

적응제어 및 시스템 규명을 이용한 Field Robot의 궤적 추종 제어

서우석*(울산대 대학원 자동차공학과), 김승수(울산대 지역협력 연구센터),
양순용, 이병룡, 안경관(울산대 기계자동차공학부)

Trajectory Tracking Control of Field Robot using Adaptive Control and System Identification

W. S. Seo(Automotive Eng. Dept., UOU), S. S. Kim(RRC, UOU),
S. Y. Yang, B. R. Lee, K. K. Ahn(School of Mech-Auto. Eng., UOU)

Abstract

The Field Robot means the machinery applied for outdoor tasks in construction, agriculture and undersea etc. In this study, to field-robotize a hydraulic excavator that is mostly used in construction working, we have developed an automatic excavation system and adaptive control system. A model-reference adaptive controller has been designed on the model that is obtained through off-line System Identification. It is illustrated by computer simulations that the proposed control system gives good performances in the trajectory tracking control and adaptation to parameter variation.

Key words: Field Robot, excavator, system identification, adaptive control, trajectory tracking

1. 서론

필드 로봇(Field Robot)은 건설, 임업, 농업, 해저 등 다양한 옥외 작업에서 인간을 대신하여 위험하거나 반복적이고 힘든 일을 수행 할 수 있는 것을 의미한다. 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.[1]-[6]

굴삭기의 작업장치는 일종의 다관절 링크를 가진 로봇 매니퓰레이터로 간주될 수 있다. 다관절 기구부의 동특성에는 링크간 상호 작용하는 연성, 그리

고 운동 위치에 따라 기구학적 및 역학적 관계 파라미터들이 변하는 시변성 등을 포함한다. 한편, 작업장치를 구동하는 유압부 역시 밸브의 개구 특성, 기름의 압축을 등에서 정확히 추정하거나 묘사하기 힘든 비선형적 파라미터들이 존재한다. 따라서, 굴삭기 시스템에 대한 정확한 수학적 모델 구축은 물론, 이론적 해석을 통한 제어이론의 조직적 적용 및 설계가 어렵다. 한편, 작업환경에 따라 외란이 다양하게 변하고, 제어입력 영점 좌우의 특성이 상이하여 산업현장에서 많이 이용되고 있는 PID 제어기의 적용에도 어려움이 있다. 따라서, 굴삭기 작업장치를 임의의 궤적에 추종시키기 위해서는 파라미터 및 외부환경(부하) 변동에 둔감한 강인제어가 요구된다.

적응제어(adaptive control)는 제어기의 파라미터들이 가변이며, 플랜트의 출력신호를 바탕으로 하여 실시간(on-line)으로 제어 파라미터들을 조절하는 메카니즘을 갖는다. 따라서, 적응제어는 불확실한 시스템 또는 시변 시스템을 다루기 위한 접근법으로서, 운동방정식의 구조는 알려져 있으나 미지 또는 천천히 변하는 플랜트 파라미터를 가진 시스템에 흔히 적용된다.

본 연구에서는 굴삭기 시스템의 불확실성 및 시변성을 고려하여, 모델 기준 적응제어(model reference adaptive control) 기법을 적용한다. 이때, 제어기의 조직적 설계를 위해 실험 및 시스템 규명(system identification)법을 통한 근사 선형 모델을 유도한다. 그리고, 이 설계 모델에 기초하여 상태 피드백 구조를 갖는 병렬 모델 기준 적응제어를 설계한다. 마지막으로, 제안된 적응제어 기법

$$\begin{cases} \dot{p}_b = \frac{1}{\beta v_b(\theta)}(q_b - A_b \dot{h}(\theta)) \\ \dot{p}_l = \frac{1}{\beta v_l(\theta)}(q_l + A_l \dot{h}(\theta)) \end{cases} \quad (4)$$

여기서 β : 작동유의 압축율

$h(\theta)$: 실린더 길이 변화율

A_b, A_l : 실린더 헤드 및 로드측 단면적

$v_b(\theta), v_l(\theta)$: 실린더 헤드 및 로드측 체적

한편, 실린더에 발생하는 힘 F 는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$F = A_b p_b - A_l p_l - D \dot{h} \quad (5)$$

여기서, D 는 실린더의 점성 마찰계수이다. 따라서, 식(5)를 미분하여 식(3)과 식(4)를 대입하면 유압 시스템의 방정식은 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{F} = & \left(\frac{A_b}{\beta v_b(\theta)} f_b(p_b) - \frac{A_l}{\beta v_l(\theta)} f_l(p_l) \right) \alpha \quad (6) \\ & - \left(\frac{A_b^2}{\beta v_b(\theta)} + \frac{A_l^2}{\beta v_l(\theta)} \right) \dot{h} - D \dot{h} \end{aligned}$$

3. 제어기 설계를 위한 시스템 규명

2장에서 유도된 굴삭기의 수학적 모델은 비선형성과 링크간 연성 그리고 실제 불확실한 파라미터 등으로 제어기 설계를 위한 모델로는 적합하지 않으며, 이는 본 논문에서 시뮬레이션을 위한 모델로만 이용된다. 한편, 시스템 규명(system identification)은 실제 플랜트에 적당한 입력과 이에 대응한 출력 신호의 데이터로부터 시스템의 주 동특성을 해석하는 방법이다. 시스템 규명법을 이용하여 굴삭기 시스템에 대한 근사 선형 모델을 얻을 수 있다면 다양한 제어 이론을 이용한 조직적인 제어기 설계가 가능하다. 따라서, 본 논문에서는 시뮬레이션 모델과는 별도로 실험을 통해 굴삭기 시스템의 동특성을 규명한다.

3.1 실험방법 및 실험결과

시스템 규명을 위한 입력 전기신호는 작업장치의 작동영역을 최대한 포함하고 유압 실린더의 포화(saturation)가 발생하지 않는 조건에서 그림 4(a)와 같은 이중 스텝 입력을 가하였다. 또한, 작업장치의 자세변화에 따른 동특성의 변화를 고려하여 각 링크의

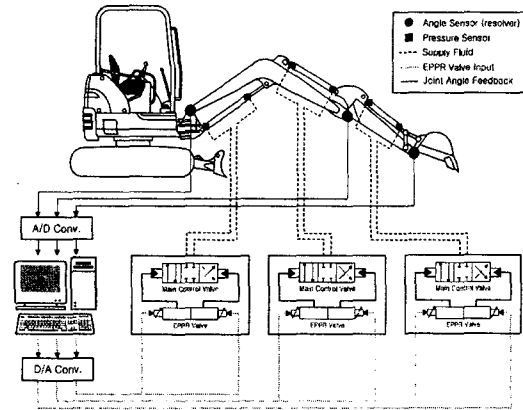


Fig. 3. Experimental apparatus for system ID

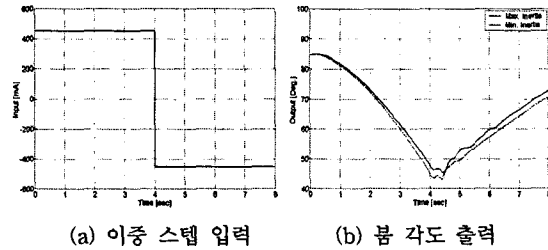


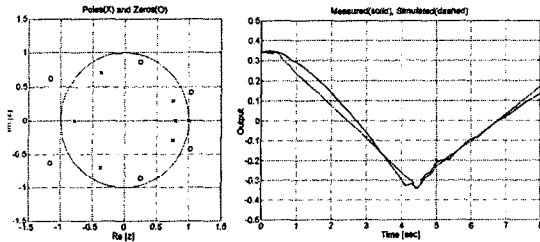
Fig. 4. Input/output of ID experiment of boom

관성부하를 최대와 최소로 하여 실험을 수행하였다. 붐의 규명 실험에서는 압과 버킷 모두를 최대한 펼친 경우를 최대 관성, 굽힌 경우를 최소 관성 조건으로 하였으며, 압의 경우는 붐과는 상관없이 버킷의 최대 펼침 및 굽힘으로 관성의 변화를 주었다. 버킷은 말단 링크이므로 운동이 다른 링크의 자세와는 무관하다.

붐, 압, 버킷 각각에 대한 규명 실험 중 여기서는 붐에 대한 실험 입출력 데이터만을 그림 4에 나타낸다. 그림 4(b)에서 실선과 점선은 붐에 대한 관성 모멘트가 각각 최대와 최소일 때의 출력을 나타낸다. 압과 버킷에 대한 규명 실험도 붐과 동일한 방법으로 수행하였으며, 시스템 규명을 위한 알고리즘은 MATLAB의 System Identification Toolbox를 이용하였다.

3.2 시스템 규명에 의한 근사 선형 모델

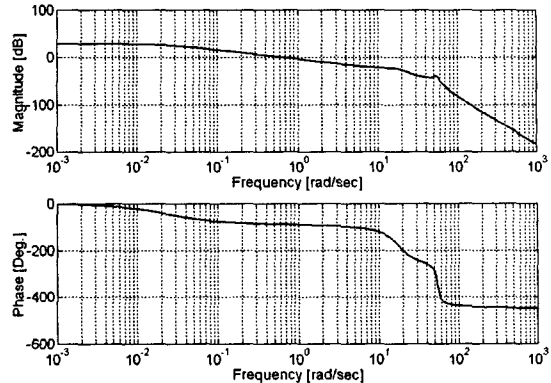
그림 5는 붐(최대 관성 조건)의 7차 ARX(Auto Regressive eXogeneous) 규명 모델의 결과를 나타낸다. 그림 5(a)는 규명 모델의 극점과 영점을 나타내고 있으며, 그림 5(b)는 규명 모델에 대한 시간역 시뮬레이션 결과이다.



(a) 극점, 영점(z-영역) (b) 플랜트(실선), 규명모델(점선)
Fig. 5. ID results of ARX model of Boom

여기서, 실선은 실험으로 측정된 출력 데이터에서 잡음 등이 필터링 된 후의 데이터이며, 점선은 규명 모델에 대하여 실험과 동일한 입력을 가했을 때의 출력이다. 한편, 압과 버킷에 대해서도 각각 8차와 10차 ARX 모델로 규명하였다.

다음으로, 이산시간 시스템으로 표현된 규명 모델을 연속시간 시스템으로 변환하고, 제어기 설계의 간편성을 위해 Hankel norm reduction을 수행하였으며, 이 때 저주파역 축소오차를 고려하여 붐, 압, 버킷의 전달함수를 모두 5차 선형모델로 근사하였다. 그림 6은 붐, 압, 버킷에 대해 시스템 규명 및 차수 줄임을 통해 얻은 5차 전달 함수에 대한 보드 선도(Bode diagram)들을 나타낸다.



(c) 버킷의 5차 전달함수

Fig. 6. Bode diagram of transfer functions of ID models

한편, 그림 6(a), (b)에서 보이는 바와 같이 붐과 압의 관성 부하가 최대일 경우(실선)와 최소인 경우(점선)에 대하여 대략 7 rad/sec 이하의 주파수 영역에서는 관성 부하의 변화에 따른 규명 모델의 주파수 특성이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는, 저주파 영역에서 동작하는 굴삭기 작업장치들의 특성을 고려하면, 붐과 압의 규명 모델은 두 가지 실험조건(최대관성 및 최소관성)의 규명 결과 중 적절히 선택될 수 있음을 의미한다. 본 논문에서는 붐, 압, 버킷의 규명 모델을 각각 식(11)~(13)과 같이 구하였다.

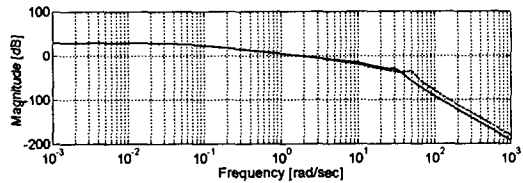
$$G_b(s) = \frac{836900}{s^5 + 43s^4 + 2998s^3 + 92200s^2 + 49200s + 26230} \quad (11)$$

$$G_a(s) = \frac{1154000}{s^5 + 20s^4 + 11420s^3 + 70340s^2 + 228400s + 251800} \quad (12)$$

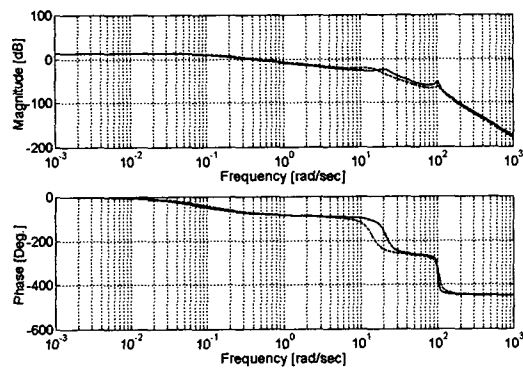
$$G_k(s) = \frac{594900}{s^5 + 19s^4 + 3372s^3 + 39300s^2 + 95050s + 22630} \quad (13)$$

4. 적응제어기 설계

적응제어 시스템은 일반적으로 미지 또는 시변 파라미터를 포함하고 있는 플랜트, 요구되는 페루프 제어 시스템을 간결하게 묘사한 기준 모델, 조정 가능한 제어 파라미터들을 포함하는 피드백 제어법칙 그리고 이들 파라미터들을 갱신하기 위한 적응 메카니즘으로 구성된다.



(a) 붐의 5차 전달함수 : 최대관성(실선), 최소관성(점선)



(b) 압의 5차 전달함수 : 최대관성(실선), 최소관성(점선)

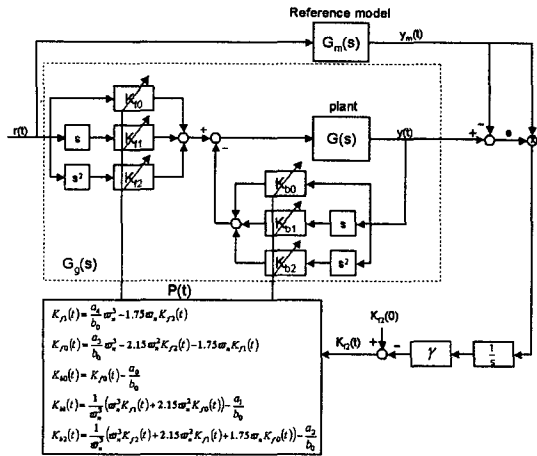


Fig. 7. Structure of model reference adaptive controller

그림 7은 본 논문에서 제안한 상태 피드백 제어 법칙을 갖는 모델 기준 적응제어기(MRAC)의 구조를 나타낸다.

기준 입력 $r(t)$ 는 궤적 계획에 의해 위치, 속도, 가속도 값으로 기준 모델과 플랜트에 동일하게 입력되고, 플랜트의 출력 $y(t)$ 는 굴삭기 작업장치의 위치, 속도, 가속도 값으로 피드백 된다.

한편, 적응제어기 설계를 위한 굴삭기 시스템의 설계모델을 3장에서 구한 시스템 규명 결과에 의해 식(14)와 같이 다시 표현한다.

$$G(s) = \frac{b_0}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (14)$$

여기서, $a_i, b_0 : constants \quad (i = 0 \sim 5)$

이 때, 그림 7의 적응제어 시스템 구조에서 설계모델과 상태 제어기를 포함하는 페루프 전달함수 $G_g(s)$ 는 식(15)와 같이 구해진다.

$$G_g(s) = \frac{b_0(K_0 + K_1 s + K_2 s^2)}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + (a_2 + b_0 K_3) s^2 + (a_1 + b_0 K_4) s + a_0 + b_0 K_0} \quad (15)$$

다음으로, 기준모델 $G_m(s)$ 은 ITAE(Integral of the Time multiplied by the Absolute value of the Error)의 기준에 따라 선정하였다. 한편, 식(15)로 주어진 페루프 전달함수는 5개의 극점과 2개의 영점(zero)을 가지는 바, 이는 적당한 3차 전달함수로 근사 될 수 있기 때문에 본 논문에서는 기준 모델로서 식(16)으로 표현되는 3차 ITAE 모델을 사용하였다.

$$G_m(s) = \frac{\omega_n^3}{s^3 + 1.75 \omega_n s^2 + 2.15 \omega_n^2 s + \omega_n^3} \quad (16)$$

한편, 모델 기준 적응제어 시스템은 동일한 기준 입력에 대하여 실제 페루프 시스템의 출력이 기준 모델의 출력에 잘 추종될 것을 요구한다. 따라서, 실제 페루프 시스템을 대신하여 식(15)로 표현된 페루프 전달함수 $G_g(s)$ 가 기준모델 전달함수 $G_m(s)$ 와 같도록 제어 파라미터들을 선정하였다. 즉, $G_g(s) = G_m(s)$ 이면, 6개의 제어 파라미터들은 식(17)의 관계로 유도된다.

$$\begin{cases} K_2 = \frac{a_5}{b_0} \omega_n^3 \\ K_i, K_{bi} = f_i(K_2, \dots), \quad i = 0, 1, 2 \end{cases} \quad (17)$$

위 식의 의미는 K_2 가 우선 정해지면, 나머지 제어 파라미터 $K_0, K_1, K_3, K_4, K_{bi}$ 는 순차적으로 계산됨을 나타낸다. 이 때, 제어파라미터 K_2 의 적응법칙은 경사 추정법(gradient estimation)을 이용하였으며, 다음과 같이 표현된다.

$$K_2(t) = K_2(0) - \gamma \int_0^t e y_m dt \quad (18)$$

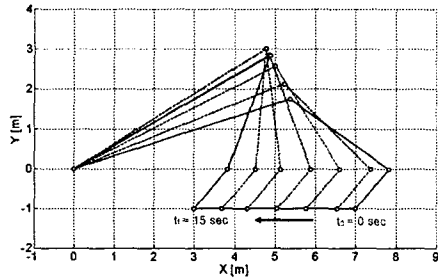
여기서, 적응오차 e 는 플랜트와 기준모델과의 출력오차이며, 적응 계인 γ 는 적당한 양의 상수이다.

5. 시뮬레이션 및 고찰

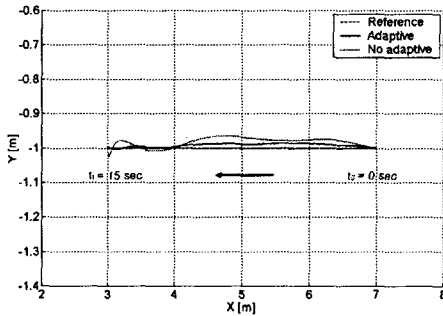
제안한 적응제어기를 이용하여 굴삭기 작업장치의 일정각 굴삭 작업에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 기준 궤적(파선)에 대해 적응제어기가 작동되는 경우(실선)와 작동되지 않는 경우(점선)에 대해 각각 수행되었다. 이 때, 적응제어기가 작동하지 않은 경우는 6개의 제어 파라미터들이 초기값을 유지하는 경우를 가정한 것이다.

그림 8(b)와 그림 9(b)는 각각 수평 직선 및 경사 직선 궤적 계획에 의한 버킷 끝단의 목표궤적 위치 추종 성능을 보여주고 있다. 수평 굴삭시 적응제어는 단순 상태 피드백 제어(제어 파라미터 적용이 없는 경우)에 비해 오차를 50% 정도 감소시킬 수 있었다. 한편, 경사 굴삭시 적응제어는 적용이 없는 경우에 비해 80% 이상의 오차 감소율을 보였다. 이는 그림 8(a)와 그림 9(a)에서 알 수 있는 바, 경사 굴삭이 수평 굴삭에 비해 링크 길이가

가장 긴 붐의 각도 변화율이 크기 때문이며, 적응 제어의 효과도 크다. 이상의 시뮬레이션 결과를 통하여, 제안된 적응제어기법은 일정 계인 상태 피드백 제어에 비해 궤적 추종성능을 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

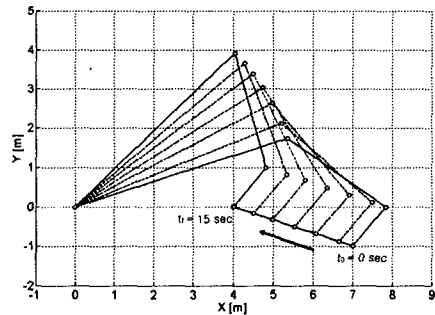


(a) 수평 굴삭 작업

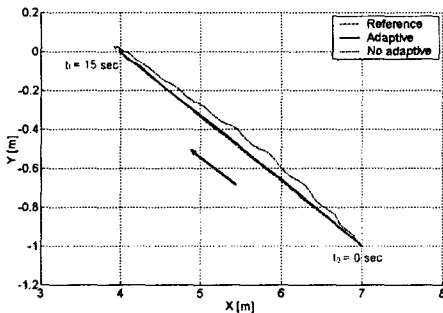


(b) 수평 굴삭 작업 시 버킷 끝단 궤적

Fig. 8. Tracking of horizontal trajectory



(a) 경사 굴삭 작업



(b) 경사 굴삭 작업 시 버킷 끝단 궤적

Fig. 9. Tracking of oblique trajectory

6. 결론

본 연구에서는 유압 굴삭기로 대표되는 필드 로봇의 궤적 추종 제어를 위해, 굴삭기 작업장치의 동역학 및 유압 특성을 분석하였다. 또한, 실제 굴삭기에 대한 실험 및 시스템 규명법을 이용하여, 시스템의 주요 동특성을 반영하는 5차 선형 전달 함수의 근사적인 설계모델을 구하였다. 시스템 규명을 통하여 얻은 근사 선형 모델을 기초로 하여 병렬 기준 모델을 갖는 적응제어기를 설계하였으며, 굴삭기의 수평 및 경사 직선 운동의 일정각 굴삭작업에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과, 목표 궤적에서 만족한 수준의 추종 오차를 실현할 수 있었고, 일정 계인 제어 기법에 비해 제안된 적응제어기의 뛰어난 성능을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 “ 과학기술부- 한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재특성평가 연구센터”의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] N. Kimura, H. Araya, M. Kakuzer, “Automatic control system for hydraulic excavator”, *Kobe Steel Engineering Report*, Vol.37, No.2, 1987.
- [2] H. Nakamura, A. Matsuzaki, “Automation in construction machinery”, *自立評論*, Vol.57, No.3, 1975.
- [3] 千葉, 竹田, “土木建設機械における自動制御”, *計測と制御*, 第21卷, 第8號, 1982.
- [4] T. Morita, Y. Sakawa, “Modeling and Control of a Power Shovel”, *計測自動制御學會論文集*, Vol. 22, No.1, 1986.
- [5] S. Y. Yang, M. C. Lee, M. H. Lee, S. Arimoto, “Measuring System for Development of Stroke- Sensing Cylinder for Automatic Excavator”, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 45, no. 3, pp.376-384, June, 1998.
- [6] W. S. Seo, S. S. Kim, S. Y. Yang, B. R. Lee, K. K. Ahn, “A Study on Trajectory Tracking Control of Field Robot”, *Proc. ICCAS*, pp. 2887- 2890, 2001.