

분리된 비선형 시스템의 적응 퍼지 슬라이딩모드 제어

An Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Control for Decoupled Nonlinear Systems

김 도 우, 양 해 원, 윤 지 섭
(Do-Woo Kim, Hai-Won Yang and Ji-Sup Yun)

Abstract : We proposed a decoupled adaptive fuzzy sliding-mode control scheme for a class of fourth-order nonlinear systems. The system is decoupled into two second-order systems such that each subsystem has a separate control target expressed in terms of sliding surface. For these sliding surfaces, we define main and sub target conditions. and, we made intermediate variables which are interconnected both surface conditions from the sub target sliding surface. Then, Two sets of fuzzy rule bases are utilized to represent the equivalent control input with unknown system functions of the main target sliding surface including intermediate variables. The membership functions of the *THEN*-part, which is used to construct a suitable equivalent control of sliding-mode control, are changed according to the adaptive law. With such a design scheme, we not only maintain the distribution of membership functions over state space but also reduce the computing time considerably. We apply the decoupled adaptive sliding-mode control to a nonlinear Cart-Pole system and confirms the validity of the proposed approach.

Keywords : fuzzy controller, sliding-mode controller, adaptive control

I. 서론

퍼지 제어는 전문가의 경험과 지식에 대한 조건적 언어 표현과 근사 추론에 기초한 제어규칙을 시스템 입출 변수와 관계시킴으로써 다양한 비선형 시스템의 제어에 널리 이용되고 있다. 그러나, 모든 경우에 대해 이러한 전문가적 언어규칙에 대한 적절한 퍼지 제어규칙과 입출력 퍼지 집합의 소속함수를 얻기는 어려우며, 특히, 퍼지제어는 안정도를 보장하는데 있어 문제점이 있다. 따라서 최근에는 이러한 퍼지 제어의 안정도 문제점을 해결하기 위해 적응 알고리즘을 적용하기도 하고, 또는 적절한 스위칭 평면을 설정하여 스위칭 평면의 동특성에 따라 시스템이 제어되도록 불연속의 스위칭 입력을 인가하여 시스템의 파라미터가 변하는 경우나 외부 외란에 대해 둔감한 동특성과 안정도를 보장하며, 빠른 과도응답 특성을 나타내는 장점을 갖고 있는 제어방식인 슬라이딩 모드 제어를 퍼지 제어에 적용하기도 한다.

Palm[1], Hwang 등[2] 그리고 Kim 등[3]은 퍼지 슬라이딩 모드의 안정도 문제를 고려하여, 등가 제어입력이 이미 존재한다는 가정 하에 퍼지규칙을 이용하여 리칭모드(Reaching-Mode) 제어입력을 구성하였다. 그러나 이러한 방법은 시스템의 수학적 모델이 미지인 경우에 적절한 등가 제어입력을 얻을 수 없는 단점이 있다. 한편 Wang[4], Yoo 등[5] 그리고 Chen[6]은 적응제어를 통해 퍼지 제어규칙을 조절하는 방법과 미지시스템의 퍼지 슬라이딩 모드 제어에 적응 알고리즘을 적용, 미지시스템을 근사화하여 등가 제

입력을 구하고, 리칭모드(Reaching-Mode) 제어입력에 퍼지 소속함수를 적용하는 방법을 제시하였다. 그러나 이 경우 리칭모드(Reaching-Mode) 제어입력을 구하는 조건에 있어서 미지시스템의 상한과 하한의 유계에 대한 조건이 필요하다는 가정을 필요로 하며, 동시에 시스템의 차수가 고차인 경우 지나치게 많은 퍼지규칙이 필요하게 된다. Lo 등[7]은 Cart-Pole과 같은 디커플링된 4차 비선형 시스템에 대해 퍼지 슬라이딩 제어를 이용하여 디커플링된 두 부시스템의 각 제어목적용 동시에 달성하는 방법을 제시하였다. 그러나, 이 방법 역시 시스템의 수학적 모델이 미지인 경우 적절한 제어를 할 수 없다.

본 논문에서는 [7]의 시스템에 있어서 수학적 모델이 미지인 경우의 문제점을 해결하기 위하여 적응 퍼지 슬라이딩모드 제어방법을 제안한다. 제안한 제어방법을 적용하기 위해서 먼저 시스템의 상태변수는 측정 가능하지만, 수학적 모델이 미지라는 가정 하에 디커플링된 4차 비선형 시스템을 제어목적 우선 순위에 따라 주목적과 부목적용 갖는 두 개의 부시스템으로 구분하고, 구분한 두 부시스템의 상태변수로 두 개의 슬라이딩 초평면을 정한다. 그리고, 각각의 슬라이딩 초평면중 부목적용의 슬라이딩 초평면을 감쇠진동의 스위칭 조건을 갖는 보조변수로 변환하고 주목적용의 슬라이딩 초평면에 포함시킨다. 또한, 보조변수에 의해 변형된 주목적용의 슬라이딩 초평면에 적응 퍼지 알고리즘을 적용하여 주목적 부시스템의 미지시스템 함수를 근사화한다. 그리고, 근사된 주목적 부시스템의 미지시스템 함수로부터 구분한 두 부시스템의 각 제어목적용 동시에 달성하는 제어입력을 구성한다.

따라서, 본 논문의 구성은 II장에서는 Cart-Pole 시스템, 크레인 시스템등과 같이 디커플링된 단일입력 다출력 4차 비선형 시스템의 수학적 모델을 알 수 없다는 가정을 두고,

다출력 제어를 위한 단일 제어입력을 구성하기 위하여 요구되는 가정들에 대하여 논한다. III장에서는 II장의 디커플링 4차 비선형 시스템을 제어목적 우선 순위에 따라 주제어목적과 부제어목적의 두 부시스템으로 구분한다. 그리고, 각 부시스템의 상태변수에 의한 슬라이딩 초평면을 구성하고, 각각의 슬라이딩 초평면중 부목적의 슬라이딩 초평면을 감쇠진동의 스위칭조건을 갖는 보조변수로 변환하여 주목적의 슬라이딩 초평면에 포함시킨다. 이때, 보조변수에 의해 변형된 주목적의 슬라이딩 초평면에 대한 스위칭 평면 설정과 슬라이딩모드 존재 조건으로 디커플링 슬라이딩 모드 제어입력을 제시하고, 제시한 제어입력의 문제점에 대해 논한다.

IV장에서는 III장에서 제시한 디커플링 슬라이딩 모드 제어입력 구성시에 수학적 모델이 미지라는 문제점을 해결하기 위하여 보조변수에 의해 변형된 주목적의 슬라이딩 초평면에 적응 퍼지 알고리즘을 적용한다. 그리고, 주목적 부시스템의 미지시스템 함수를 근사화하여 디커플링 슬라이딩 모드 제어입력을 대신하는 근사 등가 제어입력과 리칭 모드(Reaching-Mode) 제어입력을 구한다.

마지막으로 V장에서는 본 논문에서 제안한 디커플링 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어의 제어성능을 확인하기 위해 [7]의 디커플링된 역진자 Cart-Pole 비선형 시스템을 이용하여, [7]에서 제시한 퍼지 슬라이딩 모드 제어와 제어성능을 비교하는 컴퓨터 모의실험을 수행한다.

II. 문제의 설정

일반적으로 두 개이상의 출력을 단일입력으로 제어하는 것을 목적하는 단일입력 다출력 비선형 시스템은 반드시 디커플링된 형태로 시스템을 모델링하여 제어입력을 구현해야하는 것은 아니다. 그러나, 단일입력 다출력 비선형 시스템을 디커플링된 형태로 모델링하지 않고, 제어입력을 구현하는 것은 계산이 복잡하며, 모델링하기가 까다롭다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 고려하여 Cart-Pole 시스템과 같은 단일입력 다출력 비선형 시스템이 (1)과 같이 디커플링 된다고 가정한다.

$$\begin{aligned}
 A : \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\
 \dot{x}_2(t) &= f_1(x) + g_1(x)u \\
 B : \dot{x}_3(t) &= x_4(t) \\
 \dot{x}_4(t) &= f_2(x) + g_2(x)u
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

(1)에서 u 는 플랜트의 제어입력이고, $x=[x_1, x_2, x_3, x_4]^T$ 는 플랜트의 상태벡터이며, 모든 상태변수는 측정 가능한 것으로 가정한다. 그리고, (1)의 디커플링된 4차 비선형 시스템은 각각 A 와 B의 2차 부시스템으로 구분하며, 구분된 두 부시스템의 제어목적은 단일 제어입력 u 로 동시에 구현된다. 여기서, 안정한 제어입력 u 를 구성하기 위해서 (1)의 플랜트에 대하여 다음과 같이 가정한다. $f_1(x), f_2(x)$ 는 유계 영역내의 미지의 비선형연속함수이고, $g_1(x), g_2(x)$ 또한 미지의 비선형 이득함수로 $g_1(x), g_2(x) > 0$ 이고 $g_1(x)$ 의 하한 g_{1min} 은 알고 있다.

III. 디커플링 슬라이딩 모드 제어

1. 스위칭 평면의 설정

II장의 디커플링 시스템에 대한 슬라이딩 모드 제어를 설계할 때 중요한 요소는 먼저, 디커플링 시스템의 상태변수에 의한 슬라이딩 초평면이 스위칭 평면상에서 슬라이딩 모드를 유지하도록 하는 것이다. 따라서, 본 절에서는 II장에서 구분한 부시스템 A, B의 상태변수에 의하여 각각의 슬라이딩 초평면을 (2), (3)과 같이 설정한다.

$$s_1 = \bar{\lambda}_1^T \bar{x}_1 = 0, \quad \bar{\lambda}_1 = [\lambda_1, 1]^T \tag{2}$$

$$s_2 = \bar{\lambda}_2^T \bar{x}_2 = 0, \quad \bar{\lambda}_2 = [\lambda_2, 1]^T \tag{3}$$

여기서, λ_1, λ_2 는 상수이고, $\bar{x}_1 = [x_1, x_2]$ 는 부시스템 A의 상태벡터이고, $\bar{x}_2 = [x_3, x_4]$ 는 부시스템 B의 상태벡터이다.

그런데, (2), (3)의 두 슬라이딩 초평면 s_1, s_2 중 한 개의 슬라이딩 초평면으로부터 (1)의 시스템을 제어하기 위한 제어입력 $u = u^*$ 를 구현한다면, (1)의 비선형 시스템은 한가지 제어목적만을 구현 할 수 있으며, 두 개의 제어목적을 동시에 만족시킬 수는 없다. 물론, (1)의 시스템을 수학적으로 변형하여 제어입력을 구현할 수는 있지만 이는 복잡하고, 까다롭다. 따라서, 본 논문에서는 (1)의 디커플링된 두 부시스템에 두 가지 제어 목적을 단일 제어입력 u 로 동시에 구현하기 위해서, (2), (3)의 슬라이딩 초평면을 (1)의 시스템에 대한 제어목적 우선 순위에 따라 구분한다. 즉, 부시스템 A의 상태변수에 의해 구성된 (2)의 슬라이딩 초평면 s_1 을 $\bar{x}_1 = 0$ 으로 점근적으로 수렴하도록 하는 주제어 목적의 슬라이딩 초평면이라 하고, 부시스템 B의 상태변수에 의해 구성된 (3)의 슬라이딩 초평면 s_2 를 $\bar{x}_2 = 0$ 으로 점근적으로 수렴하도록 하는 부제어목적의 슬라이딩 초평면이라고 정한다.

그리고, 부제어목적의 슬라이딩 초평면 s_2 에 대한 정보를 갖는 보조변수를 설정하여, 주제어목적의 슬라이딩 초평면 s_1 에 포함시킨다.

따라서, (4)는 보조변수에 의해 (2)의 슬라이딩 초평면이 변형된 형태를 나타낸 것이다 [7].

$$s_1 = \lambda_1(x_1 - z) + x_2 \tag{4}$$

여기서, z 는 부 제어목적의 슬라이딩 초평면 s_2 에 대한 정보를 갖는 보조변수이다. 그런데, (4)와 같은 변형으로 (2)의 초평면 수렴조건인 $\bar{x}_1 = 0$ 으로의 점근적인 수렴조건은 $x_1 = z, x_2 = 0$ 조건으로 바뀌게 된다. 따라서, (2)의 초평면 수렴조건을 만족시키기 위해 (4)에 포함시킨 보조변수 z 를 (5)와 같이 슬라이딩 초평면 s_2 에 대해 1보다 작은 값을 갖는 감쇠진동의 스위칭 함수로 정한다.

$$z = z_{upper} \cdot \text{sat}(s_2 / \Phi_2) \quad 0 < z_{upper} < 1 \tag{5}$$

여기서, Φ_z 는 보조변수 z 의 채터링을 줄이기 위해 s_2 의 선형영역을 설정한 양의 정수이다. 그리고, (5)에서 정한 $\text{sat}(\cdot)$ 는 (6)과 같은 선형영역 스위칭 함수이다.

$$\text{sat}(s_2/\Phi_z) = \begin{cases} \text{sgn}(s_2/\Phi_z), & \text{if } |s_2/\Phi_z| \geq 1 \\ s_2/\Phi_z, & \text{if } |s_2/\Phi_z| < 1 \end{cases} \quad (6)$$

따라서, (5)에서 정한 보조변수 z 의 정의에 의해 $s_2 \rightarrow 0$ 일 때는 $z \rightarrow 0$ 이 되고, 만일 (4)의 슬라이딩 초평면 s_1 으로 부터 적절한 제어입력 u^* 가 구현된다면 $x_1 \rightarrow 0$ 이 되고, $s_1 \rightarrow 0$ 가 되므로 (1)의 디커플링된 비선형 시스템에 두 가지 제어목적은 동시에 구현이 가능하다.

이제 적절한 제어입력 u^* 를 구현하기 위한 (4)의 슬라이딩 초평면 s_1 의 슬라이딩 모드 존재조건에 대해 살펴보기로 한다.

2. 슬라이딩 모드 존재조건에 의한 제어입력 구성

본 절에서는 (1)의 디커플링 시스템에 적절한 제어입력 u^* 를 구현하기 위하여 (4)의 초평면 s_1 에 대한 슬라이딩 모드 존재조건을 (7)과 같이 정의하고

$$s_1 \dot{s}_1 < 0 \quad (7)$$

(7)의 조건을 항상 만족하기 위한 초평면 s_1 의 미분 방정식을 (8)과 같이 정한다.

$$\dot{s}_1 = -Q \cdot \text{sgn}(s_1) \quad (8)$$

여기서, Q 는 양의 상수이고

$$\text{sgn}(s_1) = \begin{cases} 1, & \text{if } s_1 > 0 \\ 0, & \text{if } s_1 = 0 \\ -1, & \text{if } s_1 < 0 \end{cases} \quad (9)$$

이다. (9)에서 정한 시그넘 함수 $\text{sgn}(s_1)$ 은 $s_1 = 0$ 인 선을 중심으로 빠르게 진동하면서 원점으로 수렴하는 값으로 만약 스위칭 동작에 시간지연이 없는 이상적인 시스템의 경우라면 $s_1 = 0$ 인 선을 따라 매끄럽게 미끄러지도록 한다.

그러나 실제의 경우 스위칭 동작에서 지연이나 히스테리시스와 같은 여러 종류의 불완전한 요소가 발생되므로 (9)의 시그넘 함수를 (7)에 적용할 경우 심한 채터링 현상을 수반하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 (9)의 문제점을 보완하기 위해 선형영역을 갖는 (11)과 같은 포화함수 $\text{sat}(s_1)$ 을 (8)에 적용하여 (10)과 같이 수정하고

$$\dot{s}_1 = -Q \cdot \text{sat}(s_1) \quad (10)$$

(4)의 초평면 s_1 을 미분하여 (10)에 대입한다.

$$\dot{s}_1 = \lambda_1 x_2 - \lambda_1 \dot{z} + f_1 + g_1 u^* = -Q \cdot \text{sat}(s_1) \quad (11)$$

여기서, (7)의 슬라이딩 모드 존재조건은 (11)의 대입으로

항상 만족되며, (1)의 디커플링 시스템에 가해지는 제어입력은 (7)의 존재조건 상에서 (12)과 같이 구현된다.

$$u^* = g_1^{-1}[-\lambda_1 x_2 + \lambda_1 \dot{z} - f_1 - Q \cdot \text{sat}(s_1)] \quad (12)$$

이때 (12)의 제어입력 u^* 에서 슬라이딩 모드일 때 시스템의 상태궤적이 초평면 $s_1 = 0$ 으로 제한되는 조건을 갖는다면 (11)의 슬라이딩 동작은 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{s}_1 = 0 \quad (13)$$

(13)의 슬라이딩 동작을 만족하는 연속적인 제어입력인 등가 제어입력은 (14)와 같고

$$u_{eq} = g_1^{-1}[-\lambda_1 x_2 + \lambda_1 \dot{z} - f_1] \quad (14)$$

(12)에서 구한 플랜트에 가해지는 제어입력인 u^* 는 (15)와 같이 등가 제어입력과 리칭모드 (Reaching-Mode) 제어입력으로 구분하여 다시 쓸 수 있다.

$$u^* = u_{eq} - g_1^{-1}Q \cdot \text{sat}(s_1) \quad (15)$$

따라서, (15)의 디커플링 슬라이딩 모드 제어기는 (1)의 디커플링된 시스템의 두 가지 제어목적은 동시에 제어하기 위한 단일 제어입력이고, 제어입력 u^* 를 구하기 위해서는 (1)의 부시스템 A의 비선형 연속함수 f_1, g_1 에 대한 정확한 수학적인 모델이 필요하다.

그러나 II장에서 가정했듯이 비선형 연속함수 f_1, g_1 은 정확히 알 수 없으므로 (15)의 제어입력 u^* 와 같이 구현하기 어렵다. 그래서, IV장에서는 이러한 (15)의 디커플링 슬라이딩 모드 제어기의 문제점을 해결하기 위해 (4)의 초평면 s_1 에 대해 적응 퍼지 알고리즘을 적용하여 근사치 \hat{f}_1, \hat{g}_1 를 추정하고, 이러한 근사치에 의한 제어기를 구성하는 디커플링 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 구현한다.

IV. 디커플링 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기

본 IV장에서는 (15)의 제어입력 u^* 를 구현하는데 있어서 (1)의 부시스템 A의 비선형 연속함수 f_1, g_1 을 정확히 알 수 없다는 점을 해결하기 위해 (4)의 슬라이딩 초평면 s_1 에 대해 함수 근사특성을 갖는 적응 퍼지 알고리즘을 적용하여 (15)의 제어입력 u^* 의 구현에서 문제가 되는 미지의 비선형 연속함수 f_1, g_1 의 근사치 \hat{f}_1, \hat{g}_1 를 추정한다. 그리고, 이러한 추정 근사치 \hat{f}_1, \hat{g}_1 에 의한 디커플링 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어입력 u^* 를 구한다. 그림 1은 제안한 디커플링 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어 블록도를 나타낸 것이다.

이제, (4)의 슬라이딩 초평면 s_1 으로부터 근사치 \hat{f}_1, \hat{g}_1 를 구성하기 위해 (16), (17)과 같이 퍼지규칙을 정한다.

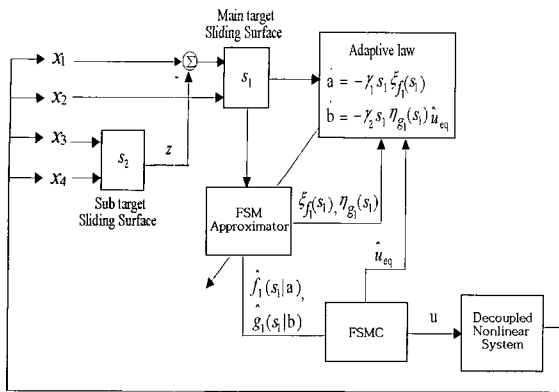


그림 1. 디커플링 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어 블록도.
Fig. 1. The block diagram of decoupled adaptive fuzzy sliding mode control.

$$i \text{ 번 규칙 : IF } s_1 \text{ is } A_i \text{ THEN } \hat{f}_1 \text{ is } (f_1)_i \quad (16)$$

$$j \text{ 번 규칙 : IF } s_1 \text{ is } B_j \text{ THEN } \hat{g}_1 \text{ is } (g_1)_j \quad (17)$$

여기서, $i \in \{-n, -n+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n-1, n\}$
 $j \in \{1, 2, \dots, m\}$

본 논문에서는 (16), (17)과 같이 근사치 \hat{f}_1, \hat{g}_1 를 추정하기 위해 슬라이딩 모드 제어에 기초한 한 개의 변수인 변형된 주제어목적의 슬라이딩 초평면 s_1 만을 이용하여 퍼지규칙을 정한다. 그러므로, 고전적인 적응 퍼지 알고리즘에서 일반적으로 사용하는 여러 상태변수에 의한 여러개의 퍼지규칙 설정으로부터 근사치를 구성하는 것에 비해 현저히 퍼지규칙의 수를 크게 줄일 수 있다. 특히 부제어목적에 관련된 보조변수를 포함한 변형된 슬라이딩 초평면 s_1 을 이용하여 퍼지규칙을 정함으로써 주제어목적과 부제어 목적을 동시에 구현할 수 있는 제어입력 u^* 을 구하는 계산속도도 기존 알고리즘에 비해 빠르게할 수 있다.

그림 2의 (a),(b)와 그림 3의 (a),(b)는 각각 $\hat{f}_1(s_1|a)$, $\hat{g}_1(s_1|b)$ 를 추정하기 위해 일정한 폭을 갖는 입력범위 $[-(s_1)_n, (s_1)_n]$ $[(s_1)_1, (s_1)_m]$ 와 출력범위 $[-a, a]$, $[0, b]$ 의 퍼지 입력 소속함수와 출력 소속함수를 나타낸 그림이다.

따라서, 그림 3의 (a),(b)의 THEN-부 출력 소속함수를 (16), (17)의 퍼지규칙에 따라 정의하면 다음과 같다.

$$(f_1)_i = \frac{i}{n} a \quad (18)$$

$$i \in \{-n, -n+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n-1, n\}$$

$$(g_1)_j = \frac{j}{m} b \quad j \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (19)$$

여기서, a, b 는 적응 알고리즘에 의해 주어진 각각의 출력 소속함수 영역에서 적응법칙으로 유도되어지는 매

개변수로서 근사치 $\hat{f}_1(s_1|a), \hat{g}_1(s_1|b)$ 를 온라인 동작 중 자유롭게 변화시킨다. 그리고, 최대 평균법을 이용한 비퍼지화 방법에 의한 근사치 $\hat{f}_1(s_1|a), \hat{g}_1(s_1|b)$ 의 출력은 다음과 같다.

$$\hat{f}_1(s_1|a) = \frac{\sum_{i=-n}^n \mu_{(A_1)_i}(s_1) \cdot \frac{i}{n} a}{\sum_{i=-n}^n \mu_{(A_1)_i}(s_1)} = a \cdot \xi_{f_1}(s_1) \quad (20)$$

$$\hat{g}_1(s_1|b) = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_{(B_1)_j}(s_1) \cdot \frac{j}{m} b}{\sum_{j=1}^m \mu_{(B_1)_j}(s_1)} = b \cdot \eta_{g_1}(s_1) \quad (21)$$

$$\xi_{f_1}(s_1) = \frac{\sum_{i=-n}^n \mu_{(A_1)_i}(s_1) \cdot \frac{i}{n}}{\sum_{i=-n}^n \mu_{(A_1)_i}(s_1)}$$

여기서,

$$\eta_{g_1}(s_1) = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_{(B_1)_j}(s_1) \cdot \frac{j}{m}}{\sum_{j=1}^m \mu_{(B_1)_j}(s_1)}$$

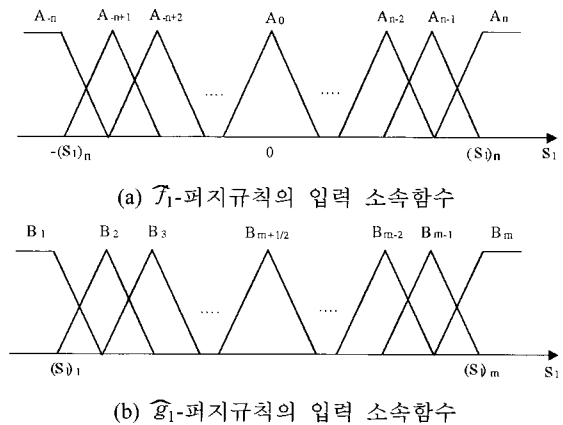


그림 2. 입력 소속함수.
Fig. 2. The membership functions of the IF-part.

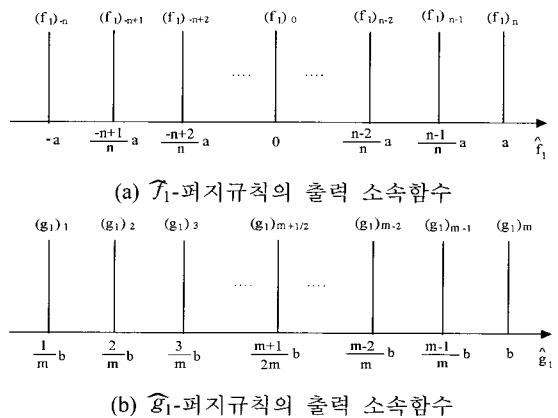


그림 3. 출력 소속함수.
Fig. 3. The membership functions of the THEN-part.

이와같이 (4)의 슬라이딩 초평면 s_1 상으로부터 구해진 (20)과 (21)의 근사치 $\hat{f}_1(s_1|a), \hat{g}_1(s_1|b)$ 을 (14)의 등가 제

어입력에 대입하면 (22)와 같은 추정 등가제어입력 \hat{u}_{eq} 이 구성된다.

$$\hat{u}_{eq} = \hat{g}_1(s|b)^{-1}(-\lambda_1 x_2 + \lambda_1 \dot{z} - \hat{f}_1(s|a)) \quad (22)$$

그리고, (4)의 슬라이딩 초평면 s_1 상에서 미지의 비선형 연속함수 f_1, g_1 을 근사치 \hat{f}_1, \hat{g}_1 로 추정하기 위한 튜닝 매개변수 a 와 b 의 적응법칙을 구성하기 위해, II장에서 정의한 보조변수 z 에 의해 변형된 (4)의 초평면 s_1 을 미분한 (11)에 (4)의 초평면 s_1 가 $s_1=0$ 으로 슬라이딩 모드 동작이 제한된다고 가정한다.

그리고, (11)의 제어입력 u^* 대신에 (22)의 추정 등가제어입력을 대입하고, $\hat{g}_1(s|b) \hat{u}_{eq} - \hat{g}_1(s|b) \hat{u}_{eq}$ 을 추가하면, (11)은 (23)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= \lambda_1 x_2 - \lambda_1 \dot{z} + f_1(x) + g_1(x) \hat{u}_{eq} \\ &\quad + \hat{g}_1(s|b) \hat{u}_{eq} - \hat{g}_1(s|b) \hat{u}_{eq} \\ &= \lambda_1 x_2 - \lambda_1 \dot{z} + f_1(x) \\ &\quad + \hat{g}_1(s|b) \hat{g}_1(s|b)^{-1}(-\lambda_1 x_2 + \lambda_1 \dot{z} - \hat{f}_1(s|a)) \\ &\quad + [g_1(x) - \hat{g}_1(s|b)] \hat{u}_{eq} \\ &= f_1(x) - \mathcal{F}(s_1|a) + [(g(x) - \hat{g}(s_1|b))] \hat{u}_{eq} \quad (23) \end{aligned}$$

(23)에서 만일, 최소 근사오차 $\epsilon = [f_1 - a^* \xi_{f_1}(s_1)] + [g_1 - b^* \eta_{g_1}(s_1)] \hat{u}_{eq}$ 를 갖는 최적 매개변수 a^* 와 b^* 가 존재한다고 가정하고, (24)와 같은 최소 근사오차를 정의하면

$$\omega_f = f_1(x) - \hat{f}_1(s_1|a^*), \quad \omega_g = g_1(x) - \hat{g}_1(s_1|b^*) \quad (24)$$

(23)은 (25)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\dot{s}_1 = \hat{f}_1(s_1|a^*) - \hat{f}_1(s_1|a) + \omega_f + [\hat{g}_1(s_1|b^*) - \hat{g}_1(s_1|b) + \omega_g] \hat{u}_{eq} \quad (25)$$

그리고, (20), (21)의 비퍼지화 방법에 의한 근사치 $\hat{f}_1(s_1|a), \hat{g}_1(s_1|b)$ 를 (25)에 대입하면, 변형된 슬라이딩 초평면 s_1 이 $s_1=0$ 상으로 제한된 (13)의 슬라이딩 동작일 때에 대해서 (26)을 얻을 수 있다.

$$\dot{s}_1 = \phi_1 \cdot \xi_{f_1}(s_1) + \omega_f + [\phi_2 \cdot \eta_{g_1}(s_1) + \omega_g] \hat{u}_{eq} \quad (26)$$

여기서, $\phi_1 = a^* - a, \phi_2 = b^* - b$ 이다.

(4)의 변형된 슬라이딩 초평면 s_1 이 $s_1=0$ 으로 제한된 슬라이딩 동작일 때에 대해서 (26)의 초평면 s_1 과 파라메

터 오차 ϕ_1, ϕ_2 가 최소화되도록 하는 튜닝 매개변수 a 와 b 의 적응법칙을 구성하기 위한 리아프노프 함수후보를 (27)과 같이 정한다.

$$V = \frac{1}{2} s_1^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \phi_1^2 + \frac{1}{2\gamma_2} \phi_2^2 \quad (27)$$

여기서, γ_1, γ_2 는 양의 상수이다. 그리고, (27)에서 정한 리아프노프 함수 V 를 시간 t 에 대해 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s_1 \dot{s}_1 + \frac{1}{\gamma_1} \phi_1 \dot{\phi}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \phi_2 \dot{\phi}_2 \\ &= \frac{1}{\gamma_1} \phi_1 (\dot{\phi}_1 + s_1 \cdot \xi_{f_1}(s_1)) + \frac{1}{\gamma_2} \phi_2 (\dot{\phi}_2 + s_1 \cdot \eta_{g_1}(s_1) \hat{u}_{eq}) + s_1 \epsilon \quad (28) \end{aligned}$$

이 된다. 여기서 $\dot{\phi}_1 = -\dot{a}, \dot{\phi}_2 = -\dot{b}$ 이고 $s_1 \epsilon$ 는 최소 근사오차로서 $s_1 \epsilon \cong 0$ 가 되도록 작게 결정 할 수 있다. 따라서, (28)에 의해 튜닝 매개변수 a 와 b 의 적응법칙이 (29), (30)과 같으면

$$\dot{a} = \gamma_1 s_1 \xi_{f_1}(s_1) \quad (29)$$

$$\dot{b} = \gamma_2 s_1 \eta_{g_1}(s_1) \hat{u}_{eq} \quad (30)$$

(28)의 V 는 다음과 같이 된다.

$$V \leq s_1 \epsilon \quad (31)$$

그러므로, (29), (30)의 a 와 b 의 적응법칙에 의해 변형된 슬라이딩 초평면 s_1 이 $s_1=0$ 인 슬라이딩 동작상에서 (20), (21)의 근사치 $\hat{f}_1(s_1|a), \hat{g}_1(s_1|b)$ 로 빠르게 근사되면, $s_1=0$ 인 과도상태에서 근사치 $\hat{f}_1(s_1|a), \hat{g}_1(s_1|b)$ 에 의해 구성된 (22)의 저주파 성분의 추정 등가제어입력 \hat{u}_{eq} 의 추정되어지는 속도 역시 기존의 적응 퍼지 알고리즘에 비해 빠르게 된다. 그리고, (4)의 슬라이딩 초평면 s_1 가 $s_1 \neq 0$ 일 때 (15)의 제어입력 u^* 의 $-g_1^{-1}Q \cdot \text{sat}(s_1)$ 은 시스템의 안정도를 보장을 위한 고주파성분 스위칭 입력이다. 여기서, $g_1^{-1}Q$ 는 리칭모드 (Reaching-Mode) 제어이득이며, 제어이득의 크기결정은 제어량의 크기와 강인성을 감안하여 절충할 수 있는 범위에서 결정한다. 본 논문에서는 디커플링 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어에서의 리칭모드 (Reaching-Mode) 제어입력을 (4)의 변형된 슬라이딩 초평면 s_1 의 변화에 의해 추정된 근사치 $\hat{g}_1(s_1|b)$ 로부터 (32)와 같이 설정한다.

$$u_r = -k \cdot \text{sat}(s_1) \quad (32)$$

여기서 $k = \hat{g}_1^{-1}Q$ 이다. 그러므로, 실제 플랜트에 가해지는 제어입력은 (33)과 같이 된다.

$$u^* = u = \hat{u}_{eq} + u_r \quad (33)$$

그런데, (32)에서 설정한 리칭모드(Reaching-Mode) 제어입력 u_r 에서의 문제점은 제어이득 k 와 떨림방지를 위한 경계폭이 추정된 근사치 $\hat{g}_1(s|b)$ 에 의해 가변이 된다는 것이다. 그림 4는 추정된 근사치 $\hat{g}_1(s|b)$ 의 변화 범위에 따른 (33)의 리칭모드(Reaching-Mode) 제어입력 변화를 추정하여 나타낸 그림이다.

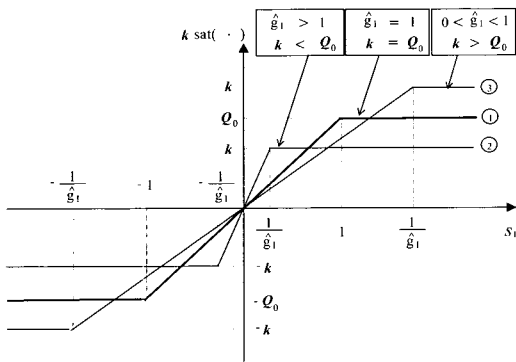


그림 4. 추정된 근사치 $\hat{g}_1(s|b)$ 의 변화 범위에 따른 리칭모드 제어입력 $k \cdot sat(s_1)$ 의 변화.

Fig. 4. The variation of $k \cdot sat(s_1)$ in accordance with the estimated value $\hat{g}_1(s|b)$.

그림 4에서 보는 바와 같이 (32)에서 설정한 리칭모드(Reaching-Mode) 제어입력은 채터링을 방지하기 위한 경계폭이 근사치 $\hat{g}_1(s|b)$ 의 추정크기 범위에 따라 가변이 되므로, 이러한 가변의 경계폭이 채터링 현상을 방지하는데 적절히 동작되는지를 판단하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 제안한 디커플링 적용 퍼지 슬라이딩 모드 제어를 디지털 제어기로 구현한다고 할 때, (34)와 같이 $s_1=0$ 인 슬라이딩 모드상에서 등가 외란이 없다는 가정에 대해 발생할 수 있는 채터링의 크기를 대략 계산한다. 그리고, 계산된 채터링의 크기를 그림 4에서 구분한 근사치 $\hat{g}_1(s|b)$ 의 경계폭 조건과의 관계를 비교하여 가변의 경계폭이 채터링 현상을 방지하는데 적절히 동작되는지를 판단한다.

$$\dot{s}_1 = -k \cdot sgn(s_1) \quad (34)$$

채터링의 크기를 근사적으로 계산하기 위해 (34)의 좌변의 미분을 차분으로 근사화하면

$$\frac{s_1(h+1) - s_1(h)}{\Delta t} = -\frac{Q}{\hat{g}_1} \cdot sgn(s_1) \quad (35)$$

이 된다. 여기서 Δt 는 샘플링 주기이며, $s_1(h)$ 는 h 시간 스텝에서의 s_1 값이다. 채터링 현상은 (35)에서 $s_1(h)$ 가 0으로 수렴하지 못하고 $|s_1(h+1)| \approx |s_1(h)|$ 인 상태에서 양과 음의 값이 반복되는 경우이다. 따라서, 채터링 크기는 대략 $|s_1(h+1) - s_1(h)|$ 의 절반인 (36)과 같다.

$$\frac{|s_1(h+1) - s_1(h)|}{2} = \frac{\hat{g}_1^{-1}Q\Delta t}{2} \quad (36)$$

그러므로, 만약 (36)에서 추정된 근사치 \hat{g}_1 가 $\hat{g}_1 = 1$ 이라면 (32)의 리칭모드(Reaching-Mode) 제어입력의 경계폭은

그림 4-①과 같이 $\frac{1}{\hat{g}_1} = 1$ 이 되고, 채터링 크기는 $\frac{Q\Delta t}{2}$ 가 되며, 샘플링 주기 Δt 와 임의 설정값 Q 에 비례함을 알 수 있다. 따라서, 경계폭이 1이 될 때는 채터링의 크기가 (37)과 같은 조건 내에 존재해야 채터링 현상을 방지할 수 있다.

$$1 \geq \frac{Q\Delta t}{2} \quad (37)$$

그러므로, (37)의 조건을 (38)과 같이 바꾸면, 일반적으로 샘플링 주기 Δt 는 알고 있으므로, 임의 설정값 Q 의 최대 설정값을 예측할 수 있다.

$$Q \leq \frac{2}{\Delta t} \quad (38)$$

그리고, 그림4-②, 그림4-③과 같이 근사치 \hat{g}_1 이 $\hat{g}_1 > 1$, $0 < \hat{g}_1 < 1$ 의 범위에서 경계폭을 갖는 경우에도 마찬가지로 (37)의 조건을 갖는다. 이는 근사치 \hat{g}_1 이

$\hat{g}_1 > 1$ 가 되면, 채터링 크기 $\frac{Q\Delta t}{2\hat{g}_1}$ 는 $\hat{g}_1 = 1$ 일 때의 채터링 크기보다는 작아지지만 경계폭도 그만큼 작아지기 때문이며, 마찬가지로 근사치 \hat{g}_1 이 $0 < \hat{g}_1 < 1$ 이 되면, 채터링 크기 $\frac{Q\Delta t}{2\hat{g}_1}$ 는 되어 $\hat{g}_1 = 1$ 일 때의 채터링 크기보다 커지지만 경계폭도 그만큼 커지기 때문이다. 결국 (32)에서 경계폭으로 정한 \hat{g}_1 은 $\hat{g}_1 > 0$ 인 모든 범위안에서 샘플링 주기 Δt 를 안다고 가정할 때 (38)의 범위에서 적절한 임의 설정값 Q 를 설정한다면, 적절히 경계폭을 가변하면서 채터링의 현상을 방지하는 역할을 할 수 있음을 알 수 있다.

그리고, (38)에서 정한 Q 는 일반적으로 제어량의 크기와 강인성을 감안하여 절충할 수 있는 범위에서 설정하는 것이 바람직하다. 그러므로, II장에서 가정한 알고 있는 하한값 g_{1min} 에 의해 구분하여 설정한다. 즉, $g_{1min} \geq 1$ 일 경우에는 근사치 \hat{g}_1 가 $\hat{g}_1 \geq 1$ 일 가능성이 많으므로, 그림

4에서와 같이 제어이득 k 가 \hat{g}_1 에 의해 감소되는 것을 고려하여 $Q \leq \frac{2}{\Delta t}$ 에 가까운 값으로 정하고, $0 < g_{1min} < 1$ 일 경우에는 근사치 \hat{g}_1 가 $0 < \hat{g}_1 < 1$ 일 가능성이 많으므로 제어이득 k 가 \hat{g}_1 에 의해 증가되는 것을 고려하여 $Q \leq \frac{1}{\Delta t}$ 에 가까운 값으로 정한다.

이와 같이 여기에서는 비선형 연속함수 f_1, g_1 을 정확히 알 수 없기 때문에 (15)의 디커플링 슬라이딩 모드 제어입력 u^* 를 구현하기 어려웠던 점을 (4)의 슬라이딩 초평면 변수 s_1 에 대한 적응 퍼지 알고리즘으로 미지시스템 함수 f_1, g_1 을 근사화 함으로써 해결하였으며, 특히, 주제어목적에 관계된 한 개 슬라이딩 초평면만을 이용한 적응 퍼지 알고리즘을 적용하여 기존 적응 퍼지 알고리즘에 비해 플랜트에 가해지는 제어입력 계산속도를 향상시킴으로써 디커플링 시스템의 제어성능 속도를 향상하였다. 또한 추정된 근사치 $\hat{g}_1(a|b)$ 에 의한 제어이득과 경계폭 가변을 갖는 리칭모드(Reaching-Mode) 제어입력의 설정에 대한 타당성을 입증하고, 제어이득 k 에서의 임의 설정값 Q 의 최대 설정 범위를 (38)과 같이 정함으로써 이득값의 설정에 따른 떨림 현상과 시스템 변화에 따른 제어의 안정성, 그리고 외란에 대한 강인성을 향상할 수 있도록 하였다. 따라서, V장에서는 [7]의 디커플링된 역진자 Cart-Pole 비선형 시스템에 제시한 디커플링 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어를 적용하여 컴퓨터 모의실험을 함으로서 제어성능을 검증하고자 한다.

V. 컴퓨터 모의실험

본 V장에서는 제시한 이론의 타당성을 증명하기 위해 [7]의 디커플링된 역진자 Cart-Pole 비선형 시스템을 이용하여 컴퓨터 모의실험을 수행한다. 그리고, [7]의 제어 성능과의 비교를 통해 제시한 이론의 타당성을 입증한다. 일반적으로 역진자 시스템의 주제어목적은 역진자의 각도가 $\theta=0$ 가 되도록 역진자의 균형을 제어하는 것이다. 그런데 실제로 역진자의 균형을 제어하기 위한 역진자 시스템은 그림 5와 같이 Cart를 평면상에서 x 거리만큼 좌우운동을 시킴으로써 제어하는 구조로 되어 있다. 그러나 보통의 역진자 시스템 제어이론에서는 제어목적은 진자의 균형만을 고려하여 시스템을 구성하기 때문에 실제 시스템의 경우와 맞지 않다.

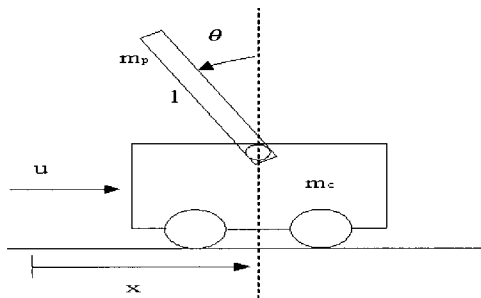


그림 5. 역진자 Cart-Pole 시스템.
Fig. 5. the cart-pole system.

따라서, 본 논문에서는 (39)와 같이 디커플링된 역진자 Cart-Pole시스템[7]에 대해 제시한 이론을 적용하여 진자의 균형과 Cart의 운동을 동시에 제어하도록 한다.

A: $\dot{x}_1(t) = x_2(t)$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{m_c g \sin x_1 - m_p l \sin x_1 \cos x_1 x_2^2}{l \cdot (\frac{4}{3} m_c - m_p \cos^2 x_1)} + \frac{\cos x_1}{l \cdot (\frac{4}{3} m_c - m_p \cos^2 x_1)} u \quad (39)$$

B: $\dot{x}_3(t) = x_4(t)$

$$\dot{x}_4(t) = \frac{-\frac{4}{3} m_p l x_2^2 \sin x_1 + m_p g \sin x_1 \cos x_1}{\frac{4}{3} m_c - m_p \cos^2 x_1} + \frac{4/3}{\frac{4}{3} m_c - m_p \cos^2 x_1} u$$

여기서, x_1 은 역진자 각도(θ), x_2 는 역진자 각속도($\dot{\theta}$), x_3 는 Cart의 거리(x), x_4 는 cart의 이동속도(\dot{x}) 그리고, u 는 Cart를 움직이도록 외부에서 가해주는 힘을 나타낸다. 그리고, (39)의 시스템 매개변수를 다음과 같이 정한다.

g : 중력가속도(9.8m/s²), l : 역진자 길이(0.5m),
 m_c : cart무게(1kg), m_p : 역진자 무게(0.05kg);

(39)의 역진자 Cart-Pole시스템은 두 개의 부시스템 A와 B로 구분되어 있다. 이중 부제어목적에 관계된 부시스템 B의 상태변수 x , \dot{x} 에 의한 슬라이딩 초평면 s_2 는 원점으로 부터 Cart가 얼마나 이동했는가를 나타내는데 사용된다. 만일, $s_2 > 0$ 라면 이는 Cart의 위치가 원점으로부터 우측에 있다는 것을 의미하므로 cart를 원점위치로 보내기 위해 음의 제어 힘이 필요하고, (5)에서 정의한 바와 같이 슬라이딩 초평면 s_2 에 대한 감쇠진동의 스위칭 함수형태의 보조변수 z 는 양수가 되어야 한다. 또 만일 $s_2 < 0$ 라면 보조변수 z 는 음수가 되어야한다.

그러므로, 디커플링된 역진자 Cart-Pole 시스템은 (5)에서와 같이 감쇠진동의 특성을 갖는 보조변수 z 를 주제어목적의 슬라이딩 초평면 s_1 에 포함시킴으로써 적절한 슬라이딩 모드 제어입력을 구성한다. 그리고, 구성된 슬라이딩 모드 제어입력상의 미지의 비선형 연속함수 f_1, g_1 를 추정하기 위한 (17), (18)과 같은 \hat{f}_1, \hat{g}_1 의 퍼지 규칙에 의한 퍼지 입력 소속함수와 출력 소속함수는 그림 6, 7과 같다.

이와 같은 과정을 통해 (39)의 역진자 Cart-Pole 시스템 초기값이 다음과 같을 때

$\theta : -60^\circ; \dot{\theta} : 0; x : 0; \dot{x} : 0;$

본 논문에서 설정한 제어 매개변수 값은 다음과 같다.

$\lambda_1=8, \lambda_2=0.7, \Phi_{upper}=14, Z_{upper}=0.9425, Q=20,$

$\gamma_1, \gamma_2 : 0.01, \Delta t=0.05$

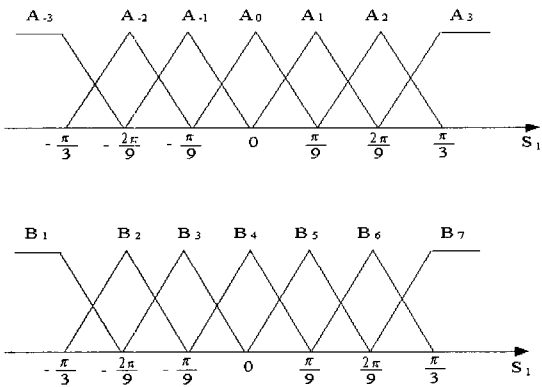


그림 6. $\widehat{f}_1, \widehat{g}_1$ 퍼지규칙의 IF-부 입력 소속함수.

Fig. 6. The membership functions of the IF-part of the $\widehat{f}_1, \widehat{g}_1$ -rule base.

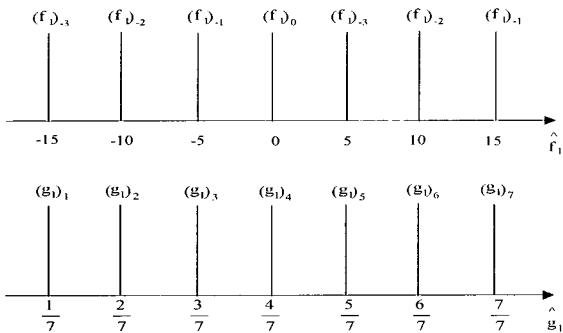


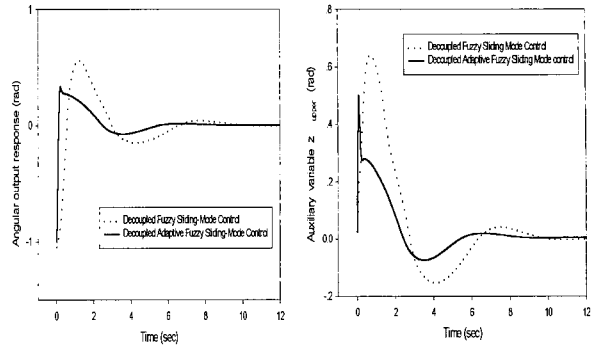
그림 7. $\widehat{f}_1, \widehat{g}_1$ 퍼지규칙의 THEN-부 출력 소속함수.

Fig. 7. The membership functions of the THEN-part of the $\widehat{f}_1, \widehat{g}_1$ -rule base.

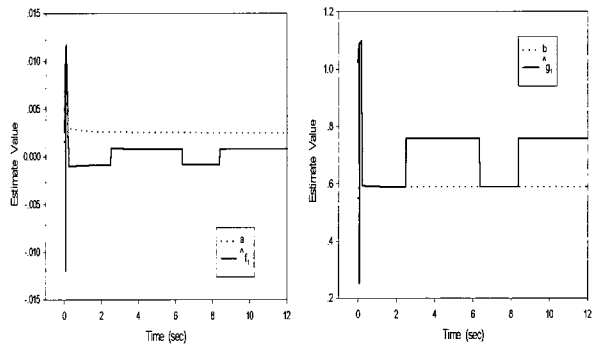
따라서, 그림 8은 역진자 Cart-Pole 시스템의 응답특성을 제안한 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어와 [7]의 퍼지 슬라이딩 모드 제어성능을 비교하여 나타낸 것이다.

그림 8-(a),(b)는 (35)의 역진자 Cart-Pole 시스템에서 주 제어 목적을 갖는 진자의 균형에 대한 부시스템의 비선형 연속함수 f_1, g_1 을 알지 못한다는 가정에 의해 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어와 부시스템의 비선형 연속함수 f_1, g_1 을 안다는 가정에서의 퍼지 슬라이딩 모드 제어시 역진자 각도 추정특성과 보조변수 z 추정특성을 나타낸 것이다. 그림 8-(c),(d)에서와 같이 주 제어 목적에 관련된 한 개의 변수 (4)와 같이 변형된 s_1 에 의한 과도상태에서의 빠른 비선형 연속함수 f_1, g_1 의 추종치에 의해 역진자 각속도 변위는 [7]의 경우에 비해 다소 빠르지만 각도 변위폭은 현저히 줄어들 수 있고, 또한 주 제어 목적인 역진자 각도균형 ($\theta = 0$)으로의 수렴이 빠르게 됨을 볼 수 있다.

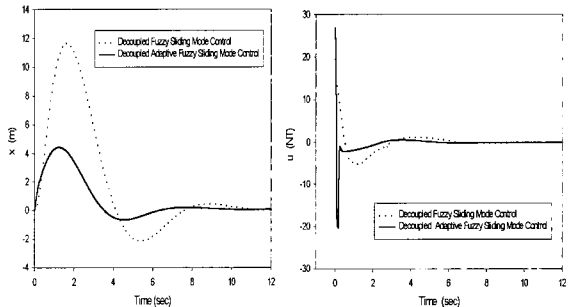
그림 8-(e),(f)는 (35)의 역진자 Cart-Pole 시스템에서 부 제어 목적을 갖는 Cart의 이동과 제어입력을 나타낸 그림이다. 그림 8-(e)의 Cart의 이동 추종특성도 빠른 비선형 연속함수 f_1, g_1 의 추종에 의해 [7]의 퍼지 슬라이딩 모드 제어 경



(a) 역진자의 각도추종특성 (b) 보조변수 z 추종 특성



(c) $\widehat{f}_1(s_1|a)$ 의 추정치 변화 (d) $\widehat{g}_1(s_1|b)$ 의 추정치 변화



(e) cart의 이동 추종특성 (f) 제어 입력 특성

그림 8. 제안한 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어와 [7]의 퍼지 슬라이딩 모드 제어의 성능 비교.

Fig. 8. Responses of Adaptive fuzzy sliding mode control and Fuzzy Sliding mode control[7].

우에 비해 초기 과도속도만 빠를 뿐 이동거리의 변화특성은 매우 우수함을 알 수 있다. 그림 8-(f)의 제어입력에서는 초기 빠른 f_1, g_1 의 추종속도에 의해 과도상태 입력이 [7]의 경우에 비해 다소 큰 것을 알 수 있다.

따라서, 그림 8의 디커플링된 역진자 Cart-Pole 시스템의 응답특성의 비교를 통하여, 미지의 비선형 연속함수를 갖는 디커플링된 비선형 시스템에 대한 본 논문의 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어 방식이 기존의 방식에 비해 매우 우수함을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 Cart-Pole 시스템, 크레인 시스템등과 같이 디커플링된 단일입력 다출력 4차 비선형 시스템의 수학적 모델을 알 수 없다는 가정 하에 다출력 제어를 위한 단일 제어입력을 구성하는 디커플링 적응 퍼지 슬라이딩모드 제어방식을 제시하였다. 특히 본 논문에서는 디커플링된 4차 비선형 시스템을 제어목적 우선 순위에 따라 주목적과 부목적을 갖는 두 개의 부시스템으로 구분하고, 부목적의 부시스템에 정보를 갖는 보조변수에 의해 변형된 주목적의 슬라이딩 초평면에 적응 퍼지 알고리즘을 적용하여 주목적 부시스템의 미지시스템 함수를 근사화 함으로써, 근사된 주목적 부시스템의 미지시스템 함수로부터 구분한 두 부시스템의 각 제어 목적을 동시에 달성하는 제어입력을 구성하였다.

따라서, 제시한 디커플링 슬라이딩 모드 제어입력을 통해 수학적 모델이 미지라는 점을 해결할 수 있었으며, 주제어목적에 관계된 한 개 슬라이딩 초평면만을 이용한 적응 퍼지 알고리즘을 적용함으로써 기존 적응 퍼지 알고리즘에 비해 플랜트에 가해지는 제어입력 계산속도와 디커플링 시스템의 제어성능 속도를 향상시킬 수 있었다. 또한 추정된 근사치 $\hat{g}_1(s|b)$ 에 의해 제어이득과 경계폭 가변을 갖는 리칭모드(Reaching-Mode) 제어입력의 설정이 타당함과 함께 제어이득에서의 임의 설정값 최대 설정범위를 정하는 규칙을 제시하였다. 그리고, 이론의 검증을 위한 컴퓨터 모의실험으로서 미지의 비선형 연속함수를 갖는 디커플링된 비선형 시스템에 대한 본 논문의 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어방식이 기존의 방식에 비해 제어성능과 강인성이 매우 우수함을 알 수 있었다. 따라서, 향후 천장 크레인, 다관절 로봇과 같은 실제 시스템에 본 논문의 디커플링 적응 퍼지 슬라이딩모드 제어를 적용하고자한다.

참고문헌

- [1] R. Palm, "Robust control by fuzzy sliding mode," *Automatica*, Vol. 30, No. 9, pp. 1429-1437, 1994.
- [2] G.-C Hwang and S.-C. Lin, "A stability approach to fuzzy control design for nonlinear systems," *Fuzzy Sets Syst.*, Vol. 48, pp. 279-287, 1992.
- [3] S.-W. Kim and J.-J. Lee, "Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface," *Fuzzy Sets Syst.*, Vol. 71, pp. 359-367, 1995.
- [4] L.-X. Wang, "Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Vol. 1, pp. 146-155, 1993.
- [5] Byungkook Yoo and Woonchul Ham, "Adaptive fuzzy sliding control of nonlinear system", *IEEE Transactions on fuzzy systems*, Vol. 6, No. 2 May 1998.
- [6] Jen-Yang Chen, "Fuzzy sliding mode controller design : indirect adaptive approach", *Cybernetics and Systems : An International Journal*, No. 30, pp. 9-27, 1999.
- [7] Ji-Chang Lo and Ya-Hui Kuo, "Decoupled fuzzy sliding mode control", *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, Vol. 6, No. 3, pp. 1392-1398, August, 1998.
- [8] L.-X. Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and control: Design and stability analysis.*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1994.
- [9] H.-J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory and Its Applications*, 2nd ed. Boston, MA: Kluwer, 1991.
- [10] D. Dubois and H. Prade, *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. New York: Academic, 1980.
- [11] K. J. Astrom and B. Wittenmark, *Adaptive Control*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [12] J.-J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
- [13] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*. New York: Mac Millan, 1992.

김 도 우

1969년생. 1995년 한양대학교 전기공학 학과(학사). 1996년 (주)쌍용자동차 근무. 1998년 한양대학교 전기공학과(석사). 1998년~2001년 동대학원 전기공학과 박사과정 및 한국원자력 연구소 박사 학원연구원. 2001년~현재 대덕



대학 전기전자계열 재직. 관심분야는 자율 주행 로봇제어 및 응용, 비선형 적응제어, 적응 슬라이딩모드 제어, 퍼지제어등.

윤 지 섭

1958년생, 1980년 서울대학교 기계공학과 (학사), 1982년 한국과학기술원 기계공학과(석사), 1987년 한국과학기술원 기계공학과(박사), 1987년~현재 한국원자력연구소 핵연료주기단 원격취급장치 개발실 책임연구원/실장, 1991년 3월~



1992년 3월 Post Doc. 지능 제어연구실, Oak Ridge 국립연구소. 관심 분야는 원자력 시설 검사/보수/해체 기술, 로봇 및 센서 기술, 생산자동화 및 계측제어 등.

양 해 원

1950년생, 1971년 서울대학교 전기공학과 (학사), 1973년 서울대학교 전기공학과(석사), 1982년 일본 Kyoto 대학교 전기공학과(박사), 1986년~현재 한양대학교 전기공학과 교수.

