

Fuzzy Observer를 이용한 서보 시스템의 제어

류제영*, 박익동*, 허옥열*, 이제희**
 인하대학교 전기공학과, 두원공과대학 컴퓨터 응용제어학과**

Control of Servo System with Fuzzy Observer

Je-Young Ryu*, Eik-Dong Park*, Uk-Youl Huh*, Je-Hi Lee**
 Dept. of Electrical Engineering Inha University*, Doowon Technical College**

Abstract - This paper presents a scheme for designing a fuzzy observer for servo control system with nonlinear element, i.e., backlash. It is found that backlash occurs when the feed direction is reversed. Due to the imperfect transient response of the driving mechanism, not only the static backlash error but also the dynamic backlash error is generated on the contouring profile. And also, we utilized two inertia modeling in order to deal with coupled system accurately. The overall control system consists of two parts - a servo controller and an Fuzzy observer. It is a Takagi-sugeno type fuzzy model whose consequent part is of the state space form is obtained. A simulation is carried out to demonstrate the effectiveness of the proposed scheme.

1. 서 론

마이크로프로세서를 기반으로 하는 AC서보모터는 하나의 센서를 이용하여 위치와 속도에 관한 정보를 제공하는 위치 제어 시스템에 널리 이용되고 있다.

서보 시스템의 제어에 있어서 동작 중에 발생하는 파라미터의 변화, 쿨롱(Coulomb) 마찰력을 비롯한 비선형 마찰력, 제어기의 포화, 커플링의 조임정도 그리고 백래쉬(backlash) 등의 다양한 비선형적 요소들에 의한 오차와 외부 외란으로 인하여 유발되는 오차들로 인해서 시스템의 정확한 모델링이 쉽지 않고 시스템과 그 모델링 사이의 오차로 인해서 시스템의 안정도에 문제를 일으켜 원하는 궤적을 정확히 추종하는 것이 어려운 문제이다. 많은 제어 문제에 있어서 시스템의 모든 상태는 측정 가능하다고 가정하지만, 실제 시스템에 있어서 부분적으로 측정 불가능한 상태도 있다. 이런 경우에 있어서 관측기를 이용하여 모르는 상태를 추정한다. 복소 평면에서 관측기의 극점들의 위치는 속도에 의존한다. 모터의 속도가 증가할 때, 관측기의 극점들은 불안정한 구역으로 이동된다. 또한 알지 못하는 비선형 시스템에 대해서 강인한 관측기의 설계는 지난 수년간 활발하게 논의된 영역 중에 하나로 선형시스템에 있어서 실제 출력과 측정된 출력과의 차이로 측정된 상태변수를 보상하는 Luenberger Observer나 상태관측기와 외란관측기를 갖는 확장 관측기의 설계 즉 추정잡음과 입력잡음에 대한 통계적인 값을 알 때, 오차를 최소화 하여 추정된 상태값을 이용하여 외란관측기를 구성함으로써 외란과 상태를 동시에 추정할 수 있는 관측기를 구성하여 향상된 제어성능을 보여 주었다.

근래에 오류검출 및 식별을 목적으로 하는 퍼지 관측자에 대한 논의가 있었고, Takagi-Sugeno(TS)모델을 기반으로 한 제어시스템에서 퍼지 제어기와 퍼지 관측기

를 분리하여 설계하여도 시스템의 안정도에는 변화가 없다는 논문들이 나오고 있다.[1]

본 논문은 백래쉬와 같은 비선형 요소를 갖는 2자유도 시스템에 퍼지 관측기를 적용하여 시스템의 보다 더 정확한 상태를 추정하여 좀더 정밀한 제어를 하는데 목적이 있다.

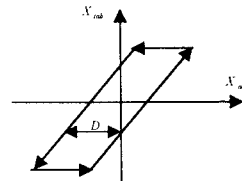
2. 본론

2.1 비선형 요소를 포함한 시스템

보통 백래쉬는 시스템 요소들 사이에 간격으로 인해 발생하는 비선형적 위치 종속 오차이며, 이로 인하여 시스템에 원하지 않는 복잡한 진동이 야기된다. 백래쉬에 의한 동작 오차에는 고정 백래쉬 오차와 다이내믹 백래쉬 오차로 구분 할 수 있는데, 고정 백래쉬 오차는 테이블, 볼스크류, 기어, 모터와 같은 기계적 요소들 서로의 간격으로 인하여 발생하는 것을 말하며, 다이내믹 백래쉬 오차는 움직이는 기계의 불완전한 순간 응답에 의해 발생하는 오차이다.

위치 피드백과 테이블의 피드백 사이에 존재하는 백래쉬에 의해서 테이블의 움직임은 위치 피드백 값을 완전히 따르지 못하게 된다.

백래쉬에 대한 입출력 특징은 다음과 같다.



x_{act} : 위치 피드백
 x_{tab} : 테이블 피드백
 D : 백래쉬 거리

그림 1. 백래쉬

또한 백래쉬의 다이내믹한 움직임에 있어서 x_{act} 와 x_{tab} 사이에 발생 가능한 상황을 정리하면 식(1)과 같다.

$$x_i = x_{i-1} + d X_{act} \quad (1)$$

위 식에서 x_i 는 i번째 시간의 상대적 거리, dX_{act} 는 i번째 시간의 증가한 피드백 위치를 나타낸다. 백래쉬의 네 가지 상태를 고려한 테이블의 위치 X_{tab} 는 다음과 같이 표현된다.

- (1) If $(0 < x_i < D)$ and $(d X_{act} > 0)$ then $(X_{tab} \text{ is stationary})$
- (2) If $(0 < x_i < D)$ and $(d X_{act} < 0)$ then $(X_{tab} \text{ is stationary})$
- (3) If $(x_i > D)$ and $(X_{tab}^{i-1} = X_{tab}^{i-1} + x_i - D)$ then $(x_i = D)$
- (4) If $(x_i < 0)$ and $(X_{tab}^{i-1} = X_{tab}^{i-1} + x_i)$ then $(x_i = 0)$

대상 시스템은 서보모터와 테이블이 커플링에 의해 연결되어 있으며, 모터의 회전운동이 리드스크류를 통해

여 테이블의 직선운동으로 변환되며, 시스템의 모델링은 그림2와 같다.

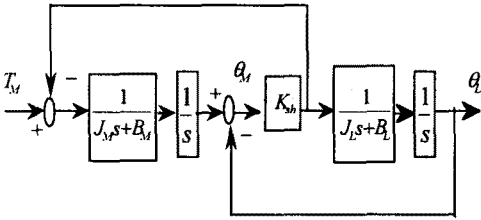


그림2. 2자유도 시스템

이 시스템의 모델링은 마찰력, 부하변화, 백래쉬 등 여러 불확실한 요소를 포함한다.

위 시스템의 상태 방정식은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 각각의 파라미터는

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{sh}}{J_M} & -\frac{B_M}{J_M} & \frac{K_{sh}}{J_M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_{sh}}{J_L} & 0 & -\frac{K_{sh}}{J_L} & -\frac{B_L}{J_L} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_M} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

$$x = [\theta_M \ \omega_M \ \theta_L \ \omega_L]$$

J_M : 모터 관성, J_L : 부하 관성, ω_M : 모터 속도,

ω_L : 부하 속도, T_M : 모터 토크,

B_M, B_L : 모터 및 부하 점성 마찰계수

K_{sh} : 스프링 상수

이다.

3. 퍼지 관측기

실제적으로 모든 상태들은 완전히 측정할 수 없으므로 제어 성능 향상에 있어서 퍼지 관측기를 디자인하는 것이 필요하다.

실제 시스템의 상태방정식으로 표현하면 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_i u(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3)$$

위 식에서 (A_i, C_i)는 관측가능하고 $x(t)$ 는 상태 벡터, $u(t)$ 는 입력벡터, $y(t)$ 는 출력벡터이다.

제안된 퍼지 모델은 "if-then"규칙에 대한 집합인 Takagi-Sugeno 타입이다.

먼저 퍼지 관측기가 부분적으로 관측가능하다고 하고 각각 규칙의 후건부의 시스템의 입출력 관계는 선형 상태 방정식으로 표현되며, 부분적 상태 관측기의 설계는 식(4)와 같다.

i 번째 관측자의 룰은

$$\text{IF } z_1(t) \text{ is } F_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } z_g(t) \text{ is } F_{ig}$$

THEN

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}(t) &= A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + G_i [y(t) - \hat{y}(t)] \\ \hat{y}_i(t) &= C_i \hat{x}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

이고, $F_{ij} (j=1, 2, \dots, g)$ 는 퍼지 집합, r 은 IF-THEN 룰의 개수, $z_i(t)$ 는 전건부 변수, $G_i (i=1, 2, \dots, r)$, $y(t)$ 와 $\hat{y}(t)$ 은 각각 관측오차행렬, 실제 시스템, 퍼지 관측기의 최종 출력이다.

그리고 퍼지 관측기의 최종 추정상태는

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_i A_i \hat{x}(t) + \sum_{i=1}^r \mu_i B_i u(t) \\ &+ \sum_{i=1}^r \mu_i G_i [y(t) - \hat{y}(t)] \end{aligned} \quad (5)$$

이고, 퍼지 관측기의 최종 출력은 가중 평균으로 식(6)과 같이 표현된다.

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i C_i \hat{x}(t) \quad (6)$$

여기서 μ_i 는 퍼지 관측기의 i 번째 가중치로 식(7)과 같이 표현된다.

$$\mu_i [z(t)] = \frac{w_i [z(t)]}{\sum_{i=1}^r w_i [z(t)]}, \quad w_i [z(t)] = \prod_{j=1}^g F_{ij} [z_j(t)] \quad (7)$$

$$z(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \dots \ z_g(t)]$$

$$w_i [z(t)] \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, r; \quad \sum_{i=1}^r w_i [z(t)] > 0$$

$$\mu_i [z(t)] \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, r; \quad \sum_{i=1}^r \mu_i [z(t)] = 1$$

여기서 w_i 는 i 번째 룰의 전건부의 적합도, $F_{ij} [z_j(t)]$ 는 퍼지 집합 F_{ij} 의 $z_j(t)$ 에서의 그레이드(grade)를 나타낸다.

따라서

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_i A_i \hat{x}(t) + \sum_{i=1}^r \mu_i B_i u(t) \\ &+ \sum_{i=1}^r \mu_i G_i \cdot C_i [x(t) - \hat{x}(t)] \end{aligned} \quad (8)$$

위와 같은 식(8)을 만들 수 있다.

본 논문에서는 퍼지 관측기의 후건부를 Luenberger 타입으로 디자인하면,

i 번째 룰은

$$\text{IF } z_1 \text{ is } F_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } z_g \text{ is } F_{ig},$$

$$\text{Then, } \hat{\dot{x}} = A_i \hat{x} + B_i u + L_i (y - C \hat{x}) \quad (9)$$

이고 \hat{x} 는 x 의 추정값이고 L_i 는 i 번째 룰에 대한 관측기의 이득행렬을 나타낸다. ($i=1, 2, \dots, r$)

퍼지 관측기의 최종 추정 상태는

$$\hat{\dot{x}} = \sum_{i=1}^r \mu_i (A_i \hat{x} + B_i u + L_i (y - C \hat{x})) \quad (10)$$

이며, 만일 L_i 행렬이 안정하다면, 다른 초기치 조건에 대해서도 \hat{x} 는 x 를 따르게 된다.

추정 상태 오차 벡터는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{e} &= \hat{x} - \hat{x} \\ &= \sum_{i=1}^r \mu_i (A_i x - B_i u) - \sum_{i=1}^r (A_i \hat{x} + B_i u + L_i (y - C \hat{x})) \\ &= \sum_{i=1}^r \mu_i (A_i - L_i C) e = \sum_{i=1}^r \mu_i \bar{A}_i e \end{aligned} \quad (11)$$

모든 양한정 등가 행렬 Q에 대해서 다음을 만족하는 양한정 행렬 P가 유일하게 존재하면, 식(10)은 근사적으로 안정하다.

$$\bar{A}_i^T P + P \bar{A}_i = -Q \quad (12)$$

식(12)의 증명은 참고문헌[4]를 참조하였다.

따라서 식(13) 조건을 만족하는 관측기 이득행렬을 구하여 시스템에 적용한다.

$$\hat{x}(t) \rightarrow x(t) \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (13)$$

4. 전체 시스템

앞에서 설명된 것을 바탕으로 비선형적 요소(백래쉬)를 포함한 2자유도 시스템에서 퍼지 관측기를 사용하여 상태를 추정하고 이를 PI제어기를 이용하여 제어하는 시스템 전체의 구성은 그림3과 같다.

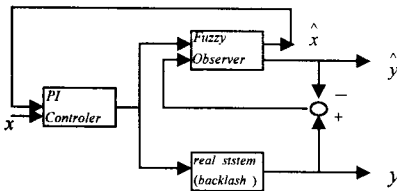


그림 3. 퍼지관측기를 갖는 전체 시스템

5. 모의 실험

모의 실험에서 사용하는 변수들의 값은 표1과 같이 지정하였다.

모터관성 모우먼트 J_w [Kg m^2]	0.001038	부하관성 모우먼트 J_2 [Kg m^2]	0.01457
모터 점성마찰계수 B_w [Kg m^2/s]	0.0137	부하 점성마찰계수 B_2 [Kg m^2/s]	0.967
커플링 상수 [Nm/rad]	300		

표1. 모의실험에서 사용하는 기본값

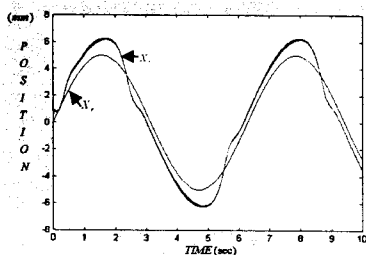


그림4. 백래쉬를 포함한 시스템의 응답특성

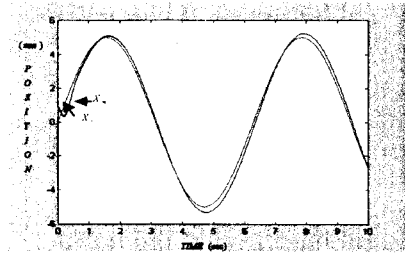


그림5. 퍼지관측기를 이용한 시스템의 응답특성

그림4,그림5에서 X_r 은 기준입력, X_b 은 백래쉬를 포함한 서보시스템의 출력, X_m 은 퍼지 관측기를 포함한 시스템의 출력을 나타낸다. 그림4는 백래쉬를 포함하고 있는 시스템을 PI제어를 하였을 때, 입력파형과 출력파형을 나타낸다. 그림5는 그림4의 시스템에 퍼지 관측기를 사용하였을 경우에 입출력 파형의 비교를 나타낸다.

그림4와 그림5에서 볼 수 있듯이 백래쉬와 같은 비선형적 요소를 포함하고 있는 시스템에 퍼지관측기를 이용하여 보다 좋은 성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 백래쉬에 대한 정의, 2자유도 시스템의 모델링, 그리고 퍼지 관측기에 대해서 설명하였다. 이를 바탕으로 비선형적 요소(백래쉬)를 포함하고 있는 2자유도 시스템을 퍼지 관측기와 PI제어기로 전체 시스템을 구성하였고, 모의실험을 통하여 제안한 시스템의 제어성능의 향상을 보였다. 앞으로 남은 과제는 실제 시스템에 적용하여 실험을 통하여 증명을 할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] X.J.Ma,Z.Q.Sun,Y.Y.He,"Analysis and Design of Fuzzy Controller and Fuzzy Observer",IEEE Trans. Fuzzy syst.,VOL.6,NO.1,Feb.1998.
- [2] K.Tanaka,T.Ikeda,H.O.Wang,"Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers:Relaxed Stability Conditions and LMI-Based Designs",IEEE Trans. Fuzzy syst. VOL.6,NO.2,MAY 1998.
- [3] J.Y.KAO,Z.M.YEH,Y.S.TARNG,Y.S.LIN,"A study of backlash on the motion accuracy of CNC lathes", Int. J. Mach Tools Manufact. VOL.36,NO.5,June 1995
- [4] H.Lee, G.Jin, J.Kim and H.Choi, "Model-based Fuzzy Control of Nonlinear Systems",J.of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, Vol.9, No.2,1999
- [5] Y.Wu,K.Fujikawa,H.Kobayashi,"A control method of speed control drive system with backlash",AMC'96 1996
- [6] T.Shaocheng,T.Jiantao,Z.Jun,"Fuzzy Adaptive Robust Observer Design for Nonlinear Systems",IEEE International Fuzzy syst. August 1999
- [7] M.Abrate,G.Griva,F.profumo,A.Tenconi,"High Speed Sensorless Fuzzy-Like Luenberger Observer",IEEE,1999