

시간지연 시스템 제어를 위한 적응제어 알고리즘 개발

Development of the Adaptive Algorithm for Time Delay Systems

Soon-Young Lee*
이 순 영*

Abstract

In control of time delay systems, if the informations about the system model and the disturbance can be estimated exactly, the ideal response can be achieved by using Smith predictor controller. Therefore, in this paper, an adaptive algorithm is proposed to control time delay systems existing modelling errors and disturbance. An adaptive observer to estimate disturbance and system model is designed and adaptive laws adjusting the observer are proposed. The new Smith predictor controller is designed using the proposed adaptive observer. As a result, the proposed controller can eliminate the effects of the disturbance and the modelling error. The effectiveness and the improved performance of the proposed system are verified by computer simulation.

요 약

시간지연 시스템 제어에서 시스템 모델과 외란에 대한 정보를 정확히 구할 수 있으면 스미스 예측제어기를 이용하여 이상적인 출력 특성을 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 모델링 오차 및 외란이 존재하는 시간지연 시스템을 효과적으로 제어할 수 있는 적응제어 알고리즘을 제시하였다. 이를 위하여 시스템 모델과 외란을 검출 할 수 있는 적응관측자 및 적응 알고리즘을 제안하였으며 이 신호들을 이용한 스미스 예측제어기를 구성하였다. 그 결과 모델링 오차 및 외란의 영향을 소거할 수 있는 제어기를 설계 할 수 있었다. 이렇게 구성된 제어기에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하여 제안된 시스템의 효용성 및 우수성을 입증하였다.

Key words : Adaptive control, Adaptive observer, Smith predictor controller, Time delay system

1. 서론

제어계 입력은 현재의 제어량에 따라 변화되어야 하지만 시간지연 시스템은 과거 제어량이 피드백 되므로 올바른 제어효과를 얻을 수 없다. 또한 시간지

연을 포함하는 제어계에서는 시간지연이 클수록 제어계의 안정을 위하여 제어이득을 낮추어야 하는데 그럴 경우 응답이 매우 느리게 된다. 따라서 이런 문제를 해결하기 위해서는 현재 제어량을 예측하는 것이 필요하게 된다[1].

시간지연을 극복하기 위한 방법으로 스미스 예측제어기가 주로 많이 사용되고 있는데, 이는 간단하면서도 효과적으로 시간지연 요소를 제거할 수 있기 때문이다. 이 방법은 지연시간시스템을 전달함수 부분과 지연시간 부분으로 각각 모델링하여 케환 신호를 사용함으로써 마치 부동시간을 제외한 것과 같은 제어효과를 얻는 것이다. 그러나 플랜트에 외란이 인가

* 경상대학교 전기전자공학부, 공학연구원
(School of Electrical and Electronics Engineering,
Gyeongsang National University)
※ 이 연구는 2007년도 경상대학교 학술진흥지원사업 연구
비에 의하여 수행되었음
接受日:2009年 2月 13日, 修正完了日: 2009年 3月 17日

되거나 모델링 오차가 발생하게 되면 제어하기가 어려울 뿐 아니라 정상상태 오차가 발생하게 되고 또한 내부적으로 불안정해질 수 있다[2].

따라서 이러한 시간지연계의 응답을 개선하기 위한 많은 방법들이 제시되었는데 Watanabe[1]나 Matausek[3,4], Wang[5] 등과 같이 주로 외란 보상기를 이용한 설계가 주를 이루고 있다. 그러나 이 방법들은 많은 변수들을 조정해야 하는 어려움이 있어 사용에 제약을 받는다. 한편 Natori[6], Takehara[7] 등은 Luenberger 형태의 관측자를 구성하여 외란을 검출하는 방법을 사용하였으나 외란을 확실하게 추종하지 못하고 정상상태오차가 발생하게 된다. 또한 위의 방법들은 외란에 대한 보상 방법만을 다루었을 뿐 모델링편차가 발생할 경우에는 적용 할 수 없다.

이에 본 논문에서는 모델링 편차 및 외란이 존재하는 경우의 시간지연 시스템 제어를 위한 새로운 적응제어 알고리즘을 제안하였다. 이를 위하여 플랜트 파라미터 및 플랜트에 인가되는 외란을 추정할 수 있는 적응관측자를 구성하였으며, 적응관측자로부터 검출된 신호들을 스미스예측제어기의 모델부분에 인가시킴으로써 모델링 오차 및 외란의 영향을 빠르게 소거할 수 있도록 하였다. 그 결과 모델링 오차 및 외란에 대하여 안정하며 정상상태오차를 빠르게 0으로 할 수 있는 새로운 형태의 스미스 예측제어기를 구성할 수 있었다. 또한 순수 적분항을 갖는 계와 불안정한 계에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 구성된 적응제어기의 효용성 및 우수성을 확인하였다.

II. 스미스 예측 제어기

시간지연 플랜트에 대한 스미스예측제어기의 블록 선도는 그림1과 같다. 여기서 $r(t)$ 는 기준입력이고 $d(t)$ 는 외란을 나타낸다. 또한 $G_c(s)$ 는 제어기로 PI 혹은 PID 제어기가 주로 사용된다.

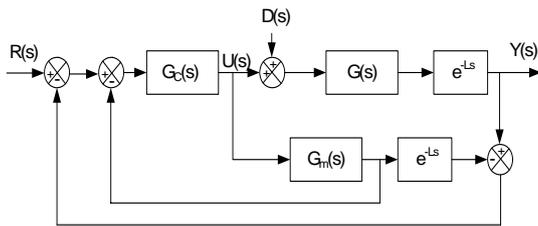


그림 1. 스미스 예측 제어기
Fig 1. Smith predictor control system

모델링 오차가 존재하지 않을 경우(즉,

$G(s) = G_m(s)$) 기준입력 및 외란에 의한 전달함수는 다음과 같다.

$$Y(s) = H_r(s)R(s) + H_d(s)D(s) \quad (1)$$

여기서

$$H_r(s) = \frac{G_c G e^{-Ls}}{1 + G_c G} \quad (2)$$

$$H_d(s) = \frac{G e^{-Ls}}{1 + G_c G} + \frac{G_c G e^{-Ls}}{1 + G_c G} (G - G e^{-Ls}) \quad (3)$$

플랜트가 적분항을 포함하고 있지 않으면 계단입력 형태의 외란에 대한 정상상태오차는 0이 된다. 그러나 플랜트의 전달함수가 순수 적분항을 포함하거나 허수축에 가까운 극점을 가지고 있는 경우 외란에 대하여 정상상태 오차가 존재하게 되고 또한 내부적으로 불안정해질 수도 있다.

그러나 그림 2와 같이 식별기에 의해 $G(s) = G_m(s)$ 가 되고, 외란 관측자를 이용 외란을 측정하여 모델에 인기시키면 외란에 대한 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$H_d(s) = \frac{G e^{-Ls}}{1 + G_c G} \quad (4)$$

이 식으로부터 계단입력 형태의 외란에 대하여 정상상태오차는 0이 되고 안정도 또한 보장됨을 알 수 있다.

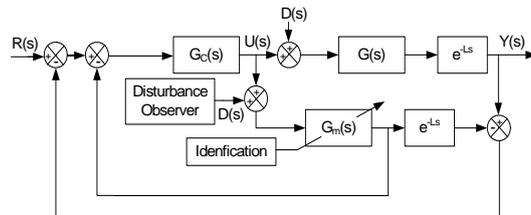


그림 2. 식별기 및 검출된 외란을 이용한 스미스 예측 제어기
Fig 2. Smith predictor control system using identification and estimated disturbance

III. 적응제어기 설계

다음과 같이 입력에 외란이 가해진 시간지연 시스템

을 생각한다[7].

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{Bd} \\ \dot{d} &= 0 \\ y &= \mathbf{Cx}(t-T) \end{aligned} \quad (5)$$

위 플랜트는 비최소 위상시스템이며 \mathbf{A} 와 \mathbf{B} 는 미지이며 \mathbf{C} 는 측정가능 하다. 또 T 는 지연시간이고 d ($|d| \leq v$)는 외란으로 최대치 v 는 알고 있다고 가정한다.

플랜트 전달함수 및 외란을 추정하기 위한 관측자를 다음과 같이 구성한다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_0 &= \mathbf{A}_m \mathbf{x}_0 + [\mathbf{A}_0 - \mathbf{A}_m] \mathbf{x} + \mathbf{B}_0 u + \mathbf{B}_0 d_0 - 2\tilde{\mathbf{B}} \\ \dot{d}_0 &= -\mathbf{B}_0^T \mathbf{e} + h(y_0 - y) - |h|d_0 \\ y_0 &= \mathbf{C} \mathbf{x}_0(t-T) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 \mathbf{A}_m 은 임의의 안정한 $n \times n$ 행렬이고, $\mathbf{B}_0 = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$, $\mathbf{e} = \mathbf{x}_0 - \mathbf{x} = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T$ 이다. 또 $e_d = d_0 - d$ 이고 h 는 가변파라미터 이며 $\tilde{\mathbf{B}}$ 는 다음과 같다.

$$\tilde{\mathbf{B}} = [\text{sgn}(e_1)|b_1|, \text{sgn}(e_2)|b_2|, \dots, \text{sgn}(e_n)|b_n|]^T \quad (7)$$

식(5)와 식(6) 으로부터 다음과 같은 오차식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}} &= \mathbf{A}_m \mathbf{e} + \Phi \mathbf{x} + \Psi u + \mathbf{B}_0 e_d + \Psi d - 2\tilde{\mathbf{B}} \\ \dot{e}_d &= \dot{d}_0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $\Phi = \mathbf{A}_0 - \mathbf{A}$, $\Psi = \mathbf{B}_0 - \mathbf{B}$ 이며 다음과 같은 적응칙에 의하여 구해진다.

$$\begin{aligned} \dot{\Phi} &= -\mathbf{e} \mathbf{x}^T \\ \dot{\Psi} &= -\mathbf{e} u + \mathbf{H}^T v \\ \dot{h} &= -d_0(y_0 - y) - \text{sgn}(h)v(|y_0 - y| + |d_0| + v) \\ \mathbf{H} &= [|e_1|, |e_2|, \dots, |e_n|] \end{aligned} \quad (9)$$

위의 적응칙을 증명하기 위하여 다음과 같은 Lyapunov 함수를 가정한다.

$$V = \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \text{Tr}(\Phi^T \Phi) + \Psi^T \Psi + e_d^2 + h^2 \quad (10)$$

위 함수의 도함수를 구하면,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{e}^T (\mathbf{A}_m^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_m) \mathbf{e} + 2\mathbf{e}^T (\mathbf{P} \Phi \mathbf{x} + \mathbf{P} \Psi u) + 2h\dot{h} \\ &\quad + 2\mathbf{e}^T (\mathbf{B}_0 e_d + \Psi d) + 2\text{Tr}(\dot{\Phi}^T \Phi) + 2\Psi^T \dot{\Psi} + 2\dot{e}_d e_d \end{aligned} \quad (11)$$

위의 도함수를 오차식과 적응칙을 이용하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} - 2e_d(h(y_0 - y) + |h|d_0) + 2\mathbf{e}^T \Psi d \\ &\quad + 2\Psi^T \mathbf{H} v - 2\mathbf{e}^T \tilde{\mathbf{B}} - 2hd_0(y_0 - y) \\ &\quad - 2|h|v(|y_0 - y| + |d_0| + v) \\ &\leq -\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} - 2dh(y_0 - y) - 2e_d^2|h| \\ &\quad + 2|h|(d^2 - dd_0) - 2|h|v(|y_0 - y| + |d_0| + v) \\ &\leq -\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} + 2|dh||y_0 - y| - 2e_d^2|h| + 2|h|d^2 \\ &\quad + 2|h|dd_0 - 2|h|v(|y_0 - y| + |d_0| + v) \\ &\leq -\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} - 2e_d^2|h| \leq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

위의 식에서 \mathbf{A}_m 은 안정한 행렬이므로 다음을 만족하는 행렬 \mathbf{Q} 가 존재한다.

$$\mathbf{A}_m^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_m = -\mathbf{Q} \leq 0 \quad (13)$$

위의 식(10)과 식(12)로부터 다음이 만족됨을 알 수 있다.

$$\mathbf{e} \in \mathcal{L}^\infty, \quad e_d \in \mathcal{L}^\infty, \quad \dot{\mathbf{e}} \in \mathcal{L}^\infty, \quad \dot{e}_d \in \mathcal{L}^\infty \quad (14)$$

또한 식(13)으로부터,

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

따라서 다음식이 만족된다.

$$\mathbf{e} \in \mathcal{L}^2, \quad e_d \in \mathcal{L}^2 \quad (16)$$

그러므로 식(14)와 식(16)으로부터 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e} = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} e_d = 0$ 이 된다[8]. 상태와 외란오차는 점근안정하여 0이 되는데 반하여 파라미터 오차는 안정할 뿐 0이 되지 못하여 $G(s) = G_m(s)$ 가 되지 않

는다. 그러나 상태오차가 0이므로 궤환되는 신호는 $G(s) = G_m(s)$ 가 된 경우와 같은 효과가 있어 원하는 제어계를 구성할 수 있다.

IV . 시뮬레이션 및 검토

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

순수 적분기를 가지는 플랜트의 전달함수는 다음과 같이 가정하였다.

$$G_1(s) = \frac{e^{-s}}{s^2 + 0.9s} \tag{17}$$

입력은 단위 계단함수를 사용하였으며 외란은 0.7로 가정하였다. 제어기로는 전체계의 안정도를 고려하여 다음과 같은 PID 제어기를 사용하였다.

$$G_c(s) = 1 + \frac{1}{s} + 10s \tag{18}$$

그림3은 0초부터 외란이 인가된 경우의 결과이며 그림4는 12초 후에 외란이 가해진 경우의 응답을 나타내는데 원하는 출력 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

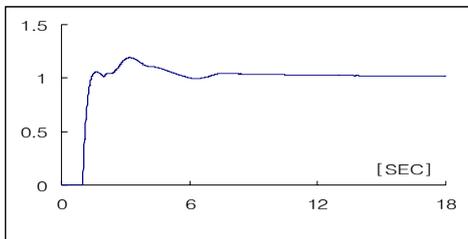


그림 3. $G_1(s)$ 의 응답($t=0$ 에서 $d=0.7$)

Fig 3. Output of $G_1(s)$ when $d=0.7$ at $t=0$

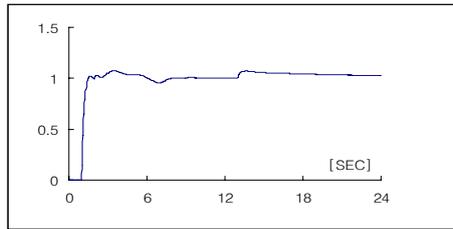


그림 4. $G_1(s)$ 의 응답($t=12$ 에서 $d=0.7$)

Fig 4. Output of $G_1(s)$ when $d=0.7$ at $t=12$

불안정한 계로는 다음과 같은 전달함수를 가정하여 시뮬레이션 하였다.

$$G_2(s) = \frac{e^{-s}}{s^2 + 0.9s - 0.1} \tag{19}$$

입력 및 외란은 앞의 경우와 같이 단위계단 함수 및 0.7로 가정하였으며, 제어기도 앞의 경우와 같이 가정하였다.

그림5는 0초부터 외란이 인가된 경우의 결과이며 그림6은 15초 후에 외란이 가해진 경우의 응답을 나타낸다. 이 경우에도 정상상태 오차 없이 원하는 출력 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

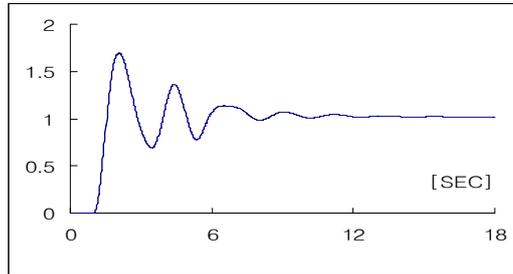


그림 3. $G_2(s)$ 의 응답($t=0$ 에서 $d=0.7$)

Fig 3. Output of $G_2(s)$ when $d=0.7$ at $t=0$

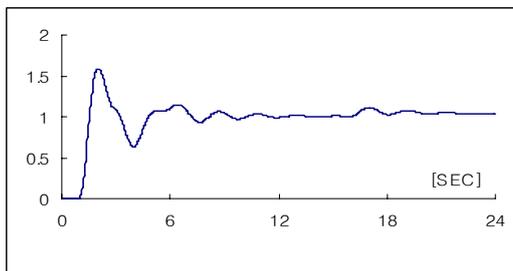


그림 4. $G_2(s)$ 의 응답($t=15$ 에서 $d=0.7$)
 Fig 4. Output of $G_2(s)$ when $d=0.7$ at $t=15$

V. 결 론

본 논문에서는 외란이 존재하는 시간지연 시스템을 효과적으로 제어할 수 있는 적응제어 알고리즘을 개발하였다. 입력에 인가된 외란을 검출하고 모델을 식별할 수 있는 적응 관측자를 설계하여 제어계를 구성하였다. 이를 위하여 새로운 형태의 관측자를 제안하였으며 이를 제어할 수 있는 적응 알고리즘을 구하였다. 이렇게 함으로써 모델링 오차와 외란의 영향을 소거할 수 있는 새로운 스미스 예측제어기를 구성할 수 있었다.

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

참고문헌

- [1] K. Watanabe, "A new modified Smith predictor control for time delay 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 processes 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] G.G. Wang, H. Q. Zhou, Y.S. Yang, Y.Zhang and Yu Zhang, ' Modified Smith Predictor Design for Periodic Disturbance Rejection", 5th Asian Control Conference, 2004
- [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 (정회원)



1980년 : 한양대학교 전기공학과
 졸업 (공학사)
 1982년 : 한양대학교 대학원 전기
 공학과 (공학석사)
 1985년 : 한양대학교 대학원 전기
 공학과 (공학박사)
 1986년 4월~현재 : 경상대학교
 교수