

신호전송 시간지연을 갖는 원격조작시스템의 힘반영 위치제어

안 성 호, 진 재 현, 박 병 석, 윤 지 섭
한국원자력연구소 사용후핵연료원격취급실증장치개발실
전화 : 042-868-2518 / 팩스 : 042-868-2854

A Force Reflecting Position Control for Teleoperation Systems with Signal Transmission Time Delay

Sung Ho Ahn, Jae Hyun Jin, Byung Suk Park, Ji Sup Yoon
Dept. of Spent Fuel Remote Handling Tech., Korea Atomic Energy Research Institute
E-mail : shahn2@kaeri.re.kr

Abstract

When the teleoperation system has a signal transmission time delay between slave system and control system, the position tracking performance of the slave system and system stability are likely to be deteriorated. This paper proposes a force reflecting position control scheme for teleoperation system with signal transmission time delay. The proposed scheme not only satisfy the system internal stability but also improves the position tracking performance with disturbance rejection capability. The simulation results show that the proposed control method provides excellent performances.

I. 서론

원격조작시스템에서 슬레이브 조작기가 마스터 조작기와 제어시스템으로부터 멀리 떨어진 원격지에 위치하는 경우에는 제어시스템과 슬레이브 조작기 사이의 신호전송에 시간지연이 발생할 수 있다. 이러한 시간지연은 슬레이브 조작기의 위치추종성능과 시스템의 안전성을 저하시키기 때문에 정교한 제어성능을 얻기 어렵다.

시간지연을 갖는 시스템의 제어기법이 활발히 연구되어 왔다. Smith에 의해 1959년 처음 도입된 smith predictor 제어기법은 시간지연 시스템의 모델을 포함하는 제어를 간단하게 설계할 수 있기 때문에 널리 사용되어 왔다. Smith predictor 제어기법은 근본적으로 안정한 시스템에 대해서만 적용할 수 있기 때문에, 시간지연을 갖는 불안정한 시스템에 대한 보상기법으로 modified smith predictor 제어기법이 제시되었다 [1][2].

힘반영 제어기법은 슬레이브 조작기에 장착된 힘/토크 측정센서로부터의 신호를 이용하여 힘반영하는 힘기준형(position-force) 제어기법과, 마스터와 슬레이브 조작기의 위치오차를 이용하여 힘반영하는 위치기준형(position-position) 제어기법으로 크게 분류된다. 일반적으로 힘반영 측면에서는 힘기준형 기법이 위치기준형 기법보다 우수한 성능을 갖지만, 슬레이브 조작기와 제어시스템 사이에 신호전송 시간지연이 존재하는 경우에는 위치기준형 기법이 힘기준형 기법보다 시간지연에 대하여 덜 민감하다.

본 논문에서는 슬레이브 조작기와 제어시스템 사이의 신호전송 과정에서 시간지연이 존재하는 경우에 대하여 위치기준형 힘반영 위치제어기법을 기반으로 하고, smith predictor 제어기법을 응용한 시간지연 보상 힘반영 위치제어기법을 제안한다. 제안한 기법에서는 시간지연을 갖는 불안정한 개루프 전달함수에 대하여 시스템의 내부안정도(internal stability)를 만족하고, 외

란제거 성능을 갖도록 제어를 설계한다. 제안한 기법으로 시간지연이 존재하는 원격조작시스템을 정교하게 위치제어할 수 있다는 장점이 있다. 2절에서는 시간지연을 갖는 원격조작시스템의 문제를 살펴보고, 3절에서는 시간지연을 보상한 힘반영 제어기법을 제안한다. 4절에서는 전산모사를 통하여 제안한 기법의 성능을 살펴보고, 5절에서는 결론을 맺는다.

II. 문제설정

2.1 1자유도 원격조작시스템의 모델링

슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않고 자유운동을 할 경우의 시스템의 동역학적 특성은 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다[3].

$$\tau_m + f_m = m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m \quad (1)$$

$$\tau_s = m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s \quad (2)$$

여기서 x_m 과 x_s 는 마스터 조작기와 슬레이브 조작기의 변위, m_m 과 m_s 는 마스터 조작기와 슬레이브 조작기의 질량, b_m 과 b_s 는 마스터 조작기와 슬레이브 조작기의 감쇠계수, f_m 는 조작자가 마스터 조작기에 가하는 힘, τ_m 과 τ_s 는 마스터와 슬레이브 조작기를 제어하기 위해 제어기로부터 가해지는 힘이다. 일반적으로 τ 는 토크를 표현하는 기호지만 여기서는 1자유도이므로 편의를 위해 힘으로 환산한 제어입력으로 취급한다.

작업자의 동역학적 특성은 다음과 같이 모델링한다.

$$\tau_{op} - f_m = m_{op} \ddot{x}_m + b_{op} \dot{x}_m + c_{op} x_m \quad (3)$$

여기서 m_{op} 는 작업자의 질량, b_{op} 는 작업자의 감쇠계수, c_{op} 는 작업자의 스프링상수이다.

한편, 위치기준형 힘반영 원격조작시스템에서는 마스터 조작기와 슬레이브 조작기의 위치오차를 마스터 조작기를 통하여 조작자에게 힘반영하며, 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_m = K_f(x_m - x_s) \quad (4)$$

여기서 K_f 는 힘반영비이다. X_m, X_s 는 마스터와 슬레이브 조작기의 위치이고, X_r 는 슬레이브 조작기가 추종하는 기준위치이다. K 는 위치환산 계수이다.

2.2 신호전송 시간지연을 갖는 원격조작시스템

그림 1은 전송신호 시간지연을 갖는 위치기준형 힘

반영 원격조작시스템의 블록선도를 나타낸다. 마스터와 슬레이브 조작기의 제어입력은 다음과 같이 주어진다.

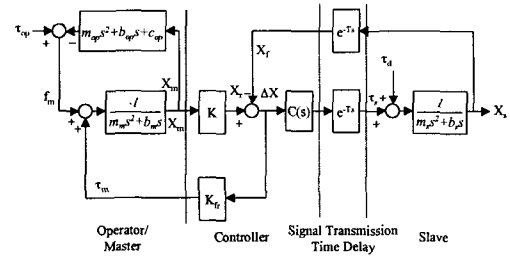


그림 1. 신호전송 시간지연을 갖는 위치기준형 힘반영 원격조작시스템

$$\tau_m(s) = K_f \{ X_m(s) - e^{-T_s} X_s(s) \} \quad (5)$$

$$\tau_s(s) = e^{-T_s} C(s) \{ X_m(s) - e^{-T_s} X_s(s) \} \quad (6)$$

신호전송 시간지연이 존재하는 원격조작시스템에 대한 힘반영 위치제어에서, 슬레이브 조작기의 전달함수는 원점에 극점을 갖는 불안정 시스템이며, 제어시스템에서부터 슬레이브 조작기로 그리고 슬레이브 조작기에서 제어시스템으로의 시간지연이 각각 존재한다. 이러한 시간지연 현상으로 인하여 시스템이 불안정하게 될 뿐 만 아니라 정밀한 힘반영 위치제어 성능을 얻기 힘들다.

III. 시간지연 보상 제어기법

3.1 시간지연 보상 힘반영 위치제어기 구조

신호전송 시간지연을 보상한 원격조작시스템에 대한 힘반영 위치제어기의 구조를 그림 2에 나타내었다. 제안한 제어기는 신호전송 시간지연을 갖는 시스템에 대하여, 시스템의 내부안정도를 만족하면서, 슬레이브 시스템의 위치추종 성능과 외란제거 성능을 향상시킨다.

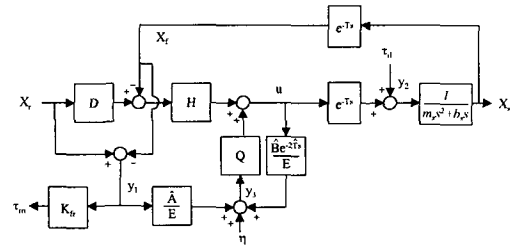


그림 2. 시간지연 보상 힘반영 위치제어기.

그림 2의 힘반영 위치제어기는 원점에 극점을 갖는 불안정한 플랜트의 전후에 시간지연을 갖는 시스템에 대하여 smith predictor 제어기법을 응용한 형태이다. 그림 2에서 제어입력(u)에 대한 슬레이브의 위치(X_s)는

$$P(s) = \frac{1}{s(M_m s + b_s)} e^{-T_s} = \frac{B(s)}{A(s)} e^{-T_s} \quad (7)$$

로 주어진다. 여기서 $A(s) = A_s(s)A_u(s)$ 이며 $A_s(s)$ 는 $P(s)$ 의 분모에 대하여 안정한 근을 갖는 다항식이며, $A_u(s)$ 는 $P(s)$ 의 분모에서 불안정한 근을 갖는 다항식이다. 식 (7)로 주어지는 플랜트에 대하여 다음과 같이 모델링한다.

$$P_m(s) = \frac{B(s)}{A(s)} e^{-T_s} \quad (8)$$

$$A(s) = A_s(s) A_u(s) \quad (9)$$

여기에서 식 (8)의 $P_m(s)$ 은 $P(s)$ 의 perfect 모델링이고 시간지연 T 는 일정하다고 가정한다. 즉, $A_s(s) = A_s(s)$, $A_u(s) = A_u(s)$, $B(s) = B(s)$, $T = T$ 라 가정한다.

그림 2에 대하여 외부입력에 대한 내부 상태변수 출력력을

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ \tau_d \\ \eta \end{bmatrix} \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서

$$\Delta = A(s) + B(s)H(s)e^{-2T_s}, \quad (11)$$

$$y_{11} = A(s) + B(s)D(s)H(s) + \left\{ H - \frac{A(s)Q(s)}{E(s)} \right\} B(s)e^{-2T_s}, \quad (12)$$

$$y_{12} = -B(s)e^{-T_s} \left\{ 1 - \frac{Q(s)B(s)}{E(s)} e^{-2T_s} \right\} \quad (13)$$

$$y_{13} = -Q(s)B(s)e^{-2T_s}, \quad (14)$$

$$y_{21} = A(s)e^{-T_s} \left\{ D(s)H(s) + \frac{Q(s)A(s)}{E(s)} \right\}, \quad (15)$$

$$y_{22} = A(s) \left\{ 1 - \frac{Q(s)B(s)}{E(s)} e^{-2T_s} \right\}, \quad (16)$$

$$y_{23} = A(s)Q(s)e^{-T_s}, \quad (17)$$

$$y_{31} = \frac{A(s)}{E(s)} \{ A(s) + B(s)H(s)e^{-2T_s} \}, \quad (18)$$

$$y_{32} = -\frac{B(s)}{E(s)} e^{-T_s} \{ A(s) + H(s)B(s)e^{-2T_s} \}, \quad (19)$$

$$y_{33} = A(s) + B(s)H(s)e^{-2T_s} \quad (20)$$

이다.

3.2 제어기 설계

식 (7)은 시간지연을 가질 뿐 만 아니라 원점에 극점을 갖는 불안정한 전달함수이므로, 이를 안정화하기 위하여

$$H(s) = \alpha \quad (21)$$

로 설계한다. 여기서 α 는 상수이다. 시스템의 내부안정도를 만족하기 위해서는 식 (10)의 모든 전달함수가 안정해야 하며, 다음의 조건이 만족되면 식 (10)의 모든 전달함수는 안정하다[2][4][5].

i) 식 (11)로 주어지는 특성방정식에서

$$\frac{\alpha B(s)}{A(s)} e^{-2T_s} \quad (22)$$

가 복소평면에서의 $(-1, 0)$ 점을 encircle하지 않도록 α 를 설정한다.

$$\text{ii) } Q(s) = f(s) \frac{E(s)}{B(s)} \quad (23)$$

로 설계하며, 이때, $Q(s)$ proper하고 안정하며, $E(s)$ 는 hurwitz이다.

식 (22), (23)이 만족될 때, 위치입력 $X_r(s)$ 와 외란 $\tau_d(s)$ 에 대한 슬레이브의 위치, $X_s(s)$, 는 다음과 같이 각각 주어진다.

$$\frac{X_s(s)}{X_r(s)} = \frac{\{f(s)A(s) + \alpha B(s)D(s)\}e^{-T_s}}{A(s) + \alpha B(s)e^{-2T_s}}, \quad (24)$$

$$\frac{X_s(s)}{\tau_d(s)} = \frac{B(s)\{1 - f(s)e^{-2T_s}\}}{A(s) + \alpha B(s)e^{-2T_s}} \quad (25)$$

식 (24), (25)에서 $D(s)$ 와 $f(s)$ 를

$$D(s) = f(s)e^{-2T_s} \quad (26)$$

$$f(0) = 1 \quad (27)$$

가 만족하도록 설계한다. 이 때 식 (24)는

$$\frac{X_s(s)}{X_r(s)} = f(s)e^{-T_s}$$

가 되어, 기준위치에 대한 슬레이브 조작기의 위치의 전달함수는 설계한 필터가 시간지연을 가지는 있는 형태로 주어진다. 또한 식 (25)는

$$\frac{X_s(0)}{\tau_d(0)} = 0 \quad (28)$$

이 되어 정상상태에서 외란제거 성능을 가진다.

IV. 전산모사

MATLAB을 이용하여 전산모사를 수행하였다. 마스

터 슬레이브 시스템의 파라미터는

마스터 조작기 : $m_m = 6kg, b_m = 0.1Ns/m,$

슬레이브 조작기 : $m_s = 6kg, b_s = 0.1Ns/m,$

작업자 : $m_{op} = 2kg, b_{op} = 2Ns/m, c_{op} = 10N/m$

로 설정하였고, 시간지연 T_d 는 0.02 sec로 설정하였다.

그림 2의 구조에 대하여 제어기는

$$A_s(s) = 6s + 0.1, \quad (29)$$

$$A_d(s) = s, \quad (30)$$

$$B(s) = 1, \quad (31)$$

$$\alpha = 1, \quad (32)$$

$$E(s) = (s + 1)^2, \quad (33)$$

$$f(s) = \frac{1}{(0.01s + 1)^2} \quad (34)$$

로 설계하였다. K 는 1로, K_{fr} 은 20으로 설정하였다. 그림 3은 $\tau_o = 5\sin(0.637\pi t)$ 로 한 경우의 위치추종응답을 나타낸다. 그림 3에서 시간지연이 존재하더라도 시스템이 안정하고 마스터와 슬레이브의 위치오차에 기인하는 힘을 조작자에게 반영하며, 마스터 조작기의 위치에 대한 슬레이브 조작기의 위치추종성능이 우수함을 알 수 있다. 그림 4는 $\tau_o = 5u(t), \tau_d = 0.2u(t-10)$ 로 한 경우의 위치추종응답을 나타내며, 정상상태에서 외란제거 성능이 우수함을 볼 수 있다.

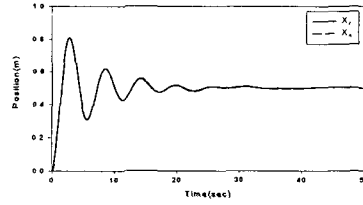


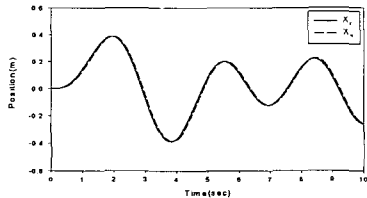
그림 4, 외란제거 응답.

V. 결론

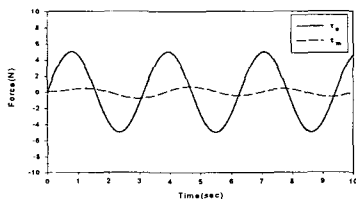
본 논문에서는 슬레이브 조작기와 제어시스템 사이의 신호전송 과정에서 시간지연이 존재하는 경우의 원격조작시스템에 대하여, 위치기준형 힘반영 위치제어 기법을 기반으로 하고 smith predictor 제어기법을 응용한 시간지연 보상 힘반영 위치제어기법을 제안하였다. 제안한 기법에서는 시간지연을 갖고 원점에 극점을 갖는 불안정한 개루프 전달함수에 대하여 시스템의 내부안정도를 만족하고, 외란제거 성능을 갖도록 제어를 설계한다. 제안한 기법으로 시간지연이 존재하는 원격조작시스템을 정교하게 위치제어할 수 있다는 장점이 있다.

참고문헌

- [1] M. R. Matausek, A. D. Micic, "Modified smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 41, no. 8, August 1996.
- [2] K. Watanabe, "A new modified smith predictor control for time-delay systems with an integrator," Proc. of the 2nd Asian Control Conference, pp.127-130, Seoul, Korea, July, 1997.
- [3] Y. Yokokohji, T. Yoshikawa, "Bilateral control of master slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-Formulation and experiment," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 10, no. 5, pp.605-620, 1994.
- [4] M. Morari, E. Zafiriou, "Robust process control," Prentice-Hall Inc. 1989.
- [5] B. C. Kuo, "Automatic control systems," 4th Edition, Prentice-Hall, 1987.



(a) 위치추종응답



(b) 힘반영 응답

그림 3. 위치추종응답.