

외란 관측기를 활용한 유압 매니플레이터의 압력 추정 Disturbance Observer Based Pressure Estimation of Hydraulic Manipulator

*#김상석^{1,2}, 권오홍², 박상덕², 손웅희²

*#S. S. Kim^{1,2}(hiroek@kitech.re.kr), O. H. Kwon², S. D. Park², W. H. Son²
¹ 과학기술연합대학원대학교 지능형로봇공학과, ² 한국생산기술연구원 로봇기술본부

Key words : Hydraulic Manipulator, Contact Force Estimation, Disturbance Observer, Extended Kalman Filter (EKF)

1. 서론

유압 시스템은 부피 대비 큰 힘을 내는 장점을 가지고 있어 현대 산업에서 다양한 분야에 이용되고 있다. 이 유압시스템의 정밀한 제어 방법으로 힘 제어 방법이 많이 사용되며, 이것의 적용을 위해서는 힘 센서가 요구된다. 하지만 이러한 힘 센서를 채택할 경우 부착 부위의 구조가 복잡해지고, 온도 등의 환경적 영향을 받는 등 단점들을 가지고 있다. 기존의 연구로서, 이러한 문제들을 해결하고 안정적인 힘 제어가 이루어질 수 있도록 외란 관측기를 통해 센서 없이 외부 환경과 모터 구동형 로봇의 접촉 힘을 추정하여 안정적인 힘 제어가 이루어지도록 하는 연구를 몇몇 문헌에서 찾아볼 수 있다[1].

유압 회전형 액추에이터를 채택한 매니플레이터의 외부 토크를 추정하는 연구도 수행되었으나, 외란 관측기를 활용하지 않고 매니플레이터의 동역학 모델과 측정된 토크 정보를 이용하여 힘 제어가 아닌 결합 모니터링을 위해 활용되었으며, 유압 모델이 직접적으로 적용되지 않았다[2].

본 논문에서는 유압 회전형 액추에이터를 채택한 매니플레이터의 외부 접촉힘을 알기 위해, 액추에이터 양단의 부하 압력을 추정하는 방법을 소개한다. 몇몇 연구에서 활용되고 있는 비선형 외란 관측기로 쓰이고 있는[3,4] 확장 칼만필터(Extended Kalman Filter)를 활용하여 기계/유체 동역학 모델을 모두 포함한 외란 관측기를 설계하고, 시뮬레이션을 통해 부하 압력의 추정 성능을 확인코져 한다.

2. 동역학 모델링 및 외란 관측기 설계

2.1 기계 동역학 모델링

본 논문에서는 각 관절에 유압 회전형 액추에이터가 부착된 다 자유도 매니플레이터에 대해 말단부 접촉 힘을 추정하기 위한 모델링 및 외란 관측기 설계를 고려하였으나, 수식 전개 편의를 위해 Fig. 1 과 같은 2 자유도 매니플레이터에 대해 일련의 과정을 진행하기로 한다. 여기서, 변수 벡터/행렬에 대한 세부적인 표현들은 지면 관계상 생략한다. 또한 액추에이터의 마찰력은 무시할 수 있다고 가정하였다.

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + J^T F_{contact}, \quad \theta = [\theta_1 \quad \theta_2]^T \quad (1)$$

2.2 유체 동역학 모델링

상기 매니플레이터의 각 조인트에는 Fig. 2 와 같은 구조의 회전형 더블 베인 유압 액추에이터가 장착되어 있으며, 서보 밸브에 의해 공급되는 유압의 단속이 이루어진다. 본 논문에서는 유압 제어에 큰 영향을 미치는 온도, 공급 압력/유량 등의 주요 유압 시스템 매개변수의 변화가 없는 것으로 가정하며, 한 관절에 대한 서보 밸브, 액추에이터의 동역학 모델링 만을 다음과 같이 수행하였다[5].

서보 밸브 동역학의 경우, 추정 성능을 향상시키기 위해 2 차 시스템으로 좀더 정확한 모델링을 식 (2)와 같이 실시하였다.

$$\ddot{x}_{sp-j} + 2\zeta\omega_n\dot{x}_{sp-j} + \omega_n^2 x_{sp-j} = K_t \omega_n^2 i_j \quad (j=1,2) \quad (2)$$

여기서, x_{sp-j} 는 각 서보 밸브의 스톱 포지션[m], i_j 는 각 서보 밸브 코일로의 입력 전류[*mA*], ζ 는 감쇠비, ω_n 는 고유진동수[*rad/sec*], K_t 는 토크모터 게인[*m/mA*]이다.

서보 밸브에 의해 단속되는 유량에 관한 방정식은 다음과 같다.

$$Q_{L-j} = C_o w x_{sp-j} \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_s - \text{sgn}(x_{sp-j}) \Delta P_j)} \quad (j=1,2) \quad (3)$$

여기서, Q_{L-j} 는 각 서보 밸브에서 액추에이터로 흐르는 유량[*m³/sec*], P_s 는 펌프의 공급유량[*kgf/m²*], ΔP_j 는 각 액추에이터 A,B 포트 사이 압력차[*kgf/m²*], C_o 는 밸브 오리피스 계수, w 는 서보 밸브 스톱 면적 구배[*m*]이다.

서보밸브에서 액추에이터에 흐르는 유량에 의해 작용하는 액추에이터의 부하 압력 방정식은 다음과 같다.

$$Q_{L-j} = \dot{\theta}_j D + C_t \Delta P_j + \frac{V_t}{4\beta_e} \Delta \dot{P}_j \quad (j=1,2) \quad (4)$$

여기서, $\dot{\theta}_j$ 는 각 액추에이터의 회전속도[*rad/sec*], V_t 는 액추에이터 총 체적[*m³*], D 는 단위 회전당 체적 변위[*m³/rad*], β_e 는 유체의 체적탄성계수[*kgf/m²*], C_t 은 액추에이터 누유에 의한 유량 손실계수[*m³/kgf*], ρ 는 유체의 밀도[*kg/m³*]이다.

서보 밸브 제어 유량 방정식(3)과 액추에이터 유량-부하 압력 방정식(4)에 의해, 액추에이터의 유체 동역학 식이 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta \dot{P}_j = \frac{4\beta_e C_o w x_{sp-j}}{V_t \sqrt{\rho}} \sqrt{P_s - \Delta P_j} - \frac{4\beta_e D}{V_t} \dot{\theta}_j - \frac{4\beta_e C_t}{V_t} \Delta P_j \quad (j=1,2) \quad (5)$$

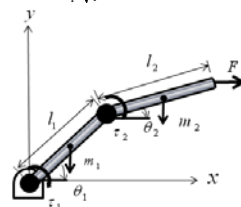


Fig. 1 2 D.O.F Hydraulic Manipulator

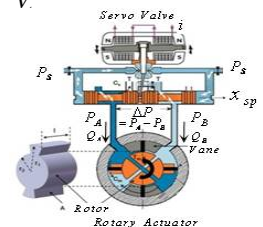


Fig. 2 Electro-Hydraulic Servo System

2.3 외란 관측기 설계

매니플레이터 말단부에 작용하는 접촉 힘을 추정하기 위해, 앞에서 구한 기계/유체 동역학 모델링 식들을 포함한 2 자유도 매니플레이터 동역학 모델에 대한 상태 공간 방정식을 식 (6)의 형태로 정의할 수 있다[3,4].

$$\dot{x}(t) = f[x(t)] + B u(t) + w(t) \quad (6)$$

$$y(t_n) = h[x(t_n)] + v(t_n)$$

여기서, $w(t)$ 는 분산 $Q(t)$ 를 갖는 모델링 불확실성을

의미하며, $\underline{u}(t_n)$ 는 분산 $R(t_n)$ 를 갖는 측정 오차임.
또한 상태변수 \underline{x}_n , 관측기 입력 \underline{v}_n , 센서 피드백 \underline{y}_n 은 다음과 같다.

$$\underline{x}_n = [\theta_1 \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \Delta P_1 \Delta P_2 x_{sp-1} x_{sp-2} \dot{x}_{sp-1} \dot{x}_{sp-2}]^T, \quad \underline{u}_n = [i_1, i_2]^T, \quad \underline{y}_n = [\theta_1 \theta_2 x_{sp-1} x_{sp-2}]^T \quad (7)$$

그리고 식 (6)을 구성하는 시스템 행렬들은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$f[\underline{x}] = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ f(\tau_2, x_1, x_2, x_3) \\ f(\tau_1, \tau_2, x_1, x_2, x_3, x_4) \\ h_1 x_7 \sqrt{\Delta P_s - \text{sgn}(x_7) x_5} - h_2 x_3 - h_3 x_5 \\ h_1 x_8 \sqrt{\Delta P_s - \text{sgn}(x_8) x_6} - h_2 x_4 - h_3 x_6 \\ x_9 \\ x_{10} \\ -\omega_n^2 x_7 - 2\zeta \omega_n x_9 \\ -\omega_n^2 x_8 - 2\zeta \omega_n x_{10} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \omega_n^2 k_i & 0 \\ 0 & \omega_n^2 k_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$h[\underline{x}] = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix}$$

시스템 (6)에 대해 선형화를 수행하면 다음과 같다.

$$\delta \dot{\underline{x}}(t) = F[\underline{x}(t)]\delta \underline{x}(t) + \underline{w}(t) \quad \underline{y}(t) = H[\underline{x}(t)] + \underline{v}(t) \quad (9)$$

$$F[\underline{x}(t)] = \frac{\partial f}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=x_i(t)}, \quad H[\underline{x}(t)] = \frac{\partial h}{\partial \beta} \Big|_{\beta=x_i(t)} \quad (i: 0 \sim 10)$$

이때, $F[\underline{x}(t)]$ 는 10 x 10 행렬이고, $H[\underline{x}(t)]$ 는 2 x 10 행렬이며, 세부적인 표현은 지면 관계상 생략한다.

식 (9)를 이용하여 확장 칼만필터(Extended Kalman Filter, EKF) 관측기를 설계하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \underline{x}_{n|n-1} &= \underline{x}_{n-1|n-1} + [f[\underline{x}_{n-1|n-1}] + B(\underline{u}_{n-1})]\Delta T \\ P_{n|n-1} &= P_{n-1|n-1} + (F_{n-1} P_{n-1|k-1} + P_{n-1|n-1} F_{n-1}^T)\Delta T + Q \\ K_n &= P_{n|n-1} H^T (H P_{n|n-1} H^T + R)^{-1} \\ \underline{x}_n | n &= \underline{x}_{n|n-1} + K_k (\underline{y}_n - H \underline{x}_{n|n-1}) \\ P_{n|n} &= P_{n|n-1} - K_n H P_{n|n-1} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\quad (11)$$

본 외란 관측기는 관측기 입력 \underline{u}_{n-1} 과 이전 상태 값 $\underline{x}_{n-1|n-1}$ 을 이용하여 다음 상태 값 $\underline{x}_{n|n-1}$ 을 추정하는 예측 단계(10)와, 예측된 상태 값 $\underline{x}_{n|n-1}$ 와 센서 피드백 \underline{y}_n 을 통한 그때의 상태 값의 분산 $\hat{P}_{n|n-1}$ 의 갱신을 통해 새로운 상태 추정 값 $\underline{x}_n | n$ 와 해당 분산 $\hat{P}_{n|n}$ 가 구해지는 수정 단계(11)로 구성된다. 이러한 과정이 반복적으로 이루어지며, 이때 필터 게인 K_n 또한 갱신된다.

이러한 외란 관측기의 추정 결과로서, 부하 압력의 추정 값 $\Delta \hat{P}$ 가 구해진다. 그리고 $\hat{\underline{c}} = D\Delta \hat{P}$ 와 기계 동역학 모델 식 (1)을 이용하면, 말단부 접촉시 발생하는 힘의 추정 값 $\hat{F}_{contact}$ 또한 가능할 것으로 예상된다.

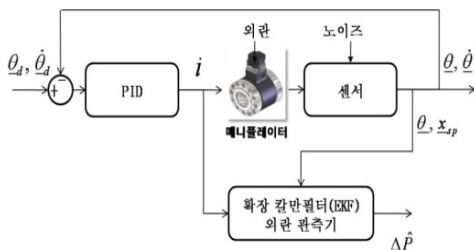


Fig. 3 PID Control and Extended Kalman Filter(EKF) Observer

3. 시뮬레이션

2 자유도 매니플레이터는 수직 방향으로 주어진 궤적을 따라 움직이며, Fig. 3 과 같이 PID 제어에 의한 궤적 추종이 이루어진다. 필터 안정성 및 추정 시간을 고려하여, R_o , Q_o , P_o 의 적절한 초기값을 시행착오를 거쳐 선택하였다.

시뮬레이션 수행 결과, 힘이 가해지지 않은 상태에서 추정 상태변수인 각 액추에이터의 부하 압력 ΔP_j 에 대한 추정 결과가 얻어졌다. 말단부 속도가 약 0.5m/s 일 때 Fig. 4 와 같이 5~10 bar 정도의 추정 오차가 발생하였고, 0.5m/s 이하의 속도에서는 Fig. 5 와 같이 오차가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 0.5m/s 이상의 속도에서는 추정오차가 커져 기대 이하의 성능을 얻었다. 이는 모델링시 액추에이터 내부 마찰 특성 및 기계 동역학 모델링에서 중력의 영향을 고려하지 않아 그러한 것으로 판단된다.

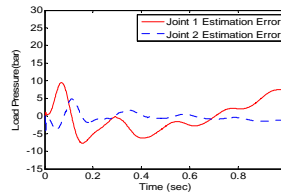


Fig. 4 Load Pressure Estimation (About 0.5m/s Velocity)

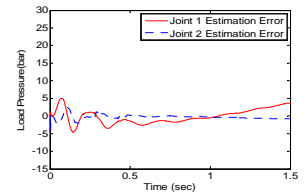


Fig. 5 Load Pressure Estimation (Under 0.5m/s Velocity)

4. 결론

유압 회전형 액추에이터를 탑재한 매니플레이터의 상태 변수를 추정할 수 있는 확장 칼만필터(EKF) 외란 관측기 모델을 소개하였다. 이러한 외란 관측기를 통해, PID 제어를 통해 궤적 추종 중인 매니플레이터의 각 액추에이터의 부하 압력 ΔP_j 를 추정하였으나 어느 정도의 오차가 발생하였다. 이는 모델링시 액추에이터 내부 마찰 특성 및 기계 동역학 모델링에서 중력의 영향을 고려하지 않아 그러한 것으로 판단된다. 이를 향상시키기 위해 좀더 정확한 모델링에 근거한 추정이 요구되며, 이를 통해 향후 말단부 접촉 힘을 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 개선된 외란 관측기를 활용하여 현재 개발 중인 4 축 유압 보행로봇의 힘 제어 및 운전 중 생길 수 있는 유압시스템의 결합 모니터링 등 여러 가지 목적으로 쓰임이 예상된다.

참고문헌

1. K.S.Eom, I.H.Suh, W.K.Chung, S.-R.Oh, "Disturbance Observer Based Force Control of Robot Manipulator without Force Sensor", Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation
2. C.Bidard, C.Libersa, D.Arthur, Y.Measson, J.-p.Friconeau, J.-D.Palmer, "Dynamic identification of the hydraulic Maestro manipulator-Relevance for monitoring", Fusion Engineering and Design 75-79 (2005) 559-564
3. 이종욱, 허건수, "3 차원 공간상에서 로봇 매니플레이터의 접촉힘 추정, 대한기계학회논문집 A 권, 제 25 권 제 2 호, pp.192~197, 2001
4. Silverio Bolognani, Roberto Obeo, and Mauro Zigliotto, "Sensorless Full-Digital PMSM Drive With EKF Estimation of Speed and Rotor Position", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL.46, NO.1, 2, 1999
5. Glen Bilodeau, Evangelos Papadopoulos, "Modelling, Identification, and Experimental Validation of a Hydraulic Manipulator Joint for Control", Proc.IROS 97