

예측기법을 이용한 NCS

NCS using the predictive strategy

金 眞 煥*

(Jin-Hwan Kim)

Abstract - The transmission delays in the networked control systems affect the performance and stability. For covering the delays, this paper proposes NCS including the predictive strategy. The proposed method shows that the two cases such as stable and unstable system are well behaved.

Key Words : NCS, predictive control

1. 서 론

전기전자 및 통신기술의 발전으로 네트워크 비용이 작아짐에 따라 네트워크를 통해 제어시스템을 구성하는 경제적 부담이 줄어들고 있으며 대규모 분산제어 시스템에서 각종 플랜트를 효율적으로 제어하기 위해 제어기와 플랜트를 네트워크를 통해 상호 연결한다. 네트워크를 통해 플랜트를 제어하는 NCS(Network Control System)에서 플랜트의 상태정보와 제어입력은 네트워크를 경유하여 전달되므로 네트워크 전달과정 중 발생할 수 있는 문제점들에 의해 NCS의 성능이 영향을 받는다.

NCS의 성능은 네트워크 물리 장치인 CAN, Ethernet, ControlNet, DeviceNet 등에 따라 달라질 수 있으며 통신 프로토콜에 따라서도 영향을 받을 수 있다. 그러나, 이러한 물리적 장치와 프로토콜의 영향은 구현상의 문제점들로 생각할 수 있고, 근본적으로 발생할 수 있는 네트워크상의 문제점들을 먼저 고려할 필요가 있다. NCS에서 제어기와 플랜트는 네트워크로 상호 연결되므로 플랜트의 상태정보와 제어입력이 네트워크상에서 지연되거나 유실됨으로써 성능저하는 물론 안정도에까지 영향을 줄 수 있다. 따라서, 네트워크를 경유함에 따라 발생하는 데이터의 전달지연은 NCS에서 첫 번째로 다루어야 할 요소이다. NCS에서 발생하는 네트워크 지연 요소는 플랜트의 센서에서 제어기로 전달되는 과정 중 발생하는 지연시간과 제어기에서 플랜트의 액츄에이터로 전달과정 중 발생하는 지연시간이 있다[1][2].

NCS의 성능과 안정도에 관한 연구결과는 버퍼를 사용한 네트워크 지연요소 처리[3], 확률적 네트워크 지연요소를 보상하기 위한 추정자 제안[4], Markov 네트워크상에서 LQR

제어기 설계[5] 등이 있다. 그러나, 이러한 연구들은 네트워크 지연시간이 샘플링 주기보다 작을 경우에 대해서만 다루어졌다.

본 논문에서는 네트워크 지연시간이 샘플링주기보다 클 경우에 대해 NCS를 효과적으로 제어하기 위해 예측제어기법을 사용한다. 예측제어기법은 여러 연구를 통해 시간지연을 가지는 플랜트와 불안정한 플랜트를 효과적으로 제어할 수 있음을 보여주고 있다[6]. 사례연구를 통해 안정한 시스템과 불안정한 시스템에 대해 네트워크 지연요소가 제어시스템에 미치는 영향을 확인하여 예측제어기법의 적용사례를 검증해 보도록 한다.

2. 네트워크 제어시스템

다음과 같은 선형 시불변 플랜트를 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t). \end{aligned} \quad (1)$$

네트워크에 의해 발생하는 지연요소는 센서로부터 제어기로 발생하는 지연시간 τ_{sc} 와 제어기에서 액츄에이터로 발생하는 지연시간 τ_{ca} 가 있다. 해석의 편의상 2가지 지연시간을 $\tau = \tau_{sc} + \tau_{ca}$ 로 지정한다.

샘플 당 유발되는 지연시간이 샘플링 주기보다 작을 수도 있고 큰 경우도 있다. 두 경우를 모두 고려하여 지연시간을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\tau = (d-1)h + \tau^* \quad (2)$$

여기서 $d \geq 1$, h 는 샘플링 주기, $0 < \tau^* \leq h$ 이다.

* 正 會 員 : 仁 荷 工 業 專 門 大 學 電 氣 科 助 教 授 · 工 博
 接 受 日 字 : 2002年 10月 14日
 最 終 完 了 : 2002年 11月 1日

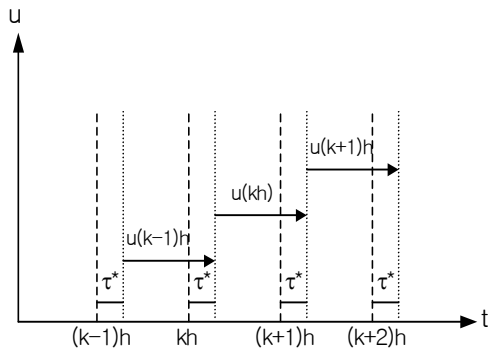


그림 1 NCS 지연요소에 의한 제어입력
Fig. 1 Control input by NCS delay

따라서, NCS 페루프 제어 시스템은

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t^+) \\ &= Ax(t) + BKx(t-\tau) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 제어입력 $u(t^+) = Kx(t-\tau)$ 는 구간 내 연속이고 $kh + \tau$ 에서만 변경된다. 그림 1에서 NCS 지연요소에 의한 제어입력의 다이어그램을 보여주고 있다.

2.1 NCS 이산화 시스템

식(3)의 이산화 시스템은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x((k+1)h) &= \Phi x(kh) + \Gamma_0(\tau^*)u(kh) \\ &\quad + \Gamma_1(\tau^*)u((k-d)h) \\ y(kh) &= Cx(kh) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Phi &= e^{Ah} \\ \Gamma_0(\tau^*) &= \int_0^{h-\tau^*} e^{As}Bs ds \\ \Gamma_1(\tau^*) &= \int_{h-\tau^*}^h e^{As}Bs ds. \end{aligned} \quad (5)$$

제어기를 포함한 샘플 시스템은

$$\begin{aligned} x((k+1)h) &= \Phi x(kh) + \Gamma_0(\tau^*)Kx(kh) \\ &\quad + \Gamma_1(\tau^*)Kx((k-d)h) \\ y(kh) &= Cx(kh). \end{aligned} \quad (6)$$

2.2 NCS 예측제어기

NCS의 예측식을 유도하기 위해 식(4)를 z -변환하고 $x(0) = 0$ 로 가정하여 ARIMA(Auto Regressive Integrated Moving Average) 모델로 변환한다.

$$\begin{aligned} X(z) &= (zI - \Phi)^{-1} \Gamma_0 U(z) \\ &\quad + (zI - \Phi)^{-1} \Gamma_1 U(z-d) \\ Y(z) &= C(zI - \Phi)^{-1} \Gamma_0 U(z) \\ &\quad + C(zI - \Phi)^{-1} \Gamma_1 z^{-d} U(z) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $(zI - \Phi)^{-1} = \text{def} [zI - \Phi]^{-1} \bar{\Phi}$,

$$Y(z) = \text{def} [zI - \Phi]^{-1} (C \bar{\Phi} \Gamma_0 + C \bar{\Phi} \Gamma_1 z^{-d}) U(z). \quad (8)$$

식(7)은 다음과 같이 정리된다.

$$y(k) = -\frac{N}{D\Delta} \Delta u(k) \quad (9)$$

여기서 $D = \text{def} [zI - \Phi]^{-1}$, $N = C \bar{\Phi} \Gamma_0 + C \bar{\Phi} \Gamma_1 z^{-d}$, $\Delta = 1 - z^{-1}$.
NCS의 ARIMA 모델식 (9)의 예측식은 다음과 같다.

$$\hat{y}(k+j) = G_j \Delta u(k+j-1) + H_j \Delta u(k-1) + F_j y(k) \quad (10)$$

여기서 $G_j = \frac{N}{D\Delta}$, $H_j = q^{-1} \frac{F_j N}{D\Delta}$.

예측식 (10)을 풀기 위해 다음과 같은 다이아판틴(diophantine) 방정식을 유도한다.

$$\begin{aligned} 1 &= A\Delta E_j + q^{-j} F_j \\ E_j B &= G_j + q^{-1} H_j. \end{aligned} \quad (11)$$

최적화된 제어입력을 구하기 위해 다음과 같은 제어법칙(quadratic control law)을 지정한다.

$$J = \left\{ \sum_{j=1}^N (r(k+j) - \hat{y}(k+j))^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda \Delta u(k+j-1)^2 \right\} \quad (12)$$

여기서 $r(k+j)$ 는 미래의 출력목표값, N 는 출력예측구간, N_u 는 입력예측구간이다.

$\partial J / \partial \Delta u$ 를 통해 최적화된 제어입력을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta u = [100 \dots] (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \Lambda)^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{y}) \quad (13)$$

여기서 \mathbf{G} , Λ , \mathbf{r} , \mathbf{y} 는 각각 G_j 의 행렬, λ 의 행렬, $r(k+j)$ 의 행렬, $\hat{y}(k+j)$ 의 행렬이다.

3. 사례연구

모의실험 사례연구를 통해 안정한 시스템과 불안정한 시스템에 대해 네트워크 지연요소의 영향을 검토해 보고 예측제어 기법을 적용한 결과를 보도록 한다. 모든 경우에 대해 샘플링 주기 $h=0.1$ 로 하고 예측제어 파라미터는 $N_u=1$, $\lambda=0.01$ 로 한다.

다음은 극점 -1을 갖는 안정한 시불변 시스템이다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -x(t) + u(t) \\ y(t) &= x(t). \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)의 네트워크 지연요소 $\tau=0$ 인 샘플된 이산화 시스템은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= 0.9048x(k) + 0.0952u(k) \\ y(k) &= x(k). \end{aligned} \quad (15)$$

그림 2는 $\tau=0.09 < h$ 일 때, 식(14)의 보드선도이다. $\tau < h$ 경우 네트워크 지연요소에 의해 시스템에 미치는 영향은 없다. 그림 3은 $\tau=0.63 (\tau^*=0.09, d=55)$ 일 때 보드선도이다. 그림 3을 보면 정상상태 부근에서 네트워크 지연요소에 의한 영향이 생기는 것을 볼 수 있다. 식(14)의 안정한 시스템에 대해서 $\tau=0.63$ 부터 네트워크 지연요소에 의한 영향이 시스템에 나타나기 시작한다.

다음은 예측제어를 적용한 NCS의 제어결과를 보도록 한다. 네트워크 지연에 의한 영향이 나타나기 시작한 $\tau=0.63$ 일 때, LQR(이 경우는 $N=1$ 일 때 예측제어와 같다.)의 적용은 페루프 시스템 응답이 불안정해진다. $N=2$ 로 하였을 때, 식(14)의 예측제어응답은 그림 4와 같다. 과도상태 응답이 나오긴 하지만, 제어가 잘 됨을 볼 수 있고, 그림 4의 과도상태를 그림 5의 보드선도에서 볼 수 있다. 결과적으로 그림 6과 7에서 보여지듯이 $N \gg 2$ 할 수록 제어성능은 개선되며, 보드선도에서 과도상태는 사라짐을 확인할 수 있다.

다음은 극점 1을 갖는 불안정 시불변 시스템이다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= x(t) + u(t) \\ y(t) &= x(t). \end{aligned} \quad (16)$$

식(16)의 네트워크 지연요소 $\tau=0$ 인 샘플된 이산화 시스템은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= 1.1052x(k) + 0.1052u(k) \\ y(k) &= x(k). \end{aligned} \quad (17)$$

식(16)의 시스템은 불안정하여 τ 의 크기가 시스템에 끼치는 영향을 확인할 수 없기 때문에 식(14)의 경우와 같이 $\tau=0.63 \gg h$ 로 하여 예측제어 응답을 보도록 한다. 그림 7, 8에서 보여지듯이 불안정 시불변 시스템에 대해서도 $N \gg 2$ 로 할 때, 제어됨을 볼 수 있다. 안정한 시불변 시스템과 마찬가지로 불안정한 시불변 시스템 역시 예측구간 $N \rightarrow \infty$ 일수록 제어성능이 개선된다.

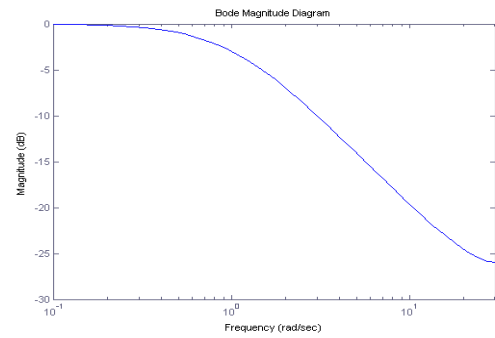


그림 2 안정한 시스템(식(14))의 bode plot ($\tau=0.09$)
Fig. 2 Bode plot of the stable system ($\tau=0.09$)

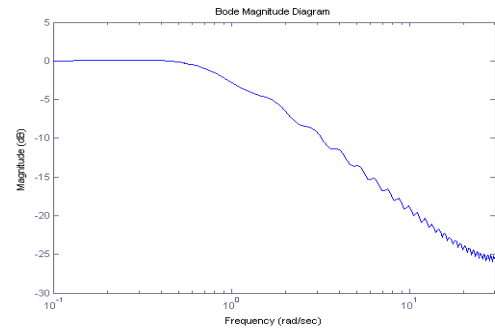


그림 3 안정한 시스템(식(14))의 bode plot ($\tau=0.63$)
Fig. 3 Bode plot of the stable system ($\tau=0.63$)

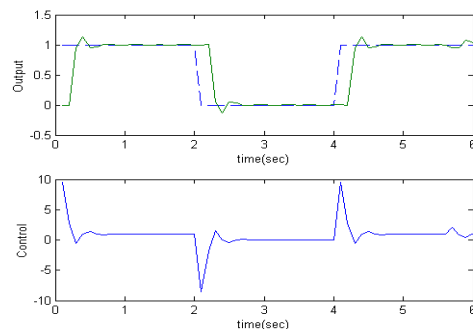


그림 4 안정한 시스템(식(14))에 대한 예측제어 응답 ($N=2, \tau=0.63$)
Fig. 4 Predictive control response of the stable system ($N=2, \tau=0.63$)

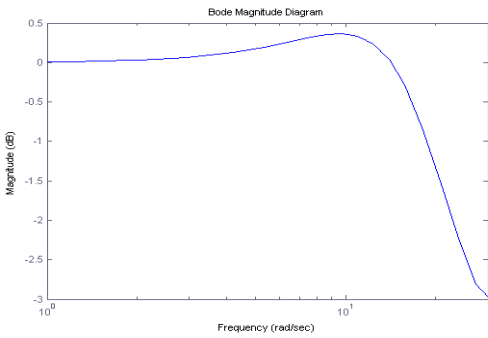


그림 5 안정한 시스템(식(14))에 대한 예측제어 페루프 시스템의 보드선도 (N=2, $\tau=0.63$)
 Fig. 5 Bode plot of the closed-loop system using the predictive control in the case of the stable system (N=2, $\tau=0.63$)

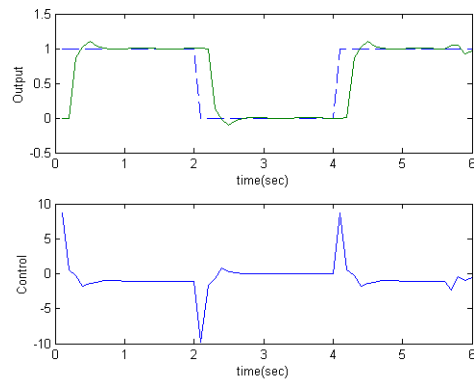


그림 8 불안정한 시스템(식(16))에 대한 예측제어 응답 (N=2, $\tau=0.63$)
 Fig. 8 Predictive control response of the unstable system (N=2, $\tau=0.63$)

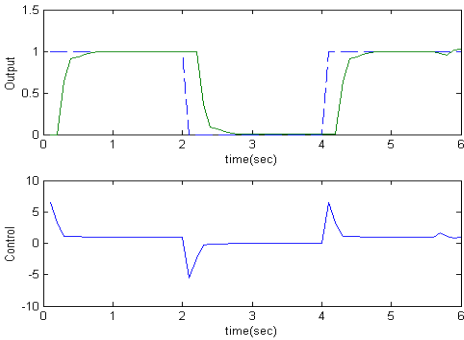


그림 6 안정한 시스템(식(14))에 대한 예측제어 응답 (N=3, $\tau=0.63$)
 Fig. 6 Predictive control response of the stable system (N=3, $\tau=0.63$)

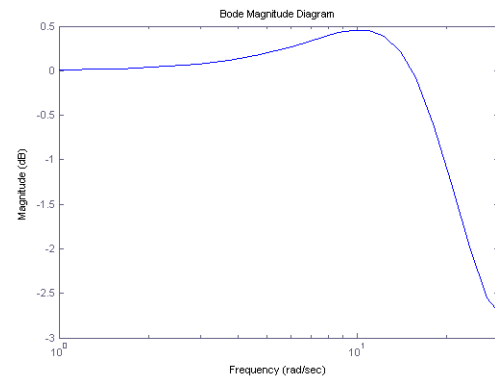


그림 9 불안정한 시스템(식(16))에 대한 예측제어 페루프 시스템의 보드선도 (N=2, $\tau=0.63$)
 Fig. 9 Bode plot of the closed-loop system using the predictive control in the case of the unstable system (N=2, $\tau=0.63$)

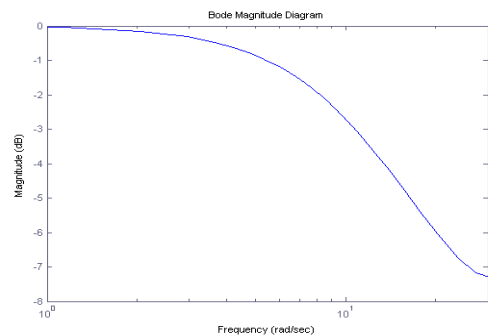


그림 7 안정한 시스템(식(14))에 대한 예측제어 페루프 시스템의 보드선도 (N=3, $\tau=0.63$)
 Fig. 7 Bode plot of the closed-loop system using the predictive control in the case of the stable system (N=3, $\tau=0.63$)

4. 결 론

본 논문에서 예측제어 기법을 적용하여 NCS 시스템을 구성하였다. 안정한 시불변 시스템의 경우 네트워크 지연요소 $\tau < h$ 경우, 네트워크 지연요소에 의해 시스템은 영향 받지 않고, 네트워크 지연요소가 샘플링 주기보다 일정범위 이상되는 $\tau \gg h$ 인 경우 시스템에 영향을 끼치며, LQR를 적용할 때 제어되지 않는다. 반면에 예측제어를 적용할 때 제어 가능함을 볼 수 있고 예측구간 N 을 크게 할수록 과도상태 응답은 더욱 개선된다. 또한, 불안정 시불변 시스템에 대해서도 예측제어 기법의 효과적인 제어성능을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] K. J. Astrom, Computer-Controlled Systems, 3rd edition, Prentice Hall, 1997
 - [2] J. Nilsson, Real-Time Control Systems with Delays, Ph.D thesis, Lund Institute of Tech., 1998.
 - [3] R. Luck and A. Ray, "An Observer-based compensator for distributed delays," Automatica, vol. 26:5, pp. 67-75, Feb. 1975
 - [4] W. Zhang, M. Branicky, and S. Phillips, "Stability of networked control systems," IEEE Control System Mag., vol. Feb., pp. 84-99, 2001
 - [5] J. Nilsson and Bo Bernhardsson, "LWR control over a markow communcation network," Proc. of the 36th IEEE CDC, pp. 4586-4591, Dec. 1997
 - [6] J. H. Kim, A Study on the Intelligent Adaptive Control for the Nonlinear Process, Ph.D thesis, Inha Univ. 1996
-

저 자 소 개



김진환 (金眞煥)

1996년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사). 1997년~2001년 두원공과대학 디지털정보제어과. 2001~현재 인하공업전문대학 전기과

Tel : 032- 870-2193

E-mail : jhkim@inhac.ac.kr