

유압 모터 위치 제어를 위한 High gain observer에 기초한 Passivity based Controller

김원희*, 최인덕*, 강동규*, 신동훈*, 원대희***, 정정주**

한양대학교 전기공학과*, 한양대학교 전기생체공학과**, 한국생산기술연구원***

High Gain Observer based Passivity based Controller for Position Control of Hydraulic actuator

Wonhee Kim*, Induk Choi*, Dong Gyu Gang*, Donghoon Shin*, Daehee Won***, Chung Choo Chung**

Department of Electrical Engineering, Hanyang University*,

Division of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang University**

Division for Applied Robot Technology, Korea Institute of Industrial Technology***

Abstract - 본 논문에서는 passivity based controller에 high gain observer를 접목시킨 유압 모터의 위치 제어를 제시 한다. 본 논문에서는 5차 비선형 동역학 모델을 사용 하였다. Passivity based controller는 유압 모터의 높은 위치 추정능력을 구현하지만 그것을 위해서는 유압 모터의 상태 및 부하의 정보를 알아야 한다. 상태 및 부하의 정보를 추정 하기 위하여 high gain observer를 제안하였다. High gain observer를 사용함으로써 유압 모터와 부하의 동역학의 비선형성을 줄여 상태 및 부하를 효과적으로 추정 하였다. 유압 모터의 위치 제어 성능 및 부하의 관측 능력 평가를 위하여 Matlab/Simulink를 이용하여 모의 실험을 구현 하였다.

1. 서 론

유압 모터는 빠른 응답과 큰 힘을 낼 수 있어 로봇, 항공기, 롤링 머신 등 다양한 곳에 사용이 되고 있다 [1]. 그러나 유압 모터는 유압 유체와 서보 밸브의 복잡한 흐름 특성에서 나오는 비선형 때문에 제어하는데 어려움이 있다. 그렇기 때문에 유압 모터의 위치 제어에 대하여 많은 연구가 되고 있다.

다양한 제어 기법이 유압 모터의 제어를 위하여 제시되었다. 제한된 동작점에서의 local linearization이 제시 되었다 [1]. 하지만 이 방법으로는 시스템의 강인성을 희생하게 된다. PD 제어를 사용한 기법이 [2]에서 제시되었다. 하지만 안정성을 증명하지 않았다. Variable Structure Control (VSC)가 유압 모터의 위치 제어를 위하여 사용되었다 [3]. 하지만 VSC는 고주파 대역에서 chattering이 발생되어 시스템을 불안정하게 할 수 있다. Feedback linearization이 유압 모터의 제어 성능을 향상시키기 위하여 제시 되었다 [4]. 하지만 밸브의 동역학이 충분히 빠르다고 가정하여 생각되었다. Backstepping 이 유압 모터 제어를 위하여 제시 되었다 [5]. 하지만 backstepping은 복잡성으로 인하여 real time implementation에 적합하지 않다. [6], [7]에서는 유압 모터 제어를 위하여 passivity based controller를 제시 하였다. 하지만 실제 비선형 제어를 위해서는 시스템의 모든 상태를 알아야 한다.

본 논문에서는 passivity based controller에 high gain observer를 접목시킨 유압 모터의 위치 제어를 제시 한다. [7]에서는 5차 비선형 동역학으로 모델링 된 유압 모터를 passivity based controller를 이용하여 효과적인 위치 제어를 하였다. 하지만 유압 모터의 모든 상태를 알고 부하는 걸리지 않은 것으로 가정을 하였다. 유압 모터의 상태와 부하를 관측하기 위하여 high gain observer를 제시 하였다. 여러 개의 유압 모터가 연결되어 사용할 경우 부하의 동역학은 비선형성을 가지기 때문에 정확하게 알 수 없다. 또한 유압 모터는 비선형 성을 가지고 있어 이러한 비선형성의 영향을 줄이기 위하여 high gain observer를 제시 하였다. 유압 모터의 위치 제어 성능 및 부하의 관측 능력 평가를 위하여 Matlab/Simulink를 이용하여 모의 실험을 구현 하였다.

2. 모 델 및 Passivity based Controller

본 논문에서는 5차의 비선형 모델을 유압 모터의 모델로 사용 하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{J_m}(D_m x_3 - \tau_L) \\ \dot{x}_3 &= h_2 x_4 \sqrt{P_s - \text{sgn}(x_4)x_3} - h_2 x_2 - h_3 x_3 \\ \dot{x}_4 &= x_5 \\ \dot{x}_5 &= -\omega_n^2 - 2\zeta\omega_n x_5 + \omega_n^2 K_v u \end{aligned} \quad (1)$$

사용된 모델은 아래와 같다. 위 식에서 x_1 은 로터의 위치, x_2 는 로터의 속도, x_3 는 양 포터의 압력차, x_4 는 서보 밸브의 위치, x_5 는 서보 밸브

의 속도, τ_L 은 마찰을 포함한 부하이며 u 는 전류 입력이다. 나머지 상수 및 모델링에 대한 정보는 [7]에 자세하게 나와 있다.

모델 (1)의 위치 제어를 위한 Passivity based Controller는 아래와 같이 설계가 된다 [7].

$$\begin{cases} u = \gamma(x, x_1^d) \\ u = -\frac{1}{\omega_n^2 K_v}(-\omega_n^2 x_4 - 2\zeta\omega_n x_5 - \dot{x}_5^d + k_5 e_5) \\ x_2^d = -(x_2 - x_1^d + k_1 e_1) \\ x_3^d = -\frac{J_m}{D_m}(-\tau_L - \dot{x}_2^d + K_2 e_2) \\ x_4^d = -\frac{1}{h_1 \sqrt{P_s - \text{sgn}(x_4)x_3}}(-h_2 x_2 - h_3 x_3 - \dot{x}_3^d + k_3 e_3) \\ x_5^d = -(x_5 - x_4^d + k_4 e_4) \end{cases} \quad (2)$$

위 식에서 x_1^d 는 위치 기준 신호이며 $x_2^d, x_3^d, x_4^d, x_5^d$ 는 전류 입력을 만들기 위한 프로파일이다. 그리고 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 는 제어 이득이다.

3. High Gain Observer

Passivity based controller에는 유압 모터의 상태 및 부하의 정보를 알아야 하지만 실제로 유압 모터에서 알 수 있는 것은 로터의 포지션만 엔코더를 통해 측정이 가능하다. 게다가 여러 개의 유압 모터를 사용하는 경우 부하의 변화를 정확하게 알 수 없으므로 부하를 추정해야 한다. 부하를 측정하기 위하여 유압 모터의 동역학 (1)에 부하를 $x_6 = \tau_L$ 으로 선언한다. 부하의 동역학은 아래와 같이 정의 된다.

$$\dot{x}_6 = f_L(\cdot) \quad (3)$$

부하의 동역학을 알 수는 없으므로 (3)과 같이 비선형으로 표현을 한다. 유압 모터의 상태 및 부하를 측정하기 위하여 아래와 같은 high gain observer를 설계한다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \Phi(\hat{x}) + B\hat{u} + L(x_1 - \hat{x}_1), \dot{x}_6 = f_L(\cdot) \quad (4)$$

여기서 $\hat{x} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \hat{x}_4, \hat{x}_5]^T$ 은 유압 모터의 상태 $x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T$ 를 추정하는 관측기의 상태이며 L 은 관측기 이득이며,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D_m}{J_m} & 0 & 0 & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & -h_2 & -h_3 & -h_1 \sqrt{P_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = [0, 0, 0, 0, \omega_n^2 K_v, 0]^T,$$

$$\phi(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_m} \tau_L \\ h_1 (\sqrt{P_s - \text{sgn}(x_4)x_3} - \sqrt{P_s}) x_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

이다. 관측기 이득은 $L = \left[\frac{\alpha_1}{\epsilon}, \frac{\alpha_2}{\epsilon^2}, \frac{\alpha_3}{\epsilon^3}, \frac{\alpha_4}{\epsilon^4}, \frac{\alpha_5}{\epsilon^5}, \frac{\alpha_6}{\epsilon^6} \right]^T$ 이며

$$A_\eta = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha_2 & 0 & \frac{D_m}{J_m} & 0 & 0 & -\frac{1}{J_m} \\ -\alpha_3 - h_2 & -h_3 & -h_1\sqrt{P_s} & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha_4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\alpha_5 & 0 & 0 & -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

를 Hurwitz하게 되도록 정해져야 한다. 관측 오차를 $\tilde{x} = x - \hat{x}$ 으로 선언하고 스케일한 관측 오차 η 를 다음과 같이 선언한다.

$$\eta = [\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6]^T = [\tilde{x}_1, \epsilon\tilde{x}_2, \epsilon^2\tilde{x}_3, \epsilon^3\tilde{x}_4, \epsilon^4\tilde{x}_5, \epsilon^5\tilde{x}_6]^T \quad (5)$$

스케일한 관측 오차의 동역학은 아래와 같다.

$$\dot{\epsilon}\eta = A_\eta\eta + \Delta(\cdot) \quad (6)$$

여기서 $\Delta(\cdot) = [0, \epsilon^2(\phi_2(x) - \phi_2(\hat{x})), \epsilon^3(\phi_3(x) - \phi_3(\hat{x})), 0, 0, 0]^T$ 이다. 관측 이득의 ϵ 가 충분히 작으면 관측 이득은 커지면서 비선형성 Δ 는 크기가 줄어 들게 된다. ϵ 은 유압 모터의 비선형의 영향을 줄일 수 있도록 충분히 작아야 한다.

4. 모의 실험

High gain observer를 이용한 passivity based controller의 위치 추종 능력을 평가 하기 위하여 Matlab/Simulink를 이용한 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험에서 사용된 부하는 식 (6)과 같다.

$$\tau_L = mgl\sin(x_1) + sint \quad (6)$$

모의 실험을 하기 위한 모델 파라미터는 표1에 나와 있다.

〈표 1〉 모델의 파라미터

| | | | |
|---------|--------------------|----------|----------------------|
| J_m | 0.179 | D_m | 2.5×10^{-5} |
| h_1 | 1.63×10^9 | h_2 | 8.92×10^7 |
| h_3 | 78.8749 | ω | 1160 |
| ζ | 0.7 | K_v | 4.0×10^{-5} |
| m | 20 | g | 9.8 |
| l | 0.4 | | |

위치 기준 신호는 그림 1에 있다. High gain observer에 의하여 추정된 상태를 이용하여 passivity based controller를 사용하였을 경우의 위치 추종 결과가 그림 1에 있다. 그림 2는 위치 추종 오차이다. 그림 1과 2의 결과에 의하여 전체 상태를 feedback 받지 않고 위치만을 feedback 받았음에도 위치 추종이 잘 되었음을 알 수 있다. 그림 3은 부하의 추정 결과이다. High gain observer를 통하여 부하 추정이 잘 되었음을 그림 3을 통하여 확인 할 수 있다.

5. 결 론

유압 모터는 동역학이 비선형을 가지고 부하를 알 수 없어 위치 제어 하는데 많은 어려움이 있다. 본 논문에서는 high gain observer를 이용하여 추정된 상태를 이용하여 passivity based control을 하여 유압 모터의 위치 제어를 하는 것을 제시 하였다. Passivity based control은 높은 위치 추종 능력을 구현하기 위해서는 유압 모터의 상태 및 부하의 정보를 필요로 한다. 유압 모터 및 부하의 비선형성을 줄이고 상태 및 부하를 효과적으로 추정하기 위하여 high gain observer를 이용 하였다. 모의 실험 결과 high gain observer가 유압 모터의 상태 및 부하를 추정을 잘 하였음을 확인 할 수 있었으며 이 정보를 이용한 passivity based controller 역시 유압 모터의 높은 위치 추종 능력을 구현 하였음을 확인 할 수 있었다.

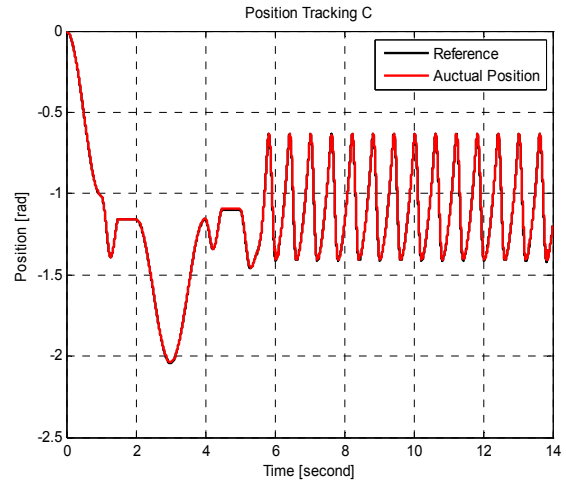
〈참 고 문 헌〉

- [1] H. E. Memt, Hydraulic Control System, Wiley and Sons, New York, 1967.
- [2] 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.
- [3] T. Chem and Y. Wu, "An Optimal Variable Structure Control with Integral Compensation for Electrohydraulic Position Servo Control Systems," IEEE Trans. Indus. Elec., vol. 39, pp. 460-463, Oct. 1992.
- [4] H. Hahn, A. Piepenbrink, and K. D. Leimback, "Input/Output Linearization Control of an Electro-Servo-Hydraulic Actuator," in Proc. IEEE Conf. Contr. Appl., pp. 995-1000, 1994.
- [5] Mohammad R. Sirouspour and S. E. Sacudean, "On the Nonlinear Control of Hydraulic Servo-Systems," in Proc. IEEE int. Conf.

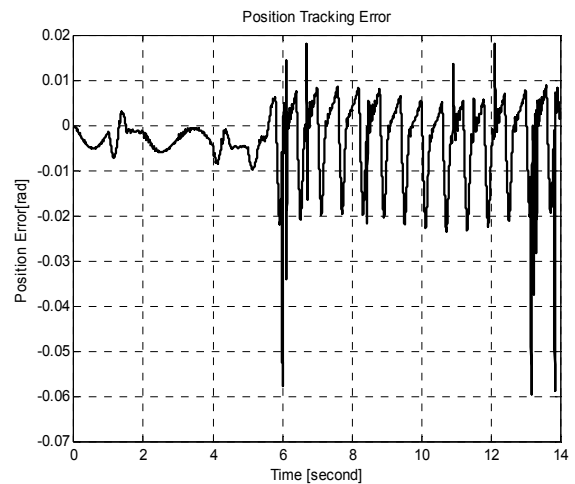
Robotics and Automat., pp. 1276-1282, April 2000.

[6] A. Alleyne and R. Liu, "Systematic Control of a Class of Nonlinear Systems with Application to Electro-hydraulic Cylinder Pressure Control," IEEE Trans. Contl. Sys. Tech., vol. 8, no. 4, pp. 623-634, July 2000.

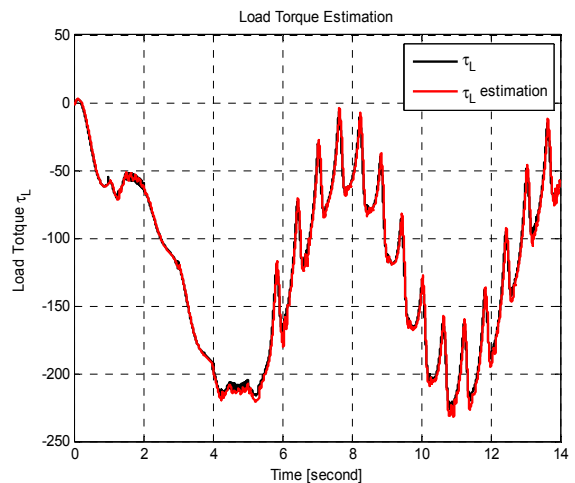
[7] 김원희, 최인덕, 한종표, 원대희, 김정주, "Passivity based Controller for Position Tracking Control of Electro-Hydraulic Servo System," Control, Automation, and Systems Symposium, pp.228-231, 2008.



〈그림 1〉 위치 프로파일 및 위치 추종 결과



〈그림 2〉 위치 추종 오차



〈그림 3〉 실제 부하 및 부하 추정 결과