채터링 감소를 위한 퍼지 슬라이딩모드 제어

Fuzzy-Sliding Mode Control for Chattering Reduction

이 태 경, 한 종 길, 함 운 철
(Tae-Kyoung Lee, Jong-Kil Han, and Woon-Chul Ham)

Abstract : This paper presents a new method with time-varying boundary layer and input gain, variated by Fuzzy Logic Control(FLC) by means of the system state in Sliding Mode Control(SMC). In addition to the time-varying boundary layer, the time-varying range of the fuzzy membership function has an effect on not only chattering reduction but also fast response characteristics. On the basis of SMC with time-varying boundary and FLC with time-varying input and output range, a computer simulation for inverted pendulum results in elimination of the chattering phenomenon and fast response.

Keywords : sliding mode control, fuzzy logic control, time-varying boundary layer, chattering reduction

I. 서론

슬라이딩모드 제어는 시스템의 불확실성과 외란에 대해 강인한 특성을 가지고 있기 때문에 최근에 많은 제어 분야에 적용되고 있다. 슬라이딩모드 제어의 기본적인 개념은 가변 제어 구조를 가진 제어 법칙을 정하고, 시스템의 상태 궤적이 특정한 평면(슬라이딩 평면)에 도달되도록 하는 것이다[1][2]. 그렇지만 실제 적용에 있어서는 스위칭평면에서 제어 입력의 불연속적인 스위칭으로 인해 채터링 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상은 고주파 특성을 포함하고 있는 시스템 제어시 고주파 동력학을 유발할 수 있기 때문에 바람직하지 못하다.

이러한 채터링을 감소시키기 위해 불연속적 스위칭함수인 $sgn(\cdot)$대신 시불변인 고정 경계층을 갖는 $sat(\cdot)$가 적용되어 왔으며[3][4][5], 퍼지제어나 적응 퍼지제어를 슬라이딩모드에 적용[5]-[8]하여 상태에 따라 경계층을 변화시키는 연구 또한 진행되어 왔다.

본 논문에서는 상태에 따라 경계층을 변화시키는 기존의 방법을 응용하여 슬라이딩모드 제어에 퍼지 논리를 적용한 새로운 퍼지슬라이딩모드 제어이론을 제안한다. 일반적인 퍼지제어기에는 입력으로써 상태 오차 $e(t)$와 오차의 변화분 $\dot{e}(t)$을 이용하고, 고정된 퍼지 입출력 대집합에 대해 퍼지 제어규칙을 만들지만[5][7], 본 논문에서 제안한 제어이론은 경계층을 고려한 슬라이딩모드 제어이기 때문에 퍼지제어기의 입력으로써 슬라이딩 평면 s와 슬라이딩 평면의 변화분 $\dot{s}$을 설정하고, 퍼지입력과 출력의 대집합으로써 고정된 상수값을 사용하지 않고,

시변 경계층 $\phi(t)$와 경계층의 변화분 $\dot{\phi}(t)$을 이용하여 제어 규칙을 만든다. 또한 퍼지제어기의 출력에 따라 입력 대집합인 경계층, 경계층의 변화분과 출력 대집합인 입력이득 $\hat{k}(x,t)$의 변화를 통해 시스템의 채터링 현상을 감소시킬 뿐만 아니라 상태추적 성능을 향상시키고, 파라미터의 변화와 외란에 대해서도 강인한 특성을 갖도록 한다. 그림 1은 본 논문에서 설계한 퍼지슬라이딩모드 제어기에 대한 블럭도이다.

본 논문의 Ⅱ장에서는 채터링 현상을 줄이기 위해 고정된 시불변 경계층을 가진 슬라이딩모드 제어의 일반적인 개요를 설명하고 있으며, Ⅲ-1절에서는 시변 경계층을 고려했을 때의 기존의 여러 논문의 접근방법을 분석·전개하였고, Ⅲ-2절에서는 새로운 퍼지 제어기를 설계하였다. Ⅳ장에서는 간략화 한 2차의 Inverted Pendulum (도립진자)에 대해 본 논문에서 제안한 퍼지 슬라이딩모드 제어기를 적용하여 시뮬레이션 하였다.

II. 일반적인 슬라이딩모드 제어

본 장에서는 시불변 경계층을 고려한 일반적인 슬라이딩모드 제어 방법을 소개한다.

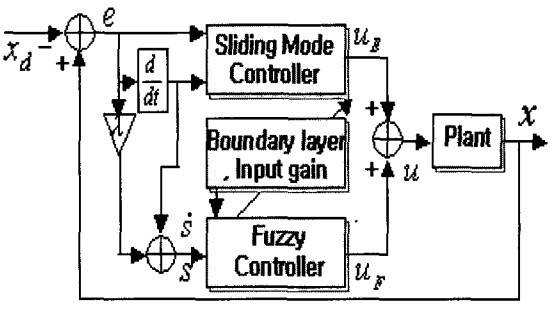


그림 1. 퍼지슬라이딩모드제어 블록도.
Fig. 1. Block diagram of fuzzy sliding mode control.

다음과 같은 2차 시스템을 고려하자.

$$\dot{x} = f(x,t) + u(t) + d(t) \tag{1}$$

접수일자 : 2000. 8. 29., 수정완료 : 2001. 2. 1.
이태경 : (주)케피코(dreamlth@conlab.chonbuk.ac.kr)
한종길 : 한려대학교 멀티미디어정보통신공학과(han@hlu.hanlyo.ac.kr)
함운철 : 전북대학교 전자정보공학부(wcham@moak.chonbuk.ac.kr)
※ 이 논문은 과학기술부·한국과학재단 지정·전라북도 지원 우수 지역협력연구센터인 전북대학교 메카트로닉스연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

여기서 $f(x,t)$는 미지의 함수이고 $\hat{f}(x,t)$는 외란이 없을 경우 $f(x,t)$의 추정 가능한 비선형 동역학식이고, $u(t)$는 제어 입력이며 $d(t)$는 외란, $x_d(t)$는 추적하고자 하는 상태 궤적이다. $d(t)$와 $f(x,t)$의 추정 오차는 다음 식과 같이 각각 한정되어 있다고 가정한다.

$$|d(t)| \le D(t), \quad \triangle f(x,t) = |\hat{f}(x,t) - f(x,t)| \le F(x,t) \quad (2)$$

$D(t)$와 $F(x,t)$는 알고있는 양의 함수라 가정한다.

2차 시스템의 안정한 슬라이딩모드 제어를 위한 상태공간 R^2에서 표현되는 슬라이딩 평면을 다음과 같이 설정한다[1].

$$s(t) = (\frac{d}{dt} + \lambda)e(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t), \quad \lambda > 0 \quad (3)$$

여기에서 상태오차 $e(t) = x(t) - x_d(t)$이며, λ는 양의 상수이다.

$f(x,t)$의 불확실성의 존재 하에서 상태 $x_d(t)$를 추적하게 하는 제어 입력은 다음의 슬라이딩 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}s(t)^2 \le -\eta|s(t)|, \quad \eta > 0 \quad (4)$$

외란이 없다는 가정 하에 추정 동력학식 $\hat{f}(x,t)$를 이용하여 $\dot{s} = \ddot{x} - \ddot{x}_d + \lambda\dot{e} = 0$ 이 되도록 하는 등가제어 입력 $u_E(t)$ 를 구하면

$$u_E = \ddot{x}_d(t) - \lambda\dot{e}(t) - \hat{f}(x,t) \quad (5)$$

가 된다.

먼저 슬라이딩모드 제어에 채터링을 감소시키기 위해서 고정된 경계층을 고려하고, $sgn(\cdot)$대신 $sat(\cdot)$를 적용하여 (4)의 슬라이딩 조건을 만족시키는 제어 법칙을 정의하면 다음과 같다.

$$u(t) = u_E(t) - k(x,t)\, sat(s(t)/\Phi) \quad (6)$$

여기서 $sat(s(t)/\Phi)$는

$$sat(s(t)/\Phi) = \begin{pmatrix} s(t)/\Phi & \text{if } |s(t)/\Phi| \le 1 \\ sgn(s(t)/\Phi) & \text{otherwise} \end{pmatrix} \quad (7)$$

이고, Φ는 고정된 경계층 폭이며 양의 함수 $k(x,t)$는 다음과 같은 부등식을 만족하는 입력이득이다.

$$k(x,t) \ge F(x,t) + \eta + D(t) \quad (8)$$

제어법칙 (6)이 슬라이딩 조건 (4)를 만족하는 증명은 참고문헌[9]에서 보여주고 있다.

본 장에서는 고정된 경계층을 가진 $sat(\cdot)$를 적용하여 입력이득의 크기를 변화시키는 슬라이딩모드 제어의 일반적인 개요를 설명하였다.

III. 시변 경계층을 적용한 제어기 설계

1. 문제의 설정

본 장의 III-1절에서는 III-2절의 퍼지 제어기 설계에서 참조 될 기존의 연구내용들에 대해 분석, 정리하였고 [4][5][9], 이러한 연구내용들을 바탕으로 III-2절에서는 퍼지제어기의 설계에 있어 2장에서 기술한 고정된 경계층 Φ를 플랜트의 상태에 따라 변화하게 하고, 슬라이딩 평면의 상태 s와 $\dot{s}$을 퍼지제어기의 입력변수로 적용하며, 시변 경계층 $\phi(t)$와 경계층의 변화율 $\dot{\phi}(t)$를 입력변수의 구간으로써 설정하여 제어기를 설계하였다. 또한 퍼지제어기의 출력변수 $u_F(t)$의 크기에 따라 시변 입력이득 $\hat{k}(x,t)$를 보정함으로써 시변의 출력 소속함수 구간을 설정하였다.

우선 퍼지제어기의 설계에 앞서 시변 경계층을 적용한 기존의 연구에 대해 살펴본다.

채터링 감소를 위하여 시변 경계층 $\phi(t)$를 고려하고 경계층 내부에서 슬라이딩 평면은 한정되어 있다고 가정한다[4].

$$B(t) = \{x(t) \,|\, |s(t)| \le \phi(t)\} \quad (9)$$

상태에 따른 경계층의 변화에 의해 슬라이딩 조건 (4)는 다음과 같이 바뀌어야 하며 경계층 밖의 모든 상태궤적은 경계층을 향해 수렴하는 것이 보장된다[4][5][9].

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}s(t)^2 \le (\dot{\phi}(t) - \eta)|s(t)| \quad (10)$$

(10)에서 상태가 슬라이딩 평면에 접근할 경우에 경계층은 수축되고 슬라이딩 평면에서 멀어질 경우에는 $\dot{\phi}(t) < \eta$가 되도록 하여 경계층의 팽창을 억제시키는 제어기를 설계할 수 있다.

(10)을 만족하기 위해서 (8)의 입력이득 $k(x,t)$에 경계층의 변화율을 고려하여 $-\dot{\phi}(t)$를 더하면 $\hat{k}(x,t)$는 다음과 같이 된다[3][5][9].

$$\hat{k}(x,t) = k(x,t) - \dot{\phi}(t) \quad (11)$$

따라서 단일 입력 2차 비선형 시스템에 대해 제어법칙 (6)은 (12)로 변형된다.

$$u(t) = u_E(t) - \hat{k}(x,t)\, sat(s(t)/\phi(t)) \quad (12)$$

여기서 변형된 입력이득 $\hat{k}(x,t) \ge F(x,t) + \eta + D(t) - \dot{\phi}(t)$는 (10)의 조건을 보장한다.

안정성 보장을 위해 Lyapunov 함수 V 를 정의하자.

$$V = \frac{1}{2}s(t)^2 \quad (13)$$

시스템의 궤적을 따라 $\dot{V}$ 는 다음과 같이 되며,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(t)\cdot\dot{s}(t) = s(t)\cdot(\lambda\dot{e} + f + d(t) - \ddot{x}_d + u(t)) \\ &= s(t)\cdot[\triangle f(x,t) + d(t) - \hat{k}(x,t)\, sat(s(t)/\phi(t))] \end{aligned} \quad (14)$$

만약 $|s(t)| > \phi(t)$이면,

$$\begin{aligned} \dot{V} &\le s(t)\cdot[F(x,t) + D(t) - \hat{k}(x,t)\, sgn(s(t)/\phi(t))] \\ &\le s(t)\cdot(F(x,t) + D(t)) - (k(x,t) - \dot{\phi}(t))|s(t)| \\ &\le (\dot{\phi}(t) - \eta)|s(t)| \end{aligned} \quad (15)$$

가 된다. 따라서 (10)은 $\dot{\phi}(t) < \eta$가 되도록 설계함으로써 시스템이 안정하게 되는 것을 보여주고 있다.

(9)와 (10)에서의 시변 경계층 $\phi(t)$를 구하기 위해 (3)의 슬라이딩 평면을 이용하여 $|s(t)| < \phi(t)$ 경우에 $\dot{s}(t)$를 전개하면 (16)과 같이 되며 이는 그림 2의 일반적인 저역통과 필터식 (17)과 동일한 표현식으로 나타내어짐을 알 수 있다[4][9].

$$\begin{aligned}\dot{s}(t) &= f(x,t)+u(t)-\ddot{x}_d(t)+\lambda\dot{e}+d(t)\\ &= f(x.t)+u_E-\hat{k}(x,t)\frac{s(t)}{\phi(t)}-\ddot{x}_d(t)+\lambda\dot{e}+d(t)\\ &= -\hat{k}(x,t)\frac{s(t)}{\phi(t)}+(-\triangle f(x,t)+d(t))\end{aligned} \quad (16)$$

$$\dot{s}(t) = -\gamma(t)s(t)+(-\triangle f(x,t)+d(t)) \quad (17)$$

양의 함수 $\gamma(t)$는 $\gamma(t)=\frac{\hat{k}(x,t)}{\phi(t)}$가 되며, 경계층의 변화에 따른 변형된 입력이득 $\hat{k}(x,t)$는 다음과 같이 된다.

$$\hat{k}(x,t) = \gamma(t)\phi(t) = k(x,t)-\dot{\phi}(t) \quad (18)$$

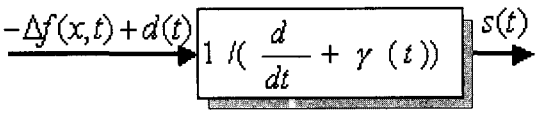


그림 2. 채터링 감소 필터.
Fig. 2. Chattering reduction filter.

(18)을 다시 정리하면 경계층의 변화율 $\dot{\phi}(t)$는

$$\dot{\phi}(t)=-\gamma(t)\phi(t)+k(x,t) \quad (19)$$

로서 표현되기 때문에 $\gamma(t)>0$로 설정하여 경계층 $\phi(t)$의 방정식을 설정할 수 있다. (10)과 (15)에서 설계조건 $\dot{\phi}(t) < \eta$를 만족시키기 위해 경계층의 최소값을 $\Phi_{\min}$으로 정의하면, $\Phi_{\min}=\sup_{x,t}\frac{F(x,t)+D(t)}{\gamma(t)}$이 되고, $\Phi_{\min}$에 의해 다음의 두 경우로 (19)를 전개할 수 있다.

$$\dot{\phi}(t)=-\gamma(t)\phi(t)+k(x,t) \quad , \phi(t)\geq\Phi_{\min} \quad (20)$$

$$\dot{\phi}(t)=0 \quad , \phi(t)<\Phi_{\min} \quad (21)$$

따라서 경계층 $\phi(t)$는 초기값에서 (20)에 의해 경계층의 최소값까지 수축된 후, (21)에 의해 더 이상의 경계층의 수축은 억제된다.

정리 1 : 초기조건 $x(0)\neq x_d(0)$이고 $|s(x(0),0)|>\phi(t=0)$이면 시스템의 궤적은 (22)에서의 유한 시간($t=t_r$)내에 경계층 $\phi(t=t_r)$에 도달하며, 이 영역 내에 머무른다.

$$t_r\leq\frac{1}{\eta}|s(t=0)-\phi(t=0)| \quad (22)$$

증명 : 초기 경계값 $\phi(t=0)$는 (19)를 이용하여 다음 식과 같이 설정한다.

$$\phi(t=0)=\frac{k(x,t=0)}{\gamma(t=0)} \quad (23)$$

초기 상태가 $s(t=0)\geq\phi(t=0)$와 $s(t=0)<-\phi(t=0)$에 따라 (10)을 $t=0$에서 $t=t_r$까지 적분을 하면 다음의 두 가지 경우로 나눌 수 있다.

1) $s(t=0)\geq\phi(t=0)$경우

$$s(t=t_r)-s(t=0)\leq\phi(t=t_r)-\eta t_r-\phi(t=0) \quad (24)$$

여기서 $s(t=t_r)=\phi(t=t_r)$이 되기 때문에 결국 경계층에 도달하는 유한시간 t_r은 다음과 같다.

$$t_r\leq\frac{1}{\eta}(s(t=0)-\phi(t=0)) \quad (25)$$

2) $s(t=0)<-\phi(t=0)$경우

동일한 방법으로 전개하면 t_r은 (26)과 같다.

$$t_r\leq\frac{1}{\eta}(-s(t=0)+\phi(t=0)) \quad (26)$$

따라서 두 경우를 모두 고려하면 (22)를 만족하게 된다.

2. 퍼지 제어기 설계

본 절에서는 Ⅲ-1절에서 분석한 시변경계층을 고려한 슬라이딩모드제어기에 퍼지논리를 적용하여 새로운 퍼지슬라이딩모드 제어기를 설계한다. 제어하고자 하는 대상 플랜트로써는 도립진자를 사용하였다.

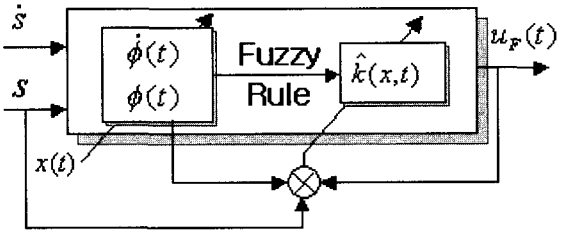


그림 3. 퍼지 논리 제어 블럭도.
Fig. 3. Block diagram of fuzzy logic control.

퍼지 소속함수의 설정에 앞서 입력변수와 출력변수를 결정한다. 슬라이딩 평면 $s(t)$와 슬라이딩 평면의 변화분 $\dot{s}(t)$를 퍼지제어기의 입력변수로 사용하고 입력변수들의 대집합은 시변 경계층 $\phi(t)$와 경계층의 변화율 $\dot{\phi}(t)$로 설정하며, 출력변수는 $u_F(t)$로서 그 대집합은 시변 $\hat{k}(x,t)$에 따라 결정되도록 퍼지제어기를 설계한다. 그림 3은 본 절에서 전개하게 될 퍼지제어 시스템에 대한 전체 블록도이다.

우선 퍼지 제어기에서 사용될 수식들은 (6),(20),(21)로부터 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$u(t) = u_E(t)+u_F(t) \quad (27.1)$$

$$u_F(t) = -\hat{k}(x,t)\,sat(s(t)/\phi(t)) \quad (27.2)$$

$$\dot{\phi}(t) = -\gamma(t)\phi(t) + k(x,t) \tag{27.3}$$

여기에서 (27.1)은 (6)의 등가 제어입력에 퍼지 슬라이딩 모드 제어 입력을 적용한 식이며, (27.2)는 퍼지 제어기의 출력인 $u_F(t)$와 이 때의 $\phi(t), s(t)$에 의해 $\hat{k}(x,t)$가 결정됨을 보여주고 있다. (27.3)에서는 $k(x,t)$와 양의 $\gamma(t)$를 이용하여 시변 경계층을 구할 수 있어 퍼지 제어기의 소속함수 대집합인 $\phi(t)$, $\dot{\phi}(t)$, $\hat{k}(x,t)$는 시스템의 상태에 따라 변경이 가능하다.

퍼지 제어기의 입력변수와 출력 변수 s, $\dot{s}$ 과 u_F에 대한 시변 소속함수는 그림 4에 나타나 있다.

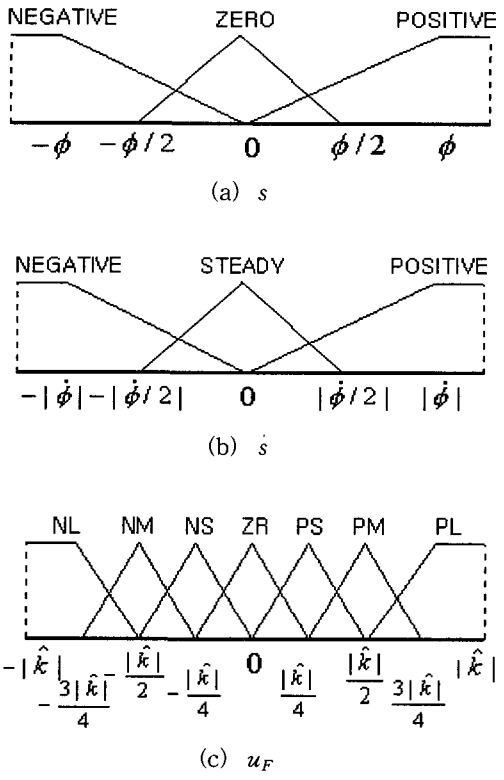


그림 4. 소속함수. (a) s, (b) $\dot{s}$, (c) u_F.

Fig. 4. Membership function. (a) s, (b) $\dot{s}$, (c) u_F.

슬라이딩 평면이 $s(t) < 0$(NEGATIVE)이면서 음의 방향(NEGATIVE)으로 진행된다면 퍼지 제어입력은 양의 큰 값 PL(Positive Large)을 가져야 한다. 이와 같은 방법으로 그림 4의 소속함수에 근거한 퍼지 제어규칙을 세우면 다음과 같다.

R_1 : IF s is NEGATIVE and $\dot{s}$ is NEGATIVE,
THEN u_F is PL(Positive Large) (28.1)

R_2 : IF s is NEGATIVE and $\dot{s}$ is STEADY,
THEN u_F is PM(Positive Medium) (28.2)

R_3 : IF s is NEGATIVE and $\dot{s}$ is POSITIVE
THEN u_F is PS(Positive Small) (28.3)

...

따라서 (28)과 같은 방법으로 규칙을 세우면 모두 9개의 제어규칙들이 생성되고, 이를 표 1에 정리하였다.

표 1. 퍼지 제어규칙.

Table 1. Fuzzy control rule.

$\dot{s}$ \ s	NEGATIVE	ZERO	POSITIVE
NEGATIVE	PL	PS	NS
STEADY	PM	ZR	NM
POSITIVE	PS	NS	NL

제어규칙에 따른 퍼지 출력값 $u_F(t)$를 도식화하면 그림 5처럼 나타낼 수 있으며, 여기서 입력과 출력의 구간 $\phi(t)$, $\dot{\phi}(t)$, $\hat{k}(x,t)$은 시간에 따라 변화하게 된다.

예를 들어 그림 5에서 I 경우($s < 0$, $\dot{s} < 0$), $u_F(t)$는 PL이고 II 경우($s < 0$, $\dot{s} = 0$) $u_F(t)$는 PS가 된다.

본 논문에서는 주어진 규칙에 의해 퍼지 추론(Inference)을 하기 위한 방법으로, Mamdani에 의해 제안된 퍼지 추론법인 Max-Min 방법을 사용하였고, 비퍼지화 방법으로 무게 중심법(Center of Gravity)을 이용하였다.

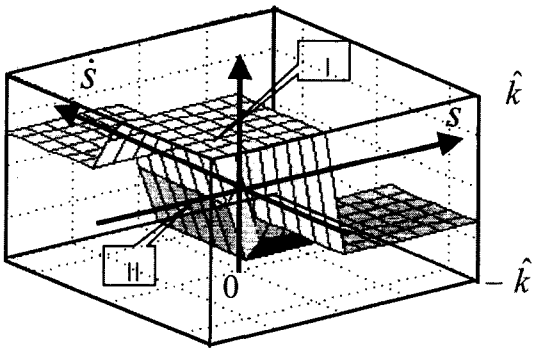


그림 5. s와 $\dot{s}$에 대한 u_F의 크기.

Fig. 5. Magnitude of u_F for s, $\dot{s}$.

이와 같은 퍼지슬라이딩모드 제어에서 초기 경계값이 주어졌을 때 입력변수 s, $\dot{s}$에 대해 표 1의 퍼지 제어규칙을 적용함으로써 u_F를 구할 수 있으며, (27.2)을 이용하여 변형된 $\hat{k}(x,t)$을 구할 수 있을 뿐만 아니라, 또한 플랜트의 상태에 따라 새로운 경계값 $\phi(t)$를 얻음으로써 시변 퍼지슬라이딩 제어기를 구현할 수 있다 .

IV. Simulation

Ⅲ장에서 제안한 퍼지 슬라이딩모드 제어기의 타당성을 입증하기 위해 간단한 비선형 2차 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

점성마찰과 외란이 존재하는 도립진자에 대한 2차 시

스템을 다음과 같이 고려하자.

$$\ddot{x}+b\dot{x}+a\cos(x)=u+d(t) \tag{29}$$

여기에서 실제 파라미터 값 $a=\hat{a}+\triangle a$, $b=\hat{b}+\triangle b$ 이며, 외란 $d(t)=\sin(t)$이고 도립진자의 질량과 점성마찰의 값은 미지의 값이다. 이들 파라미터들은 $\hat{a}=3.5$, $\hat{b}=0.5$로 추정가능 하다고 가정한다. 따라서 파라미터 불확실성은 다음과 같이 한정된다.

$$|\triangle a|\le 0.3,\ |\triangle b|<0.2 \tag{30}$$

(29)와 (30)을 비교하면 추정 동역학식 $\hat{f}(x,t)$는

$$\hat{f}(x,t)=-\hat{b}\dot{x}-\hat{a}\cos(x)=-0.5\dot{x}-3.5\cos(x) \tag{31}$$

이며 $|\triangle f(x,t)|$ 와 $|d(t)|$는 각각 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}|\triangle f(x,t)| &=|\triangle b\dot{x}+\triangle a\cos(x)|\\ &\le|0.2\dot{x}+0.3\cos(x)|=F(x,t)\end{aligned} \tag{32}$$

$$|d(t)|=|\sin(3t)|\le 1=D(t) \tag{33}$$

(5)와 (8)로부터 등가입력 $u_E(t)$와 입력이득 $k(x,t)$는 각각

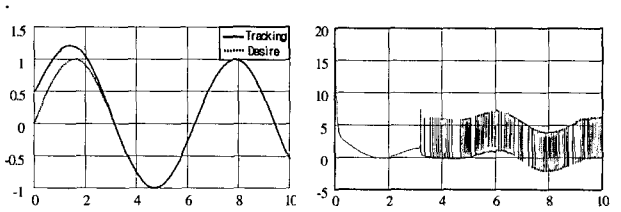
$$u_E(t)=0.5\dot{x}+3.5\cos(x)-\gamma(t)\dot{e}+\ddot{x}_d \tag{34}$$

$$k(x,t)\ge F(x,t)+D(t)+\eta=|0.2\dot{x}+0.3\cos(x)|+1+\eta \tag{35}$$

이 된다. 추적궤적 $x_d(t)=\sin(t)$, $\eta=0.5$, (17)로부터 $\gamma(t)=\lambda$는 양의 상수 20, 초기 경계층은 $\phi(t=0)=0.1$로 정했을 때 제어 입력은 (36)이 되고, 시변 경계층 $\phi(t)$는 (37)이 된다.

$$u(t)=0.5\dot{x}+3.5\cos(x)-20\dot{e}+\ddot{x}_d+u_F(t) \tag{36}$$

$$\dot{\phi}(t)=-\gamma(t)\phi(t)+k(x,t)+|0.2\dot{x}+0.3\cos(x)|+1+\eta \tag{37}$$

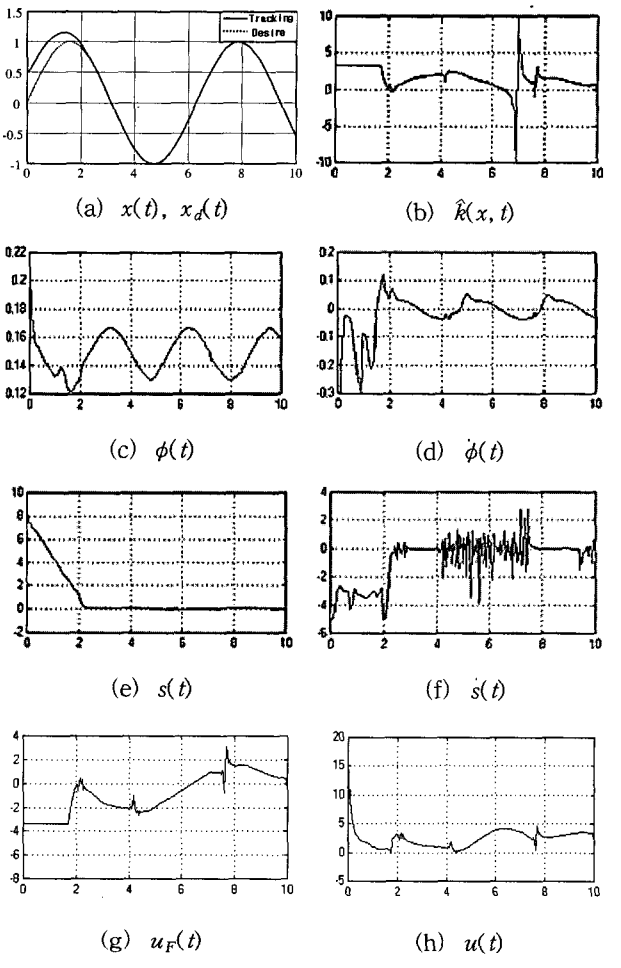


(a) State trajectories (b) Control input

그림 6. $sgn(\cdot)$를 이용한 시뮬레이션 결과.

Fig. 6. Simulation result using $sgn(\cdot)$.

그림 6은 등가입력 $u_E(t)$의 스위칭 함수 $sgn(\cdot)$를 (29)의 도립진자에 적용했을 때의 입력과 출력을 보여주며, 그림 7은 (36)처럼 퍼지제어기의 출력인 $u_F(t)$가 시스템에 적용되었을 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다.



(a) $x(t)$, $x_d(t)$ (b) $\hat{k}(x,t)$

(c) $\phi(t)$ (d) $\dot{\phi}(t)$

(e) $s(t)$ (f) $\dot{s}(t)$

(g) $u_F(t)$ (h) $u(t)$

그림 7. 퍼지슬라이딩모드 제어기에 의한 시뮬레이션 결과.

Fig. 7. Simul. result by fuzzy sliding mode controller. (a) State trajectories, $x(0)=[0.5\ 0]^T$, (b) Input gain, (c) Boundary layer, (d) Derivative of boundary layer, (e) Sliding surface, (f) Derivative of sliding surface, (g) Control input by fuzzy controller, (h) Control input.

그림 6과 그림 7로부터 스위칭 함수로써 퍼지제어기를 적용하였을 때 제어입력의 채터링 현상이 현저히 감소되었고, 정상상태로의 응답특성 또한 빨라졌다. 그림 7의 결과에서 $\dot{\phi}(t)<\eta$로 설계되어, 이는 (10)과 (15)의 조건을 만족하기 때문에 시스템은 안정하다.

V. 결론

본 논문에서는 채터링 감소를 위해 시변 경계층을 고려한 슬라이딩모드 제어에 퍼지 논리를 적용한 새로운 퍼지슬라이딩모드 제어이론을 제안하였다. 제안한 제어이론은 슬라이딩 평면 $s(t)$와 슬라이딩 평면의 변화분 $\dot{s}(t)$를 퍼지 입력으로 하고, 퍼지입력과 출력의 대집합으로써 경계층과 경계층의 변화분을 이용하여 제어 규칙을 만들었다. 또한 퍼지 출력의 크기에 비례하여 입력

대집합인 경계층 $\phi(t)$와 경계층의 변화분 $\dot{\phi}(t)$, 출력 대집합인 입력이득 $\hat{k}(x,t)$이 변화하였다. 그 결과 제안한 제어기를 적용하였을 때 제어입력에 채터링현상이 감소했을 뿐만 아니라 정상상태로의 빠른 응답특성을 보여주고 있다 .

참고문헌

[1] J. Y. Hung, W. Gao, and J. C. Hung "Variable structure control," *IEEE Trans on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 2~17, Feb., 1993.

[2] V. I. Utkin "Sliding modes and their application in variable structure systems," Mir Publications *Moscow*, 1978.

[3] D. Q. Zhang and S. K Panda, "Chattering-free and st-response sliding mode controller," *IEE*, vol. 146, no. 2, pp. 171~177, March, 1999.

[4] P. Kachroo and M. Tomizuka, "Chattering reduction and error convergence in the sliding-mode control of a class of nonlinear systems," *IEEE Trans On Automatic Control*, vol. 41, no. 7, pp. 1063~1068, July, 1996.

[5] C. G. Lhee, J. S. Park, and H. S. Ahn "Sliding-like fuzzy logic control with self-tuning the dead zone parameters," *1999 IEEE Int. Fuzzy Systems Conf. Proc*, pp. 544~549, 3, 1999.

[6] Q. P. Ha and D. C. RYE, "Robust sliding mode control with application," *Int. J. Control*, vol. 72, no. 12, pp. 1087~1096, 1993.

[7] S. W. Kim and J. J. Lee, "Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface," *Fuzzy Sets and Systems 71*, pp. 359~367, 1995.

[8] B. K. Yoo and W. C. Ham, "Adaptive control of robot manipulator using fuzzy compensator," *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, vol. 8, no 2, April, 2000.

[9] J. J, E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control* . Englewood Cliffs. NJ: Prentice Hall, 1991.

이 태 경

1999년 전북대 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(2001). 현재 (주)케피코 근무. 관심분야는 가변구조제어, 퍼지제어.

한 종 길

1992년 전북대 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(1995). 동대학 박사수료(1997). 1997년~현재 한려대학교 멀티미디어정보통신공학과 교수. 관심분야는 퍼지제어, 가변구조제어, GA형 제어.

함 운 철

1979년 서울대 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(1982), 동대학 박사(1988). 1984년~현재 전북대학교 전자정보공학부 교수. 관심분야는 로봇제어, 적응제어, 가변구조제어, 비선.