불확실한 비선형 시스템의 퍼지 관측기 기반의 슬라이딩 모드 제어기 설계
Sliding Mode Controller Design Based On The Fuzzy Observer For Uncertain Nonlinear System

°서 호 준*, 박 장 현'', 허 성 회'', 박 귀 태*

* 고려대학교 전기공학과(Tel : 81-02-3290-3698; Fax : 81-02-3290-3698 ; E-mail: hojoon@elec.korea.ac.kr)

Abstract : In adaptive fuzzy control systems, fuzzy systems are used to approximate the unknown plant nonlinearities. Until now, most of the papers in the field of controller design for nonlinear system using fuzzy systems considers the affine system with fixed grid-rule structure based on system state availability. This paper considers observer-based nonlinear controller and dynamic fuzzy rule structure. Adaptive laws for fuzzy parameters for state observer and fuzzy rule structure are established so that the whole system is stable in the sense of Lyapunov.

Keywords : sliding mode control, observer, fuzzy system

1. 서론

퍼지 시스템은 임의의 함수를 원하는 정도의 정밀도로 근사화할 수 있고[1] 전문가의 지식을 반영할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인하여 퍼지 시스템을 이용한 제어기는 제어 대상에 대한 정확한 수학적 모델이 필요치 않으며, 최근 불확실한 비선형 계통에 대하여 리아프노프(Lyapunov)관점에서 안정한 퍼지 제어 방식이 널리 연구되고 있다.[2,3,5]

그러나, 대부분의 연구결과는 모든 상태변수가 측정 가능하다는 시스템 상태 벡터 가용성을 전제로 하고 있으며, 또한 퍼지 규칙이 격자구조로 고정이 되어 있어 제어기의 차수가 불필요하게 높아진다는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 불확실한 비선형 시스템에 대한 퍼지 상태 관측기를 설계하여 상태 벡터 가용성 문제를 해결하였으며 관측기의 출력을 이용한 가변 구조 제어기를 설계하고자 한다. 또한, 제안한 기법에서는 퍼지 규칙 파라메터 뿐만 아니라 퍼지 규칙 구조까지 온라인으로 탐색하는 알고리즘을 제안하여 제어기의 차수를 낮추는 기법을 적용한다. 제시한 제어기는 온라인(on-line)으로 퍼지규칙의 파라메터 뿐만 아니라 구조도 갱신이 되며 리아프노브(Lyapunov) 관점의 안정도가 보장되도록 제어규칙과 파라메터 갱신법칙을 결정한다. 제안된 알고리즘의 효율성을 역진자 계통에 적용하여 모의실험으로 보인다.

2. 문제기술 및 가정

본 논문에서는 다음과 같은 단일입력 단일출력(SISO) 비선형 시스템을 고려한다.

$$y^{(n)} = f(x) + g(x)u \tag{1}$$

여기서

$y \in R$	: 시스템의 출력
$u \in R$	: 제어입력
$y^{(i)}\ i=1,\cdots n$	: y의 i번째 시간 도함수
$f(\cdot)g(\cdot):R^n \to R$	: 미지의 비선형 함수

상태변수를 $x=[x_1\ x_2 \cdots x_n]^T=[y\ y^{(1)} \cdots y^{(n-1)}]^T \in R^n$으로 정의하면 (1)은 다음과 같은 상태방정식으로 기술된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f(x) + g(x)u \\ y &= x_1 \end{aligned} \tag{2}$$

비선형 계통 (1)에 대해 제어기를 설계하기 위해서 다음과 같은 가정들이 필요하다.

가정 1: (1)의 함수 $f(x)$는 $(x) \in R^n$에 대해서 C^1이고, 입력 u에 대해서 smooth한 함수이다.

가정 2: 모든 $(x, u) \in R^{n+1}$에 대해서 $g(x) \neq 0$ 이 성립하고 $g(x)$의 부호는 알 수 있다.

가정 3: 기준입력 $y_d(t), y_d^{(1)}(t), \cdots y_d^{(n-1)}(t)$은 smooth하고 유계이다.

3. 퍼지 시스템을 이용한 함수의 근사화

Wang [1]의 연구 결과에 의하면 crisp 퍼지화기, max-product 추론, 무게중심 비퍼지화기를 사용하면 퍼지시스템의 출력은 식 (3)와 같이 표현된다.

$$y(x,\theta) = \frac{\sum_{l=1}^{M} \theta^l \left(\prod_{i=1}^{n} \mu_{F_i^l}(x_i)\right)}{\sum_{l=1}^{M} \left(\prod_{i=1}^{n} \mu_{F_i^l}(x_i)\right)} \triangleq \theta^T \xi(x) \tag{3}$$

식 (3)의 퍼지 시스템을 이용하면 임의의 함수를 원하는 정도까지 근사화시킬 수 있다는 사실이 알려져 있다. 여기서 $\mu_{F_i^l}$ 는 i 번째 상태변수에 대한 l 번째 퍼지 소속함수를 의미하며 θ 는 퍼지 후건부 파라메터 벡터이다. 또한, M은 퍼지 규칙의 개수를 나타내며 $\xi(x)$ 는 k 번째 요소가 다음 식 (4)와 같이 정의되는 M