論 文
56-9-25

시간지연 시스템 제어를 위한 적응외란관측자 설계

Design of Adaptive Disturbance Observer for the Time Delay System Control

李 順 榮†
(Soon-Young Lee)

Abstract - In control of the time delay systems, if the disturbance information can be estimated exactly, the ideal response for the disturbance can be achieved. Therefore, in this paper, a new adaptive disturbance observer for the time delay system control is proposed. The disturbance observer is designed and adaptive laws for adjusting the observer are proposed. The new Smith predictor controller to eliminate the effects of the disturbance can be achieved by adding an estimated disturbance to the Smith model. The improved performances of the proposed system and the adaptive disturbance observer are verified by computer simulation.

Key Words : Adaptive Observer, Smith Predictor Controller, Time Delay System, PID Controller

1. 서 론

시간지연 시스템은 실제 산업 현장에서 매우 많이 사용되고 있다. 이러한 시간지연 시스템은 비선형 형태의 특성방정식으로 표현되므로 해석이나 제어계 구성이 어렵고 복잡하게 된다. 특히 제어기 구성에 있어 시간이 지난 정보가 피드백 되므로 올바른 제어효과나 안정성을 보장 할 수 없다. 따라서 현재의 제어량을 예측하여 사용하는 것이 필요하게 된다[1].

시간지연을 극복하기 위한 방법으로 스미스 예측제어기가 주로 많이 사용되고 있는데, 이는 매우 간단하면서도 효과적으로 시간지연 요소를 제거할 수 있기 때문이다. 이 방법은 시스템을 전달함수와 지연시간 부분으로 수학적 모델링하여 피드백 신호를 검출하는 방법이다. 이 경우 특성 방정식에 시간지연 항이 소거되어 마치 시간지연이 없는 시스템처럼 제어기 구성이 가능해 진다. 그러나 플랜트에 외란이 인가되면 이 외란을 적절히 제어하기가 어려울 뿐 아니라 플랜트 전달함수가 원점이나 혹은 원점에 가까운 극을 포함하고 있을 경우에는 외란에 대하여 정상상태 오차가 발생하게 되고 또한 내부적으로 불안정해질 수 있다[2].

따라서 이러한 외란에 대한 시간지연계의 응답을 개선하기 위한 많은 방법들이 제시되었는데 Watanabe[1]나 Matausek[3,4], Astrom[5] 등과 같이 주로 외란보상기를 이용한 설계가 주를 이루고 있다. 그러나 이 방법들은 많은 변수들을 조정해야 하는 어려움이 있으며, 또한 Matausek와 Astrom의 방법은 1차계에 한정되어 있어 사용에 제약을 받을 수 있다. 또한 Natori[6], Takehara[7] 등은 Luenberger 형태의 관측자를 구성하여 직접 외란을 검출한 후 검출된 외란을 모델에 인가 시켜 외란의 영향을 소거하는 방법을 사용하였다. 그러나 이 경우 외란을 확실하게 추종하지 못하고 오차가 남게 된다.

본 논문에서는 시간지연 플랜트에 인가되는 외란을 검출할 수 있는 적응외란관측기를 제안하였다. 이를 위하여 새로운 형태의 관측자를 구성하였으며 관측자의 가변 파라메타들을 조절할 수 있는 적응 알고리즘을 구하였다. 아울러 검출된 외란을 스미스 모델 부분에 인가시켜 외란의 영향을 소거할 수 있는 스미스 예측제어기를 구성하였다. 또한 순수 적분항을 갖는 계와 불안정한 계에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 제안한 적응 외란 관측자 및 스미스 예측제어기의 효용성 및 우수성을 입증하였다.

2. 스미스 예측 제어기

시간지연을 갖는 플랜트에 대한 스미스예측제어기의 블록선도는 그림1과 같다. 여기서 $r(t)$는 기준입력이고 $d(t)$는 외란을 나타낸다. 또한 $G_C(s)$ 는 제어기로 PI 혹은 PID 제어기가 주로 사용된다.

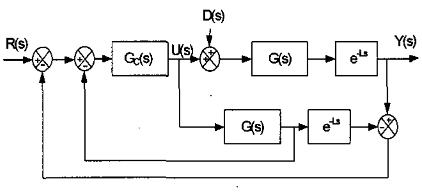

그림 1. 스미스 예측제어 시스템
Fig 1. Smith predictor control system

† 교신저자, 正會員 : 경상대학교 전기전자공학부, 공학연구원
E-mail : sy_lee@nongae.gsum.ac.kr
接受日字 : 2007年 5月 23日
最終完了 : 2007年 7月 4日

기준입력에 의한 출력의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_r(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G(s)e^{-Ls}}{1+G_c(s)G(s)} \quad (1)$$

위의 전달함수는 분모에 시간 지연항이 포함되어 있지 않다. 따라서 시간지연이 없는 플랜트처럼 제어기 $G_c(s)$를 구성할 수 있으며 시간 지연항에 의하여 불안정해 지지도 않는다. 또한 제어기가 적분기를 포함하게 되면 계단 입력에 대한 정상상태 오차는 0이 된다.

외란에 대한 전달함수를 구하면 다음과 같이 된다.

$$G_d(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G(s)e^{-sL}}{1+G_c(s)G(s)} + \frac{G_c(s)G(s)e^{-Ls}}{1+G_c(s)G(s)}\left(G(s) - G(s)e^{-Ls}\right) \quad (2)$$

플랜트가 적분항을 포함하고 있지 않고 제어기가 적분기를 포함하고 있으면 계단입력 형태의 외란에 대한 정상상태 오차는 0이 된다. 그러나 플랜트의 전달함수가 순수 적분항을 포함하거나 허수축에 가까운 극점을 가지고 있는 경우 외란에 대하여 정상상태 오차가 존재하게 되고 또한 내부적으로 불안정하게 될 수도 있다.

그림 2처럼 외란을 측정할 수 있고 측정된 외란을 모델에 인가시킬 수 있다면 외란에 대한 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$G_d(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G(s)e^{-sL}}{1+G_c(s)G(s)} \quad (3)$$

이 전달함수로부터 $G_c(s)$에 적분기가 포함되면 계단입력 형태의 외란에 대하여 정상상태오차는 0이 되고 안정도 또한 보장됨을 알 수 있다.

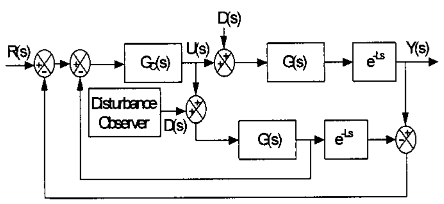

그림 2. 검출된 외란을 이용한 스미스 예측 제어기

Fig 2. Smith predictor control system using estimated disturbance

3. 외란 관측자 설계

다음과 같이 입력측에 외란이 가해진 시간지연 시스템을 생각한다[7].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Bd \\ \dot{d} &= 0 \\ y &= Cx(t-T) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 A는 안정한 행렬이며, T는 지연시간이다. 또한 $d(|d| \leq v)$는 외란으로 최대치v는 알고 있다고 가정한다.

위 시스템의 상태와 외란을 측정하기 위한 Luenberger 형태의 관측자를 구성하면 오차식은 다음과 같이 된다.

$$\dot{E} = AE + HCE(t-L) \quad (5)$$

이 식에 대한 특성방정식은 다음과 같이 된다.

$$|sI - A - HCe^{-Ls}| = 0 \quad (6)$$

이 특성방정식은 비선형 항 e^{-Ls}을 포함하고 있어 파라메타 H값을 찾기가 어렵다. 이에 참고문헌[6,7]에서는 지연시간만큼 지연된 오차를 이용하여 e^{-Ls}항을 포함하지 않는 특성방정식을 사용하여 H를 구하였다. 그러나 이 경우 출력에 다음과 같은 $d(t) - d_0(t-L)$에 의한 항이 첨가되어 정확한 외란 관측 및 소거가 불가능하게 된다[7].

$$y_d(t) = \frac{G_c(s)G(s)e^{-Ls}}{1+G_c(s)G(s)} \times (G(s) - G(s)e^{-Ls})(d(t) - d_0(t-L)) \quad (7)$$

따라서 본 논문에서는 관측자를 다음과 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= Ax_0 + Bu + Bd_0 + H(y - y_0) \\ \dot{d}_0 &= B^T e + h(y - y_0) + |h| d_0 \\ y_0 &= Cx_0(t-T) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $e = x - x_0$ 이고 $e_d = d - d_0$ 이며 H와 h는 가변파라메타 이다.

식(4)와 (8)로 부터 다음과 같은 오차 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= Ae + Be_d - H(y - y_0) \\ \dot{e}_d &= -B^T e - h(y - y_0) - |h| d_0 \end{aligned} \quad (9)$$

가변 파라메타 H와 h를 구하기 위한 다음과 같은 적응칙을 생각한다.

$$\begin{aligned} \dot{H} &= Pe(y - y_0) \\ \dot{h} &= -d_0(y - y_0) - sgn(h)v(|y - y_0| + |d_0| + v) \end{aligned} \quad (10)$$

위의 적응칙을 증명하기 위하여 다음과 같은 Lyapunov 함수를 가정한다

$$V = e^T P e + e_d^2 + H^T H + h^2 \tag{11}$$

위 함수의 도함수 $\dot{V}$를 식(9)와 식(10)을 이용하여 구하면,

$$\begin{aligned}\dot{V} &= e^T(A^T P + PA)e - 2e_d(h(y-y_0) + |h|d_0) \\ &\quad - 2hd_0(y-y_0) - 2|h|v(|y-y_0| + |d_0| + v) \\ &= -e^T Q e - 2dh(y-y_0) - 2e_d^2|h| \\ &\quad + 2|h|(d^2 - dd_0) - 2|h|v(|y-y_0| + |d_0| + v) \\ &\leqq -e^T Q e + 2|dh||y-y_0| - 2e_d^2|h| + 2|h|d^2 \\ &\quad + 2|h||dd_0| - 2|h|v(|y-y_0| + |d_0| + v) \\ &\leqq -e^T Q e - 2e_d^2|h| \leqq 0\end{aligned} \tag{12}$$

위의 식에서 Q는 다음을 만족하는 행렬이다.

$$A^T P + PA = -Q \leqq 0 \tag{13}$$

위의 식을 만족하는 Q가 존재하기 위해서는 A가 안정한 행렬이여야 한다[8]. 따라서 순수 적분기를 포함하거나 불안정한 계의 경우 사용이 불가능하다. 그러나 식(1)에서 보듯이 전체계를 안정시킬 수 있는 PID 제어기가 존재하게 되므로 전체적으로 안정한 A가 존재하게 되어 적용이 가능해진다. 위의 식(9)와 식(12) 로부터 다음이 만족됨을 알 수 있다.

$$e \in \mathcal{L}^{\infty}, e_d \in \mathcal{L}^{\infty}, \ \dot{e} \in \mathcal{L}^{\infty}, \dot{e}_d \in \mathcal{L}^{\infty} \tag{14}$$

또한 식(12)로부터,

$$0 \leqq \int_{t_0}^{\infty} (e^T Q e + 2e_d^2|h|)dt < \infty \tag{15}$$

따라서 다음식이 만족된다.

$$e \in \mathcal{L}^2, \quad e_d \in \mathcal{L}^2 \tag{16}$$

그러므로 식(14)와 식(16)으로 부터 $\lim_{t \to \infty} e = 0$, $\lim_{t \to \infty} e_d = 0$ 이 되어 외란 및 상태를 검출할 수 있다[8].

4. 시뮬레이션 및 검토

본 논문에서 제안한 외란 관측기의 효용을 알아보기 위하여 순수 적분기를 가지는 계와 불안정한 계에 대하여 시뮬레이션 하였다.

순수 적분기를 가지는 플랜트의 전달함수는 다음과 같이 가정하였다.

$$G(s) = \frac{e^{-0.5s}}{s^2 + 0.9s} \tag{17}$$

입력은 단위 계단함수를 사용하였으며 외란은 0.7로 가정하였다. 제어기로는 다음과 같은 PI 제어기를 사용하였다.

$$G_c(s) = 10 + \frac{10}{s} \tag{18}$$

그림3은 0초부터 외란이 인가된 경우의 결과이며 그림4는 5초 후에 외란이 가해진 경우의 응답을 나타낸다.

그림에서 보듯이 외란을 잘 추종하고 있으며, 외란의 검출로 인하여 원하는 출력 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

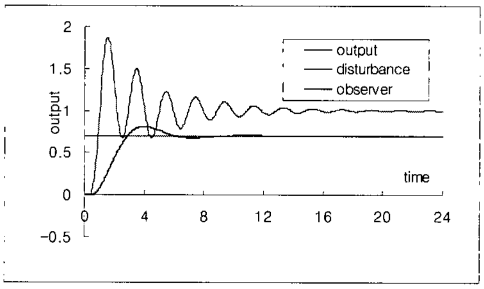

그림 3. 외란 검출 및 응답

Fig 3. Response and estimated disturbance

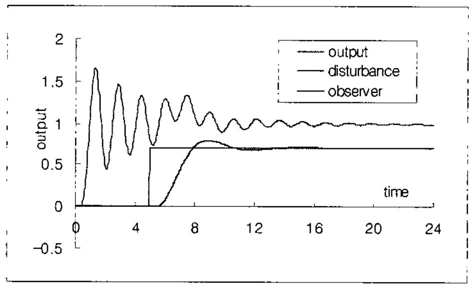

그림 4. 외란 검출 및 응답

Fig 4. Response and estimated disturbance

불안정한 계로는 다음과 같은 전달함수를 가정하여 시뮬레이션 하였다.

$$G(s) = \frac{e^{-0.5s}}{s^2 + 0{:}9s - 0.1} \tag{19}$$

입력 및 외란은 앞의 경우와 같이 단위계단 함수 및 0.7로 가정하였으며, 제어기로는 전체계의 안정도를 고려하여 다음과 같은 PID 제어기를 가정하였다.

$$G_c(s) = 1 + s + \frac{1}{s} \tag{20}$$

그림5는 0초부터 외란이 인가된 경우의 결과이며 그림6은

5초 후에 외란이 가해진 경우의 응답을 나타낸다. 이 경우에도 외란 검출이 용이하며 이에 따른 응답특성도 원만히 수행됨을 알 수 있다.

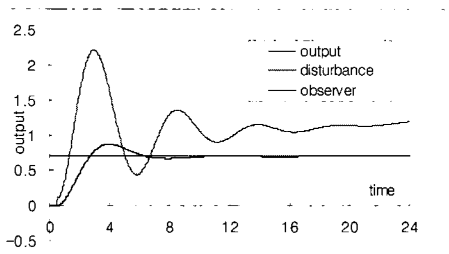

그림 5. 외란 검출 및 응답
Fig 5. Response and estimated disturbance

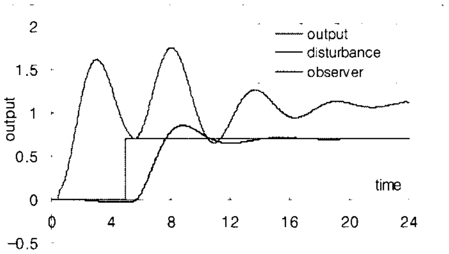

그림 6. 외란 검출 및 응답
Fig 6. Response and estimated disturbance

3. 결 론

본 논문에서는 시간지연 시스템의 입력측에 인가된 외란을 검출하기 위한 적응외란 관측자를 구성하였다. 이를 위하여 새로운 형태의 관측자를 제안하였으며 이를 제어할 수 있는 적응 알고리즘을 구하였다. 또한 검출된 외란을 사용하여 스미스 예측 제어기를 구성한 결과 외란에 대한 정상상태 오차를 0으로 할 수 있는 스미스 예측제어기를 구성할 수 있었다.

구성된 시스템에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하여 제안한 시스템의 효용성 및 우수성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 경상대학교 연구년제 연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었음

참 고 문 헌

[1] K. Watanabe, "A new modified Smith predictor control for time delat systems with an integrator", Proc. of the 2nd Asian Control Conference, Vol.3 pp. 127 - 130, July, 1997, Seoul

[2] S. Majhi, D.P. Atherton, "Modified Smith predictor and controller for proceses with time delay", IEE Proc. Control Theory Appl., Vol.146, No. 5, pp. 359-366, September 1999

[3] M.R. Matausek A.D. Micic, " A modified Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead time", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.41, No.8,pp. 1199-1203, August 1996

[4] M.R. Matausek, A.D. Micic, " On the modified Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead time", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.44, No.8, pp. 1603-1606, August 1999

[5] K.J. Astrom, C.C. Hang, and B.C. Lim, " A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead time", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.39, No.2, pp. 343-345, February 1994

[6] K. Natori, K Ohnishi, "An approach to design of feedback systems with time delay", Industrial Electronics Society, 2005, IECON 2005

[7] T. Takehara, T. Kunitake, H. Hashimoto, F. Harashima, ' The control for the disturbance in the system with time delay", Proceedings 1996 4th International Workshop on Advanced Motion Control, 1996

[8] K. S. Narendra, A. M. Annaswamy, "Stable Adaptive System", Prentice Hall, 1989

저 자 소 개

이 순 영 (李 順 榮)

1958년 11월생. 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1982년 한양대학교 대학원 전기공학과 공학석사. 1985년 한양대학교 대학원 전기공학과 공학박사, Yale 대학교, Pennsylvania 주립대학교, Calgary 대학교 방문교수, 1986년- 현재 경상대학교 전기전자 공학부 교수