

고감속비의 관절을 가지는 원격조작기의 양방향 제어

°안 성 호(安聖鎬)*, 윤 지 섭(尹智燮)**, 이 상 정(李相禎)***

**한국원자력연구소 사용후핵연료원격취급장치개발분야

전화 : (042) 868-2596 / 팩스 : (042) 868-2854

***충남대학교 전자공학과

전화 : (042) 821-6582 / 팩스 : (042) 823-4494

A Bilateral Control for Telemanipulators with High Reduction Ratio Joints

°Sung Ho Ahn*, Ji Sup Yoon**, Sang Jeong Lee***

*** Department of Remote Technology, Korea Atomic Energy Research Institute

**Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

E-mail : *shahn2@kaeri.re.kr, **jsyoon@kaeri.re.kr, ***eesjl@cslab.chungnam.ac.kr

Abstract

Since the telemanipulator consisting of high reduction ratio gear joints has a slow dynamics comparing with the master manipulator, its control signal is likely to be saturated resulting in poor tracking performance and deteriorated stability. This paper proposes a bilateral control scheme of a telemanipulator having high reduction ratio, which can compensate the control input saturation. The experimental results show that the proposed control scheme has excellent performances.

I. 서론

원격조작 양방향 제어시스템은 조작자가 작업현황을 감시하면서 마스터 조작기(manipulator)를 사용하여 슬레이브 조작기를 원격으로 조작하고, 마스터를 쥐고 있는 조작자의 손에 슬레이브 조작기의 작업상황이 힘 반영되도록 하는 시스템으로 극한환경에서 정교한 작업을 수행하는데 널리 이용되고 있다. 특히, 원자력 폐기물의 해체, 절단, 이송 등의 작업에는 취급 가반하중

이 큰 고감속비의 관절을 갖는 원격조작기가 사용된다. 고감속비의 관절을 가지는 슬레이브 조작기는 제어입력의 포화를 빈번히 발생하기 때문에^[1] 마스터에 대한 추종성능이 나쁠 뿐 아니라 시스템의 안정도도 나빠질 수 있다. 따라서, 고감속비의 관절을 가지는 슬레이브 조작기를 정교한 작업이나 위치변화가 빈번한 작업에 안정하게 적용하기 위하여 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 보상한 양방향 제어기법이 필요하다.

본 논문에서는 슬레이브 조작기가 고감속비의 관절을 가짐으로 인해 제어입력의 포화를 발생하는 경우에 대하여 적분 되말림 현상을 보상하고 슬레이브 조작기의 추종성을 향상시킬 수 있는 양방향 제어기법을 제안한다. 2절에서는 고감속비의 관절을 가지는 원격조작기의 양방향 제어문제를 설정하고, 3절에서는 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 보상한 양방향 제어기법을 제안하며, 4절에서는 고감속비의 관절을 가지는 동력 매니플레이터에 적용하여 실험한 결과를 제시한다.

II. 문제설정

원격조작 양방향 제어시스템은 마스터 조작기, 슬레

이브 조작기, 제어용 컴퓨터, 다축제어기, 구동모터 및 드라이버, 힘/토크 센서 등으로 구성된다. 그림 1에 제어입력 포화를 가지는 슬레이브 조작기에 대한 양방향 제어시스템의 모델을 보였다^[2].

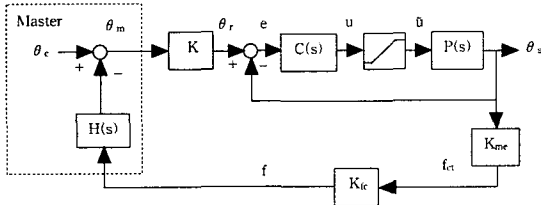


그림 1. 제어입력 포화를 가지는 슬레이브 조작기의 양방향 제어시스템 블록선도
Fig. 1. Block diagram of the bilateral control system for slave manipulator with control input saturation

그림 1에서 θ_c 는 조작자의 지령 각위치이고, θ_m 은 마스터 조작기의 각위치이고, θ_r 은 기준 각위치이며, θ_s 는 슬레이브 조작기의 각위치이다. u 는 슬레이브 조작기의 제어기에서 계산된 제어입력이며, \hat{u} 슬레이브 조작기의 실제 제어입력이다. f_{cr} 는 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시의 접촉힘이고, f_1 은 슬레이브 조작기의 제어입력 포화에 의해 조작자에게 반영되는 힘이고, f_2 는 슬레이브 조작기의 접촉에 의해 조작자에게 반영되는 힘이며, f 는 접촉 또는 포화에 의해 조작자에게 반영되는 힘이다. K 는 위치 보정 계수이고, K_{fc} 는 슬레이브 조작기의 접촉에 대한 힘반영비이며, K_{fs} 는 슬레이브 조작기의 제어입력 포화에 대한 힘반영비이다. K_{me} 는 슬레이브 조작기와 환경사이의 탄성계수(stiffness)이다.

$P(s)$ 는 슬레이브 조작기의 제어입력에 대한 슬레이브 조작기의 각위치(angular position) 출력의 전달함수이고,

$$P(s) = \frac{K_s}{s(\tau_s s + 1)} \quad (1)$$

로 주어진다^[3]. 여기서 K_s 는 이득상수이고 τ_s 는 시정수이다. $H(s)$ 는 마스터 조작기를 쥐고 있는 조작자 손에 인가된 힘에 대한 마스터 조작기의 각위치의 전달함수이고,

$$H(s) = \frac{C_h}{\tau s + 1} \quad (2)$$

로 주어진다^[2]. 여기서 C_h 는 조작자가 쥐고 있는 마스터 조작기의 컴플라이언스(compliance)이고 τ 는 시정

수이다. $C(s)$ 는 슬레이브 조작기의 제어기이다. $\hat{u}(t)$ 는 일반적으로 다음과 같은 포화특성을 가진다.

$$\hat{u}(t) = \begin{cases} u_{\max}, & u(t) \geq u_{\max} \\ u(t), & -u_{\max} \leq u(t) \leq u_{\max} \\ -u_{\max}, & u(t) \leq -u_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되면 적분 되말림 현상으로 인하여 기준위치에 대한 슬레이브 조작기의 추종성능이 나빠지고 시스템이 불안정해질 수 있다. 이와 같은 문제에 대한 대책 없이는 원격조작 양방향 제어시스템을 정교한 작업에 사용할 수 없으며, 특히 원자력 시설의 해체, 이송 등의 안전을 필요로 하는 작업에의 적용은 곤란하다. 따라서 제어입력 포화를 가지는 슬레이브 조작기에 대하여 적분 되말림 현상을 보상하고 정교한 위치제어 특성을 얻을 수 있는 양방향 제어기법의 개발이 필요하다.

III. 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 보상한 양방향 제어

그림 2에 제안하는 양방향 제어기법의 블록선도를 보였다.

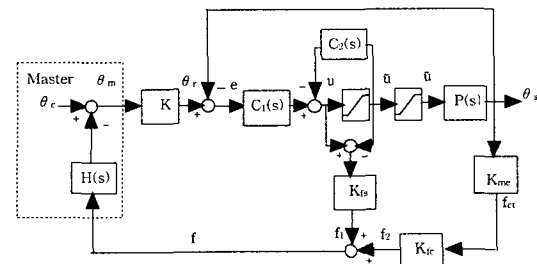


그림 2. 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 보상한 양방향 제어구조
Fig. 2. Block diagram of the proposed bilateral control scheme with compensating the control input saturation

제안하는 양방향 제어기법의 주된 관점은 슬레이브 조작기의 제어기를 적분 되말림 현상을 보상하는 구조로 설계하여 포화 발생시에 포화량을 줄이도록 하고, 또한 이 포화량을 힘으로 변환하여 조작자에게 힘반영시켜 마스터를 천천히 움직이도록 함으로써, 시변(time varying)인 기준위치에 대해 슬레이브 조작기의 추종성능을 증가시키는 것이다.

슬레이브 조작기의 제어기는 2 단계 설계기법으로 설계된다. 첫 번째 단계에서 $C(s)$ 를 다음과 같은 불완

전 미분 형태의 PID 제어기로 설계한다.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{s + \gamma} \quad (4)$$

Biproper하고 최소위상(minimum phase)인 $C(s)$ 는 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않은 상태에서 슬레이브 조작기가 기준위치를 추종하도록 설계한다. 그리고 두 번째 단계에서는 적분 되말림 현상을 보상하도록 $C(s)$ 를 그림 2와 같은 구조로 하여 다음과 같이 설계한다.

(i) $C_1(s)$ 는 biproper하고 최소위상이며 안정하다.

(ii) $C_2(s) = C_1(s)C^{-1}(s) - 1$. (5)

그림 2에서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않으면

$$\tilde{u}(s) = u(s) \quad (6)$$

가 되고, (5)에 의하여

$$\begin{aligned} u(s) &= \frac{C_1(s)}{1 + C_2(s)} e(s) \\ &= C(s)e(s) \end{aligned} \quad (7)$$

의 관계가 성립한다. $C(s)$ 와 $C_1(s)$ 가 biproper하고 최소위상이고 $C_1(s)$ 가 안정하면, (5)로 설계된 $C_2(s)$ 는 proper하고 안정하며 $\{1 + C_2(s)\}^{-1}$ 도 안정하다. 따라서, (7)에서는 불안정한 극점과 영점의 상쇄가 발생하지 않으며, 슬레이브 조작기의 제어기는 제어목적에 따라 설계된 $C(s)$ 와 같게 된다. 한편, 그림 2에서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되면

$$u(s) = C_1(s)e(s) - \{C_1(s)C^{-1}(s) - 1\}\tilde{u}(s) \quad (8)$$

로 주어지고, 적분 되말림 현상을 보상하는 구조가 된다¹⁴⁾. 이 때, 그림 2의 양방향 제어구조에서는 포화량을 힘으로 변환시켜 마스터 조작기를 쥐고 있는 조작자에게

$$f(s) = K_f\{u(s) - \tilde{u}(s)\} \quad (9)$$

의 힘을 반영시킨다.

슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 제어입력이 포화되지 않으면 $\tilde{u}(s) = u(s)$ 이고,

$$f(s) = f_1(s) = f_2(s) = 0 \quad (10)$$

이므로 조작자에게 아무런 힘이 반영되지 않는다. 이 때, 슬레이브 조작기의 각위치는

$$\theta_s(s) = \frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)} \theta_r(s) \quad (11)$$

로 주어지며, 추종성을 가지도록 설계한 $C(s)$ 에 의해 슬레이브 조작기는 기준 각위치를 추종한다. 그리고, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉한 상태에서 제어입력이 포화되지 않으면

$$f(s) = f_2(s) = K_{fc}f_c(s) \quad (12)$$

의 힘이 조작자에게 반영된다.

한편, 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되면 (8)이 성립하여 적분 되말림 현상을 보상하는 구조로 되며, 슬레이브 조작기의 각위치는

$$\theta_s(s) = P(s)\tilde{u}(s) \quad (13)$$

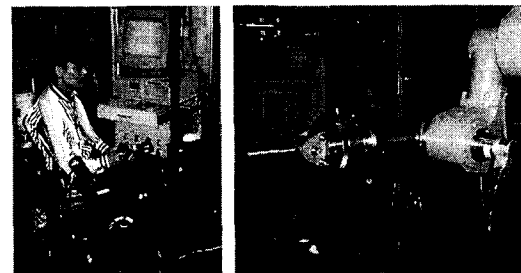
가 된다. 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않을 경우에 조작자에게 반영되는 힘은 (9)로 주어지고, 접촉할 경우에는

$$f(s) = K_f\{u(s) - \tilde{u}(s)\} + K_{fc}f_c \quad (14)$$

로 주어진다. 따라서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되는 경우에는 적분 되말림 현상을 보상하면서 조작자에게 포화에 의한 힘을 반영시켜 마스터 조작기를 천천히 움직이게 함으로써, 느리게 변하는 기준위치에 대한 슬레이브 조작기의 추종성은 향상된다.

IV. 동력 조작기에 응용

본 논문에서 대상으로 한 양방향 제어시스템의 형상은 그림 3과 같다.



(a) Master manipulator and control system (b) Slave manipulator

그림 3. 실험에 사용한 양방향 제어시스템 형상
Fig. 3. Picture of the experiment setup

마스터 조작기는 의자의 오른쪽 팔걸이 부분에 6 자유도를 가지는 마스터 조작기를 설치하여 조작자가 편안히 앉은 상태에서 조작할 수 있는 구조이다. 슬레이브 조작기는 취급 가반하중이 큰 중량물을 취급하기 위하여 설계된 고감속비의 관절을 가지는 7 자유도의 동력 조작기이다. 본 논문에서는 마스터 조작기의 6축 중에 중력방향으로 움직이는 한 축을 조작하여 슬레이브 조작기의 한 축과 연계 제어되도록 하였다.

제어입력의 포화를 보상하지 않은 그림 1의 양방향 제어시스템에 대해 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 때의 응답을 그림 4에 보였다. 슬레이브 제어입력의

포화로 인하여 위치제어 루프가 끊어지기 때문에 슬레이브 조작기는 물체에 강하게 접촉하고, 슬레이브 조작기는 기준위치를 추종하지 못하며, 물체로부터 분리된 후에도 불안정하게 진동함을 볼 수 있다.

레이브 조작기가 물체에 접촉한 상태에 있을 때에도 제어기의 포화량이 작게 유지되기 때문에 마스터 조작기를 역으로 움직이면 슬레이브 조작기는 기준위치를 곧바로 추종함을 볼 수 있다.

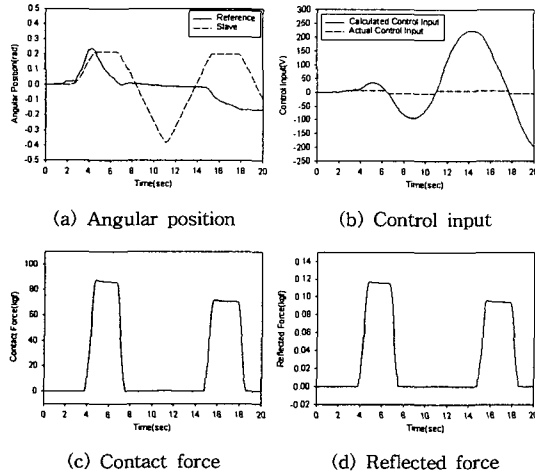


그림 4. 제어입력의 포화를 보상하지 않은 경우의 응답
Fig. 4. Responses without compensating the control input saturation

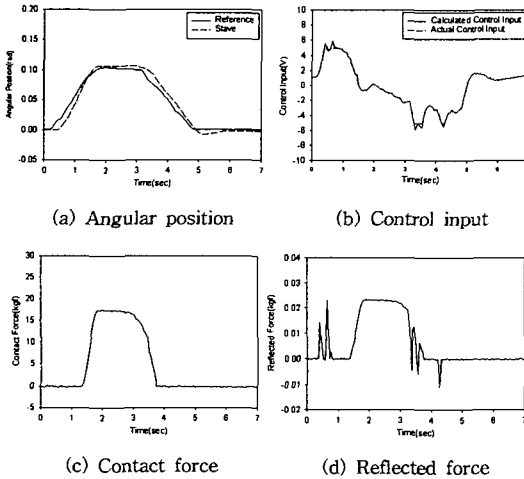


그림 5. 제안한 양방향 제어기법을 적용한 경우의 응답
Fig. 5. Responses for the proposed bilateral control scheme

그림 5는 본 논문에서 제안한 양방향 제어기법을 적용한 경우의 응답을 나타낸다. 슬레이브 조작기를 1.40초에 물체에 충돌시켜 접촉한 상태를 유지하고 있다가 3.20초에 마스터 조작기를 역방향으로 움직일 때에 슬레이브 조작기는 3.75초에 물체로부터 분리됨을 볼 수 있다. 슬레이브 조작기는 기준위치를 잘 추종하며, 슬

V. 결론

본 논문에서는 고감속비의 관절을 가지는 원격조작기에 대해 제어입력 포화를 보상한 원격조작 양방향 제어기법을 제안하고, 실험을 통하여 제안한 기법의 성능을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 양방향 제어기법을 고감속비의 관절을 가짐으로 인해 제어입력 포화를 발생하는 슬레이브 조작기에 적용할 경우에 안정하고 정교한 힘반영 특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 특히, 원자력 시설의 해체, 이송 등의 작업이나 방사선물질의 원격취급을 위한 조작기에 적용하여 정교한 작업을 안정하게 수행함으로써 안정성을 향상할 수 있다는 장점이 있다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 과학기술부의 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] N. Kircanski and A. Goldenberg, "An experimental study of nonlinear stiffness, hysteresis, and friction effects in robot joints with harmonic drives and torque sensors", *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 16, no. 2. pp. 214-239, 1997.
- [2] W. S. Kim, "Developments of new force reflecting control schemes and an application to a teleoperation training simulator", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1412-1419, 1992.
- [3] C. L. Phillips and H. T. Nagle, *Digital control system analysis and design*, Prentice-Hall, 1990.
- [4] A. Zheng, M. V. Kothare and M. Morari, "Anti-windup design for internal model control", *Int. J. Control*, vol. 60, no. 5, pp. 1015-1024, 1994.