

피드백 오차 학습법을 이용한 궤적추종제어

* 성 형 수, 이 호 길
(고려대 전기 공학과) (생산기술연구원)

ABSTRACT

To make a dynamic system a given desired motion trajectory, a new feedback error learning scheme is proposed which is based on the repeatability of dynamic system motion. This method is composed of feedforward and feedback control laws. A benefit of this control scheme is that the input pattern that generates the desired motion can be formed without estimating the physical parameters of system dynamics. The numerical simulations show the good performance of the proposed scheme.

Key words : feedback error learning scheme(피드백 오차 학습법), feedback control(피드백 제어), feedforward control(피드포워드 제어)

1. 서 론

동적 시스템의 정밀한 궤적추종을 위해서는 기존의 PID 피드백제어로는 고이득이 요구되나 하드웨어 실현의 제약⁽¹⁾ 등으로 인하여 제어가 어려우며, 또한 파라미터나 부하 변동으로 인한 시스템의 특성 변화에 대응이 곤란하다.

이러한 변동에 대처하는 방식으로 파라미터를 추정하여 보상하는 적응제어와 학습을 통해 피드포워드를 생성시켜 시스템의 동특성을 상쇄시키는 Kawamura가 제창한 반복 학습제어⁽²⁾가 있다. 그러나 적응제어는 알고리즘이 복잡하여 실시간처리를 위해 고성능 프로세서가 필요하나 고가이어서 일반적으로 사용

이 어려우며, 반복 학습제어는 피드포워드 입력만 생성시키므로 학습후 외란에 의해 시스템이 변동될 경우 대응이 곤란하여 재학습을 해야 하는 단점이 있다. 이러한 관점에서 피드포워드와 피드백이 적절히 융합된 형태가 필요하게 된다. 1987년 Kawato⁽³⁾는 피드포워드와 피드백을 형성하는 학습제어법을 신경회로망으로 구현하였고, 大山英明⁽³⁾은 이를 확장한 확장 피드백 시스템을 제안하였다. 그러나 이러한 방식은 신경회로망을 이용하고 있어 피드포워드가 역시스템 모델로 수렴한다는 것을 이론적으로 증명하기 어렵고, 또한 시스템 구성도 복잡하다.

본 연구에서는 신경회로망을 이용하지 않고 정확한 모델없이 피드백 오차 반복학습을 통하여 피드포워드 입력 방법으로 역시스템을 구성할 수 있고, 외란에는 피드백으로 대처하는 피드백 오차 학습제어⁽³⁾를 제안하고, 이론적인 증명과 시뮬레이션을 통해 궤적추종의 수렴성과 제어기법의 유효성을 보이고자 한다.

2. 피드백 오차 학습제어

목표궤적 $y_d(t)$ 는 연속 미분가능하고, 시스템은 선형이며 최소위상계로 가정하며, 학습과정은 Fig. 1과 같다.

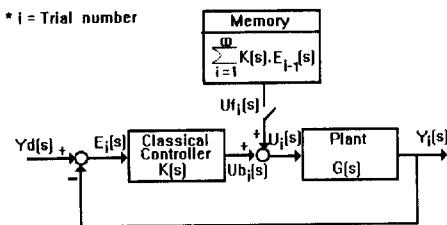


Fig. 1 Feedback error learning process

여기서 i , Y_d , Y_i , E_i , $K(s)$, $G(s)$, U_{fi} , U_{bi} 와 U_i 는 각각 학습횟수, 목표궤적, 출력, 목표궤적과 출력간의 오차, 위치제어기, 플랜트, 학습입력, 피드백으로부터 입력 및 전체 입력이다.

실현 가능한 목표궤적이 주어졌을 때 목표궤적과 시간에 대한 실제 시스템의 응답과의 오차를 오프-라인으로 측정하여 학습입력으로 피드백 입력과 같이 플랜트에 가한 후, 이를 점진적으로 보정하여 역플랜트에 준하는 모델을 구해 피드포워드 입력으로 가하여 목표궤적을 추종을 실현시키는 알고리즘으로 i 번째 학습에서 입력은

$$U_i(s) = U_{b,i}(s) + U_{f,i}(s) \quad (1)$$

$$= S(s)E_{i-1}(s) = S(s)^{i-1}E_1(s)$$

$$U_{b,i}(s) = K(s) E_i(s) \quad (2)$$

1회째의 출력과 오차는

$$U_{f,i}(s) = U_{f,i-1}(s) + K(s) E_{i-1}(s) \quad (3)$$

$$Y_1(s) = H(s) Y_d(s),$$

오차는

$$E_i(s) = Y_d(s) - Y_i(s) \quad (4)$$

$$E_1(s) = Y_d(s) - Y_1(s)$$

전체 전달함수, 감도 및 출력은

$$H(s) = [I + G(s)K(s)]^{-1}G(s) K(s) \quad (5)$$

i번째의 학습입력은

$$S(s) = [I + G(s)K(s)]^{-1} \quad (6)$$

학습횟수를 무한대로 가정하면 학습입력은

$$Y_i(s) = H(s) Y_d(s) + S(s)G(s) U_{f,i}(s) \quad (7)$$

$$\lim_{i \rightarrow \infty} U_{f,i}(s) = K(s) [I - S(s)]^{-1} S(s) Y_d(s) \quad (10)$$

1회, 2회, 3회 및 i회째 학습입력은

$$U_{f,1}(s) = 0$$

$$= K(S) [I - (I + G(S)K(S))^{-1}$$

$$U_{f,2}(s) = U_{f,1}(s) + K(s)E_1(s) = K(s)E_1(s)$$

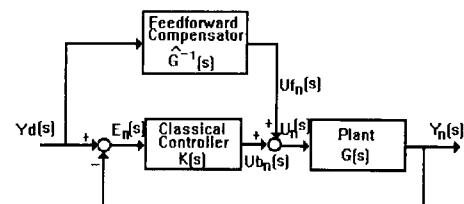
$$= G^{-1}(S) Y_d(S) \quad (11)$$

$$U_{f,3}(s) = U_{f,2}(s) + K(s)E_2(s)$$

식(7)로부터 $Y_i(s) = Y_d(s)$ 가 실현된다.

$$= K(s)E_1(s) + K(s)E_2(s)$$

$$U_{f,i}(s) = K(s)[E_1(s) + E_2(s) + \dots + E_{i-1}(s)] \quad (8)$$



식(7)과(8)을 $i, i-1$ 에 대해 전개후 차를 계산

Fig. 2 Feedback error learning control

하면 i번째의 오차는

$$E_i(s) = [I - H(s)] E_{i-1}(s) \quad (9)$$

학습을 무한대로 시행하기는 불가능하므로

학습횟수 n 번째, 오차한계내 쾌적추종되면 학

습입력은 $U_{f_n}(s) = \widehat{G^{-1}}(S) Y_d(S)$ 로 되어 결국

Fig. 2와 같이 제어를 하게된다.

이상의 알고리즘에 의한 피드백 오차 학습
제어의 특징은 다음과 같다.

- 1) 미지의 플랜트에 적용 가능
- 2) 파라미터 추정이 불필요
- 3) 시스템 설계가 간단
- 4) 학습 횟수 증가에 따라 오차가 감소
- 5) 피드백으로 외란의 영향을 최소화

3. 시뮬레이션

제어대상인 DC 서보전동기와 기어를 갖춘
단일 관절 매니퓰레이터 모델의 기어 및 상태
방정식은 식(12)와 같다.

$$\frac{N_m}{N_L} = \frac{\theta_L}{\theta_m} = n < 1, n : \text{기어 감속비}$$

$$x_1(t) = \theta_m(t), \quad x_2(t) = w_m(t) \quad \text{및} \quad x_3(t) = i_a(t)$$

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = x_2(t)$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = -\frac{f}{J} x_2(t) + \frac{K_a}{J} x_3(t) - \frac{1}{J} T_L(t) \quad (12)$$

$$\frac{dx_3(t)}{dt} = -\frac{K_b}{L_a} x_2(t) - \frac{R_a}{L_a} x_3(t) - \frac{v_a(t)}{L_a}$$

전동기는 정격전압 15V, 정격출력 12W, 유

기전압정수(Kb) 3.5 V/krpm, 토크정수(Ka) 33

$*10^3$ N.m/A, 전기자 관성(J) $32*10^{-7}$ N.m.sec²,

전기자저항(R) 4.5Ω, 기계적 시정수(Tm) 13.0
m.sec, 기어 감속비 1/50인 저관성⁽⁴⁾ 소형전동
기이다.

피드백은 PD 제어기와, 목표궤적은 t의 3차
식으로, 오차 한계는 $\int_0^{2.0} e^2 dt = 2*10^{-4}$ 로 설정

하여 학습횟수를 비교도록 한다.

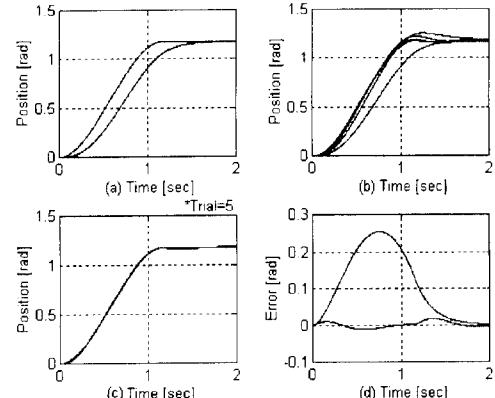


Fig. 3 Position tracking without load

Fig. 3은 무부하시 응답이며 순서대로 피드

백 제어응답, 학습 과정응답, 5회째 학습 완료,
1회, 5회의 오차이며, Fig. 4는 학습 완료된 전
체, 피드포워드, 피드백 입력 및 학습횟수에
따른 오차감소 경향이다.

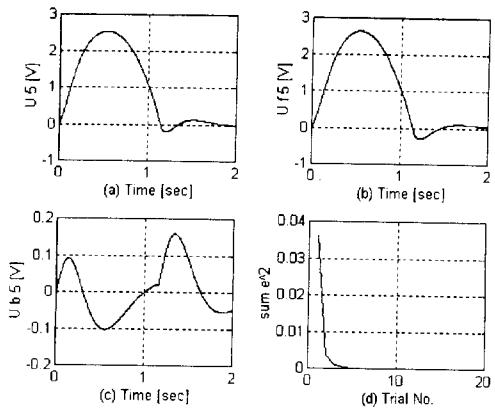


Fig. 4 Input and Error tendency

Fig. 5는 관성 모멘트가 5%증가 되었을때

무부하시 학습완료 입력을 가하여 파라미터
변동에 대해 견실성을 보여준다.

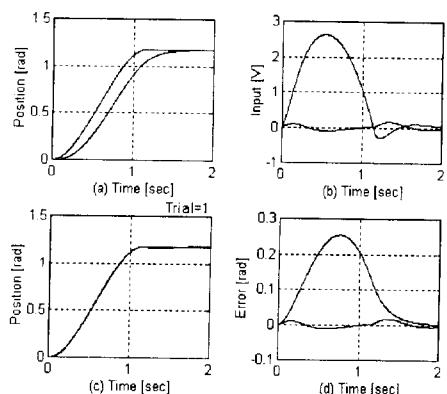


Fig. 5 In case of changing parameter

Fig. 6은 부하변동의 경우 자체학습은 5회
에 도달되나, 무부하 학습완료 입력을 인가할
때는 3회만에 수렴되어 학습경감의 효과를 보

여준다.

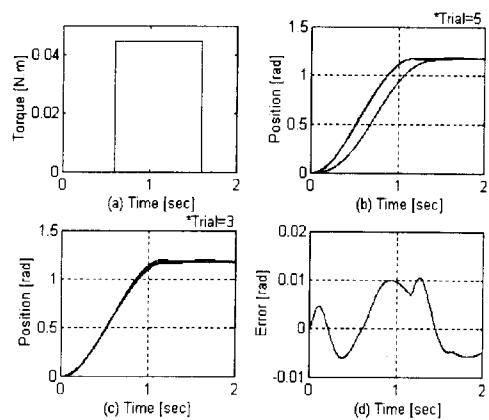


Fig. 6 In case of changing load

4. 결 론

본 연구에서 제안하는 피드백 오차 학습제
어를 이용하여 궤적추종에 대한 시뮬레이션은
만족스러운 결과를 얻었다. 또한 피드백 오차
학습과정 동안 학습초기에는 피드백에 의존성
이 높은 반면 학습이 계속 진행되면서 피드포
워드가 점차적으로 강화되게 된다.

본 연구에서는 역시스템에 준하는 모델을
피드백 오차 학습과정을 통하여 실현시켜 궤
적추종을 할 수 있다는 점과 피드백의 병용으
로 외란에 대한 영향도 최소화 할 수 있다는
점이 제안된 제어기법의 중요한 특징이라 할
수 있다.

5. 참고 문헌

1. 이 호길, “유연 링크 로보트의 제어에 관한

연구”, 大阪大學, 1989.

2. S. Kawamura and S. Arimoto, "Realizati-

on of robot motion based on a learning

method" IEEE Trans. Systems, man and

cybern., vol. 18, No. 1, 1988.

3. 大山英明, 館 瞳, “확장 피드백 시스템의 역

운동학 모델의 오프-라인 학습, 일본 로보트

학회지, vol. 13, No. 5, pp. 691-699, 1995.

4. McKerrow, "Introduction to robotics", Ad-

dison-Wesley, 1990.