1} M_{\tau_a} = -\hat{M}_{pp}^{-1} M_{pa} M_{aa}^{-1} \in R^{p \times r} \\ H_p &= M_p^{-1}(M_{F_a} F_a + M_{F_p} F_p + M_{d_a} d_a + M_{d_p} d_p) \in R^p \end{aligned}$$

위의 수식 (6)을 자세히 보면, 수동관절 변수,  $q_p$ 는 능동관절에 장착된 구동기의 출력인  $\tau_a$ 를 이용하여 제어를 해야한다. 즉 수동관절과 능동관절 사이의 동적 커플링을 이용하여 제어를 수행한다.

슬라이딩 모드 제어기를 다음의 식(7)과 같이 정의하면,

$$\tau_a = \hat{M}_{\tau_a}^{\#} (V_{pr} - \hat{H}_p) \quad (7)$$

이 때, #는 의사 역행렬(Pseudo Inverse)[5]을 의미하고,  $\hat{M}_{\tau_a}, \hat{H}_p$ 는 공칭값(Nominal)을 고려한 파라미터 값으로서,

$$\hat{M}_{\tau_a} = -( \hat{M}_{pp}^{-1} \hat{M}_{pa} \hat{M}_{aa}^{-1} ) \text{ 와}$$

$$\hat{H}_p = \hat{M}_p^{-1} ( \hat{M}_{F_a} \hat{F}_a + \hat{M}_{F_p} \hat{F}_p ) \text{ 으로서 각}$$

각 표현된다. 한편 수식 (7)을 (6)에 대입하면,

$$\ddot{q}_p = V_{pr} + \eta_p \quad (8)$$

수식 (8)에서 불확실성을 내포하는 항들을 통합하여 다음과 같이  $\eta_p$ 로서 표현할 수 있다.

$$\eta_p = (M_{\tau_a} \hat{M}_{\tau_a}^{\#} - I_p) V_{pr} + (H_p - M_{\tau_a} \hat{M}_{\tau_a}^{\#} \hat{H}_p)$$

이 때 제어입력 ( $V_{pr}$ )은 다음과 같이 정의한다.

$V_{pr} = V_p + \Delta V_p$  (단,  $\Delta V_p$ 는 불확실성과 외란을 극복하는 제어입력 성분임.)

추종 오차(Tracking error)는 다음과 같이 정의한다.  $e_p = q_p - q_{pd} (\in R^p)$  (단,  $q_{pd}$ 는 수동 관절의 제어 목표 값 벡터)

이때 수동관절의 슬라이딩 평면(Sliding surface)을 다음과 같이 정의한다.

$$s_p = \dot{e}_p + \Lambda_p e_p \in R^p \text{ (단, } \Lambda_p \text{는 positive definite 상수(constant) 이득 대각 행렬임.)}$$

그러므로 외부(Outer) 루프(loop) 입력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_p = \ddot{q}_{pr} - (K_p + \Lambda_p) \dot{e}_p - K_p \Lambda_p e_p$$

(단,  $K_p$ 는 positive definite 상수 이득 대각 행렬임)

수동 관절을 가진 로봇 매니퓰레이터를 위한 퍼지 슬라이딩 모드 기법을 이용한 제어기

### 3.1.2 Fuzzy SMC의 설계

슬라이딩 모드 제어기 설계 결과에서 알 수 있는 것은 입력,  $V_p$ 이 크게 시스템 파라미터의 공칭값 성분에 대한 제어 입력인  $V_p$  항과 외란 및 불확실성을 극복하는  $\Delta V_p$  항의 두 가지 성분으로 구성된다. 여기서  $\Delta V_p$  항은 시스템의 대표점 (Representative Point, 즉 RP)이 위상평면상의 슬라이딩 평면에 존재하도록 하는 역할을 하는데, 그림 1에서 보는 것처럼 슬라이딩 평면에 의하여 구분되는 두 영역 중에서 어느 영역에 대표점이 속하는가에 따라 급격한 입력 값의 변화를 갖는다. 여기서 채터링이 발생하게 되며, 이때 오차 및 오차의 변화를 퍼지 입력으로하는 퍼지제어기를 구성하면 급격한 변화가 일어나지 않게 되어 채터링을 발생하지 않는 강인한 제어기를 설계할 수가 있다.

#### 퍼지 멤버십 함수의 설계

수동관절에 대한 입력용 퍼지 변수는 오차( $e_p$ )와 그의 미분에 해당하는  $\dot{e}_p$  등의 두 가지이며, 출력 퍼지 변수는 제어입력에서 외란 및 불확실성을 극복하는 항인  $\Delta V_p$ 이다. 멤버십 함수의 형태는 그림 2와 같은데, NB(Negative Big), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), ZR(Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big) 등의 총 7개의 라벨(Label)로 구성이 되며, 퍼지 변수  $e_p, \dot{e}_p, \Delta V_p$ 는 모두 같은 형태의 멤버십 함수를 갖는다. 단, 독립변수 축을 정규화 변수(S.F., Scale Factor)로서 표현함으로써 전체 퍼지 제어기 튜닝에 이용이 된다. 추론 방식은 Mamdani의 Min-max 규칙을 사용하였고, 비퍼지화(Defuzzification)는 면적중심법(COA, Center Of Area) 방식을 적용하였다.

#### 퍼지 제어 규칙 기반의 설계

퍼지 제어 규칙 기반은 그림 1의 개념과 같이 위상 평면상에서 슬라이딩 라인이 구분하는 두 영역 중 대표점이 위치하는 영역에 따라서 제어 출력의 부호를 결정하고, 슬라이딩 라인과 대표점을 연결하는 수선의 길이에 비례하는 제어 출력이 발생하도록 규칙을 설정하여 구성된다. 표 1은 이와 같은 개념을

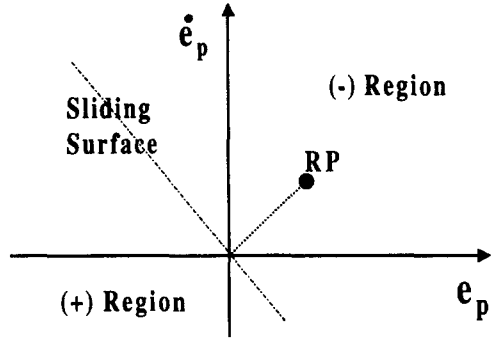


그림 1. 대표점과 슬라이딩 라인과의 관계  
Fig. 1. The relationship between RP and sliding line

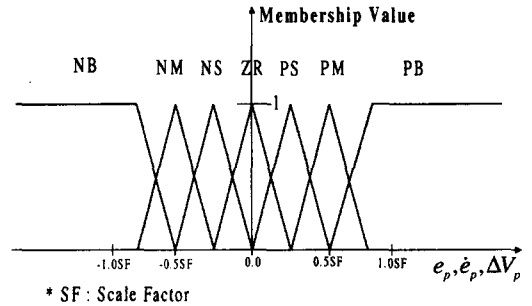


그림 2. 멤버십 함수의 정의  
Fig. 2. The definition of membership function

반영한 제어 규칙 표로서, 표의 셀 중에서 ZR(ZeRo)의 출력을 갖는 셀(Cell)들은 슬라이딩 라인 상에 대표점이 있을 경우를 고려한 것들이다. 이 Zero 셀 들은 전체 표를 (+)영역 및 (-) 영역으로 구분하는 기준이 되며, 이 Zero 셀 들로부터 멀어질수록 출력의 크기가 커짐을 알 수 있다. 이러한 방식으로 퍼지 제어 규칙을 구성하면, 슬라이딩 모드 제어 개념을 그대로 퍼지 제어에 대해 적용할 수 있게 된다. 따라서 퍼지 제어기의 튜닝은 이러한 룰 베이스를 조정하는 것이 아니라, 멤버십 함수의 정규화 변수(S.F.)를 조정함으로써 이루어진다.

### 3.2 능동관절의 제어

동적 방정식인 수식 (3)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\ddot{q}_a = M_{aa}^{-1}(\tau_a + d_a - M_{ap} \ddot{q}_p - F_a) \quad (9)$$

표 1. 퍼지 제어 규칙 기반  
Table 1. The rule base of fuzzy controller

$e_p$ / $\dot{e}_p$	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
PB	ZR	NS	NS	NM	NB	NB	NB
PM	PS	ZR	NS	NS	NM	NB	NB
PS	PS	PS	ZR	NS	NS	NM	NB
ZR	PM	PS	PS	ZR	NS	NS	NM
NS	PB	PM	PS	PS	ZR	NS	NS
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZR	NS
NB	PB	PB	PB	PM	PS	PS	ZR

동적 커플링을 이용하여 제어하는 수동관절 제어 외는 달리, 능동관절 변수,  $q_a$ 는 능동 관절의 구동기 출력인  $\tau_a$ 에 의하여 직접적인 제어를 할 수 있으므로 수동관절 제어에 비하여 보다 쉬운 문제가 된다. 수동관절과는 달리 능동관절의 제어는 수동관절의 제어가 종료되었을 때 이루어지므로, 수동관절의 브레이크에 의해 각속도 및 각가속도가 0이 된다.(즉,  $\dot{q}_p = \ddot{q}_p = 0$ ) 따라서, 수식 (9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ddot{q}_a = M_{aa}^{-1}\tau_a - M_{aa}^{-1}F_a + M_{aa}^{-1}d_a \quad (10)$$

$$= M_{aa}^{-1}\tau_a + H_a$$

이때,

$$H_a = -M_{aa}^{-1}(F_a - d_a)$$

한편, 추종 오차(tracking error)는,

$$e_a = q_a - q_{ad} \quad (\in R^n)$$

(단,  $q_{ad}$ 는 수동 관절의 제어 목표 값 벡터)

능동 관절의 슬라이딩 평면(Sliding surface)은 다음과 같이 정의한다.

$$s_a = \dot{e}_a + \Lambda_a e_a \in R^n$$

(단,  $\Lambda_a$ 는 positive definite 상수(constant) 이득 대각 행렬임.)

이때 능동 관절에 대한 슬라이딩 모드 제어기는 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_a = -K_a s_a + \Delta V_a \in R^n$$

(단,  $K_a$ 는 positive definite 상수(constant) 이득 대각 행렬임.)

능동관절의 제어에서도 위의 제어가 중  $\Delta V_a$ 항이 시스템의 불확실성 및 외란을 극복하는 입력이며, 일반적인 슬라이딩 모드 제어에서는 이 입력 성분이 채터링을 유발한다. 따라서 오차 및 오차의 변화를 퍼지 입력으로하는 퍼지제어기를 구성함으로써 채터링을 방지한다. 능동관절의 퍼지 제어기는 수동관절의 경우와 같은 개념으로 설계가 수행되며, 능동관절에 대한 입력용 퍼지 변수는 오차( $e_a$ )와 그의 미분에 해당하는  $\dot{e}_a$  등의 두 가지이며, 출력 퍼지 변수는 제어입력에서 외란 및 불확실성을 극복하는 항인  $\Delta V_a$ 이다. 퍼지 변수의 형태, 추론 방식, 제어 규칙 기반 등의 관련 사항에 대하여는 퍼지 변수가  $e_a, \dot{e}_a, \Delta V_a$ 이라는 것 외에는 수동관절의 경우와 동일하다.

#### 4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 3축(n=3)의 평면(Planar) 로봇에 대하여 수행되었는데, 이 때 그림 3과 같이 능동관절의 수는 2개(r=2)이고, 수동관절의 수는 1개(p=1)로 가정하였다. 수동관절은 좌표축 원점에 대해 바깥쪽에 위치하였으므로 수동관절 변수는  $q_3$ 로 지정하였다.

시뮬레이션 수행 시에 로봇 파라미터의 불확실성을 반영하기 위하여 파라미터의 공칭값은 실제 값의 70[%]로 지정하였으며 각 관절의 초기 치와 제어 목표치는 표 2와 같다. 그리고 링크의 길이는 모두 0.5[m]로, 링크의 질량은 모두 1[Kg]으로 가정하였다.

한편 제어에 사용되는 이득 행렬은 다음과 같이 정하였다.

$$K_p = 100, \Lambda_p = 15, R_p = 1, K_a = 3, \Lambda_a = 3$$

시뮬레이션 수행결과, 시스템의 불확실성이 있더라도 퍼지 슬라이딩 모드 제어 기법에 의하여 모든 관절은 각 초기 값으로부터 주어진 제어 목표 값으로 수렴하는 것을 그림 4에서 확인할 수가 있다. 특히 수동관절인 3번 관절은 능동관절인 1, 2 번 관절과의 동적 커플링에 의하여 제어가 되었는데, 0.518

수동 관절을 가진 로봇 매니플레이터를 위한 퍼지 슬라이딩 모드 기법을 이용한 제어기

표 2. 각 관절의 초기값 및 목표값  
Table 2. Initial value and final value of each joint

구분 관절변수	초기값 [deg.]	목표값 [deg.]	비고
$q_1(t)$	0	90	Active
$q_2(t)$	0	0	Active
$q_3(t)$	-90	0	Passive

[초]에 원하는 목표 값에 도달하여 브레이크에 의해서 고정되었다.

한편 출력의 떨림 현상인 채터링의 감소 현상을 확인하기 위해서는 위상 평면상에서 대표점이 어떻게 움직이는가를 고찰할 필요가 있는데, 이를 위해서 대표적으로 1번 관절의 위상 제어를 슬라이딩 모드 제어와 퍼지 슬라이딩 모드 제어 결과에 대해 각각 그림 5, 6에 나타내었다. 그림 5를 살펴보면, 초기부터 0.518[초]까지는 동적 커플링에 수동관절 제어 모드로서 S자 모양을 그리면서 대표점이 이동하다가, 이 제어모드가 종료하면 자신의 관절을 제어하기 위해 주어진 슬라이딩 라인을 따라가는 모드로 변형이 된다. 이때 슬라이딩 라인으로부터 대표점이 벗어날 때마다 다른 제어 입력이 급격한 변화를 가지고 인가되기 때문에 채터링이 발생하게 되는 데, 이것을 그림 5에서 확인할 수가 있다. (단, 그림 5에서 가로축은 오차( $e_a$ )축이며, 세로축은 오차의 미분( $\dot{e}_a$ )에 대한 축임.)

그러나, 퍼지 슬라이딩 모드 제어에서는 이 급격한 변화를 방지하는 특성이 있으므로 채터링이 줄어든 것을 그림 6에서 확인할 수가 있다. 그러나 수렴 속도의 측면에서 보면 채터링이 줄어든 만큼 대표점이 슬라이딩 라인에 수렴하는 속도가 늦어지고 있음을 알 수 있다. 이는 퍼지 제어가 채터링을 감소하기 위해 입력의 발생을 적절히 줄이고 있기 때문인데, 인가되는 전체 에너지가 줄어든 만큼 응답 속도가 늦어지는 것은 당연한 결과이다.

이런 방식으로 채터링이 감소하였다면 1번 관절의 구동기 출력 토크(Torque) 역시 줄어들게 되는 데, 실제 구동기의 출력은 항상 물리적인 토크 출력의 최대치(Maximum)에 의해 제한이 되어 있으므로 실

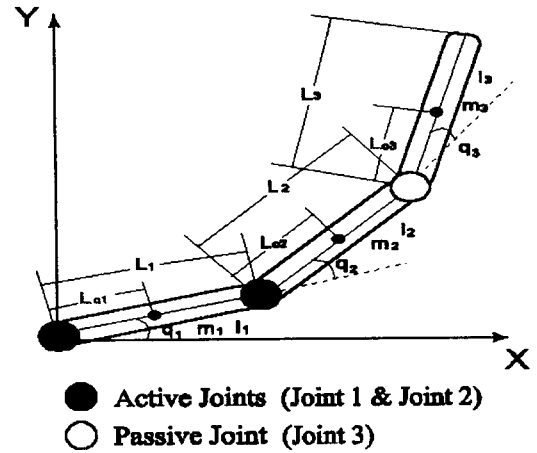


그림 3. 언더액츄에이티드 로봇 매니플레이터의 구성  
Fig. 3. The configuration of an underactuated robot manipulator

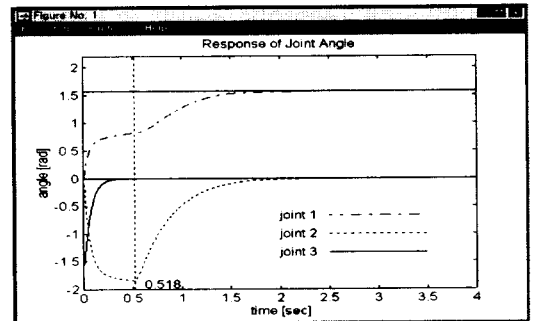


그림 4. 퍼지 슬라이딩 모드 제어에 의한 관절 응답  
Fig. 4. Joint Response by FSMC

제적인 적용에 있어서 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다. 그림 7은 슬라이딩 모드 제어 시에 1번 관절 구동기의 토크 출력이며 그림 8은 퍼지 슬라이딩 모드 제어의 토크 출력을 나타낸 것인데, 퍼지 슬라이딩 모드의 경우가 대략 30[%] 이내로 감소된 출력을 내고 있는 것을 알 수가 있다. 이와같은 경향은 다른 관절의 경우에도 동일하게 발견된다.

## 5. 결론

본 연구는 입력의 차수가 시스템의 차수보다 작은

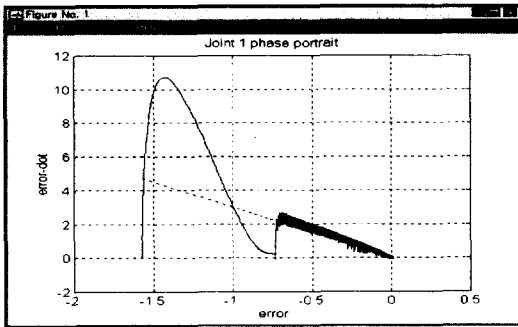


그림 5. 슬라이딩 모드 제어에 의한 관절 1의 위상궤적  
Fig. 5. Phase portrait (Joint1) by SMC

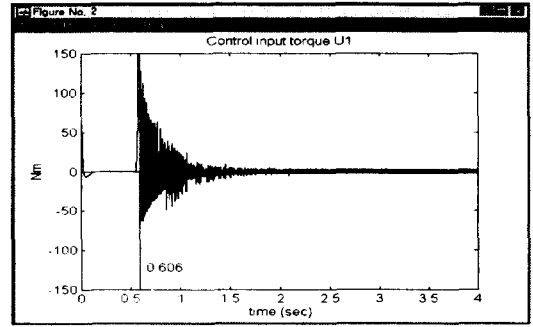


그림 7. 슬라이딩 모드 제어에 의한 관절 1에 가해지는 토크  
Fig. 7. Torque at Joint 1 by SMC

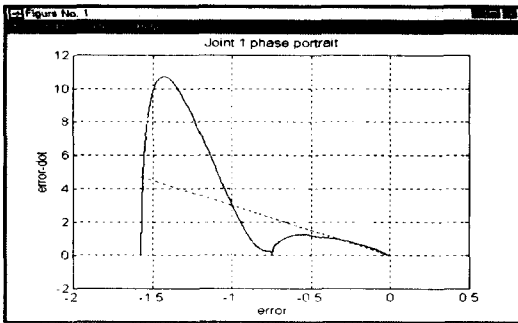


그림 6. 퍼지 슬라이딩 모드 제어에 의한 관절1의 위상궤적  
Fig. 6. Phase portrait (Joint1) by FSMC

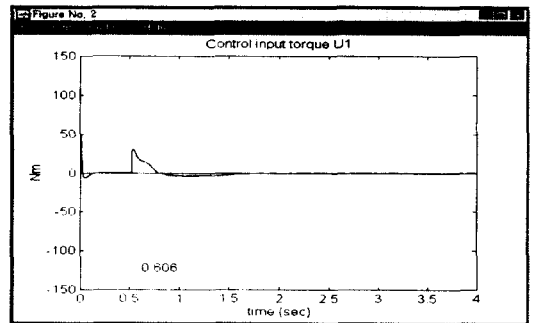


그림 8. 퍼지 슬라이딩 모드 제어에 의한 관절 1에 가해지는 토크  
Fig. 8. Torque at Joint 1 by FSMC

언더엑츠크에이티드 매니플레이터의 퍼지 슬라이딩 모드 제어에 대한 것으로서, 시스템의 파라미터의 불확실성 및 외란이 존재할 경우에도 이것을 극복할 수 있는 강인한 슬라이딩 모드 특성과 퍼지 제어기의 채터링 감소 효과를 동시에 얻기 위한 것이다. 여기서 수동관절은 능동관절과의 동적 커플링에 의하여 제어가 수행될 수가 있다. 한편 퍼지 제어기의 경우 정규화 변수를 조정함으로써 전체 퍼지 제어기 성능의 튜닝을 수행하였다.

총 3개의 축 중에서 1개의 수동관절을 갖는 언더엑츠크에이티드 매니플레이터에 대하여 퍼지 슬라이딩 모드 제어의 시뮬레이션을 수행하여, 3축 모두 원하는 각도로 제어가 됨을 확인하였으며, 특히 퍼지 제어기에 의하여 채터링이 감소하는 것을 확인하였다.

한편, 채터링 감소로 인하여 제어 입력 에너지가 감소하였으므로 시스템 출력의 수렴 속도가 일반적인 슬라이딩 모드 제어기에 비해 느려지는 특성이 있게 된다. 이 정도의 느려짐이 문제가 되지 않는 시스템에 있어서는 기존의 슬라이딩 모드 제어기에 비하여 최대 토크가 약 30% 정도인 작은 구동기를 가지고도 강인하고 채터링이 감소된 좋은 성능의 제어를 수행할 수 있다는 측면에서 연구 결과의 중요성을 찾을 수 있겠다.

퍼지 제어기는 수학적 모델에 그다지 구애받지 않고도 제어규칙을 전문가의 지식을 통해 신속하게 구성할 수 있다는 측면이 있으나, 안정도 판별 등의 분석적인 측면에서는 어려운 점이 있다. 따라서, 언더엑츠크에이티드 매니플레이터에 대한 퍼지 슬라이딩

수동 관절을 가진 로봇 매니퓰레이터를 위한 퍼지 슬라이딩 모드 기법을 이용한 제어기

모드 제어기의 안정도 분석은 추후 연구과제로 진행되어져야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H. Arai, S. Tachi, "Position Control of a Manipulator with Passive Joints Using Dynamic Coupling", IEEE Trans. Robot. Automat., Vol.7, No.4, pp. 528~534, August, 1991.
- [2] G. Oriolo and Y. Nakamura, "Free-joint manipulators: motion control under second order nonholonomic constraints", IEEE international Workshop on Intelligent robots and systems, pp 1248-1253, 1991.
- [3] E. Papadopoulos and S. Dubowsky, "Failure recovery control for space robotic systems", American Control Conference, Vol. 2, pp. 1485-1490, 1991.
- [4] M. Bergerman and Y. Xu, "Robust joint and Cartesian Control of Underactuated Manipulator", ASME, J. Dyn. Syst. Measure. Contr., vol. 118, no.3, pp.557~565, Sept., 1996.
- [5] J. Shin, J. Lee, "Robust Adaptive Control for Underactuated Robot Manipulators : Part I. Joints Space Control Using the Brakes at Passive Joints" submitted to IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1997.
- [6] D. Driankov et al, An Introduction to Fuzzy Control, Springer-Verlag, pp. 37~144, 1993.
- [7] C. Ting et al, "Fuzzy Sliding Mode Control of Nonlinear System", IEEE Int'l Conference on Fuzzy Systems, pp. 1620~1625, 1994.

#### ◆저자소개◆

##### 김 원(金元)

1967년 8월 13일생. 1986년~1990년 한국항공대학교 항공전자공학과 졸업. 1990년~1997년 국방과학연구소 연구원. 1997년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정.

##### 김민성(金汶省)

1974년 10월 27일생. 1993년~1997년 한양대학교 공과대학 전자공학과 졸업. 1997년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정.

##### 신진호(申鎭鎬)

1968년 12월 14일생. 1987년~1991년 한양대학교 공과대학 전자공학과 졸업. 1991년~1993년 한국 과학 기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1993년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사 과정 재학.

##### 이주장(李柱張)

1948년 11월 14일생. 1973년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1984년 Univ. of Wisconsin 졸업(박사). 1978~1979년 미국 G. T. E. Automatic Electric Co. Project Engineer. 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 부교수. 대한전기학회 로보틱스 및 자동화연구회 대전 지부장.