

비선형 외란관측기 기반 유압서보시스템의 백스테핑 제어 Backstepping Control with Nonlinear Disturbance Observer for Electro-hydraulic Systems

원대희

Daehee Won(daehee@kitech.re.kr),
한국생산기술연구원 CT융합연구그룹

Key words : Disturbance Observer, Backstepping Control, Electro-hydraulic Systems

1. 서론

유압 서보시스템은 액추에이터의 자체 무게 대비 큰 힘을 낼 수 있는 장점을 가지고 있어 다양한 산업분야에서 많이 활용되고 있다. 최근에는 자체 동력을 가지고 유압시스템 구동이 가능한 로봇 시스템 개발에도 응용되고 있다. 이러한 활용도 증가 및 마이크로프로세서 기술의 발달로 인해 90년대부터 최근까지 유압서보시스템 제어를 위해 다양한 비선형 제어기법이 제안 되었다. 특히, 유압 서보 시스템의 동역학 모델은 백스테핑 제어기 설계에 적합한 구조로 되어있어, 이 방법을 적용한 유압시스템의 적응제어, 강인제어 등 다양한 제어기 설계방법이 제안되었다. 그리고, 시스템의 불확실성에 대한 외란 관측기 설계기법[2] 또한 많은 연구가 되어왔다.

본 논문에서는 유압 서보 시스템의 제어기 설계시 비선형 외란 관측기를 포함하여 시스템의 불확실성과 외란항을 제거함으로써, 백스테핑 기법을 적용시 각 상태의 불확실성에 대한 영향을 최소화하기 위한 제어기법을 제안하고자 한다.

2. 시스템 모델링

본 논문에서는 산업분야에서 널리 사용 되는 전기제어방식의 유압서보시스템의 5차 동역학 모델을 3차로 간략화하여 제어기 설계에 이용하였으며, 그 운동방정식은 식(1)과 같이 표현된다[1].

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \underbrace{0}_{f_1} + \underbrace{1}_{g_1} x_2 + d_1 \\ \dot{x}_2 &= -\underbrace{\frac{k}{m} x_1 - \frac{b}{m} x_2 + \frac{A_p}{m} x_3}_{f_2} + d_2 \\ \dot{x}_3 &= \underbrace{-h_2 x_2 - h_3 x_3}_{f_3} + \underbrace{h_4 \sqrt{P_s - \text{sgn}(u)} x_3}_{g_3} u \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 $h_1 = 4\beta_e A_p / V_t$, $h_2 = 4\beta_e C_{dp} / V_t$, $h_3 = 4\beta_e C_{d0} k / (V_t \sqrt{\rho})$ 이다.

시스템의 상태변수 x_1 와 x_2 는 피스톤의 위치와

속도이며, x_3 는 각 챔버간의 압력차이며, $d_i = \Delta f_i + d_i^{ext}$ 는 모델링 오차와 외란의 합을 나타낸다. 식(1)에서 사용된 상수에 대한 설명은 생략하기로 한다.

3. 외란 관측기 설계

본 논문에서는 관측기 동역학에 비해 외란은 상대적으로 변화가 느리다고 가정하여 $\dot{d} = 0$ 으로 가정하고, 식(2)와 같은 비선형 외란 관측기의 기본 모델을 사용하였다.[2]

$$\begin{aligned} \dot{\hat{d}}_i &= l_i (\dot{x}_i - f_i - g_i x_{i+1} - \hat{d}_i), \quad i=1,2 \\ \dot{\hat{d}}_i &= l_i (\dot{x}_i - f_i - g_i u - \hat{d}_i), \quad i=3 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 \hat{d}_i 는 관측된 외란 값이다.

그러나, 위의 외란 관측기를 사용하기 위해서는 각 상태의 미분항이 필요하다. 실제 시스템에서는 노이즈 등의 문제로 인해 각 상태를 직접 미분하여 사용하는 것은 문제가 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 식(3)과 같은 보조변수 ξ_i 를 도입하였다.

$$\xi_i = \hat{d}_i - p_i(x_1, \dots, x_i), \quad i=1,2,3 \quad (3)$$

본 논문에서는 식(3)의 $p_i = l_i x_i$ 로 정의하고 보조변수를 이용하여 설계된 비선형 외란 관측기는 식(4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{d}}_1 &= \xi_1 + p_1, \quad \dot{\hat{d}}_2 = \xi_2 + p_2, \quad \dot{\hat{d}}_3 = \xi_3 + p_3 \\ \dot{\xi}_i &= -l_i \xi_i - l_i (p_i + f_i + g_i x_{i+1}), \quad i=1,2 \\ \dot{\xi}_i &= -l_i \xi_i - l_i (p_i + f_i + g_i u), \quad i=3 \end{aligned} \quad (4)$$

식(3)-(4)와 $\bar{d}_i = d_i - \hat{d}_i$ 를 이용하면 제안한 외란 관측기의 오차 동역학을 식(5)와 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{\bar{d}} = -L \bar{d} \quad (5)$$

여기서, $\bar{d} = [\bar{d}_1 \quad \bar{d}_2 \quad \bar{d}_3]^T$ 은 실제 외란값과 관측된 값의 차이이며, 관측기 이득 $L = \text{diag}\{l_1, l_2, l_3\}$ 을 적절히 선택하여 외란 관측기를 안정하게 설계 할 수 있다.

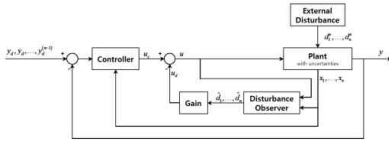


Fig. 1 The structure of the proposed controller

4. 제어기 설계

Fig. 1 은 본 논문에서 제안한 제어기 구조를 나타낸다. 제어기 설계를 위해 새로운 상태변수 $z_1 = x_1 - y_d$, $z_2 = x_2 - \dot{y}_d - \alpha_1$, $z_3 = x_3 - y_d^{(2)} - \alpha_2$ 를 정의하고, 백스테핑 기법을 사용하여 제어기를 설계하였으며, 모델링 되지 않은 외란을 제거하기 위해 3절에서 제안한 외란 관측기로부터 관측된 각 상태의 외란항을 포함하여 설계한 제어입력 u 는 식(6)과 같다.

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_1} \left(-f_1 - \hat{d}_1 - k_1 z_1 - (g_1 - 1) \dot{y}_d \right)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_2} \left(-f_2 - \hat{d}_2 + \dot{\alpha}_1 - (g_2 - 1) y_d^{(2)} - k_2 z_2 - g_1 z_1 \right)$$

$$u = \frac{1}{g_3} \left(-f_3 - \hat{d}_3 + \dot{\alpha}_2 + y_d^{(3)} - k_3 z_3 - g_2 z_2 \right) \quad (6)$$

여기서 함수 α_i 는 각 상태변수를 안정화시키기 위한 함수이다.

식(6)의 제어입력을 적용하면 오차 동역학은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{z}_1 = -k_1 z_1 + g_1 z_2 + \tilde{d}_1$$

$$\dot{z}_2 = -k_2 z_2 - g_1 z_1 + g_2 z_3 + \tilde{d}_2$$

$$\dot{z}_3 = -k_3 z_3 - g_2 z_2 + \tilde{d}_3 \quad (7)$$

5. 안정도 분석

본 논문에서 설계된 제어기의 각 상태 오차와 외란 관측기 오차의 제곱 항으로 구성된 Lyapunov 함수를 식(8)과 같이 정의하였다.

$$V = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} (z_i^2 + \tilde{d}_i^2) \quad (8)$$

식(8)을 시간에 대해 미분하면 식(9)와 같이 표현된다.

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^3 (z_i \dot{z}_i + \tilde{d}_i \dot{\tilde{d}}_i) \leq -\sum_{i=1}^3 \left(k_i - \frac{1}{2} \right) z_i^2 - \sum_{i=1}^3 \left(l_i - \frac{1}{2} \right) \tilde{d}_i^2 \quad (9)$$

만약 제어기의 이득을 $k_i \geq 1/2$ 으로, 외란 관측기 이득을 $l_i \geq 1/2$ 의 조건으로 선택하면, 식(9)는 $\dot{V} \leq 0$ 을 만족하여 본 논문에서 설계된 외란관측기 기반 백스테핑 제어기는 각 상태의 오차 z_i 를 점근적으로 0으로 수렴함을 보장하게 된다.

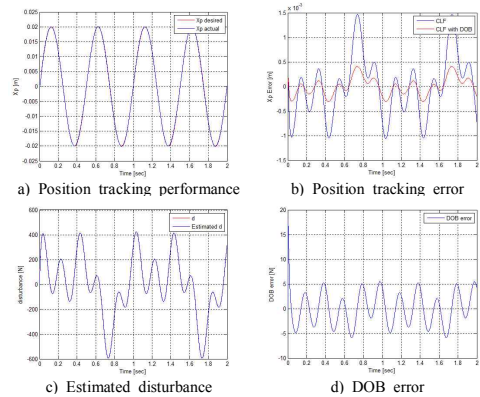


Fig. 2 The simulation results of the proposed controller

Table 1 Comparison of CLF and CLF with DOB

| Tracking error | CLF | CLF with DOB |
|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| $\ x_p^d - x_p\ _{\infty}$ | 15×10^{-4} | 4.099×10^{-4} |
| $\ x_p^d - x_p\ $ | 54.6×10^{-3} | 16.0×10^{-3} |

6. 시뮬레이션 결과

3절의 외란 관측기와 4절에서 설계된 제어기의 성능을 평가하기 위하여 제어기 설계시 고려되지 않은 외란(Fig. 2-c)을 입력하고 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 모델링 오차에 대한 보상 성능을 입증하기 위해 플랜트 모델은 5차 동역학 모델을 이용하였다.

Fig. 2와 Table 1은 외란 관측기를 포함하지 않은 제어기와 본 논문에서 제안한 제어기의 위치 제어 성능의 비교와 외란 관측 결과를 나타낸다.

7. 결론

본 논문에서는 외란 및 모델오차 등 불확실성을 포함하고 있는 유압 서보 시스템의 제어를 위해 백스테핑 설계 기법을 적용하였으며, 외란 관측기를 이용하여 불확실성에 대한 영향을 최소화하기 위한 제어기법을 제안하였다. 또한, 제어기의 안정도 분석과 위치 제어 및 외란관측 성능을 시뮬레이션을 통해 확인 하였다.

참고문헌

- H. E. Merrit, Hydraulic Control System, Wiley and Sons, New York, 1967.
- Chen W, Balance D, Gawthrop P, O'Reilly J, " A non-linear disturbance observer for robotic manipulators," IEEE Trans. Ind. Electron. 47(4), 932-938 (2000)