

예측제어기를 이용한 네트워크 시간지연 보상

허 화 라 박 재 한 이 장 명
 부산대학교 전자공학과

Compensation of Network Time Delay Using Predictive Controller

Hwa R. Hur, Jae H. Park and Jang M. Lee
 Pusan National University
 hrhur@hyowon.pusan.ac.kr

ABSTRACT

A predictive controller is designed based upon stochastic methods for compensation of network time delay which caused by the spatial separation between controllers and actuators. Current commands are generated by using time varying probability functions which can be defined according to the values of previous control inputs and actual outputs. To demonstrate the effect of this control methodology, simulation experiments are performed. The results show that even an unstabilized system by a long time delay can be stabilized with this predictive controller.

예측하여 제어하는 방법이 연구되어지고 있는데 [1]-[2], 기존의 시간지연의 보상 방법에서는 보다 정밀한 플랜트의 모델링이 요구되며, 시간지연이 일정하여야 하며, 외란이 없다는 가정 등의 여러 제약조건이 많다[3]. 본 연구에서는 현재 입력된 과거값에서 선형예측함수를 구하여 예측된 값과 출력의 발생확률을 고려하여 예측할 수 있는 예측 제어기 모델을 제안하고, 이를 실제 적용하여 보다 안정적이고 시간지연의 영향을 최소화하는 시스템을 구현하여 제안된 모델의 타당성을 검증하고자 한다. 이에 따라 본 연구에서는 DC 서보모터 제어에 Network을 고려한 임의의 시간지연요소를 인가하여 시스템의 출력에 나타나는 영향과 예측 모델을 적용하였을 때 나타나는 시간지연의 영향을 비교, 고찰하고자 한다.

I. 서론

전자제어 기술이 발달함에 따라 많은 제어 시스템이 Vehicle에 적용되어 자동차의 전자제어 엔진 시스템에서부터 항공기의 자동 항법장치 등에 이르기까지 광범위하게 발전되어 왔으며, 최근에 이르러 이들 제어 시스템이 Network을 통하여 제어되는 통합제어시스템에 대한 관심이 고조되고 있다. 다수의 제어기가 Network을 통하여 분산제어되는 경우 시스템의 제어루프 내부에 어떤 불가피한 시간지연 요소가 존재하게 되며 이러한 시간지연은 제어기의 성능 및 전체 시스템의 안정성에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이러한 시간지연을 보상하여 그에 따르는 영향을 최소화하기 위하여 과거의 상태에서 현재 및 미래상태를

II. 예측모델

기존의 예측은 플랜트의 모델을 정확히 구하여 앞으로의 출력을 예측하는 방법으로 모델링이 정확히 되면 좋은 특성을 얻을 수 있으나, 플랜트의 모델링 오차가 커진다거나 모델링이 되지 않는 비선형 시스템에 대해서는 사용할 수 없는 단점이 있다. 본 논문에서는 과거의 출력과 현재의 출력사이에 상관관계가 크며 출력이 랜덤하지 않은, 제어에서의 일반적인 플랜트에 대하여 적용가능한 예측모델로 식(1)을 제안한다.

$$y_p[n + d_0] = f_L\{d_0, \mathcal{Y}[n], \dots, \mathcal{Y}[n - M]\} \cdot f\{f_L(\dots), \mu_N, \sigma^2\} \quad (1)$$

제안된 예측모델은 n 시점으로부터 N 개의 이전 값에서 d_0 이후의 값을 예측하는 모델로서, 지연된 N 개의 과거값에서 파라미터(평균 m_N , 분산 σ_N^2)를 추출하여 이후의 값을 예측한다. 예측오차에 대해서는 예측모델 자체적으로 선형예측기의 1차 기울기이득 k_a 와 확률밀도함수의 분산이득 k_b 를 조정함으로써 처리한다. 예측모델의 구성은 그림 1과 같다.

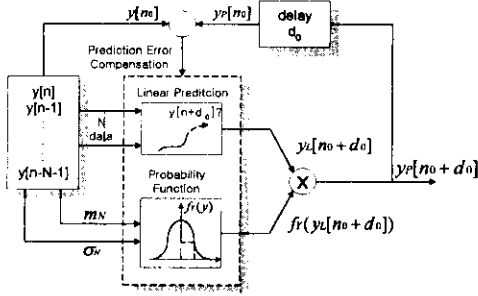


그림 1. 예측모델의 구성
Fig. 1. Construction of Predictive model

여기서 $f_L(d_0, y[n], \dots, y[n-N])$ 는 선형근사함수로 실제 사용된 함수는 Taylor 선형함수로 식(2)를 사용하였으며 k_a 는 1차 기울기 이득이다.

$$y_L[n_0 + d_0] = k_a \sigma_N d_0 \frac{dy[n]}{dn} \Big|_{n=n_0} + y[n_0] \quad (2)$$

또한 $f_Y(f_L(\dots), \mu_N, \sigma^2)$ 는 출력의 확률밀도함수로 식(3)의 일반적인 Gaussian 함수를 사용하였다. 여기서 분산(σ^2)은 평균(m_N)과 분산이득 k_b 에 영향을 받으며, ref 는 기준입력이다.

$$f_Y(y_n[n_0 + d_0], m_N, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y_L[n_0 + d_0] - ref}{\sigma}\right)^2\right) \quad (3)$$

$$(\sigma^2 = k_b \cdot |ref - m_N|^2)$$

제안된 예측모델은 출력값이 발생될 확률을 고려하여 선형예측과 함께 이후의 값을 추측하므로, 선형예측에서 발생될 수 있는 오차를 출력확률로서 보완하여 실제값에 가깝게 예측할 수 있는 모델이다. 여기서의 출력 확률밀도함수는 기준입력 ref 를 중심으로 하는 Gaussian 함수이며, 그 분산은 N 개의 과거값 평균(m_N)과 기준입력 ref 의 차이로서, m_N 이 ref 와 차이가 많을수록 출력의 발생확률은 넓은 범위에서 높게 나타난다. 이러

한 예측법은 플랜트가 Network에 의해 제어되는 시스템에서도 유용하게 사용할 수 있다.

III. 시간지연 시스템

3.1 시간지연을 갖는 제어시스템

제어기와 플랜트사이엔 원격이나 Network으로 구성된 제어시스템에서는 시간지연이 발생되며 이를 고려하여야 한다. 이러한 시스템에서 발생하는 시간지연의 가장 큰 원인은 데이터의 전송에서 발생하는 전송선로상의 시간지연으로 크게 2가지가 있다. 즉 제어기 출력에서 플랜트로 제어값이 전송되는 과정에서 발생하는 시간지연(d_{CA})과 플랜트 출력이 귀환되어 제어기로 전송되는 과정에서 발생하는 시간지연(d_{SC})으로 구분되며 그림 2에 시간지연을 포함한 제어시스템의 구성을 나타내었다.

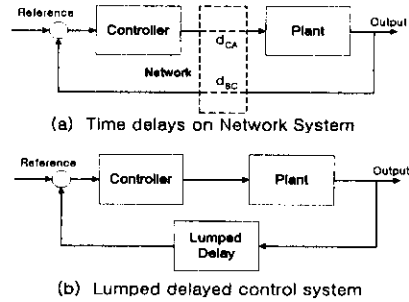


그림 2. 시간지연을 갖는 제어시스템
Fig. 2. Control System with Time-delay

3.2 제어시스템의 개요

본 연구에서는 DC 서보 모터 제어에 시간지연을 적용하였다. 구성된 제어시스템은 그림 3과 같이 제어기, 영차홀더(ZOH), 플랜트, 시간지연, Sampler로 구성되어 있다. 각 요소의 수식적 모델은 식(4)~(9)에 나타내었다. 플랜트는 DC 모터에 대하여 파라미터들을 구하여 모델링하였으며 제어기는 PID 제어기를 사용하였다.

PID 제어기 (Discrete-time PID controller)

$$m[k] = \left(K_p + \frac{K_i}{2}\right)e[k] + K_i \sum_{i=0}^k \frac{e[(k-1)] + e[i]}{2} + K_d(e[k] - e[(k-1)]) \quad (4)$$

$$G_D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \left[K_p + \frac{K_i}{1-z^{-1}} + K_d(1-z^{-1}) \right] \quad (5)$$

영차홀더 (Zero-Order Holder)

$$g_h(t) = u(t) - u(t-T) \quad (6)$$

$$G_H(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \quad (T: \text{sampling time}) \quad (7)$$

플랜트 (DC servo Motor)

$$G_P(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{1}{K_E} \frac{1/\tau_s}{s + 1/\tau_s} \quad (8)$$

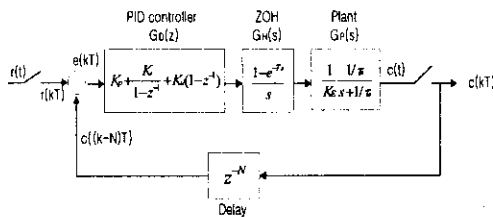
(τ_s : motor의 settling time)

시간지연: N sample delay

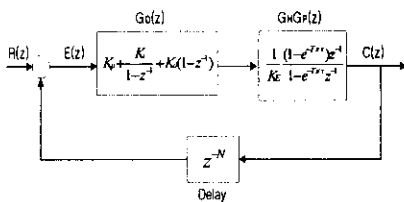
$$z^{-N} \quad (9)$$

이 시스템의 모델에서 전체전달함수는 식(10)으로 주어진다.

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{z^{-N} G_D(z) G_H G_P(z)}{1 + z^{-N} G_D(z) G_H G_P(z)} \quad (10)$$



(a) DC motor control model with time delay



(b) Delayed control system model with Z variable

그림 3. 시간지연 시스템의 모델
Fig. 3. model of delayed control system

3.3 제어시스템의 시간지연영향

구성된 제어시스템에 시간지연을 인가하여 시스템의 특성변화와 출력을 관측하였다. 시간지연에 따라 시스템의 극점을 조사하고 단위 계단응답을 simulation하여 그림 5(a)-7(a)에 나타내었다. 극점의 위치가 시간지연이 증가될수록 Z 평면상의 단위원 경계면과 가까운 곳에서 구해졌으며, 그에 따라 출력의 진동이 커지며 응답이 느린 불안정한 시스템특성을 나타내었다. 또한 6 sample 이상의 지연에 대하여는 극점이 단위원의 외부에 발생되

어 시스템의 출력은 발산하며 불안정하게 되었다. 단위계단응답은 시스템의 외란에 대한 특성을 나타내므로 전송지연 등의 외란이 가해 졌을 때 시간지연 시스템은 안정성 및 응답속도에서 심각한 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 제한한 예측기를 적용하여, 예측할 수 없는 불확실한 시간지연 및 외란에 대한 출력의 영향을 최소화하는 더욱 강인하며 안정적인 시스템을 구현하고자 한다.

3.4 예측제어기를 적용한 시간지연시스템

시간지연이 제어시스템의 출력과 안정성에 심각한 영향을 미친다는 것을 3.3절의 결과에서 알 수 있었다. 이는 현재 케환된 값이 시간지연으로 인한 과거의 출력값이기 때문이다. 만약 현재 케환되어진 과거값들에서 현재의 값 및 미래의 값을 추측하여 제어를 하며, 이 추측된 값이 실제값과 오차가 작다면 시간지연의 영향은 현저하게 감소할 것이다. 따라서 본 논문에서 제한한 예측기를 그림 4와 같이 실제 시간지연 시스템에 적용하여, 지연에 따른 시스템의 출력을 적용되지 않은 시스템과 관측 및 비교하여 예측기의 성능 및 타당성을 검증한다.

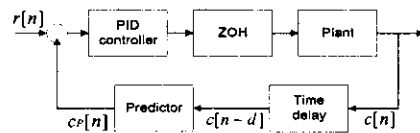


그림 4. 예측기를 적용한 시간지연시스템
Fig. 4. Time delay system with predictor

IV. 실험결과 및 고찰

시간지연에 따라 예측기를 추가한 시스템에 대하여 실험한 결과를 다음에 나타내었다. 제어주기는 10 msec로 설정하였고 플랜트 즉 DC모터의 모델 파라미터 τ_s 는 130 msec로 K_e 는 2로 실험을 통해 설정하였다. PID 제어기의 이득은 $K_p=10, K_i=2, K_d=2$ 로 각각 설정하였으며, 예측기의 추정샘플수 N 은 10으로, k_a 와 k_b 의 초기치는 1로 설정하였다. 제어시스템의 출력응답특성을 관측하기 위하여 기준입력은 200 [pulse/ms]로 하여 예측기를 사용하여 시간지연을 보상한 시스템과 보상하지 않은 시스템에 대하여 단위계단응답을 구하였다. 시간지연의 실험은 지연이 없을

때, 3 sample 지연이 있을 때 (30 msec 지연), 6 sample 지연이 있을 때(60 msec 지연)의 3가지의 경우에 대하여 출력을 관측하였다.

(1) 그림 5은 시간지연이 없을 때의 제어시스템의 단위계단응답으로 실험된 제어기는 18 샘플(180 msec)에서 입력에 대하여 완전히 추종한다.

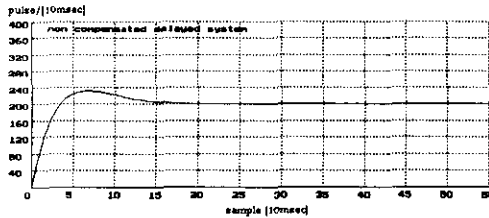


그림 5. 지연이 없을 때의 시스템의 응답
Fig. 5. Response of non-delayed system
(sampling time: 10msec, Kp: 10, Ki: 2, Kd: 2)

(2) 그림 6은 3 sample (30 msec)의 지연이 있을 때의 제어시스템의 단위계단응답이다. (a)의 시간지연이 보상되지 않은 시스템의 출력은 진동이 심하며 응답속도 또한 많이 늦어짐이 확인된다. 그러나 예측기를 적용한 시스템의 출력 (b)는 진동도 심하지 않으며 응답속도의 변화도 지연이 없을 때와 큰 차이가 없음이 관측된다.

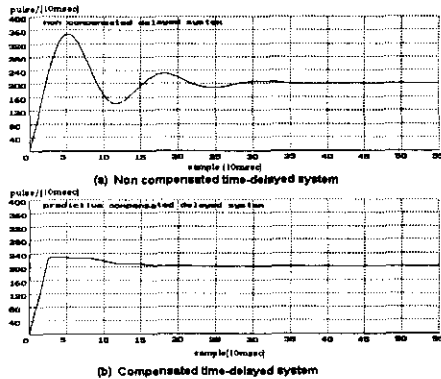


그림 6. 3 샘플 지연이 있을 때의 시스템의 응답
Fig. 6. Response of 3 sample delayed system (30 msec)

(3) 그림 7은 6 sample (60 msec)의 시간지연이 있을 때의 제어시스템의 단위계단응답이다. 시간지연이 보상되지 않은 시스템은 출력 (a)에서 수렴되지 못하고 발산하여 불안정한 시스템이 됨을 알 수 있다. 그러나 예측제어가 적용된 시스템의 출력 (b)에서는 약간의 진동과 overshoot이 발생되나 출력이 수렴되어 안정하며 응답속도의 영

향도 크지 않음을 알 수 있다.

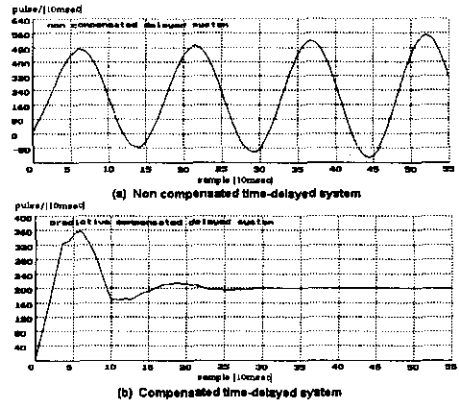


그림 7. 6샘플 지연이 있을 때의 시스템의 응답
Fig. 7. Response of 6 sample delayed system (60 msec)

V. 결론

본 논문에서는 시간지연을 가지는 시스템에 대하여 시간지연에 따르는 문제를 극복하는 방법으로 예측모델을 제안하였으며 예측모델이 적용된 시간지연시스템은 지연에 따르는 치명적인 영향이 보상되어 안정한 시스템이 된다는 것을 확인하였다. 이러한 결과에서 예측기를 적용한 시간지연 시스템은 Network 전송지연을 포함하는 불확실한 시간지연과 외란에 대하여 보다 안정적이며 강한 시스템임을 확인하였다. 제안된 모델은 플랜트에 대한 대략적인 정보만으로도 가능하므로 많은 곳에서 적용가능 하다고 생각한다. 향후 연구 과제로는 예측모델의 예측구간에 한계가 있어 제한된 범위 이후의 값은 예측이 어려운 문제가 있으므로, 예측모델의 이득조정의 최적화와 플랜트에 따른 최적의 확률함수를 구하여 예측구간을 더욱 확장하는 것이다.

참고문헌

- [1] T.Furukawa and E.Shimenura, "Predictive Control for Systems with Time Delay", International Journal of Control, Vol.37, No.2, pp.399-412, 1983
- [2] Z. Q. Wang and S. Skogestad, "Robust Control of time-delay systems using the Smith predictor" Internat.J. Control, vol.57, No.6, pp.1405-1420,1993
- [3] J. E. Marshall, H.Gorecki, A.korytowski, and K. Walton, "Time-Delay Systems: Stability and Performance Criteria with Application", Ellis Horwood Limited, 1992