채터링 감소를 위한 퍼지 슬라이딩 모드 제어

Fuzzy-Sliding Mode Control for Chattering Reduction

°이 태 경, 문 지 운, 함 운 철*

*전북대학교 전자공학과(Tel : 82-063-270-2405; Fax : 063-270-2400 ; E-mail: wcham@moak.chonbuk.ac.kr)

Abstract : This paper presents a methodology combining sliding mode control and fuzzy control to tune the boundary layer and input gain according to the system state. The equivalent control is designed such that the nominal system exhibits desirable dynamics. The robust control with fuzzy self-tuning is then developed to guarantee the reaching condition and reduce chattering phenomenon in the presence of parameter and disturbance uncertainties.

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

1. 서론

슬라이딩 모드 제어는 시스템의 불확정성과 외란에 대해 강인한 특성을 가지고 있기 때문에 최근에 많은 제어 분야에 적용되고 있다. 슬라이딩 모드 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 불연속적인 스위칭함수인 $sgn()$함수 대신 시불변인 고정 경계층을 갖는 $sat()$함수가 적용되어 왔으며[3][5][7], 퍼지제어나 적응 퍼지제어를 슬라이딩 모드에 적용[4][7][8][9]하여 상태에 따라 경계층을 변화시키는 연구 또한 진행되어왔다.

일반적인 퍼지 제어기에는 입력으로써 에러와 에러의 미분치를 사용하여 고정된 입력구간[7][8]에 대해 퍼지 제어규칙을 만들지만 본 논문에서는 슬라이딩 평면 s와 슬라이딩 평면의 변화율 $\dot{s}$ [4][8]에 대해 제어 규칙을 세우고 퍼지 출력의 크기에 비례하여 입력구간인 경계층[3][5][6]과 경계층의 미분치 그리고 출력구간인 입력이득의 변화[2][5]를 통해 시스템의 채터링 현상을 감소시킬 뿐 아니라 빠른 응답특성을 갖도록 하고 있다. 그림 1의 전체 블록도와 같이 퍼지 제어기를 통한 경계층의 변화는 채터링의 감소 뿐만 아니라 상태 추적 또한 향상되어 지고, 파라미터의 변화와 외란에 대해서도 강인한 특성을 갖게된다.

본 논문의 2절에서는 채터링 현상을 줄이기 위해 고정된 경계층을 가진 슬라이딩 모드 제어의 일반적인 개요를 설명하고 있으며, 3.1절에서는 시변 경계층을 고려했을 때의 기존의 여러 논문의 접근방법을 분석했고, 3.2절에서는 3.1절에서 전개된 수식들을 이용, 실제 퍼지 제어기를 설계하여 경계층의 변화와 이에 따른 입력이득의 변화에 대해 기술하였고 4절에서는 이와 같이 설계한 제어기를 통한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

2. 일반적인 슬라이딩모드 제어

본 절에서는 시불변 경계층을 고려한 일반적인 슬라이딩 모드 제어 방법을 소개한다.

다음과 같은 2차 시스템을 고려하자.

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

여기서 $f(x,t)$ 는 미지의 함수로서 $\hat{f}(x,t)$ 는 추정 가능한 비선형 동역학식, $u(t)$는 제어 입력이며 $d(t)$는 외란, $x_d(t)$는 추적하고자 하는 상태 궤적이다. 외란과 $f(x,t)$ 의 추정 오차는 다음과 같이 각각 한정되어 있다고 가정하며,

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

여기서 $D(t)$와 $F(x,t)$ 는 알고있는 양의 함수라 가정한다.

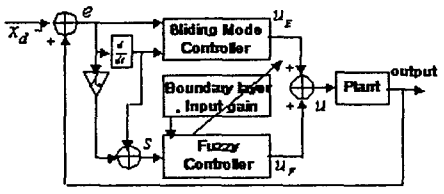

그림 1. 퍼지 슬라이딩모드 제어 블록도

2차 시스템에 대한 안정한 슬라이딩 모드 제어를 위한 상태공간 R^2에서 표현되는 슬라이딩 평면을 다음과 같이 설정한다[1].

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

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.

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

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

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

가 된다.

먼저 슬라이딩 모드 제어에 채터링을 감소시키기 위해서 고정된 경계층을 두어 $sgn()$함수 대신 $sat()$함수를 적용하여 식(4)의 슬라이딩 조건을 만족시키는 제어 법칙을 정의하면 다음과 같다.

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

여기서 $sat(s(t)/\Phi)$ 는

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