

퍼지 포화함수를 이용한 슬라이딩 모드 제어의 채터링 현상 개선

Improvement of Chattering Phenomena in Sliding Mode Control using Fuzzy Saturation Function

유 병 국

Byung-Kook Yoo

한려대학교 멀티미디어정보통신공학과

요 약

슬라이딩 모드 제어방식은 가변구조 제어이론의 하나로서 불확실성을 가진 비선형 시스템에 대한 강인한 특성을 가지고 있지만 제어입력에 채터링 현상을 발생시키기 때문에 그 적용에 한계를 가지고 있다. 채터링을 제거하는 방식에는 여러 가지 방식이 있으나 본 논문에서는 특수한 비선형 함수와 퍼지시스템을 이용하여 기존의 고정 경계층 이용방식에 비하여 정상상태 오차를 줄일 수 있는 개선된 채터링 제거전략을 제안한다. 제안된 제어방식에서는 퍼지시스템의 출력변수 상에 설정된 퍼지집합의 구간 범위를 조절함으로써 trade-off관계에 있는 정상상태 오차와 채터링의 크기를 적절히 조절할 수 있다. 제안된 전략의 타당성을 보이기 위해 기존의 고정 경계층 방식을 간단히 분석하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 이를 비교 분석한다.

Abstract

Sliding mode control, as a typical method of variable structure control, has the robust characteristics for the uncertainty and the disturbance of the nonlinear system. Because, however, sliding mode control input includes a sign function that is discontinuous on the predefined switching surface, its applications are primarily limited by the need of alleviation or reduction of chattering. In this paper, we propose a chattering alleviation strategy based on a special nonlinear function and a fuzzy system. By using the proposed control scheme, we can reduce the steady state error. Its tracking performance is as fast as that of conventional method using the fixed boundary layer. Especially, in the proposed method, we can adjust the trade-off between the steady state error and the degree of chattering by regulating the proper range of the output variable of the fuzzy system. To verify the validity of the proposed algorithm, the analysis of the control method using the fixed boundary layer and the computer simulations are shown to compare with them.

Key Words : Fuzzy system, Sliding mode control, Chattering phenomenon

1. 서 론

슬라이딩 모드 제어는 시스템의 불확실성과 외란에 대하여 강인한 특성을 가지고 있는, 가변구조제어방식의 한 형태로 1970년대부터 활발히 연구가 진행되어왔다 [1-3]. 그러나 이러한 슬라이딩모드제어 방식은 가변구조 시스템(variable structure system) 전략을 기반으로 하고 있기 때문에 제어입력에 스위칭입력을 포함하게 된다. 이러한 스위칭 입력이 채터링을 발생시키게 되며 이것은 시스템의 평형점 부근에서 고주파 진동을 나타내게 되거나 모델화 되지 않은 고주파 동특성을 발생시키고 또는 실제 구현에 있어 작동기(actuator)의 물리적 한계 등으로 인하여 구현이 불가능해질 수 있다.

이러한 채터링은 실제 제어시스템을 구성할 때 바람직하지 못한 현상이며 슬라이딩모드제어이론의 가장 큰 단점이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 제안되어왔다. 가장 일반적이며 대표적인 것으로 스위칭 평면에 고정 경계층(boundary layer)을 두는 방식이 있다 [4-6]. 이 방식은 기존의 슬라이딩모드 제어입력내의 $sgn(\cdot)$ 함수를 포화함수인 $sat(\cdot)$ 로 대체하는 방식이다. 그러나 이 방식은 추적제어에서 스위칭 제어입력에 비하여 채터링은 제거될 수 있으나 추적오차가 커지게 되는 문제를 발생시킨다. 이러한 채터링 제거와 추적오차 성능의 개선을 위한 방법으로 경계층을 시변으로 설정하고 이것을 실시간으로 적용시키는 방식이 있다[5]. 여기서는 차단 주파수를 결정하는 상수를 이용하고 또한 경계층의 시간에 따른 변화를 하나의 안정한 동역학으로 설정하는 방식이 사용된다. 이와 유사한 방식으로 슬라이딩모드 이득과 경계층 범위를 동시에 적용시키는 방식[7]이 있으며 또한 슬라이딩 함수 s 와 시간미분 \dot{s} 를 이용하는

접수일자 : 2001년 10월 29일
완료일자 : 2002년 3월 2일

방식[8]이 제안되기도 하였다. 또한 슬라이딩 평면을 회전 또는 이동시키는 방식[9], 최적시간 궤적에 의한 비선형 슬라이딩 평면을 이용하는 방식[10], 슬라이딩 벡터를 이용하는 방식[11]등 여러 가지 연구가 이루어져 왔다 [12-15].

본 논문에서는 시변 경계층을 이용한 방식과 유사한 방식으로 s 와 \dot{s} 정보를 이용하여 경계층의 크기를 달리 하는 효과를 가지는 간단한 방식을 제안한다. 이 방식에서는 특수한 비선형 함수를 이용하게 되며 이 함수의 특정 매개변수를 퍼지시스템을 이용하여 변화시키게 된다. 이것은 결국 제어입력에 사용되는 포화함수가 퍼지시스템에 의한 함수가 된다는 것이며 기존 시변 경계층 방식에서의 슬라이딩모드이득을 적응시키는 단계가 필요 없다. 또한 s 와 \dot{s} 의 정보를 이용하는 특수한 비선형 함수를 이용하기 때문에 기존의 고정 경계층 방식과 같은 수렴속도 특성을 보이면서도 정상상태오차를 줄일 수 있다. 채터링은 퍼지시스템의 출력변수상의 퍼지집합 설정 범위에 의해 적절히 제거시킬 수 있다.

본 논문의 구성은 2장에서 일반 적인 슬라이딩모드 제어 방식과 채터링 감소를 위한 고정 경계층 도입방식에 대하여 간단히 분석하고 이 분석을 토대로 3장에서 특수한 비선형 함수와 이를 이용한 퍼지 포화함수를 정의하고 이를 통해 채터링 현상을 개선시킬 수 있는 새로운 방식을 제안한다. 제안된 방식에 대한 타당성을 보이기 위해 4장에서는 고정 경계층 방식과의 비교를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인한다. 마지막으로 5장에서는 결론에 대하여 논한다.

2. 채터링 감소를 위한 기존 방식

2.1 일반적인 슬라이딩모드제어

다음과 같은 2차 시스템을 고려하자.

$$\ddot{x}(t) = f(x, t) + u(t) + d(t) \quad (1)$$

여기서 $f(x, t)$ 는 미지의 함수이고 $u(t)$ 는 제어입력, 그리고 $d(t)$ 는 외란을 나타낸다. $x = [x \ \dot{x}]^T$ 는 상태벡터이며 외란이 없는 경우 $f(x, t)$ 에 대한 추정 가능한 함수를 $\hat{f}(x, t)$ 라하고 $x_d(x)$ 를 추적하고자 하는 상태궤적이라 할 때 다음과 같은 조건을 가정할 수 있다.

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

여기서 D 는 양의 상수이며 $F(x, t)$ 는 알고있는 양의 함수이다. $x_d = [x_d \ \dot{x}_d]^T$ 를 추적하고자 하는 궤적이라 하면 추적오차는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$e = x - x_d = [e \ \dot{e}]^T \quad (3)$$

이 시스템에 대하여 안정한 슬라이딩모드제어를 위한 $s(e)$ 를 다음과 같이 설정한다.

$$s(e) = \left(-\frac{d}{dt} + \lambda \right) e(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t), \quad \lambda > 0 \quad (4)$$

이 때 제어목적은 2차원 상태공간상에 정의된 $s(e) = 0$ 일 때의 시변 슬라이딩 평면 $S(t)$ 상에 시스템의 궤적이 유지되도록 하는 제어입력을 설계하는 것이며 이것은

상태궤적이 슬라이딩 평면 $S(t)$ 외부에 있을 때 이를 슬라이딩 평면에 도달할 수 있도록 하는 다음의 슬라이딩 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2(e) \leq -\eta |s(e)|, \quad \eta > 0 \quad (5)$$

입력 설계 시 완전한 $f(x, t)$ 는 모른다고 가정하였으므로 이에 대한 추정 $\hat{f}(x, t)$ 를 이용해야 한다. 또한 상태가 슬라이딩 평면의 외부에 존재하며 외란과 불확실성에 대한 강인성을 갖도록 하기 위하여, 즉 슬라이딩 조건 (5)를 만족하도록 하기 위하여 입력에 다음과 같이 $sgn(\cdot)$ 항을 추가하도록 한다.

$$u(t) = \hat{u}(t) - k(x, t)sgn(s), \quad (6)$$

$$sgn(s) = \begin{cases} 1, & \text{if } s > 0 \\ -1, & \text{if } s < 0 \end{cases}$$

여기서 $\hat{u}(t) = \ddot{x}_d(t) - \lambda \dot{e}(t) - \hat{f}(x, t)$ 이다. 이 때

$$k(x, t) \geq F(x, t) + \eta + D \quad (7)$$

이다. 안정도를 분석하기 위하여 다음과 같이 슬라이딩 조건을 확인한다.

$$V = \frac{1}{2} s^2(e) \quad (8)$$

이를 시간에 대하여 미분하면

$$\dot{V} = s[\hat{f}(x, t) - \hat{f}(x, t)] - (F(x, t) + \eta + D)|s| \leq -\eta |s| \quad (9)$$

따라서 슬라이딩 조건 (5)를 만족하게 된다.

2.2 고정 경계층을 도입한 슬라이딩모드제어

제어입력 (6)에는 시스템의 불확실성이나 외란등으로 인하여 슬라이딩 평면 $S(t)$ 와 교차되는 제어 불연속 $k(x, t)sgn(s)$ 를 포함하고 있기 때문에 입력에 채터링이 발생하게 된다. 이러한 채터링을 감소시키기 위하여 슬라이딩 평면에 다음과 같은 경계층 $B(t)$ 를 고려한다.

$$B(t) = \{e \mid |s(e)| \leq \Phi\}, \quad \Phi > 0 \quad (10)$$

이러한 경계층을 고려한 제어입력은 (6)의 $sgn(\cdot)$ 를 포화함수 $sat(\cdot)$ 으로 대체한 것이다.

$$u(t) = \hat{u}(t) - k(x)sat(s/\Phi), \quad (11)$$

$$sat(s/\Phi) = \begin{cases} s/\Phi, & |s/\Phi| \leq 1 \\ sgn(s/\Phi), & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서 Φ 는 고정된 경계층 폭이다. 이를 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.

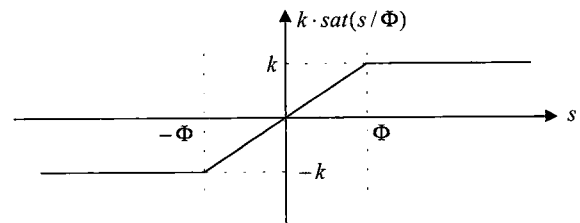


그림 1. 경계층 Φ 를 고려한 포화함수
Fig. 1. Saturation function with boundary layer Φ

이 시스템의 안정도에 대하여 두 가지로 나누어 살펴 보기로 한다. 먼저 만약 시스템 궤적이 $B(t)$ 외부에 있을 때 (11)에서 $\text{sat}(s/\Phi)$ 는 $\text{sgn}(s)$ 와 같으며 따라서 제어 입력 (11)은 (6)과 같고 결국 슬라이딩 조건 (5)를 만족하게 된다. 이것은 시스템 궤적이 $B(t)$ 외부에 있을 때 입력 (11)에 의해 유한시간 이내에 $B(t)$ 내로 궤적이 들어 오게 된다는 것을 의미하며 일단 $B(t)$ 내로 들어온 궤적은 모든 시간 $t > t_0$ 에 대하여 $B(t)$ 내에 머무르게 된다. 여기서 t_0 는 시스템 궤적이 $B(t)$ 내부로 들어온 시간을 나타낸다. 시스템 궤적이 $B(t)$ 내부에서 시작되어 나타나는 궤적에 대한 분석은 다음과 같다. 초기값이 $B(t)$ 의 내부에 있으므로 제어입력 (11)은 다음과 같이 표현되어 질 수 있다.

$$u(t) = \hat{u}(t) - k(x)s/\Phi \quad (12)$$

즉, $|s(\bar{e})| \leq \Phi$ 이므로 \dot{s} 는 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{\bar{e}} + \lambda \bar{e} \\ &= f(x, t) - \hat{f}(x, t) + d(t) - k(x, t)s/\Phi \\ &= -k(x, t)s/\Phi - \Delta f(x, t) + d(t) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $\Delta f(x, t) = \hat{f}(x, t) - f(x, t)$ 이다. (13)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\dot{s} + r(x, t)s = -\Delta f(x, t) + d(t) \quad (14)$$

여기서 $r(x, t) = \frac{k(x, t)}{\Phi}$ 이며 이것은 1차 저역통과 필터식과 동일한 형태이며 s 는 그림 2와 같이 필터를 통하여 얻어질 수 있다. 여기서 p 는 Laplace 연산자이다.

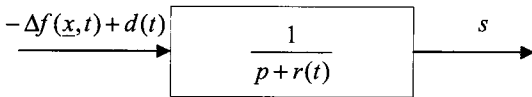


그림 2. s 의 한계(boundary) 계산을 위한 1차 LPF 모형
Fig. 2. The 1st-order LPF model to calculate the bound of s

그림에서 $r(t)$ 를 다음과 같이 가정한다.

$$R_{\min} \leq r(t) \leq R_{\max} \quad (15)$$

그리고 $-\Delta f(x, t) + d(t) = z(x, t)$ 로 놓고 다음 조건을 만족하는 Z 를 정의한다.

$$|z(x, t)| \leq Z \quad (16)$$

그러면 필터의 출력의 크기 $|s|$ 는 다음과 같이 표현되어 질 수 있다.

$$\begin{aligned} |s| &= \left| \int_0^t e^{-R_{\min}(t-\tau)} z(x, \tau) d\tau \right| \\ &\leq Z \int_0^t e^{-R_{\min}(t-\tau)} d\tau \\ &\leq \frac{Z}{R_{\min}} \end{aligned} \quad (17)$$

결국 $|s|$ 의 최대크기는 Z/R_{\min} 이고 시정수는 $1/R_{\min}$ 이 된다. 경계층의 두께 Φ 와 $r(t)$ 가 반비례관계이고 따라서 R_{\min} 이 반비례관계이므로 Φ 가 큰 값으로 설정되

면 R_{\min} 은 작으며 (17)로부터 $|s|$ 의 최대크기는 커진다. $|s|$ 의 최대크기가 커진다는 것은 (4)로부터 오차와 오차의 속도성분이 커진다는 것을 의미한다. 또한 (17)로부터 시정수가 커진다는 것을 알 수 있다. 반대로 Φ 를 작게 설정하면 $|s|$ 의 최대값은 작아지며, 즉 최대오차가 작아지며 시정수도 작은 값을 갖는다. 결국 Φ 를 작게 설정하는 것이 궤적을 슬라이딩 평면 $S(t)$ 에 빨리 접근시키는 것이며 오차도 작아지는 것이다. 그러나 Φ 를 너무 작게 설정하면 (14)에서 \dot{s} 가 커지게 되며 가변구조 현상에 의해 다시 채터링이 발생하게 되고 결국 입력 연속화의 의미가 없어지게 된다.

3. 퍼지 포화함수를 이용한 채터링 제거

앞장의 분석에서와 같이 Φ 의 크기는 상태의 수렴속도와 정상상태 오차의 크기를 결정하는 중요한 파라미터이다. 본 장에서는 s 와 \dot{s} 를 이용하여 상태에 따라 적절히 Φ 를 변화시키는 효과를 얻기 위해 퍼지시스템을 사용하여 빠른 수렴과 제어입력의 연속화를 수행하는 방식을 제안한다. 이러한 퍼지시스템은 (11)의 포화함수를 재정의하는 것이며 이를 퍼지 포화함수라 하자.

$$F_{\text{sat}}(s, \dot{s}) = \begin{cases} 1, & s \geq \Phi \\ F(s, \dot{s}), & -\Phi < s < \Phi \\ -1, & s < -\Phi \end{cases} \quad (18)$$

여기서

$$F(s, \dot{s}) = 1.2732 \times \tan^{-1}(\text{sgn}(s) \cdot |s/\Phi|^{\alpha(s, \dot{s})}) \quad (19)$$

이며 여기서

$$\alpha(s, \dot{s}) = 10^{\zeta(s, \dot{s})} \quad (20)$$

여기서 $\zeta(s, \dot{s})$ 는 s 와 \dot{s} 를 입력으로 하는 퍼지시스템을 나타내며 이 때 퍼지시스템 출력변수의 전체집합 구간은 $[-\zeta_{\min}, 0]$ 이며 따라서 $10^{-\zeta_{\min}} \leq \alpha \leq 10^0$ 이 된다. 이 퍼지 포화함수의 형태를 알아보기 위하여 몇 개의 대표적인 α 값에 의한 함수 $F_{\text{sat}}(s, \dot{s})$ 을 도시하면 다음 그림 3과 같다.

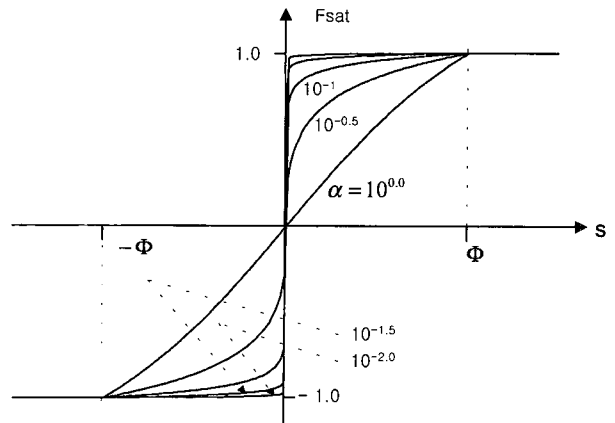


그림 3. 대표적인 α 값에 대한 함수 $F_{\text{sat}}(s, \dot{s})$

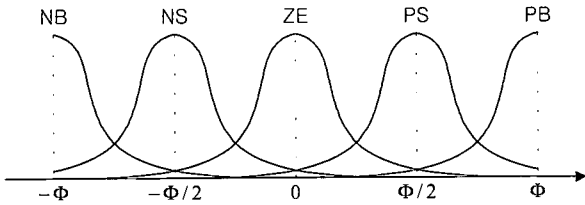
Fig. 3. The function $F_{\text{sat}}(s, \dot{s})$ for several α

이 때 s 와 \dot{s} 를 이용하여 상태에 따라 적절히 ϕ 를 변화시키는 효과와 같은 결과를 얻기 위해 퍼지시스템을 사용하여 빠른 수렴과 제어입력의 연속화를 수행하기 위한 퍼지시스템의 규칙은 다음 표와 같이 설정한다. 이 규칙은 s 와 \dot{s} 의 크기를 고려하여 상태공간상에서 상태가 원점에서 멀리 있거나 그 움직임이 멀어지게될 때 ϕ 의 값을 작게 설정한 것과 같은 형태를 갖도록 하기 위하여 ξ 값을 작게(큰 음의 값)하여 채터링이 발생하더라도 상태를 슬라이딩 평면에 도달되도록 하며 또한 수렴속도를 향상시킨다. 그리고 상태가 슬라이딩 평면에 가까이 있으며 그 움직임이 적을 때(s 와 \dot{s} 값이 작을 때) 채터링을 발생되지 않도록 하기 위해 기존의 고정 경계층 방식과 같은 효과를 갖도록 ξ 값을 크게(0에 가까운 음의 값) 설정한 것이다.

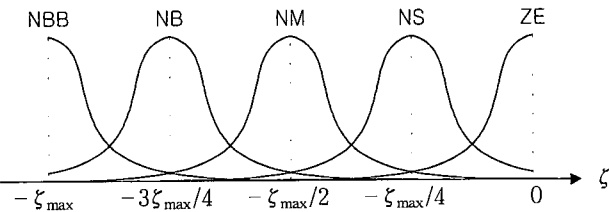
표 1. 퍼지 규칙 테이블
Table 1. Fuzzy rule table

$\dot{s} \backslash s$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NBB	NB	NM	NS	ZE
NS	NB	NM	NS	ZE	NS
ZE	NM	NS	ZE	NS	NM
PS	NS	ZE	NS	NM	NB
PB	ZE	NS	NM	NB	NBB

이 때 퍼지시스템의 각 입력 및 출력변수 상에 설정된 퍼지집합의 형태는 Gaussian 퍼지집합을 사용하였으며 설정은 다음과 같다.



(a) FS의 입력변수 s, \dot{s} 상에 설정된 퍼지집합
(a) Fuzzy sets defined on input variables s, \dot{s} of FS



(b) FS의 출력변수 ξ 상에 설정된 퍼지집합
(b) Fuzzy sets defined on output variable ξ of FS

그림 4. FS의 입출력변수 상에 설정된 퍼지집합

Fig. 4. The fuzzy sets defined on the input and output variables of FS

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 제안된 퍼지 포화함수를 이용한 방식과 기존의 고정 경계층을 이용한 방식을 비교하기 위하여 다음과 같은 예제 시스템[5]에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 살펴본다.

$$\ddot{x} + (|\sin(t)| + 1) \dot{x}^2 \cos 3x = u \quad (21)$$

따라서

$$\ddot{x} = -(|\sin t| + 1) \dot{x}^2 \cos 3x + u \quad (22)$$

로부터 $\hat{f} = -1.5 \dot{x}^2 \cos 3x$ 로 놓고 $F = 0.5 \dot{x}^2 |\cos 3x|$ 으로 할 수 있으며 $f = -(|\sin t| + 1) \dot{x}^2 \cos 3x$ 이며 s 는 (4)에 의해서 다음과 같이 설정한다.

$$s = \dot{e} + \lambda e = \dot{e} + 20e \quad (23)$$

즉, $\lambda = 20$ 이며 모든 시뮬레이션에서 $\eta = 0.1, \phi = 0.1$ 로 설정하였다. (7)로부터 슬라이딩모드 이득은

$$k \geq F + \eta + D \quad (24)$$

이 된다. 그러나 (21)에서 외란 $d(t)$ 를 고려하지 않았으므로 $D = 0$ 으로 하였다. 결국 제어입력은 (6), (11), (18)로부터 다음과 같이 설계되어진다.

a. 기존의 스위칭 입력 방식 :

$$u = 1.5 \dot{x}^2 \cos 3x + \ddot{x}_d - 20 \dot{e} - (0.5 \dot{x}^2 |\cos 3x| + 0.1) \text{sgn}(s) \quad (25)$$

b. 기존의 고정 경계층 사용방식 :

$$u = 1.5 \dot{x}^2 \cos 3x + \ddot{x}_d - 20 \dot{e} - (0.5 \dot{x}^2 |\cos 3x| + 0.1) \text{sat}(s/\phi) \quad (26)$$

c. 제안된 퍼지 포화함수 사용방식 :

$$u = 1.5 \dot{x}^2 \cos 3x + \ddot{x}_d - 20 \dot{e} - (0.5 \dot{x}^2 |\cos 3x| + 0.1) F \text{sat}(s, \dot{s}) \quad (27)$$

모든 시뮬레이션에서 표본화 주기는 1msec로, 원하는 상태계적은 $x_d(t) = \sin(\pi t/2)$ 로 설정하였다. 퍼지시스템은 단일값 퍼지화, max-product 추론, 무게중심법 비퍼지화방식을 사용하였다.

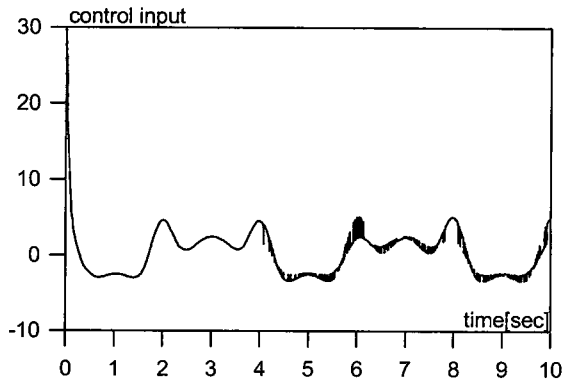
시뮬레이션 결과에서 그림 5는 위의 세가지 방식에 대한 제어입력을 비교한 것이다. 그림 5(a)에서 상태가 스위칭 평면에 도달된 이후인 약 4초 이후부터 입력에 채터링이 발생되는 것을 확인할 수 있다. 고정 경계층을 이용한 제어입력인 그림 5(b)는 입력에 채터링이 제거된 것을 확인할 수 있으며 제안된 방식인 그림 5(c)에서도 채터링이 거의 보이지 않음을 확인할 수 있다. 그림 6에서는 각 방식에 대한 정상상태 오차를 비교할 수 있다. 즉, 스위칭 제어입력에서는 채터링이 발생되지만 정상상태 오차가 매우 적으며 고정 경계층을 이용한 방식은 입력에 채터링이 나타나지 않지만 경계층의 두께에 의해 정상상태 오차가 크게 나타나게 된다. 그러나 본 논문에서 제안한 퍼지 포화함수 이용방식에서는 제어입력에 채

터링이 감소됨과 동시에 정상상태오차도 경계층 방식에 비하여 매우 작아짐을 알 수 있다. 또한 그림 6으로부터 고정 경계층방식과 퍼지 포화함수 이용방식의 수렴속도는 차이가 없음을 확인할 수 있다. 그림 7은 퍼지 포화함수를 이용한 방식에서 ζ_{min} 을 각각 3과 30으로 설정한 경우에 대한 제어입력을 나타낸것이다. 그림 8은 ζ_{min} 을 각각 1.5, 3, 30으로 설정했을 때의 $Fsat(s, \dot{s})$ 값의 변화를 도시한 것이다. 그리고 그림 9는 ζ_{min} 의 값에 따른 정상상태 오차를 비교한 것이다. 이 결과를 통하여 ζ_{min} 값의 설정을 적절히 조절함으로써 정상상태 오차의 허용범위와 채터링의 크기에 대한 trade-off 관계를 조절할 수 있음을 알 수 있다. 즉, ζ_{min} 값을 크게 설정하면 기존의 스위칭 제어입력방식과 같은 결과가 나타나며 반대로 그 값을 작게 설정하면 고정 경계층 방식과 같아진다.

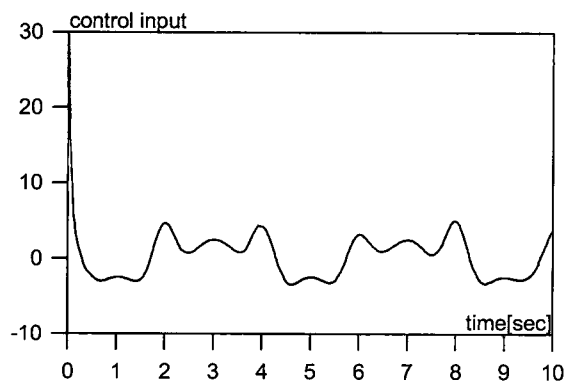
$$Fsat(s, \dot{s})|_{\zeta_{min} \rightarrow \infty} \approx sgn(s)$$

$$Fsat(s, \dot{s})|_{\zeta_{min} \rightarrow 0} \approx sat(s/\emptyset)$$

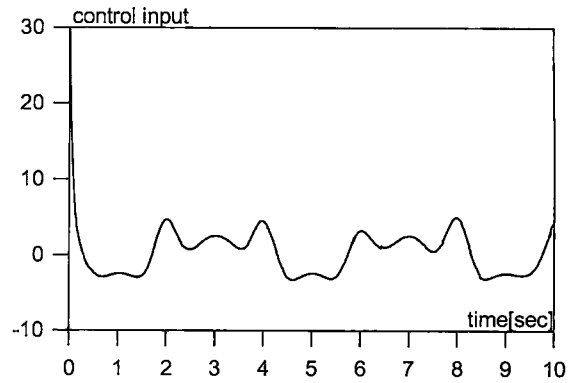
이것은 그림 3으로부터 직접 이해될 수도 있다.



(a) 스위칭 제어입력, (25)
(a) Switching control input, (25)



(b) 고정 경계층을 이용한 제어입력, (26)
(b) Control input using the fixed boundary layer, (26)



(c) 제안된 퍼지 포화함수를 이용한 제어입력
($\zeta_{min} = 1.5$), (27)

(c) The control input using the proposed fuzzy saturation function, (27)

그림 5. 스위칭 입력, 고정 경계층 및 퍼지 포화함수 이용 제어입력

Fig. 5. The control inputs using switching, the fixed boundary layer and fuzzy saturation function

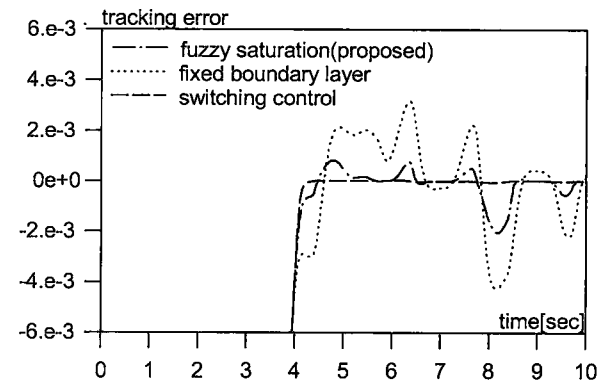
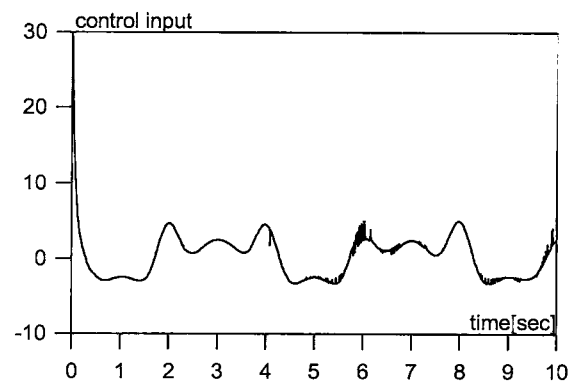


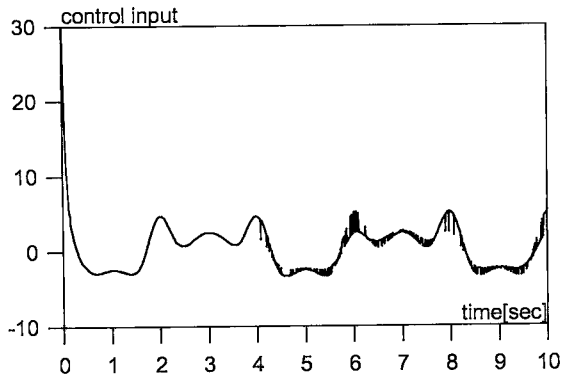
그림 6. 스위칭, 고정 경계층 및 퍼지 포화함수 이용 제어의 오차비교

Fig. 6. The comparison of the state errors for three control methods



(a) $\zeta_{min} = 3.0$ 일 때의 제어입력, (27)

(a) The control input using the proposed fuzzy saturation function with $\zeta_{min} = 3.0$, (27)

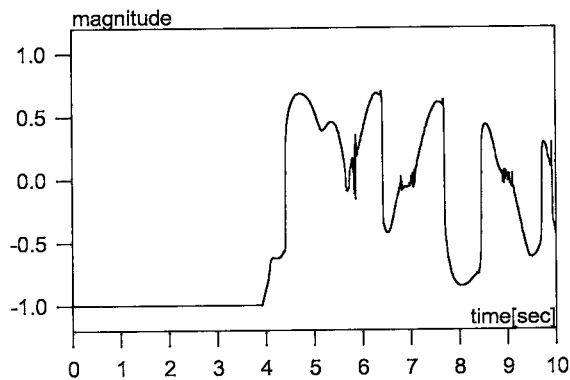


(b) $\zeta_{\min} = 30.0$ 일 때의 제어입력, (27)

(b) The control input using the proposed fuzzy saturation function with $\zeta_{\min} = 30.0$, (27)

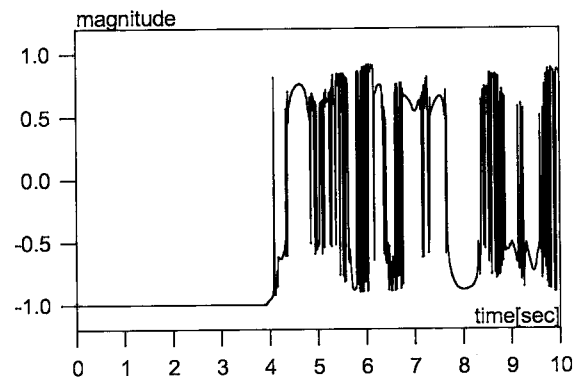
그림 7. 퍼지 포화함수를 이용한 제어에서 ζ_{\min} 의 설정에 따른 제어입력의 비교

Fig. 7. The comparison of the control inputs based on the setting of ζ_{\min} in the proposed scheme



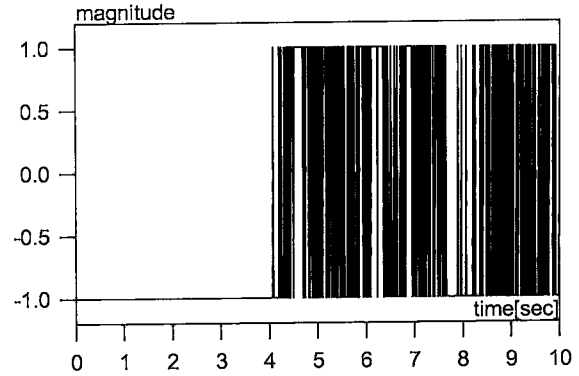
(a) $\zeta_{\min} = 1.5$ 일 때의 $Fsat(s, \dot{s})$

(a) $Fsat(s, \dot{s})$ with $\zeta_{\min} = 1.5$ in the proposed scheme



(b) $\zeta_{\min} = 3.0$ 일 때의 $Fsat(s, \dot{s})$

(b) $Fsat(s, \dot{s})$ with $\zeta_{\min} = 3.0$ in the proposed scheme



(c) $\zeta_{\min} = 30.0$ 일 때의 $Fsat(s, \dot{s})$

(c) $Fsat(s, \dot{s})$ with $\zeta_{\min} = 30.0$ in the proposed scheme

그림 8. 퍼지 포화함수를 이용한 제어에서의 ζ_{\min} 의 설정에 따른 $Fsat(s, \dot{s})$ 의 비교

Fig. 8. The comparison of $Fsat(s, \dot{s})$ s based on the setting of ζ_{\min} in the proposed scheme

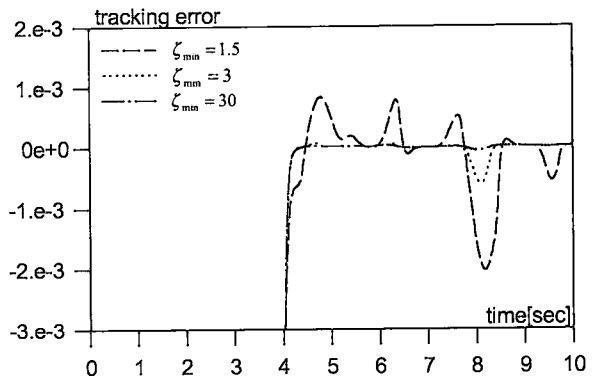


그림 9. 퍼지 포화함수를 이용한 제어에서 ζ_{\min} 의 설정에 따른 정상상태 오차의 비교

Fig. 9. The comparison of the state errors based on the setting of ζ_{\min} in the proposed scheme

5. 결론

본 논문에서는 특수한 비선형 함수와 s 와 \dot{s} 정보를 입력으로 하는 퍼지시스템을 이용하여 슬라이딩모드 제어에서의 채터링을 감소 또는 제거할 수 있는 새로운 전략을 제안하였다. 이 방식은 기존의 고정 경계층을 사용하는 방식에 비하여 정상상태 오차를 줄이거나 필요에 따라 적절히 조절할 수 있으며 같은 정도의 수렴속도를 보장한다. 또한 경계층을 시변으로 설정하는 기존의 방식에서 필요로 하는 슬라이딩 모드 이득의 적용을 필요로 하지 않는다. 또한 제한된 제어방식에서는 퍼지시스템의 출력변수의 범위를 적절히 조절함으로써 trade-off 관계에 있는 정상상태 오차와 채터링의 크기를 조절할 수 있다.

참고문헌

[1] U. Itkis, "Control systems of variable structure," John Wiley & Sons inc., New York, 1976.

[2] V. A. Utkin, "Variable structure systems with sliding mode," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. AC-22, no. 2, pp. 212-222, Apr. 1977

[3] V. A. Utkin, "Sliding modes and their applications in variable structure systems," Moscow: Mir, 1978.

[4] J. J. Slotine and S. S. Sastry, "Tracking control of non-linear systems using sliding surfaces with application to robot manipulators," *Int. Jpurnal of Control*, vol. 38, no. 2, pp. 465-492, 1983.

[5] J. J. Slotine and W. Li, "Applied nonlinear control," Prentice Hall, 1991.

[6] J. Y. Hung, W. Gao and J. C. Hung, "Variable structure control: A survey," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, Feb. 1993.

[7] 박재삼, "자기동조 경계층 범위를 갖는 적응 슬라이딩 모드제어," *제어·자동화·시스템공학회 논문지*, 제 6 권, 1 호, pp. 8-14, 2000.

[8] 함운철, 이태경, 문지운, "채터링 감소를 위한 퍼지 슬라이딩 모드제어," *Proc. of the 15th KACC*, pp. D425-D427, Oct. 2000.

[9] S. B. Choi, 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.

[10] 함운철, 김성태, 한종길, 임규만, "비선형 스위칭 평면을 이용한 슬라이딩 모드제어기의 설계," *제어·자동화·로보틱스연구회 합동학술발표대회논문집*, pp. 36-40, 1997.

[11] Y. Pan, K. Furuta and S. Hatakeyama, "Invariant sliding sector for variable structure control," *Proc. 38th Conf. Decision and Control*, pp. 5152-5157, 1999.

[12] K. B. Park and T. Tsuji, "Variable structure controller with chattering alleviation," *Proc. of IEEE Int. Conf. on System, Man and Cybernetics*, vol. 4, pp. 3544-3549. 1998.

[13] G. Bartolini and P. Pydynowski, "An improved, chattering free, VSC scheme for uncertain dynamical systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 41, no. 8, pp. 1220-1226, Aug. 1996.

[14] G. Bartolini, A. Ferrara and E. Usai, "Chattering avoidance by second-order sliding mode control," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 43, no. 2, pp. 241-246, 1998.

[15] 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, 1996.

저 자 소 개



유 병 국 (Byung Kook Yoo)

1992년 : 전북대학교 전자공학과(공학사)

1995년 : 전북대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)

1999년 : 전북대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)

현재 : 한려대학교 멀티미디어정보통신공학과 전임강사

관심분야 : 퍼지제어, 적응제어, 로봇제어, 가변구조제어

Phone : 061-760-1174

Fax : 061-761-6709

E-mail : bkyoo@hlu.hanlyo.ac.kr