



일차원 퍼지 규칙 슬라이딩 평면을 이용한 터미널 슬라이딩 모드 제어

Terminal Sliding Mode Control Using One Dimensional Fuzzy Rule Type Sliding Surfaces

서삼준*†

Sam-Jun Seo

*안양대학교 전기전자공학과

†Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Anyang University

요약

본 논문에서는 퍼지 슬라이딩 평면의 개념을 터미널 슬라이딩 평면의 기술기를 선정하는데 적용한 일차원 퍼지규칙 슬라이딩 평면을 이용한 터미널 슬라이딩 제어를 제안하였다. 터미널 슬라이딩 모드 제어의 개념을 확장하여 연속인 도달법칙을 가지는 터미널 슬라이딩 모드 제어 입력을 제안하였다. 컴퓨터 모의실험에서 제안한 제어기는 터미널 슬라이딩 모드 제어기 보다 빠른 수렴 특성과 채터링이 발생하지 않는 특성을 보여주었으며 일차원 퍼지 규칙을 사용하여 계산량이 작다는 장점을 가지고 있다.

키워드 : 터미널 슬라이딩 모드 제어, 적응 퍼지 제어, 채터링 완화, 퍼지 슬라이딩 표면

Abstract

In this paper, a new approach to the terminal sliding mode control using adaptive fuzzy sliding surfaces is proposed. The idea behind this approach is to utilize an adaptive sliding surface, in which the slope of the surface is updated on line using a SISO fuzzy logic inference system. We expanded the concepts of terminal sliding mode controller and proposed the terminal sliding mode control input with continuous reaching laws. The computer simulation results have shown the improved performance of the proposed control approach in terms of a decrease in the reaching and settling times and chattering free as compared to the conventional terminal sliding mode control with a fixed sliding surface. The proposed controller has also an advantage that has less computational burden to the conventional terminal sliding mode control using one-directional fuzzy rules.

Key Words : Terminal Sliding Mode Control, Adaptive Fuzzy Control, Chattering Free, Fuzzy Sliding Surfaces

Received: Jun. 24, 2016
Revised : Oct. 6, 2016
Accepted: Oct. 13, 2016
† Corresponding authors
ssj@anyang.ac.kr

1. 서론

슬라이딩 모드 제어 이론은 상태 벡터가 유한 시간 내에 상태 공간상에 정의된 특정한 슬라이딩 평면에 도달하는 도달 모드(reaching mode)와 슬라이딩 평면에 도달한 후 빠른 속도로 평면을 따라 원점으로 수렴하는 슬라이딩 모드(sliding mode)를 발생시켜 계통의 안정성과 함께 파라미터 및 외란에 대한 둔감성을 보장할 수 있다는 장점들을 가지고 있다.[1][4]

일반적인 슬라이딩 모드 제어기는 상태공간에서 슬라이딩 평면을 안정하게 설계하고 시스템의 상태가 이 슬라이딩 평면에 도달하도록 빠르게 스위칭하는 형태의 제어입력을 인가한다. 기존의 슬라이딩 모드 제어기법에서는 슬라이딩 평면을 주로 상태변수의 선형결합 형태의 함수를 사용하여 전체 슬라이딩 평면이 안정하도록 설계한다. 그런데 이러한 선형 슬라이딩 모드 평면은 지수 함수적으로 안정한 특징을 가지므로 오차가 0으로 수렴하는데 무한한 시간이 걸리는 단점이 있다.

최근에 이러한 일반적인 슬라이딩 모드 제어의 단점을 보완하여 터미널 슬라이딩 평면을 제안하여 유한한 기간 안에 오차가 0으로 수렴함을 보장하는 터미널 슬라이딩 모드 제어기를 제안하였으며[5], 이를 활용하여 여러 분야에 적용하고 있다.[6][10]

슬라이딩 모드 제어는 본질적으로 불연속 제어 입력을 인가함으로써 지연시간이 존재하는 실제

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

계통에 적용 시에는 제어기 설계 시 고려되지 않은 동특성이 여기 되어 상태가 채터링(chattering)하는 현상이 발생한다는 단점을 가지고 있다. 최근에 이러한 채터링을 감소시키기 위해 잘 정의되지 않은 복잡한 시스템에 적합한 퍼지 논리 제어기와 슬라이딩 모드 제어기를 결합한 퍼지 슬라이딩 모드 제어기가 제안되었다.[11][13]

본 논문에서는 이러한 터미널 슬라이딩 모드 제어기의 개념을 확장하여 연속인 도달법칙을 가지는 터미널 슬라이딩 모드 제어 입력을 제안하여 채터링을 완화하였고 퍼지 슬라이딩 평면의 개념을 확장하여 단일입력 단일출력 퍼지 추론 시스템을 이용하여 계산량을 줄여 터미널 슬라이딩 평면의 기울기를 선정하는데 적용한 일차원 퍼지 규칙 슬라이딩 평면을 이용한 터미널 슬라이딩 제어기를 제안하였다. 또한, 도립진자 계통의 안정화 문제와 트랙킹 문제에 적용하여 제안한 제어기의 유용성을 입증하였다.

2. 터미널 슬라이딩 모드 제어

다음과 같은 단일 입력 단일 출력(SISO) 비선형 시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(x) + g(x)u \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $f(x), g(x)$ 는 미지의 비선형 연속함수이며 $u \in R, y \in R$ 은 각각 계통의 입력과 출력이고, $x = [x_1 \ x_2]^T$ 는 측정 가능한 상태 벡터이다. 식 (1)의 계통이 제어 가능하기 위하여 $U_c \in R^2$ 인 가제어 공간 내의 모든 x 에 대하여 $g(x)$ 의 부호를 알고 있어야 한다. 즉, $x \in U_c$ 에 대해 $\|g(x)\| > 0$ 로 가정한다.

제어목적은 상태 벡터 x 가 원하는 상태 벡터 x_d 를 추종하는 것이다. 추종 오차를 다음과 같이 정의하자.

$$e = x - x_d = [e \ \dot{e}]^T \quad (2)$$

슬라이딩 모드 제어기는 다음과 같은 두 단계에 의하여 설계된다.

- 1) 원하는 특성을 가지는 슬라이딩 평면 설계

$$S = \{e \in R^2 \mid s(e) = 0\} \quad (3)$$

- 2) 시스템의 상태들을 슬라이딩 평면상에 머무르도록 하는 제어 입력 구성

$$u = \begin{cases} u^+ & \text{when } s > 0 \\ u^- & \text{when } s < 0 \end{cases} \quad (4)$$

원하는 특성을 가지는 슬라이딩 평면을 설계하기 위하여 일반적인 슬라이딩 모드 제어에서는 다음과 같은 슬라이딩 평면을 사용한다.

$$s = \dot{e} + \lambda e = 0 \quad (5)$$

여기서, $\lambda > 0$ 인 상수이다.

이러한 선형 슬라이딩 평면을 사용하면 오차가 점근 안정(asymptotic stable)이 됨을 보장한다. 다른 말로 표현하면 유한한 시간 내에 오차가 균형점에 이르지 못한다는 것이다. 최근에 이러한 선형 슬라이딩 모드 제어의 단점을 보완하기 위하여 터미널 슬라이딩 모드 제어가 제안되어 많은 응용분야에 사용되고 있다.

고전적인 터미널 슬라이딩 모드 제어에서 다음과 같은 슬라이딩 평면이 사용된다.

$$s = \dot{e} + \lambda e^\gamma = e_2 + \lambda e_1^\gamma = 0 \quad (6)$$

여기서, γ 은 $0 < \gamma < 1$ 을 만족하는 유리수이면서 분자 및 분모가 모두 홀수이다.

식 (6)의 터미널 슬라이딩 평면을 사용하면 도달모드 후($s = 0$) 임의의 $e(0) \neq 0$ 에서 $e(t_s) = 0$ 에 걸리는 시간 t_s 는 다음과 같이 유한하다.[12]

$$t_s = -\lambda^{-1} \int_{e(0)}^0 \frac{1}{e^\gamma} de = \frac{1}{\lambda(1-\gamma)} |e(0)|^{1-\gamma} \quad (7)$$

즉, 오차가 터미널 슬라이딩 평면 내에 머무르면 유한한 시간 내에 0이 됨을 의미한다.

본 논문에서는 터미널 슬라이딩 모드의 개념을 확장하여 다음과 같은 슬라이딩 평면을 사용한다.

$$s = \dot{e} + \lambda |e|^\gamma \text{sgn}(e) = e_2 + \lambda |e_1|^\gamma \text{sgn}(e_1) = 0 \quad (8)$$

여기서, γ 은 $0 < \gamma < 1$ 인 실수로 확장된다.

슬라이딩 모드 제어 설계 시 가장 중요한 부분이 도달조건이 만족되는 제어 입력을 선정하는 것이다. 일반적으로 많이 사용되는 방법 중의 하나가 다음과 같은 도달 법칙을 사용하는 것이다

$$\dot{s} = -k_1 s - k_2 \text{sgn}(s) \quad (9)$$

여기서, k_1 과 k_2 는 양수이고 s 가 임의의 초기값 $s(0)$ 에서 슬라이딩 평면($s = 0$)에 도달하는데 걸리는 시간은 다음과 같다.

$$t_r \leq \frac{|s(0)|}{k_2} \quad (10)$$

식 (10)으로부터 임의의 슬라이딩 평면의 초기상태 $|s(0)|$ 에서 슬라이딩 평면 $s = 0$ 에 도달하는 시간 t_r 이 유한하다는 것을 알 수 있다. 그러나 식 (9)의 도달법칙에 $sgn(s)$ 함수를 사용하기 때문에 불연속적인 입력을 사용하게 되어 채터링이 발생하는 단점이 생긴다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 다음과 같이 연속인 도달법칙을 가지는 제어 입력을 제안한다.

$$\dot{s} = -k_1s - k_2|s|^\rho sgn(s) \quad (11)$$

여기서, k_1 과 k_2 는 양의 상수이며 ρ 는 $0 < \rho < 1$ 인 설계상수이다. 식 (11)은 $sgn(s)$ 함수를 포함하고 있지만 $|s|^\rho$ 항에 의해 연속 입력을 사용하게 되어 채터링 현상이 발생하지 않는다.

정리 1 : 제어계통 (1)에 대해 다음과 같은 제어입력을 인가하면 추종오차 e 가 유한한 시간 안에 0에 도달함을 보장한다.

$$u = \left\{ \frac{\ddot{x}_d - f(x) + \gamma|e_1|^{\gamma-1}e_2sgn(e_1) + k_1s + k_2|s|^\rho sgn(s)}{g(x)} \right\} \quad (12)$$

증명: 다음과 같은 리아프노프 함수 후보를 설정하자.

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

리아프노프 함수 후보의 시간에 대한 미분은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} \\ &= s(e_2 + \gamma|e_1|^{\gamma-1}e_1sgn(e_1)) \\ &= s(\ddot{x}_d - f(x) - g(x)u + \gamma|e_1|^{\gamma-1}e_2sgn(e_1)) \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)에 식 (12)의 제어입력을 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} \\ &= -k_1s^2 - k_2|s|^{\rho+1} \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에서 k_1 과 k_2 는 양수이므로 s 가 초기치 $|s(0)|$ 에서 0에 도달하는데 걸리는 시간 t_r 은 다음과 같다.

$$t_r \leq \frac{|s(0)|^{\rho+1}}{k_2} \quad (16)$$

따라서, 식 (16)으로부터 시스템의 초기치가 어디에 있던지 유한한 시간 안에 제안한 터미널 슬라이딩 평면에 도달함을 알 수 있다. 또한 식 (10)과 식 (16)을 비교해 보면 제안한 터미널 슬라이딩 모드 제어에서 s 가 초기치 $|s(0)|$ 에서 0에 도달하는데 걸리는 시간 t_r 이 더 작다는 것을 알 수 있다.

3. 일차원 퍼지 규칙 슬라이딩 평면

최근에 제어성과 견실성을 개선하기 위하여 퍼지 시변 슬라이딩 평면을 기반으로 한 퍼지 슬라이딩 모드 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[13]. 본 논문에서도 이러한 점에 착안하여 퍼지 논리 제어를 터미널 슬라이딩 모드의 슬라이딩 평면의 기울기를 조정하는데 사용하고자 한다.

그림 1과 같은 터미널 슬라이딩 모드 평면을 고려하여 보자. 슬라이딩 평면 기울기가 작을수록 느린 오차 수렴 속도와 긴 추종 오차 시간을 보일 것이며 큰 기울기의 슬라이딩 평면은 빠른 오차 수렴 특성을 가지나 추종 정확도가 떨어진다. 그래서 추종 시간과 오차 수렴 시간 사이에는 상반관계(trade-off)가 있다. 따라서 최적의 슬라이딩 평면의 기울기를 얻기 위해 오차 e 와 오차의 미분 \dot{e} 값의 공간 상의 위치에 따라 λ 값을 결정하는 것이 효과적이다.

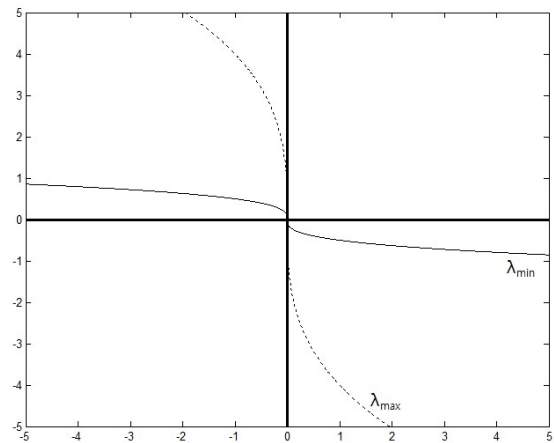


그림 1. 터미널 슬라이딩 평면
Fig. 1. Terminal sliding surfaces

Yagiz와 Hacioglu는 오차 e 와 오차의 미분 \dot{e} 을 입력 으로 하여 λ 를 출력하는 일차원 퍼지 규칙을 이용하여 슬라이딩 평면의 기울기를 추론하는 방법을 제안하였다.[14] 오차 e 와 오차의 미분 \dot{e} 은 $[-1, 1]$ 로 정규화하였으며 양수와 음수 값을 가질 수 있으나 슬라이딩 평면의 기울기 λ 는 안정도를 보장하기 위하여 양의 값만 가질 수 있다. 표 1에 퍼지 입력 언어 변수 NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB와 퍼지 출력 언어 변수 VVS, VS, S, M, B, VB, VVB를 가지는

이차원 퍼지 규칙을 제시하였다. 이러한 방법은 e 와 \dot{e} 의 상대적인 위치에 따라 슬라이딩 평면의 기울기가 결정되기 때문에 효과적인 장점이 있는 반면에 입력 언어 변수가 각각 7개로 49개의 규칙을 사용하기 때문에 계산량이 많다는 단점이 있다.

표 1. 이차원 퍼지 규칙
Table 1. Two dimensional fuzzy rules

\dot{e} / e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	M	B	VB	VVB	VB	B	M
NM	S	M	B	VB	B	M	S
NS	VS	S	M	B	M	S	VS
ZE	VVS	VS	S	M	S	VS	VVS
PS	VS	S	M	B	M	S	VS
PM	S	M	B	VB	B	M	S
PB	M	B	VB	VVB	VB	B	M

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 다음과 같은 변수 $e_d(t)$ 를 도입하여 퍼지규칙을 7개만 사용하여 계산시간을 줄이는 일차원 퍼지규칙 슬라이딩 평면을 제안한다.

$$e_d(t) = |e(t)| - \beta|\dot{e}(t)| \quad (17)$$

여기서, β 는 오차와 오차의 미분에 대한 상대적인 중요도를 고려하는 설계인자이다.

제안한 일차원 퍼지규칙은 오차가 클수록 λ_{\min} 에 가깝게 오차의 미분이 클수록 λ_{\max} 가깝게 λ 값이 선정된다.

표 2. 일차원 퍼지 규칙
Table 2. One dimensional fuzzy rules

e_d	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
λ	VVB	VB	B	M	S	VS	VVS

4. 컴퓨터 모의 실험 및 결과

제안한 퍼지 터미널 슬라이딩 모드 제어기의 유용성을 입증하기 위하여 다음과 같은 도립 진자 계통을 고려해보자.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{g \sin x_1 - \frac{mlx_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_c + m}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)} + \frac{\cos x_1}{m_c + m} u \quad (18) \\ &= f(x) + g(x)u \end{aligned}$$

여기서, 상태 x_1 과 x_2 는 그림 2와 같이 $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}$ 를 나타낸다. 또한 도립 진자의 각 파라미터는 표 3과 같다.

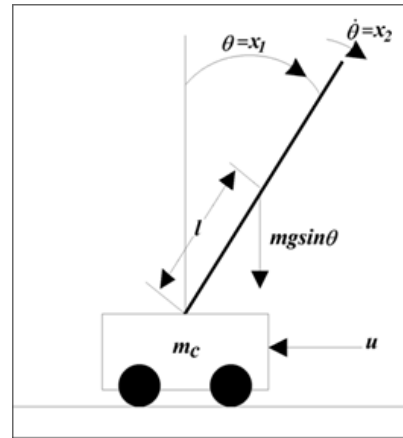


그림 2. 도립 진자 계통
Fig. 2. Inverted pendulum system

표 3. 도립 진자 계통의 매개변수들
Table 3. Parameters of inverted pendulum system

Parameter	Symbol	Value
Acceleration of gravity	g	$9.8m/s^2$
Mass of cart	m_c	$1Kg$
Mass of pole	m	$0.1Kg$
Length of pole	l	$0.5m$

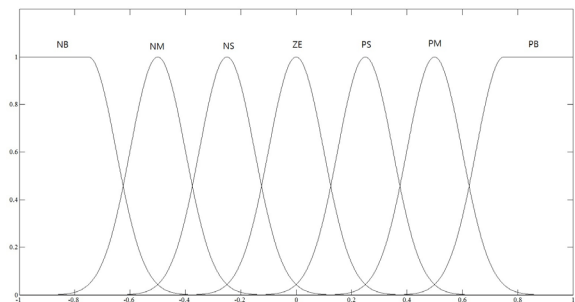


그림 3. 퍼지 입력 함수
Fig. 3. Fuzzy input function

컴퓨터 모의실험에 사용한 퍼지 입력 함수는 그림 3과 같은 Gaussian 소속 함수를 사용하였다. 퍼지 출력 함수는 퍼지 싱글톤 함수를 사용하였다.

다양한 상황에서 제안한 제어기의 우수성을 입증하기 위하여 도립진자의 안정화(Stablization)과 트래킹(Tracking) 문제에 적용하였다.

■ 안정화(Stablization) 문제

안정화의 제어 목적인 x_1 와 x_2 를 영으로 유지하기 위해 스위칭 함수는 다음과 같이 선정하였다.

$$\dot{s} = x_2 + \lambda|x_1|^\gamma \text{sgn}(x_1) = 0 \quad (19)$$

초기치는 $x(0) = [0.2 \ 0]^T$, 샘플링 시간은 0.001sec로 선정하였다. 식 (12)의 제어입력에서 $\gamma=0.7, \rho=0.5, k_1=1, k_2=1$ 로 사용하였고 식 (17)의 $\beta=0.2$ 로 선정하였다.

그림 4에 터미널 슬라이딩 모드 제어기(TMC)와 제안한 제어기(AFTMC)의 상태응답 x_1 을 표시하였고 그림 5에는 슬라이딩 평면 응답을 비교하였다.

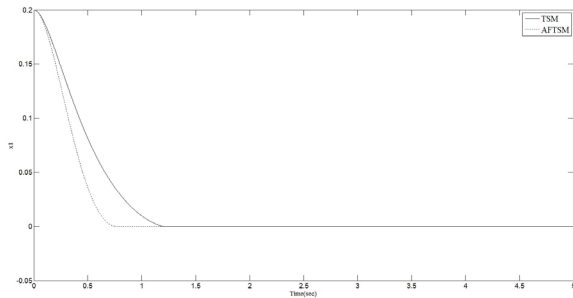


그림 4. 상태 응답 x_1 비교(안정화)
Fig. 4. Comparisons of state response x_1 (stabilization)

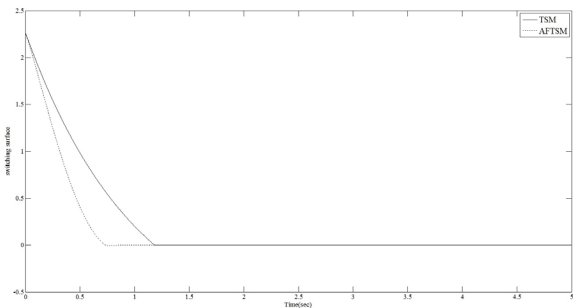


그림 5. 슬라이딩 평면 응답 비교(안정화)
Fig. 5. Comparisons of sliding surface response (stabilization)

안정화 문제에서 상태응답과 슬라이딩 평면 응답 모두 제안한 제어기의 응답이 터미널 슬라이딩 모드 제어기의 응답보다 빠르게 수렴하였다.

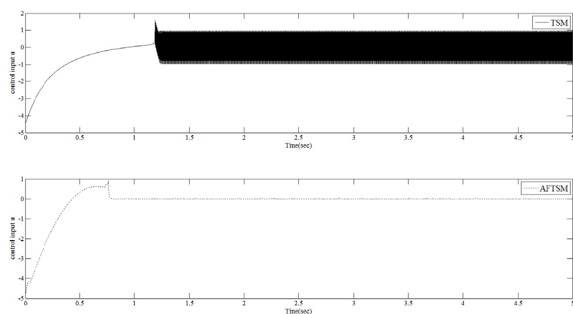


그림 6. 제어 입력 비교(안정화)
Fig. 6. Comparisons of control input (stabilization)

그림 6에는 제어입력을 비교하였는데 식 (9)를 사용한 터미널 슬라이딩 모드 입력에서는 채터링이 발생하였으나 제안한 제어기는 채터링이 발생하지 않음을 알 수 있다.

■ 트래킹(Tracking) 문제

트래킹 문제에서의 제어목적은 상태 벡터 x_1 가 원하는 상태 벡터 $x_d = \frac{\pi}{30} \sin(t)$ 를 추종하는 것이다. 이러한 제어 목적을 달성하기 위하여 스위칭 함수는 다음과 같이 선정하였다.

$$\dot{s} = e_2 + \lambda|e_1|^\gamma \text{sgn}(e_1) = 0 \quad (20)$$

제어입력은 식 (12) 초기치는 $x(0) = [0.2 \ 0]^T$, 샘플링 시간은 0.001sec로 선정하였으며 다른 파라미터 값은 안정화 문제에서와 같이 동일한 값을 사용하였다.

그림 7에 터미널 슬라이딩 모드 제어기(TMC)와 제안한 제어기(AFTMC)의 상태응답 x_1 을 표시하였다. 두 응답 모두 기준신호 $x_d = \frac{\pi}{30} \sin(t)$ 를 잘 추종하지만 제안한 제어기가 터미널 슬라이딩 모드 제어기 보다 더 빨리 기준신호를 추종한다.

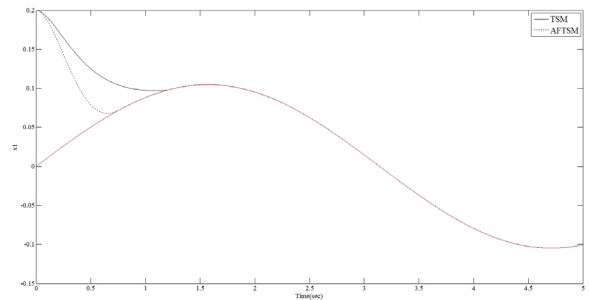


그림 7. 상태 응답 x_1 비교(트래킹)
Fig. 7. Comparisons of state response x_1 (tracking)

이러한 상황을 보다 자세히 알기 위해 그림 8에는 오차 응답을 비교하였으며 그림 9에는 슬라이딩 평면 응답을 비교하였다.

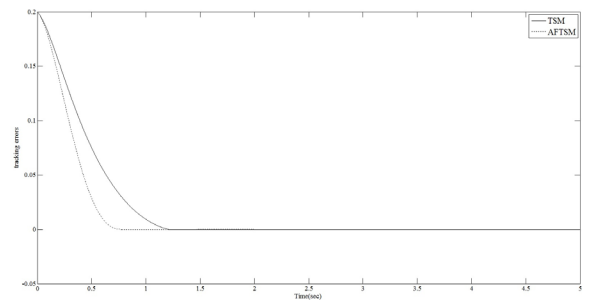


그림 8. 추종 오차 e_1 비교(트래킹)
Fig. 8. Comparisons of tracking error e_1 (tracking)

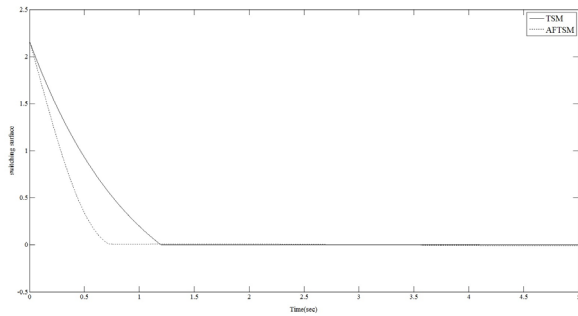


그림 9. 슬라이딩 평면 응답 비교(트래킹)
Fig. 9. Comparisons of sliding surface response(tracking)

트래킹 문제에서도 안정화 문제와 유사하게 추종오차와 슬라이딩 평면 응답 비교에서도 제안한 제어기의 응답이 터미널 슬라이딩 모드 제어기의 응답보다 빠르게 수렴하였다.

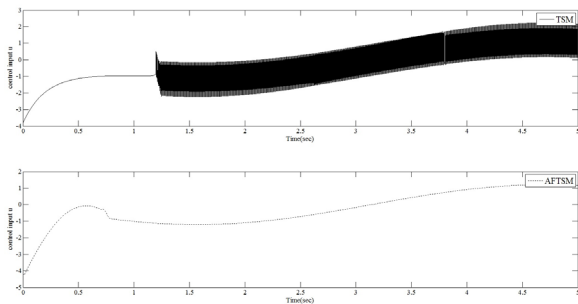


그림 10. 제어 입력 비교(트래킹)
Fig. 10. Comparisons of control input(tracking)

마지막으로 그림 10에는 제어입력을 비교하였는데 터미널 슬라이딩 모드 입력에서는 도달 모드 이후 슬라이딩모드에서는 채터링이 발생하였으나 제안한 제어기는 전 구간에서 채터링이 발생하지 않아 우수한 특성을 가짐을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 터미널 슬라이딩 모드 제어기의 개념을 확장하여 연속인 도달법칙을 가지는 터미널 슬라이딩 모드 제어 입력을 제안하여 채터링을 완화하였고 퍼지 슬라이딩 평면의 개념을 터미널 슬라이딩 평면의 기술을 선정하는데 적용한 일차원 퍼지 규칙 슬라이딩 평면을 이용한 터미널 슬라이딩 제어기를 제안하고 단일입력 단일출력 퍼지 추론 시스템을 이용하여 계산량을 줄였다.

도립진자 계통의 안정화 문제와 트래킹 문제에 적용하여 제안한 제어기의 우수성을 입증하였으며 터미널 슬라이딩 모드 제어기 보다 빠른 수렴 특성과 채터링이 발생하지 않으며 일차원 퍼지 규칙을 사용하여 계산량이 작다는 장점을 가지고 있어 실제 제어

시스템에 쉽게 적용이 가능하다.

References

- [1] B. K. Yoo and K. H. Yang, "Fuzzy Sliding Mode Control of Nonlinear System Based on T-S Fuzzy Dynamic Model" *Journal of Korea Institute of Intelligent Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 112-117, 2004.
- [2] B. J. Park and S. W. Kwak, "On the Design of Simple-structured Adaptive Fuzzy Logic Controllers" *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 93-99, 2003.
- [3] B. J. Choi, "Absolute Stability of the Simple Fuzzy Logic Controller" *Journal of Korea Institute of Intelligent Systems*, vol. 11, no. 7, pp. 574-578, 2001.
- [4] R. A. DeCarlo et al., "Variable structure control of nonlinear multivariable systems : a tutorial," *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 3, pp. 212-232, 1988.
- [5] M. Zhihong, A. P. Paplinski, and H. R. Wu, "A robust terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 39, no. 12, pp. 2464-2469, Dec., 1994.
- [6] Y. Feng, X. Yu, and Z. Man, "Non-singular terminal sliding mode control of rigid robotic manipulators," *Automatica*, vol. 38, pp. 2159-2167, 2002.
- [7] Y. Li and D. Fan, "Aero-engine variable structure global fast terminal sliding mode control method," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 51, No. 2, pp. 191-195, 2013.
- [8] C. Suttirak and C. Pukdeboon, "Finite-time convergent sliding mode controllers for robot manipulators," *Applied Mathematical Sciences*, vol. 7, no. 63, pp. 3141-3154, 2013.
- [9] X. Liu, H. Zhao, and H. Liu, "Adaptive fuzzy non-singular terminal sliding mode control for a class of uncertain nonlinear systems," *Journal of Information & Computational Sciences*, vol. 10, no. 4, pp. 1229-1236, 2013.
- [10] L. Young and F. Ding, "Aero-engine variable structure global fast terminal sliding mode control method," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 191-195, 2013.
- [11] Q. P. Ha, Q. H. Nguyen, D. C. Rye and H. F. Durrant-Whyte,

“Fuzzy sliding-mode controllers with applications,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 1, pp. 38-46, 2001.

- [12] X. Yu, Z. Man and B. Wu, “Design of fuzzy sliding-mode control systems,” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 95, No. 3, pp. 295-306, 1998.
- [13] J. Wang, A. B. Radb and P. T. Chan, “Indirect adaptive fuzzy sliding mode control: Part I: fuzzy switching,” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 122, No. 1, pp. 21-30, 2001.
- [14] N. Yagiz and Y. Hacioglu, “Fuzzy sliding modes for robust control of a planar robot,” *Journal of Vibration Control*, vol. 11, pp. 903-922, 2005.

저자 소개



서삼준(Sami-Jun Seo)

1989년 : 고려대학교 공과대학 전기공학 공학사

1991년 : 고려대학교 공과대학 전기공학
공학석사

1996년 : 고려대학교 공과대학 전기공학
공학박사

1997~현재 : 안양대학교 전기전자공학과 교수

관심분야 : Intelligent Control, Robotics, Automation

Phone : +82-31-467-08740

E-mail : ssj@anyang.ac.kr