

로봇 매니플레이터를 위한 퍼지 이동 슬라이딩 모드 제어

Fuzzy Moving Sliding Mode Control for Robotic Manipulators

전 경 한, 최 봉 일
(Kyung Han Chun and Bong Yeol Choi)

Abstract : Recently, the study of the moving sliding mode in the variable structure control is in progress actively. The conventional time-invariant sliding mode control can't guarantee the sliding mode in the reaching phase, which is robust against the uncertainty. But with the time-varying method, the controller makes the states track the desired trajectories and keeps the sliding mode. Nevertheless, the piecewise continuous method of the past still has the reaching mode. Thus we propose the continuously moving sliding surface by the fuzzy algorithm. The proposed algorithm is made of the fuzzy rule considering both the error and the error velocity, and may apply to the entire phase plane without sacrificing sliding mode. Especially the proposed scheme can rotate to the slope-decreasing direction, needless to say rotating to the slope-increasing direction. For showing that the proposed controller guarantees the sliding mode and ensures the robustness, we apply the proposed method to the two-link robot manipulator simulation.

Keywords : fuzzy, moving sliding mode, robot manipulator

I. 서론

최근 슬라이딩 모드 제어가 광범위하게 적용되고 있다. 그중에서도 비선형 시스템의 경우 슬라이딩 모드 제어의 특성인 견실성으로 인해 불확실성에 대하여 강한 제어가 가능하다. 그러나 실제 제어하는 과정에서 도달 모드라는 견실성이 보장되지 않는 구간이 존재하여 이를 개선하기 위한 노력이 많이 이루어졌다. 빠른 시간내 슬라이딩 모드에 도달하기 위하여 도달 모드 입력을 증가시키면 슬라이딩 모드에서 채터링이 발생하고 반대의 경우엔 도달기간이 증가한다. 그러므로 이들을 동시에 고려, 개선하여야만 한다[1]-[3].

이동 슬라이딩 모드는 상태변수가 항상 슬라이딩 평면위에 있도록 슬라이딩 모드를 설계하여 견실성이 보장되고 채터링 또한 개선할 수 있다. Choi와 Park[4]는 기존의 슬라이딩 모드에 구간 연속적인 기법의 이동 슬라이딩 모드를 제안하여 제어기에 적용하였다. 그래서 견실성과 채터링을 개선하였으나 여전히 도달 모드가 존재함을 알 수 있다. 또한 Bartoszewicz[5]도 유사한 연속적인 이동 슬라이딩 모드를 제안하였다. 기울기와 절편을 일차 함수로 설정, 시간에 따른 슬라이딩 평면의 연속적인 변화를 이루었다. 한편 Ha[6]는 퍼지 논리를 이용한 연속적인 이동 슬라이딩 모드 제어를 제안하였다. 이는 구조적으로 위상평면에서 오차를 고려한 연속적인 형태의 이동 슬라이딩 모드이다. 그리고 연속적인 슬라이딩 평면 이동으로 인하여 견실성의 희생없이 채터링 현상을 개선하였다. 그러나 위상평면에서 오차만을 고려한 퍼지 이동 슬라이딩 모드였으며 회전이동의 경우 오차속도를 고려하지 않으므로 상태

변수의 위치에 따른 적절한 회전이동의 어려움이 있고 특히 사용된 퍼지 규칙은 기울기가 증가하는 방향으로의 이동만이 가능하다.

본 논문에서는 퍼지논리를 이용한 이동 슬라이딩 모드 제어를 제안한다. 제안한 이동 슬라이딩 모드 제어는 퍼지논리 구현시 오차와 오차속도를 입력으로 하는 새로운 퍼지규칙을 이용하며 이들의 크기와 위치를 고려하여 퍼지제어기를 설계한다. 오차와 오차속도를 퍼지추론을 통해 슬라이딩 평면위에서 이동하도록 하여 전 상태평면에 적용가능하고 도달 모드를 없앴으로써 견실성이 보장되는 새로운 퍼지규칙이며 특히 회전이동의 경우 기존에 기울기가 증가하는 방향뿐만 아니라 기울기가 감소하는 방향으로의 이동까지 가능한 이동 슬라이딩 모드이다. 제안한 알고리즘의 타당성을 비선형 로봇 매니플레이터에 적용하여 증명하며 견실성과 채터링의 감소를 보인다.

II. 퍼지 이동 슬라이딩 모드

가변구조 제어는 슬라이딩 모드에서 견실성이란 독특한 동특성을 가지지만 도달 모드에서 이러한 견실성이 보장되지 않는다. 이를 개선하기 위하여 슬라이딩 평면을 옮겨서 상태변수가 항상 슬라이딩 모드를 가지도록 퍼지 이동 슬라이딩 모드는 연속적으로 슬라이딩 평면을 이동한다. 그러므로 견실성을 보장하고 빠른 수렴특성을 나타낸다[6].

1. 시스템 및 슬라이딩 모드 정의

최근 가변구조 제어는 광범위한 분야에 적용되어왔다. 본 논문에서 고려하는 제어대상 시스템은 그 중에서도 많이 적용된 로봇 매니플레이터이다. 일반적으로 로봇 매니플레이터는 결합된 이차 비선형 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{2k-1}(t) &= x_{2k}(t) \\ \dot{x}_{2k}(t) &= f_k(\mathbf{x}, t) + b_k(\mathbf{x})u_k(t), \quad k=1,2,\dots,m \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{x}=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_{2m}(t)]^T \in R^{2m}$ 는 초기치 $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0)$ 인 상태벡터이며 모든 상태가 측정가능하고 $\mathbf{u} \in R^m$ 는 제어입력이며 $b_k(\mathbf{x}) > 0$ 는 제어이득이다. $f_k(\mathbf{x}, t), k=1,2,\dots,m$ 는 알려지지 않은 비선형 동특성으로 $\hat{f}_k(\mathbf{x}, t)$ 로 추정되며 $F_k(\mathbf{x}, t)$ 에 의해 다음과 같이 유계된다.

$$|f_k(\mathbf{x}, t) - \hat{f}_k(\mathbf{x}, t)| \leq F_k(\mathbf{x}, t) \quad (2)$$

그리고 추적코자하는 궤적을 $x^d = [x_1^d, x_2^d, \dots, x_{2m}^d]^T$ $t \in R^{2m}$ 이라하면 \mathbf{x}_0 에 대하여 다음과 같은 오차를 영으로 수렴토록 하는 제어기 설계가 제어목적이다.

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= [e_1(t), e_2(t), \dots, e_{2m}(t)]^T \\ &= [x_1(t) - x_1^d(t), x_2(t) - x_2^d(t), \\ &\quad \dots, x_{2m}(t) - x_{2m}^d(t)]^T \end{aligned} \quad (3)$$

일반적으로 가변구조 제어는 도달 모드와 슬라이딩 모드로 구성되어진다. 슬라이딩 모드에서 상태는 불확실성에 무관한 특성을 가지고 설계된 슬라이딩 평면에 따라 상태변수의 동특성이 정해진다. 전형적인 슬라이딩 함수는 다음과 같다.

$$S_k = e_{2k} + c_k e_{2k-1}, \quad c_k > 0 \quad (4)$$

이 슬라이딩 함수에 대하여 다음의 제어입력은 $\eta_k > 0$ 에 대하여 슬라이딩 조건 $S_k \dot{S}_k \leq -\eta_k |S_k|$ 을 만족한다.

$$u_k = b_k^{-1} [\hat{u}_k - (F_k(\mathbf{x}, t) + \eta_k) \text{sgn}(S_k)] \quad (5)$$

여기서 $\hat{u}_k = -\hat{f}_k(\mathbf{x}, t) + \dot{x}_{2k}^d - c_k e_{2k}$ 이다. 단, 도달 모드에서는 견실성이 보장되지 않으므로 Slotine and Li[7] 등은 오차 초기치를 0으로 보고 처음부터 슬라이딩 모드라고 간주하였다. 그러나 실제 초기치는 오차 상태공간에 임의적으로 놓여질 수 있으므로 견실성을 보장하고 빠른 추적성능을 위한 시변 슬라이딩 평면이 필요하였으며 Choi와 Park[4], Bartoszewicz[5] 등에 의해 제안되어졌다. 여기서도 구간 연속적인 방법으로 시변 슬라이딩 평면이 변하므로 도달 모드는 여전히 존재한다. 이를 개선하기 위하여 본 논문에서는 오차와 오차속도를 고려한 퍼지논리를 이용하여 슬라이딩 평면이 연속적으로 변하도록 제안한다.

2. 퍼지 이동 슬라이딩 모드

본 절에서는 오차와 오차속도를 함께 고려하여 퍼지 추론의 입력변수를 확장함으로써 오차와 오차속도가 임의의 위치에 있더라도 항상 슬라이딩 평면위에 존재하면서 상태변수가 영으로 수렴할 수 있도록 하는 퍼지 이동 슬라이딩 모드 제어를 제안한다. 사용하는 슬라이딩 함수는 다음과 같다.

$$S_k = e_{2k} + c_k e_{2k-1} + \alpha_k \quad (6)$$

슬라이딩 평면은 기울기 c_k 와 절편 α_k 의 변화에 따라 이동하게 되는데 1, 3사분면에서는 절편에 의한 이동을, 2, 4사분면에서는 기울기에 의한 회전이동을 하여 원하는 슬라이딩 평면으로 천이하도록 설계한다. 우선 2, 4사분면에서 기울기에 의한 회전이동은 다음과 같다.

경우 1 : 슬라이딩 평면의 회전이동이 이루어지는 경우
 우선 상태 평면에서 상태 변수가 2, 4사분면에 있을 경우 회전을 이용, 슬라이딩 평면을 이동하면 항상 슬라이딩 모드를 가지면서 견실성이 보장된다. 회전의 경우 그 형태는 그림 1과 같이 두 가지가 있을 수 있으며 원점을 지나므로 α_k 는 영이다. c_k 를 퍼지추론하기 위한 언어적 규칙을 찾기 위해서는 슬라이딩 평면의 기울기와 시스템 상태와의 특성을 고려해야 한다. 기울기가 큰 값을 가지면 수렴속도는 빨라지지만, 도달 모드 구간이 길기 때문에 견실성이 떨어질 수 있고, 반대로 기울기가 작은 값을 가지면 도달 모드 구간은 줄지만 수렴속도가 느려진다. 여기서 도달 모드 구간은 기울기가 작은 임의의 초기 상태가 기울기가 큰 최종 슬라이딩 평면위로 천이되기까지의 기간으로 예를 들었으며 도달 모드 구간은 감소하도록 퍼지규칙을 설계한다. 또한 오차속도를 고려하여 상태변수의 위치에 따라서 기울기가 증가하는 경우와 감소하는 경우를 모두 고려하여야 한다. 회전이동에 대한 경우 위의 사항을 고려하고 오차와 오차속도의 전체 상태평면에 대하여 제안하는 새로운 퍼지규칙은 표 1과 같다.

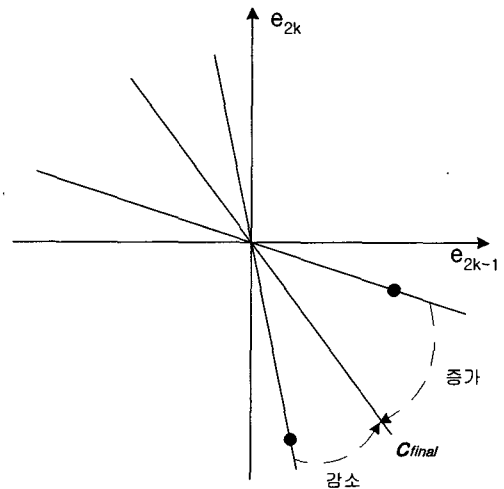


그림 1. 슬라이딩 평면의 회전이동.
 Fig. 1. Rotation of the sliding surface.

여기서 P는 Positive, N은 Negative를 나타낸다. S는 Small, M은 Medium, L은 Large, VL은 Very Large를 나타내고 ZR은 Zero이다, 그리고 F는 Final을 나타낸다. 퍼지규칙은 상태변수가 항상 슬라이딩 평면위에 있도록 위상평면에 위치에 따라 결정되며 실제 이동하

표 1. 기울기에 대한 퍼지규칙.

Table 1. Fuzzy rules for the slope.

$e_{2k-1} \backslash e_{2k}$	NL	NS	ZR	PS	PL
PVL	L	ML	F	F	F
PL	L	ML	F	F	F
PM	S	MS	F	F	F
PS	S	MS	F	F	F
ZR	S	MS	F	MS	S
NS	F	F	F	MS	S
NM	F	F	F	MS	S
NL	F	F	F	ML	L
NVL	F	F	F	ML	L

는 기울기를 고려하여 결정하였다. 다만 1, 3사분면에서는 절편에 의한 이동만 있으므로 이 때 기울기는 원하는 슬라이딩 평면으로 정한다.

입력에 사용한 오차에 대한 멤버십 함수는 그림 2와 같다.

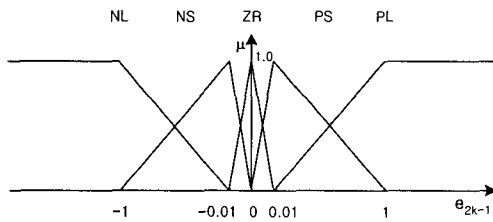


그림 2. 오차에 대한 멤버십 함수.

Fig. 2. Membership functions of the error.

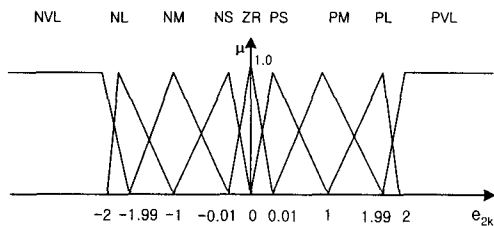


그림 3. 오차속도에 대한 멤버십 함수.

Fig. 3. Membership functions of the error velocity.

오차속도에 대한 멤버십 함수는 그림 3과 같다.

퍼지규칙의 출력인 슬라이딩 평면 기울기의 경우 멤버십 함수는 이동변 삼각형 형태이며 그림 4와 같다. 이 경우에도 슬라이딩 모드를 유지하면서 원하는 슬라이딩 평면의 기울기인 C_{final} 까지 이동하도록 멤버십 함수를 설계한다. 단 S, L은 F와 동일하고 각 멤버십 함수가 겹치도록 밀변의 반이 S, F, L 중심간격의 2가 되게 설계한다.

그림 4에서 C_{final} 은 원하는 슬라이딩 평면의 기울기 값이며 C_s , C_l 은 항상 슬라이딩 모드가 되도록

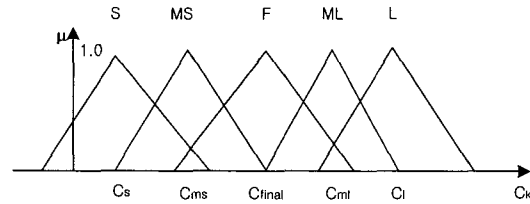


그림 4. 기울기에 대한 멤버십 함수.

Fig. 4. Membership function of the slope.

적절히 선택한다. 그리고 C_{ms} , C_{ml} 은 계산에 의해 다음과 같이 구한다.

$$C_{ms} = \frac{C_s + C_{final}}{2}, C_{ml} = \frac{C_{final} + C_l}{2} \quad (7)$$

제한한 퍼지 이동 슬라이딩 모드 제어는 오차와 오차속도를 고려하여 설계하여 전 상태평면에 적용가능하며 특히 회전이동의 경우 제안한 퍼지규칙에 의해 기울기가 감소, 증가하는 경우 모두에 대해서 적용가능하다.

경우 2: 슬라이딩 평면의 절편이 필요한 경우

1, 3사분면에서 상태변수는 절편에 의한 이동을 한다. 그림 5는 절편이 있는 슬라이딩 평면에서 상태변수의 이동을 보여준다.

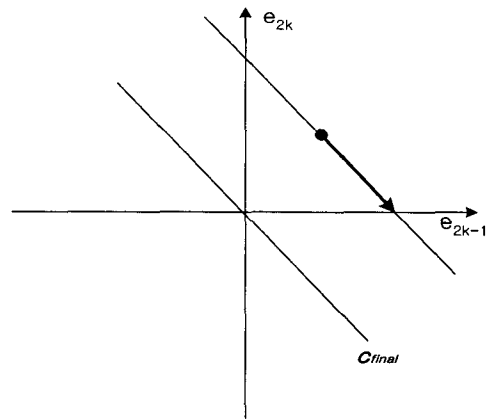


그림 5. 슬라이딩 평면에 절편이 필요한 경우.

Fig. 5. The case of the sliding surface requiring the intercept.

이때 절편 α_k 는 다음과 같다.

$$\alpha_k = -(e_{2k}(0) + c_k e_{2k-1}(0)) \quad (8)$$

(8)에 의해 상태는 처음부터 슬라이딩 평면위에 있게 되며 1사분면의 경우 슬라이딩 평면위에서는 오차속도가 양의 값이므로 오차는 증가하게 되고 그림 5와 같이 슬라이딩 평면위를 이동한다. 이동전까지 기울기는 C_{final} 이며 2, 4사분면으로 이동한 후 α_k 는 영이다. 이동후엔 퍼지 이동 슬라이딩 모드를 이용하여서 회전

이동하여 원하는 슬라이딩 평면에 도달하게 된다. 그러므로 항상 슬라이딩 모드를 유지하며 견실성이 보장된다.

이상을 조합하여 퍼지 이동 슬라이딩 모드에 의한 제어 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

단계 1 : 퍼지추론을 위해 입력변수를 소속함수의 적절한 위치로 조정, 퍼지규칙 적용을 위한 조정계수가 요구된다. 즉 실제 입력변수는 $e_{2k-1}(t)/\sigma_{2k-1}$ 과 $e_{2k}(t)/\sigma_{2k}$ 이며 사용자가 σ_{2k-1} 과 σ_{2k} 를 결정한다.

단계 2 : 출력변수의 $C_s, C_{ms}, C_{final}, C_{ml}, C_{ms}$ 와 절편 α_k 값을 결정한다. C_s, C_{ms} 는 슬라이딩 평면의 회전이동이 시작될 때 상태변수가 슬라이딩 평면 위에 존재하도록 선택하며, C_{final} 는 최종 슬라이딩 평면의 기울기로 결정하고, C_{ms}, C_{ml} 은 (7)에 의해 결정한다. α_k 는 경우 2에 따른다.

단계 3 : 입력 변수 $e_{2k-1}(t)$ 와 $e_{2k}(t)$ 에 대한 퍼지추론을 통해 출력변수 $c_k(t)$ 를 결정한다. 이 때 사용한 퍼지추론 방법은 max-min이며 비퍼지화는 무게중심법(COG)를 사용하였다.

단계 4 : 슬라이딩 함수 $S_k(t)$ 에 대해 제어입력 (5)를 구하여 적용한다.

제어입력에서 불확실성을 보상하기 위한 불연속 제어입력으로 인한 채터링이 발생한다. 이는 퍼지 이동 슬라이딩 모드 제어와는 무관하면 단지 불확실성에 기인한 것이다. 이를 개선하기 위하여 Slotine and Sastry[3]은 유계치를 이용하였으며 이는 퍼지추론으로 근사화할 수 있다. 부호함수를 근사화하면 다음과 같다 [6].

$$Y = \tanh(s_k) \tag{9}$$

여기서 $s_k = S_k/\sigma_{sk}$ 이며 σ_{sk} 는 양수이다.

III 모의실험

제안한 퍼지 이동 슬라이딩 제어기의 성능을 보이기 위하여 Ha에 사용된 2자유도 로봇 매니플레이터의 추적제어를 모의실험하였다[6].

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= [\mu x_1 + M(x_1 + a)]x_2^2 / (\mu + M) \\ &\quad + [u_1(t) + d_1(t)] / (\mu + M) \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \{-2[\mu x_1 + M(x_1 + a)]x_2 x_4 + u_2(t) \\ &\quad + d_2(t)\} / [J_1 + J_2 + \mu x_1^2 + M(x_1 + a)^2] \end{aligned} \tag{10}$$

그림 6에 사용한 로봇 매니플레이터가 있으며 μ 와 M 은 링크의 질량과 부하의 질량이며 J_1 과 J_2 는 각각 링크의 질량 중심 C 와 원점 0에 대한 링크의 관성 모멘트이다. a 는 원점으로부터 C 까지의 거리이며 u_1 과 u_2 는 각각 동작을 실행하는데 필요한 힘과 토크이

다. 그리고 $d_i(t)$ 는 알려지지 않은 외란으로 $|d_i(t)| \leq \delta_i, i=1,2$ 이다. (10)을 (1)과 비교하면 다음과 같다.

$$f_1 = \{[\mu x_1 + M(x_1 + a)]x_2^2 + d_1(t)\} / (\mu + M) \tag{11}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= 1/(\mu + M) \\ f_2 &= \{-2[\mu x_1 + M(x_1 + a)]x_2 x_4 + d_2(t)\} \\ &\quad / [J_1 + J_2 + \mu x_1^2 + M(x_1 + a)^2] \\ b_2 &= 1/[J_1 + J_2 + \mu x_1^2 + M(x_1 + a)^2] \end{aligned}$$

그러므로 비선형 동특성의 추정치는

$$\begin{aligned} \hat{f}_1 &= [\mu x_1 + M(x_1 + a)]x_2^2 / (\mu + M) \\ \hat{f}_2 &= -2[\mu x_1 + M(x_1 + a)]x_2 x_4 \\ &\quad / [J_1 + J_2 + \mu x_1^2 + M(x_1 + a)^2] \end{aligned} \tag{12}$$

이고 유계치는 다음과 같다.

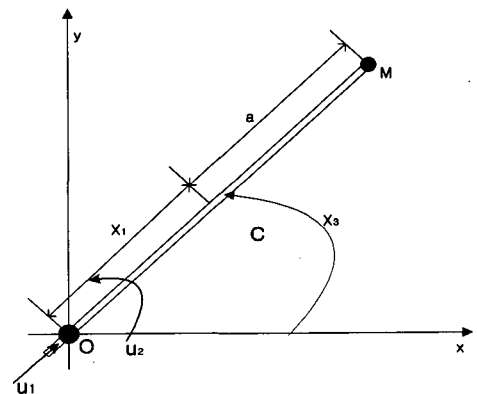


그림 6. 2 자유도 로봇 매니플레이터.

Fig. 6. Two-link robot manipulator.

$$\begin{aligned} |f_1 - \hat{f}_1| &= |d_1/(\mu + M)| \\ &\leq \delta_1/(\mu + M) = F_1 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} |f_2 - \hat{f}_2| &= |d_2/[J_1 + J_2 + \mu x_1^2 + M(x_1 + a)^2]| \\ &\leq \delta_2/(J_1 + J_2) = F_2 \end{aligned}$$

원하는 궤적은

$$x_1^d(t) = \begin{cases} -0.75 \sin(\pi/20), & 0 \leq t \leq 10 \\ -0.75, & t \geq 10 \end{cases} \tag{14}$$

$$x_3^d(t) = \begin{cases} 2\pi \sin(\pi/20), & 0 \leq t \leq 10 \\ 2\pi, & t \geq 10 \end{cases}$$

이다. 결과적으로 원하는 end-point 궤적은 다음과 같이 원형궤적을 그린다.

$$X(t) = (x_1^d(t) + a) \cos(x_3^d(t)) \tag{15}$$

$$Y(t) = (x_1^d(t) + a) \sin(x_3^d(t))$$

모의 실험에 사용한 매개변수 값들은 다음과 같다.

$$\mu = M = 1\text{kg}, J_1 = J_2 = 1\text{kgm}^2, a = 1\text{m},$$

$$d_1(t) = 0.2\cos(5\pi t)\text{N}, \quad (16)$$

$$d_2(t) = 0.5\cos(5\pi t)\text{Nm}, \delta_1 = 0.2, \delta_2 = 0.5$$

퍼지에 사용한 출력 조정 계수는 1이며 입력 조정 계수는 입력에 따라 제안한 퍼지규칙의 적용을 고려하여 적절히 선택하였다. $\sigma_1 = 0.1592, \sigma_2 = 1$ 를 사용하였으며 σ_3, σ_4 은 다음에 고려한 경우 1, 2, 3에 따라서 각각 $\sigma_3 = 0.349, 0.1745, 0.349, \sigma_4 = 1, 2.443, 0.3839$ 이다. 제안한 퍼지 이동 슬라이딩 모드를 실험하기 위하여 세가지 경우를 고려하였다. 우선 상태변수 초기치는 다음과 같이 회전이동과 평행이동을 나타내기 위하여 e_1, e_2 는 3사분면에, e_3, e_4 는 4사분면에 각각 있도록 설정하였다[6].

$$[x_1(0), x_2(0), x_3(0), x_4(0)]^T$$

$$= [-0.15, -0.2, 0.349, 0.987]^T \quad (17)$$

두번째의 경우 $x_4(0) = -1.456$ 으로 오차와 오차속도가 존재하는 경우이며, 세번째의 경우 $x_4(0) = -2.852$ 이고 회전이동에서 기울기가 감소하는 경우이다. 단 두, 세번째의 나머지 초기치는 첫번째와 동일하다. 세가지 경우를 e_3, e_4 의 위상평면인 그림 7에 나타내었다.

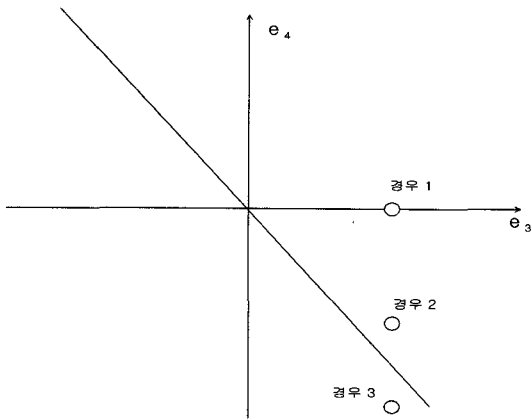


그림 7. 사용한 초기치들.
Fig. 7. Used initial values.

Ha와 비교하기 위하여 C_{final} 를 9로 동일하게 설정하여 모의실험하였다. 우선 경우 1의 모의 실험 결과로 그림 9에 기존의 Ha에 존재하였던 도달 모드가 개선되었음을 그림 8을 통하여 알 수 있다. 그림 10, 11에서는 도달 제어입력의 불연속성을 연속화(퍼지화)하여 채터링이 개선됨을 알 수 있다. 다음으로 경우 2는 제안한 알고리즘을 전체 상태평면에 적용가능함을 보이기 위한 실험이다. 그림 13에 Ha의 방법에서 나타난 도

달 모드를 그림 12에서 제안한 제어법칙은 슬라이딩 모드를 지속적으로 유지하며 그림 14, 15에서 Ha의

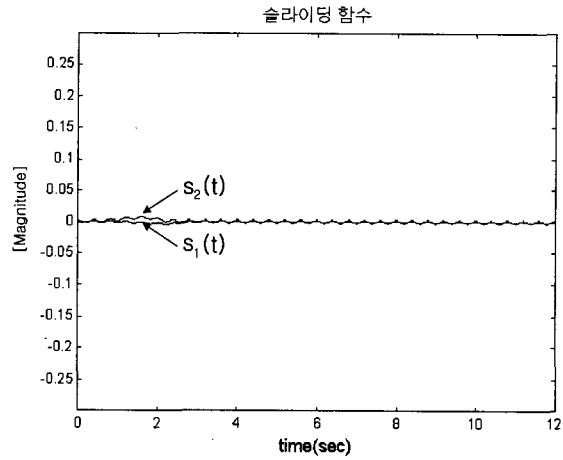


그림 8. 슬라이딩 함수(제안한 방법:경우 1).
Fig. 8. Sliding function(proposed method:case 1).

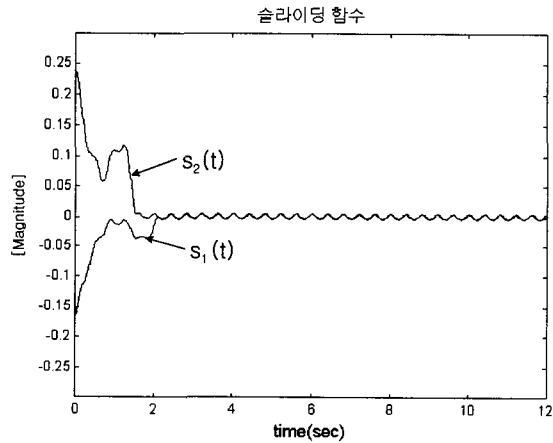


그림 9. 슬라이딩 함수(Ha의 방법:경우 1).
Fig. 9. Sliding function(Ha's method:case 1).

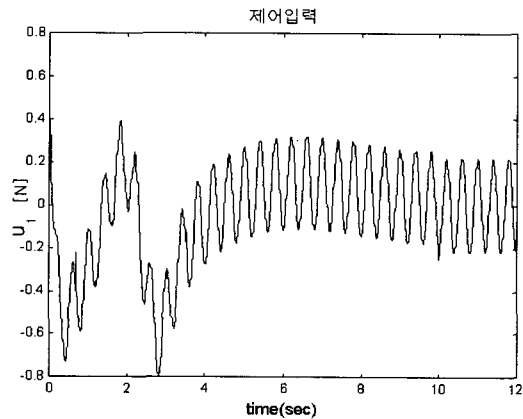


그림 10. 제어입력 1.
Fig. 10. Control input.

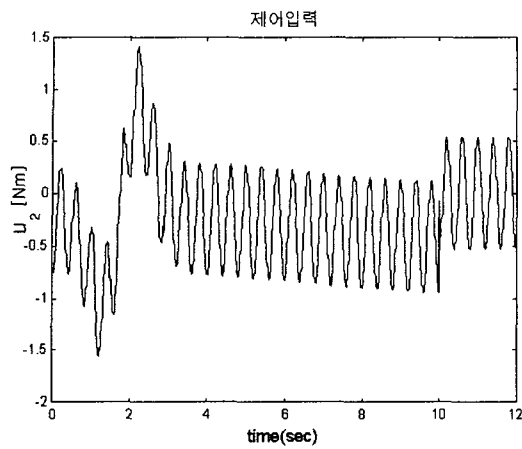


그림 11. 제어입력 2.
Fig. 11. Control input 2.

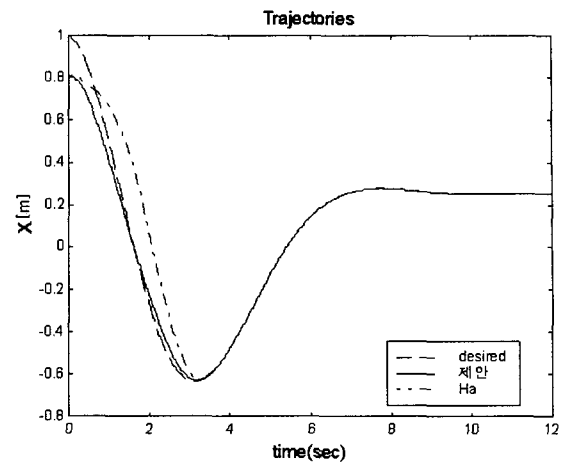


그림 14. 엔드 포인트 궤적 x (경우 2).
Fig. 14. The trajectories of the end point x (case 2).

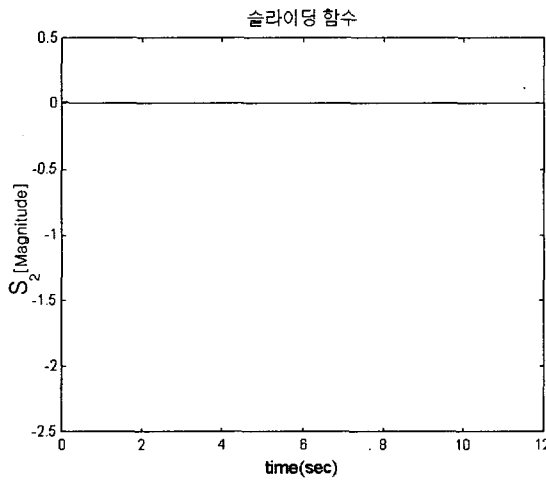


그림 12. 슬라이딩 함수 S_2 (제안한 방법:경우 2).
Fig. 12. Sliding function S_2 (proposed method:case 2).

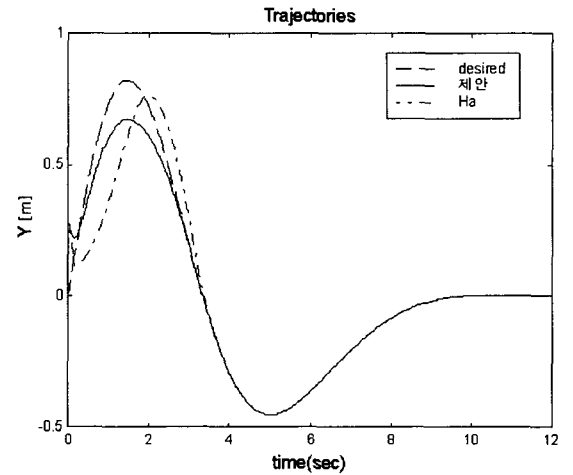


그림 15. 엔드 포인트 궤적 Y (경우 2).
Fig. 15. The trajectories of the end point Y (case 2).

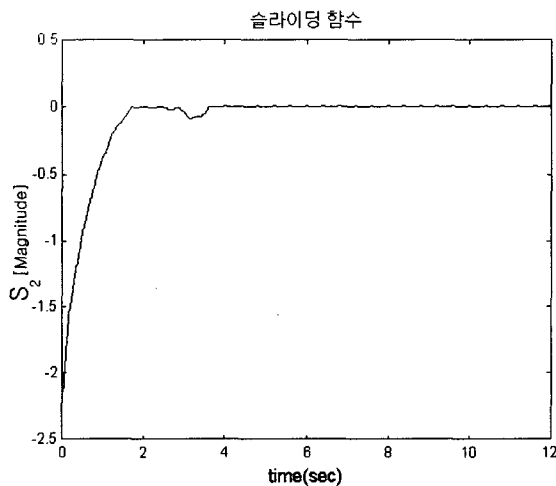


그림 13. 슬라이딩 함수 S_2 (Ha의 방법:경우 2).
Fig. 13. Sliding function S_2 (Ha's method:case 2).

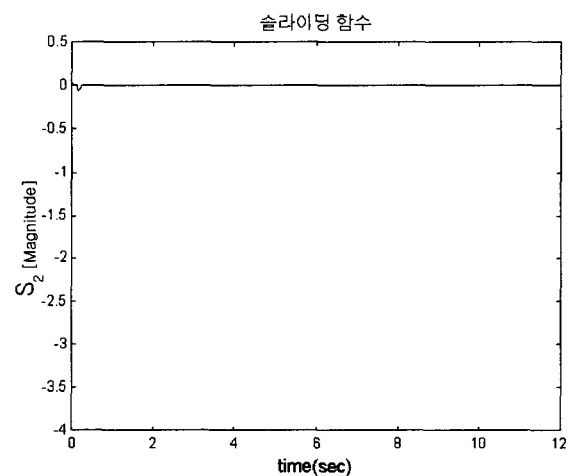


그림 16. 슬라이딩 함수 S_2 (제안한 방법:경우 3).
Fig. 16. Sliding function S_2 (proposed method:case 3).

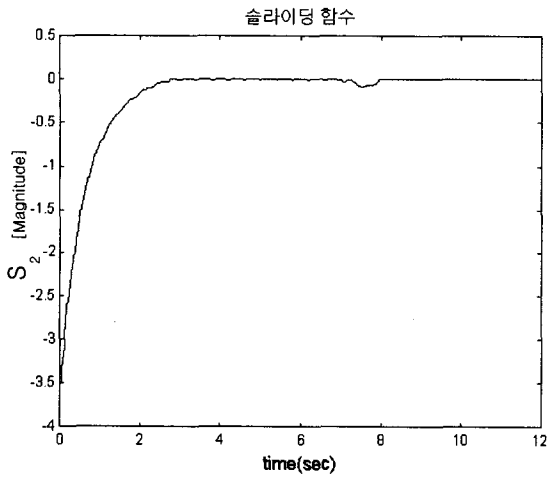


그림 17. 슬라이딩 함수 S_2 (Ha의 방법:경우 3).
Fig. 17. Sliding function S_2 (Ha's method:case 3).

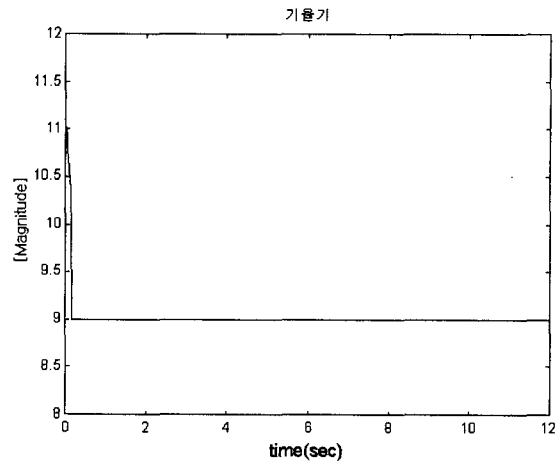


그림 20. 기울기 변화(경우 3).
Fig. 20. The variation of the slope(case 3).

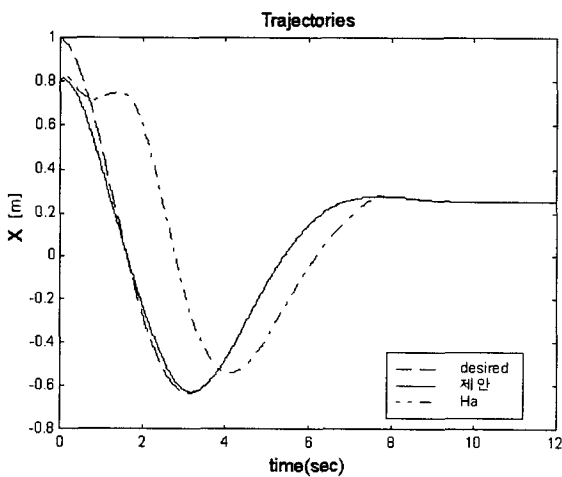


그림 18. 엔드 포인트 궤적 x (경우 3).
Fig. 18. The trajectories of the end point x (case 3).

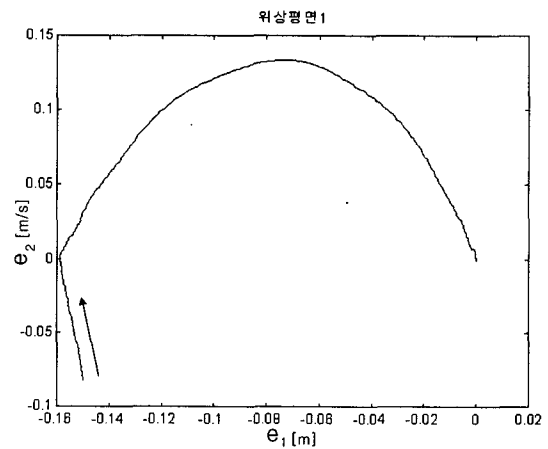


그림 21. 절편에 의한 이동(e_1, e_2).
Fig. 21. The transition by interceptor(e_1, e_2).

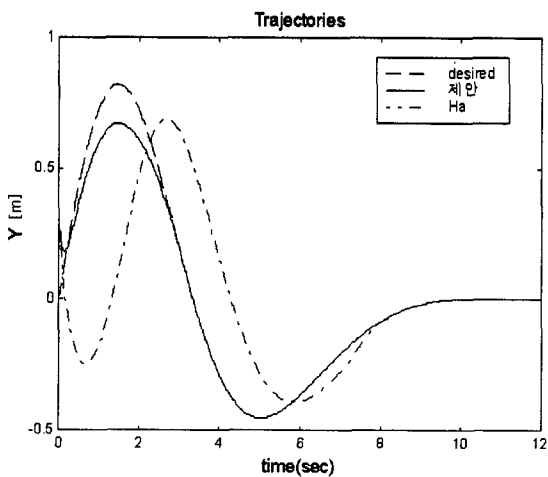


그림 19. 엔드 포인트 궤적 y (경우 3).
Fig. 19. The trajectories of the end point y (case 3).

방법보다 빠르게 원하는 궤적을 추적함을 알 수 있다. 마지막으로 경우 3은 기울기가 감소하는 방향으로의 회전이동을 보여주는 실험이다. 그림 16-19에서 경우 2와 마찬가지로 도달 모드를 개선하며 빠른 추적성능을 나타낸다. 감소하는 방향으로의 이동을 보여주기 위해 기울기의 변화를 그림 20에 도시하였다. 그리고 절편에 의한 이동을 보이기 위하여 3사분면에 초기치가 위치한 e_1, e_2 에 대한 실험 결과를 그림 21에 나타내었으며 3사분면에서 절편에 의해 2사분면으로 이동한 후 회전이동알고리즘에 의해 원점으로 수렴함을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 퍼지 이동 슬라이딩 모드에 대하여 제안하였다. 기존의 가변 구조 제어는 슬라이딩 모드에서 건설성이 보장되나 도달 모드에선 건설성이 보장되지 않으므로 최근 이를 이동 슬라이딩 모드로 개선

하였다. 한편 퍼지 이동 슬라이딩 모드가 제안되어 연속적인 슬라이딩 평면의 변화로 도달 모드를 개선하였지만 오차만을 고려하여 전체 상태평면에 적용이 어려웠다. 또한 기존의 퍼지규칙은 회전이동에서 기울기가 감소하는 방향으로의 적용이 쉽지 않았다. 본 논문에서는 오차와 오차속도를 고려한 확장된 퍼지 이동 슬라이딩 모드를 제안하여 전 상태평면에 적용가능하고 상태변수가 항상 슬라이딩 모드에 있으며 회전이동시 기울기가 증가, 감소하는 방향이 모두 가능하다. 마지막으로 비선형 로봇 매니퓰레이터에 적용하여 제안한 제어기가 항상 슬라이딩 모드에 있으며 오차가 영으로 수렴함을 보였다.

참고문헌

- [1] C. M. Dorling and A. S. I. Zinober, "Two approaches to hyperplane design in multi variable structure control systems," *Int. J. of Control*, vol. 44, pp. 65-82, 1986.
- [2] J. J. Lee and Y. Xu, "A new method of switching surface design for multi variable structure systems," *IEEE Trans. on Automat. Contr.*, vol. 39, pp. 414-419, 1994.
- [3] J. J. Slotine and S. S. Sastry, "Tracking control of non-linear systems using sliding surfaces with application to robot manipulators," *Int. J. of Control*, vol. 35, pp. 1345-1350, 1983.
- [4] S. B. Choi, D. W. Park, and S. Jayasuriya, "A time-varying sliding surface for fast tracking control of second-order uncertain systems," *Automatica*, vol. 30, pp. 899-904, 1994.
- [5] A. Bartoszewicz, "A comment on 'A time-varying sliding surfaces for fast and robust tracking control of second-order uncertain systems'," *Automatica*, vol. 31, no. 12, pp. 1893-1895, 1995.
- [6] Q. P. Ha, D. C. Rye, and H. F. Durrant-Whyte, "Fuzzy moving sliding mode control with application to robotic manipulators," *Automatica*, vol. 34, pp. 607-616, 1999.
- [7] J. J. Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control*, Englewood Cliffs. NJ: Preantice-Hall, 1991.



전 경 한

1968년 10월 3일생. 1991년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1993년 2월 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1993년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 가변구조 제어, 퍼지 제어.



최 봉 열

1961년 5월 20일생. 1983년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1985년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1993년 2월 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1985년~현재 경북대학교 재직. 현 경북대학교 전자전기공학부 부교수. 관심분야는 가변구조 제어, 적응제어.