

견마르봇용 유압액츄에이터의 모델 파라미터의 불확실성에 대한강인 제어기 설계

Robust Controller Design for Model Parametric Uncertainties of Electro-hydraulic Actuator with Application to Four Legged Robot

임종국¹, *# 권오홍², 원대희², 박상덕³, 박종현¹

Jong Guk Yim¹, *# Ohung Kwon²(ohung@kitech.re.kr), Dae Hee Won², Sangdeok Park³, Jong Hyeon Park¹
¹한양대학교 기계공학부, ²한국생산기술연구원 CMT 개발단, ³한국생산기술연구원 지능형로봇연구그룹

Key words : Electro-Hydraulic Actuator, Passivity, Parameter Uncertainty, Robust Control

1. 서론

유압 시스템은 액츄에이터의 크기에 대한 출력의 비가 크기 때문에 현대 산업분야에서 많이 활용되고 있다. 그러나 유압 시스템은 비선형성이 크고, 큰 모델 불확실성을 가지고 있다. 불확실성의 예로는 산업상 이용에 따른 하중의 변화와 온도의 변화에 따른 유압 파라미터의 변화 등이 있다. 이러한 특성을 가지는 유압시스템에 대하여 90년대부터 최근까지 다양한 제어기법이 제안되었다. 제한된 동작점에서의 local linearization이 제안되었지만 [2], 시스템의 강인성을 희생되는 단점이 있다. Lyapunov analysis에 기초한 Backstepping 기법을 사용하는 제어기가 설계되었지만[3], 제어기의 복잡성과 가상 제어 입력들의 정확한 미분치를 요구하므로 실제 구현에는 적합하지 않다. Backstepping 기법을 대신하여 passivity 기반 제어기를 제안하였으나 [4],[5] 가상 입력의 미분과 모델 불확실성의 한계 함수의 결정 등의 단점이 있다.

본 논문에서는 passivity 기반으로 제어기를 설계하면서 파라미터 불확실성에 의한 항들을 외란으로 보고 L_2 -gain analysis를 이용하여 강인한 제어기를 설계하였다.

2. 시스템 모델링

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

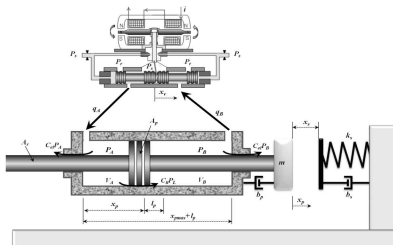


Fig. 1 A schematic of experimental system

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 & (1) \\ x_2 &= \alpha_{21}\mu(x_1 - x_s) + \alpha_{22}x_2 + \alpha_{23}x_3 \\ x_3 &= \alpha_{32}x_2 + \alpha_{33}x_3 + \alpha_{34}h(x_3, x_4)x_4 \\ x_4 &= \alpha_{44}x_4 + \alpha_{4u}u \end{aligned}$$

$$\text{여기서 } \alpha_{21} = -\frac{k_s}{m}, \alpha_{22} = -\frac{b_p}{m}, \alpha_{23} = \frac{A}{m}, \alpha_{32} = -\frac{4\beta_c A}{V_t},$$

$$\alpha_{33} = -\frac{4\beta_c C_{tm}}{V_t}, \alpha_{34} = \frac{4\beta_c C_{dw}}{V_t \sqrt{\rho}}, \alpha_{44} = -\frac{1}{\tau}, \alpha_{4u} = \frac{K_v}{\tau},$$

$$h(x_3, x_4) = \sqrt{(P_s - \text{sgn}(x_4)P_t)}, \mu = \begin{cases} 1 & x_1 \geq x_s \\ 0 & x_1 < x_s \end{cases} \text{ 이다}$$

시스템의 상태변수는 시스템의 상태변수 x_1, x_2 는 피스톤의 위치 및 속도, x_3 는 각 챔버간의 압력차이며, x_4 는 서보밸브의 스톱 위치이다.

위의 동역학 식에서 사용된 상수값은 기존 유압 서보시스템의 문헌[6]에 많이 사용되는 것으로 본 논문에서는 생략하기로 한다.

3. Passivity 기반 제어기 설계

유압 시스템 동역학 모델 1)에 대하여 트래킹해야 할 위치 궤적이 $x_{(1)desired}$ 로 주어 질 때 트래킹에러 ($e_1 = x_1 - x_{(1)desired}$)가 global asymptotically stability를 만족하도록 passivity 이론 [1], [4]에 따라 각각의 desired states를 설계하면 식 2)와 같다.

$$\begin{aligned} x_{(2)desired} &= \dot{x}_{(1)desired} - \eta_1 e_1 \quad (\eta_1 > 0) \\ x_{(3)desired} &= \frac{1}{\alpha_{23}}(-\alpha_{21}\mu(x_1 - x_s) - \alpha_{22}x_2 \\ &\quad + \dot{x}_{(2)desired} - \eta_2 e_2) \quad (\eta_2 > 0) \\ x_{(4)desired} &= \frac{1}{\alpha_{34}h(x_3, x_4)}(-\alpha_{32}x_2 - \alpha_{33}x_3 \\ &\quad + \dot{x}_{(3)desired} - \eta_3 e_3) \quad (\eta_3 > 0) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $e_i = x_i - x_{(i)desired}$ ($i=2,3$)이다. 서보밸브의 응답 속도가 충분히 빠르다고 하면 즉, τ 가 충분히 작다고 하면 제어 입력 u 는 식 3)과 같이 설계된다.

$$u = \frac{1}{K_v}x_{(4)desired} \quad (3)$$

4. 모델 파라미터 불확실성에 대한 강인한 제어기 설계

실제 유압 시스템에서는 모델 파라미터를 정확하게 알 수 없으므로 제3절에서 설계된 제어입력을 적용하면 실제 파라미터와의 차이에 의한 항들이 나타나게 된다. 또한 각 desired states의 미분도 정확하게 구할 수 없으므로 차이가 존재하게 된다. 이러한 항들을 외란으로 취급하고 L_2 -gain Analysis [7]을 이용하여 강인한 제어입력이 추가되도록 설계하면 압력에 대한 $x_{(3)desired}$ 는 다음과 같다.

$$x_{(3)desired} = \frac{1}{\hat{\alpha}_{23}}(-\hat{\alpha}_{21}\mu(x_1 - x_s) - \hat{\alpha}_{22}x_2 + \hat{x}_{(2)desired} - \eta_2 e_2 - k_2 e_2)$$

여기서 $\hat{\alpha}$ 는 시스템 모델 파라미터의 추정치이고, $\hat{x}_{(2)desired} = \eta_1 \dot{x}_{(1)desired} + \ddot{x}_{(1)desired} - \eta_1 x_2$ 이고 k_2 는 다음과 같다.

$$k_2 = \frac{\lambda_2}{\Phi_2} (\Phi_2 > 0),$$

$$\lambda_2 = \sqrt{\mu\bar{\alpha}_{21}^2 + \bar{\alpha}_{22}^2 + \bar{\alpha}_{23}^2 + \Phi_2^2}$$

여기서 $\bar{\alpha}_{2i}$ 는 $|\alpha_{2i} - \hat{\alpha}_{2i}| \leq \bar{\alpha}_{2i}$ 를 만족하는 값이다. 서브 밸브 위치에 대한 $x_{(4)desired}$ 는 다음과 같다.

$$x_{(4)desired} = \frac{1}{\hat{\alpha}_{34}h(x_3, x_4)}(-\hat{\alpha}_{32}x_2 - \hat{\alpha}_{33}x_3 + \hat{x}_{(3)desired} - \eta_3 e_3 - k_3 e_3)$$

$$\hat{x}_{(3)desired} = \hat{\beta}_1 \dot{x}_{(1)desired} + \hat{\beta}_2 \ddot{x}_{(1)desired} + \hat{\beta}_3 \frac{d^3 x_{(1)desired}}{dt^3} + \hat{\beta}_4 x_2 + \hat{\beta}_5 \{\hat{\alpha}_{21}\mu(x_1 - x_s) + \hat{\alpha}_{22}x_2 + \hat{\alpha}_{23}x_3\}$$

$$k_3 = \frac{\lambda_3}{\Phi_3} (\Phi_3 > 0)$$

$$\lambda_3 = \sqrt{\gamma_{31}^2 + \gamma_{32}^2 + \gamma_{33}^2 + \gamma_{34}^2 + \Phi_3^2}$$

여기서 $\hat{\beta}_i = \hat{\beta}_i(\hat{\alpha}_{2i}, \eta_i, k_2)$ 이고 $\bar{\gamma}_{3i} = \bar{\gamma}_{3i}(\hat{\beta}_i, \bar{\alpha}_{2i})$ 로 복잡한 항들이 정리된 것이다.

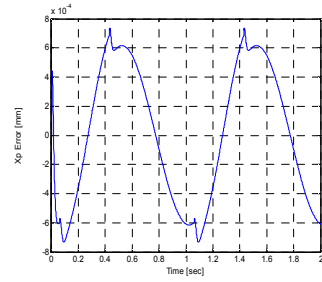
5. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 설계된 강인 제어기의 성능을 검증하기 위하여 기계부의 질량 및 탄성 계수, 유압부의 체적 탄성 계수에 각각 10%의 모델링 오차가 있다고 가정하고 위치 트래킹 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig. 2와 같다. 모델 파라미터의 불확실성이 존재하는 경우라고 하더라도 위치 에러는 충분히 작음을 확인할 수 있다.

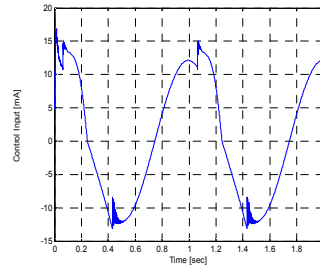
6. 결론

유압 시스템은 기계부와 유압부가 연결된 구조로 비선형성이 크고, 각각의 모델 파라미터에 불확실성

이 존재하는 시스템이다. 이러한 구조에 적합하면서 파라미터의 불확실성에 의한 영향을 최소화하기 위하여 passivity를 기반으로 제어기를 설계하였고 L_2 -gain analysis를 이용하여 강인성을 가지도록 하였다.



a) Position error



c) Control input

Fig. 2 Simulation results

후기

본 연구는 지식경제부 민간겸용기술개발사업 “다족형 견마로봇 플랫폼 기술 개발” 과제로 지원되었습니다.

참고문헌

1. H. Khalil, Nonlinear System, Englewood Prentice-Hall, April 1996.
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. Mohammad R. “On the Nonlinear Control of Hydraulic Servo-Systems,” in Proc. IEEE int. Conf. Robotics and Automat., pp. 1276-1282, April 2000.
4. A. Alleyne and R. Liu, “Systematic Control of a Class of Nonlinear Systems with Application to Electro-hydraulic Cylinder Pressure Control,” IEEE Trans. Contrl. Sys. Tech., vol. 8, no. 4, pp. 623-634, July 2000.
5. 김원희 최인덕 한종표 원대희 정정주 “Passivity based Controller for Position Tracking Control of Electro-Hydraulic Servo System,” Control, Automation, and Systems Symposium, pp.228-231, 2008.
6. H. E. Merritt, Hydraulic Control System, Wiley and Sons, New York, 1967.
7. A. J. van der Schaft, “ L_2 -Gain Analysis of Nonlinear Systems and Nonlinear State Feedback H_∞ Control”, IEEE Trans. on Auto. Contr, Vol. 37, No. 6, pp770-784.