

Study on Smith Predictor Design for a System with a Time-delayed Controller

정 슬
(Seul Jung)

Intelligent Systems and Emotional Engineering(I.S.E.E) Lab.
Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

Abstract : 시간지연제어기는 이전의 정보를 이용하여 시스템의 불확성을 없애는 제어방식이다. 시간지연 제어 방식에서는 빠른 제어 샘플링과 시스템의 일부 정보(관성) 그리고 가속도의 정확한 측정을 필요로 한다. 하지만 시간지연제어기는 시간지연의 비선형을 추가하여 안정성을 확보하지 못하는 것이 가장 큰 문제이다. 본 논문에서는 시간지연 제어기를 사용하는 시스템을 위한 스미스 예측기를 제안하고 설계한다. 스미스 예측기는 시간지연 요소를 없애어 안정성을 확보하는 것으로 시간지연제어기에서 필수적으로 나타나는 시간지연 문제를 해결한다.

Keywords : Time-delayed control, Smith predictor, stability

I 서론

시스템에 대한 외란은 시스템의 성능을 저하시킬 뿐만아니라 안정성에 영향을 주기도 한다. 대표적인 외란 제어기는 외란 관측기(Disturbance observer : DOB)를 사용하는 방법으로 외란을 평가하여 상쇄시키는 방법이다.

외란 관측기는 그 구조가 간단하기 때문에 모터제어 시스템에 많이 사용되어져 왔고[1], 하드디스크 드라이브의 모터제어에도 적용되었대[2]. DOB의 구조에서 외란을 평가하기 위해서는 시스템의 출력을 시스템의 역모델을 거쳐 시스템의 입력을 평가하는 방식으로 시스템의 모델의 정확성에 따라 성능이 좌우된다. 이와 같이 시스템의 모델오차와 센서의 잡음과 같은 문제를 해결하기 위해 Q필터를 사용한다. 따라서 외란 관측기에서 핵심은 시스템의 역모델의 정확성과 Q 필터의 설계라고 할 수 있다.

시간지연제어기(Time-delayed control :TDC)는 외란관측기와 유사한 구조를 갖는다. 시간지연제어기는 외란을 관측하기 위해 역모델을 사용하지 않고 이전 샘플 시간의 정보를 사용한다. 그 구조가 간단하여 로봇제어나 무인항공기 제어 등과 같은 비선형 시스템의 제어에 쓰여 왔다 [3-5].

시간지연제어 방식은 이전 샘플 정보를 사용하므로 샘플링이 빨라야 하는 조건을 만족해야 한다. 최근에 하드웨어의 발달로 샘플링시간은 충분히 빠른 제어 주기를 얻을 수 있어 이 문제는 해결이 가능하다. 이전

샘플정보에는 제어입력과 시스템의 관성정보 그리고 가속도 정보가 있는데 이 정보들의 정확성에 의해 제어기의 성능이 좌우된다. TDC는 DOB와 마찬가지로 시스템의 일부 모델, 즉 관성 모델이 필요하다. 또한 가속도 정보가 필요한데 이 부분이 가장 취약하다. 우선 가속도를 알아내기 위해서는 시스템의 출력으로부터 직접 계산을 통해서 구하는 경우가 가장 간단한데 잡음이 많아 사용하기 어려운 것이 문제이다. 최근에는 시스템에 가속도를 측정할 수 있는 센서를 부착하여 직접 측정하는 방법이 제안되었대[6].

본 논문에서는 시간지연제어기의 단점인 시간지연 문제를 해결하여 안정성을 확보하는 제어방식을 제안하고자 한다. 스미스 예측기를 사용하여 안정성에 영향을 미치는 시간지연문제를 해결하고자 한다.

II 시간지연제어기

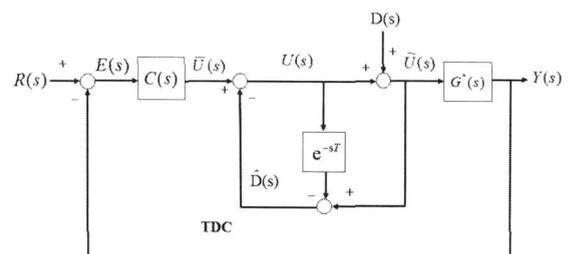


그림 1. 이상적인 시간지연제어 시스템 구조

그림 1은 이상적인 시간지연 제어시스템을 DOB구조에 맞추어 나타내고 있다. 공정이 $G(s)$ 이고 제어기가

$C(s)$ 그리고 외란이 $D(s)$ 이다. 여기서 이상적이란 의미는 실제로 귀환되는 신호 $\tilde{u}(s)$ 가 주어지지 않기 때문이다.

외란의 평가치 $\hat{D}(s)$ 는 다음과 같이 구한다.

$$\hat{D}(s) = \tilde{U}(s) - U(s)e^{-sT} = D(s) + U(s)(1 - e^{-sT}) \quad (1)$$

여기서 T 는 샘플링 시간이다.

그림 1에서 $\hat{D}(s) = U(s) - \bar{U}(s)$ 이므로 식(1)에 대입하여 정리하면 제어입력은 다음과 같다.

$$U(s) = \frac{\bar{U}(s) - D(s)}{2 - e^{-sT}} \quad (2)$$

식(2)를 이용하여 기준입력 $R(s)$ 와 외란 입력 $D(s)$ 에 대한 시스템의 출력을 구하면 다음과 같다.

$$Y(s) = \frac{G^*(s)C(s)R(s)}{2 - e^{-sT} + G^*(s)C(s)} + \frac{(1 - e^{-sT})G^*(s)D(s)}{2 - e^{-sT} + G^*(s)C(s)} \quad (3)$$

만약 샘플링이 빨라 $|e^{-sT}| = 1$ 이면 식(3)은 외란의 영향이 제거된 형태가 된다.

$$Y(s) = \frac{G^*(s)C(s)}{1 + G^*(s)C(s)} R(s) \quad (4)$$

하지만 일반적으로 식(3)에서 분모의 시간지연 텀, e^{-sT} 의 영향이 남아있어 안정성이 확보되지 않는다. 따라서 분모의 시간지연을 없애는 것이 필요하다.

III. 스미스 예측기 설계

시간지연제어 방식 (3)에서 보면 특성방정식에 시간지연이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이 시간지연을 제거하기 위해 스미스 예측기를 설계하고자 한다.

먼저 그림 1에서 $\tilde{u}(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \tilde{U}(s) &= U(s) + D(s) \\ &= \frac{1}{2 - e^{-sT}} [\bar{U}(s) + (1 - e^{-sT})D(s)] \end{aligned} \quad (5)$$

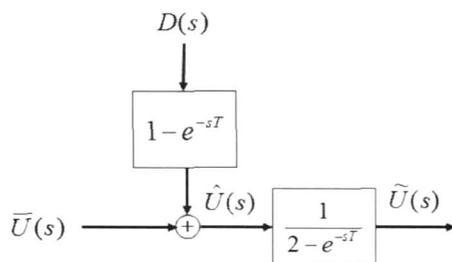


그림 2. 식(5)의 블록 다이어그램 구조

식(5)를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다. 따라서 시간지연이 있는 부분을 시스템의 전달함수에 포함하면 새로운 시스템은 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{G^*(s)}{2 - e^{-sT}} \quad (6)$$

시간지연이 있는 시스템에서 시간지연 부분을 제거하기 위한 스미스 예측기를 설계한다.

식(6)을 포함한 스미스 예측기의 설계는 그림 3과 같다.

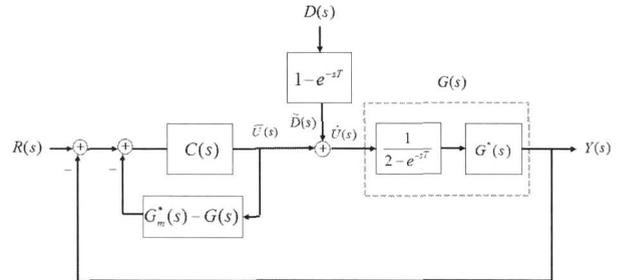


그림 3. 시간지연을 위한 스미스 예측기 구조

그림 3에서 제어입력 $\bar{U}(s)$ 는 다음과 같다.

$$\bar{U}(s) = \frac{C(s)(R(s) - Y(s))}{1 + C(s)(G_m^*(s) - G(s))} \quad (7)$$

여기서 $G_m^*(s)$ 는 시스템의 모델이다.

식(7)을 대입하여 출력을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{G(s)C(s)}{1 + C(s)(G_m^*(s) - G(s)) + G(s)C(s)} R(s) \quad (8) \\ &+ \frac{G(s)[1 + C(s)(G_m^*(s) - G(s))]}{1 + C(s)(G_m^*(s) - G(s)) + G(s)C(s)} \tilde{D}(s) \end{aligned}$$

여기서 $\tilde{D}(s) = (1 - e^{-sT})D(s)$ 이다. 식(7)을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{G(s)C(s)}{1 + G_m^*(s)C(s)} R(s) \quad (9) \\ &+ \frac{G(s)[1 + C(s)(G_m^*(s) - G(s))]}{1 + G_m^*(s)C(s)} (1 - e^{-sT})D(s) \end{aligned}$$

식(9)에서 보면 분모에 시간지연이 없어진 것을 알 수 있다. 또한 $|e^{-sT}| = 1$ 이므로 외란의 영향이 영이 되어 식(9)는 외란의 영향이 없어지게 되는 것을 알 수 있다. 더불어 분모에 시간지연이 제거된 형태로 나타남을 볼 수 있다. 특성방정식은 다음과 같다. 시스템 모델 $G_m^*(s)$ 에 의한 특성 방정식으로 구성되는 것을 볼 수 있다.

$$1 + G_m^*(s)C(s) = 0 \quad (10)$$

그러므로 추종성능은 시스템의 모델이 얼마나 정확한 한가에 달려있음을 알 수 있다.

$$Y(s) = \frac{G(s)C(s)}{1 + G_m^*(s)C(s)} R(s) \quad (11)$$

그러나 분자에는 시간지연이 나타남을 볼 수 있다. 이는 안정성에는 영향을 미치지 않으므로 제어를 설계할 때 고려하면 된다.

하지만 제어기 $C(s)$ 를 잘 설계하면 되겠지만 제어기는 특성방정식에 영향을 미치므로 설계에 한계가 있다. 즉 특성방정식에 영향을 미치지 않는 선필터(prefilter)를 설계하여 시간지연 요소를 줄일 수 있다. 그림 4는 선필터를 추가한 제어블록 다이어그램이다.

선필터를 추가한 전달함수는 다음과 같다.

$$Y(s) = \frac{G(s)C(s)P(s)}{1 + G_m^*(s)C(s)}R(s) \quad (12)$$

여기서 $P(s)$ 는 선필터이다. 선필터를 phase lead 형태로 설계를 하면 시간지연으로 인한 응답의 처짐을 보완 할 수 있다.

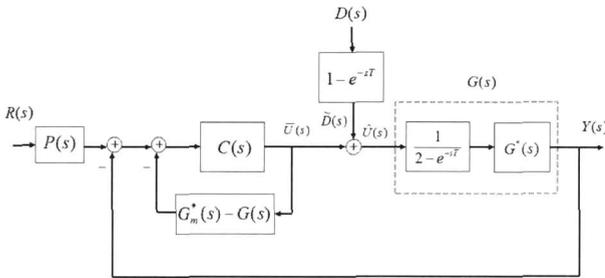


그림 4. 선필터를 추가한 스미스 예측기 구조

하지만 그림 4에서 보면 2가지 문제점이 발생한다. 하나는 $G_m^*(s) - G(s)$ 의 구현이고 다른 하나는 외란에 대한 조작성 불가능 한 것이다.

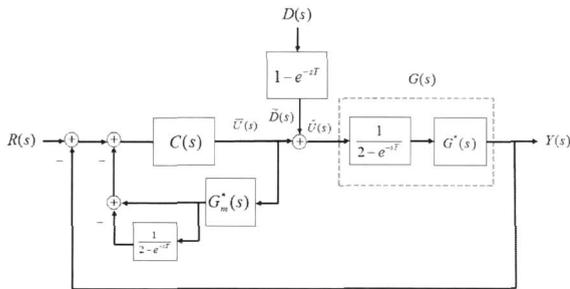


그림 5. 변경된 스미스 예측기 구조

여기서 $G_m^*(s) - G(s)$ 은 모델을 이용하여 그림 5와 같이 구현하면 된다. 하지만 외란에 대한 문제는 아직 풀어야 할 숙제로 남아 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 시간지연제어기를 사용할 경우에 발생하는 시간지연을 없애기 위해 스미스 예측기를 설계하였다. 스미스 예측기를 사용하면 특성방정식에서

시간지연을 없애주어 시스템의 안정성을 높이는 효과를 가져왔다. 시스템의 성능은 시스템 모델에 의존하므로 시스템 모델에 오차가 있을 경우에는 $Q(s)$ 필터를 추가하여 성능을 높일 수 있을 것이다. 또한 선필터 $P(s)$ 를 추가하여 input shaping을 통해 시간지연을 보완하는 효과를 얻을 수 있다. 하지만 문제점은 외란에 대한 처리를 할 수 없다는 것이다. 추후연구에서는 $Q(s)$ 필터를 고려한 스미스 예측기의 성능을 파악하기 위해 시뮬레이션을 통한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 2014년 충남대학교 학술연구지원사업의 지원을 받아 수행되었음을 알려드리고 지원에 감사드립니다.

V. 참고 문헌

- [1] K. Ohnishi, "A New Servo Method in Mechatronics", Trans. Japanese Society of Electrical Engineers, vol. 107D, pp. 83-86, 1987
- [2] M. Tomizuka, "Robust Digital Motion Controllers for Mechanical Systems", Robotics and Autonomous System, pp. 143-149, 1996
- [3] K. Yousef-Toumi and O. Ito, "A Time-delay controller for systems with unknown dynamics", Journal of Dynamic Systems, measurement, and Control", vol. 112, pp. 133-142, 1990
- [4] S. Jung, T. C. Hsia, and R. G. Bonitz, "Force Tracking Impedance control for robot manipulators with an unknown environment : Theory, Simulation, and Experiment", International Journal of Robotics Research, vol. 29, no. 9, pp. 765-774, 2001
- [5] J. G. Lim and S. Jung, "Experimental Studies of Attitude Control of a Quad-rotor System Using a Time-delayed Controller", Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, vol.20, no.4, pp. 381-388, 2014
- [6] S. H. Jeong and S. Jung, "Design and Experimental Studies of Disturbance Observer for Attitude Control of a Quad-rotor System", Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, vol.19, no.11, pp. 1004-1010, 2013