

비선형 시스템에 대한 동적인 규칙 삽입을 이용한 퍼지 관측기 설계

서 호 준* 박정현*** 서삼준** 김동식* 박귀태***
 (*)순천향대학교 정보기술공학부 (**) 안양대학교 전기전자공학과 (***) 고려대학교 전기전자전파공학부

Design of Fuzzy Observer for Nonlinear System using
 Dynamic Rule Insertion

Seo, Hojoon* Park, Janghyun*** Seo, Samjun** Kim, Dongsik* Park, Gwitae***
 (*) Soonchunhyang Univ. (**) Anyang Univ. (***) Korea Univ.

Abstract - In the adaptive fuzzy sliding mode control, from a set of a fuzzy IF-THEN rules adaptive fuzzy sliding mode control whose parameters are adjusted on-line according to some adaptation laws is constructed for the purpose of controlling the plant to track a desired trajectory. Most of the research works in nonlinear controller design using fuzzy systems consider the affine system with fixed grid-rule structure based on system state availability. The fixed grid-rule structure makes the order of the controller big unnecessarily, hence the on-line fuzzy rule structure and fuzzy observer based adaptive fuzzy sliding mode controller is proposed to solve system state availability problems. Therefore, adaptive laws of fuzzy parameters for state observer and fuzzy rule structure are established implying whole system stability in the sense of Lyapunov.

1. 서 론

최근에는 비선형 계통의 고차항을 무시하는 자코비언 선형화 기법과는 달리 케환이나 좌표변환만을 사용하여 주어진 비선형 계통을 입출력 선형 동특성을 갖도록 하는 입출력 선형화 기법에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. Sastry 와 Isidori는 계통의 상대 차수를 알고 입출력 선형화가 가능한 비선형 계통에 대해 계통의 비선형 동특성을 비선형 기저 함수(Nonlinear basis function)들의 선형 결합으로 표현하고 이를 추정함으로써 제어 목적에 이용하는 적응 제어 기법에 대한 연구를 수행한바 있다.[1,2] 그러나 이 방법에서는 비선형 모델에 대한 수학적 배경에 기초하므로 전개가 복잡하게 되는 문제가 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 임의의 함수를 원하는 정도의 정밀도로 근사화할 수 있고 [3,4] 전문가의 지식을 반영할 수 있는 장점을 지닌 퍼지 제어기를 도입하여 불확실한 비선형 계통에 대하여 리아프노프 관점에서 안정한 퍼지 제어방식이 널리 연구되고 있다.[3-6] 이러한 연구자들 중에서 Wang은 비선형 동특성을 퍼지기저함수(fuzzy basis function)들의 선형 결합형태로 표현하고 파라미터들을 추정하여 제어 목적에 이용하는 퍼지 적응 제어기(fuzzy adaptive controller)를 제안한 바 있다.[3,4] Wang의 방법에서는 퍼지 제어규칙의 수만큼 파라미터를 추정하여야 하므로 추정하여야 할 파라미터 수가 규칙의 개수나 기준 퍼지 집합의 개수에 비례하여 급증하게 되는 문제가 있어 실시간에 적용하기에는 문제가 있으며 대부분의 연구결과는 모든 상태변수가 측정 가능하다는 시스템 상태 벡터 가용성을 전제로 하고 있다.

따라서, 본 논문에서는 상태 벡터 가용성이 결여된 불확실한 비선형 시스템에 대하여 퍼지 상태 관측기를 설계하여 상태 벡터 가용성 문제를 해결하였다. 또한, 제안한 기법에서는 퍼지 규칙 파라미터뿐만 아니라 퍼지 규칙 구조까지 온라인으로 탐색하는 알고리즘을 제안하여

제어기의 차수를 낮추는 기법을 적용한다. 제시한 제어기는 온라인(on-line)으로 퍼지규칙의 파라미터뿐만 아니라 구조도 갱신이 되며 리아프노브(Lyapunov) 관점의 안정도가 보장되도록 제어규칙과 파라미터 갱신법칙을 결정하였다.

2. 온라인 자동 조정 퍼지 규칙 시스템

식 (1)로 표현되는 단일입력 단일출력(SISO) 비선형 시스템을 고려한다.

$$y^{(n)} = f(y, y^{(1)}, \dots, y^{(n-1)}) + g(y, y^{(1)}, \dots, y^{(n-1)})u + d(t) \quad (1)$$

여기서, y 는 출력, u 는 제어 입력, $y^{(i)}$ 는 y 의 i 번째 시간도함수 그리고 $f(\cdot), g(\cdot)$ 는 미지의 비선형 함수이다. 상태변수를 $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T = [y \ y^{(1)} \ \dots \ y^{(n-1)}]^T \in R^n$ 으로 정의하면 식 (1)의 비선형 시스템은 다음 식 (2)와 같은 상태방정식으로 기술된다.

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

퍼지 모델 식별 이론에 근거하여 임의의 비선형 함수 $f(x), g(x)$ 의 근사값은 crisp 퍼지화기, max-product 추론, 무게중심 비퍼지화기를 사용하여 식 (3)과 같은 퍼지 시스템의 출력으로 표현된다.[7]

$$\begin{aligned} \hat{f}(x|\theta_f) &= \frac{\sum_{i=1}^M \theta_{f_i} (\prod_{j=1}^n \mu_{F_j}(x_j))}{\sum_{i=1}^M (\prod_{j=1}^n \mu_{F_j}(x_j))} \triangleq \theta_f^T \xi_f(x) \\ \hat{g}(x|\theta_g) &= \frac{\sum_{i=1}^M \theta_{g_i} (\prod_{j=1}^n \mu_{G_j}(x_j))}{\sum_{i=1}^M (\prod_{j=1}^n \mu_{G_j}(x_j))} \triangleq \theta_g^T \xi_g(x) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하면 임의의 함수 $f(x), g(x)$ 를 원하는 정도까지 근사화시킬수 있다는 사실이 알려져 있다. 여기서, μ_{F_j}, μ_{G_j} 는 i 번째 상태변수의 l 번째 소속함수를 의미하며 $\theta_f = (\theta_{f_1}, \theta_{f_2}, \dots, \theta_{f_M})^T$ 와 $\theta_g = (\theta_{g_1}, \theta_{g_2}, \dots, \theta_{g_M})^T$ 는 후건부 파라미터 벡터이며 M 은 규칙의 개수이다. 또한, $\xi_f(x) = (\xi_{f_1}(x), \dots, \xi_{f_M}(x))^T, \xi_g(x) = (\xi_{g_1}(x), \dots, \xi_{g_M}(x))^T$ 이며 k 번째 요소가 식 (4)와 같이 정의되는 M 차원의 퍼지 기저 함수(FBF : fuzzy basis function)라 한다.

$$\begin{aligned} \xi_{f_k}(x) &\triangleq \frac{\prod_{j=1}^n \mu_{F_j}(x_j)}{\sum_{i=1}^M (\prod_{j=1}^n \mu_{F_j}(x_j))} \\ \xi_{g_k}(x) &\triangleq \frac{\prod_{j=1}^n \mu_{G_j}(x_j)}{\sum_{i=1}^M (\prod_{j=1}^n \mu_{G_j}(x_j))} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)의 퍼지 시스템을 이용하여 함수 $f(x), g(x)$ 의 근사값을 추정하는 알고리즘은 퍼지 규칙들 중에서 규칙 적합도의 크고 작음에 관계없이 모든 퍼지 규칙이 전체

퍼지 시스템의 출력에 반영되므로 모든 FBF에 대한 적응책이 필요하게 되어 불필요하게 제어기의 차수가 증가하는 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 퍼지 규칙 구조를 온라인으로 탐색하는 알고리즘을 제안하였다.

식 (4)에서 정의한 k 번째 FBF가 다음의 조건식 (5)를 만족하는 경우에 대하여 시간 t 이후에 k 번째 FBF가 활성화되는 기법을 취한다.

$$\begin{aligned} \xi_{fk}(x) &\geq \epsilon_{fFBF} \\ \xi_{gk}(x) &\geq \epsilon_{gFBF} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\epsilon_{fFBF}, \epsilon_{gFBF}$ 는 활성화와 경계값을 나타내며 0과 1사이의 범위를 갖는다. 즉, 설계자가 지정한 활성화 경계값 이하의 값을 갖는 FBF는 전체 퍼지 시스템의 출력에 반영하지 않고 활성화 경계값 이상의 값을 갖는 FBF만을 반영한다. 식 (5)의 조건을 이용하여 활성화(active)된 FBF와 비활성화(passive)된 FBF로 전체 퍼지 시스템을 표현할 수 있으며, 다음 식 (6)과 같이 활성화된 FBF만을 이용하여 퍼지 시스템의 출력을 표현한다.

$$\begin{aligned} \hat{f}_a(x|\theta_{fa}) &= \theta_{fa}^T \xi_{fa}(x) \\ \hat{g}_a(x|\theta_{ga}) &= \theta_{ga}^T \xi_{ga}(x) \end{aligned} \quad (6)$$

또한, 식 (2)의 $f(x)$ 와 $g(x)$ 는 식 (7)과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} f(x) &= \hat{f}(x|\theta_f^*) + \delta_f(x) = \theta_f^{*T} \xi_f(x) + \delta_f(x) \\ g(x) &= \hat{g}(x|\theta_g^*) + \delta_g(x) = \theta_g^{*T} \xi_g(x) + \delta_g(x) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, θ_f^*, θ_g^* 는 최적의 추정치를 갖는 퍼지 파라미터를 의미하며, $\delta_f(x)$ 와 $\delta_g(x)$ 는 함수 $f(x), g(x)$ 의 추정 오차이다. 식 (7)은 활성화된 FBF와 비활성화된 FBF로 분리하여 표현하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{f}(x|\theta_f^*) &= \theta_f^{*T} \xi_f(x) = \begin{bmatrix} \theta_{fa}^* \\ \theta_{fb}^* \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \xi_{fa}(x) \\ \xi_{fb}(x) \end{bmatrix} \\ \hat{g}(x|\theta_g^*) &= \theta_g^{*T} \xi_g(x) = \begin{bmatrix} \theta_{ga}^* \\ \theta_{gb}^* \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \xi_{ga}(x) \\ \xi_{gb}(x) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)로부터 활성화와 경계값에 의하여 활성화된 부분 $\theta_{fa}^*, \theta_{ga}^*$ 과 비활성화된 부분 $\theta_{fb}^*, \theta_{gb}^*$ 로 퍼지 후건부 파라미터를 분리하여 표현하면 식 (9)과 같다.

$$\theta_f^* = \begin{bmatrix} \theta_{fa}^* \\ \theta_{fb}^* \end{bmatrix} \quad \theta_g^* = \begin{bmatrix} \theta_{ga}^* \\ \theta_{gb}^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

위와 유사하게 θ_f^*, θ_g^* 의 추정치인 θ_f, θ_g 또한 다음 식 (10)과 같이 분리하여 표현할 수 있다.

$$\theta_f = \begin{bmatrix} \theta_{fa} \\ \theta_{fb} \end{bmatrix} \quad \theta_g = \begin{bmatrix} \theta_{ga} \\ \theta_{gb} \end{bmatrix} \quad (10)$$

위에서 기술된 활성화와 경계값이 도입된 퍼지 시스템을 이용하여 상태 관측기를 구성하는 방법에 대하여 다음 절에서 논한다.

3. 퍼지 시스템을 이용한 상태 관측기의 설계

식 (1)로 표현되는 비선형 시스템의 상태 공간 모델은 다음 식 (11)과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + b[f(x) + g(x)u + d(t)] \\ y &= c^T x \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, A, b 그리고 c 행렬은 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ c^T &= [1 \ 0 \ \dots \ 0] \end{aligned} \quad (12)$$

식 (11)의 비선형 시스템에 대한 상태 관측기는 다음 식 (13)과 같이 설계한다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + b[\hat{f}_a(\hat{x}|\theta_{fa}) + \hat{g}_a(\hat{x}|\theta_{ga})u - v(t) \\ &\quad + K(y - \hat{y})] \\ \hat{y} &= c^T \hat{x} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, $v(t)$ 는 퍼지 시스템의 근사화 오차를 보상하기 위한 입력항이며, $\hat{f}_a(\hat{x}|\theta_{fa})$ 와 $\hat{g}_a(\hat{x}|\theta_{ga})$ 는 관측기의 출력 \hat{x} 를 이용하여 $f(x)$ 와 $g(x)$ 를 추정할 함수로써 앞에서 설명한 바와 같이 활성화된 FBF만을 이용하여 구성되며 표현식은 식 (14)와 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \hat{f}_a(\hat{x}|\theta_{fa}) &= \theta_{fa}^T \xi_{fa}(\hat{x}) \\ \hat{g}_a(\hat{x}|\theta_{ga}) &= \theta_{ga}^T \xi_{ga}(\hat{x}) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $\xi_{fa}(\hat{x})$ 와 $\xi_{ga}(\hat{x})$ 는 상태 관측기의 출력 \hat{x} 에 의하여 활성화된 FBF이며 θ_{fa} 와 θ_{ga} 는 그에 해당하는 퍼지 후건부 파라미터이다.

비선형 시스템의 동특성 방정식과 상태 관측기의 동특성 방정식을 이용하여 관측기 오차 동특성을 유도하기 위하여 식 (15)와 같은 상태 추정 오차를 정의한다.

$$\begin{aligned} \hat{x} &\triangleq x - \hat{x} \\ \dot{\hat{x}} &= A_o \hat{x} + b_l - \theta_{fa}^T \xi_{fa}(\hat{x}) - \theta_{ga}^T \xi_{ga}(\hat{x})u \\ &\quad + \theta_{fb}^{*T} \xi_{fb}(\hat{x}) + \theta_{gb}^{*T} \xi_{gb}(\hat{x})u + v + \omega_m \\ \dot{\hat{y}} &= c^T \hat{x} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, $A_o = A - Kc^T$ 는 관측기의 시스템 행렬이며, $\omega_m = f(x) - \hat{f}(\hat{x}|\theta_f^*) + (g(x) - \hat{g}(\hat{x}|\theta_g^*))u + d(t)$, 최적의 파라미터를 이용한 추정함수값 $\hat{f}(\hat{x}|\theta_f^*)$ 와 $\hat{g}(\hat{x}|\theta_g^*)$ 는 상태 관측기의 출력 \hat{x} 를 이용하여 $f(x)$ 와 $g(x)$ 를 추정한 함수값이며 앞에서 기술한 바와 같이 활성화와 경계치값을 이용하여 상태 관측기의 출력 \hat{x} 에 의하여 활성화된 FBF와 비활성화된 FBF로 분리하여 표현하여 표현할 수 있으며, 퍼지 시스템의 후건부 파라미터 오차 벡터를 다음 식 (17)과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \theta_{fa} &\triangleq \theta_{fa} - \theta_{fa}^* \\ \theta_{ga} &\triangleq \theta_{ga} - \theta_{ga}^* \end{aligned} \quad (17)$$

식 (16)으로 표현된 상태 공간 모델로 표현된 관측기 오차 동특성을 라플라스 변환을 이용하여 입출력 모델인 전달 함수 형태로 표현하면 다음의 식 (18)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{y} &= H(s) [-\theta_{fa}^T \xi_{fa}(\hat{x}) - \theta_{ga}^T \xi_{ga}(\hat{x})u \\ &\quad + \theta_{fb}^{*T} \xi_{fb}(\hat{x}) + \theta_{gb}^{*T} \xi_{gb}(\hat{x})u + v + \omega_m] \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, 전달함수 $H(s)$ 는 식 (19)와 같이 정의된다.

$$H(s) \triangleq c^T (sI - A_o)^{-1} b \quad (19)$$

식 (19)과 같이 표현된 입출력 모델의 전달함수 $H(s)$ 에 설계자가 $H(s)L(s)$ 가 SPR이 되도록 전달함수 $L(s)$ 를 선정하면 (18)의 우변에 $L(s)L(s)^{-1}$ 를 곱하여 정리하면 식 (20)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{y} &= H(s)L(s) [-L(s)^{-1}(\theta_{fa}^T \xi_{fa}(\hat{x}) + \theta_{ga}^T \xi_{ga}(\hat{x})u \\ &\quad + L(s)^{-1}(\theta_{fb}^{*T} \xi_{fb}(\hat{x}) + \theta_{gb}^{*T} \xi_{gb}(\hat{x})u) + v_f + \omega_{mf}] \\ &= H(s)L(s) [-\theta_{fa}^T \hat{\phi}_{fa} - \theta_{ga}^T \hat{\phi}_{ga} u + v + \omega_\phi] \end{aligned} \quad (20)$$

여기서, $v_f, \omega_{mf}, \omega_\phi$ 는 다음 식 (21)과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} v_f &= L(s)^{-1} v \\ \omega_{mf} &= L(s)^{-1} \omega_m \\ \omega_\phi &= -v + \theta_{fa}^T \hat{\phi}_{fa} + \theta_{ga}^T \hat{\phi}_{ga} u \\ &\quad + L(s)^{-1}(\theta_{fb}^{*T} \xi_{fb}(\hat{x}) + \theta_{gb}^{*T} \xi_{gb}(\hat{x})u) \\ &\quad - L(s)^{-1}(\theta_{fa}^T \xi_{fa}(\hat{x}) + \theta_{ga}^T \xi_{ga}(\hat{x})u) \\ &\quad + v_f + \omega_{mf} \end{aligned} \quad (21)$$

또한, $\hat{\phi}_{fa}$ 와 $\hat{\phi}_{ga}$ 는 식 (22)와 같이 정의되어진다.

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_{fa} &= L(s)^{-1} \xi_{fa}(\hat{x}) \\ \hat{\phi}_{ga} &= L(s)^{-1} \xi_{ga}(\hat{x}) \end{aligned} \quad (22)$$

식 (20)으로부터 새로운 좌표계에서 상태 공간 모델을 구하면 식 (23)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}} &= A_z \hat{z} + B_z [-\partial_{f_0}^T \hat{\varphi}_{f_0} - \partial_{g_0}^T \hat{\varphi}_{g_0} u + v + \omega_\phi] \\ \hat{y} &= C_z^T \hat{z} \end{aligned} \quad (23)$$

여기서, 행렬 A_z, B_z, C_z 는 $H(s)L(s)$ 의 상태공간 모델식에 대한 시스템 행렬들으로써, $L(s) = s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m$ 로 표현된다고 가정하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} A_z &= A - KC^T \\ B_z &= [0 \ 0 \ \dots \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_m]^T \in R^{n \times 1} \\ C_z &= [1 \ 0 \ \dots \ 0] \in R^{1 \times n} \end{aligned} \quad (24)$$

또한, 식 (21)에서 정의한 ω_ϕ 는 추정 오차 및 외란을 의미하며, 다음의 식 (25)와 같이 ω_ϕ 는 양의 상수 φ^* 에 의하여 유계되어 있다고 가정한다.

$$|\omega_\phi| \leq \varphi^* \quad (25)$$

$H(s)L(s)$ 가 SPR이 되도록 설계하였으므로, Kalman-Yakubovich Lemma에 의하여 다음 식(26)의 관계식을 만족하는 양정칙 행렬 P 가 존재한다.[8]

$$\begin{aligned} A_z^T P + PA_z &= -Q^* \\ PB_z &= C_z \\ Q^* &= C_z Q C_z^T \end{aligned} \quad (26)$$

위의 Kalman-Yakubovich Lemma를 이용하여 상태 관측기의 오차가 유계됨을 보이기 위하여 다음 식(27)과 같은 형태의 Lyapunov 함수를 선정한다.

$$\begin{aligned} V_o &= \frac{1}{2} \hat{z}^T P \hat{z} + \frac{1}{2\gamma_f} \partial_{f_0}^T \partial_{f_0} \\ &\quad + \frac{1}{2\gamma_g} \partial_{g_0}^T \partial_{g_0} + \frac{1}{2\gamma_\varphi} \tilde{\varphi}^2 \end{aligned} \quad (27)$$

여기서, $\tilde{\varphi} \triangleq \hat{\varphi} - \varphi^*$ 는 φ^* 에 대한 적응 오차이며, $\hat{\varphi}$ 는 φ^* 의 추정값을 나타낸다. 또한, 양수 $\gamma_f, \gamma_g, \gamma_\varphi \in R$ 는 적응 이득을 의미하며 설계자가 적절하게 선정한다. 식 (27)을 이용하여 적응칙을 다음과 같이 선정한다.

$$\begin{aligned} \dot{\partial}_{f_0} &\triangleq \gamma_f \tilde{\varphi} \partial_{f_0} \\ \dot{\partial}_{g_0} &\triangleq \gamma_g \tilde{\varphi} \partial_{g_0} u \\ \dot{v}(t) &\triangleq -\tilde{\varphi} \operatorname{sgn}(\tilde{y}) \\ \dot{\hat{\varphi}} &\triangleq \gamma_\varphi |\tilde{y}| \end{aligned} \quad (28)$$

식 (28)과 같이 설계된 적응칙을 이용하여 Lyapunov 함수의 도함수는 다음의 식 (29)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_o &\leq -\frac{1}{2} \hat{z}^T Q^* \hat{z} \\ &\leq -\frac{1}{2} \lambda_{\min}(Q^*) |\tilde{y}|^2 \\ &\leq 0 \end{aligned} \quad (29)$$

식 (35)의 결과로부터 상태 추정 오차는 원점에 대해 점근적으로 안정함(asymptotically stable)을 알 수 있다. 즉, 설계한 상태 관측기의 출력은 실제 시스템의 상태 변수를 잘 추종함을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션

식 (30)의 도립 진자(cart-pole) 계통을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{g \sin x_1 - \frac{m b x_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_c + m}}{\kappa \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)} + \frac{\cos x_1}{\kappa \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)} u \end{aligned} \quad (30)$$

초기 상태변수 값은 $x(0) = [0.06 \ 0]^T$ 로 설정하였으며, 시뮬레이션에 이용한 상수값들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P &= \begin{bmatrix} 15 & 5 \\ 5 & 15 \end{bmatrix} \\ \gamma_f &= 1000 & \gamma_g &= 10 & \gamma_\varphi &= 1 \\ \epsilon_{fFBF} &= 0.1 & \epsilon_{gFBF} &= 0.1 \end{aligned}$$

그림 1은 기준출력을 $y_d(t) = 0$, 그림 2는 기준출력을 $y_d(t) = \frac{30}{\pi} \sin(t)$ 으로 선정하였을 때의 결과이다. 관측기

의 출력이 시스템 출력에 수렴함을 알 수 있다.

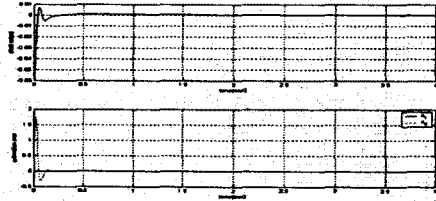


그림 1 시스템 출력, 상태 추정 오차 $y_d = 0$

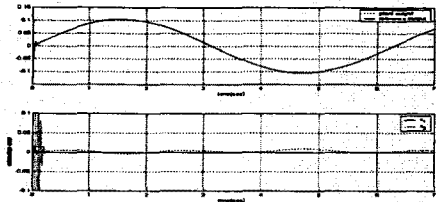


그림 2 시스템 출력, 상태 추정 오차 $y_d = \frac{\pi}{30} \sin(t)$

5. 결론

본 논문에서는 상태 벡터 가용성이 결여된 불확실한 비선형 시스템에 대하여 상태 변수의 정보를 추정하여 문제를 해결하는 상태 관측기를 설계하였다. 또한 제안한 기법에서는 퍼지 규칙 파라미터뿐만 아니라 퍼지 규칙 개수까지 온라인으로 탐색하는 알고리즘을 제안하여 제어기의 차수를 낮추는 기법을 적용하였다. 이 방법은 특히 퍼지 관측기에서 유용하게 적용되는데 그 이유는 퍼지 관측기에서는 퍼지 파라미터를 갱신하는 동특성식과 동시에 이들을 필터링하는 알고리즘이 추가가 되기 때문이다. 제시한 제어기는 리아프노브(Lyapunov) 관점의 안정도가 보장되도록 제어규칙과 퍼지 파라미터 갱신법칙과 유계상수 추정치 갱신법칙들을 결정한다. 제안된 알고리즘의 효율성을 역전자 계통에 적용하여 모의실험으로 보였다.

(참고 문헌)

- [1] A. Isidori, Nonlinear Control System. New York: Springer Verlag, 1989.
- [2] S. Sastry and A. Isidori, "Adaptive Control of Linearizable Systems", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 34, no. 11, Nov 1989.
- [3] L.-X. Wang and J. M. Mendel, "Fuzzy Basis Functions Universal Approximation, and Orthogonal Least-Squares Learning", IEEE Trans. Neural Network, vol. 3, no. 5, pp. 807-814, 1992.
- [4] Li-Xin Wang, "Stable Adaptive Fuzzy Controllers with Application to Inverted Tracking", IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics-Part B, vol. 26, No. 5, pp. 677-691, October 1996.
- [5] C.-S. Chen and W.-L. Chen, "Robust model reference adaptive control of nonlinear systems using fuzzy systems", Int. J. Systems Science, vol. 27, no. 12, pp. 1435-1442, 1996.
- [6] B. Yoo and W. Ham, "Adaptive fuzzy sliding mode control of nonlinear system", IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 6, no. 2, pp. 315-321, 1998.
- [7] L. X. Wang, "Adaptive fuzzy systems and control - Design and stability analysis", Prentice-Hall, 1994.
- [8] D. Strobl, U. Lenz and D. Schroder, "Systematic Design of Stable Neural Observers For A Class Of Nonlinear Systems", Proc. of 1997 IEEE International Conference on control Applications, pp. 377-382, 1997.