

응답특성 향상을 위한 지능형 굴삭기 시스템의 PI Anti-Windup 알고리즘 적용

The Application of PI Anti-Windup On an Intelligent Automation Excavator System for better Response

*이창섭¹, #홍대희¹, 김기영¹, 배장호¹
*C. S. Lee¹, #D. H. Hong(dhhong@korea.ac.kr)¹, K. Y. Kim¹, J. H. Bae¹
¹ 고려대학교 기계공학과

Key words : PI anti windup, Control, Excavator, Cylinder, Response

1. 서론

최근 지능형 자동 굴삭기 시스템에 대한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 그 동안 기계적 시스템에만 의존했던 기존 굴삭기가 효율, 안전성 등의 문제로 인한 시장의 요구를 반영하여 지능형 굴삭기로의 발전을 시도하고 있다. 지능형 굴삭기에서 가장 중요한 것 중 하나는 원하는 위치로 빠르고 정확하게 Bucket 을 이동시키는 것이다. Bucket 을 정확하게 Control 하려면 Arm 과 Boom 의 Hydraulic cylinder 를 정확하게 Control 해야 한다.

기존의 연구에서는 Arm 과 Boom 의 Cylinder 를 PI controller 로 제어를 하였는데 큰 Overshoot 과 느린 응답의 문제가 있었다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 PI Anti Windup 알고리즘을 적용하여 향상된 응답특성을 확인해 보았다.

2. PI anti windup

계산된 제어 값이 실제 구동기(actuator)가 작용할 수 있는 값의 한계보다 커서 구동기의 포화(saturation)가 발생하게 되는 경우, 오차의 적분 값이 큰 값으로 누적되게 되어 시스템이 설정 값에 도달하는 데 오랜 시간이 걸리게 되는 경우가 있는데, 이를 적분기의 와인드업이라고 한다. 이를 방지하기 위해서는 Anti windup 기법을 이용하여 PI 제어를 보완해야 한다.

PI Anti-windup 컨트롤을 적용 하는 몇 가지 방법이 있다. Conditional Integration, Limited Integrator, Tracking Anti-windup 등의 방법이 있는데 그 중에서도 Conditional Integration 방법이 Integral effect 를 줄이는 가장 간단한 접근법이다. Control signal 또는 Control error 와 같은 값들의 특정한 조건에서 Integration 을 On 하거나 Off 하는 방법이다. [1]

Conditional Integration 은 Fig. 1 과 같이 제어 입력이 특정 조건에 의해 제한이 되기 시작하면($i_c^* = i^*$) I controller 의 스위치가 Off 되어서 비례제어만을 하다가 제한이 끝나면($i_c^* \neq i^*$) 스위치가 On 되어 비례 적분제어를 실행하게 된다. [2]

Conditional Integration 을 하게 되면 PI 제어만 했을 때보다 Overshoot 이 줄어들고 응답이 빨라지게 된다.

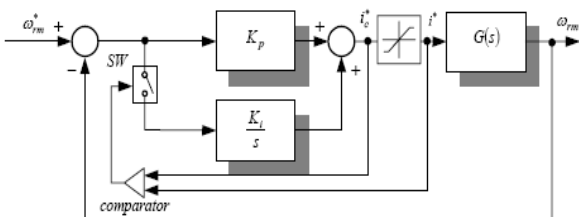


Fig. 1 Conditional Integration Strategy



Fig. 2 Hydraulic excavator (SOLAR015) equipped with PVC and inclinometer sensors



Fig. 3 Proportional valve control system

3. 실험환경

실험에 사용된 유압굴삭기는 Fig. 2 에서 보듯이 스윙, 붐, 암 그리고 버킷의 4 가지 기본 동작을 가진 SOLAR015 의 1.5 톤 급 모델이며 이를 바탕으로 유압굴삭기를 제어하기 위한 시스템을 구축하였다. SOLAR015 는 기본적인 유압 굴삭기로 전기 신호를 통한 제어를 할 수 없기에 밸브를 개조 해야 한다. 밸브는 Fig. 3 와 같이 비례제어 밸브를 장착하였고 붐, 암의 각도를 알기 위해 경사계를 장착하였다. [3]

링크의 각도 정보를 PC 가 받고 이를 제어하기 위해 붐과 암에 각각 경사계 3 개를 장착하였는데 암의 각도를 위해서는 경사계가 2 개가 필요하다. 그 이유는 붐의 진동을 다른 경사계로 읽어서 진동을 상쇄시키기 위함이다. 경사계는 아날로그 입력 전압에 따른 붐과 암의 각도 변화를 측정할 수 있도록 되어 있는데 실험에 사용된 센서는 Microstrain 사의 FAS-A 제품이다. 아날로그 신호를 받고 명령을 주는 것은 NI DAQ 6024E 보드를 이용하였다. [4]

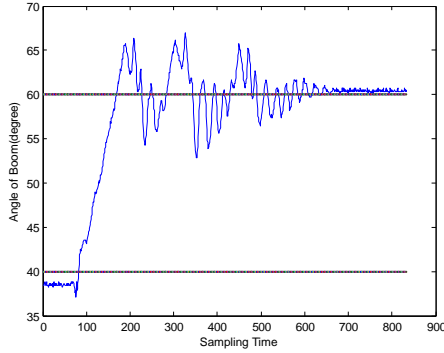


Fig. 4 Angle of Boom with PI control

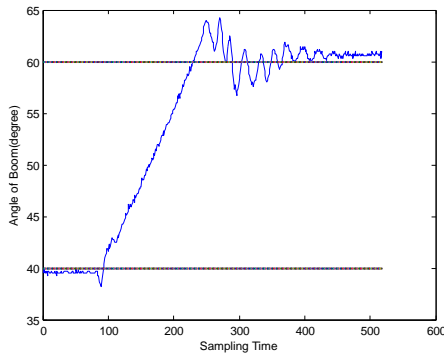


Fig. 5 Angle of Boom with PI anti windup control

4. PI anti windup 적용 결과

실험은 암과 붐 각각을 PI 컨트롤만 한 경우와 PI anti windup 컨트롤을 한 경우로 나누어서 실시하였다. 붐의 경우 지평선과 40 도의 각도에서 60 도로의 각도로 움직이도록 Control Reference 값을 설정하였고, P 컨트롤과 I 컨트롤 Gain 은 모든 실험에서 동일하게 설정하였다.

Fig. 4 는 PI 컨트롤만 한 붐의 각도를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. Overshoot 은 65 도가 넘고 Settling Time 은 600(Sampling time)이 넘는다. Overshoot 뿐만 아니라 심한 진동이 생기는 것은 붐의 움직임을 경사계가 실시간으로 완벽하게 따라가 주기 못하기 때문에 생기는 현상으로 암은 2 개의 경사계를 사용함으로써 이러한 문제를 해결하였지만 붐은 그렇지 못하기 때문에 경사계가 조금 늦게 따라가서 Error 값을 측정하면 방향이 바뀌거나 컨트롤 값이 커져서 심한 진동이 생기기도 한다.

Fig. 5 는 PI anti windup 을 적용하여 붐의 각도를 측정 한 것으로 PI 컨트롤만 했을 때보다 Overshoot 이 현저히 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 PI 컨트롤 값을 특정 범위 안에서 스위칭함으로써 누적되는 Integration 값을 줄여주어서 진동 및 Overshoot 이 작아지게 된 것이다.

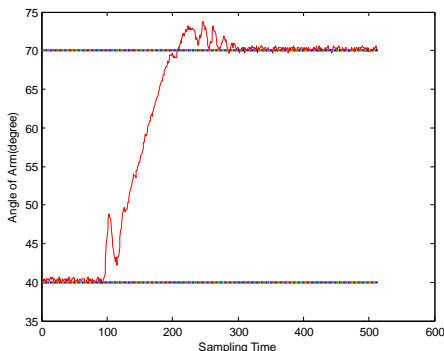


Fig. 6 Angle of Arm with PI control

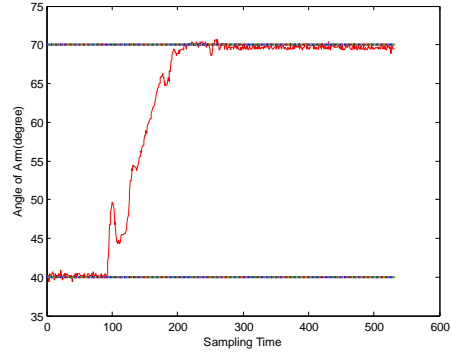


Fig. 7 Angle of Arm with PI anti windup control

Arm 을 컨트롤하는 실험은 붐과 40 도를 이루는 각도에서 70 도로 움직이도록 Control Reference 값을 설정하였고, P 컨트롤과 I 컨트롤 Gain 은 모든 실험에서 동일하게 설정하였다.

Fig. 6 은 PI 컨트롤만 한 암의 각도를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 Overshoot 는 74 도 이고 Settling Time 은 300(Sampling time)이다. 붐에 비해서 PI 컨트롤 만으로도 결과가 양호해 보이는 것은 암의 길이가 짧고 경사계를 추가해서 진동 등을 보정해 주었기 때문이다.

Fig. 7 은 PI anti windup 을 적용하여 암의 각도를 측정 한 것으로 Overshoot 은 완전히 줄어들었고 Settling Time 은 조금 작아졌다. 빠른 응답은 Error 값이 초기에는 크기 때문에 빨리 Reference 값을 따라갈 수 있게 P 컨트롤 만 하였기 때문이다. 또한, 일정 조건에 도달하면 I 컨트롤을 시작해서 Overshoot 을 현저히 줄일 수 있었다.

5. 결론

지능형 굴삭기를 컨트롤함에 있어 가장 중요한 것은 원하는 위치로 빠르고 정확하게 이동시키는 것인데 PI 컨트롤만 해서는 부족하다는 것을 확인했다. 큰 Overshoot 과 적분기 누적으로 인한 응답시간 지연은 굴삭기를 제어하는데 문제가 되지만 PI anti windup 컨트롤을 하면서 이를 개선할 수 있음을 보았다. 현재는 각 Hydraulic cylinder 만 컨트롤 했지만 향후에는 Kinematics 및 Dynamics 를 통해 전체 굴삭기 시스템을 PI anti windup 을 이용하여 컨트롤할 수 있을 것으로 기대한다.

후기

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(06첨단융합 C01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. C. Bohn and D. P. Atherton, "An analysis package comparing PID anti-windup strategies" IEEE Control Systems Magazine, April, pp.34~40, 1995
2. H. B. Shin, "New anti-windup PI controller for Electronics, vol.48,no.2, April, pp.442-451, 1995
3. Chiang, M. -H., Huang, C. -C., "Experimental Implementation of Complex Path Tracking Control for Large Robotic Hydraulic Excavators," Int. Adv. Manuf. Technol., 23, 126-132, 2004.
4. Kim, D., Oh, K. W., Hong, D., Park, J. -H., Hong, S., "Design and Simulation of A Haptic Device for Excavator with Phantom 1.5," Asian Symposium for Precision Engineering and Nanotechnology, 133-138, 2007.