

필드로봇의 궤적 추종에 대한 강인제어

최종환*(부산대 대학원 지능기계공학과), 김승수(울산대 RRC),
양순용, 이병룡, 안경관(이상 울산대 기계자동차공학부), 이진걸(부산대 기계공학부)

Robust Control for Trajectory Tracking Control of Field Robot

J. H. Choi(Intel. & Mecha. Eng. Dept., PNU), S. S. Kim(RRC, UOU), S. Y. Yang, B. R. Lee, K. K. Ahn
(Mecha-Auto. Eng. Dept., UOU) and J. G. Lee(Mechanical Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

The Field Robot means the machinery applied for outdoor tasks in construction, agriculture and undersea etc. In this paper, to field-robotize a hydraulic excavator, we have proposed a robust and systematic controller design method. Disturbance observer is used as inner controller to reshape the excavating system into the linear dynamics of nominal model by compensating coupled nonlinear terms, model uncertainties and external load variations. Using the linear model that is obtained through off-line system identification, a H_∞ control scheme is applied to construct a disturbance observer and a servo-controller systematically.

Key Words : Field Robot(필드 로봇), Excavator(굴삭기), Trajectory Tracking Control(궤적추종 제어), Disturbance Observer(외란 관측기), H_∞ Control (H_∞ 제어)

1. 서론

필드 로봇은 건설, 임업, 농업, 해저 등 다양한 육외 작업에서 인간을 대신하여 위험하거나 반복적이고 힘든 일을 수행 할 수 있는 기계이다. 특히, 건설 현장에서 많이 사용되는 유압 굴삭기는 기계 자체가 갖는 기구학적 유연성과 유압 구동기를 이용한 고출력 때문에 그 역할이 점차 확대되고 있으며, 지능적인 메카트로닉스 기계로 발전되고 있다. 이에 따라, 다양한 작업이 가능한 굴삭기의 자동화 및 지능화에 따른 필드 로봇화에 대한 연구가 적극 진행되고 있다.

다관절 링크를 가진 로봇 매니퓰레이터로 여겨지는 굴삭기의 작업부는 링크간 상호 작용하는 연성, 운동 위치에 따라 기구학적 및 역학적 관계 파라미터들이 변하는 시변성 등을 포함하며, 작업부를 구동하는 유압부 역시 밸브의 개구 특성, 기름의 압축율 등 정확히 추정하거나 묘사하기 힘든 비선형적 파라미터들이 존재한다. 굴삭기의 자동화를 위해서는 선형모델에 포함되지 않는 비선형적 요소 및 외부의 외란에 대한 강인성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 외란 관측기에 근거한 H_∞ 제어 이론을 이용한 개선된 궤적 추종 제어기를 제안한다. On-line 과 off-line에서 시스템 규명법을 적용하여 실제 플랜트를 제어기 설계를 위한 선형모델로 근사시킨다. 근사된 선형모델을 기초로 모델링 오차와 외란을 보상하도록 H_∞ 제어이론을 이용한 외란 관측기와 서보 제어기를 설계하도록 한다. 또한, 제안된 제어기를 굴삭기 작업장치의 수평 및 경사 직선 운동에 적용하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 유용성을 검토한다.

2. 굴삭기의 모델링

2.1 굴삭기 유압부의 모델링

굴삭기의 작업부를 구동시키는 유압부는 유압펌프, 주 제어밸브(MCV), 비례제어밸브, 유압 실린더 및 여러 가지 보조밸브 등으로 구성되어진다. Fig. 1은 굴삭기 유압 회로의 개략적인 구성을 나타내며, 블, 암, 버켓 모두 동일한 구조를 갖는다.

베르누이의 식에 의해 유압 실린더로 들어가는 유량은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$qb = \begin{cases} CdSbh\alpha\sqrt{2(P_h - p_b)/\rho}, & (\alpha \geq 0) \\ CdSbh\alpha\sqrt{2(p_b - P_0)/\rho}, & (\alpha < 0) \end{cases}$$

$$ql = \begin{cases} -CdSbh\alpha\sqrt{2(p_l - P_0)/\rho}, & (\alpha \geq 0) \\ -CdSbh\alpha\sqrt{2(P_h - p_l)/\rho}, & (\alpha < 0) \end{cases} \quad (1)$$

여기서, α 는 벨브 스플의 개도($-1 \leq \alpha \leq 1$), ρ 와 C_d 는 작동유 밀도 및 오리피스 유량계수, S_{bh} 와 S_{hl} 는 고압측 공급부 및 저압측 복귀부 개구면적, S_{bl} 와 S_{ll} 는 저압측 공급부 및 고압측 복귀부 개구면적, P_h 와 P_0 는 펌프 공급 압력(일정) 및 귀환 압력, p_b 와 p_l 는 실린더 헤드측 및 로드측 압력 등을 각각 나타낸다.

유압 실린더의 압력-유량 특성은 식(2)와 같다.

$$\begin{cases} \dot{p}_b = \frac{K_b}{v_b(\theta)}(qb - Ab\dot{h}(\theta)) \\ \dot{p}_l = \frac{K_l}{v_l(\theta)}(ql + Al\dot{h}(\theta)) \end{cases} \quad (2)$$

여기서, K 는 작동유의 체적 탄성 계수, $\dot{h}(\theta)$ 는 실린더 길이의 변화율, A_b 와 A_l 는 실린더 헤드 및 로드측 단면적, $v_b(\theta)$ 와 $v_l(\theta)$ 는 실린더 헤드 및 로드측 체적 등을 각각 나타낸다.

한편, 실린더에 발생하는 힘은 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$F = Abp_b - Alp_l - Dh \quad (3)$$

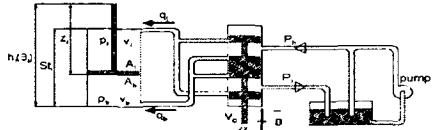


Fig. 1 Schematic diagram of hydraulic circuit

2.2 굴삭기 작업부의 모델링

Fig. 2에 굴삭기 작업부에 대한 운동 좌표계와 각 링크의 파라미터들을 나타내고 있다. m , I 는 각각 링크들의 질량 및 관성 모멘트를 나타내며, θ 는 링크들의 각변위, g 는 중력 가속도, L , l 와 δ 등은 그림에서 표시된 바와 같이 각각 길이 및 각도 상수들이다. 아래 첨자 1, 2, 3은 각각 봄, 암, 버켓을 의미한다.

굴삭기 작업장치의 운동방정식을 Lagrange 방정식을 사용하여 유도하면 다음과 같다.

$$J(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) = \tau \quad (4)$$

여기서, $J(\theta)$ 는 관성항으로써 대칭인 양의 한정행렬이며, $h(\theta, \dot{\theta})$ 는 코리올리력과 원심력에 의한

항, $g(\theta)$ 는 중력항, τ 는 작업부 링크들에 공급되는 토크를 각각 나타낸다.

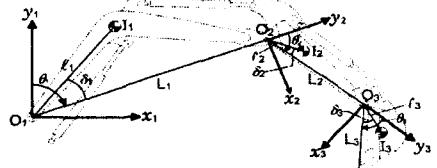


Fig. 2 Schematic diagram of excavator attachment

3. 외란 관측기에 근거한 H_∞ 제어기

외란 관측기는 로봇 시스템의 장인성 향상과 힘제어 및 위치 제어시 알고리즘을 단순화하기 위하여 사용되어져 왔다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 외란 관측기는 역공칭모델과 장인성과 외란 제거 성능을 보장하는 설계계수 Q 로 이루어져 있다. 기본 개념은 시스템으로 들어오는 외란이 계측될 수 없다고 하더라도 관측기에 의하여 보상되어진다. Fig. 3에 나타난 추정된 외란 \hat{d} 는 식(5)와 같이 표현된다.

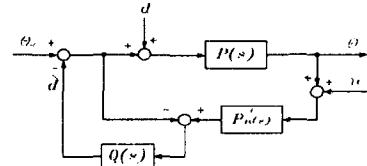


Fig. 3 Structure of the disturbance observer

$$\hat{d} = Q P_n^{-1} (P - P_m)v + Q P_n^{-1} n + Q P_n^{-1} P d \quad (5)$$

여기서 P 는 실제 플랜트, P_m 은 공칭 모델, n 은 센서 노이즈, d 는 외란, Q 는 저역통과 필터를 각각 나타낸다. 만약 공칭모델이 실제 플랜트와 같고 센서 노이즈가 없다고 하면, 추정된 외란은 실제 외란은 일치하게 될 것이다. 또한 실제 플랜트의 동특성은 추정된 외란에 의하여 저역 주파수에서 공칭모델의 동특성과 일치하게 된다. 이것은 외란 관측기의 제어기는 저역 통과 필터 Q 를 설계하므로써 모델의 불확실성을 보상할 수 있다.

3.1 선형화된 공칭모델

본 연구에서는 H_∞ 제어이론을 기초한 장인 제어기 Q 를 설계하기 위하여 on-line 과 off-line에서 실제 굴삭기 시스템을 시스템 규명법을 적용하여 선형모델로 근사한다. 시스템 규명법을 위한 입력 전기신호는 작업부의 작동영역을 최대한 포함하고 유압 실린더의 포화가 발생하지 않는 조건에서 이중 스텝 입력을 가하였다. 또한, 작업부의 자세변화에 따른 동특성의 변화를 고려하여 각 링크의 관성부하를 최대와 최소로 하여 실험을 수행하였다

Fig. 4 는 봄의 7 차 ARX 규명 모델의 결과를 나타낸다. 여기서 실선은 실험으로 측정된 출력 데이터에서 잡음 등이 필터링 된 후의 데이터이며, 점선은 규명 모델에 대하여 실험과 동일한 입력을 가했을 때의 출력이다. 한편, 암과 버켓에 대해서도 각각 8 차와 10 차 ARX 모델로 규명하였다. 다음으로, 이산시간 시스템으로 표현된 규명 모델을 연속시간 시스템으로 변환하고, 제어기 설계의 간편성을 위해 Hankel norm reduction 을 수행하였으며, 이 때 저주파역 축소오차를 고려하여 봄, 암, 버켓의 전달함수를 모두 2 차 선형모델로 근사하였다. 각 근사된 선형모델은 다음과 같다.

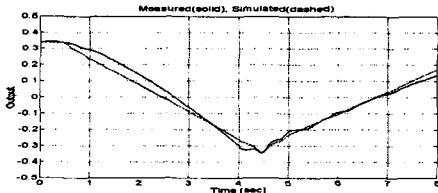


Fig. 4 Identification result of 7th ARX model of boom

$$\text{봄} : P_{h_b}(s) = \frac{5.4}{s^2 + 15s + 0.04}$$

$$\text{암} : P_{h_a}(s) = \frac{5}{s^2 + 10s + 0.5}$$

$$\text{버켓} : P_{h_k}(s) = \frac{16}{s^2 + 34s + 0.8}$$

3.2 H_∞ 제어기 설계

H_∞ 제어이론에서 안정화 제어기를 설계하기 위하여 가중함수가 포함된 일반화 플랜트를 구성한다. Fig. 5 는 가중함수와 외란 관측기의 구조를 포함시킨 일반화 플랜트를 나타내고 있다. 일반적으로 외란의 주파수 특성은 개인안정한 가중함수 $W_1 \in RH_\infty$ 로 모델되어지고 제어입력의 구속조건은 $W_2 \in RH_\infty$ 의 적절한 선정으로 한정되어진다. 이것은 단지 봄의 제어에 한정하며, 암과 버켓의 제어 과정은 생략한다. 봄의 공칭모델 P_h 은 시스템 규명과 모델 차수 저감에 위한 입력 전류와 출력인 각도와의 전달함수이다. 개인안정한 가중함수 W_1 은 봄의 주파수 특성에 의하여 선정되어진다. 각 링크에 대한 안정화 제어기 Q 의 전달함수는 다음과 같다.

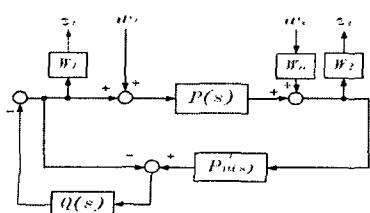


Fig. 5 A generalized plant model for control design

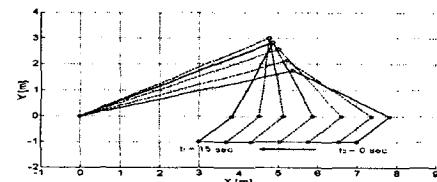
$$Q_b(s) = \frac{5.4s^4 + 2.54 \times 10^2 s^3 - 2.767 \times 10^4 s^2 - 4.687 \times 10^5 s - 3.612 \times 10^5}{-s^6 - 6.263 \times 10^5 s^5 - 1.664 \times 10^3 s^4 - 2.444 \times 10^4 s^3 - 1.867 \times 10^5 s^2 - 5.241 \times 10^5 s - 3.61 \times 10^5}$$

$$Q_a(s) = \frac{5s^4 + 4.6 \times 10^2 s^3 - 3.09 \times 10^4 s^2 - 3.764 \times 10^5 s - 4.303 \times 10^5}{-s^6 - 1.03 \times 10^2 s^5 - 2.59 \times 10^3 s^4 - 2.91 \times 10^4 s^3 - 1.643 \times 10^5 s^2 - 4.447 \times 10^5 s - 4.303 \times 10^5}$$

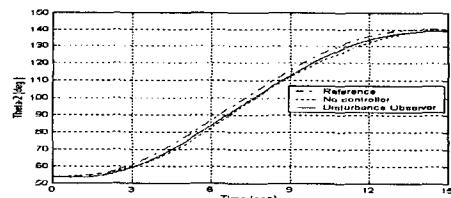
$$Q_k(s) = \frac{1.6 \times 10s^4 + 2.128 \times 10^3 s^3 - 6.544 \times 10^4 s^2 - 4.128 \times 10^6 s - 5.014 \times 10^6}{-s^6 - 1.679 \times 10^2 s^5 - 8.99 \times 10^3 s^4 - 1.914 \times 10^5 s^3 - 1.514 \times 10^6 s^2 - 4.807 \times 10^6 s - 5.015 \times 10^6}$$

4. 시뮬레이션 결과

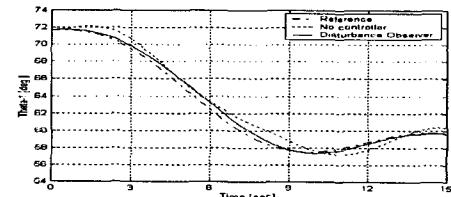
외란 관측기에 근거한 H_∞ 제어기를 이용하여 굴삭기 작업부의 일정각 굴삭 작업에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에서는 5 차 다항식을 통해 버켓 끝단에 대한 궤적계획을 생성하였으며, 이 때 봄과 암의 궤적은 기구학적 구속에 의해 결정된다. 궤적계획은 버켓 단의 수평 직선운동과 경사 직선운동 두 가지를 고려하였다. 수평 궤적의 경로는 Fig. 6(a)와 같이 15sec 동안 바깥에서 안쪽으로 이동거리 4m로 하였으며, 경사 궤적 경로는 Fig. 7(a)와 같이 바깥쪽 아래에서 안쪽 위로 수



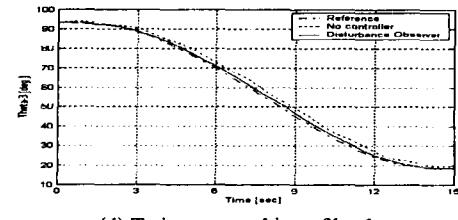
(a) Horizontal excavation task



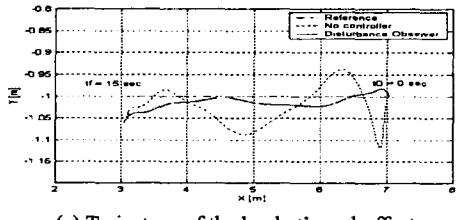
(b) Trajectory tracking of boom



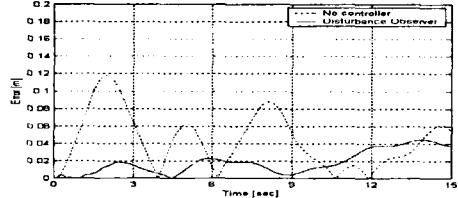
(c) Trajectory tracking of arm



(d) Trajectory tracking of bucket



(e) Trajectory of the bucket's end-effector



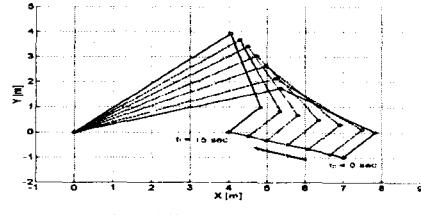
(f) Absolute error of the reference trajectory
Fig. 6 Tracking of the horizontal trajectory

평거리 3m, 수직거리 1m로 하였다. 외란 $d(t)$ 는 봄, 암, 버켓에 대하여 각각 $4\sin(t)$, $2\sin(t)$, $2\sin(3t)$ 로 선정하였다. Fig. 6(b)~(d)는 수평 직선 운동에 대한 봄, 암, 버켓에 대한 각변위의 추종 성능을 나타낸다. 시뮬레이션의 초기 시간과 마지막 시간에서 각 링크의 각속도는 zero이다. Fig. 6(e)와 Fig. 7(b)는 수평 직선 및 경사 직선 궤적 계획에 의한 버켓 끝단의 목표 궤적 추종 성능을 나타내고 있다. 또한 Fig. 6(f)와 Fig. 7(c)는 목표 궤적과 제안된 외란 관측기에 근거한 H_∞ 제어기와 PI 제어기를 사용한 궤적과의 절대오차를 나타내고 있다. PI 제어기와 비교하여 제안된 제어기의 사용으로 궤적 추종 성능이 향상됨을 보여준다.

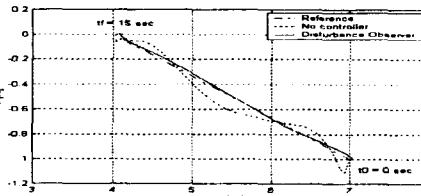
5. 결 론

본 연구는 굴삭기 작업부의 궤적 추종제어를 위하여 시스템 규명을 바탕으로 외란 관측기를 근거로 한 H_∞ 제어기를 제안하였다.

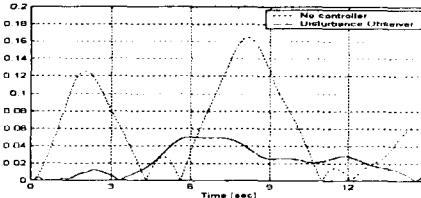
- 1) 굴삭기의 유압부와 작업부에 대하여 각각 수학적 모델링을 수행하고, 굴삭기 전체 시스템에 대한 운동방정식을 유도하였다.
- 2) 실제 굴삭기에 대한 실험 및 시스템 규명법을 적용하여 시스템의 주요 동특성을 반영하는 선형 모델을 수립하고 이 모델을 기초로 하여 내부 안정성이 보장되는 외란 관측기의 구조를 가지는



(a) Oblique excavation task



(b) Trajectory of the bucket's end-effector



(c) Absolute error of the reference trajectory

Fig. 7 Tracking of the oblique trajectory

H_∞ 제어기를 설계하였다.

- 3) 굴삭기 작업부의 일정각 굴삭 작업에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 PI 제어기와 비교하여 제안된 H_∞ 제어기의 뛰어난 궤적 추종 성능을 검증하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부-한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성 평가 연구 센터 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. T. Morita, Y. Sakawa, "Modeling and Control of a Power Shovel", vol. 22, no. 1, pp. 69-75, 1986
2. T. Yoshimura, K. Etokoro, "A Simulation Study of Leveling Control by Hydraulic Shovels", Journal of JSME(C), vol. 58, no. 554, 1992(in Japanese).
3. S. Stogestad, I. Postlethwaite, Multivariable Feedback Control Analysis and Design, John Wiley & Sons, 1996.
4. Y. J. Choi, W. K. Chung and Y. G. Youm, "Disturbance Observer in H_∞ Frameworks", IEEE, pp. 1394-1396, 1996