

채터링 감소를 위한 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기의 설계

Design of Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller for Chattering Reduction

서삼준*, 김동원**, 박귀태**

Sam-Jun Seo, Dong-Won Kim*, and Gwi-Tae Park*

* 안양대학교 전기전자공학과

** 고려대학교 전기공학과

요 약

본 논문에서는 고전적인 슬라이딩 모드 제어에서 단점으로 나타나는 채터링을 감소시키고 도달 시간을 줄이기 위한 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 제안하였다. 전문가의 경험이나 직관에 주로 의존하는 제어 규칙의 획득을 쉽게 하기 위해 최대 경사법을 이용하여 슬라이딩 모드 조건이 만족되면서 채터링 현상을 줄이기 위한 제어 규칙의 결론부 파라미터를 수정하는 적응 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘은 고전적인 가변 구조 제어 시스템의 장점인 외란, 매개변수 변화와 불확실성에 둔감한 성질을 그대로 간직하고 있다. 제안한 알고리즘의 유용성을 보이기 위해 도립 진자 시스템에 적용한 결과 채터링 감소와 빠른 응답 특성을 얻을 수 있다.

Abstract

In this paper, we proposed an adaptive fuzzy sliding control algorithm using gradient descent method to reduce chattering phenomenon which is viewed in variable control system.

In design of FLC, fuzzy control rules are obtained from expert's experience and intuition and it is very difficult to obtain them. We proposed an adaptive algorithm which is updated by consequence part parameter of control rules in order to reduce chattering phenomenon and simultaneously to satisfy the sliding mode condition.

The proposed algorithm has the characteristics which are viewed in conventional VSC, e.g. insensitivity to a class of disturbance, parameter variations and uncertainties in the sliding mode. To demonstrate its performance, the proposed control algorithm is applied to an inverted pendulum system. The results show that both alleviation of chattering and performance are achieved.

Key words : sliding mode control, chattering reduction, fuzzy logic control, inverted pendulum

1. 서 론

가변 구조 제어 이론은 불연속적인 제어 입력을 이용하여 시스템의 구조를 의도적으로 가변 시킴으로써 강인한 제어 특성을 얻는 제어 기법으로, 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 있으며, 슬라이딩 모드시 동특성 방정식의 차수가 감소되어 제어기의 설계 및 해석이 용이한 장점들을 가지고 있다[1][2].

가변 구조 제어 이론은 본질적으로 불연속 제어 입력을 인가함으로써 지연시간이 존재하는 실제 계통에 적용 시에는 제어기 설계 시 고려되지 않은 동특성(unmodeled dynamics)이 여기 되어 상태가 채터링(chattering)하는 현상이 발생하고 도달 모드 시에는 가변 구조가 발생되지 않는 순수한

상태 궤환 만을 갖기 때문에 견실성을 보장 받지 못한다는 단점을 가지고 있다.

최근에 이러한 채터링을 감소시키기 위해 불연속적인 스위칭 함수인 $sgm(\cdot)$ 대신 경계층을 갖는 $sat(\cdot)$ 를 적용하는 연구[3-5]와 잘 정의되지 않은 복잡한 시스템에 적합한 퍼지 논리 제어기와 슬라이딩 모드 제어기를 결합한 퍼지 슬라이딩 모드 제어기가 제안되었다[5-8].

퍼지 슬라이딩 모드 제어기에서 가장 중요한 제어 규칙은 일반적으로 경험자의 직관이나 경험으로부터 얻어지고 그러한 제어규칙은 언어적 법칙이나 퍼지 관계로 표현된다. 그러나, 퍼지 제어 규칙을 얻는 체계적인 방법이 없고 거의 모든 경우 시행 착오에 의존하고 있는 실정이다.

이러한 문제점을 보완하기 위해 본 논문에서는 시행 착오 방법으로 조정되던 제어 규칙을 자동으로 찾아 주는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 제안하였다. $-s^2$ 가 최소가 되도록 최대 경사법을 적용하여 결론부 파라미터의 적응 알고리즘을 유도하여 채터링을 감소시켰다.

본 논문의 구성은 아래와 같다. 2장에서 가변 구조 제어 시스템에 대해 간략하게 설명한 후 3장에서는 퍼지 슬라이딩 모드 제어기에 대해 기술하며 4장에서는 제안한 적응 퍼지

접수일자 : 2004년 8월 23일

완료일자 : 2004년 10월 8일

슬라이딩 모드 제어기에 대해 기술하며 5장에서는 제안한 제어 알고리즘을 도립 진자 시스템에 적용하여 그 유용성을 입증하였고 마지막으로 6장에서는 결론에 대해 실었다.

2. 가변 구조 제어 시스템

다음과 같이 주어지는 비선형 방정식을 고려해 보자.

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)u \quad (1)$$

여기서, $x \in R^n$ 는 시스템의 상태 벡터이고, $f, g: R^+ \times R^n \rightarrow R^n$ 는 vector field, $u \in R$ 는 시스템에 인가되는 제어 입력이다. 가변 구조 제어기는 일반적으로 다음과 같은 두 단계에 의하여 설계된다.

- 1) 원하는 특성을 갖는 슬라이딩 평면 설계

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

- 2) 시스템의 상태 벡터들을 슬라이딩 평면상에 위치하도록 하는 제어 입력 구성

$$u = \begin{cases} u^+(x) & \text{when } s(x) > 0 \\ u^-(x) & \text{when } s(x) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

원하는 상태를 x_d 라고 하면 상태 오차는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\tilde{x} = x - x_d \quad (4)$$

일반적으로 스위칭 평면은 다음과 같이 정의한다.

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{x} \quad (5)$$

여기서, λ 는 양수로 선정한다.

일단 슬라이딩 모드가 일어나면 시스템은 매개변수 불확실성과 외란에 둔감하게 된다. 이 때, 상태를 슬라이딩 평면으로 도달하게 하는 조건을 결정하는 것이 중요하다. 이러한 조건을 도달 조건(reaching condition)이라 부른다.

이러한 도달 조건을 구하기 위해 다음과 같은 Lyapunov function candidate를 정의하자.

$$V(x, t) = \frac{1}{2} s^2(x) \quad (6)$$

여기서, $s(x)$ 는 스위칭 함수이고, $x \in R^n$ 는 시스템의 상태 벡터이다.

슬라이딩 모드를 존재하게 하는 도달 조건은 다음과 같이 구하여진다[2].

$$\dot{V}(x, t) = s(x)\dot{s}(x) < 0 \text{ for } x \in R^n - S \quad (7)$$

일반적으로 가변 구조 제어 시스템의 동특성은 도달 모드와 슬라이딩 모드로 이루어진다. 원하는 슬라이딩 모드 동특성은 적절한 스위칭 함수 $s(x)$ 를 설계함으로써 결정된다. 슬라이딩 모드 제어 설계에 있어서 중요한 부분이 도달 조건을 만족하는 제어 입력을 선정하는 것이다. 즉, 도달 모드 설계 시 원하는 시스템 동특성 뿐만 아니라 슬라이딩 모드를 얻을 수 있는 제어 입력을 결정하여야 한다.

본 논문에서는 다음과 같은 도달 법칙을 사용하였다.

$$\dot{s}(x) = -K \text{sgn}(s), \quad K > 0 \quad (8)$$

여기서, 수렴속도는 스위칭 이득 K 에 의해 결정된다.

스위칭 함수 $s(x)$ 를 식 (1)의 궤적에 따라 시간에 대해 미분을 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(x) &= \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} \dot{x} \\ &= \frac{\partial s}{\partial x} f(x) + \frac{\partial s}{\partial x} g(x)u = -K \text{sgn}(s) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)을 제어 입력에 대해 정리하면 다음의 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} u &= - \left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} \left[\frac{\partial s}{\partial x} f(x) + K \text{sgn}(s) \right] \\ &= u_{eq} + u_s \end{aligned} \quad (10)$$

$$u_{eq} = - \left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} \left[\frac{\partial s}{\partial x} f(x) \right] \quad (11)$$

$$u_s = - \left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} K \text{sgn}(s) \quad (12)$$

여기서, u_{eq} 는 등가 제어 입력이고, u_s 는 스위칭 제어 입력이다.

3. 퍼지 슬라이딩 모드 제어

도달 법칙을 갖는 슬라이딩 모드 제어 설계를 위해 제어 이득 K 에 대해서는 다음과 같은 사항을 고려하여야 한다.

1. 가변구조 제어 시스템의 불변성은 슬라이딩 모드에서만 존재하고 도달 모드에서는 시스템의 섭동이나 외란에 민감하다. 따라서, 슬라이딩 평면에 도달하는 시간을 최소화하는 것이 중요하다.
2. 도달 시간을 줄이는 한가지 방법이 큰 이득을 적용하는 것이지만 이것은 포화(saturation) 문제와 채터링(chattering) 현상을 발생시킨다.
3. 슬라이딩 모드시 제어 이득 K 를 작게 선정하면 채터링을 감소한다. 그래서 일단 시스템의 궤적이 슬라이딩 평면에 거의 도달하면 채터링을 줄이기 위해 가능한 한 K 를 작게 한다.

위의 항들을 고려하여 K 에 대한 제어 규칙을 얻기 위해 일반적으로 r 과 $|s|$ 를 퍼지 입력 변수로 선택한다. 여기서, r 은 원점과의 거리차 $r = \sqrt{e^2 + \dot{e}^2}$ 이며 $|s|$ 는 스위칭 평면과의 거리이다. 이러한 r 과 $|s|$ 를 크리스프 입력으로 사용하여 퍼지 규칙을 결정하기 위해 Z, S, M, L 의 네 가지로 각각 퍼지 분할한다. 제어 이득 K 에 대한 언어적 변수는 K_Z, K_S, K_M, K_L 로 각각 선정하였다.

K 에 대한 퍼지 제어 규칙은 표 1과 같다.

표 1. K에 대한 2 입력 1 출력 퍼지 규칙
Table 1. Two input one output fuzzy rule for K

s \ r	Z	S	M	K _M
Z	K _Z	K _Z	K _S	K _L
S	K _Z	K _S	K _M	K _L
M	K _S	K _S	K _M	K _L
L	K _S	K _M	K _L	K _L

이러한 2 입력 1 출력 퍼지 규칙은 결론부 파라미터의 수가 많아 제어규칙을 수정하는 적응 알고리즘의 수가 많아지기 때문에 다음과 같은 1입력 1출력 퍼지 규칙을 사용한다.

표 2. K에 대한 1 입력 1 출력 퍼지 규칙
Table 2. One input one output fuzzy rule for K

s	Z	S	M	L
K	K _Z	K _S	K _M	K _L

위의 규칙을 보면 상태가 원점에 가까이 있고 스위칭 함수에도 가까이 있는 경우에는 K의 값을 아주 작은 값으로 선정하여 채터링을 줄이고 상태가 원점에서 매우 멀리 떨어져 있고 스위칭 함수에서도 아주 멀리 떨어져 있는 경우에는 빠르게 슬라이딩 모드에 도달시키기 위해 K의 값을 크게 선정했다.

제어 이득 K를 추론하기 위해 제안한 제어 규칙을 사용하고 퍼지 관계의 합성은 Mamdani의 최대 최소 연산자를 사용했으며 비퍼지화법으로 면적 중심법(center of area method)을 사용하면 FLC에 의해 추론되는 제어 이득 K는 다음과 같다.

$$K = \frac{\mu_L K_L + \mu_M K_M + \mu_S K_S + \mu_Z K_Z}{\mu_L + \mu_M + \mu_S + \mu_Z} = \frac{\sum_j \mu_j K_j}{\sum_j \mu_j} \quad (13)$$

여기서, $J = \{L, M, S, Z\}$ 로 정의되는 색인집합(index set)이다.

4. 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어

퍼지 논리 제어기에 사용되는 제어 규칙은 전문가의 직관과 경험에 의해 얻어지며 언어적 규칙이나 퍼지 관계에 의해 표현된다. 그러나, 퍼지 규칙은 획득하기가 힘들어 제어기의 설계를 어렵게 한다. 따라서 논 논문에서는 최대 경사법을 이용하여 퍼지 제어 규칙을 자동으로 생성하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 제안한다.

적응 알고리즘은 시스템 궤적을 슬라이딩 모드에 머무르게 하는 제어 규칙의 결론부 파라미터를 수정하는 방법을 이용한다. 슬라이딩 모드 조건($s\dot{s} < 0$)이 만족된다면 스위칭함수는 0이 되고 원하는 시스템의 동특성을 얻을 수 있다. 이러한 슬라이딩 모드 조건에 의해 $-s\dot{s}$ 값을 최소화하는 방향으로 결론부 파라미터를 수정하면 채터링이 감소하고 도달 법칙에 슬라이딩 모드 조건도 만족이 된다.

최대 경사법에 이용하여 결론부 파라미터는 다음과 같이 수정된다.

$$\dot{K}_j = -\Gamma \frac{\partial(-s\dot{s})}{\partial K_j} = \Gamma \frac{\partial s\dot{s}}{\partial K_j} \quad (14)$$

여기서, Γ 는 적응 이득이다.

chain rule에 의해 식 (14)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{K}_j = \Gamma \frac{\partial s\dot{s}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial K_j} = \Gamma \frac{\partial s\dot{s}}{\partial u_{eq}} \frac{\partial u_{eq}}{\partial K_j} + \Gamma \frac{\partial s\dot{s}}{\partial u_s} \frac{\partial u_s}{\partial K_j} \quad (15)$$

식 (11)에 나타난 바와 같이 등가 제어 입력 u_{eq} 는 상태 x 에만 의존하기 때문에 $\frac{\partial u_{eq}}{\partial K_j} = 0$ 이다.

따라서, 식 (15)는 다음과 같이 된다.

$$\dot{K}_j = \Gamma \frac{\partial s\dot{s}}{\partial u_s} \frac{\partial u_s}{\partial K_j} \quad (16)$$

$\frac{\partial s\dot{s}}{\partial u_s}$ 를 구하기 위해 식 (9)의 양변에 s 를 곱하고 $u = u_{eq} + u_s$ 를 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$s\dot{s} = s \frac{\partial s}{\partial x} f(x) + s \frac{\partial s}{\partial x} g(x)(u_{eq} + u_s) \quad (17)$$

이 식을 u_s 에 대해 미분하면 $\frac{\partial s\dot{s}}{\partial u_s}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial s\dot{s}}{\partial u_s} = s \frac{\partial s}{\partial x} g(x) \quad (18)$$

식 (12)의 스위칭 입력에 식 (13)의 FLC에 의해 추론되는 제어 이득 K를 대입하면 다음과 같다.

$$u_s = -\left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} K \text{sgn}(s) = -\left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} \frac{\sum_j \mu_j K_j}{\sum_j \mu_j} \text{sgn}(s) \quad (19)$$

이 식을 K_j 에 대해 미분하면

$$\frac{\partial u_s}{\partial K_j} = -\left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} \frac{\mu_j}{\sum_j \mu_j} \text{sgn}(s) \quad (20)$$

이다.

마지막으로 식 (16)에 식 (18)과 식 (20)을 각각 대입하면 제어 규칙의 결론부 파라미터를 수정하는 적응 알고리즘을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\dot{K}_j = -\Gamma |s| \frac{\mu_j}{\sum_j \mu_j} \quad j = L, M, S, Z \quad (21)$$

5. 컴퓨터 모의 실험

본 논문에서 제안한 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기의 유용성을 입증하기 위하여 다음과 같은 도립 진자 계통을 고려해 보자.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{g \sin x_1 - \frac{m l x_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_c + m}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)} + \frac{\cos x_1}{m_c + m} u \\ &= f(x) + g(x)u \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, 상태 x_1 과 x_2 는 그림1과 같이 $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta}$ 를 나타낸다. 또한 도립 진자의 각 파라미터는 표 3과 같다.

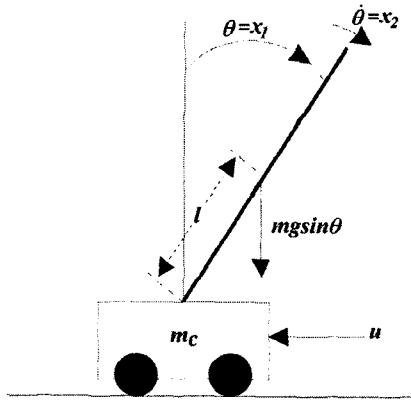


그림 1. 도립 진자 계통
Fig. 1. The inverted pendulum system

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

	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	$0.5m$

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

$$s(x) = cx_1 + x_2 = 0 \quad (23)$$

도달 모드 제어 입력은 다음과 같이 결정된다.

$$u_R = g^{-1}(x) [-f(x) - cx_2 - Ksgn(s)] \quad (24)$$

여기서, 등가 제어 입력은 다음과 같다.

$$u_{eq} = g^{-1}(x) [-f(x) - cx_2] \quad (25)$$

퍼지 규칙의 결론부 파라미터의 적응 법칙은 다음과 같다.

$$\dot{K}_j = -\Gamma |s| \frac{\mu_j}{\sum_j \mu_j} \quad j = L, M, S, Z \quad (26)$$

초기 조건은 $x_1(0) = 0.2(rad)$ 과 $x_2(0) = 0.0(rad/sec)$ 로 설정하고 스위칭 평면 상수 c 는 5로 사용하였고 샘플링 시간은 1msec으로 선정하였고 제어 입력에 대한 제약 조건은 부가하지 않았다.

컴퓨터 모의실험은 고전적인 가변 구조 제어기와 제안한

적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 사용하였을 때를 표 1의 제어규칙을 사용하였을 때와 표 2의 제어규칙을 사용하였을 때로 각각 나누어서 수행하였다.

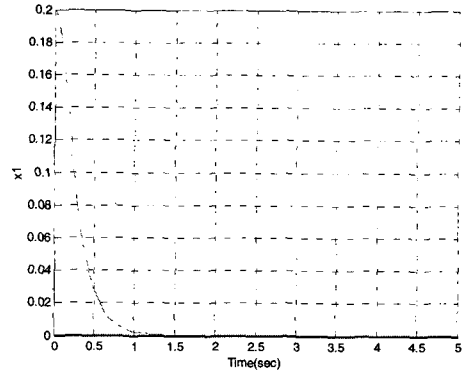


그림 2. x_1 의 시간 응답(가변 구조 제어기)
Fig. 2. Time response of x_1 (VSS)

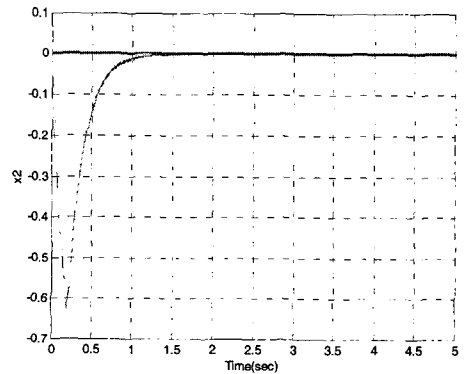


그림 3. x_2 의 시간 응답(가변 구조 제어기)
Fig. 3. Time response of x_2 (VSS)

제어 이득 $K=5$ 로 선정하였을 때의 고전적인 가변 구조 제어기의 응답을 그림 2에서5에 나타내었다. 그림 2와 3에는 상태 x_1 과 x_2 에 대한 시간 응답을 표시하였고 그림 4에는 위상 평면 응답을 그림 5에는 제어 입력을 나타내었다.

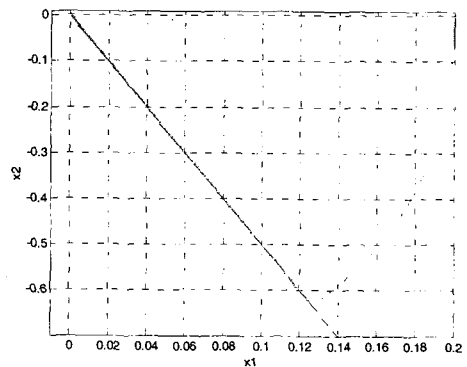


그림 4. 위상 평면 응답(가변 구조 제어기)
Fig. 4. Phase plane response(VSS)

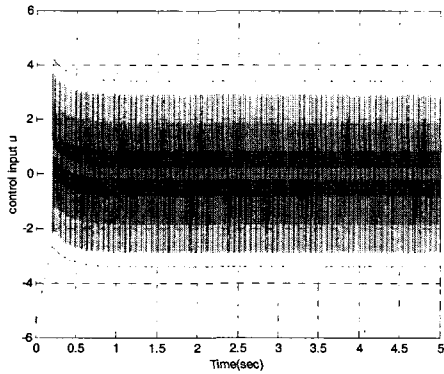


그림 5. 제어 입력 u (가변 구조 제어기)
Fig. 5. Control input u (VSS)

가변 구조 제어기를 사용하였을 경우에는 빠른 응답 특성을 보이는 반면 그림 5에서와 같이 제어 입력에 큰 채터링이 발생함을 알 수 있다.

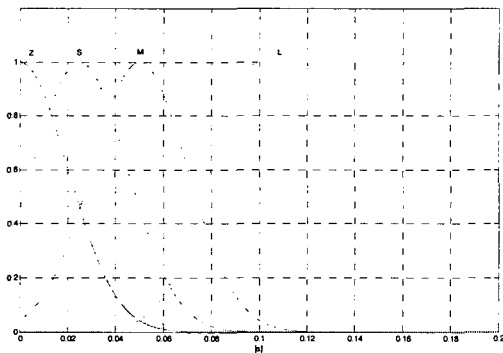


그림 6. $|s|$ 의 소속 함수
Fig. 6. Membership function of $|s|$

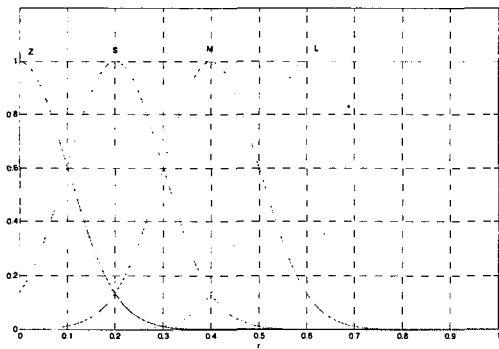


그림 7. r 의 소속 함수
Fig. 7. Membership function of r

제안한 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기에서 결론부 파라미터의 초기값은 $K_L = 5.0$, $K_M = 2.0$, $K_S = 0.5$, $K_Z = 0.0$ 을 적용 이득 $\Gamma = \text{diag}(10, 400, 400, 0)$ 로 선정하였다.

제안된 제어 알고리즘에 사용된 퍼지 입력 변수 $|s|$ 과 r 의 소속함수는 각각 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

제안한 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기에 대한 컴퓨터 모의 실험 결과를 그림 8에서그림 15까지 나타내었다. 그림 설명에서 1입력 1출력 제어 규칙을 사용하였을 경우 Type1으로 표시하였고 2입력 1출력 제어 규칙을 사용하였을 경우 Type2로 표시하였다. 그림을 동시에 비교하였을 경우에는 Type1에는 '4', Type2에는 '16'의 legend를 각각 사용하였다. 그림 8과 9에는 제안한 제어기의 x_1 과 x_2 에 대한 시간 응답을 각각 비교하여 표시하였고 그림 10에는 위상 평면 응답을 그림 11는 Type1의 제어 입력을 그림 12에는 Type2의 제어 입력을 각각 나타내었다. 그리고 그림 13과 14에는 결론부 파라미터의 응답을 마지막으로 그림 15에는 추론된 제어 이득 K 를 각각 비교하여 나타내었다. 컴퓨터 모의 실험 결과 제안한 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기는 고전적인 가변 구조 제어기와 비슷한 시스템 응답을 보이면서도 채터링 현상은 현저히 감소하였음을 알 수 있다.

2입력 1출력 제어 규칙을 사용하였을 경우와 1입력 1출력 제어 규칙을 사용하였을 경우에 거의 비슷한 응답 특성을 가지지만 2입력 1출력 제어 규칙을 사용하였을 경우 슬라이딩 평면에 좀 더 빨리 도달함을 알 수 있다.

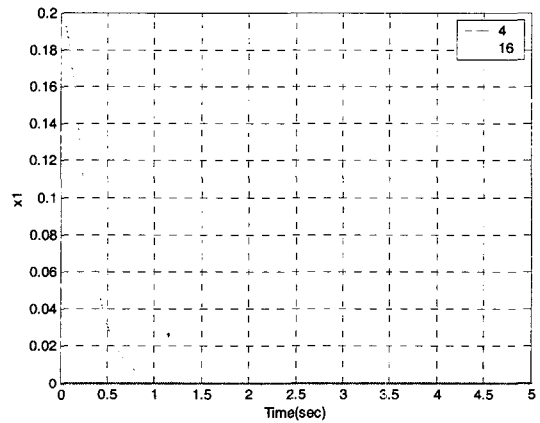


그림 8. x_1 의 시간 응답(제안한 제어기)
Fig. 8. Time response of x_1 (The proposed controller)

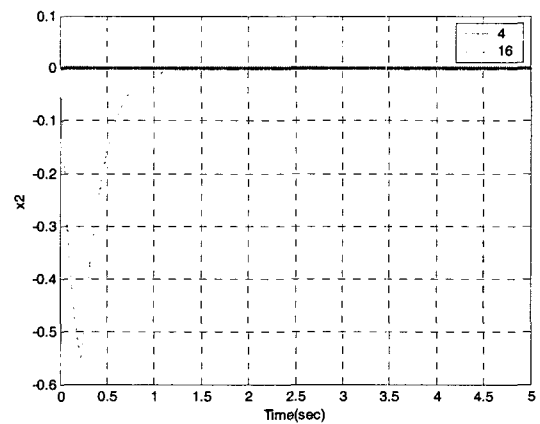


그림 9. x_2 의 시간 응답(제안한 제어기)
Fig. 9. Time response of x_2 (The proposed controller)

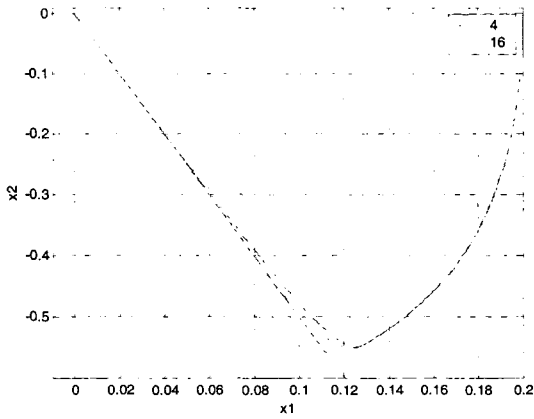


그림 10. 위상 평면 응답(제안한 제어기)
Fig. 10. Phase plane response(The proposed controller)

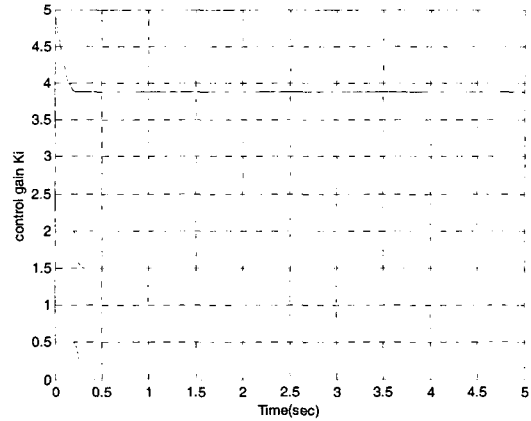


그림 13. 결론부 파라미터(Type 1)
Fig. 13. Consequence parameter(Type 1)

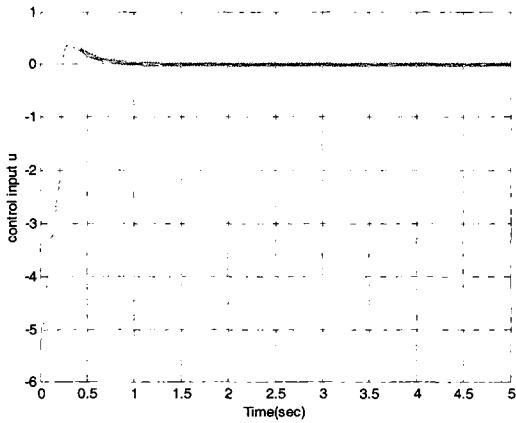


그림 11. 제어 입력 u (Type 1)
Fig. 11. Control input u (Type 1)

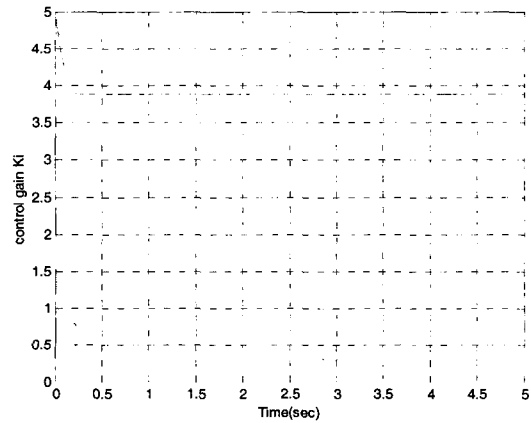


그림 14. 결론부 파라미터(Type 2)
Fig. 14. Consequence parameter(Type 2)

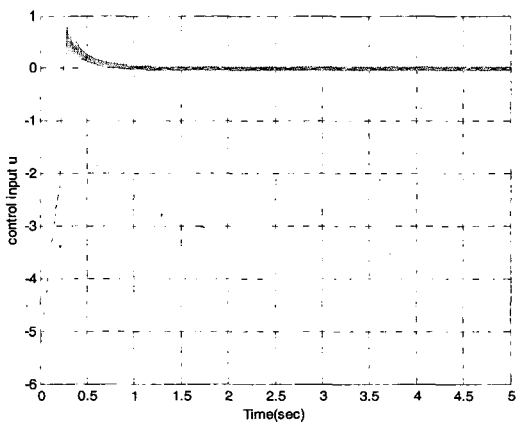


그림 12. 제어 입력 u (Type 2)
Fig. 12. Control input u (Type 2)

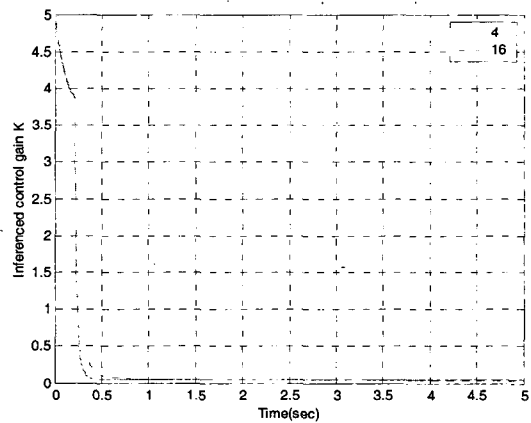


그림 15. 추론된 제어 이득 K (제안한 제어기)
Fig. 15. Inferred control gain K

6. 결 론

본 논문에서는 고전적인 슬라이딩 모드 제어에서 단점으로 나타나는 채터링을 감소시키고 도달 시간을 줄이기 위한 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 제안하였다. 전문가의 경험이나 직관에 주로 의존하는 제어 규칙의 획득을 쉽게 하기 위해 최대 경사법을 이용하여 슬라이딩 모드 조건이 만족되면서 채터링 현상을 줄이기 위한 제어 규칙의 결론부 파라미터를 수정하는 적응 알고리즘을 제안하였다.

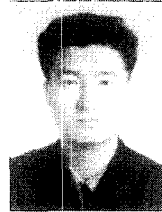
컴퓨터 모의 실험 결과 제안된 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기는 외란과 매개변수 불확실성에 강인한 고전적인 가변 구조 제어기의 특성을 그대로 유지하면서 채터링을 감소시키는 효과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] DeCarlo, R. A. et al., "Variable structure control of nonlinear multivariable systems : a tutorial", *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 3, pp. 212-232, 1988.
- [2] J. Y. Hung, W. Gao, and J. C. Hung, "Variable structure control: A Survey", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 2-17, 1993.
- [3] D. Q. Zhang and S. K. Panda, "Chattering-free and fast-response sliding mode controller", *IEE proceedings D*, vol. 146, no. 2, pp. 171-177, 1999.
- [4] P. Kachroo and M. Tomizuka, "Chattering reduction and error convergence in the sliding mode control of a class of a nonlinear systems", *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 41, no. 7, pp. 1063-1068, 1996.
- [5] 박재삼, "자기동조 경계층 범위를 갖는 적응 슬라이딩 모드 제어", *제어자동화시스템공학 논문지*, 제6권, 제1호, pp. 8-14, 2000.
- [6] C. G. Lhee, J. S. Park, and H. S. Ahn, "Sliding-like fuzzy logic control with self-tuning the dead zone parameter", *1999 IEEE Int. Fuzzy Systems Conf. Proc.*, pp. 544-549, 1999.
- [7] Palm, R., "Robust control by fuzzy sliding mode", *Automatica*, vol. 30, no. 9, pp. 1429-1437, 1994.

- [8] S. W. Kim and J. J. Lee, "Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 71, pp. 359-367, 1995.
- [9] 이태경, 한종길, 함운철, "채터링 감소를 위한 퍼지 슬라이딩모드 제어", *제어자동화시스템공학 논문지*, 제7권, 제5호, pp. 393-398, 2001.
- [10] 유동상, "불확실성의 Fredholm 적분 수식화를 통한 적응가변구조제어기 설계", *제어자동화시스템공학 논문지*, 제9권, 제9호, pp. 658-663, 2003.

저 자 소 개



서삼준(Sam-Jun Seo)

1997년~현재 안양대학교 전기전자공학과 조교수

관심분야 : 퍼지이론, 신경망 이론,, 유전자 알고리즘, 퍼지 슬라이딩 모드 제어, 지능 로봇, 원격 조종 시스템, 자동화 시스템

Phone : 031-467-0874

Fax : 031-467-0800

E-mail : ssj@anyang.ac.kr



김동원(Dong-Won Kim)

2002년~현재 고려대학교 대학원 전기공학과 박사수료

관심분야 : 소프트 컴퓨팅 기반 뉴로-퍼지 시스템, GMDH-Type 알고리즘, 유전자 알고리즘, Type 2 FLS, 시스템 모델링, 지능 Robotics, 지능제어



박귀태(Gwi-Tae Park)

1981년~현재 고려대학교 전기공학과 교수
2000년~현재 (사) IBS Korea 회장

관심분야 : 퍼지이론, 신경망 이론,, 유전자 알고리즘, 지능 Robotics, 지능제어, 인텔리 전트빌딩, 신호처리