

모델 추종 제어기 설계 및 실현화

정구락, 김광태, 김제한

국방과학연구소

Model Following Controller Design and Implementation

Koo-Rack Chung, Kwang-Tae Kim, Jae-Hwan Kim
Agency for Defense Development

ABSTRACT

This paper proposes a performance improvement to a control system with optimal state feedback control. In this paper, a simple and direct design procedure is proposed to design the model following controller. The scheme is implemented in a 16 bit micro-computer with math coprocessor. Tests on a DC machine have been conducted.

1. 서론

많은 제어 응용분야에서 기준입력을 정확히 추적 할 수 있는 제어기가 요구되고 있다. 추적 시스템에 있어서 중요한 문제는 기준입력이 변화할 때 시스템의 출력이 신속히 기준입력을 따라 가도록 만드는 동시에 시스템의 조정(Regulation) 문제를 해결하는 것이다. 상태궤환 제어기와 같은 조정기(Regulator)만을 적용 할 때는 계단 입력과 같은 기준입력 변화에는 양호한 성능을 얻을 수 있지만 기준입력이 빠른속도로 증가하거나 정현파와 같이 지속적으로 변화 할 경우 원하는 추적 정확도를 얻기는 어렵다. [2,3]

본 논문에서는 계단입력, 경사입력 및 포물선 입력을 고려한 시스템 모델을 설정, 모델 추종 제어기 설계에 적용하여 설계된 제어기의 성능을 확인 하고자 한다. 서론에 이어 2장에서는 모델추종 제어기를 설계하여 설계된 제어기의 계수를 기준입력과 플랜트 출력간의

오차에 의한 제어항과 기준입력에 의한 제어항으로 재구성하였으며, 3장에서는 재구성된 제어기의 제어 계수에 따른 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였고, 4장에서는 설계된 제어기를 16비트 마이크로 컴퓨터에 실현하여 직류 전동기의 위치 제어에 적용하였다.

2. 제어기의 구성

모델 추종 제어기는 제어대상 플랜트가 일정한 모델의 동특성을 갖도록 제어하는 것이다. 모델 추종제어기 설계를 위해 플랜트와 모델을 (1), (2) 식과 같이 고려한다.

$$X_p(k+1) = A_p X_p(k) + B_p U(k) \quad \dots\dots(1)$$

$$X_m(k+1) = A_m X_m(k) + B_m R(k) \quad \dots\dots(2)$$

오차 벡터를 (3)식과 같이 정의하고, 플랜트 제어 입력을 (4) 식과 같은 선형 제어 법칙으로 고려하면 오차 벡터는 (5) 식으로 표현된다.

$$E(k) = X_m(k) - X_p(k) \quad \dots\dots(3)$$

$$U(k) = K_p X_p(k) + K_e E(k) + K_m R(k) \quad \dots\dots(4)$$

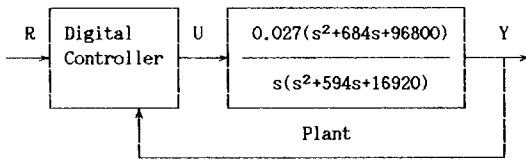
$$E(k+1) = (A_m - B_p K_e) E(k) + (A_m - A_p - B_p K_p) X_p(k) + (B_m - B_p K_m) R(k) \quad \dots\dots(5)$$

(5) 식에서 완벽한 모델 추종을 위해서 플랜트 제어 입력, U(k)는 (6), (7)식을 만족시킬 수 있도록 선택되어야 한다.

$$(A_m - A_p - B_p K_p) X_p(k) + (B_m - B_p K_m) R(k) = 0 \quad \dots\dots(6)$$

$$E(k+1) = (A_m - B_p K_e) E(k) \quad \dots\dots(7)$$

제어 대상 플랜트를 속도제어기, 전류제어기, 9 KWDC 서보 모터 및 대형 부하(6톤)로 고려할 때 시스템블록 선도는 그림 1.과 같다. 플랜트가 그림 1.과 같이 구성 될 때 계단, 경사 및 포물선 함수의 위치입력에 대하여 정상상태 위치오차가 영(Zero)인 시스템 모델은 (8) 식과 같이 나타낼 수 있다. [5]



R:위치명령, U:제어입력, Y:위치출력

그림 1.시스템 블록선도

Fig 1. System block diagram

$$T_m(s) = \frac{598s^2 + 19321s + 339768}{s^3 + 598s^2 + 19321s + 339768} \dots (8)$$

플랜트를 이산계로 등가변환하면 (9)식과 같고, 디지털 제어기 설계를 위하여 플랜트와 모델을 이산시간계 상태 방정식으로 나타내면 (10),(11) 식과 같다.

$$G_p(z) = \frac{4.25 \cdot 10^{-4}(z^2 - 7.06 \cdot 10^{-2}z + 8.2 \cdot 10^{-3})}{z^3 - 1.74z^2 + 0.75z - 2.63 \cdot 10^{-3}} \dots (9)$$

$$X_p(k+1) = A_p X_p(k) + B_p U(k)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{2.63}{1000} & -0.75 & 1.74 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{p1}(k) \\ X_{p2}(k) \\ X_{p3}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{4.25}{10000} \end{bmatrix} V(k) \dots (10)$$

(단, $V(z) = (z^2 - 7.06 \cdot 10^{-2}z + 8.2 \cdot 10^{-3})U(z)$
 $X_{p1}(k) = Y(k)$)

$$X_m(k+1) = A_m X_m(k) + E_m R(k)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{2.53}{1000} & -0.72 & 1.67 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{m1}(k) \\ X_{m2}(k) \\ X_{m3}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.76 & -1.75 & 1.05 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1(k) \\ R_2(k) \\ R_3(k) \end{bmatrix} \dots (11)$$

$X_{m1}(k) = Y_m(k)$, $R(k)$: 위치명령
 $R_1(k) = R(k)$, $R_2(k) = R(k+1)$, $R_3(k) = R(k+2)$

제어 입력 $V(k)$ 를 (12)식과 같이 고려하고, (6),(7) 식을 만족시키는 제어 계수를 구하면 표 1.과 같다.

$$V(k) = [K_{p1}, K_{p2}, K_{p3}] \begin{bmatrix} X_{p1}(k) \\ X_{p2}(k) \\ X_{p3}(k) \end{bmatrix} + [K_{o1}, K_{o2}, K_{o3}] \begin{bmatrix} X_{o1}(k) \\ X_{o2}(k) \\ X_{o3}(k) \end{bmatrix} + [K_{m1}, K_{m2}, K_{m3}] \begin{bmatrix} R_1(k) \\ R_2(k) \\ R_3(k) \end{bmatrix} \dots (12)$$

표 1. 설계된 제어기 계수

Tab 1. Designed controller's coefficients

	1	2	3
K_p	-0.2426	54.56	-173.6
K_o	0.0	0.0	0.0
K_m	1782.5	-4125.2	2462.0

앞에서 구한 제어계수를 (12)식에 대입하고 기준입력 $R(k)$ 와 플랜트 출력 $Y(k)$ 의 식으로 나타내면 제어입력 $V(k)$ 는 (13)식과 같다.

$$V(k) = 1782.5R(k) - 4125.2R(k+1) + 2462R(k+2) - 0.24Y(k) + 55Y(k+1) - 173.6Y(k+2) \dots (13)$$

제어 입력 $V(k)$ 를 기준 입력과 플랜트 출력간의 오차에 의한 제어항과 기준입력에 의한 제어항으로 분리하여 제어기 실현시 제어계수 조정으로 플랜트 모델링 오차를 보상할 수 있도록 재구성하면 그림 2. 및 (14)식과 같이 나타낼 수 있다.

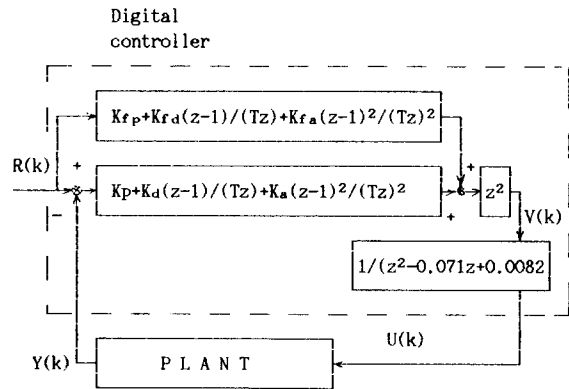


그림 2. 재구성된 제어기 구조도

Fig 2. Reconstructed controller's structure

$$T(Z) = \frac{Y(Z)}{R(Z)} = \frac{Kf_p + Kf_d(z-1)/(Tz) + Kf_a(z-1)^2/(Tz)^2}{K_p + Kd(z-1)/(Tz) + Ka(z-1)^2/(Tz)^2} \cdot \frac{Gc(z)Gp(z)}{1 + Gc(z)Gp(z)} \quad \dots (14)$$

(단, $Gc(z) = [K_p + Kd(z-1)/(Tz) + Ka(z-1)^2/(Tz)^2]z^2U(z)/V(z)$)

3. 컴퓨터 시뮬레이션

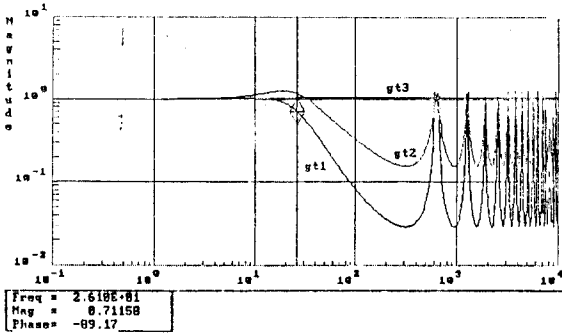
앞 장에서 재구성된 시스템에서 기준 입력의 종류에 따라서 영향이 나타나는 제어 계수 Kf_p , Kf_d , Kf_a 에 따른 전달함수를 (15)식 - (17)식과 같이 정의하고 전달 함수에 따른 시뮬레이션을 수행하였다.

$$Gt_1 = T(z) | Kf_d=0, Kf_a=0 \quad \dots (15)$$

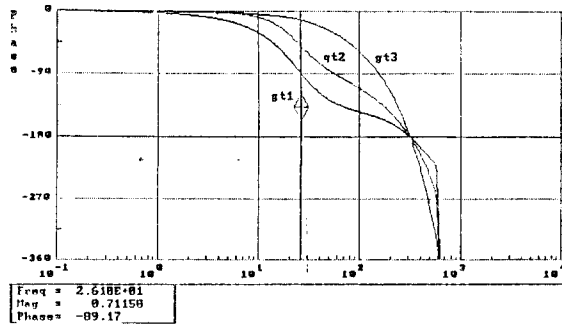
$$Gt_2 = T(z) | Kf_d=5.06, Kf_a=0 \quad \dots (16)$$

$$Gt_3 = T(z) | Kf_d=5.06, Kf_a=0.178 \quad \dots (17)$$

각 전달 함수의 주파수 특성은 그림 3.과 같고, 계단 입력, 경사 입력, 포물선 입력에 대한 응답 특성은 그림 4. - 그림 6.과 같다.



(a) 전달 함수 이득



(b) 전달 함수 위상

그림 3. 전달 함수의 주파수 특성
Fig 3. Frequency Response of the Transfer Function

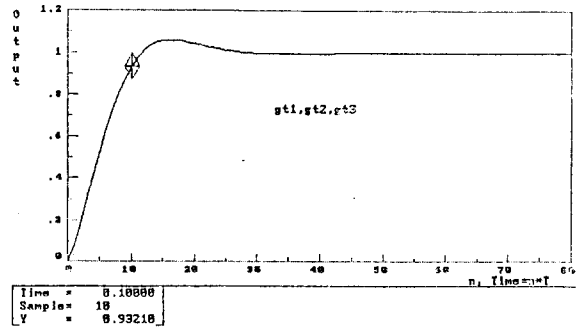


그림 4. 전달 함수의 계단 입력 응답 특성

Fig 4. Step Response

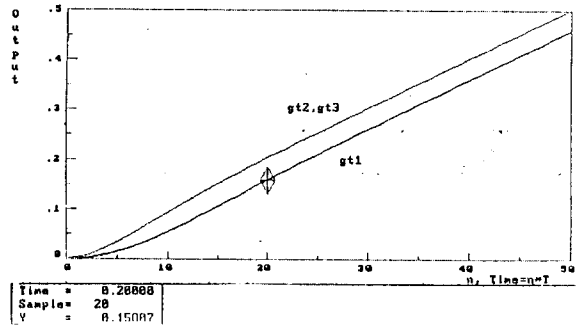


그림 5. 전달 함수의 경사 입력 응답 특성

Fig 5. Ramp Response

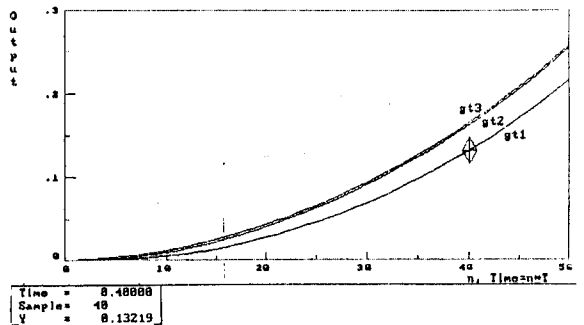


그림 6. 전달 함수의 포물선 입력 응답 특성

Fig 6. Parabolic Response

컴퓨터 시뮬레이션은 IBM-PC에서 사용가능한 CC(제어기 설계용 프로그램)를 이용하였으며, 이 장에서 나타난 시뮬레이션 결과 또한 CC 프로그램을 이용하여 얻어진 것이다.

4. 실험 및 고찰

앞 장에서 설계된 제어기를 2축 동시 구동시 샘플링 주기를 10ms로 하여 Intel 8086, 8087로 구성된 마이크로 컴퓨터에 실현하였으며, 제어 알고리즘 수행용 프로그램은 PL/M-86(Program Language for Micro-processor, Intel) 언어로 작성하였다. 위치 제어기는 큰 신호 입력시 서보 증폭기(Actuator Saturation)에 따라 나타나는 만족스럽지 못한 과도 응답 특성을 개선하기 위해 운동 방식식에 의한 개략 제동(Corse Braking) 후 위치오차가 4 mrad 미만에서 모델 추종 제어기가 작동되도록 설계하였다.[8] 적용된 서보 제어 루프의 구성도는 그림 7.과 같다.

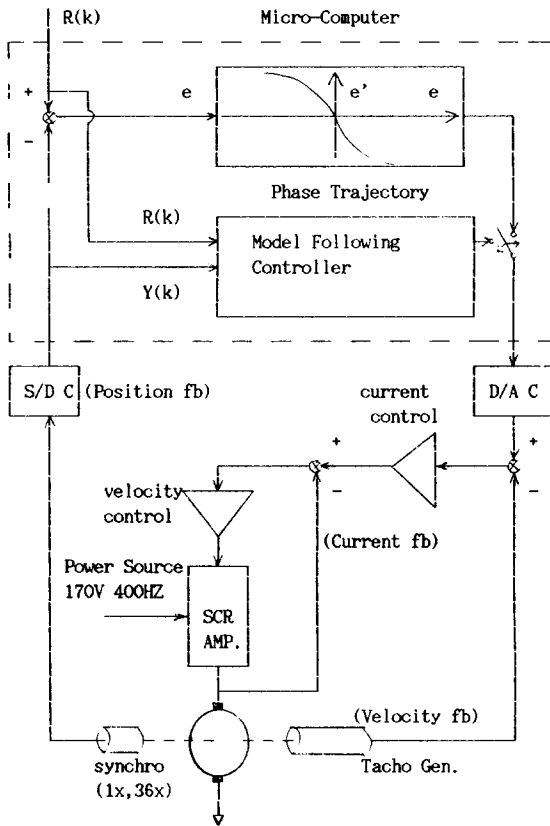


그림 7.서보 제어루프 구성도

Fig 7.Servo control loop

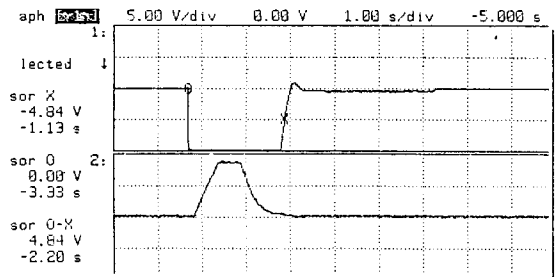
제어기 설계에서 구한 제어 계수들 표 2.와 같이 조정하여 계단입력, 경사입력 및 정현파 입력을 인가하고 추적

정확도를 측정하였다. 실험 결과는 그림 8. 과 같다. 실험에서 기준입력과 관계되는 K_{fd} , K_{fa} 는 플랜트의 부하와 마찰력의 변화 및 모델링 오차에 따라 계수 조정이 필요하였다.

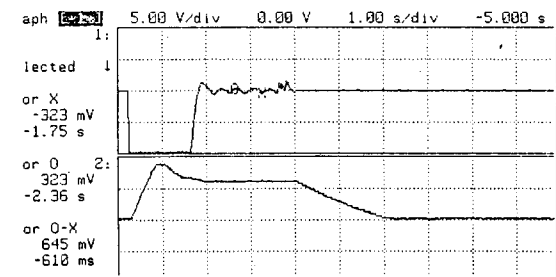
표 2. 실험에 사용된 계수값

Tab 2. Adjusted coefficients by experiment

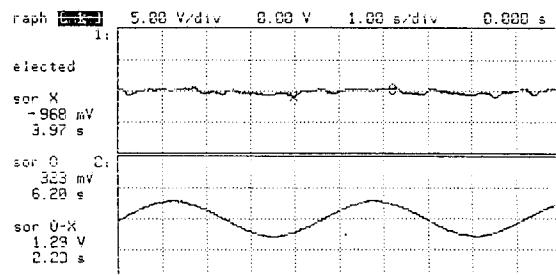
	K_p	K_d	K_a	K_{fp}	K_{fd}	K_{fa}
이론치	119.3	0.59	2.4×10^{-5}	0.0	5.06	1.78×10^{-1}
실험치	119.3	0.59	2.4×10^{-5}	0.0	5.5	2.0×10^{-1}



(a) 계단 입력: 90°



(b) 경사 입력: 60°/sec



(c) 정현파 입력: $20 \sin 1.38t$

그림 8. 기준입력에 따른 위치오차

(CH1 : 위치오차, CH2 : 모터속도)

Fig 8. Position Error with Input

5. 결 론

본 논문에서는 기준입력으로 계단 입력, 경사입력 및 포물선 입력을 고려한 모델 추종 제어기를 설계하였으며, 이를 디지털 제어기로 실현하여 상태궤환 제어기 보다 우수한 추적 정확도를 얻었다.

플랜트의 부하와 마찰력의 변화에 따라 계수조정이 이루어지기 위해서는 적응 제어기 적용이 필요하지만 적응 제어기 실현을 위해서는 디지털제어기의 충분한 연산속도 증가가 선행되어야 할것으로 판단된다.

6. 참 고 문 헌

- [1] 정구락, 김광태, 김제환, " 추적 정확도 향상을 위한 최적 제어기 설계 및 실현화 ", '89년 한국자동제어 학술 회의 논문집 Vol.1, PP 105 - 108, 1989
- [2] K.J.Astrom and B.Wittenmark, "Computer Controlled System ", Prentice-Hall, London, 1984
- [3] Atans M., " On the PID Controllers Using Optimal Linear Regulator Theory", Automatica Vol.7,PP 643 - 647, 1971
- [4] K.J.Astrom, " Robustness of a Design Method Based on Assignment of Poles and Zeros ", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-25 No.3, PP 588 - 591, 1980
- [5] Stanley M.Shinners,"Modern Control System Theory and Applications ", Tower Press, 1979
- [6] C.J.Harris and S.A.Billings,"Self-Tuning and Adaptive Control : Theory and Application ",Peter Peregrinus Ltd.,England, 1981
- [7] Peter M.Thompson, "Program CC Version 4 Tutorial and User's Guide", System Technology,Inc.,California, 1988
- [8] D.R.Wilson, M.Sc. and C.Eng., " Modern Practice in Servo Design ", Pergamon Press,Oxford, 1970