

피지 슬라이딩 제어를 이용한 트럭 역주행 제어

송 영목, 임 화영  
 광운대학교 제어계측공학과

Truck Backer-Upper Control using Fuzzy-Sliding Control

Song Young Mok, Yim hwa Young  
 Kwnag Woon Univ

**Abstract** - Fuzzy Systems which are based on membership functions and rules, can control nonlinear, uncertain, complex systems well. However, Fuzzy logic controller(FLC) has problems: It is some difficult to design the stable FLC for a beginner. Because FLC depends mainly on individual experience. Sliding control is a powerful robust method to control nonlinearities and uncertain parameters systems. But it has a chattering problem by discontinuous control input according to sliding surface. Therefore it needs to be smoothed to achieve an optimal input.

In this paper, To solve problems desinged Fuzzy Sliding Control. The effectiveness of result is shown by the simulation and the experimental test for Truck Backer-Upper Control.

1. 서 론

피지 제어시스템은 소속함수와 규칙을 기반으로 비선형성이 강하고, 불확실하며, 복잡한 시스템을 비교적 쉽게 제어할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 다음과 같은 문제점들이 있다.

첫째, 전문가적인 경험이 부족할 경우 성능 저하의 우려가 있고, 둘째, 이상적인 소속함수를 결정하기가 어려워 역전파알고리즘 같은 방법이 필요로하게 된다. 그러므로 비교적 간단하며 강건한 피지 제어를 설계할 수 있는 방법이 요구된다.

본 논문에서는 이런 문제점을 해결하기 위해 피지 슬라이딩 제어를 적용하였다. 슬라이딩 모드 제어는 비선형이나 불확실한 시스템을 제어하는 방법으로 파라미터의 외란이나 변동에서 적용할 수 있는 강건한 제어 방법이다. 제안한 제어기의 효과를 검증하기 위해 불확실한 시스템인 트럭 역주행 제어에 적용하였다.

2. 피지 슬라이딩 제어기 설계

2.1 슬라이딩 제어

일반적인 비선형 시스템은 다음과 같이 표현 된다.

$$\dot{x}^{(n)}(t) = f(x, t) + b(x, t) \cdot u + \tilde{d} \tag{1}$$

여기서,  $x(t) = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T$ 인 상태 벡터,  $\tilde{d}(t)$ 는 상위 경계를 알고 있는 외란,  $u$ 는 제어 입력,  $f(x, t), b(x, t)$ 는 상태 벡터  $x$  와 시간  $t$  에 대한 비선형 함수,  $\nu_n$ 는 설계할 때 고려되어지는 비모델된 주파수이다. 추정 제어 문제는 원하는 상태 궤적을  $x^d(t)$ 라 할 때, 추정 오차  $x(t) - x^d(t)$ 을 모델 불확실성,

모델화되지 않은 주파수, 그리고, 외란의 존재에도 불구하고 0(zero)으로 만드는 제어 입력을 찾는 것이다. 추정 오차는,

$$e(t) = x(t) - x^d(t) = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T \tag{2}$$

로 정의하며 슬라이딩 평면 (2차 시스템인 경우 슬라이딩 라인)은,

$$s(x, t) = (dt/d + \lambda)^{n-1} e = \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n-1}{k} \lambda^k \cdot e^{(n-1-k)} \tag{3}$$

에 의해 결정되고,  $\lambda > 0$ 로 선택한다. 추정 제어 문제는 상태 벡터  $e(t)$ 를 모든 시간  $t \geq 0$ 에 대해서 슬라이딩 평면  $s(x, t) = 0$ 에 머무르도록 하는 제어 법칙의 설계와 같다. 따라서,  $V(0) = 0, V > 0$ , for  $s > 0$ 를 가진 리아프노프 함수,

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

을 정의한다. 시스템(1)이 안정하기 위한 충분 조건은,

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

이다. 여기서  $s$ 는 슬라이딩 평면으로부터의 거리이며  $\eta$ 는 양수이다. 도달 조건(reaching condition)은 다음과 같다.

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

(6)식이 만족되어진다면, 식(1)은 슬라이딩 모드(sliding mode)가 된다.

절점 주파수의 역할을 하는 파라미터  $\lambda$ 의 설계는 모델화되지 않은 주파수  $\nu_n$ 를 제거시키는 방법으로, 하위 경계를  $\nu_n \min$ 라 할때,

$$\lambda \ll \nu_n \min \tag{7}$$

가 되도록 설계 한다. 슬라이딩 모드 제어 법칙을 만족하는 제어 입력  $u$ 는 식(6)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \hat{b}^{-1}(\hat{u} - \hat{f}), \tag{8}$$

$$\hat{u} = G \cdot (\hat{u} - K(x, t) \cdot \text{sgn}(s)),$$

$$\hat{u} = x^{d(n)} - \sum_{k=1}^{n-1} \binom{n-1}{k} \lambda^k \cdot e^{(n-k)},$$

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & \text{for } s > 0 \\ -1 & \text{for } s < 0 \end{cases} \tag{9}$$

채터링을 감소시키기 위한 방법으로 가변 경계층,

$$B(t) = \{x | s(x, t) \leq \emptyset\} \text{ 을 도입하고, (8)식에서}$$

$\text{sgn}(s)$ 은  $\text{sat}(\frac{s}{\emptyset})$ 로 대체한다.

$$\text{sat}(s/\phi) = \begin{cases} s/\phi & \text{if } |s| < 1 \\ \text{sgn}(s/\phi) & \text{if } |s| \geq 1. \end{cases} \quad (10)$$

여기서,  $K(\mathbf{x}, t) > 0$  이고,  $\hat{f}$ 와  $\hat{b}$ 는  $f$ 와  $b$ 의 추정치이다.

$G$ 값을 결정하기 위해서 다음과 같이 경계를 정의한다.  
 $0 \leq \beta^{\min} \leq b \cdot \hat{b} \leq \beta^{\max}$ . (11)

여기서  $\hat{b}$ 은 추정 제어 이득으로,  $\hat{b} = (\beta^{\min} \cdot \beta^{\max})^{1/2}$ 이고,  $G = (\beta^{\min} \cdot \beta^{\max})^{-1/2}$ 로 정의된다.

그리고,  $\beta = (\beta^{\max}/\beta^{\min})^{1/2}$ 는 이득 여유이다.

제어항  $K(\mathbf{x}, t)$ 는,

$$K(\mathbf{x}, t) \geq \beta(|\Delta f| + (1 - \beta^{-1}) \cdot |\hat{u}| + |\hat{f}| + \eta). \quad (12)$$

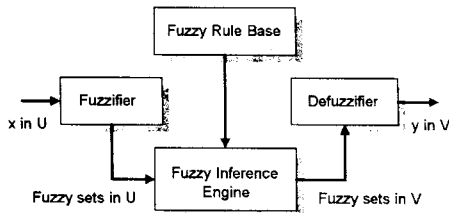
이고,  $|\Delta f|, |\hat{a}|, |\hat{u}|$ 의 상한치를 다음과 같이 정의하면,

$$|\Delta f| < \bar{F}, |\hat{a}| < \bar{D}, |\hat{u}| < \bar{U} \text{ 최종적으로,} \quad (13)$$

이다.

## 2.2 퍼지 제어기

퍼지 시스템은 <그림 1.>에서 보는 바와 같이 실제 입력값을 퍼지화하는 Fuzzifier, 퍼지값을 추론하는 Inference Engine, 추론 과정에서 이용되는 Fuzzy Rule Base, Fuzzy Rule Base를 구성하는 IF-THEN Rule, 퍼지값을 다시 실제 값으로 바꾸어주는 Defuzzifier로 나누어진다. Fuzzifier, Inference Engine, Defuzzifier는 여러 가지가 제시되어 있지만 Singleton Fuzzifier, Product Inference Engine, Center Average Defuzzifier 등이 일반적으로 사용된다.



<그림 1.> 퍼지 시스템

## 2.3 퍼지 슬라이딩 제어

채터링을 줄이기 위해 경계층을 둔 제어 항, 식(12) 대신에 퍼지 슬라이딩 제어 입력  $u_{fuzz}$ 은 다음과 같다.

$$u_{fuzz} = -K_{fuzz}(|s|) \cdot \text{sgn}(s) \quad (13)$$

$u_{fuzz}$ 를 구하기 위한 퍼지 제어기의 입력으로는 상태 벡터  $\mathbf{e}$ 와 슬라이딩 평면  $s=0$  사이의 거리  $|s|$ 의 크기를 사용한다. IF-THEN 규칙은 다음과 같다.

$$R^i: \text{if } s = LS^i \text{ then } u = LU^i \quad (14)$$

상응하는 제어 법칙은,

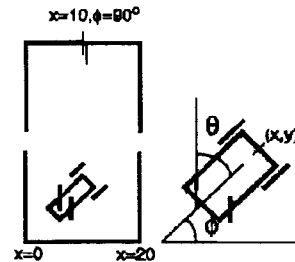
$$u = \hat{b}^{-1}(G \cdot \hat{u} - \hat{f} + G \cdot u_{fuzz}) \quad (15)$$

$$u_{fuzz} = -K(|s|) \cdot \text{sgn}(s) \quad (16)$$

로 바뀌고, 퍼지 슬라이딩 설계부분은 (16)식에 집중하고, 나머지 설계 과정은 경계층을 둔 슬라이딩모드 제어기의 설계에 따른다.

## 2.4 Truck Backer - Upper Control

트럭을 뒤로 이동시켜 우리가 원하는 위치로 제어한다는 것은 비선형 제어 문제이다. 이 논문의 기반이 되는 입력, 출력 값들은 운전자가 주어진 상황에서 대응하는 값의 측정값들을 이용하였으며, 시뮬레이션 구간은 <그림 2-1>과 같이 나타내었다.



<그림 2-1>

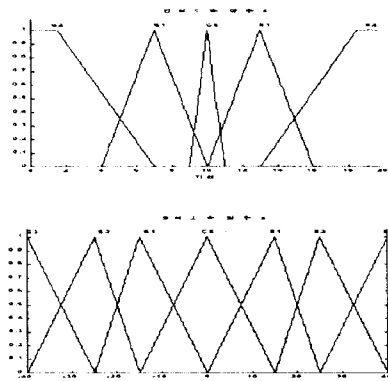
$X$ 는 거리,  $\phi$ 는 각도,  $\theta$ 는 출력값을 나타낸다.

트럭의 근사화 된 모델식은 다음과 같다.

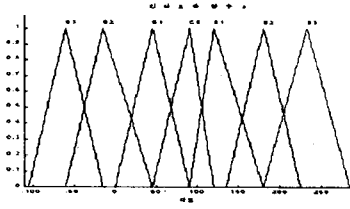
$$\begin{aligned} x(t+1) &= x(t) + \cos[\phi(t) + \theta(t)] + \sin[\theta(t)] \sin[\phi(t)] \\ y(t+1) &= y(t) + \sin[(\phi(t) + \theta(t)) - \sin[\theta(t)] \cos[\phi(t)] \\ \phi(t+1) &= \phi(t) - \sin^{-1}\left[\frac{2 \sin(\theta(t))}{b}\right] \end{aligned}$$

## 2.5 퍼지 슬라이딩 제어기 설계

(13)식의  $u_{fuzz}$ 값을 구하기 위한 소속 함수는 <그림 2-4.1>과 <그림 2-4.2>와 같다.



<그림 2-4.1 입력소속함수>



〈 그림 2-4.2 출력소속함수〉

퍼지 슬라이딩 제어 입력  $u_{fuzz}$ 를 구하기 위해서, Singleton fuzzifier, Center Average defuzzifier, Production Inference Engine,

$$u = \frac{\sum_{i=1}^M y_i^{-1} \left( \prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)}{\sum_{i=1}^M \left( \prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j) \right)} \quad (19)$$

을 사용하였다.

다음 조건으로 시뮬레이션을 실행한 결과이다.

Truck의 위치 : 거리 3, 각도 -30도  
 제어목표 위치 : 거리 10, 각도 90도

퍼지제어기를 이용한 경우 (시간에 대한 거리<그림 2-4.3>, 각도<그림 2-4.4>, 제어입력<그림 2-4.5>)

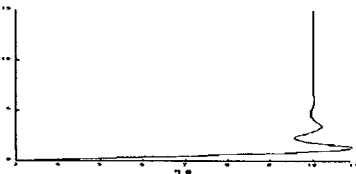


그림 2-4.3

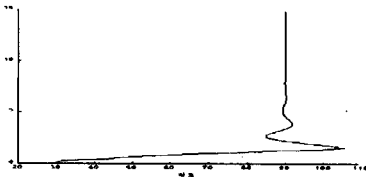


그림 2-4.4

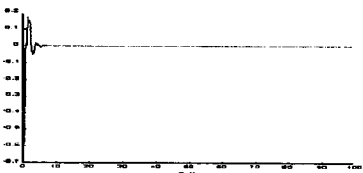


그림 2-4.5

퍼지 슬라이딩 이용한 경우(시간에 대한 거리(그림 2-4.6), 각도(그림2-4.7), 제어입력(그림 2-4.8))

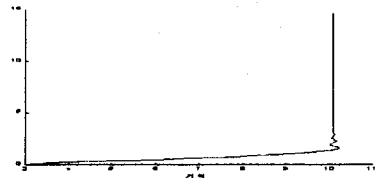


그림 2-4.6

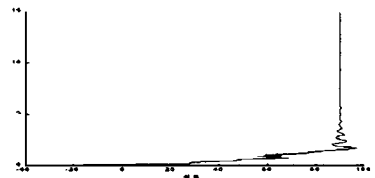


그림 2-4.7

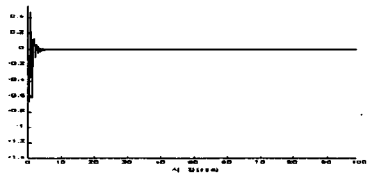


그림 2-4.8

### 3. 결 론

시뮬레이션 결과를 비교하여보면 간단하 퍼지제어기보다는 슬라이딩과 함께 사용하였을 때 좀 더 빠른 시간에 원하는 위치로 제어되는 것을 볼 수있었다. 하지만 이때 채터링과 트랙킹 오차가 생기는 것을 볼 수 있었으며, 향후 이를 보완하는 것이 과제로 남게되었다.

### (참 고 문 헌)

- [1] E.Slotine, L.Weiping, "Applied Nonlinear Control", Prentice Hall, 1991
- [2] P.Rainer, D.Dimitre and H.Hans, "Model Based Fuzzy Control", Springer, 1997
- [3] L.X.Wang, "A Course in Fuzzy systems and Control", Prentice Hall, 1997
- [4] L.X.Wang, "Generating Fuzzy Rules by Learning from Example" IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOL.22, NO 6, 1992