

AC 서보 모터의 고성능 제어를 위한 퍼지 슬라이딩 모드 제어기

Fuzzy Sliding Mode Controllers for High Performance Control of AC Servo Motors

°김광수*, 조동일**

서울대학교 전기공학부 및 제어계측신기술연구소

*Tel: +82-02-889-4238, Fax: +82-02-889-4239, E-mail: barney@asri.snu.ac.kr

**Tel: +82-02-880-8371, Fax: +82-02-882-4658, E-mail: dichon@asri.snu.ac.kr

Abstracts Variable Structure Controller(VSC) is usually known to have robustness to bounded exogenous disturbances. The robustness is attributed to the discontinuous term in the control input. However, this discontinuous term also causes an undesirable effect called chattering. To alleviate chattering, a hybrid controller consisting of VSC and Fuzzy Logic Controller(FLC) is proposed, which belongs to the category of Fuzzy Sliding Mode Controller(FSMC). The role of FLC in FSMC is to replace a fixed gain of a discontinuous term with a time-varying one based on a specified rule base. The characteristics of proposed controller are shown to be similar to those of VSC with a saturation function instead of sign function. The only remarkable difference is the nonlinearity whose form can be adjusted by free parameters, normalize gain, denormalize gain, and membership functions. Applied to AC servo motor, the proposed controller is compared with VSC in a regulation problem as well as a speed tracking problem. The simulation results show a substantial chatter reduction.

Keywords Fuzzy Sliding Mode Control, Variable Structure Control, AC servo motor

1. 서론

가변구조 제어기법(Variable Structure Control : VSC)은 유계(bounded)인 외란에 대해 견실하다고 알려져 있는 비선형제어 기법이다. 이러한 견실성(robustness)은 VSC의 가장 큰 특징이면서 주요한 장점이지만, 이와 함께 VSC는 채터현상(chattering)이라는 단점을 가지고 있다. VSC의 견실성은 불연속 함수인 부호함수에 바탕한 빠른 스위칭으로부터 얻어지는 것인데, 유한한 샘플링시간으로 인하여 채터현상이 나타나게 된다. 채터현상은 많은 경우 모델링되지 않은 시스템의 고주파 동적 특성을 유발시키거나, 시스템의 소자들에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있기 때문에[3], 실제 VSC의 응용에 가장 큰 걸림돌이 되어왔다. 이러한 이유로 실제 응용을 위해 채터현상을 줄이기 위한 여러 연구가 진행되어 왔다. 참고문헌 [8]은 부호함수 대신에 포화함수를 이용하고, 참고문헌[2, 5]은 외란관측자를 이용하였다. 채터현상을 줄이기 위한 또 하나의 방법은 퍼지논리(fuzzy logic)를 이용하는 것이다. 이것은 퍼지슬라이딩모드 제어기법(Fuzzy Sliding Mode Control : FSMC)이라 불리는 범주의 한 부류가 된다.

FSMC는 크게 두 가지의 접근방법으로 구별된다. 첫 번째 접근방법은 퍼지논리제어기(Fuzzy Logic Control : FLC)와 VSC와의 유사성으로부터 출발한 것이다[7]. 두 번째의 방법은 고정되어 있는 VSC의 파라미터의 일부를 퍼지논리를 이용하여 시변(time-varying)으로 하는 것이다[1, 6, 10]. 본 논문에서는 이 두 번째의 접근 방법을 바탕으로 제어기를 설계하고, 안정성 해석을 새로 추가한다.

2. 가변구조제어와 퍼지논리

2.1. 가변구조제어

다음과 같은 이차 비선형 시스템을 생각한다.

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

여기서 $x(t) = (x, \dot{x})^T$ 는 상태벡터, u 는 제어입력이다. 그리고,

$f(x, t)$ 에 대한 추정 불확실성이 유계되었다고 가정한다. 즉, 다음을 가정한다.

$$f(x, t) = \tilde{f}(x, t) + \Delta f(x, t), \quad |\Delta f(x, t)| \leq F \tag{2}$$

슬라이딩평면(sliding surface)을 다음처럼 정의한다.

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)e = \dot{e} + \lambda e = 0 \tag{3}$$

여기서 $e(t)$ 는 추종오차이다. 슬라이딩평면을 이용하여 다음과 같은 리야푸노프(Lyapunov) 함수를 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} s^2 \tag{4}$$

임의의 초기 조건에서 슬라이딩 평면에 도달하기 위한 충분조건, 즉 (1)의 안정성 보장에 대한 충분조건은 다음과 같다.

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

(5)로부터 도달조건(reaching condition)을 얻는다.

$$s \cdot \text{sgn}(s) \leq -\eta \tag{6}$$

(6)의 식을 만족하면, 비선형 시스템 (1)은 상태궤적이 일단 슬라이딩평면에 도달한 후 슬라이딩 평면 위에 머물면서 $e=0$ 으로 미끄러져 들어가는 슬라이딩 모드(sliding mode)로 들어가게 된다. 가변구조제어의 제어 입력은 다음과 같다.

$$u_{SMC} = -\tilde{f} + \ddot{x}_d - \lambda \dot{e} - k_m \cdot \text{sgn}(s) \tag{7}$$

여기서, k_m 은 $F + \eta$ 의 상한값이다.

2.2. 퍼지논리제어

퍼지제어시스템의 가장 큰 특징은 시스템의 동적 특성이, 수식이 아닌 언어적 표현으로 된 규칙(rule)의 집합에 의해 특징 지워진다는 점이다. 그림 1은 일반적인 퍼지 시스템의 구조이다.

크리스프값은 소속 함수(membership function)라는 것을 통해 퍼지값으로 변환된다. 이 과정을 퍼지화(fuzzify)라고 하고, 퍼지 집합 F의 소속 함수, μ_F 는 D가 크리스프값의 정의역이라 하면, $\mu_F : D \rightarrow [0, 1]$ 와 같이 사상(mapping)으로 정의된다.

x, y, z는 언어적 변수(linguistic variable)이고, Ai, Bi, Ci

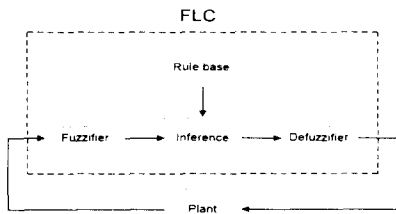


그림 1 일반적인 퍼지시스템 구조
Fig. 1 The general structure of FLC

($i=1, 2, \dots, n$)은 언어적 변수값(linguistic value)라고 할 때, rule base의 모양은 대개 다음과 같이 If-then의 형태로 표현된다.

$$R_i : \text{IF } (x \text{ is } A_i) \text{ and } (y \text{ is } B_i), \text{ THEN } (z \text{ is } C_i) \quad (8)$$

퍼지화된 값들은 룰베이스와의 합성 연산(composition operation)에 의해 추론되고, 무게중심법(center of gravity)등을 통해 크리프화되어 플랜트의 제어입력으로 들어가게 된다.

3. 퍼지슬라이딩모드 제어기

3.1. 제어기의 구조

제안된 제어기의 전체적인 구조는 그림 2와 같다.

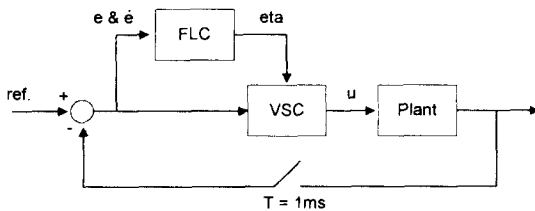


그림 2 전체 제어기 구조
Fig. 2 Overall controller structure

FLC의 세부적인 구조는 그림 3과 같다.

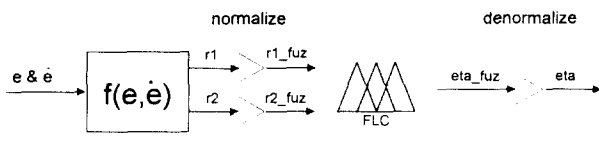


그림 3 FLC의 세부구조
Fig. 3 The Inner structure of FLC

제어기의 튜닝 파라미터는 정규화 이득(normalize gain), 역정규화 이득(denormalize gain), 그리고 FLC내에서 소속 함수의 구간변화등이다.

3.2. Rule Base 생성

그림 4를 바탕으로 하여 룰베이스를 얻어낸다. 슬라이딩 평면과 대표점(representative point : RP)과의 거리($r1$)와 원점으로부터 RP까지의 거리($r2$)를 퍼지제어기의 크리프 입력으로 하였고, 각 입력에 대한 η_{fuzzy} 가 출력으로 나오도록 하였다. 이것은 참고문헌[10]의 방법과 유사한데, 다른 점은 FLC의 출력이 η_{fuzzy} 하나만 되게 하였고, $r2$ 의 계산에 슬라이딩평면의 값 s 를 이용하였다는 점이다. 이러한 점들은 FLC의 출력이 두 개이고, $r2$ 의 계산에 \sin 함수나 atan 함수등을 이용한 참고문헌[10]의 경우보다 규칙의 개수를 반으로 줄이고, 제어기의 계산량을 줄이는 측면에서 장점을 가진다. 또 다른 특징은 정규화 이득과 역

정규화 이득을 이용하였다는 점인데, 이러한 파라미터는 상평면(phase plane)에서 그리고 안정성 분석에서 물리적 의미를 가지게 된다.

룰베이스는 일반적인 FLC와 같이 If-then의 형태를 갖는다.

$$\text{IF } (r1 \text{ is } \dots) \text{ and } (r2 \text{ is } \dots) \text{ THEN } (\eta_{fuzzy} \text{ is } \dots)$$

여기서 $r1 = |s| / \sqrt{\lambda^2 + 1}$, $r2 = \sqrt{e^2 + \dot{e}^2}$ 이다.

본 논문에서는 슬라이딩 평면 또는 원점으로부터의 거리가 먼 수록 큰 제어입력이 필요하고, 거리가 가까울수록 작은 제어입력으로도 충분하다는 발견적인(heuristic) 관점에서 설계되었고, 전실성 보장조건 $ss < 0$ 는 역정규화 이득이 담당하도록 하였다.

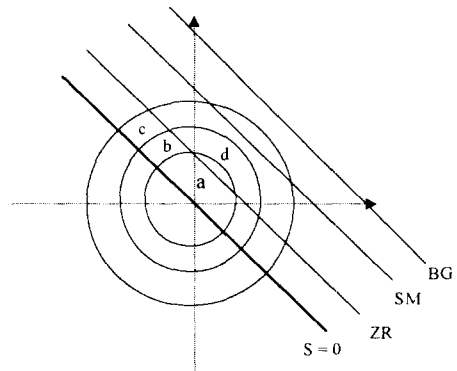


그림 4 룰베이스를 얻기 위한 상평면
Fig. 4 A phase plane for a rule base

FLC의 퍼지화된 입력과 출력이 각각 5개의 영역을 가질 때의 룰베이스는 표 1과 같다. 표 1에서 음영으로 표시된 부분은 $r1$ 과 $r2$ 에 대한 정규화 이득이 같은 값일 때, 상평면으로부터 물리적으로 불가능하다고 생각되어 생략한 부분이다. 이것은 규칙의 개수를 줄이기 때문에 실시간 제어기 구현을 용이하게 한다.

표 1 퍼지영역이 5개일 때의 룰베이스

TABLE 1 The rule base when fuzzy region is 5

$r2 \backslash r1$	ZR	SM	MD	BG	VB
ZR	ZR	ZR			
SM	ZR	SM	SM		
MD	SM	SM	MD	BG	
BG	SM	MD	MD	BG	VB
VB	MD	MD	BG	VB	VB

3.3. 제어기 분석

$r1 = |s| / \sqrt{\lambda^2 + 1}$ 의 관계가 있으므로, s 와 η_{fuzzy} 의 관계를 살펴보기 위해 $r2$ 의 값을 일정하게 고정시키고, $r1$ 만을 퍼지제어 입력으로 하면, 그림 5에서 볼 수 있듯이 FSMC는 VSC에서의 부호함수 대신에 일반적인 형태의 포화함수를 쓰는 경우가 됨을 알 수 있다. 단지 VSC에서의 부호함수와 다른 점은 비선형성을 가지는 구간을 퍼지 경계층이라고 한다면, FLC 자체가 이미 비선형성을 가지고 있으므로, 퍼지 경계층내에서 선형이 아닌 비선형의 형태를 가진다는 것이다.

튜닝 파라미터와 이러한 일반적인 형태의 비선형 포화함수와 사이의 관계는 다음과 같은 관계를 발견할 수 있다.

- 입력단의 소속함수의 경계점들과 비선형 포화함수의 미분불가능한 점들은 일치한다.
- 출력단의 소속함수의 변화는 비선형 포화함수의 미분불가능한 점들사이에서의 비선형의 모양을 변화시킨다.
- η_{fuzzy} 의 최대값은 정규화 및 비정규화 이득이 결정한다.

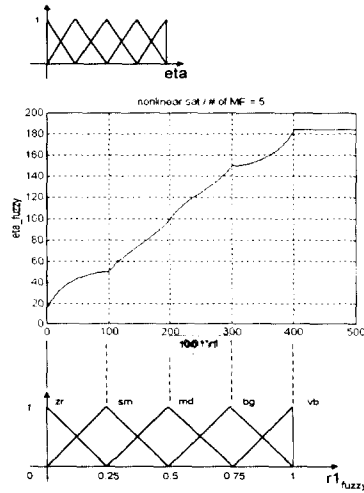


그림 5 비선형 포화함수
Fig. 8 A nonlinear saturation function

3.4. 견실안정성 보장

FSMC의 안정성 분석은 FLC에 대한 명확한 안정성 분석이 없는 것과 마찬가지로 아직 이에 대한 절대적인 결과를 보고하는 연구는 없는 것 같다. 참고문헌 [4]는 룰베이스를 얻는 단계에서 $ss < 0$ 을 만족하도록 체계적인(systematic) 접근을 하였기 때문에, 룰베이스 자체에서 안정성을 보장하게끔 하였다. 참고문헌 [9]는 상평면을 입력 퍼지 집합으로 나누고, 이렇게 나누어서 생기는 각 부분영역들에서 하나 하나 분석을 함으로써, 준슬라이딩(quasi-sliding) 영역이 존재함을 증명하였다. 이 방법은 체계적이기는 하나, 퍼지 집합이 고정되어 있어서, 너무 제한적이라는 단점이 있다.

본 논문에서는 튜닝 파라미터중의 하나인 역정규화 이득의 조정으로 VSC의 도달법칙을 만족함을 보이고자 한다. 그림 3에서 보면 FLC의 출력은 0과 1사이의 값을 갖는다. 이 값이 역정규화 이득과 곱해져서 실제 사용되는 η_{fuzzy} 가 되므로, VSC에서 파라미터 불확실성과 외란을 고려하여 $ss < 0$ 가 만족되도록 하는 η_{min} 보다 크도록 역정규화 이득의 값을 조정해준다. 즉, 역정규화 이득(α)을 곱하기 전의 FLC로부터의 출력값을 η_{FLC} 라 하면, $\eta_{fuzzy} > \eta_{min}$ 을 만족하도록 α 의 범위를 정할 수 있다.

$$\eta_{fuzzy} = \alpha \cdot \eta_{FLC} > \eta_{min} \quad (9)$$

여기서 η_{min} 은 파라미터 불확실성과 외란의 상한값이 모두 최대일 때의 값으로 알려져 있는 값이고, 그 때의 η_{FLC} 는 최대값인 1의 값을 가질 것이므로, (9)로부터 α 의 범위를 정할 수 있다. 그리고 이것은 FSMC에서 $ss < 0$ 을 보장한다.

4. 모의실험 결과

모의실험에 사용할 플랜트는 다음과 같이 모델링되는 AC 서보 모터이다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= K(u - x_2) - \frac{d}{J} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 d 는 외란, J 는 회전 관성(inertia), u 는 제어입력, K 는 모터상수이다. 모의실험은 레귤레이터 문제와 사다리꼴 입력 응답에 대해 각각 VSC와 결과를 비교하여 본다.

실험 조건은 표 2에 정리되어 있다. 이 때 같은 실험조건을

위하여 VSC의 η 값과 FSMC의 역정규화 이득을 800으로 같게 하였다. 이것은 FSMC의 η_{fuzzy} 의 최대값이 VSC의 η 과 같게 됨을 의미한다.

표 2 실험 조건
TABLE 2 Experimental conditions

	η	λ	정규화 이득	역정규화 이득
FSMC	.	20	0.25 (r1 & r2)	800
VSC	800	20	.	.

그림 6과 그림 7은 초기값을 $(x_1, x_2) = (-2, 0)$ 으로 주었을 때, FSMC와 VSC의 레귤레이션 결과이다. 각각의 (a)는 위치 오차, (b)는 속도 오차, (c)는 제어 입력, (d)는 상계적(phase plot)을 도시한 것이다. 위치 오차와 속도 오차가 FSMC의 경우가 VSC의 경우보다 더 작아지고, 채터현상도 현저하게 줄어들음을 볼 수 있다.

그림 8과 그림 9는 초기값을 $(x_1, x_2) = (0, 0)$ 일 때, 가속도의 크기가 $16.67(\text{rad}/\text{sec}^2)$ 이고, 최대 크기가 $5(\text{rad}/\text{sec})$ 인 사다리꼴 입력을 주었을 때의 응답 결과이다. 각각의 (a)는 위치 오차, (b)는 속도 추종, (c)는 제어 입력, (d)는 전환 함수 s 의 값을 도시한 것이다. 역시 채터 현상이 많이 줄어들음을 알 수 있다. 이 경우는 위치 오차가 VSC보다 FSMC가 약간 더 크게 나타나지만, 역시 채터 현상이 많이 줄어들음을 알 수 있다.

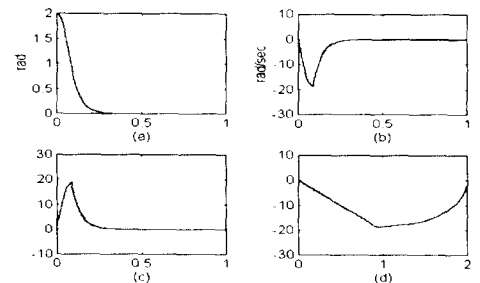


그림 6 FSMC의 레귤레이터 문제

- (a) 위치 오차 (b) 속도 오차
- (c) 제어 입력 (d) 상계적

Fig. 6 Regulation problem of FSMC

- (a) position error (b) speed error
- (c) control input (d) phase plot

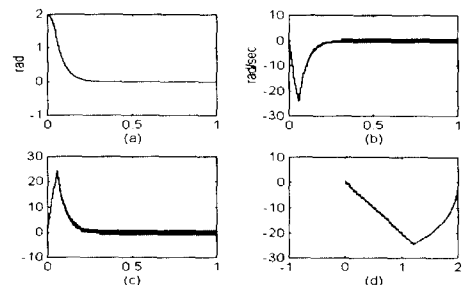


그림 7 VSC의 레귤레이터 문제

- (a) 위치 오차 (b) 속도 오차
- (c) 제어 입력 (d) 상계적

Fig. 7 Regulation problem of VSC

- (a) position error (b) speed error
- (c) control input (d) phase plot

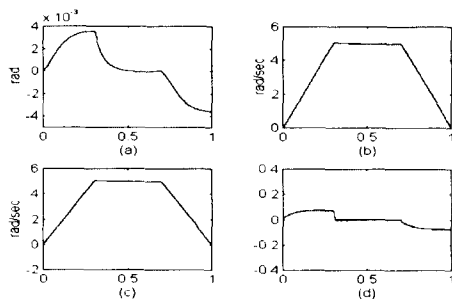


그림 8 FSMC의 사다리꼴 입력 응답
(a) 위치 오차 (b) 속도 추종
(c) 제어 입력 (d) 전환 함수

Fig. 8 The trapezoidal input response of FSMC
(a) position error (b) speed tracking
(c) control input (d) switching function

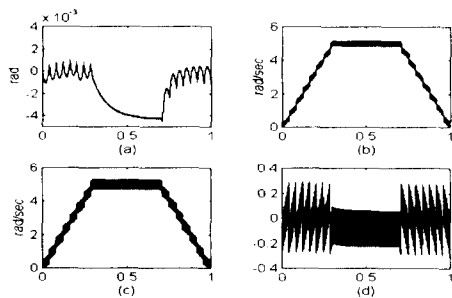


그림 9 VSC의 사다리꼴 입력 응답
(a) 위치 오차 (b) 속도 추종
(c) 제어 입력 (d) 전환 함수

Fig. 9 The trapezoidal input response of VSC
(a) position error (b) speed tracking
(c) control input (d) switching function

5. 결론

본 논문에서는 VSC의 고정된 값을 가지는 불연속입력항의 상수를 퍼지논리를 이용하여 조정하여 주는 FSMC를 제안하였다. 제어기의 구조는 슬라이딩 평면과의 거리와 원점으로부터의 거리를 입력으로 하는 FLC의 출력값을 VSC의 제어입력 계산에 이용하도록 되어 있다. 한편 제안된 FLC의 물베이스는 상평면으로부터 발견적인 방법으로 얻어졌으며, 정규화 이득의 조정으로 규칙의 개수를 줄일 수 있는 장점이 있다. 제안된 FSMC는 시뮬레이션을 통하여 레귤레이션 문제와 속도 추종에 대하여 VSC와 비교하였다. 그 결과 VSC의 경우에 비해 채터문제가 월등히 향상되었다.

참고문헌

- [1] S.-B. Choi and J.-S. Kim, "A fuzzy-sliding mode controller for robust tracking of robotic manipulators," *Mechatronics*, vol. 7, no. 2, pp. 199-216, 1997
- [2] Y. Eun, K. Kim, and D. Cho, "Combined discrete-time variable structure disturbance observer and variable structure controller for compensating cutting load disturbances in CNC AC servo motors," *Proceedings of 2nd ASCC*, pp. 249-252, 1997
- [3] J. C. Hung, "Chattering handling for variable structure

control systems," *Proceedings of IECON'93*, vol. 3, pp. 1968-1972, 1993

- [4] G.-C. Hwang and S.-C. Lin, "A stability approach to fuzzy control design for nonlinear systems," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 48, pp. 279-287, 1992
- [5] A. Kawamura, H. Itoh, and K. Sakamoto, "Chattering reduction of disturbance observer based sliding mode control," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 30, no. 2, pp. 456-461, 1994
- [6] Neyer and Gorez, "Use of fuzzy concepts in adaptive sliding mode control," *IEEE International Conference on System, Men, and Cybernetics*, pp. 443-447, 1994
- [7] R. Palm, *Model-based fuzzy control : gain scheduling and fuzzy sliding mode control*, Springer-Verlag, 1997
- [8] J.-J. E. Slotine and S. S. Sastry, "Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces with applications to robot manipulators," *International Journal of Control*, vol. 38, no. 2, pp. 465-492, 1983
- [9] S. Y. Yi and M. J. Chung, "Systematic design and stability analysis of a fuzzy logic controller," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 72, pp. 271-298, 1995
- [10] 사공성대, 이연정, 최봉열, "비선형 시스템에 대한 퍼지 도달 법칙을 가지는 가법 구조 제어," *제어·자동화·시스템 공학 논문지*, 제2권, 제4호, pp. 279-286, 1996