

복수전동기 구동 시스템의 성능 향상을 위한 반복학습제어기 설계

이흥희, 김정희

울산대학교 전기전자정보시스템공학부

An Iterative Learning Controller Design for Performance Improvement of Multi-Motor System

H.H. Lee and J.H. Kim

School of Electrical Engineering and Information System, University of Ulsan, Korea

ABSTRACT

Iterative learning control is an approach to improve the transient response of systems that operate repetitively over a fixed time interval. It is useful for the system where the system output follows the different type input, in case of design or modeling uncertainty. In this paper, we introduce the concept of iterative learning control and then apply the learning control algorithm for multi-motor system for performance improvement.

1. 서 론

최근 급속도로 발전하고 있는 산업 분야에서 정밀하고 빠른 응답 특성을 갖는 전동기 제어시스템이 필수적으로 요구됨에 따라 다양한 형태의 제어시스템에 대한 연구 및 개발이 진행되어 왔다.

그 중에서 일정한 궤적을 따라 반복적인 작업을 수행하는 시스템의 동작 특성을 향상시키기 위해 반복학습제어기가 유용하게 사용될 수 있다.^[1]

반복학습은 사람의 다양한 학습 능력 중에서 반복되는 훈련을 통하여 행동을 수정하고 숙련된 동작을 습득해 나가는 과정을 모방한 학습 방법이며, 산업용 로봇이나 수치제어 공작기계 등과 같이 일정한 작업을 반복적으로 수행해 나가면서 정밀한 작업을 필요로 하는 시스템을 위해 제시되었다.

특히 이 기법은 제어대상의 정확한 파라미터를 알 수 없는 경우이거나 모델이 주어지지 않은 경우에 반복되는 학습을 통하여 입력을 조정하여 원하는 정도의 출력을 얻을 수 있게 하는 장점이 있다.

본 논문에서는 두 대의 서보 앰프가 일정한 궤적을 따라 동작 할 때 특정 지점에서의 오버슈트, 라

이징 타임, 정상상태 오차와 같은 과도상태응답을 향상시키기 위한 반복학습제어기를 설계하고, 그 동작특성을 시뮬레이션을 통해 나타내 보였다.

2. 시스템 모델링

2.1 서보 앰프 모델링

본 논문에서는 미쓰비시 속도제어용 서보앰프와 전동기에 대해 입력(속도지령)과 출력(속도) 데이터로부터 얻어지는 주파수 특성을 이용하여 PID 제어기와 직류전동기로 이루어진 근사화 모델을 구했다. 이는 그림 1과 같고 서보앰프의 근사화 모델에 대한 상태방정식은 (1), (2)와 같다.

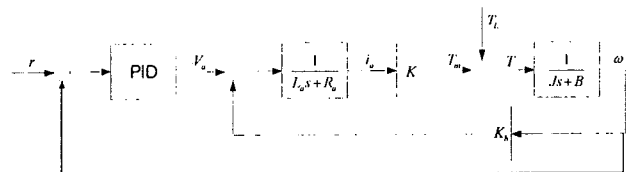


그림 1. 서보앰프 근사화 모델

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha & -\beta & -\gamma \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$y = [\delta \quad \varepsilon \quad \gamma] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $\alpha = \frac{JR + BL + K K_d}{JL}$,

$$\beta = \frac{BR + K K_p + K^2}{JL}, \quad \gamma = \frac{K K_i}{JL}$$

$$\delta = \frac{K K_d}{JL}, \quad \epsilon = \frac{K K_p}{JL}$$

J=관성모멘트, R=회전자 저항, L=회전자 인덕턴스
K=역기전력 상수(=토크상수), K_i, K_d, K_p=PID제어
기 이득, B=마찰계수

3. 제어기 설계

3.1 일반적인 학습제어

반복학습제어의 기본적인 개념을 그림 (2)와 같이 나타내었다. 시스템이 동작하는 동안 각각의 입력과 출력은 메모리에 저장되고, 동작 중에 발생한 오차를 통해 시스템에 알맞은 이상적인 입력의 형태를 식 (3), (4)와 같이 계산할 수 있다^[2].

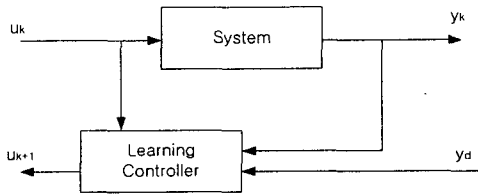


그림 2 일반적인 학습제어 형태

$$y_k = T_s u_k \quad (3)$$

$$u_{k+1} = u_k + T_e E_k \quad (4)$$

여기서 T_s 는 시스템의 선형 연산자, T_e 는 에러의 선형 연산자, k는 동작구간의 반복회수, u_k 는 입력, y_k 는 출력, y_d 는 이상적인 출력의 궤적을 나타낸다.

반복적인 동작을 통해 이상적인 입력의 형태는 다음의 조건을 만족시킬 때 식 (4)를 통해 계산할 수 있다.^[1]

$$\|I - T_e T_s\|_\infty < 1 \quad (5)$$

결국 반복학습제어기를 설계하는 문제는 부등식 (5)를 만족시키는 적절한 T_e 값을 찾아내는 것이다.

3.2 Inverse System Estimator

본 논문에서는 그림 3과 같이 서보앰프의 입력 측에 Inverse System Estimator 형태의 반복학습 제어기 A_k 를 삽입하였다.

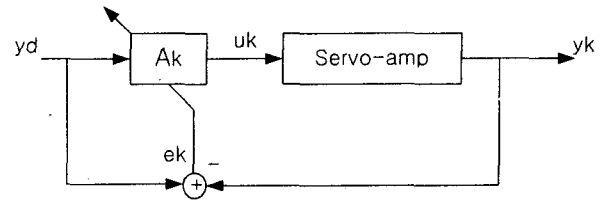


그림 3 시스템 블록도

서보 앰프는 식 (6)과 같이 Markov 정수 h_i 를 가지는 선형연산자로 표현할 수 있다.^[2]

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_2 & h_1 & 0 & \dots & 0 \\ h_3 & h_2 & h_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_n & h_{n-1} & h_{n-2} & \dots & h_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$h_i = c A^{i-1} b \quad (i=1, 2, 3, \dots)$$

서보 앰프로 입력되는 제어입력은 식 (7)과 같이 계산되어 진다. A_k 는 서보 앰프 역함수에 해당하는 선형 연산자이다.

$$u_k = A_k y_d \quad (7)$$

여기서 정수 k는 시스템이 반복동작을 하는 횟수이다.

A_k 는 서보 앰프가 반복 동작을 시작하는 시점에서 식 (8)과 같이 갱신된다.

$$A_{k+1} = A_k + \Delta A_k \quad (8)$$

$$\Delta A_k = \begin{bmatrix} a_1 e_k(1) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_1 e_k(2) & a_2 e_k(1) & 0 & \dots & 0 \\ a_1 e_k(3) & a_2 e_k(2) & a_3 e_k(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1 e_k(n) & a_2 e_k(n-1) & a_3 e_k(n-2) & \dots & a_n e_k(1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 a_i 는 식 (5)를 만족시키는 T_e 의 원소이다. 결과적으로 식 (8)에 의해 갱신된 새로운 입력 u_{k+1} 은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{k+1} = A_{k+1} y_d = (A_k + \Delta A_k) y_d = u_k + \Delta A_k y_d \quad (10)$$

4. 시뮬레이션

표 1의 모델 파라미터를 적용하여 Matlab을 사용해 시뮬레이션을 수행하였다. 시스템의 동작구간은 20초 동안이며 샘플링은 10ms이다. 그리고 한 구간의 동작이 끝나면 같은 동작을 처음부터 반복하게 된다.

표 1 모델 파라미터

R[Ω]	1
L[H]	0.1
J[Kg.cm ² /sec]	0.0098
B[Kg.cm ² /sec]	0.2
K[Kg.cm/A](V/rad)	0.1
Kp,Ki,Kd	5,5,1

식 (6)을 통해서 얻은 결과를 바탕으로 시스템의 Inverse Matrix를 다음과 같이 구하였다.

$$A = H^{-1} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & a_1 & 0 & \dots & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n & a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$a_i = -\frac{1}{h_1} \sum_{j=1}^{i-1} a_j h_{i-j+1}$$

여기서 정수 n은 샘플링 횟수를 나타낸다.

그리고 H_e 는 부등식 (5)를 만족시키기 위해 간단히 다음과 같이 설정하였다.

$$H_e = H^{-1} \quad (12)$$

식 (9), (12)를 바탕으로 다음과 같이 ΔA_k 의 원소인 α_i 를 계산하였다.

$$\alpha_i = 0.1 * a_i / y_d(i) \quad (13)$$

식 (10)에 α_i 값을 적용하여 시스템이 원하는 출력을 낼 수 있는 이상적인 입력의 값을 계산하였다. 시뮬레이션 결과 파형은 그림 4-12와 같다.

그림 4-5는 서보 앰프의 입력 파형을 나타내고 있다.

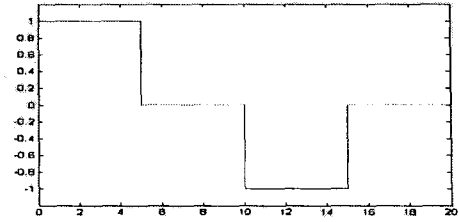


그림 4 서보 앰프1의 속도 입력 파형

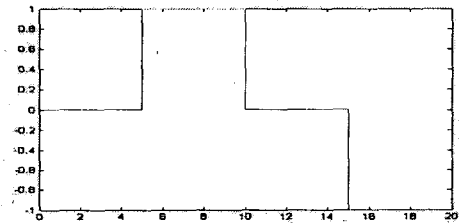


그림 5 서보 앰프2의 속도 입력 파형

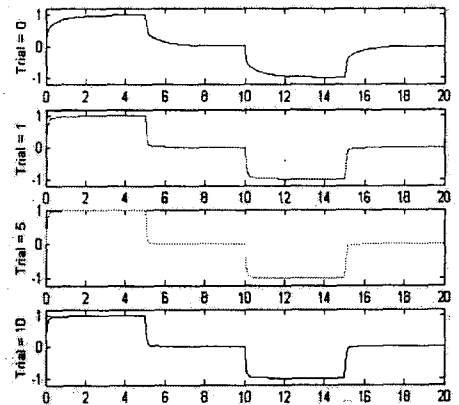


그림 6 서보 앰프1의 반복학습제어에 의한 속도 출력 파형

그림 6은 서보 앰프1의 반복학습제어에 의한 속도 출력을 나타내었다. Trial 은 반복학습 횟수를 나타낸다.

그림 7-8은 그림 6의 출력 파형을 확대한 것으로 반복 횟수에 따른 속도응답을 나타내고 있다.

그림 9는 반복학습제어를 쓰지 않은 경우의 속도 출력 오차와 5번의 반복학습제어를 통한 속도 출력 오차를 나타내었다.

그림 10, 11은 두 대의 서보 앰프가 그림 1과 2의 속도 입력으로 동작 할 때 발생하는 위치 궤적을 나타낸 것이다.

그림 12는 입력의 형태가 변하였을 때 반복학습제어를 쓰지 않은 경우의 속도 출력과 5번의 반복학습제어를 통한 속도 출력 나타내었다.

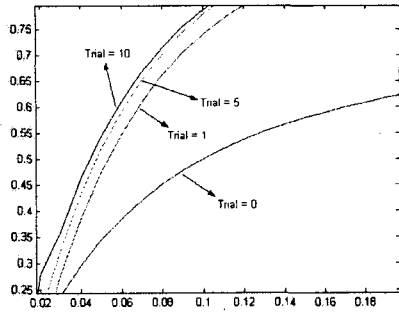


그림 7 서보 앰프의 반복학습제어에 의한 과도상태 응답

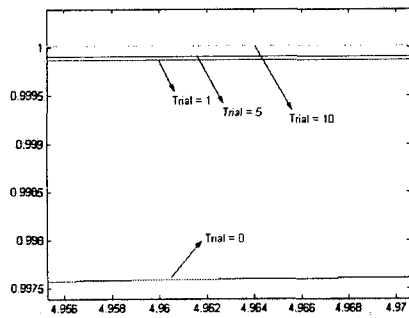


그림 8 서보 앰프의 반복학습제어에 의한 정상상태 응답

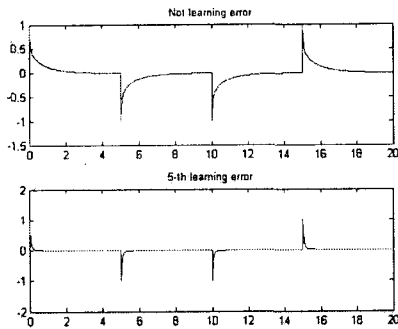


그림 9 에러 출력 파형

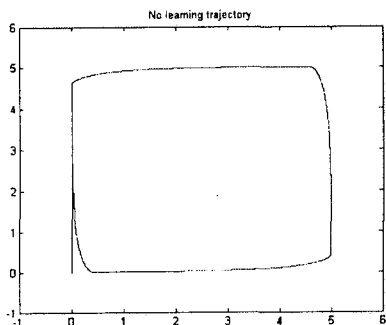


그림 10 학습 이전의 서보 앰프 위치 궤적

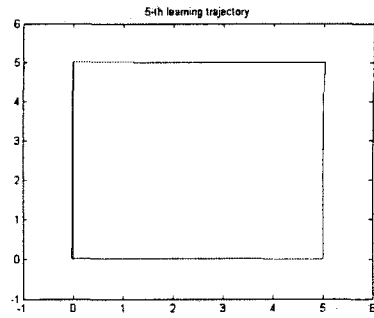


그림 11 반복학습에 의한 서보 앰프 위치 궤적

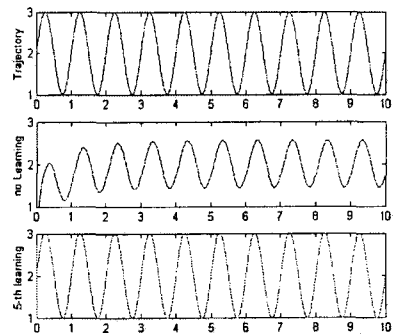


그림 12 입력의 변화에 따른 속도 출력

5. 결 론

본 논문에서는 두 대의 서보 앰프가 주어진 작업을 수행하면서 보다 정확하고 빠른 응답 특성을 가질 수 있도록 반복학습제어기를 설계하였다.

각 서보앰프에 대한 근사화 모델은 입력(속도 지령치)과 출력(속도)에 대한 주파수 응답을 통해 얻었고 Matlab을 통한 시뮬레이션을 통해 성능 평가를 수행하였다. 그 결과 반복학습을 통한 출력이 학습을 하기 이전 보다 향상되는 것을 알 수 있었다. 또한 입력에 변화에 강인한 성능을 가지는 것을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Kevin L. Moore, "Iterative Learning control for Deterministic Systems", Springer-Verlag, pp. 1-77, 1993.
- [2] Thomas Kailath, "Linear System", Prentice-Hall, pp. 43,70,92-93, 1980.
- [3] Gerco Otten, Theo J. de Vries, Adrian M. Rankers, Erik W. Gaal, "Linear Motor Motion Control Using a Learning Feedforward Controller, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 2, No. 3, Sept. 1997.
- [4] Won-Cheol Kim, Kwang-Soon Lee, Arkadii V. Kim, "On Iterative Learning Control For Some Distributed Parameter Systems", KACC, 1994.