

유압 액추에이터의 외란 관측기 기반 입력력 피드백 선형화 제어

Input-Output Feedback Linearization with Extended State Observer for Electro-hydraulic Actuator

*이상류¹, #원대희², 권오홍², 박상덕³

*Sang-ryu Lee¹, #Daehee Won(daehee@kitech.re.kr)², Ohung Kwon², Sangdeok Park³

¹한국과학기술연합대학원 대학교, ²한국생산기술연구원 CMT 개발단, ³한국생산기술연구원 지능형로봇연구그룹

Key words : Electro-Hydraulic Actuator, Extended State Observer, Feedback Linearization

1. 서론

유압 서보시스템은 액추에이터의 자체 무게 대비 큰 힘을 낼 수 있는 장점을 가지고 있어 다양한 산업분야에서 많이 활용되고 있다. 특히, 디지털 소자의 발달로 비선형성이 강한 유압서보 제어를 위한 비선형제어가 가능해져 서보 제어 성능이 고속/고정밀화가 가능하게 되어 로봇분야에서도 이를 적용하려는 시도들이 활발히 진행되고 있다. 90년대부터 최근까지 다양한 제어기법이 유압 서보 제어를 위해 제안되었다. 제한된 동작점에서의 local linearization이 제안 되었다[1]. 하지만 이 방법으로는 시스템의 강인성을 희생하게 된다. Backstepping이 유압 서보 제어를 위하여 제시 되었다 [2]. Backstepping은 복잡성으로 인하여 실시간 구현에는 적합하지 않다. [3], [4]에서는 유압 서보제어를 위하여 passivity based controller를 제안 하였으나 실제 비선형 제어를 위해서는 시스템의 모든 상태를 알아야 한다.

따라서, 본 논문에서는 유압 서보 시스템의 불확실성과 외란의 총합을 확장 상태로 정의하고 단지 위치 측정 데이터만을 이용하여 이를 관측하고 제어 위한 비선형 관측기와 입력력 피드백 선형화 제어를 접목시킨 제어기를 제안하고자 한다.

2. 시스템 모델링

본 논문에서는 Fig. 1과 같은 유압 서보시스템의 동역학 모델과 제어기를 설계하였으며, 그 동역학 식은 식 (1)과 같다.

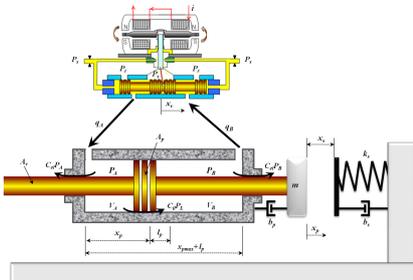


Fig. 1 A schematic of experimental system

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_2}{f_1} \\ \frac{\mu a_1(x_1 - x_2) + a_2 x_2 + a_3 x_3}{f_1} \\ h_1 x_2 + h_2 x_3 + h_3 \sqrt{P_s - x_4} / |x_4| x_3 x_4 \\ \frac{x_5}{f_2} \\ \frac{b_1 x_4 + b_2 x_5}{f_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{b_1}{g_1} \end{bmatrix} u$$

$$y = h(x) = \frac{x_1}{g_1}$$

여기서 $a_1 = \frac{k_1}{m}$, $a_2 = \frac{k_2}{m}$, $a_3 = -\frac{b_p}{m}$, $a_4 = \frac{A}{m}$, $h_1 = -\frac{4\beta_e A}{V_1}$, $h_2 = -\frac{4\beta_e}{V_1} \left(C_u + \frac{C_{cl}}{2} \right)$, $h_3 = \frac{4\beta_e C_{cl} w}{V_1 \sqrt{\rho}}$, $\mu = \begin{cases} 1 & \text{for } x_1 \geq x_2 \\ 0 & \text{for } x_1 < x_2 \end{cases}$ 이다

시스템의 상태변수는 시스템의 상태변수 x_1 , x_2 는 피스톤의 위치 및 속도, x_3 는 각 챔버간의 압력차이며, x_4 , x_5 는 각각 서보밸브의 스톱 위치와 속도이다.

위의 동역학 식에서 사용된 상수에 대해서는 기존 유압 서보 시스템 관련 문헌[5]에 많이 사용되는 것으로 본 논문에서는 생략하기로 한다.

3. 입력력 피드백 선형화기반 제어기 설계

본 논문에서는 2절의 5차 유압 서보시스템 동역학 모델을 3차 시스템으로 간략화 하여 제어기 설계시 사용하였으며, 식 (2)와 같이 입력력 피드백 선형화 과정을 통하여 제어 입력을 얻을 수 있다.

$$y^{(r)} = \frac{\partial(L_f^{-1}h(x))}{\partial x} [f(x) + g(x)u] = L_f^r h(x) + L_g L_f^r h(x)u \quad (2)$$

본 논문에서 사용된 비선형 모델의 상대 차수는 3이며, 설계된 제어 입력은 식 (3)과 같다.

$$u = \frac{1}{L_g L_f^r h(x)} (-L_f^r h(x) + v) = \frac{1}{a_3 g_3} [-\mu a_1 f_1 + a_2 f_2 + a_3 f_3 + v]$$

$$= \frac{1}{\frac{A}{m} \frac{4\beta_e C_{cl} w K_v}{V_1 \sqrt{\rho}} \sqrt{P_s - \text{sgn}(u)} x_3} \times \left(-\left(\frac{k_1}{m} x_2 - \frac{b_p}{m} \left(-\frac{k_2}{m} \mu (x_1 - x_2) - \frac{b_p}{m} x_2 + \frac{A}{m} x_3 \right) \right) + \frac{A}{m} \left(-\frac{4\beta_e A}{V_1} x_2 - \frac{4\beta_e}{V_1} \left(C_u + \frac{C_{cl}}{2} \right) x_3 \right) \right) + v \quad (3)$$

여기서 피드백제어기 v 는 PD제어기 형태로 설계하였으며, k_1, k_2 는 제어 이득이다.

4. 비선형 외란 관측기 설계

실제 제어시스템에서 시스템의 불확실성 및 외란을 포함되어 있기 때문에 제3절에서 설계된 제어입력으로는 비선형 항을 정확히 선형화 할 수가 없다. 그래서, 제어기 설계에 사용된 모델을 *nominal* 모델로 가정하고 위에서 언급한 모든 불확실성 및 외란을 추가하여 시스템 모델을 식 (4)와 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x}^{(3)} &= \underbrace{f(x,t) + g(x)u + \Delta(x,t,u)}_{N(x,t,u)} \\ &= N(x,t,u) + \Delta(x,t,u) = R(x,t,u) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $N(x,t,u)$ 는 *nominal* 모델, $R(x,t,u)$ 은 실제 모델이며 $\Delta(x,t,u)$ 는 제어기 설계시 포함되어지지 않은 동역학 모델과 외란이다.

이러한 불확실성과 외란을 관측하기 위한 관측기를 설계하기 위한 이를 확장 상태로 정의하고 시스템을 식(5)와 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \quad \dot{x}_2 = x_3, \quad \dot{x}_3 = f(x,t) + g(x)u + \Delta(x,t,u), \\ \dot{x}_4 &= d(t), \quad y = h \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $x_4 = \Delta(x,t,u)$, $\dot{x}_4 = d(t)$ 는 알 수 없는 값이며, 이 확장 상태(z_4)를 관측하기 위한 비선형 관측기(Extended State Observer) 형태는 식 (6)과 같다.[6]

$$\begin{aligned} e &= z_1 - y \\ \dot{z}_1 &= z_2 - \beta_{01}z_1(e) \\ \dot{z}_2 &= z_3 - \beta_{02}z_2(e) \\ \dot{z}_3 &= z_4 + f(x,t) - \beta_{03}z_3(e) + g(x)u \\ \dot{z}_4 &= -\beta_{04}z_4(e) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $z_i(\cdot)$ 는 $e_{0i}z_i(e_{0i}) > 0, \forall e_{0i} \neq 0, z_i(0) = 0$ 을 만족하는 비선형 함수이며 $\beta_i, i=1, \dots, 4$ 는 관측기 이득이고, 이를 적당히 선택하면 실시간으로 상태를 관측할 수 있으며 관측기의 상태변수 $z_i(t)$ 는 $x_i(t)$ 으로 수렴하게 된다.

이러한 관측기를 통해 시스템의 불확실성 및 외란 항인 확장 상태(z_4)를 관측하여 식 (3)의 제어기와 결합하면 식 (7)과 같은 제어입력을 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{a_3 g_3} [-z_4 - (ua_1 f_1 + a_2 f_2 + a_3 f_3) \\ &\quad + k_1(x_1^d - x_1) + k_2(x_2^d - x_2)], \quad k_i \geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

5. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 제어기와 PID제어기, 관측기가 포함되지 않은 입출력 피드백 선형화 기반 제어기의 제어 성능을 비교하였으며, Fig. 2는 그 결과이다. 그리고, 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

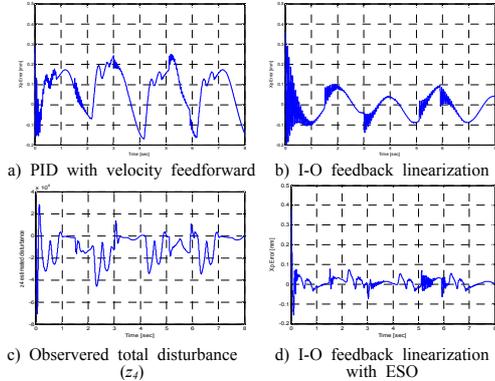


Fig. 2 A comparison of position tracking error

- 실린더 회방 위치 : $x_1^d = 0.01 \sin(\pi t) [m]$
- 외란 500 [N] (1.5 sec < t < 3 sec)
- 외란 500 [N] (5.1 sec < t < 5.9 sec)
- 외란 0 [N] (그 외)

6. 결론

유압 서보 시스템은 비선형성 강하고 모든 상태를 측정하기 힘든 시스템이다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 5차 모델을 근사화한 3차 시스템을 제어기 설계에 사용하였으며 이때 발생하는 시스템 모델링 및 매개변수 오차와 외란 등을 실린더의 위치만을 이용한 확장 상태 관측기를 통해 관측하고 비선형제어기와 결합하여 기존의 제어기보다 외란에 강인한 제어기를 설계하고 그 성능을 확인 할 수 있었다.

후기

본 연구는 지식경제부 민군겸용기술개발사업 "다축형 견마로봇 플랫폼 기술 개발" 과제로 지원되었습니다.

참고문헌

1. D. Li and S. E. Salcudean, "Modeling, Simulation, and Control of a Hydraulic Stewart Platform," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., pp. 3360-3366, April 1997.
2. Mohammad R. "On the Nonlinear Control of Hydraulic Servo-Systems," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., pp. 1276-1282, April 2000.
3. A. Alleyne and R. Liu, "Systematic Control of a Class of Nonlinear Systems with Application to Electro-hydraulic Cylinder Pressure Control," IEEE Trans. Cont. Sys. Tech., vol. 8, no. 4, pp. 623-634, July 2000.
4. 김원희 최인덕 한종표 원대희 정경주 "Passivity based Controller for Position Tracking Control of Electro-Hydraulic Servo System," Control, Automation, and Systems Symposium, pp.228-231, 2008.
5. H. E. Memt, Hydraulic Control System, Wiley and Sons, New York, 1967.
6. Jingqing Han, "From PID to Active Disturbance Rejection Control", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 3, March 2008.