

유전알고리즘에 의한 퍼지모델 기반의 상태관측기 설계

이현식* · 손영득** · 김종화*** · 유영호*** · 하윤수*** · 진강규***

Design of a Fuzzy Model-Based State Observer Using GAs

H-S Lee · Y-D Son · J-H Kim · Y-H Yu · Y-S Ha · G-G Jin

Key words : Fuzzy model(퍼지모델), Fuzzy state observer(퍼지 상태관측기), Genetic algorithms(유전알고리즘)

Abstract

This paper presents a scheme for designing a fuzzy model-based state observer for nonlinear systems. For this scheme, a Tagaki-Sugeno type fuzzy model whose consequent part is of the state space form is obtained. It describes the locally linear input/output relationship of a system. The parameters of the fuzzy model are adjusted using a genetic algorithm. Then, fuzzy full-order and reduced-order state observers are designed based on the fuzzy model. A set of simulation works is carried out to demonstrate the effectiveness of the proposed scheme.

1. 서 론

상태제환 제어는 설계 방법과 안정성에 대한 증명이 잘 정립되어 있어 폭넓게 사용되고 있는 방법 중의 하나이다. 이 방법은 제어기를 구현하기 위하여 모든 상태변수의 제환을 요구하지만, 실제 제어 환경에서는 상태변수를 모두 측정하는 것이 곤란한 경우가 많다. 설령 모든 상태변수의 측정이 가능하더라도 경제적, 기술적인 이유로 측정이 어려운 변수들이 있을 수 있다. 이러한 문제를 해결하

기 위한 한 방법은 시스템의 선형 모델을 기반으로 상태관측기를 구축하는 것이다. 그러나 최근의 시스템은 그 규모가 커지고 복잡해짐으로서 파라미터 변동, 모델링 오차, 비선형 요소, 외란 등 여러 가지 불확실성을 내포하게 되어 정확한 모델을 얻는 것이 어렵고, 모델을 얻는다 해도 동작 중에 시스템의 파라미터가 변동하면 모델과 시스템 사이에 오차가 발생하게 된다.

이를 보완하기 위한 한 방법은 퍼지이론을 이용하는 것이다. 퍼지이론은 정성적으로 불확실한 정

* 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과(원고접수일 : 2000년 8월)

** (일)고베상선대학 대학원 선박제어공학부

*** 한국해양대학교 기계·정보공학부

보를 다룰 수 있을 뿐만 아니라, 인간이 사용하는 언어적인 형태로 기술되는 전문가의 지식을 도입하기가 용이하여 많은 응용연구가 이루어지고 있으며 또한 실제 시스템에 성공적으로 적용한 사례가 많다. 그러나 이를 직접 적용함에 있어서 현실적으로 발생하는 문제점으로는 입출력공간의 퍼지분할, 소속함수와 제어규칙의 결정 등에 있어서 체계적인 해석방법이 부족하고, 고유의 비선형 연산과 추론 때문에 이를 포함한 전체 시스템의 안정성을 증명하기가 대단히 어렵다는 것이다.

특히 안정성 문제점을 효과적으로 해결하기 위하여 제안된 것 중에 한가지로 Takagi Sugeno(T-S)의 퍼지모델이 있다^{11, 31}. T-S 퍼지모델은 제어기 설계에 기존의 선형 제어이론과 접목할 수 있고, 전체 시스템의 안정성이 보장되는 제어를 설계할 수 있다는 의미에서 대단히 큰 장점을 가진다. 따라서 저자들은 유전알고리즘을 이용하여 T-S 형태의 최적 퍼지모델을 얻고 이에 기초하여 퍼지제어를 설계하는 한 방법을 제안하였다^{10, 11}. 여기서, "If-then" 문장으로 기술되는 각 규칙의 결론부는 비선형시스템의 국부적인 입출력 관계를 나타내도록 선형 연속방정식으로 표시되었다. 퍼지모델은 넓은 동작 영역에서 시스템과 유사한 동특성을 갖도록 시스템의 입출력 데이터와 유전알고리즘을 이용하여 그 조건부와 결론부 파라미터들이 최적으로 추정되었다. 추정된 모델의 각 서브시스템에 대응되는 국부적 상태궤환 제어규칙을 구하고 이들을 결합하여 퍼지 제어가 설계되며 이 때 목표치나 외란 변화에도 잘 추종하도록 설계되었다.

그러나, 제안된 제어기는 상태궤환 기법의 한 형태로서 이를 구현할 시에는 모든 상태변수의 궤환이 요구되는 문제점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 퍼지 상태관측기에 대한 기존의 연구^{112, 131}를 확장하여 모델에 기초한 퍼지 상태관측기의 설계 기법을 제안한다. 이를 위하여 먼저 결론부가 선형 연속방정식(즉, 서브시스템)으로 표현되는 T-S 형태의 퍼지모델을 얻고 다음으로 각 규칙의 서브시스템에 대하여 전차 또는 축약 상태관측기를 설계하고 마지막으로 이들을 퍼지규칙으로 결합하여 퍼지 상태관측기를 얻는다.

2. 퍼지 모델링

이 절에서는 퍼지 상태관측기를 설계하기 위한 선행 연구로 저자들¹⁰¹이 제안한 퍼지 모델링 기법에 대해 요약 정리한다.

2.1 퍼지모델

제안된 퍼지모델은 Tagaki-Sugeno가 제안한 퍼지모델의 한 형태로서 "If-then" 규칙들로 구성된다. 각 규칙의 결론부는 시스템의 국부적인 입출력 관계를 나타내며 다음과 같이 선형 상태공간형으로 표시된다.

$$R^i : \text{If } v_1 \text{ is and } \dots \text{ and } v_r \text{ is, } F_r^i, \\ \text{then } \dot{x} = A^i x + B^i u \quad (1 \leq i \leq l) \quad (1a) \\ y = Cx \quad (1b)$$

여기서 R^i 는 i 번째 퍼지규칙, l 은 규칙의 수, $v = [v_1, \dots, v_r]^T \in R^r$, u 는 퍼지 시스템의 입력, $x = [x_1, \dots, x_n]^T \in R^n$ 은 퍼지 시스템의 상태벡터이며 $y \in R^r$ 는 출력이다. 행렬 A^i, B^i ($1 \leq i \leq l$)와 C 는 적절한 차수를 가지며, 행렬 쌍 (A^i, C) ($1 \leq i \leq l$)는 가관측한 것으로 가정한다. 일반적으로 v 는 여러 가지 형태를 취할 수 있으나, 특별한 경우로 $v = x_p \in R^n$ ($r = n$) 생각할 수 있다. x_p 는 실제 시스템의 상태벡터를 의미한다.

2.2 퍼지규칙의 추론

식 (1)의 퍼지 시스템이 입력으로 $v = x_p$ 와 u 를 가지면 i 번째 규칙의 조건부 적합도 ρ^i 는 다음과 같이 계산된다.

$$\rho^i = \prod_{j=1}^n F_j^i(v_j) \quad (1 \leq i \leq l) \quad (2)$$

전체 규칙의 추론 결과는 다음과 같게 된다.

$$\dot{x} = \frac{\sum_{i=1}^l \rho^i (A^i x + B^i u)}{\sum_{i=1}^l \rho^i} \\ = \sum_{i=1}^l \xi^i (A^i x + B^i u) \quad (3a)$$

$$\xi^i = \frac{\rho^i}{\sum_{i=1}^l \rho^i} \quad (3b)$$

여기서 $\sum_{j=1}^l \xi_j > 0$ 인 것으로 간주한다.

2.3 유전알고리즘을 이용한 파라미터의 추정

시스템을 기술하는 퍼지모델이 얻어지면 모델의 동특성이 시스템의 그것에 가깝도록 조건부 입력 변수들의 공간을 적절히 퍼지 분할하고, 결론부 방정식의 계수를 최적 조정하는 작업이 요구되는데 결국 비선형 최적화 문제로 귀착된다. 입력 변수공간은 “외부(exterior)” 퍼지집합 또는 “내부(interior)” 퍼지집합으로 퍼지 분할되며 각각 시그모이드와 가우스 형태의 소속함수를 사용하였다.

$$F_j^i(x) = \frac{1}{1 + \exp(-u_j^i(x - o_j^i))} \quad (4a)$$

$$F_j^i = \left(\frac{-(x - m_j^i)}{2(\sigma_j^i)^2} \right) \quad (4b)$$

따라서, $m_j^i, \sigma_j^i, \mu_j^i, o_j^i$ 가 조건부의 파라미터이고, 행렬 A^i 와 B^i ($1 \leq i \leq l$)가 결론부의 파라미터가 된다.

여기서 일어나는 최적화 문제는 유전알고리즘(GA)^[4-7]으로 해결하며 적응 메커니즘으로서의 GA는 퍼지모델이 시스템의 동특성에 가까워지도록 계속적으로 파라미터들을 조정하게 된다. 그림 1은 퍼지 모델링 구성도를 나타내고 있다.

집단이 진화해 가는 동안 GA는 좋은 모델과 더 나은 모델을 구분하는 판단 기준으로 적합도 함수를 사용하게 되는데 이는 다음의 목적함수로부터 계산된다.

$$J(\varphi) = \int_{(k-W+1)T}^{kT} \|x_p(t) - x(t)\| dt \quad (5)$$

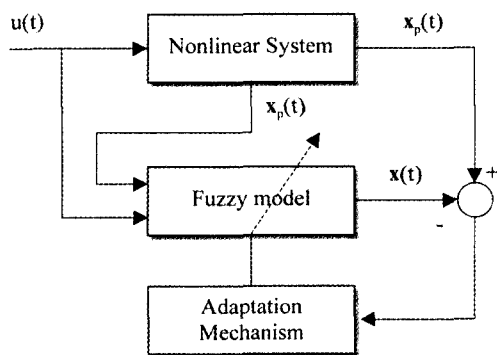


Fig. 1 Schematic diagram fuzzy modelling

여기서 φ 는 조정되는 파라미터들로 구성되는 벡터이고, W 는 데이터 윈도우의 크기이며, T 는 샘플링 주기이다. 특히 W 는 퍼지모델의 정밀도와 연산시간 사이에서 적절히 타협되는 매개변수이다. 따라서 각 개체의 적합도는 다음 식으로부터 계산된다.

$$f = -J(\varphi) - \alpha \quad (6)$$

여기서 α 는 세대와는 상관없이 항상 $f \geq 0$ 인 관계가 유지되도록 설정되는 상수로서, 본 연구에서는 집단의 성능이 개선되고 개체간의 우열 비교가 어려운 상황에서도 선택압(selection pressure)이 유지되도록 세대에 따라 적응적으로 변경된다^[6].

3. 퍼지 상태관측기의 설계

3.1 퍼지 전차수 상태관측기

먼저 $y \in R^1$ 인 경우($q=1$) 즉, 스칼라 출력 신호만을 측정하는 환경을 고려해서 출력과 제어입력 값으로 시스템의 모든 상태변수를 추정하는 문제를 살펴본다. 앞서 구한 퍼지모델의 각 결론부에 대하여 전차수 상태관측기(full-order state observer)를 설계하고 퍼지규칙으로 연결하면 다음과 같은 퍼지 전차수 상태관측기를 얻을 수 있다.

$$\hat{R}^i : \text{If } v_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } v_r \text{ is } F_r^i, \\ \text{then } \dot{\hat{x}} = A^i \hat{x} + B^i u + L^i (y - C^i \hat{x}) \quad (1 \leq i \leq l) \quad (7)$$

여기서 \hat{x} 는 관측된 상태벡터이며 L^i 는 i 번째 규칙의 관측기 이득행렬이다. L^i 는 극배치법, 2차 성능지수의 최소화에 근거한 방법 등으로 설계할 수 있으나 본 연구에서는 극배치법을 이용한다. 식 (7)은 다음과 같이 추론된다.

$$\dot{\hat{x}} = \frac{\sum_{i=1}^l \rho^i (A^i \hat{x} + B^i u + L^i (y - C^i \hat{x}))}{\sum_{i=1}^l \rho^i} \\ = \sum_{i=1}^l \xi^i (A^i \hat{x} + B^i u + L^i (y - C^i \hat{x})) \quad (8)$$

여기서 ξ^i 는 식 (3b)에서 정의된 것과 같은 값을 가진다.

만약 $(A^i - LC)$ 가 안정한 행렬이 되도록 L^i 를 적절히 선택하면 상태관측기와 시스템의 초기조건이 서로 달라도는 \hat{x} 는 x 로 수렴하게 되는데, 이를 보이기 위하여 오차벡터 $\tilde{x} = x - \hat{x}$ 를 정의하면 다음과 같게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= \dot{x} - \dot{\hat{x}} \\ &= \sum_{i=1}^l \xi^i (A^i x + B^i u) - \sum_{i=1}^l \xi^i (A^i \hat{x} + B^i u + L^i (y - C \hat{x})) \\ &= (\sum_{i=1}^l \xi^i H^i) \tilde{x} \end{aligned} \quad (9)$$

단, $H^i = A^i - LC$

정리1 : 식 (9)로 표시되는 자유 시스템의 평형 상태는 \tilde{x}_e 만약 모든 서브시스템에 대해서

$$(H^i)^T P + PH^i = -Q^i \quad (1 \leq i \leq l) \quad (10)$$

을 만족하는 공통의 양의 한정행렬 P 가 존재하면 점근안정하다. 단, 이 때 Q^i 는 양의 한정행렬이다.

증명 : 다음과 같은 Lyapunov 함수를 생각하자.

$$V(\tilde{x}) = \tilde{x}^T P \tilde{x}$$

양변을 한 번 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{x}) &= \dot{\tilde{x}}^T P \tilde{x} + \tilde{x}^T P \dot{\tilde{x}} \\ &= \tilde{x}^T (\sum_{i=1}^l \xi^i (H^i)^T) P \tilde{x} + \tilde{x}^T P (\sum_{i=1}^l \xi^i H^i) \tilde{x} \\ &= \sum_{i=1}^l \xi^i [\tilde{x}^T ((H^i)^T P + PH^i) \tilde{x}] \end{aligned}$$

$\forall i \in [1, l]$ 에 대해 $\dot{V}(\tilde{x}) < 0$ 이 성립되기 위해서는

$$(H^i)^T P + PH^i = -Q^i$$

이고 P, Q^i 가 양의 한정행렬이면 된다.

이는 행렬 L^i 가 정리의 조건을 만족하도록 선정된다면 $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ 이 됨을 의미한다.

3.2 퍼지 축소차수 상태관측기

전차수 상태관측기는 상태변수 중의 일부를 출력으로 측정할 수 있음에도 불구하고 모든 상태를 추정하게 된다. 이것은 연산 관점에서 본다면 대단히 비경제적이다. 만약 $\dim(y) = q (\leq n)$ 이고, $\text{rank}(C) = q$ 인 경우에는 $(n-q)$ 개의 상태만을 추정할 수 있는 축소차수 상태관측기의 설계가 가능

하다. $E^T = [C^T \ T^T]$ 로 정의되는 행렬 E 가 비특이행렬이 되도록 $(n-q) \times n$ 행렬 T 를 임의로 선정하고, 식 (1)을 $z = Ex$ 로 등가변환하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{R}^i : & \text{If } v_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } v_r \text{ is } F_r^i, \\ \text{then } & \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^i & A_{12}^i \\ A_{21}^i & A_{22}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1^i \\ B_2^i \end{bmatrix} u \quad (1 \leq i \leq l) \end{aligned} \quad (11a)$$

$$y = [I_q \ 0] z = z_1 \quad (11b)$$

여기서 $z^T = [z_1^T \ z_2^T]$ 로서 z_2 는 측정할 수 없는 변수이고, $A_{11}^i, A_{12}^i, A_{21}^i$ 와 A_{22}^i 는 $EA^i E^{-1}$ 로부터 각각 $q \times q, q \times (n-q), (n-q)$ 와 $(n-q) \times (n-q)$ 의 차원을 갖도록 분할된 행렬이고, 와 또한 EB^i 로부터 적절한 차원을 갖도록 분할된 행렬이며, I_q 는 $q \times q$ 단위행렬이다.

식 (11b)의 관계를 (11a)에 적용하면 이는 미지의 변수 $z_2 \in R^{n-q}$ 에 대한 방정식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \hat{R}^i : & \text{If } v_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } v_r \text{ is } F_r^i, \\ \text{then } & \dot{z}_2 = A_{22}^i z_2 + u \quad (1 \leq i \leq l) \end{aligned} \quad (12a)$$

$$y' = A_{12}^i z_2 \quad (12b)$$

여기서

$$\bar{u} = A_{21}^i y + B_2^i u \quad (13a)$$

$$y' = \dot{y} - A_{11}^i y - B_1^i u \quad (13b)$$

로서 기지의 신호 y 와 u 의 함수이다. 식 (12)의 각 서브시스템은 쌍 (A_{22}^i, A_{12}^i) 가 가관측하면 상태관측기의 구성이 가능한데, 만약 (A^i, C) 가 (A_{22}^i, A_{12}^i) 가 관측하면는 가관측하게 된다⁽⁶⁾. 식 (12a)의 결론부 방정식에 대하여 상태관측기를 설계하면 다음 식을 얻는다.

$$\dot{\hat{z}}_2 = A_{22}^i \hat{z}_2 + \bar{u} + L^i (y' - A_{12}^i \hat{z}_2) \quad (14)$$

여기서 L^i 는 상태관측기의 이득행렬이다. 따라서 각 서브시스템의 축소차수 상태관측기를 퍼지규칙으로 결합한 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{R}^i : & \text{If } v_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } v_r \text{ is } F_r^i, \\ \text{then } & \dot{w} = H^i w + D^i y + G^i u \quad (1 \leq i \leq l) \end{aligned} \quad (15a)$$

단,

$$\dot{z}_2 = w + L^i y \quad (15b)$$

$$H^i = A_{22}^i - L^i A_{12}^i \quad (15c)$$

$$D^i = A_{22}^i L^i + A_{21}^i - L^i A_{11}^i - L^i A_{12}^i L^i \quad (15d)$$

$$G^i = B_2^i - L^i B_1^i \quad (15e)$$

그러므로, 퍼지 축소차수 상태관측기의 최종 출력은 다음의 식으로 추론된다.

$$\dot{w} = \sum_{i=1}^l \xi^i (H^i w + D^i y + G^i u) \quad (16)$$

식 (16)에서 L^i 가 적절히 결정되면 \dot{z} 가 z_2 를 추정할 수 있음을 보이기 위하여 $\dot{z} = z_2 - \dot{z}_2$ 로 정의하고 식 (11), 식 (15)의 결과를 이용하여 추론하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \sum_{i=1}^l \xi^i [(z_2 - (\dot{w} + L^i z_1))] \\ &= \sum_{i=1}^l \xi^i (A_{21}^i + A_{22}^i z_2 + B_2^i u) \\ &\quad - \sum_{i=1}^l \xi^i (H^i w + D^i y + G^i u) \\ &\quad - \sum_{i=1}^l \xi^i L^i (A_{11}^i y + A_{12}^i z_2 + B_1^i u) \\ &= \left(\sum_{i=1}^l \xi^i H^i \right) \dot{z} \end{aligned} \quad (17)$$

단, $H^i = A_{22}^i - L^i A_{12}^i$ 이다.

그러므로, 정리1의 결과를 이용하면 식 (17)과 같이 표시되는 자유 시스템의 평형상태는 만약 모든 서브시스템에 대하여 다음의 조건을 만족하는 공통의 양의 한정행렬 P 가 존재하면 점근적으로 안정하게 된다. 이때 Q^i 는 양의 한정행렬이다.

$$(H^i)^T P + P H^i = -Q^i \quad (1 \leq i \leq l) \quad (18)$$

이는 행렬 L^i 가 식 (18)의 조건을 만족하도록 선정된다면 $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{z}_2(t) \rightarrow z_2(t)$ 이 됨을 의미한다.

4. 시뮬레이션

4.1 제어대상

제안된 상태관측기의 유효성을 검증하기 위하여 그림 2과 같은 이중수조 시스템에서 시뮬레이션을 실시하였다.

여기서 $S_1 = 20.1062 \times 10^{-3} [m^2]$ 은 #1 수조 단면적, $S_2 = 11.3097 \times 10^{-3} [m^2]$ 는 #2 수조 단면적, $P_1, P_2 = 0.7069 \times 10^{-3} [m^2]$ 은 관의 단면적, $H_1, H_2 [m]$

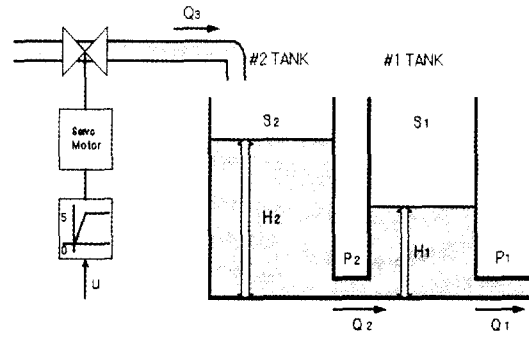


Fig. 2 A two-tank system

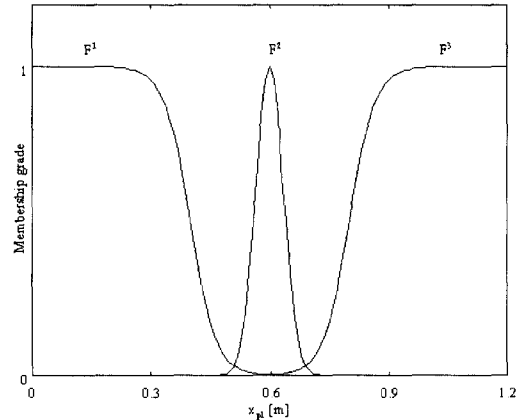


Fig. 3 Membership functions of the fuzzy sets

은 각각 #1 수조와 #2 수조의 수위, $Q_1, Q_2, Q_3 [m^3/sec]$ 는 유량, $K_v = 0.9896 \times 10^{-3} [m^3/secV]$ 는 서보모터의 이득, $T_v = 1.0 [sec]$ 는 서보모터의 시정수이며, $u [V]$ 는 서보모터의 입력이다.

그림 3의 시스템에서 상태변수를 $x_{p1} = H_1, x_{p2} = H_2, x_{p3} = Q_3$ 로 정의하면 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}_p = f(x_p, u) \quad (19a)$$

$$y_p = x_{p1} \quad (19b)$$

여기서 $x_p = [x_{p1}, x_{p2}, x_{p3}]^T$ 와 y_p 는 시스템의 상태 벡터와 출력이고, $f(\cdot, \cdot)$ 는 3×1 의 함수 벡터로서 다음과 같은 요소를 가지며, $sgn(\cdot)$ 는 부호함수이다.

$$f_1(x_p, u) = \frac{1}{S_1} [sgn(x_{p2} - x_{p1}) P_2 \sqrt{2g |x_{p2} - x_{p1}|} - P_1 \sqrt{2g x_{p1}}] \quad (20a)$$

$$f_2(\mathbf{x}_p, \mathbf{u}) = \frac{1}{S_1} [x_{p3} - \text{sgn}(x_{p2} - x_{p1}) P_2 \sqrt{2g |x_{p2} - x_{p1}|}] \quad (20b)$$

$$f_3(\mathbf{x}_p, \mathbf{u}) = \frac{1}{T_v} [-x_{p3} + K_v \mathbf{u}] \quad (20c)$$

퍼지모델의 결론부는 시스템의 선형화 모델을 기초로 하여 얻어진다. 만약 시스템이 i 번째 동작점 $(\mathbf{x}_0^i, \mathbf{u}_0^i)$ 부근에서 동작한다고 가정하면 모델의 상태벡터와 제어입력은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0^i + \Delta \mathbf{x}^i \quad (21a)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0^i + \Delta \mathbf{u}^i \quad (21b)$$

이때 $\Delta \mathbf{x}^i$ 와 $\Delta \mathbf{u}^i$ 는 동작점으로부터의 오차를 의미한다. 이를 (19)에 대입하고 선형화 과정을 거치면 다음 식을 얻는다.

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}^i = \mathbf{A}^i \Delta \mathbf{x}^i + \mathbf{B}^i \Delta \mathbf{u}^i \quad (22)$$

시뮬레이션에서 관의 단면적 P_1, P_2 는 서로 같고 세 동작점, 즉 $(\mathbf{x}_0^1, \mathbf{u}_0^1) = ([0.3, 0.6, 0.0017]^T, 1.732)$, $(\mathbf{x}_0^2, \mathbf{u}_0^2) = [0.6, 1.2, 0.0024]^T, 2.4495)$, $(\mathbf{x}_0^3, \mathbf{u}_0^3) = ([0.9, 1.8, 0.003]^T, 3.0)$ 을 고려하면 퍼지모델은 다음과 같이 표시된다.

$$\mathbf{R}^i: \text{If } v_1 \text{ is } F^i, \text{ then } \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^i \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}^i \Delta \mathbf{u} \quad (1 \leq i \leq 3) \quad (23)$$

여기서 \mathbf{A}^i 와 \mathbf{B}^i 는 유전알고리즘을 이용하여 구할 수 있으나 문제를 간단히 하기 위하여 선형화를 통하여 구한다. 그 결과로 다음과 같을 얻는다^[12].

$$\mathbf{A}^1 = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0^1 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0^1}} = \begin{bmatrix} -0.2843 & 0.1421 & 0.0 \\ 0.2526 & -0.2526 & 88.4194 \\ 0.0 & 0.0 & -1.0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}^1 = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0^1 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0^1}} = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ 0.001 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}^2 = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0^2 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0^2}} = \begin{bmatrix} -0.2009 & 0.1005 & 0.0 \\ 0.1786 & -0.1786 & 88.4194 \\ 0.0 & 0.0 & -1.0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}^2 = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0^2 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0^2}} = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ 0.001 \end{bmatrix},$$

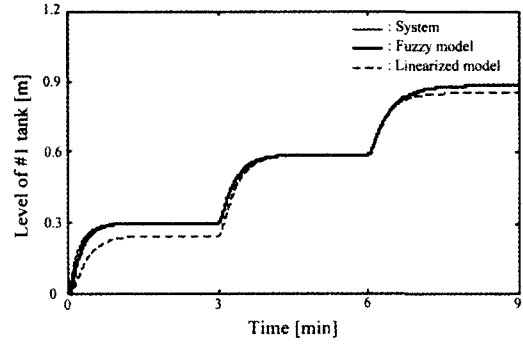


Fig. 4 Step responses of the original system, the fuzzy model and the linearized model

$$\mathbf{A}^3 = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0^3 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0^3}} = \begin{bmatrix} -0.1640 & 0.082 & 0.0 \\ 0.1458 & -0.1485 & 88.4194 \\ 0.0 & 0.0 & -1.0 \end{bmatrix},$$

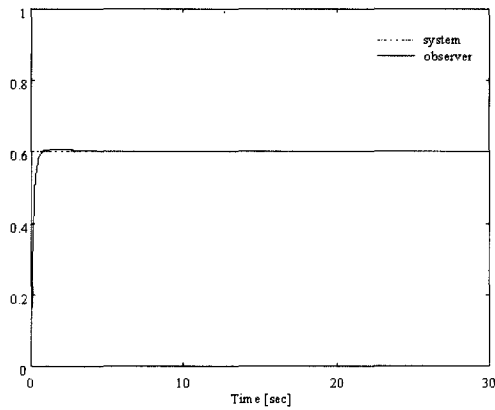
$$\mathbf{B}^3 = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0^3 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0^3}} = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.0 \\ 0.001 \end{bmatrix}$$

F^1 (=Low)과 F^3 (=High)는 시그모이드 형태의 퍼지집합, F^2 (=Medium)는 가우스 형태의 퍼지집합을 사용하였다. 또한 F^2 의 중심은 $m_1^2=0.6$ 으로 고정된다. 따라서 추정되어야 할 파라미터는 전전부의 파라미터인 $\mu_1^i, \sigma_1^i, \mu_3^i, \sigma_3^i$ 가 되며 이들을 최적 조정하기 위하여 실수 코딩 유전알고리즘을 사용하였고 제어 파라미터로는 집단 크기 $N=20$, 재생산 계수 $\eta=1.7$, 교배확률 $P_c=0.9$, 돌연변이 확률 $P_m=0.05$ 를 사용하였다^[7]. 그림 3은 조정된 퍼지집합을 보여준다.

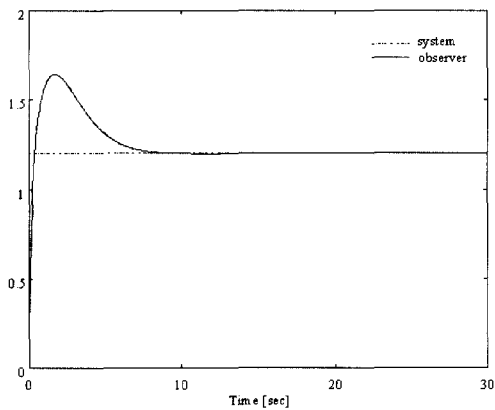
그림 4는 퍼지모델을 검증하기 위하여 비선형 이중수조 시스템, 퍼지모델, 동작점 $(\mathbf{x}_0^2, \mathbf{u}_0^2)$ 에서 얻어진 선형모델의 계단상 입력의 변화에 대한 출력을 그린 것이다. 기대하였듯이 퍼지모델은 전 범위에서 시스템과 비슷한 동특성을 보이지만, 선형모델은 동작점 부근에서만 만족스럽고 그 외 범위에서는 만족스럽지 못하다.

4.2 퍼지 전차수 상태관측기

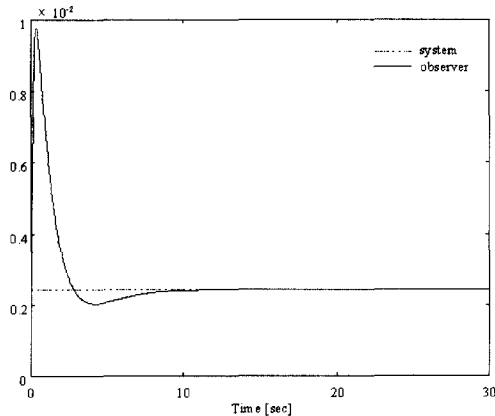
먼저 계측신호 $\mathbf{x}_{p1}(=y_p=H_1)$ 을 이용하여 전 상태변수를 추정하는 퍼지 전차수 상태관측기를 설계한다. 식 (23)과 같이 주어지는 퍼지모델을 기반



(a) x_{p1} and \hat{x}_1



(b) x_{p2} and \hat{x}_2



(c) x_{p3} and \hat{x}_3

Fig. 5 Responses of the system with the fuzzy full-order state observer

으로 각 결론부에 대하여 전차수 상태관측기를 설계하면 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{R}^i : \text{If } x_{pi} \text{ is } F^i, \\ \text{then } \Delta \dot{\hat{x}} = A^i \Delta \hat{x} + B^i \Delta u + L^i (y_p - C \hat{x}) \quad (1 \leq i \leq 3) \quad (24)$$

여기서 $L^1 = [6.4632 \ 5.4123 \ 0.0971]^T$, $L^2 = [6.6205 \ 10.3108 \ 0.1373]^T$, $L^3 = [6.6902 \ 17.6854 \ 0.1683]^T$ 이며, 이는 $(1 \leq i \leq 3)$ 가 $-6.667, -0.6667 \pm 0.3229$ 의 고유치를 가지면서 식(10)이 만족하도록 설정된 것이다.

그림 5에서 시스템과 퍼지 상태관측기의 응답을 보이고 있다. 이는 상태관측기의 초기치는 모두 0으로 설정되고 시스템이 (x_0^i, u_0^i) 의 정상상태에서 동작될 때의 응답이다. 그림에서 퍼지 상태관측기가 시스템의 각 상태를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

4.3 퍼지 축소차수 상태관측기

다음은 계측신호 $x_{p1}(=H_1)$ 와 $x_{p2}(=H_2)$ 을 이용하여 $x_{p3}(=Q_3)$ 를 추정하는 퍼지 축소차수 상태관측기를 설계한다.

$$\hat{R}^i : \text{If } v_i \text{ is } F^i, \\ \text{then } \Delta \dot{w} = H^i \Delta w + D^i + \Delta w_p + G^i \Delta u \quad (1 \leq i \leq 3) \quad (25)$$

여기서

$$H^1 = -0.73, D^1 = [0.0008 \ 0.0015], G^1 = 0.001, \\ H^2 = -0.73, D^2 = [0.0005 \ 0.0017], G^2 = 0.001, \\ H^3 = -0.73, D^3 = [0.0004 \ 0.0018], G^3 = 0.001$$

이고, $L^1 = L^2 = L^3 = [0.0 \ -0.0031]$ 이며 이는 $H^i (1 \leq i \leq 3)$ 의 고유치가 -0.73 이 되도록 설정된 것이다. 이는 식(17)의 오차 시스템의 상승시간이 3[sec] 이내가 되도록 설정된 것이다.

그림 6에서 시스템과 퍼지 상태관측기의 응답을 보이고 있다. 이는 상태관측기의 초기치는 모두 0으로 설정되고 시스템의 정상상태에서 동작될 때의 응답이다. 그림에서 퍼지 축소차수 상태관측기도 시스템의 상태를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

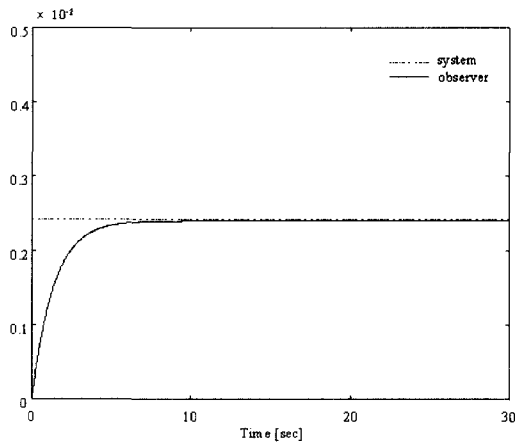


Fig. 6 Responses of the system with the fuzzy reduced-order state observer

5. 결 론

본 연구에서는 퍼지모델에 기초하여 퍼지 상태 관측기를 설계하는 한 기법을 제시하였다. 이를 위하여 먼저 시스템을 국부적으로 기술하는 선형 서브시스템들을 "If-then" 문장으로 연결하여 퍼지모델을 얻었고, 유전알고리즘을 이용하여 퍼지모델의 파라미터를 추정하였다. 그리고 추정된 퍼지모델에 기초하여 전차수 또는 축소차수 상태관측기를 설계하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 실시한 결과 퍼지 상태관측기는 시스템의 상태변수들을 잘 추정하는 것을 보였다.

참고문헌

[1] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control," *IEEE Trans. on Sys., Man and Cyber.*, Vol. 15, No. 1, pp. 116~132, 1985
 [2] K. Tanaka and M. Sugeno, "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control System," *ets and Systems*, Vol. 45, pp. 135~156, 1992

[3] K. Tanaka, "Design of Model-based Fuzzy Controller Using Luapunov's Stability Approach and Its Application to Trajectory Stabilization of a Model Car," H. T. Nguyen et al.(Eds), John Wiley & Sons, Inc., pp. 31~50, 1995
 [4] D. T. Pham and G. Jin, "Genetic Algorithm using Gradient-like Reproduction Operator," *Electronics Letters*, Vol. 31, No. 18, pp. 1558~1559, 1995
 [5] D. T. Pham and G. Jin, "A Hybrid Genetic Algorithm," *Proc. 3rd World Cong. on Expert Systems*, Seoul, Vol. 2, pp. 748~757, 1996
 [6] J. J. Grefenstette, "Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, Vol. SMC-16, No. 1, pp. 122~128, 1986
 [7] 주상래, 진강규, "실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제6권, 제4호, pp. 268~275, 2000
 [8] C. Chen, *Linear System Theory and Design*, Holt-Saunders, N.Y., 1984
 [9] 이현식, 진강규 외, "유전알고리즘을 이용한 비선형 시스템의 온라인 퍼지 모델링," 퍼지 및 지능 시스템학회 논문지, 제8권, 제3호, pp. 80~87, 1998
 [10] 이현식, 주상래, 진강규, "상태공간형의 결론부를 가지는 퍼지모델," 한국박용기관학회 1999년도 춘계학술대회 논문집, pp. 13~18, 1999
 [11] 이현식, 진강규 외, "모델에 기초한 비선형시스템의 퍼지제어," 퍼지 및 지능 시스템학회 논문지, 제9권, 제2호, pp. 170~178, 1999
 [12] 이현식, 진강규 외, "Design of a Fuzzy State Observer," 한국해양대학교 산업기술연구소 연구논문집, 제17권, pp. 77~86, 1999
 [13] K. Kim, J. Joh and W. Kwon, "Design of the Continuous Time Takagi-Sugeno Fuzzy Controllers for Nonlinear Dynamic Systems Using Fuzzy Estimators," 한국퍼지 및 지능 시스템학회 논문지, 제9권, 제3호, pp. 239~248, 1999

저 자 소 개



이현식(李鉉植)

1996년 한국해양대학교 제어계측공학과 (공학사). 1998년 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 (공학석사). 1998년~현재 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 박사과정



손영득(孫榮得)

1997년 한국해양대학교 제어계측공학과 학부 졸업. 1998년 동경공업대학 제어 시스템 공학부 교환 연구생. 1998년~현재 고베상선대학 해양 전자기계 공학부 대학원 재학



김종화(金鍾和)

1981년 부산대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1985년 동 대학원 석사(제어공학). 1989년 동 대학원 박사(제어공학). 1990년~현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 부교수. 1996~1997 University of Wales, Cardiff 연구교수. 관심분야는 적응제어, 퍼지제어, 지능제어 등임. 당학회 종신회원 및 평의원.



유영호(劉永昊)

1951년 10월생. 1974년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1986년 한국해양대학교 대학원제어계측공학과 졸업 (공학석사). 1990년 동대학원 졸업 (공학박사). 1급기관사. 1997. 12~1998. 12 영국 University of Wales Cardiff Systems Engineering Division 연구교수. 1983~1991 한국해양수산연수원 부교수. 1992~현재 한국해양대학교 자동화정보공학부 부교수. 당학회 연구이사, 종신회원.



하윤수(河潤秀)

1962년 4월생. 1986년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1990년 동 대학원 졸업(석사). 1996년 일본 쓰쿠바대학 대학원 졸업(박사). 1996~현재 한국해양대학교 자동화·정보 공학부 조교수.



진강규(陳康奎)

19~53년 10월 12일생. 1977년 한국해양대학교 기관학과(학사). 1985년 Florida Institute of Technology, 전기·전자·컴퓨터공학과(석사). 1986년 University of Wales Cardiff, 전기·전자·시스템공학과(박사). 현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 정교수.