

시간지연을 고려한 굴삭기의 적응 슬라이딩 모드 제어기 설계

ADAPTIVE SLIDING MODE CONTROL DESIGN FOR AN EXCAVATOR WITH TIME DELAY

이봉주¹, 김현진¹

1) 서울대학교 기계항공공학부, 서울 151-742

교신 저자: 김현진, hjinkim@snu.ac.kr

요약

굴삭기는 유압을 이용하여 동작하는 플랜트이다. 유체의 난류유동으로 인하여 유압실린더의 모델링은 어려운 반면에 PID 제어기를 이용한 위치, 속도제어는 간단하게 할 수 있다. 하지만 PID 제어기를 이용했을 경우 유압실린더 특성상 동작 시 시간지연이 발생한다. 본 논문에서는 PID 제어가 되고 있는 굴삭기를 시간지연 동특성만을 가지는 시스템으로 모델링했다. 시간지연 상수의 불확실성을 고려하여 시간지연을 제어할 적응 슬라이딩 모드 제어기를 설계했고 슬라이딩 모드만을 사용했을 때와 성능을 비교하였다. 그리고 굴삭작업 중 장애물에 막혔을 때 장애물을 우회하여 굴삭작업을 할 수 있도록 임피던스 필터를 설계하였고 시뮬레이션을 통해 결과를 확인하였다.

시스템 모델링

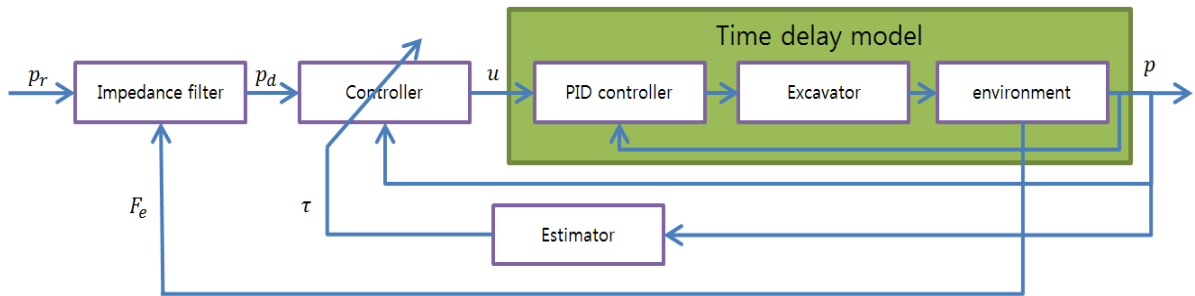


그림 1. 시스템 다이어그램

그림 1 에서 시간지연 모델에 해당하는 부분인 PID 제어기를 이용한 굴삭기를 제어하는 파트를 통합하여 시간지연 시스템으로 새로이 정의했다. 본 논문에서 다룰 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{\tau}\theta + \frac{1}{\tau}u \quad (1)$$

여기서 τ 는 불확실성을 가지는 파라미터이고 θ 는 관절의 각도, u 는 제어입력에 해당한다.

슬라이딩 모드 제어

시간지연을 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 제어할 수 있다.

$$e = \theta - \theta_d \quad (2)$$

$$s = e + \lambda \int e dt \quad (3)$$

$$\dot{s} = \dot{e} + \lambda e = -\frac{1}{\tau}\theta - \dot{\theta}_d + \lambda e + \frac{1}{\tau}u \quad (4)$$

$$u = \tau \left(-\lambda e + \dot{\theta}_d + \frac{1}{\tau}\theta - Q \text{sign}(s) \right) = \tau \left(-\lambda e + \dot{\theta}_d - Q \text{sign}(s) \right) + \theta \quad (5)$$

θ_d 는 관절이 추종할 각도, s 는 슬라이딩 표면이다.

적응 슬라이딩 모드 제어

적응제어기법을 적용하여 τ 를 추정하여 제어입력을 추정 할 수 있으며 추정된 $\hat{\tau}$ 을 이용하여 제어입력 u 를 업데이트 할 수 있다.

$$u = \hat{\tau} \left(-\lambda e + \dot{\theta}_d - Q \text{sign}(s) \right) + \theta \quad (6)$$

르야프노프 함수는 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2\tau k_a} \tilde{\tau}^2 \quad (\tilde{\tau} = \hat{\tau} - \tau) \quad (7)$$

$$\dot{V} = s\dot{s} + \frac{1}{\tau k_a} \tilde{\tau}\dot{\tilde{\tau}} \quad (8)$$

$$= s \left(-\frac{1}{\tau}\theta - \dot{\theta}_d + \lambda e + \frac{\hat{\tau}}{\tau} \left(-\lambda e + \dot{\theta}_d - Q \text{sign}(s) \right) + \frac{1}{\tau}\theta \right) + \frac{\tilde{\tau}}{\tau k_a} \dot{\tilde{\tau}}$$

$$= -sQ \text{sign}(s) + \frac{\tilde{\tau}}{\tau} \left(s \left(-\lambda e + \dot{\theta}_d - Q \text{sign}(s) \right) + \frac{1}{k_a} \dot{\tilde{\tau}} \right)$$

\dot{V} 이 음반한정이 되기 위해서 $\dot{\hat{\tau}}$ 은 다음과 같은 업데이트 식을 가질 수 있다.

$$\dot{\hat{\tau}} = k_a s \left(\lambda e - \dot{\theta}_d + Q \text{sign}(s) \right) \quad (9)$$

그리고 채터링 현상을 피하기 위해 sign 함수 대신 포화함수를 이용하였다. 포화함수를 사용함으로써 채터링 문제를 완화시킬 수 있지만 제어정확성은 다소 떨어질 수 있다. 최종적으로 제어입력 식과 파라미터 업데이트 식은 다음과 같다.

$$u = \hat{\tau} \left(-\lambda e + \dot{\theta}_d - Q \text{sat} \left(\frac{s}{\Phi} \right) \right) + \theta \quad (10)$$

$$\dot{\hat{\tau}} = k_a s \left(\lambda e - \dot{\theta}_d + Q \text{sat} \left(\frac{s}{\Phi} \right) \right) \quad (11)$$

여기서 Φ 는 표면의 경계층 두께를 나타내는 파라미터이다.

τ 의 초기 추정 값을 이용하여 불확실성을 슬라이딩 제어기만으로 제어한 결과와 적응기법을 추가하여 시간지연을 제어한 결과는 다음과 같다.

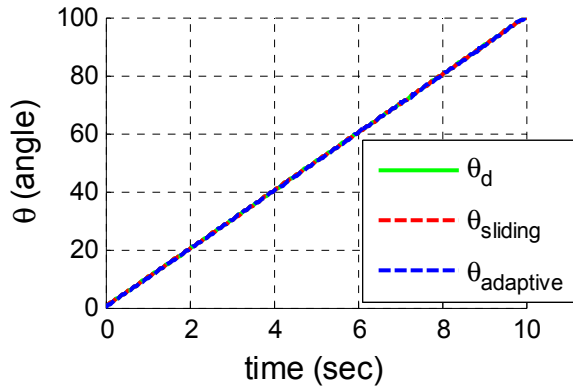


그림 2. 제어 결과

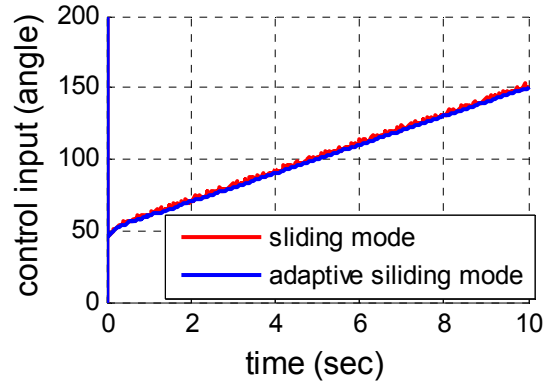


그림 3. 제어입력

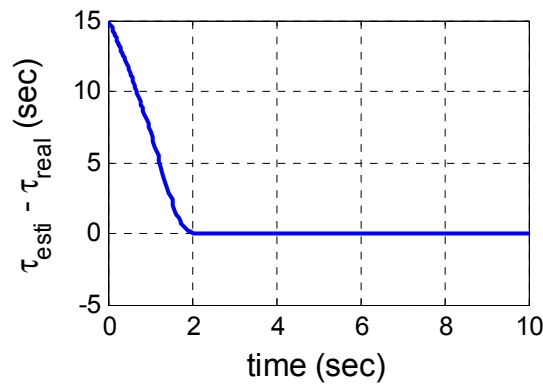


그림 4. 파라미터 추정 오차

위 결과는 제어명령 값 $\theta_d = 10t$ 일 때 시뮬레이션 결과이며 이때 제어이득 및 시정수는 각각 $Q = 10$, $k_a = 12.5$, $\tau_{real} = 5$ 로 설정했다. 두 제어기 모두 제어명령 값을 잘 추종하는 결과를 보이긴 하지만 제어입력을 살펴보면 그림 3 과 같이 슬라이딩 모드 제어기만 사용했을 때 채터링이 발생하는 반면 적응제어기법을 함께 사용했을 경우 채터링이 생기지 않음을 확인할 수 있다.

임피던스 필터

굴삭작업 중 장애물에 부딪혀 반력을 받을 때 이 정보로부터 장애물을 우회하여 굴삭작업을 할 수 있도록 임피던스 필터를 설계하였다.

$$M\ddot{e}_f + C\dot{e}_f + Ke_f = F_e \quad (e_f = \theta_d - \theta_r) \quad (12)$$

F_e 는 환경으로부터 받는 반력, θ_d 는 목표를 향하는 기존 궤적, θ_r 은 장애물을 회피하여 새로 생성되는 추종할 궤적이다. M, C, K 값들은 설계변수로서 반력이 가해질 때 새로 생성되는 궤적의 경향은 이 값들에 의해 정해진다.

그림 5 는 임피던스 필터를 이용하여 장애물을 만났을 때 우회하여 지나가는 시뮬레이션 결과이다. 노란색 실선은 원래 굴삭작업 경로이고 초록색 실선은 장애물을 우회하여 지나가는 경로, 빨간색 점선은 실제 굴삭기가 지나간 경로이다.

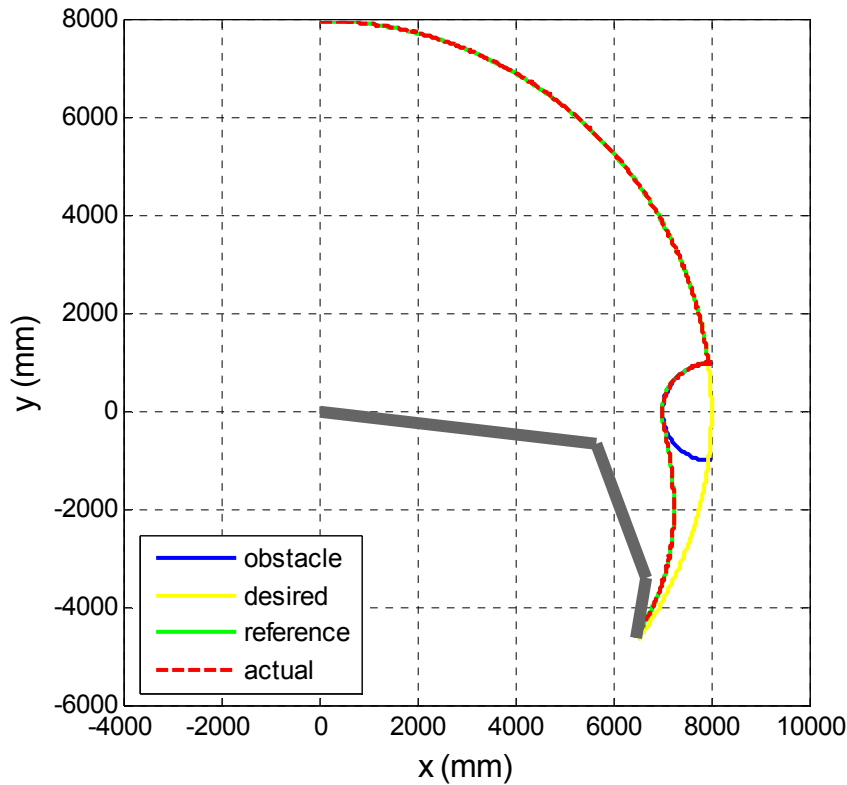


그림 5. 임피던스 필터를 이용한 시뮬레이션 결과

결론

슬라이딩 모드 제어기만 이용하였을 경우와 적응 슬라이딩 모드 제어기를 이용했을 경우 두 제어기의 제어입력을 비교해보면 적응 제어기법을 함께 썼을 때 채터링 현상이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

식 (11)에서 s 가 0 으로 수렴할 경우 \hat{t} 이 τ 로 수렴하지 않았어도 \hat{t} 은 0 이 되어 르야프노프 안정성을 만족시키므로 \hat{t} 가 항상 0 으로 수렴한다고 보장할 수 없다. 하지만 \dot{V} 가 음반한정이므로 이 시스템은 안정하다 할 수 있다. 이 논문에서 제안한 적응 제어기법이 불확실성을 가지는 파라미터의 수렴성은 보장하지는 않지만 같은 상황에서 채터링을 완화시키므로 적응 슬라이딩 모드 제어기를 사용하는 것이 제어입력의 경제성 면에서 더 낫다고 할 수 있다.

참고문헌

1. Ioannou, P. A., and Sun, J., *Robust Adaptive Control*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
2. Slotine, J.-J. E., and Li, W., *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, Englewood Cliff, NJ, 1991.
3. Haojian Xu, Maj D. Mirmirani, Petros A. Ioannou, "Adaptive Sliding Mode Control Design for a Hypersonic Flight Vehicle," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 27 No. 5, pp 829-838, September-October 2004.
4. Jose de Gea, Frank Kirchner, "Modelling and Simulation of Robot Arm Interaction Forces Using Impedance Control," *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control (IFAC)*, Seoul, Korea, pp. 15589~15594. , 2008