T-S 퍼지 모델을 이용한 유도탄 적응 제어

Missile Adaptive Control using T-S Fuzzy Model

윤한진, 박창우, 박민용
연세대학교 전기전자공학과

Han-Jin Youn, Chang-Woo Park, Mingon Park
Dept. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei Univ.
(youn_hanjin@hanmail.net)

ABSTRACT

In this paper, in order to control uncertain missile autopilot, an adaptive fuzzy control(AFC) scheme via parallel distributed compensation(PDC) is developed for the multi-input/multi-output plants represented by the Takagi-Sugeno(T-S) fuzzy model. Moreover adaptive law is designed so that the plant output tracks the stable reference model(SRM). From the simulations results, we can conclude that the suggested scheme can effectively solve the control problems of uncertain missile systems based on T-S fuzzy model.

Keywords : Missile Autopilot, T-S Fuzzy model, AFC, PDC, SRM

Ⅰ. 서 론

지금까지 유도탄 오토파일롯 제어를 위해 비선형 모델에 기반한 강인 또는 적응제어 기법이 많이 연구되어 왔다.[1][6] 그러나 유도탄 제어를 위해 필수적으로 필요한 비선형 모델을 그 복잡한 특성 때문에 모델링이 매우 어렵다. 한편 복잡한 비선형 시스템의 모델링을 위해 Takagi-Sugeno 퍼지 모델링 방법이 제안되었으며, 많은 비선형 시스템에 훌륭히 적용되어 왔다.[3] 본 연구에서는 이러한 퍼지 모델링을 이용해 유도탄 시스템을 묘사하고, 이를 기반으로 한 제어기를 설계한다. 즉, 복잡한 유도탄 플랜트를 퍼지 모델로 간단 명료하게 표현한 다음 퍼지 모델을 이용한 적응 퍼지 제어기를 설계하는 방법을 제안한다. 먼저 유도탄 운동 모델로 미지의 파라미터와 모델 불확실성을 갖는 비선형 모델을 선정하고, 여러 개의 설계 점을 선정한 후 선정된 각각의 설계 점에서 선형화된 운동방정식을 유도한 후 소속함수를 이용하여 퍼지 모델링을 한다. 그리고, 시스템의 변수에 대한 추정값을 구하고, 기준 모델과 플랜트의 퍼지 모델간의 에러, 상태, 기준입력 신호를 토대로 적응 퍼지 제어기를 설계한다.

위에 제시된 방법을 유도탄 받음각 제어기 설계에 적용하여 전체 폐루프 시스템의 안정도, 성능 등을 살펴보고, 컴퓨터를 이용한 모의실험을 통해 그 효용성을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 3개의 절로 1절에서는 T-S 모델을 기반으로 한 퍼지 제어를 소개하고, 2절에서는 T-S 퍼지 모델을 이용한 적응 퍼지 제어를 3절에서는 실제 유도탄 시스템에 적용하여 적응 퍼지 제어기를 설계한 다음 컴퓨터를 이용한 모의실험 결과를 살펴본 후, 마지막 3장에서는 결론을 다룬다.

Ⅱ. 본 론

2.1 T-S 모델을 기반으로 한 퍼지 제어

TAKAGI-SUGENO 퍼지 모델에 의해 표현되는 연속시간 비선형 시스템(Continuous-time Nonlinear System)이 있다고 하자. 그때 연속시간 비선형 시스템에 대한 T-S 모델의 규칙은 다음과 같이 표현할 수 있다.[3]

$$R^i : \textit{If } x_1(t) \textit{ is } M_1^i \cdots \text{ and } x_n(t) \textit{ is } M_n^i \quad \textit{Then } \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \tag{1.1}$$

단, $R^i (i=1,2,\cdots,l)$는 i번째 퍼지 규칙을 나타내고, l은 퍼지 규칙의 수이고, M_n^i는 퍼지 집합이며

$x^T(t) = [\, x_1(t),\ x_2(t),\ \cdots,\ x_n(t)]$,

$u^T(t) = [\, u_1(t),\ u_2(t),\ \cdots,\ u_m(t)]$ 이다.

주어진 상태와 입력 $(x(t), u(t))$으로 부터 연속시간 비선형 시스템에 대한 T-S 퍼지 모델의 추론 결과는

아래와 같다.

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t))\{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t))} \quad (1.2)$$

단, $w_i(x(t)) = \prod_{j=1}^{n} M_j^i(x_j(t))$ 이고, $M_j^i(x_j(t))$ 는 $x(t)$에 관한 소속함수의 적합도를 나타내며, $\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t)) > 0$, $w_i(x(t)) \geq 0$ (for $i = 1,2,\cdots,l$)로 가정한다.

여기서, 퍼지 시스템(1.2)의 안정화를 위한 퍼지 제어기 설계를 위해 병렬 분산 보상(Parallel Distribution Compensation)개념을 이용한다.[3] PDC 제어기는 전제 조건의 완성을 위하여 퍼지 모델과 동일한 퍼지 집합을 공유한다. 즉, PDC 제어기는 아래와 같은 형태를 갖는다.

$$R^i : \textit{If } x_1(t) \textit{ is } M_1^i \cdots \textit{ and } x_n(t) \textit{ is } M_n^i \quad \textit{Then } u(t) = -K_i x(t) \quad (1.3)$$

단, $x^T(t) = [x_1(t), x_2(t), \cdots, x_n(t)]$ $(i = 1,2,\cdots,l)$ 이다.

주어진 상태 $x(t)$로부터 PDC 제어기(1.3)의 제어 입력은 식 (1.4)와 같이 추론될 수 있다.

$$u(t) = -\frac{\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t)) K_i x(t)}{\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t))} \quad (1.4)$$

단, $w_i(x(t)) = \prod_{j=1}^{n} M_j^i(x_j(t))$ 이다.

식 (1.2)에 식 (1.4)를 대입하면 다음과 같은 폐루프 퍼지 제어 시스템을 구할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) w_j(x(t)) \{A_i - B_i K_j\} x(t)}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) w_j(x(t))} \quad (1.5)$$

위 시스템(1.5)의 안정성 보장은 다음의 Theorem 1에서 보인다.

Theorem 1 **T-S 퍼지 시스템의 안정 조건**

만약 모든 $i, j (= 1,2,\cdots l)$에 대해서 $G_{ij}^T P + P G_{ij} = -Q_{ij}$ 식을 만족하는 양의 한정 행렬 P가 존재하고, Q_{ij}는 양의 한정 행렬이라면 퍼지 제어 시스템(1.5)의 평형상태는 전역적으로 점근적 안정이다. 단 $G_{ij} = A_i - B_i K_j$ 이다.

이에 대한 증명은 참고문헌[3]를 참조하기 바란다.

2.2 T-S 모델을 기반으로 한 적응 제어

T-S 퍼지 모델에 의해 표현되는 비선형 플랜트가 다음과 같다고 하자.

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t))\{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t))} \quad (2.1)$$

단, $x(t) \in R^n$ 는 측정 가능하고, $A_i \in R^{n\times n}$, $B_i \in R^{n\times q}$ $(i = 1,\cdots,l)$는 미지의 상수 행렬이며 (A_i, B_i)는 제어 가능하다. 제어의 목적은 폐루프 플랜트에서 모든 신호가 유계 범위를 갖는 입력 벡터 $u(t) \in R^q$를 선택하고 다음 식과 같은 기준 모델의 상태 $x_m(t) \in R^n$를 플랜트의 상태 $x(t)$ 가 따라가도록 결정하는 것이다

$$\dot{x}_m(t) = \frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t)) \{(A_m)_{ij} x_m(t) + (B_m)_{ij} r(t)\}}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t))} \quad (2.2)$$

여기서 $(A_m)_{ij} \in R^{n\times n} (i, j = 1,\cdots,l)$은 Theorem 1에서의 퍼지 시스템의 안정조건을 만족시키고, $(B_m)_{ij} \in R^{n\times q}$ 이며, $r(t) \in R^q$ 은 유계되어 있는 기준 입력 벡터이다.

2.2.1 제어 입력 (Control Law)

만약 행렬 A_i, B_i를 알고 있다면, 제어 입력은

$$u(t) = \frac{\sum_{j=1}^{l} \mu_j(x(t))(-K_j^* x(t) + L_j^* r(t))}{\sum_{j=1}^{l} \mu_j(x(t))} \quad (2.3)$$

이고, 이 식(2.3)을 위의 식(2.1)에 대입하면 다음과 같은 폐루프 플랜트를 구할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t)) \{(A_i - B_i K_j^*) x(t) + B_i L_j^* r(t)\}}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t))} \quad (2.4)$$

그러므로, 만약 $K_j^* \in R^{q\times n}$, $L_j^* \in R^{q\times q}$ 이 다음 대수 방정식을 만족하도록 선택되어 진다면,

$$A_i - B_i K_j^* = (A_m)_{ij}, \quad B_i L_j^* = (B_m)_{ij} \quad (2.5)$$

그때 폐루프 플랜트의 전달 함수는 기준 모델의 전달함수와 동일하게 되며 어떤 유계된 기준 입력 신호 $r(t)$에 대해 $x(t)$는 $x_m(t)$로 지수적으로 접근한다.

그러나, A_i, B_i를 정확히 알지 못하므로 다음과 같은 제어 입력을 제안한다.

$$u(t) = \frac{\sum_{j=1}^{l} \mu_j(x(t))(-K_j(t) x(t) + L_j(t) r(t))}{\sum_{j=1}^{N} \mu_j(x(t))} \quad (2.6)$$

여기서, $K_j(t)$, $L_j(t)$ 는 K_j^* , L_j^* 의 추정치이고 적응 규칙에 의해 계산되어 진다.

2.2.2 적응 규칙 (Adaptive Law)

원하는 제어 입력(2.3)에 B_i를 곱한 다음 (2.1)식에서 더하고 빼면 아래 (2.7)과 같고,

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) = &\frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t)) (A_m)_{ij}}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t))} x(t) \\ &+ \frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t)) (B_m)_{ij}}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t))} r(t) \\ &+ \frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t)) B_i (K_j^* x(t) - L_j^* r(t) + u(t))}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t))}\end{aligned} \quad (2.7)$$

적응규칙에 의해 구해진 제어 입력(2.6)에 $\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t)) B_i / \sum_{i=1}^{l} w_i(x(t))$ 를 곱한다음 (2.2)식에서 더하고 빼면 아래 (2.8)식과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{x}_m(t) = &\frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t)) (A_m)_{ij}}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t))} x_m(t) \\ &+ \frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t)) (B_m)_{ij}}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t)) \mu_j(x(t))} r(t)\end{aligned}$$

$$+\frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(\boldsymbol{x})\mu_j(\boldsymbol{x}(t))\, B_i(K_j(t)\,\boldsymbol{x}(t)-L_j(t)\,\boldsymbol{r}(t)+\boldsymbol{u}(t))}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(\boldsymbol{x}(t))\mu_j(\boldsymbol{x}(t))} \tag{2.8}$$

추적 오차(trackimg error)를 $e(t) \triangleq x(t) - x_m(t)$ 로 정의하면 에러 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{e}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\,\mu_j(x(t))\,(A_m)_{ij}}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\mu_j(x(t))}\, e(t) + \frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\,\mu_j(x(t))\, B_i(-\tilde{K}_j(t)\,x(t)+\tilde{L}_j(t)\,r(t))}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\mu_j(x(t))}$$

단, $\tilde{K}_j(t) = K_j(t) - K_j^*$, $\tilde{L}_j(t) = L_j(t) - L_j^*$ 이다. 여기서 L_j^*는 양의 한정 혹은 음의 한정이라 가정하고 $\Gamma_j^{-1} = L_j^* sgn(l_j)$ (단, L_j^*가 양의 한정이면 $l_j=1$ 이고 음의 한정이면 $l_j=-1$)으로 정의하자. 그러면 $B_i = (B_m)_{ij} L_j^{*-1}$ 이 되고 추적오차의 미분값은 아래와 같다.

$$\dot{e}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\mu_j(x(t))(A_m)_{ij}}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\mu_j(x(t))}\, e(t) + \frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\,\mu_j(x(t))(B_m)_{ij}L_j^{*-1}(-\tilde{K}_j(t)\,x(t)+\tilde{L}_j(t)\,r(t))}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\mu_j(x(t))}$$

이제 페푸프 플랜트 모델(2.7)이 기준 모델(2.2)를 따라가도록 적응 규칙을 구해보자.

리아프노프 후보 함수를 V라 하면,

$$V(e(t), \tilde{K}_j(t), \tilde{L}_j(t)) = e(t)^T P\, e(t) + \sum_{j=1}^{l} tr(\tilde{K}_j(t)^T \Gamma_j \tilde{K}_j(t) + \tilde{L}_j(t)^T \Gamma_j \tilde{L}_j(t))$$

단, 양의 한정 행렬 $P = P^T > 0$는 A_m의 안정 조건을 만족시키는 리아프노프의 방정식 $(A_m)_{ij}^T P + P(A_m)_{ij} = -Q_{ij}$ $(Q_{ij} = Q_{ij}^T > 0\ (i,j=1,\cdots,l))$ 을 만족시킨다.

그렇다면 V의 미분값 $\dot{V}$는

$$\dot{V} = -e(t)^T \frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\,\mu_j(x(t))\,Q_{ij}}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\mu_j(x(t))}\, e(t) + 2tr\left\{ -\frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\,\mu_j(x(t))\,\tilde{K}_j(t)^T\Gamma_j(B_m)_{ij}^T sgn(l_j)}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\mu_j(x(t))} P e(t)\, x(t)^T + \sum_{j=1}^{l} \tilde{K}_j(t)^T\Gamma_j\, \dot{\tilde{K}}_j(t) \right\} + 2tr\left\{ \frac{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\,\mu_j(x(t))\,\tilde{L}_j(t)^T\Gamma_j(B_m)_{ij}^T sgn(l_j)}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\mu_j(x(t))} P e(t)\, r(t)^T + \sum_{j=1}^{l} \tilde{L}_j(t)^T\Gamma_j\, \dot{\tilde{L}}_j(t) \right\}$$

이 된다.

그러므로 $\dot{V}$가 음의 한정이 되기 위한 적응 규칙은 다음 두 식(2.9)과 같이 되어야 된다.

$$\dot{\tilde{K}}_j(t) = \dot{K}_j(t) = \frac{\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t))\,\mu_j(x(t))\,(B_m)_{ij}^T sgn(l_j)}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\mu_j(x(t))} P e(t)\, x(t)^T = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t))(B_m)_{ij}^T}{\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t))} \right\} \left\{ \frac{\mu_j(x(t))}{\sum_{j=1}^{l}\mu_j(x(t))} \right\} sgn(l_j)\, P\, e(t)\, x(t)^T$$

$$\dot{\tilde{L}}_j(t) = \dot{L}_j(t) = -\frac{\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t))\,\mu_j(x(t))\,(B_m)_{ij}^T sgn(l_j)}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l} w_i(x(t))\mu_j(x(t))} P e(t)\, r(t)^T = -\left\{ \frac{\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t))(B_m)_{ij}^T}{\sum_{i=1}^{l} w_i(x(t))} \right\} \left\{ \frac{\mu_j(x(t))}{\sum_{j=1}^{l}\mu_j(x(t))} \right\} sgn(l_j)\, P\, e(t)\, r(t)^T \tag{2.9}$$

Theorem 2 적응 퍼지 제어기의 안정성

적응 규칙(2.9), 제어 입력(2.6)을 갖는 퍼지 모델(2.2)과 플랜트 모델(2.1)에서 기준 입력 $r(t)$와 기준 모델의 상태 $x_m(t)$가 유계 되어 있다면 그때의 제어 입력(2.6)과 적응 규칙(2.9)는 다음의 조건을 보장해 준다.

(i) $K(t)$, $L(t)$, $e(t)$ are bounded

(ii) $e(t) \to 0$ as $t \to \infty$

이에 대한 증명은 참고문헌[2]를 참조하기 바란다.

2.3 유도탄 오토파일롯의 제어

2.3.1 퍼지 모델링 및 제어기 설계

본 연구를 위해 참고문헌[1]에 주어진 비선형 미사일 운동 방정식을 사용한다. 즉.

$$\dot{x}_1 = (\frac{fgQS}{WV})\cos(x_1)[\,\phi_z(x_1) + b_z\, u] + x_2$$
$$\dot{x}_2 = (\frac{fQSd}{I_{yy}})[\,\phi_m(x_1) + b_m\, u] \tag{3.1}$$

단, x_1은 받음각, x_2는 피치각속도, u는 제이핀 변위각, V는 유도탄 속도, I_{yy}는 피치 방향의 관성 모멘트, Q는 동압, S는 기준 면적, d는 기준 직경, f는 radians을 degree로 바꿔주는 인자, g는 중력가속도를 나타내며

$\phi_z(x_1) = 0.000103\ x_1^3 - 0.00945\, x_1 |x_1| - 0.170\, x_1$

$\phi_m(x_1) = 0.000215\ x_1^3 - 0.0195\, x_1 |x_1| + 0.051\, x_1$

b_z = -0.034, b_m = -0.206 이다.

위 식(3.1)을 이용하여 제안된 적응 퍼지 제어기 설계 를 위해서는 미사일을 나타내는 T-S 퍼지 모델이 필요하 다. 평형점에서의 리아프노프 선형화 방법을 이용해서 입력에 대 한 x_1, x_2값의 변화를 확인하여 기울기가 바 뀌는 점을 기준으로 퍼지 선형화를 한다.

R^1 : *If* x_1 *is about* 0 , *then* $\dot{x} = A_1 x + B_1 u$

R^2 : *If* x_1 *is about* 20 , *then* $\dot{x} = A_2 x + B_2 u$

R^3 : *If* x_1 *is about* -20 , *then* $\dot{x} = A_3 x + B_3 u$

R^4 : *If* x_1 *is about* 50 , *then* $\dot{x} = A_4 x + B_4 u$

R^5 : *If* x_1 *is about* -50 , *then* $\dot{x} = A_5 x + B_5 u$

R^6 : *If* x_1 *is about* 100 , *then* $\dot{x} = A_6 x + B_6 u$

R^7 : *If* x_1 *is about* -100 , *then* $\dot{x} = A_7 x + B_7 u$

R^8 : *If* x_1 *is about* 180 , *then* $\dot{x} = A_8 x + B_8 u$

R^9 : *If* x_1 *is about* -180 , *then* $\dot{x} = A_9 x + B_9 u$

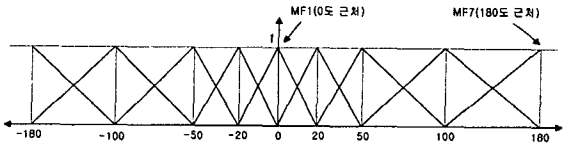

그림1. x_1의 소속 함수

원 미사일 운동방정식은 그림1의 소속함수에 대응하는 퍼지 공간에서 분할되어 진다.

제안된 적응 퍼지 제어기 설계를 적용하기 위하여, 플랜트의 기준 모델은 다음과 같이 설정했다.

$$\dot{x}_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} x_m + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} r \tag{3.2}$$

제어기는 전건부를 완성하기 위해 퍼지 모델에서

동일한 퍼지 집합을 갖는다. 즉, 제어기는 아래의 형태를 갖게 된다.

R^i : *If* x_1 *is* MF_i

$u(t) = -K_j\,[x_1\ x_2]^T + L_j\,r(t)$

$j = 1,2,3,4,5,6,7,8,9$

제어기의 피드백 제어 게인 K_i , L_i는 폐루프 플랜트가 기준 모델(3.2)을 따라가도록 적응 규칙에 의해 실시간 업데이트 된다. 이제 (2.9)식을 이용해서 폐루프 플랜트가 기준 모델을 따라 가도록 적응 규칙의 요소 K_i , L_i를 구하면 다음식과 같다.

$$\dot{K}_j(t) = \left\{ \frac{\mu_j(x(t))}{\sum_{j=1}^{7}\mu_j(x(t))} \right\} sgn(l_j) B_m^T P\, e(t)\, x(t)^T$$

$$\dot{L}_j(t) = \left\{ \frac{\mu_j(x(t))}{\sum_{j=1}^{7}\mu_j(x(t))} \right\} sgn(l_j) B_m^T P\, e(t)\, r(t)^T$$

$(j = 1,2,3,4,5,6,7,8,9)$

단, $B_m^T = [\,1\ \ 0\,]$, $P = \begin{bmatrix} 1.5 & -0.5 \\ -0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$ 이다.

2.3.2 모의 실험 결과

모의실험을 통하여 앞에서 제시한 적응 제어기의 성능을 알아본다.

초기 조건은 $x_1 = 30^0$, $x_2 = 0^0$ 로 하고 기준 입력 신호를 0으로 하였다. 그림2는 기준 모델, 그림3은 퍼지 모델, 그림4는 원 시스템 모델의 응답을 나타내며 그림5는 입력 신호이다.

본 모의 실험은 T-S 퍼지 모델링의 효용성을 동시 점검하기 위해 설계된 제어기를 퍼지 모델 뿐만 아니라 원 모델(4.1)로도 적용 하였다. 그리고 시스템의 적응 성능을 보이기 위해 파라미터(b_z, b_m)를 공칭값의 20% 이내에서 변화시켰다.

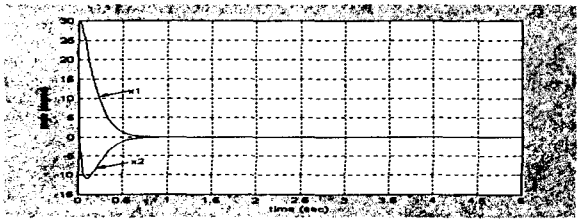

그림2 기준 모델의 신호

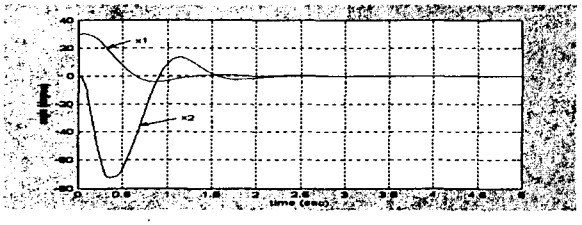

그림3 퍼지 모델의 신호

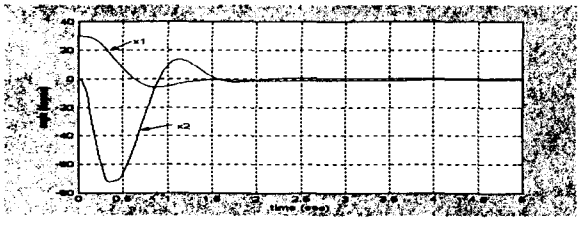

그림4 원 플랜트 모델의 신호

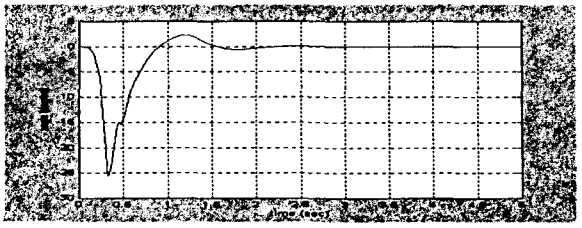

그림5 입력 신호

그림으로부터 알 수 있듯이 파라미터 변화에도 불구하고 제어를 훌륭히 수행함을 알 수 있다.

Ⅲ. 결 론

본 논문에서는 불확실한 미사일 오토파일롯의 제어를 위해 미사일 시스템의 T-S 퍼지 모델을 유도하고 이를 기반으로 한 적응 퍼지 제어기를 설계하는 방법을 제시하였다. 제어기는 병렬 분상 보상 이론을 이용하여 설계되며 적응 규칙을 미사일 시스템의 기준 모델을 추종하도록 작동하게 된다. 제안된 제어기는 regulation 제어를 성공적으로 해결하는 것을 모의실험을 통해 보였다.

Ⅳ. 참고문헌

[1] R.A. Hull and Z. Qu, "*Design and Evaluation of Robust Nonlinear Missile Autopilots from a Performance Perspective*", Proc, ACC, 1995, pp.189-193

[2] C.W. Park, C.H. Lee and M. Park "*Control of Uncertain Flexible Joint Manipulator Using Adaptive Takagi-Sugeno Fuzzy Model Based Controller*" IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Seoul, Korea, May 2001, pp.985-990

[3] T. Takagi and M. Sugeno, "*Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control*", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., 1985, vol.15, no.1, pp.116-132

[4] John H. Blakelock, Inc, *Automatic Control of Aircraft and Missiles*, John Wiley & Sons, 1991

[5] P. A. Ioannou and J. Sun, *Robust Adaptive Control*, Prentice Hall International Editions, New Jersey, 1996

[6] Chauan-Kai Lin and Sheng-De Wang, "*Adaptive Fuzzy Control of Bank-To-Turn Missiles*", IEEE Int. Conf. Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Taipei, Taiwan 1996, Vol.1, pp.596 -601