

DELAYED FEEDBACK을 이용한 로봇트 제어기의 설계

◦임동진
산업과학기술연구소

Dong H. Chyung
University of Iowa, U.S.A.

CONTROLLER DESIGN FOR A ROBOTIC MANIPULATOR USING DELAYED FEEDBACK

Dong-Jin Lim
RIST

Dong H. Chyung
University of Iowa, U.S.A.

ABSTRACT

In this paper, the problem of designing a feedback controller for a robotic manipulator, which is activated by a D.C. motor through a gear train and a flexible shaft or chain, is considered. When the response of the closed loop control system is relatively slow, a satisfactory controller may be designed as a PID controller. As the speed of the control system increases, however, the spring effect of the linkage becomes profound, and as a result, the transient response exhibits a substantial oscillation. To eliminate this oscillation, it is necessary to design the controller based on at least a fourth order system model. This, in turn, requires the feedback of the entire state variables. In practice, however, only the position of the manipulator and the velocity of the motor are readily measurable. The state variable reconstruction method or a state observer cannot be used because of the system nonlinearities such as the Coulomb frictions. In this study, an alternative controller, which is based on delayed feedback of the output variable only, is proposed, and a successful delayed feedback controller is designed and implemented on an actual experimental manipulator.

1. 서론

대부분의 로봇트 매니퓰레이터(robotic manipulator)에 있어서, 각 축(joint)은 기어(gear)나 체인(chain)을 통해 직류모터(D.C. Motor)에 의해서 구동이 된다. 이 경우에, 제어기 설계에서 고려되어야 할 중요한 요소로서 쿨롱마찰(Coulomb friction)과 기어(gear)나 벨트(belt) 혹은 체인(chain)에 의한 스프링(spring)효과가 있다 [1,2,3]. 제어시스템의 응답속도가 빠르지 않을 경우에는 PID 제어기만으로도 양호한 응답을 얻을 수 있지만 [3], 속도를 증가 시킴에 따라서 구동부분의 스프링(spring) 효과가 나타나게 되고, 이에 따라 과도응답에서 진동현상(oscillation)이 존재하게 된다. 일반적으로, 이러한 진동현상(oscillation)은 PID 제어기의 계수조정만으로는 제거가 어렵다. 본 고에서는 지연궤환(delayed feedback) 제어기를 소형 실험용 로봇트 매니퓰레이터(robotic manipulator)의 한 축(joint)에 적용한 실험결과를 기술하고자 한다. 이 소형 로봇트 매니퓰레이터(robotic manipulator)의 각 축(joint)은 벨트

(belt) 혹은 체인(chain)과 함께 기어(gear)를 통하여 직류 모터에 연결이 되어있다. 본 제어기는 PI 제어기에 출력변수의 지연궤환(delayed feedback)이 추가된 형태를 하고있다. 쿨롱마찰과 중력으로 인하여 발생하는 정상상태의 오차는 PI 제어기의 적분연산기에 의해서 보상이되며, 과도상태의 진동현상은 출력 변수의 지연궤환에 의해서 제거된다. 이때, 각 축의 위치 변수는 모터의 축이 아닌 로봇트팔이 연결된 축에서 측정된다.

2. 제어모델

본 고에서 대상으로 하는 매니퓰레이터의 한 축(joint)은 그림 1 과 같이 나타낼 수 있다.

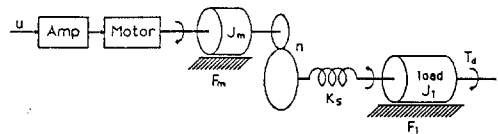


그림 1. 로봇트 드라이브 시스템

Fig. 1. Robot Drive System

그림 1에서, Fm과 F1은 쿨롱마찰을 나타내며, Td는 중력등으로 인하여 외부로부터 가해지는 토크(torque)이다. 입력 신호 u는 모터구동용 앰프(power amp)의 입력에 가해지는 제어신호이다. 위의 드라이브 시스템을 블록선도로 나타내면 그림 2와 같다.

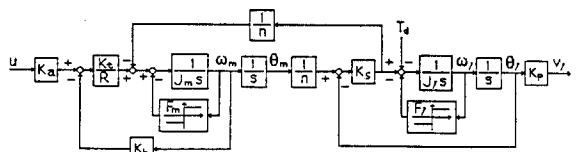


그림 2. 로봇트 드라이브 시스템의 블록선도

Fig. 2. Block Diagram of the Robot Drive System

위의 그림에서 사용된 변수는 다음과 같이 정의 된다.

- u : 앰프에 가해지는 입력전압
- T_d : 중력으로 인한 외부 토크
- v_1 : 위치검출용 포텐쇼미터(potentiometer)의 출력
- θ_1 : 부하축 위치각도
- ω_1 : 부하축 각속도
- θ_m : 모터축 위치각도
- ω_m : 모터축 각속도

시스템 파라미터(system parameter)는 실험에 의하여 구해졌으며, 그 수치들은 다음과 같다.

- $K_p=9.55$ volts/rad : 포텐쇼미터 상수
- $R=8.19\Omega$: 모터 권선 저항
- $K_b=0.0388$ volts.sec/rad : 모터 역기전력 상수
- $K_t=0.0388$ N.m/A : 모터 토크 상수
- $K_a=6$: 파워앰프 상수
- $n=524$: 기어 감속비
- $K_s=500$ N.m/rad : 스프링 상수
- $F_m=0.004737$ N.m : 모터축 쿨롱마찰
- $J_m=0.000003$ Kg.m² : 모터 관성(inertia)
- $F_1=0.5$ N.m : 부하축 쿨롱마찰
- $J_1=0.04$ Kg.m² : 부하축 관성(inertia)

우선, 상태변수벡터 x 를 다음과 같이 정의한다.

$$x=(x_1, x_2, x_3, x_4)^T$$

- $x_1=v_1$: 포텐쇼미터에 의해 측정되는 부하축 위치각도
- $x_2=\omega_1$: 부하축 각속도
- $x_3=\theta_m/n$: 모터축의 위치를 감속비로 나눈값
- $x_4=\omega_m/n$: 모터축의 각속도를 감속비로 나눈값

그러면 벡터형태로 나타낸 시스템 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 9.55 & 0 & 0 \\ -1309 & 0 & 12500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 63.6 & 0 & -607 & -61.3 \end{bmatrix} x - \begin{bmatrix} 0 \\ 25f_1(x_2) \\ 0 \\ 636f_m(x_4) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 18.1 \end{bmatrix} u - \begin{bmatrix} 0 \\ 25T_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (S1)$$

3. DELAYED FEEDBACK 제어기

먼저 PID 제어기를 구성하기 위하여, 오차적분기를 시스템에 추가시키면 그림 3 과 같은 형태가 된다.

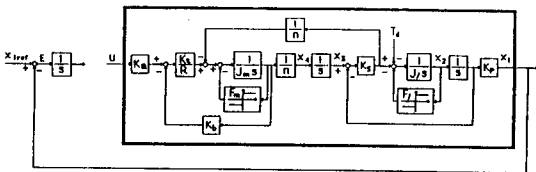


그림 3. 적분기가 추가된 시스템

Fig. 3. Augmented System

그림 3 에 대한 시스템 방정식을 세우기 위하여, 새로운 변수 x_5 를 다음과 같이 정의한다.

$$x_5 = x_{1ref} - x_1$$

그러면 전체 시스템의 차수(order)는 하나 증가되고, 차수가 증가된 시스템은 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 9.55 & 0 & 0 & 0 \\ -1309 & 0 & 12500 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 63.6 & 0 & -607 & -61.3 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 25f_1(x_2) \\ 0 \\ 636f_m(x_4) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 18.1 \\ 0 \end{bmatrix} u - \begin{bmatrix} 0 \\ 25T_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ x_{1ref} \end{bmatrix} \quad (S2)$$

이때에, 응답속도가 늦을 경우에는 스프링 양단의 위치가 거의 같다고 볼 수 있으므로, 스프링 파라미터가 무한대($K_s=\infty$)라고 가정할 수 있다. 즉, 로봇 팔이 비교적 천천히 움직일 경우에는 축의 스프링효과를 무시하여도 좋을 것이다. 따라서, 이 경우에는 시스템 (S2) 는 다음과 같이 3차식으로 간략화 될 수 있고, 이 식을 이용하여 PID 제어기의 계수를 결정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 9.55 & 0 \\ 0 & -58.40 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 607f_m(x_2)+1.16f_1(x_2) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 17.24 \\ 0 \end{bmatrix} u - \begin{bmatrix} 0 \\ 1.16T_d \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ x_{1ref} \end{bmatrix} \quad (S3)$$

위의 시스템에 대한 PID 제어기는

$$U(s) = \frac{K_I}{s} E(s) - (K_1 + K_2 s) X_1(s) \\ = K_I X_5(s) - (K_1 + K_2 s) X_1(s)$$

와 같이 주어지며, 이 PID 제어기의 계수를 구하기 위하여 다음과 같이 평가함수를 정의한다.

$$J_1 = \int_0^{\infty} (q_1 x_1^2(t) + q_2 x_2^2(t) + q_3 x_3^2(t) + u^2(t)) dt$$

PID 제어기의 계수들은 위에 주어진 평가함수를 식 (S3)에 대하여 최소화 하여 구할수 있는데, 이때에 x_{1ref} , T_d , F_1 , F_m 들은 모두 0 으로 놓는다. 그림 4 는 제어기의 구성도를 보여준다.

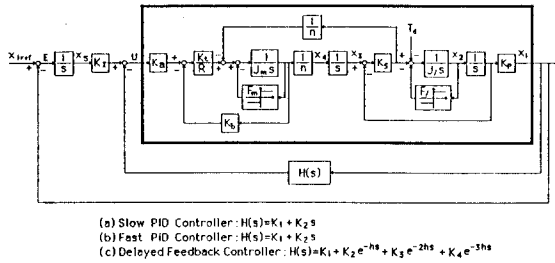


그림 4. 제어 시스템

Fig. 4. Feedback Control System

위의 평가함수에서 $q_1=0, q_2=0, q_5=900$ 의 값을 사용했을때의 최적 제어기는

$$K_1=30, H(s)=5.1+0.08s$$

이며, 이에대한 스텝(step)응답은 그림 5 와 같다. 그림에서 보는바와 같이 세틀링(settling) 시간은 약 5초이며, 비교적 양호한 응답을 보여주고있다.

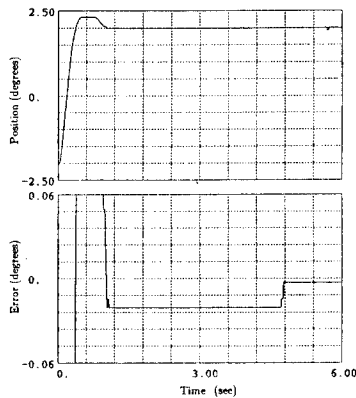


그림 5. $K_1=30, H(s)=5.1+0.08s$ 에 대한 스텝 응답 및 오차
 Fig. 5. Step Response and the Error for

$$K_1=30, H(s)=5.1+0.08s$$

시스템의 응답속도를 빠르게 하기위해서, 평가함수에 대한 웨이팅 인수(weighting factor)를 다음의 값으로 변경을 하였다.

$$q_1=0, q_2=0, q_5=30000$$

위의 웨이팅 인수들에 대한 최적제어는 다음과 같다.

$$K_1=170, H(s)=13.6+0.18s$$

위의 제어기를 실제 매니퓰레이터에 적용한후 보다 양호한 응답을 얻기위해서 계수들을 조정하였다. 이때에, 적분기의 계수는 고정을 시키고 나머지의 계수만을 실험적으로 조정 한 결과 다음과 같은 값들에 대해서 가장 양호한 응답을 얻었다.

$$K_1=170, H(s)=14+0.05s$$

이에대한 스텝응답은 그림 6 과 같다.

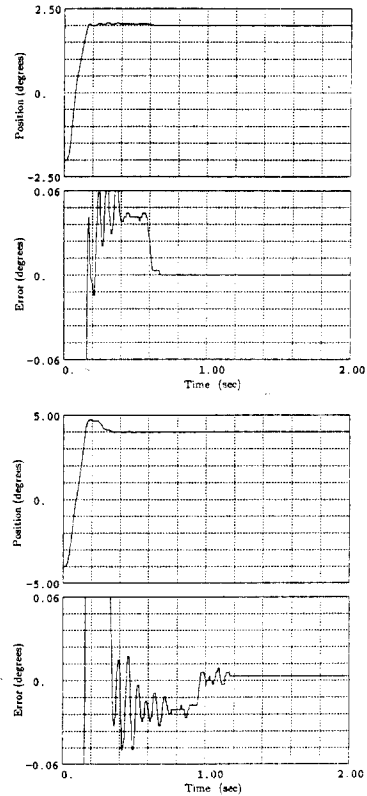


그림 6. $K_1=170, H(s)=14+0.05s$ 에 대한 스텝응답 및 오차
 Fig. 6. Step response and the Error for

$$K_1=170, H(s)=14+0.05s$$

그림에서 볼수있듯이 세틀링(settling) 시간은 약 1 초까지 줄었으나, 과도상태에서 상당한 진동현상을 볼수있다. 위에서 언급한바와 같이 위의 응답은 적분기의 계수는 고정시킨 상태에서 가장 양호한 응답이었고, PD 의 계수조정만으로는 진동현상을 제거할수 없었다. 물론 적분계수 K_1 를 줄이면 진동현상을 줄일수있으나, 응답속도가 따라서 느려지게 된다.

위의 결과로부터, 응답속도가 빠르게되면 3차식으로 간략화 시킨 식을 사용할수가 없게되고 원래의 시스템인 (S2)를 고려해야함을 알수가 있다. 이때, 대상으로 하고있는 매니퓰레이터에서 제어기 구성을 위해 사용 가능한 변수는 포텐쇼미터(potentiometer)에 의해 측정되는 위치변수 x_1 과 인위적으로 도입된 변수인 x_5 뿐 이다. 또한, 쿨롱마찰과 같은 비선형요소로인하여 관측기(observer)의 사용도 곤란하므로, 다음과 같은 지연피환 제어기(delayed feedback control)를 채택하였다.

$$u(t) = -(K_1 x_1(t) + K_2 x_1(t-0.005) + K_3 x_1(t-0.01) + K_4 x_1(t-0.015) + K_1 x_5(t))$$

혹은

$$H(s) = K_1 + K_2 e^{-hs} + K_3 e^{-2hs} + K_4 e^{-3hs}, \quad h=0.005$$

위의 제어기에 대한 계수들을 구하기 위해서 다음과 같은 평가함수를 도입하여, 이 평가 함수를 최소화하는 계수들을 구하였다.

$$J_2 = \int_0^{\infty} (q_1 x_1^2(t) + q_2 x_2^2(t) + q_3 x_3^2(t) + q_4 x_4^2(t) + q_5 x_5^2(t) + u^2(t)) dt$$

일반적인 제어기의 설계에서는 항상 그러하듯이, 먼저 이론에 의한 제어 계수들을 구해서 실제 시스템에 적용을 한후 보다 좋은 응답을 얻기 위해서 각 계수들을 조금씩 조정하였다. 이때, 앞의 PID제어기와 비교하기 위해서 평가함수의 q_5 는 PID경우와 같은 값인 30000을 사용하였고 나머지는 0으로 놓았다. 즉

$$q_1=0, q_2=0, q_3=0, q_4=0, q_5=30000$$

의 값들을 사용하여 최적 지연궤환 계수(optimal delayed feedback parameters)를 얻은 결과 다음과 같다.

$$K_1=170, K_2=216, K_3=-480, K_4=395, K_5=-117$$

위에서 언급한 바와 같이, 이 계수들을 실제 시스템에 적용시킨후 계수들을 조금씩 조정하여 가장 양호한 응답을 다음의 계수값들에 대하여 얻을 수 있었다.

$$K_1=170, K_2=184, K_3=-430, K_4=360, K_5=-100$$

이때의 스텝 응답은 그림 7에 보는바와 같다. 그림에서 볼수 있듯이, 같은 적분계수에 대해서 PID의 경우는 진동현상을 제거할수 없었으나, 지연궤환을 사용하였을 경우는 진동현상이 거의 제거되었음을 알수있다.

4. 결론

본 고에서는 기어나 체인을 통해서 직류모터로 구동어 되는 로봇트 매니퓰레이터의 제어기 설계문제가 논의되었다. 빠른 응답이 요구되지 않을 경우에는 PID 제어기로도 양호한 응답을 얻을수 있으나, 빠른 속도의 응답이 요구되는 경우에는 기어나 체인의 스프링 효과를 고려한 모델을 사용하여 제어기의 설계를 하여야 한다. 이때에, 진동현상이 과도응답에서 나타나지 않는 양호한 응답을 얻기 위해서는 모든 상태변수의 궤환이 필요하지만, 실제 시스템에서는 모든 상태변수가 항상 측정가능하지는 않다. 또한, 쿨롱마찰등과 같은 비선형 요소로 인하여 관측기(observer)의 사용 또한 어렵다. 본 고에서는, 이와 같은 문제의 해결책으로, 측정가능한 변수의 지연궤환을 이용한 제어기의 사용이 제시되었고, 실제의 실험용 로봇트 매니퓰레이터에 적용한 결과를 보여주었다.

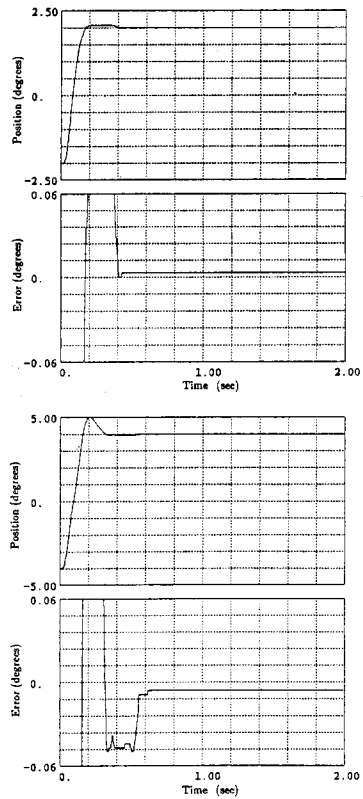


그림 7. $K_1=170$, $H(s)=184-430e^{-0.005s}+360e^{-0.01s}-100e^{-0.015s}$ 에 대한 스텝응답 및 오차

Fig. 7. Step response and the Error for

$$K_1=170, H(s)=184-430e^{-0.005s}+360e^{-0.01s}-100e^{-0.015s}$$

참고문헌

- [1] M.C. Good, L.M. Sweet and K.L. Strobel, "Dynamic Models for Control System Design of Integrated Robot and Drive Systems", Transactions of the ASME, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.107, March 1985.
- [2] L.M. Sweet and M.C. Good, "Redefinition of the Robot Motion-Control Problem", *IEEE CONTROL SYSTEM MAGAZINE*, Vol.5, No.3, Aug. 1985.
- [3] S.C. Won, D-J Lim and D.H. Chyung, "D-C Motor Driven Robotic Manipulator Control", *Proceedings of IEEE 24th CDC*, Dec. 1985.
- [4] J.H. Kim and D.H. Chyung, "Delayed Feedback Optimal Controller", *IFAC World Congress IX*, Budapest, Hungary, July 1984.