論文99-36S-2-6

예측제어기를 이용한 시간지연 보상

(Compensation of Time Delay Using Predictive Controller)

許 花 羅 *, 朴 宰 漢 *, 李 章 明 *

(Hwa R. Hur, Jae H. Park, and Jang M. Lee)

요 약

제어기와 플랜트가 공간상으로 분리되어 폐루프 내부에 시간지연이 불가피하게 존재하는 제어시스템의 시간지연 문제를 보상하기 위하여 확률 모델에 기반하여 설계된 예측제어기를 제안한다. 예측제어기는 지연된 이전의 값들로부터 선형예측 기법과 확률함수를 이용하여 실제의 현재값을 추정하며, 이를 제어기에 적용하여 시간지연에 의하여 발생되는 문제점을 최소화하였다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 DC 서보모터 시스템에 본 알고리즘을 실현하였으며, 상이한 시간지연에 따른 제어시스템의 영향을 관측하였다. 실험결과에서 예측제어기는 시간지연에 대하여 PID 제어기보다 우수한 수렴특성을 나타내었으며, 제어기의 안정범위 내에서 허용할 수 있는 최대 시간지연 값도 증가시킬 수 있음을 보였다. 제안된 예측제어기는 플랜트의 모델링을 요구하지 않고 출력의 통계적 정보만을 사용하므로 모델링이 어려운 시스템의 제어나 PID 제어의 보상기로 활용할 수 있는 범용적인 기법이다.

Abstract

A predictive controller is designed based upon stochastic methods for compensating time-delay effects on a system which has inherent time-delay caused by the spatial separation between controllers and actuators. The predictive controller estimates current outputs through linear prediction methods and probability functions utilizing previous outputs, and minimizes the malicious phenomena caused by the time-delay in precision control systems. To demonstrate effectiveness of this control methodology, we applied this algorithm for the control of a tele-operated DC servomotor. The experimental results show that this predictive controller is superior to the PID controller in terms of convergence-characteristics, and show that this controller expands the maximum allowable time-delay for a system maintaining the stability. Since the proposed predictor does not require models of plants - it requires only stochastic information for outputs --, it is a general scheme which can be applied for the control of systems which are difficult to model or the compensator of PID control.

I. 서 론

전자제어 기술이 발달함에 따라 많은 제어시스템이 vehicle에 적용되어 자동차의 전자제어 엔진 시스템에서부터 항공기의 자동 항법장치 등에 이르기까지 광범위하게 발전되어 왔으며, 최근에 이르러 이들 제어시스템이 네트워크를 통하여 제어되는 통합제어시스템에 대한 관심이 고조되고 있다. 다수의 제어기가 네트워크를 통하여 분산 제어되는 경우 시스템의 제어루프 내부에 어떤 불가피한 시간지연 요소가 존재하게 되며 이러한 시간지연은 제어기의 성능 및 전체시스템의 안정성에 심각한 영향을 미칠 수 있다[1]. 또한, 플랜트의 구성 요소 중에서 모터에 의한 회전운동을 직선운

* 正會員, 釜山大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Pusan National University)

接受日字:1998年7月28日, 수정완료일:1999年1月20日

동으로 변환시켜 이를 이용하는 시스템의 경우에 있어서 직선운동의 방향이 전환되는 양끝 점에서의 운동을 모터측 관점에서 볼 때 방향이 전환되는 시점에서 외란이 발생된 것으로 보이며, 이것은 시스템의 안정성 문제를 발생시킨다. 따라서 이러한 시간지연을 보상하여 그에 따르는 영향을 최소화하기 위하여 과거의 상태에서 현재 및 미래상태를 예측하여 제어하는 방법이 연구되고 있는데[2,3], 이러한 기존의 시간지연 보상 방법에서는 보다 정밀한 플랜트의 모델링이 요구되며, 시간지연이 일정하여야 하며, 외란이 없다는 가정 등의 여러 제약조건이 많다. 본 연구에서는 현재 시점을 기준으로 이전에 입력된 과거값으로부터 선형 예측함수를 구하고, 출력값의 확률분포를 고려한 확률함수를 구하여 미래의 출력을 예측할 수 있는 예측제어기 모델을 제안하며, 이를 실제 적용하여 보다 안정적이고 시간지연의 영향을 최소화하는 시스템을 구현하여 제안된 모델의 타당성을 검증한다. 이에 따라 본 연구에서는 DC 서보 모터 제어에 시간지연 요소를 인가하여 시스템의 출력에 나타나는 영향과 예측모델을 적용하였을 때 나타나는 시간지연의 영향을 비교, 고찰한다.

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 시스템이나 시간지연이 큰 시스템에 대해서는 적용하기가 어렵다는 단점이 있다[4,5]. 본 논문에서는 과거의 출력과 현재의 출력 사이에 상관관계가 크며 출력이 랜덤하지 않은, 제어에서의 일반적인 플랜트에 대하여 적용 가능한 예측모델로 식(1)을 제안한다.

$$y[n+d]=y[n]+f_L\{d,y[n],\cdots,y[n-M]\}\cdot f_P\{f_L,m_N,\sigma^2\} \tag{1}$$

여기에서

a : 시간지연

$y[n]$: 현재 시점의 출력값

$y[n+d]$: 시간지연을 고려하여 예측한 출력값

$y[n-M]$: $y[n]$을 기준으로 N샘플 이전에 출력되어진 과거값

f_L : 선형예측함수

f_F : 확률함수

m_N : 현재 시점을 기준으로 과거 N개의 출력값에 대한 평균값

σ^2 : 현재 시점을 기준으로 과거 N개의 출력값에 대한 분산

제안된 예측모델은 n 시점에서 N개의 이전 값으로부터 a 이후의 값을 예측하는 모델로서, 지연된 N개의 과거값에서 파라미터(평균 m_N ,분산 σ^2)를 추출하여 a 이후의 값을 예측한다. 예측모델의 구성은 그림 1과 같다.

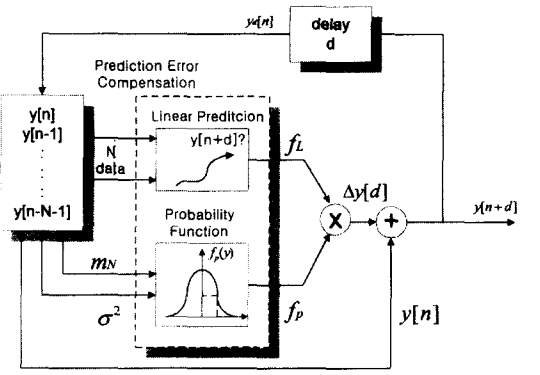


그림 1. 예측 모델의 구성

Fig. 1. Construction of Predictor model.

여기서 $f_L\{d,y[n],\cdots,y[n-M]\}$은 선형예측함수의 미분값으로 식(2)로 정의하며, 확률함수 $f_P\{f_L,m_N,\sigma^2\}$는 식(3)으로 표시되는 Gaussian 함수를 사용하였다. 이 함수들을 결합한 식(1)은 현재값 $y[n]$과 그 이전의 값들 $y[n-1]$, $y[n-2]$,$\cdots$, $y[n-N-1]$로부터 a 이후의 값 $y[n+d]$를 예측함을 의미한다. 예측된 a 이후의 값은 현재값 $y[n]$에 a 이후 값의 변화량 $\Delta y[d]$가 부가되어 $y[n+d]=y[n]+\Delta y[d]$ 의 형태로 나타난다. 여기서 현재값에서 a 이후 값의 변화 $\Delta y[d](y[n+d]-y[n])$는 선형예측함수와 확률함수의 곱($f_L\times f_F$)으로 주어진다. f_L은 선형예측함수로 식(2)와 같이 $y[n]$의 변화로부터 구한다. 또한, f_F는 $y[n]$의 확률함수로서 f_L의 값을 조정하는 역할을 한다. 추정한 선형예측함수(f_L)로 예측된 결과가 실제 출력값이 나타날 확률이 낮은 부분(기준 입력값과 많이 떨어진 부분)에서 구해지면 f_L의 값은 신뢰성이 낮으므로 그 확률을 곱하여 f_L의 값이 작아지도록 보정하며, 반대로 예측된 결과가 나타날 확률이 높은 부분(기준 입력값과 가까운 부분)에서 구해지면 큰 확률값이 곱해

져서 $\Delta y[d]$에 f_L의 값이 많이 반영된다. 확률함수는 예측 자체에 어떠한 영향을 미치지는 않고 예측된 결과를 보정하는 역할을 한다.

확률함수는 과거의 값들로부터 구하며, 확률이 가장 높은 부분은 기준입력 부분이다. 이는 PID 제어기 자체는 정상상태 오차가 0이며, 시스템이 발산하지 않는 이상, 출력은 기준입력에 추종하여 수렴하기 때문이다. 그리고, 출력은 과도 상태에서는 비교적 넓은 범위에서 나타나서 점차적으로 수렴되므로 확률함수의 분산 또한 그에 따라 변화되어야 한다. 따라서 식 (3)과 같이 확률함수의 중심을 기준입력으로 정하고 그 분산은 관측된 과거값들의 평균으로 하면 위의 두 가지 조건을 동시에 만족시킬 수 있다. 출력이 수렴하면 확률함수 역시 기준을 중심으로 수렴된다.

1. 선형예측함수에 의한 시간지연 보상값의 1차 예측

$f_L\{d, y[n], \cdots, y[n-M]\}$은 Taylor 급수를 이용한 선형 근사 함수의 예측값으로 식(2)로 정의한다. 여기서 T는 제어주기이다.

$$f_L(\delta) = \frac{dy(t)}{dt}\delta + \frac{1}{2!}\frac{d^2y(t)}{dt^2}\delta^2 + \cdots + \frac{1}{r!}\frac{d^r y(t)}{dt^r}\delta^r + \cdots \Big|_{t=t_0}$$

(continuous time)

$$f_L(d) = \frac{1}{T}\left((y[n]-y[n-T])(Td) + \frac{1}{2!}(y[n]-2y[n-T]+y[n-2T])(Td)^2 + \cdots\right)\Big|_{n=n_0}$$

(discrete time)

(2)

Taylor 급수에 의해 $y[n_0+d] = y[n_0] + \frac{1}{T}y'[n_0](Td) + \frac{1}{2!T}y''[n_0](Td)^2 + \cdots = y[n_0] + f_L(d)$로 n_0에서 d 이후의 변화량 $\Delta y[d] = y[n_0+d] - y[n_0] = f_L(d)$를 예측할 수 있다.

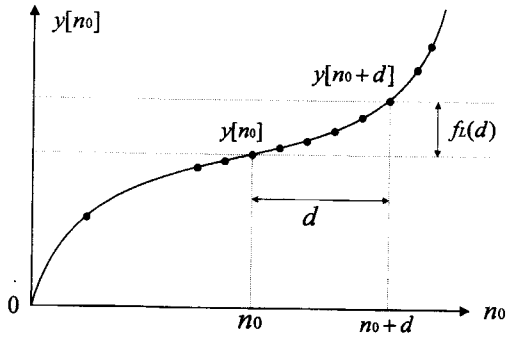


그림 2. 선형 예측법에 의한 d 샘플 이후의 변화량 예측

Fig. 2. Prediction of variation afterwards d sample by linear prediction method.

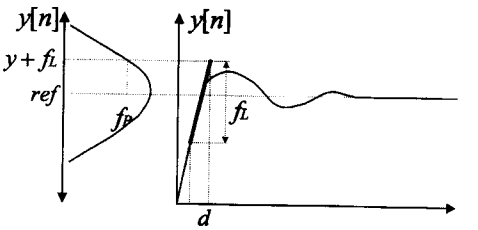
실제 제어주기 T는 일반적으로 짧은 시간이므로 고차항은 매우 작은 값이 된다. 실제 실험에서도 T는 10 [ms] 로 설정하여 3차항 즉, $(Td)^3$ 이상의 항은 무시하였다. 따라서 $f_L(d)$를 2차항까지 사용하여 예측된 결과는 $y[n_0+d] = y[n_0] + f_L(d)$로서 구해지며 예측된 결과의 타당성을 출력의 발생확률에 의해 다시 보상한다.

2. 확률함수

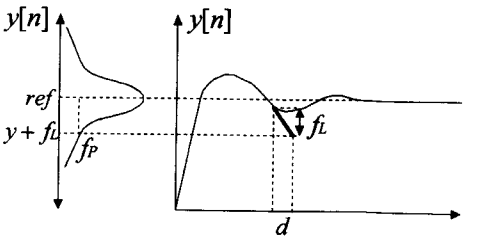
$f_P\{f_L, m_N, \sigma^2\}$는 출력의 확률함수로 식(3)으로 표시되는 Gaussian 함수를 사용하였다. 여기서 분산(σ^2)은 평균(m_N)과 분산 이득 k_a에 영향을 받으며, ref는 기준입력이다.

$$f_P\{f_{L,m_N},\sigma^2\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(y[n]+f_L)-ref}{\sigma}\right)^2\right) \quad (3)$$

단, $\sigma^2 = k_a \cdot |ref - m_N|^2$으로 정의된다



(a)



(b)

그림 3. 각 상태에 따른 선형예측과 확률함수
(a) y [n] 의 분산이 큰 경우의 fL, fP (b) y [n] 의 분산이 작은 경우의 fL, fP

Fig. 3. Linear prediction and probability function at each case.
(a) value of fL, fP for large variance of y [n] (b) value of fL, fP for small variance of y [n]

제안된 예측모델은 출력값이 발생될 확률을 고려하여 선형예측과 함께 이후의 값을 추측하므로, 선형예

측에서 발생될 수 있는 오차를 출력 확률로서 보완하여 실제 값에 가깝게 예측할 수 있는 모델이다. 그림 3에서와 같이 출력 확률 밀도 함수는 기준입력 rej를 중심으로 하는 Gaussian 함수이며, 그 분산은 N개의 과거값의 평균(m_N)과 기준입력 rej의 차이로서, m_N이 rej 와 차이가 많을수록 출력의 발생 확률은 넓은 범위에서 높게 나타난다. 즉 그림 3. (a)는 모터가 기동될 때나 수렴 상태에서 시간지연이 발생되었을 때 나타나는 경우로 분산이 크므로 높은값이 f_L에 곱해져 현재값 $y[n]$에 보상되며, 그림 3. (b)는 수렴되기 이전의 상태로 분산이 작아 낮은값이 f_L에 곱해져 현재값 $y[n]$에 보상된다.

Ⅲ. 시간지연 시스템

1. 시간지연을 갖는 제어시스템

제어기와 플랜트 사이에 원격이나 네트워크로 구성된 제어시스템에서는 시간지연이 발생되며 이는 제어 성능 및 안정도에 심각한 문제를 야기한다. 이러한 시스템에서 발생되는 시간지연의 원인은 데이터의 전송에서 발생되는 전송 선로상의 시간지연으로 제어기 출력에서 플랜트로 제어값이 전송되는 과정에서 발생되는 시간지연(d_{CA})과 플랜트 출력이 궤환되어 제어기로 전송되는 과정에서 발생되는 시간지연(d_{SC})으로 구분되며[6-8], 그림 4. (a)에 시간지연을 포함한 제어시스템의 등가 모델을 보여준다.

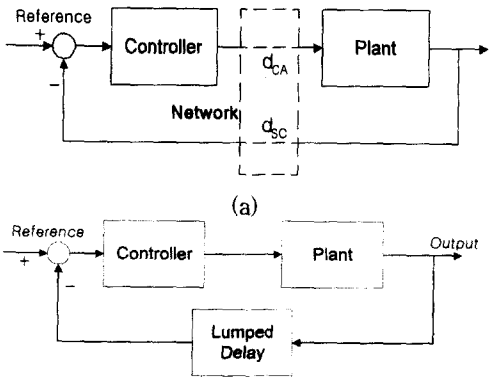


그림 4. 시간지연을 갖는 제어 시스템
(a) 네트워크 시스템 상의 시간지연 (b) 통합된 시간지연 제어 시스템

Fig. 4. Conrol system with time delay.
(a) Time delays on network system (b) Lumped delayed control system

또한, 그림 4. (a)로 표시된 시간지연을 포함한 제어시스템은 시간지연 효과를 해석하기 위하여 그림 4. (b)와 같이 시간지연은 출력에서 기준값으로의 궤환 경로에만 존재하는 간략화된 모델로 표시된다[6-7].

2. 제어시스템의 개요

본 연구에서는 DC 서보 모터 제어에 시간지연을 적용하였다. 구성된 제어시스템은 그림 5와 같이 제어기, 영차 홀더(ZOH), 플랜트, 시간지연 및 샘플러로 구성되어 있다. 각 요소의 수식적 모델은 식(4)~(9)에 나타내었다.

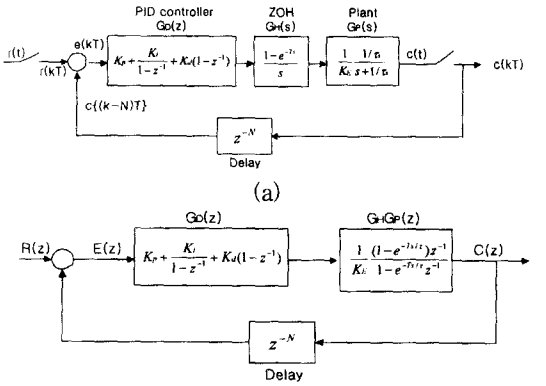


그림 5. 시간지연 시스템의 모델
(a) 시간지연을 포함한 DC 모터 제어 시스템의 모델 (b) 시간지연 시스템의 Z 전달함수 모델

Fig. 5. Model of delayed control system.
(a) DC motor control model with time delay
(b) Delayed control system model with Z variable

플랜트는 DC 모터에 대하여 파라미터들을 구하여 모델링 하였으며 제어기는 이산시간 PID 제어기(Discrete-time PID controller)를 사용하였으며, 아래와 같이 표시된다.

이산시간 PID 제어기(Discrete-time PID controller) :

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

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

또한, 영차 홀더(Zero-Order Holder), 플랜트(DC 서

보 모터), 시간지연(N샘플 지연) 은 아래와 같이 표시된다.

영차 홀더(Zero-Order Holder) :

$$g_h(t) = u(t) - u(t-T) \tag{6}$$

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

플랜트(DC 서보 모터) :

$$G_P(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{1}{K_E}\frac{1/\tau_s}{s+1/\tau_s} \quad (\tau_s : \text{모터의 정착 시간}) \tag{8}$$

시간지연 (N샘플 지연) :

$$z^{-N} \tag{9}$$

최종적으로 그림 5에 표시된 시스템의 전달함수는 식(4)~(9)에 의하여 식(10)으로 주어진다.

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{z^{-N}G_D(z)G_HG_P(z)}{1+z^{-N}G_D(z)G_HG_P(z)} \tag{10}$$

3. 제어시스템의 시간지연 영향

시스템의 극점은 그림 6과 같이 극점의 위치가 시간지연이 증가될수록 Z 평면상의 단위원 경계면과 가까운 곳으로 접근하며, 그에 따라 출력의 진동이 커지며 응답이 느린 불안정한 시스템 특성을 나타낸다[9].

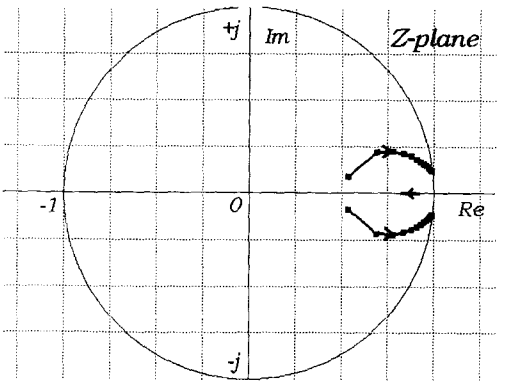


그림 6. 시간지연에 따른 극점의 이동
Fig. 6. Movement of pole locations as increament of time delay.

또한, PID 알고리즘만 채택할 경우 시간지연이 발생하면 극점이 단위원의 외부에 발생되어 시스템의 출력은 발산하며 불안정하게 된다. 단위계단응답은 시스템의 외란에 대한 특성을 나타내므로 전송지연이나, 모터의 회전운동을 변환시켜 직선운동을 요구하는 경우 직선운동의 방향전환 시점에서 나타나는 부하 등의 외란이 가해졌을 때 시간지연 시스템은 안정성 및 응답속도에서 심각한 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 제안한 예측기를 적용하여, 예측할 수 없는 불확실한 시간지연 및 외란에 대한 출력의 영향을 최소화하는 더욱 강인하며 안정적인 시스템을 구현하고자 한다.

그림 6에서는 시간지연이 발생함에 따라 극점의 위치가 이동되어지는 과정을 보여준다.

4. 예측제어기를 적용한 시간지연 시스템

시간지연이 제어시스템의 출력과 안정성에 심각한 영향을 미친다는 것은 이론적으로 잘 알려져 있다. 시간지연을 출력값에서 입력값으로 궤환 경로에만 존재하는 것으로 모델링한 lumped 모델(그림 4. (b))을 사용하는 경우, 시간지연은 출력값이 궤환에서 지연되어 입력과 더해지는 결과로 된다. 만약 현재 궤환되어진 과거값들에서 현재의 값 및 미래의 값을 추측하여 제어를 하며, 이 추측된 값이 실제 값과 오차가 적다면 시간지연의 영향은 현저하게 감소할 것이다. 따라서 본 논문에서 제안한 예측기를 그림 7과 같이 실제 시간지연 시스템에 적용하여, 지연에 따른 시스템의 출력을 적용되지 않은 시스템과 관측 및 비교하여 예측기의 성능 및 타당성을 검증한다.

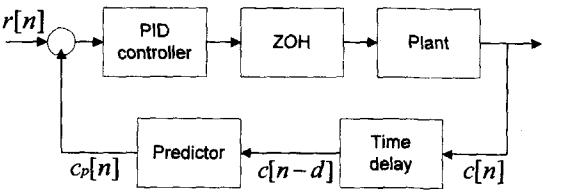


그림 7. 예측기를 적용한 시간지연 시스템
Fig. 7. Time delay system with predictor.

본 연구에서는 식(1)의 예측모델을 사용하여, 즉,

$C_P[n] = C[n-d] + f_L\{d, C[n], \cdots, C[n-M]\} \cdot f_P\{f_L, m_N, \sigma^2\}$

의 식으로 표시되는 예측기를 사용하여 시간지연에 강인한 제어기를 설계한다.

Ⅳ. 실험결과 및 고찰

선행 연구[10]에서 수행한 시뮬레이션을 바탕으로, 본 연구에서는 DC 모터로 실험을 수행하여 PID와 예

측제어기를 포함하는 PID를 비교 분석하였다. 실험조건은 다음과 같으며 실험 환경은 그림 8에 나타내었다.

<실험조건>

1. DC 서보 모터 : FMD-E20PA(200 [W])
2. 출력 : PWM(frequency : 500 [Hz] , resolution : 16 [bit])
3. 입력 : 엔코더(16 bit counter)
4. 제어 주기 : 10 [ms]
5. DC모터의 모델 파라미터(τ_S) : 130 [ms]
6. PID 제어기의 이득 : Kp=80, Ki=10, Kd=40
7. 샘플수(N) : 10 [sample]
8. 기준입력(ref) : 2000 [rpm]

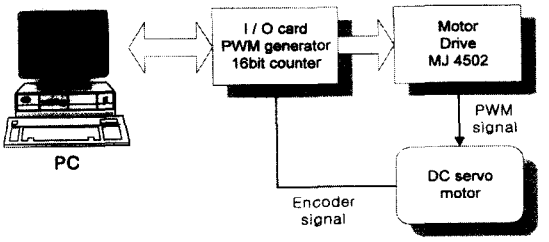


그림 8. 실험 환경
Fig. 8. Environment of experiment.

PID시스템과 예측제어기를 사용한 시간지연 보상 시스템과의 출력응답특성을 관측하기 위하여 단위계단 응답을 구하였다. 시간지연의 실험은 지연이 없을 때, 3샘플(30 [ms] 지연) 지연이 있을 때, 6샘플(60 [ms] 지연) 지연이 있을 때의 3가지의 경우에 대하여 그림 9,10,11에서 출력을 관측하였고, 입력이 삼각파와 정현파에 대해서도 그림 12,13에서 출력을 관측하였다.

1. 실험결과

(1) 그림 9는 시간지연이 없을 때의 제어시스템의 단위계단응답으로 실험된 PID 제어기는 약 26샘플(260 [ms] 지연)에서 입력에 대하여 완전히 추종하는 것을 보여준다.

(2) 그림 10은 3샘플(30 [ms])의 시간지연이 있을 때의 제어시스템의 단위계단응답이다. 그림 10. (a)의 시간지연이 보상되지 않은 시스템의 출력은 진동이 심하며 응답속도 또한 많이 늦어짐이 확인된다. 그러나 예측제어기를 적용한 시스템의 출력 그림 10. (b)는 진동이 없으며, 응답속도의 변화도 시간지연이 없는 PID제어 보다 좋은 약 22샘플(220 [ms] 지연)에서 입력에 대하여 완전히 추종한다.

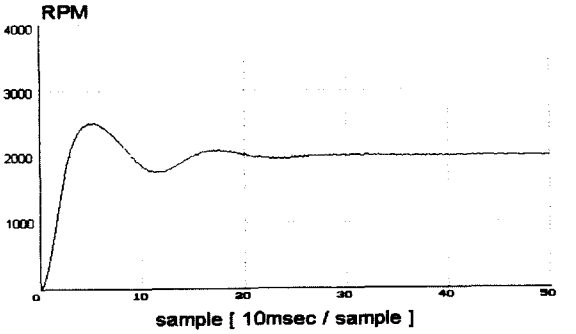
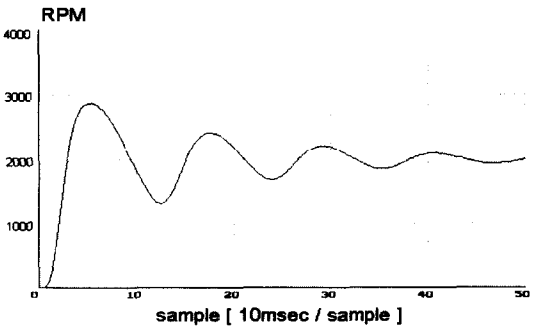
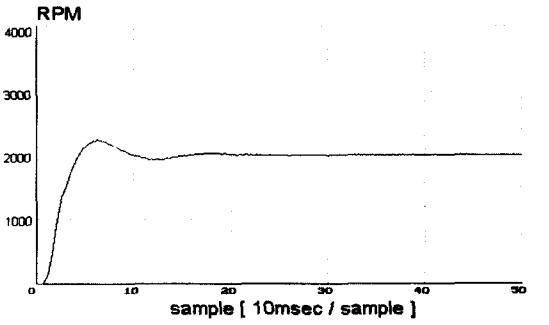


그림 9. 시간지연이 없는 시스템의 응답
Fig. 9. Response of non-delayed system.



(a)



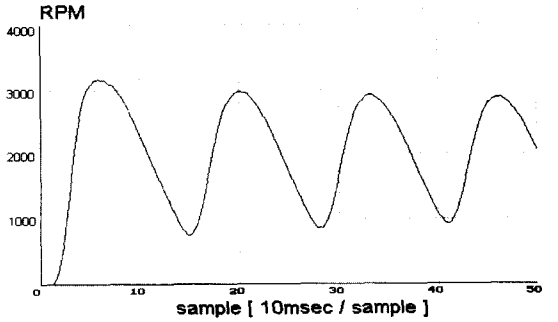
(b)

그림 10. 3 샘플 지연이 있을때의 시스템의 응답 (30 msec)
(a) 보상되지 않은 시스템의 출력 (b) 예측기로 보상된 시스템의 출력

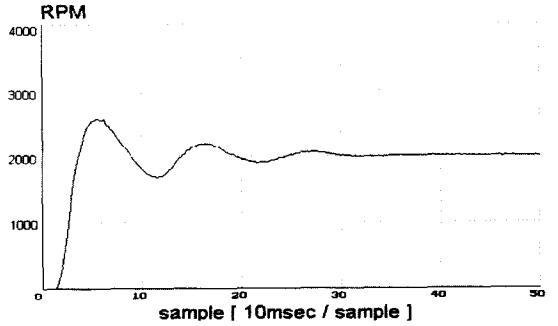
Fig. 10. Response of 3 sample delayed system (30 msec).
(a) Non-compensated time delayed system
(b) Compensated time delayed system by predictor

(3) 그림 11은 6샘플(60 [ms])의 시간지연이 있을 때의 제어시스템의 단위계단응답이다. 시간지연이

보상되지 않은 시스템은 출력 그림 11. (a)에서 수렴되지 못하고 발산하여 불안정한 시스템이 됨을 알 수 있다. 그러나 예측제어기가 적용된 시스템의 출력 그림 11. (b)에서는 약간의 진동과 오버슈터가 발생되나 출력이 수렴되어 안정하며, 응답속도의 영향도 크지 않는, 약 34샘플(340 [ms] 지연)에서 입력에 대하여 완전히 추종함을 알 수 있다.



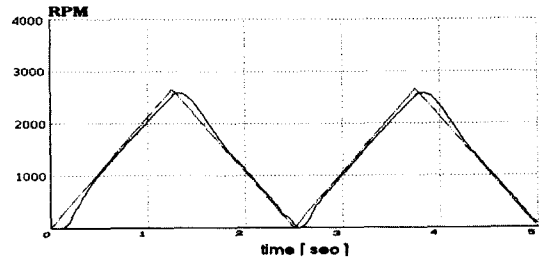
(a)



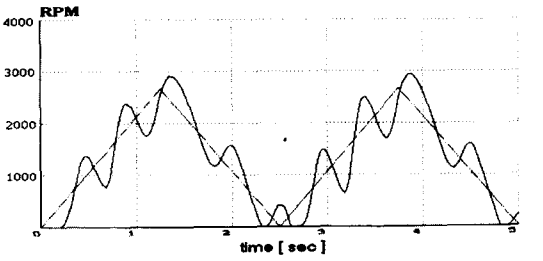
(b)

그림 11. 6 샘플 지연이 있을때의 시스템의 응답 (60 msec)
(a) 보상되지 않은 시스템의 출력 (b) 예측기로 보상된 시스템의 출력

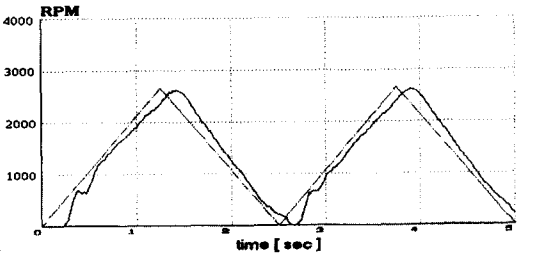
Fig. 11. Response of 6 sample delayed system (60 msec).
(a) Non-compensated time delayed system
(b) Compensated time delayed system by predictor



(a)



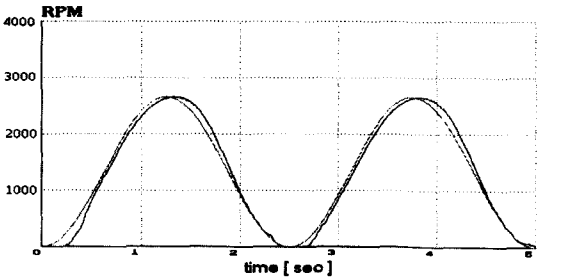
(b)



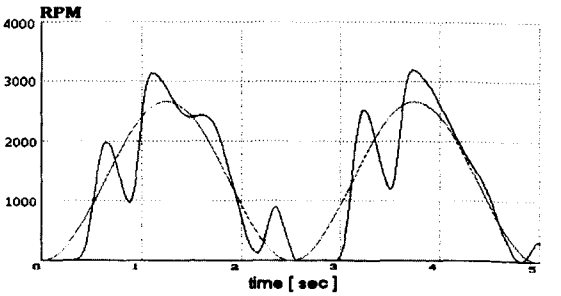
(c)

그림 12. 삼각파 입력에 대한 시스템의 응답
(a) 시간지연이 없는 시스템의 출력 (b) 8 샘플 지연이 있는 시스템의 출력 (80 msec) (c) 예측기로 보상된 시스템의 출력

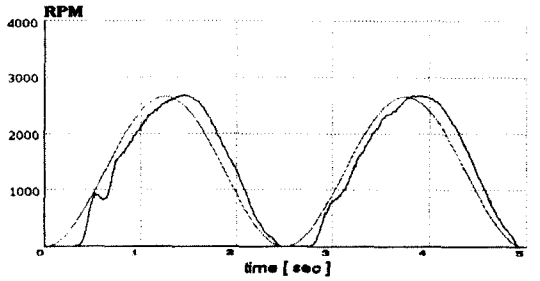
Fig. 12. Response of triangular input.
(a) Output of non-delayed system (b) Output of 8 samples delayed system (80 msec) (c) Compensated time delayed system by predictor



(a)



(b)



(c)

그림 13. 정현파 입력에 대한 시스템의 응답
(a) 시간지연이 없는 시스템의 출력 (b) 8 샘플 지연이 있는 시스템의 출력 (80 msec) (c) 예측기로 보상된 시스템의 출력

Fig. 13. Response of sinusoidal input.
(a) Output of non-delayed system (b) Output of 8 samples delayed system (80 msec) (c) Compensated time delayed system by predictor

(4) 그림 12, 13은 입력이 삼각파와 정현파에 대한 결과로, 8샘플(80 [ms])의 시간지연을 인가하고 예측제어기를 적용한 시스템의 출력으로 시간지연이 보상됨을 보여준다.

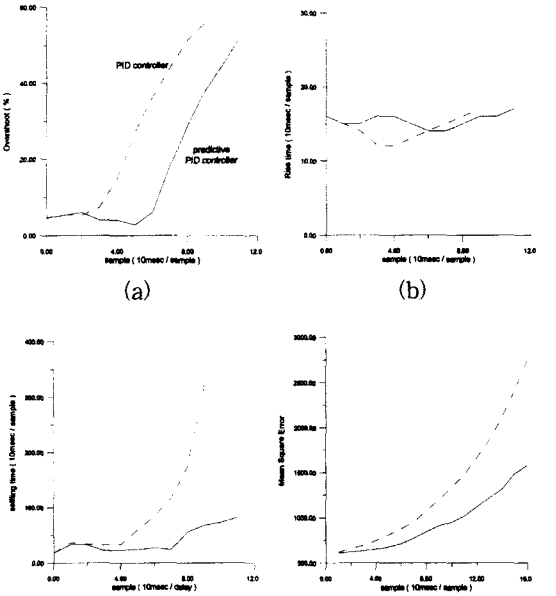
2. 성능 평가 및 고찰

제안한 예측 PID 제어기와 PID 제어기의 시간지연에 따른 성능을 비교하여 나타내었다. 제어기의 성능을 나타내는 지표로는 오버슈터(Overshoot), 상승시간 (Rise time), 정착시간 (Settling time), 제곱 오차 평균 (Mean Square Error)을 사용하였으며, 설정된 이득에서 시간지연에 따라 나타나는 제어기 성능의 변화를 비교하여 나타내었다.

1) 제어기의 이득을 증가시켜 빠른 응답을 요구한 경우 (시스템은 불안정)

그림 14의 결과는 PID 제어기 이득을 각각 Kp = 68, Ki = 8, Kd = 34로 설정하고, 0 에서 12 샘플의 시간지연을 인가하여 구한 결과이다. 각 결과의 점선은 PID 제어기의 결과이며, 실선은 예측 PID 제어기의 결과이다.

(1) 그림 14. (a)는 시간지연에 따른 오버슈터의 변화이다. 선형 시스템의 시간지연에 따라 나타나는 특성대로 PID 제어기에서는 시간지연에 따라 오버슈터가 증가하며 나타났으며, 그에 따라 진동이 증가하여 그림 14. (c)와 같이 정착시간 또한 매우 느려진다. 그러나 예측 PID 제어기는 오버슈터가 PID 제어기에 비하여 작게 나타나며, 발생되더라도 그림 14. (c)의 결과와 같이 정착시간이 크게 변화하지 않는 것은 예측에 의하여 출력이 급속히 수렴되어져 나타난 결과이다.



(a) (b)

(c) (d)

그림 14. 시간지연증가에 따른 제어기 성능의 변화 (Kp : 68, Ki : 8, Kd : 34)
(a) 오버슈트 (b) 상승시간 (c) 정착시간 (d) 제곱평균오차

Fig. 14. Change of controller performance as increment of time delay.(Kp : 68, Ki : 8, Kd : 34)
(a) Overshoot (b) Rise time (c) Settling time (d) Mean Square Error

(2) 그림 14. (b)는 시간지연에 따른 상승시간의 변화인데 큰 변화는 나타나지 않는다. 단, 어느 정도의 시간지연은 페루프 시스템의 극점을 빠른 응답을 갖도록 이동시킴이 결과에서 확인되었다. 결과에서 나타난 바와 같이 PID 제어기는 3샘플의 지연까지는 상승시간이 오히려 빨라진다.

(3) 그림 14. (c)의 결과에서는 PID 제어기는 선형 시스템이므로 오버슈터에 비례하여 정착시간도 증가되어 나타나지만, 예측 PID 제어기는 시간지연이 발생되더라도 정착시간이 크게 변화하지 않음을 알 수 있다. 시간지연에 따라 PID 제어기가 진동하면서 정착시간 또한 지연되어지는 것과 달리, 예측 PID 제어기는 예측에 의하여 현재의 출력을 추정하여 제어하므로

지연이 없을 때의 제어기 특성에서 크게 벗어나지 않고 정착시간의 변화가 크지 않다.

(4) 따라서 그림 14. (d)의 결과와 같이 PID 제어기는 지연이 증가될수록 오버슈터와 정착시간이 증가되어 진동 구간이 길어지고 제곱 오차 평균 또한 증가하는데 비해, 예측 PID 제어기는 급속한 수렴에 의해 정착시간과 진동을 최소화하므로 제곱 오차 평균이 PID 제어기에 비하여 현저히 감소됨이 확인된다.

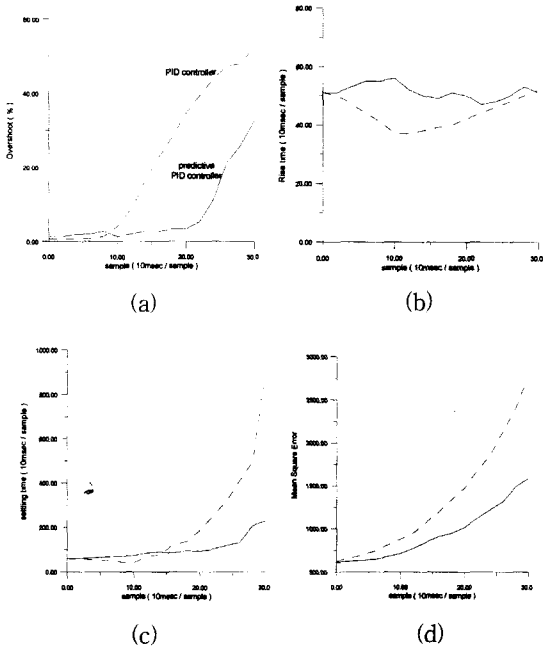


그림 15. 시간지연증가에 따른 제어기 성능의 변화 (Kp : 32, Ki : 2, Kd : 16)
(a) 오버슈트 (b) 상승시간 (c) 정착시간 (d) 제곱평균오차

Fig. 15. Change of controller performance as increment of time delay.(Kp : 32, Ki : 2, K d : 16)
(a) Overshoot (b) Rise time (c) Settling time. (d) Mean Square Error.

2) 제어기의 이득을 감소시켜 시스템의 안정성을 요구한 경우 (응답은 늦음)

제어기의 이득을 감소하면 응답은 느려지는 반면, 시스템이 안정한 시간지연 범위가 증가한다. 제어기의 이득이 낮은 경우의 결과를 다음에 나타내었다. 그림 15의 결과는 PID 제어기 이득을 각각 Kp = 32, Ki = 2, Kd = 16으로 설정하고, 0 에서 30 샘플의 시간지연을 인가하여 구한 결과이다.

제어기의 이득이 낮은 경우 또한 시간지연에 따른 두 가지 제어기의 특성은 동일하게 관측되었다. 단지 응답속도가 비교적 느려지고, 시간지연 범위는 넓어짐이 다를 뿐이었다. 두 조건의 결과에서 제안된 예측 PID 제어기는 시간지연이 발생되더라도 시간지연이 없을 때의 PID 제어기의 특성을 크게 벗어나지 않음이 확인되었다.

3) 제어기 이득에 따른 안정한 시간지연 범위

또한 예측 PID 제어기는 시스템의 안정한 시간지연 범위를 더욱 확장하여 시스템을 시간지연에 대하여 더욱 안정하고 강인한 시스템이 되도록 한다. 그림 16에 제어기 이득에 따라 안정한 시간지연 범위를 나타내었다. 결과에서 제어기의 이득이 낮을수록 두 가지 제어기 모두 안정한 시간지연의 범위가 넓어지지만, 예측 PID 제어기는 항상 그 값이 더 크며 낮은 이득에서는 그 차이가 더욱 증가됨이 확인된다. 이득이 8 일 때는 안정한 시간지연 구간의 차이가 2샘플(20msec)이며, 이득이 2의 경우는 6샘플(60msec)이다. 여기서 제어기의 이득은 Kp = 26 + 6×Gain, Ki = Gain, Kd = 13 + 3×Gain 으로 각각 설정하였다.

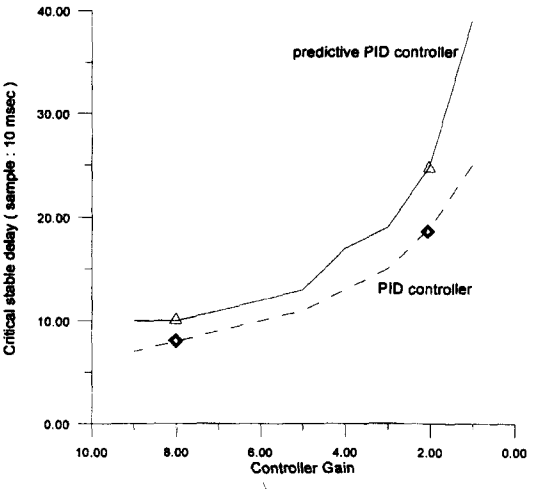


그림 16. 제어기 이득에 따른 안정한 시간지연 범위

Fig. 16. Range of stable time delay as control gain.

전체적으로 각각 이득이 다르게 설정된 제어기에서 시간지연에 따라 나타나는 성능의 변화를 관측하여 표 1에 나타내었다. 이득은 PID 제어기의 Kp, Ki, Kd을 나타내며, 각 란의 상단은 PID 제어기, 하단은 예측 PID 제어기의 결과이다. 공란은 출력이 진동 및 발산하여 수렴하지 않는 경우이다.

표 1의 결과에서 예측 PID 제어기가 PID 제어기

보다 시간지연에 따른 성능 변화가 적음을 알 수 있으며, 또한 이득이 낮을수록 수렴하는 시간지연 영역이 커짐이 확인된다.

표 1. 시간지연과 이득에 따른 제어기의 성능
Table 1. Controller performance as time delay and control gain.

delay / Gain	0 sample			5 sample			10 sample			15 sample		
	ov %	ris 10ms	set 10ms	ov	ris	set	ov	ris	set	ov	ris	set
80, 10, 40	8.0	13	15	38	11	73						
	8.0	13	15	14	11	16	62	15	79			
74, 9, 37	5.3	15	28	34	12	57						
	5.3	15	28	5.3	13	22	54	16	100			
68, 8, 34	5.3	16	33	26.7	12	59						
	5.3	16	33	2	15	26	48.7	16	78			
62, 7, 31	4.7	18	19	26.7	12	59						
	4.7	18	19	2.7	24	27	36.7	18	74			
56, 6, 28	4.7	20	22	15.3	15	42	52	20	236			
	4.7	20	22	4	23	30	24.7	19	71			
50, 5, 25	4	23	25	11.3	17	45	42.7	21	151			
	4	23	25	5.3	26	53	6.7	21	27	43.3	26	131
44, 4, 22	3.3	28	31	7.3	22	50	32	23	96	53.3	28	431
	3.3	28	31	4	30	36	2.7	26	53	24.7	28	58
38, 3, 19	2	35	40	3.3	30	32	18.7	27	65	39.3	31	193
	2	35	40	2	39	44	4	42	56	2.7	37	67
	20 sample delay > 28.7			36	123							
32, 2, 16	0.7	50	59	0.7	45	50	4	37	39	19.3	38	82
	20 sample delay > 34.7			42	192							
	0.7	50	59	2	54	62	2	56	74	3.3	49	88
	20 sample delay			25 sample delay			30 sample delay					
	4	50	97	18	49	131	30.7	51	220			

▶ ov : Overshoot (%) ▶ ris : Rise time (10 msec)
▶ set : settling time (10msec)

따라서 제어기의 이득에 관계없이, 시간지연이 클수록 본 연구에서 제안된 예측제어기의 성능이 우수함을 평가할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 시간지연을 가지는 시스템에 대하여 시간지연에 따르는 문제를 극복하는 방법으로 예측모델을 제안하였으며 예측모델이 적용된 시간지연 시스템은 지연에 따르는 치명적인 영향이 보상되어 안정한 시스템이 된다는 것을 확인하였다. 이러한 결과에서 예측기를 적용한 시간지연 시스템은 전송지연이나, 모터의 회전운동을 변환시켜 직선운동을 요구하는 경우 직선운동의 방향전환 시점에서 나타나는 부하 등을 포함하는 불확실한 시간지연과 외란에 대하여 보다 안정적이며 강인한 시스템임을 확인하였다. 제안된 모델은 플랜트에 대한 대략적인 정보만으로도 가능하므로 불확실성을 갖는 시스템이나, 정확한 모델링이 어려운 시스템 등의 다양한 제어시스템에 적용 가능하다.

향후 연구과제로는 수술용 로봇과 같은 원격 제어시스템에서 발생되는 랜덤한 시간지연에 대해서도 강인한 제어 알고리즘의 개발 등이 있다.

참 고 문 헌

[1] A. Ray, "Introduction to Networking for Integrated Control Systems," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 76-79, 1989.

[2] T. Furukawa and E. Shimemura, "Predictive Control for Systems with Time Delay," *International Journal of Control*, vol. 37, no. 2, pp. 399-412, 1983.

[3] N. Shanmugathasan and R. D. Johnston, "Exploitation of Time Delays for Improved Process Control," *International Journal of Control*, vol. 48, no. 3, pp. 1137-1152, 1988.

[4] Z. Q. Wang and S . Skogestad, "Robust control of time-delay systems using the Smith predictor," *International Journal of Control*, vol. 57, no. 6, pp. 140 5-1420, 1993.

[5] R. Luck and A. Ray, "An Observer-based Compensator for Distributed Delays," *Automatica*, vol. 26, no. 5, pp. 903-908, 1990.

[6] A. Ray, "Integrated Communication and Control Systems : Part I -Analysis," *ASME Journal of Dynamic Systems*, vol. 110, pp. 367-373, 1988.

[7] A. Ray, "Integrated Communication and Control Systems : Part II -Design Considerations," *ASME Journal of Dynamic Systems*, vol. 110, pp. 374-381, 1988.

[8] C. H. Lee, "D-stability analysis for

discrete systems with a time delay," *System & Control Letters*, vol. 19, pp. 213-219, 1992.

[9] C. H. Lee, "D-Stability of Continuous Time-delay Systems Subjected to a Class of High Structured Perturbations," *IEEE Transaction on Automatic Control*, vol. 40, no. 10, pp. 1803-1807, 1995.

[10] 허화라, 박재한, 이장명, "예측제어기를 이용한 네트워크 시간지연 보상," *IEEK Conference*, vol. 21, no. 1, pp. 243-246, 1998

[11] J. E. Marshall, H.Gorecki, A.korytowski, and K. Walton, *Time-Delay Systems: Stability and Performance Criteria with Application*, Ellis Horwood Limited, 1992.

[12] Michael Green and David J. N. Limeber, *Linear Robust Control*, Prentice Hall, 1996.

[13] Thomas Kailath, *Linear System*, Prentice Hall, 1980.

[14] Katsuhiko Ogata, *Discrete-Time Control Systems*, Prentice Hall, 1987.

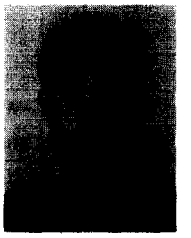
[15] Alberto Leon-Garcia, *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*, Addison Wesley, 1994.

[16] H. Gorecki, S. Fuksa, P. Grabowski and A. Korytowski, *Analysis and Synthesis of Time Delay Systems*, John wiley & Sons, 1989.

저 자 소 개

許 花 羅(正會員)

현재 부산대학교 전자공학과 박사과정. 주관심분야는 Time-Delay, 모델예측제어, 원격제어로봇



朴 宰 漢(正會員)

현재 부산대학교 전자공학과 석사과정. 주관심분야는 지능제어, 다변수제어, 자율이동로봇

李 章 明(正會員) 第 36卷 S編 第 1號 參照