

論文2000-37SC-5-3

제어입력 포화를 고려한 고하중 원격조작기의 힘반영 유연성 제어

(A Force Reflecting and Compliant Control for Heavy-Duty Power Telemanipulators with Control Input Saturation)

安聖鎬*, 尹智燮*, 李相禎**

(Sung-Ho Ahn, Ji-Sup Yoon, and Sang-Jeong Lee)

요 약

고감속비의 관절을 갖는 고하중 조작기를 원격조작 힘반영 제어시스템의 슬레이브 조작기로 사용할 경우에는 마스터 조작기에 비하여 느린 동특성으로 인해 슬레이브 조작기의 제어입력에 포화가 빈번히 발생한다. 슬레이브 조작기가 유연성을 갖도록 설계한 경우에도 제어입력이 포화되면 위치제어루프가 끊어지기 때문에 시스템이 불안정해지고 슬레이브 조작기가 물체에 강하게 접촉하는 경우가 발생하며, 유연한 힘제어 성능을 얻는데 어려움이 있다. 본 논문에서는 고하중 원격조작기에 대해 제어입력의 포화를 고려한 힘반영 유연성 제어기법을 제안한다. 제안하는 힘반영 유연성 제어기법은 제어입력의 포화를 가지는 원격조작기에 대하여 안정한 힘반영 성능과 함께 정밀한 위치제어와 유연성제어 성능을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 제안한 제어기법의 안정도를 해석하였고 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

Abstract

Since the heavy-duty power manipulator generally has high ratio gear reducers at its joints, its dynamic characteristics is much slower than that of the master manipulator and it is likely to encounter the saturation in the input magnitude when it is used as the slave manipulator in telemanipulation systems. This paper proposes a force reflecting and compliant control scheme for the heavy-duty power telemanipulator. The main advantage of the proposed scheme is that it provides a precise position and compliant control performance for a telemanipulator with control input saturation. The stability of the proposed scheme is analyzed and a series of experiments shows its performance.

I. 서 론

* 正會員, 韓國原子力研究所

(Korea Atomic Energy Research Institute)

** 正會員, 忠南大學校 情報通信工學部

(Division of Electrical and Computer Engineering, Chungnam National University)

※ 본 연구는 2000년도 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 지원으로 수행되었음.

接受日字:2000年6月7日, 수정완료일:2000年7月29日

기호설명

- x_c 조작자의 지령위치
 x_f 힘반영에 의해 마스터 조작기를 변화시킨 위치
 x_m 마스터 조작기의 위치
 x_s 슬레이브 조작기가 접촉하는 면의 위치
 θ_m 마스터 조작기의 각위치
 θ 기준 각위치

- θ_s 슬레이브 조작기의 각위치
- u 슬레이브 조작기의 제어기에서 계산된 제어입력
- \tilde{u} 슬레이브 조작기의 실제 제어입력
- τ_1 슬레이브 조작기의 제어입력 포화에 의해 발생되는 마스터 조작기 구동모터의 토크
- τ_2 슬레이브 조작기의 접촉에 의해 발생하는 마스터 조작기 구동모터의 토크
- τ_m 포화 또는 접촉에 의해 발생하는 마스터 조작기 구동모터의 토크
- f_{ct} 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시의 접촉력
- f 접촉 또는 포화에 의해 조작자에게 반영되는 힘
- K 위치 보정계수
- K_m 마스터 조작기의 위치에 대한 마스터 조작기의 각위치 변화량의 비
- K_x 슬레이브 조작기의 각위치에 대한 슬레이브 조작기 접촉면에서의 위치변화량의 비
- K_r 접촉힘 제한 보정계수
- K_s 포화량에 대한 힘제한 보정계수
- K_f 마스터 조작기 구동모터의 토크에 대해 조작자에게 가해지는 힘의 비
- K_{eff} 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시의 탄성계수
- K_{fc} 슬레이브 조작기의 접촉에 대해 조작자에게 반영되는 힘반영비
- K_{fs} 슬레이브 조작기의 제어입력 포화에 대해 조작자에게 반영되는 힘반영비

원격조작 시스템은 우주공간이나 심해의 탐사, 채굴 그리고 원자력 시설의 해체 등과 같이 인간이 직접 작업할 수 없는 극한환경 하에서의 작업에 널리 사용되어 왔으며, 지능형 로봇을 대치하여 작업을 수행하는데 널리 도입되고 있다. 원격조작 시스템에서 정교한 작업을 수행하기 위해서는 조작자에게 작업환경에 관한 정보를 정확하게 전달하여 조작자가 마치 현장에서 직접 작업을 수행하는 것처럼 느끼게 하여야 한다. 예를 들어, 원자력 시설의 해체와 같이 정교함과 안전성을 필요로 하는 작업에서는 접촉력에 관한 정보가 조작자에게 효과적으로 전달되어야 하며, 접촉력을 원거리의 조작자에게 현실감 있게 전달해 주는 힘반영 기능이 필수적으로 요구된다.

주변환경이 고강성으로 이루어져 있는 경우에는 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시에 접촉력이 급격히 증가하기 때문에 접촉시에 유연성을 가지도록 하기 위하

여 컴플라이언스(compliance) 제어가 도입되었으며, 많은 연구가 진행되어 왔다^[1-6]. Kim등^[1-2]은 1차 지연효과를 이용한 능동 분할제어(shared control) 기법을 제안하여 시간지연을 가지는 원격조작 시스템에 적용하였다. Venkataraman등^[3]은 신경 회로망을 기초로 하는 컴플라이언스 제어기법을 제안하였다. 차동력^[4]은 퍼지이론과 신경 회로망을 사용한 분할 컴플라이언스 제어기법을 제안하였다. 그러나 지금까지 발표된 대부분의 연구들은 저하중 작업에 대해 수행되었으며 슬레이브 조작기의 접촉력을 조작자에게 어떻게 전달시켜줄 것인가에 대한 연구결과들이다.

한편, 고감속비의 관절을 가지는 고하중 조작기는 제어입력의 포화를 빈번히 발생하기 때문에^[7], 적분 되말림(windup) 현상으로 인하여 슬레이브 조작기의 위치추종 성능과 시스템의 안정성이 나빠지게 된다. 또한, 제어입력의 포화시에는 위치제어루프가 끊어지기 때문에 슬레이브 조작기가 물체에 강하게 접촉하는 경우가 발생하며 유연한 힘제어 성능을 얻기 힘들다. 따라서 제어입력의 포화를 보상하여 슬레이브 조작기의 추종성능을 향상시키며, 슬레이브 조작기가 고강성의 물체에 접촉할 때에 유연성을 가지는 동시에 작업자에게 접촉력을 선명하게 느끼게 해주는 기법의 연구가 필요하다. 제어입력의 포화에 따른 적분 되말림 현상을 보상하는 기법에 관한 연구가 많이 연구되어 왔다^[8-12]. 지금까지 발표된 기법들을 살펴보면, 포화가 발생했을 때에 포화량을 적분기 입력으로 제한하여 포화량을 감소시키는 역 계산(back calculation) 기법^[8], 포화가 발생했을 때에 기준 입력신호와 출력신호의 차이인 오차신호가 제어기의 상태변수에 영향을 미치지 못하도록 하는 컨디셔닝(conditioning) 기법^[9], 관측자와 상태변수 제한을 결합한 구조의 관측자(observer) 기법^[10], 그리고 IMC(internal model control) 구조에서의 적분 되말림 현상 보상기법^[11-12]으로 크게 분류할 수 있다. 안성호등^[13-14]은 제어입력의 포화를 가지는 원격조작기에 대하여 적분 되말림 현상을 보상하는 구조로 슬레이브 조작기의 제어를 설계하고, 제어입력의 포화량을 힘으로 변환시켜 마스터 측에 힘반영시킴으로써 제어입력 포화에 관계없이 슬레이브 조작기가 기준위치를 추종하게 하는 힘반영 제어기법을 제안하였다.

본 논문에서는 제어입력의 포화를 갖는 고하중 조작기를 슬레이브 조작기로 사용한 원격조작 시스템에 대

하여 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시에 유연성을 가지도록 하고 조작자에게 안정하게 힘반영시켜 조작자가 정교하고 안정하게 작업을 할 수 있도록 하는 힘반영 유연성 제어기법을 제안한다. 2절에서는 제어입력의 포화를 가지는 고하중 원격조작기의 힘반영 유연성 제어문제를 살펴보고, 제어입력의 포화를 고려한 고하중 원격조작기의 힘반영 유연성 제어기법을 제안한다. 3절에서는 제안한 기법을 동력 조작기에 적용한 실험 결과를 제시한다.

II. 고하중 원격조작기의 힘반영 유연성 제어

이 절에서는 제어입력의 포화를 가지는 고하중 원격조작기의 힘반영 유연성 제어문제를 살펴보고, 제어입력의 포화를 고려한 고하중 원격조작기의 힘반영 유연성 제어기법을 제안하며, 제안한 기법의 안정도와 특성을 분석한다.

원격조작 힘반영 제어시스템은 그림 1과 같이 마스터 조작기, 슬레이브 조작기, 제어용 컴퓨터, 다축제어기, 구동모터 및 드라이버, 힘/토크 센서 등으로 구성된다. 고하중 조작기는 고감속비의 관절을 가짐으로 인하여 제어입력의 포화를 빈번히 발생하기 때문에 안정하고 정교한 힘반영 성능을 얻기 어렵다. 그림 2에 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 가지는 힘반영 제어시스템의 모델을 보였다^[2]. f_{ct} 는 힘/토크 센서의 출력을 중력에 대하여 보상하고 교정하여 구한 값이다. 따라서, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 경우에는 x_s 로부터 θ_f 로의 케환루프가 형성되지만, 접촉하지 않을 경우에는 f_{ct} 가 0이 되어 x_s 로부터 θ_f 로의 케환루프가 형성되지 않는다.

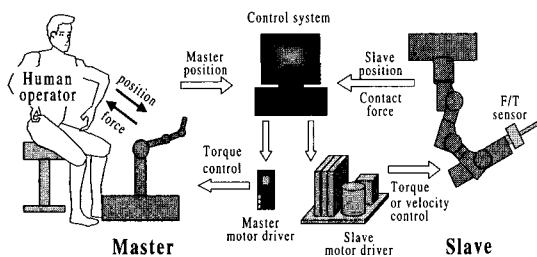


그림 1. 힘반영 제어시스템의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the force reflecting control system.

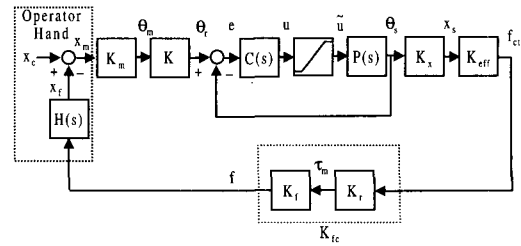


그림 2. 슬레이브 조작기의 제어입력에 포화를 가지는 힘반영 제어시스템

Fig. 2. Block diagram of the force reflecting control system with control input saturation of the slave manipulator.

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

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

로 주어진다^[15]. 여기서 K_s 는 이득상수이고 τ_s 는 시정수이다. $H(s)$ 는 마스터 조작기를 쥐고 있는 조작자의 손에 인가된 힘에 대한 마스터 조작기 위치의 전달함수이고

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

로 주어진다^[2]. 여기서 C_h 는 조작자가 쥐고 있는 마스터 조작기의 컴플라이언스이고 τ 는 시정수이다. $C(s)$ 는 슬레이브 조작기의 제어기이다. 고하중 조작기의 실제 제어입력 $\tilde{u}(t)$ 는 일반적으로 다음과 같은 포화특성을 갖는다.

$$\tilde{u}(t) = \begin{cases} u_{\max}, & u(t) > u_{\max} \\ u(t), & -u_{\max} \leq u(t) \leq u_{\max} \\ -u_{\max}, & u(t) < -u_{\max} \end{cases} \tag{3}$$

1. 문제설정

슬레이브 조작기가 물체에 접촉시에 유연성을 가지도록 하고 접촉력을 조작자에게 효과적으로 전달하기 위하여 분할 컴플라이언스 제어기법이 도입되었다. 분할 컴플라이언스 제어기법은 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 때에 자율적으로 유연성을 가지는 동시에, 조작자에 힘반영시켜 마스터 조작기를 쥐고 있는 조작자의 손을 통하여 유연성을 부가하도록 하여 유연성

$C(s)$ 를 다음과 같은 불완전 미분 형태의 PID 제어기로 설계한다.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{s + \gamma}. \quad (7)$$

여기서 $\gamma > 0$ 이다. Biproper하고 최소위상(minimum phase)인 $C(s)$ 를 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않은 상태에서 슬레이브 조작기가 기준위치를 추종하도록 설계한다. 그리고 두 번째 단계에서는 $C(s)$ 에 대하여 적분 되말림 현상을 보상하도록 그림 4와 같은 구조로 하여 다음과 같이 설계한다.

$$(i) C(s) = \frac{C_1(s)}{1 + C_2(s)} \quad (8)$$

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

$$(iii) C_2(s) = C_1(s)C^{-1}(s) - 1. \quad (9)$$

그림 3에서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않으면

$$\tilde{u}(s) = u(s) \quad (10)$$

가 된다. 이 때, $C(s)$ 와 $C_1(s)$ 가 biproper하고 최소위상이고, $C_1(s)$ 가 안정하면, 식 (9)로 설계된 $C_2(s)$ 는 proper하며 안정하다. 따라서, 식 (8)에서는 불안정한 극점과 영점의 상쇄가 발생하지 않으며, 슬레이브 조작기의 제어기는 제어목적에 따라 설계된 $C(s)$ 와 같게 된다. 한편, 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되면

$$u(s) = C_1(s)e(s) - \{C_1(s)C^{-1}(s) - 1\}\tilde{u}(s) \quad (11)$$

로 주어지고 적분 되말림 현상을 보상하는 구조가 된다^[11]. 이 때, 그림 4에서는 포화량을 힘으로 변환시켜 마스터 조작기를 쥐고 있는 조작자에게

$$f(s) = K_f\{u(s) - \tilde{u}(s)\} \quad (12)$$

의 힘을 반영시킨다. 결과적으로, 제안한 그림 4의 힘반영 유연성 제어구조는 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화될 경우에 적분 되말림 현상을 보상하면서 포화에 의한 힘을 조작자에게 반영시켜 마스터 조작기를 천천히 움직이게 함으로써, 슬레이브 조작기의 기준위치 추종성을 향상시키는 구조이다.

(2) 입력력 관계

① 포화되지 않을 경우

그림 4에서 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 제어입력이 포화되지 않으면, $\tilde{u}(s) = u(s)$ 이므로 $\tau_1(s) = 0$ 이고, $f_{ct}(s) = 0$ 이므로 $\tau_2(s) = 0$ 이 된다. 따라서 $f(s) = 0$ 이 되며 조작자에게 아무런 힘이 반영되지 않는다. 이 때, 각위치는

$$\theta_m(s) = K_m r_c(s), \quad (13)$$

$$\theta_r(s) = K\theta_m(s), \quad (14)$$

$$\theta_s(s) = \frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)}\theta_r(s) \quad (15)$$

로 주어지며, 추종성을 고려하여 설계한 $C(s)$ 에 의해 슬레이브 조작기는 기준 각위치를 추종한다.

슬레이브 조작기가 물체에 접촉한 상태에서 제어입력이 포화되지 않으면

$$\frac{F_{ct}(s)}{\theta_r(s)} = \frac{K_x K_{eff} P(s) C(s)}{1 + P(s) C(s) [1 + K_x K_{eff} \{K_c(s) + K K_m K_{fc} H(s)\}]} \quad (16)$$

이 되고,

$$f(s) = f_2(s) = K_{fc} f_{ct}(s) \quad (17)$$

의 힘이 조작자에게 반영된다. 따라서, 슬레이브 조작기는 능동 컴플라이언스 제어구조를 가지며, 조작자에게 접촉힘을 반영함으로써 마스터의 위치 변화량을 작게 하여 컴플라이언스를 부가하는 분할 컴플라이언스 제어구조가 된다.

② 포화될 경우

그림 4에서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되면, 식 (11)이 성립하여 적분 되말림 현상을 보상하는 구조로 되고, 슬레이브 조작기의 각위치는

$$\theta_s(s) = P(s)\tilde{u}(s) \quad (18)$$

가 된다. 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않을 경우에 조작자에게 반영되는 힘은 식 (12)로 주어지고, 접촉할 경우에는

$$f(s) = K_f\{u(s) - \tilde{u}(s)\} + K_{fc} f_{ct} \quad (19)$$

의 힘이 조작자에게 반영된다. 적분 되말림 현상 보상 구조의 제어기와 포화량에 의한 힘반영은 제어입력의 포화를 벗어나게 하고, 제어입력의 포화로부터 벗어나면 식 (16)과 (17)이 성립하여 분할 컴플라이언스 제어구조가 된다.

(3) 안정도 해석

제안한 힘반영 제어시스템의 안정도를 해석하기 위하여 그림 4를 비선형 궤환을 갖는 선형시스템의 일반적인 형태로 그림 5와 같이 나타낼 수 있다^[16].

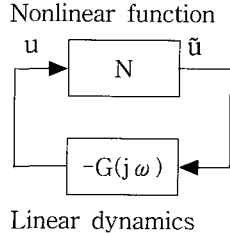


그림 5. 비선형 궤환을 갖는 선형시스템의 일반적인 형태
Fig. 5. A configuration of linear system $G(j\omega)$ with nonlinear feedback, N , for stability analysis.

보조정리. 그림 5에서 $G(j\omega)$ 는 원점에 있는 단일극점 이외의 모든 극점들이 안정하고, 비선형 궤환 N 은 다음의 조건을 만족한다고 가정한다.

$$0 < k_1 \leq \frac{N(\sigma, t)}{\sigma} \leq k_2 = 1. \quad (20)$$

이 경우, 다음 조건을 만족하는 실수(real constant) α 가 존재하면 폐루프 시스템은 절대 안정하다.

$$\text{Re}\{(G(j\omega)+1)(1+\alpha j\omega)\} \geq 0, \forall \omega. \quad (21)$$

증명. [16] 참조

제안한 그림 4의 힘반영 유연성 제어구조의 절대안정도를 만족하기 위한 조건은 다음의 정리 1과 같이 주어진다.

정리 1. 다음의 조건을 만족하는 실수 α 가 존재하면 제안한 그림 4의 힘반영 유연성 제어시스템은 절대 안정하다.

(i) 접촉하지 않을 경우:

$$\text{Re}\left[\frac{C_1(j\omega)\{C^{-1}(j\omega)+P(j\omega)\}(1+\alpha j\omega)}{1+KK_mK_\beta C_1(j\omega)H(j\omega)}\right] \geq 0, \forall \omega. \quad (22)$$

(ii) 접촉할 경우:

$$\text{Re}\left[\frac{C_1(j\omega)\{C^{-1}(j\omega)+(1+KK_mK_\beta K_x K_{eff}H(s)+K_x K_{eff}K_c(s))P(j\omega)\}}{1+KK_mK_\beta C_1(j\omega)H(j\omega)}\right] \times (1+\alpha j\omega) \geq 0, \forall \omega. \quad (23)$$

증명. 그림 4에서 $\hat{u}(j\omega)$ 로부터 $-u(j\omega)$ 로의 전달 함수 $G(j\omega)$ 는 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않을 경우에는

$$G(j\omega) = \frac{C_1(j\omega)\{C^{-1}(j\omega)+P(j\omega)\}}{1+KK_mK_\beta C_1(j\omega)H(j\omega)} - 1 \quad (24)$$

로 주어지고, 접촉할 경우에는

$$G(j\omega) = \frac{C_1(j\omega)}{1+KK_mK_\beta C_1(j\omega)H(j\omega)} \times [C^{-1}(j\omega) + (1+KK_mK_\beta K_x K_{eff}H(s) + K_x K_{eff}K_c(s))P(j\omega)] - 1 \quad (25)$$

로 주어진다. $P(j\omega)$ 는 식 (1)과 같이 원점에 단일극점과 안정한 극점을 가지며, $H(j\omega)$ 는 식 (2)와 같이 주어지며 안정하다. 2.1절에서 $C(j\omega)$ 와 $C_1(j\omega)$ 는 biproper하고 최소위상이 되도록 설계하였고, $C_1(j\omega)$ 는 안정하도록 설계하였으므로, 식 (24)와 (25)의 $G(j\omega)$ 는 원점에 있는 단일극점 이외에는 모든 극점들이 안정하다. 따라서 식 (24)와 (25)를 보조정리의 (21)에 대입하면 식 (22)와 (23)이 구해지고, 이것은 절대 안정도를 위한 충분조건이 된다.

(4) 정상상태 위치추종 특성

그림 4의 제안한 힘반영 유연성 제어구조에서 슬레이브 조작기의 정상상태 위치추종 특성은 다음과 같다.

정리 2. 그림 4에서 $x_c(s)$ 가 단위 계단입력으로 주어질 때, $\theta_c(s)$ 에 대한 $\theta_s(s)$ 의 정상상태 오차는 다음과 같다.

(i) 접촉하지 않을 경우:

$$e_{ss} = 0. \quad (26)$$

(ii) 접촉할 경우:

$$e_{ss} = \frac{KK_mK_x K_{eff}K_{cc}}{1+K_x K_{eff}(K_{cc}+KK_mK_\beta C_h)}. \quad (27)$$

증명. 그림 4에서 $x_c(s)$ 가 단위 계단입력으로 주어질 때에 슬레이브 제어입력이 포화되면, 슬레이브 조작기의 제어기는 적분 되말림 보상구조를 가지도록 설계하였으므로 슬레이브 조작기가 접촉하거나 접촉하지 않을 경우 모두에 대해 정상상태에서의 슬레이브 제어 입력은 포화되지 않은 상태로 볼 수 있다^[11]. 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 포화되지 않으면 $\theta_s(s)$ 는 식 (15)로 주어지고 $\theta_r(s)$ 는

$$\theta_r(s) = KK_m x_c(s) \quad (28)$$

로 주어진다. 식 (1)과 (7)을 식 (15)에 대입한 결과와 식 (28)로부터, $x_c(s)$ 가 단위 계단입력으로 주어질 때의 정상상태 오차는

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s(\theta_r(s) - \theta_s(s)) \\ = 0$$

로 구해진다. 한편, 슬레이브 조작기가 접촉한 상태에서 포화되지 않을 경우에

$$\theta_s(s) = \frac{KK_m P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)[1 + K_x K_{eff}(K_c(s) + KK_m K_{fc}H(s))]} x_c(s) \quad (29)$$

$$\theta_r(s) = \frac{KK_m [1 + P(s)C(s)\{1 + K_x K_{eff}K_c(s)\}]}{1 + P(s)C(s)[1 + K_x K_{eff}(K_c(s) + KK_m K_{fc}H(s))]} x_c(s) \quad (30)$$

가 된다. $x_c(s)$ 가 단위 계단입력으로 주어질 때의 정상상태 오차는 식 (1), (2)와 (7)를 식 (29)와 (30)에 대입하여

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s(\theta_r(s) - \theta_s(s)) \\ = \frac{KK_m K_x K_{eff} K_{cc}}{1 + K_x K_{eff}(K_{cc} + KK_m K_{fc} C_h)}$$

로 구해진다.

주. 그림 4의 구조에서 컴플라이언스 제어기 $K_c(s)$ 가 존재하지 않을 때, 즉, 식 (27)에서 K_{cc} 가 0일 때, $x_c(s)$ 가 단위 계단입력으로 주어질 경우의 $\theta_r(s)$ 에 대한 $\theta_s(s)$ 의 정상상태 오차는 0 이 됨을 알 수 있다.

III. 동력 조작기에 응용

이 절에서는 고 감속비의 관절을 가지는 동력 조작기를 슬레이브 조작기로 사용하고 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 보상하지 않은 경우와 본 논문에서 제안한 힘반영 유연성 제어기법을 적용한 경우에 대해 실험한 결과를 살펴본다.

본 논문에서 대상으로 한 힘반영 제어시스템의 형상은 그림 6과 같다. 마스터 조작기는 의자의 오른쪽 팔걸이 부분에 6 자유도를 가지는 마스터 조작기를 설치하여 조작자가 편안히 앉은 상태에서 조작할 수 있는

구조이다. 마스터 조작기의 구동모터 회전축에는 토크 제어형 드라이버와 감속기가 없는 서보모터가 연결되어 있다. 슬레이브 조작기는 취급 가반하중이 큰 중량물을 취급하기 위하여 설계된 고감속비의 관절을 가지는 7 자유도의 동력 조작기이다. 동력 조작기는 원자력 시설의 해체, 이송 등에 사용되는 장비로서 취급 가반하중이 100 kgf으로 큰 반면 응답이 매우 느린 특성을 가진다. 본 논문에서는 수직으로 움직이는 마스터와 슬레이브 조작기의 각 한 축을 연계제어 되도록 하였다. 슬레이브 조작기의 각 위치를 측정하기 위하여 관절부위의 끝에 광학 위치센서(encoder)를 부착하였고, 슬레이브 조작기와 외부환경 사이의 접촉력을 측정하기 위하여 힘/토크 센서를 조작기의 종단에 부착하였다. 힘/토크 센서와 제어용 컴퓨터 사이의 신호전달은 RS-232 방식으로 하였고 통신속도는 9600 bps로 설정하였다.



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

그림 6. 실험에 사용한 힘반영 제어시스템 형상
Fig. 6. Picture of the experimental setup.

슬레이브 조작기는 하모닉 드라이브(harmonic drive)와 웜(worm)으로 구성된 감속기를 가지는 비선형 특성이 큰 시스템이지만^[7], 제어입력의 포화를 제외한 다른 비선형 특성들은 무시하고 $P(s)$ 를 모델링하였다. 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않도록 계단입력의 전압 V 을 가하여 각위치 $[rad]$ 를 측정하여 $P(s)$ 를 다음과 같이 구하였다.

$$P(s) = \frac{0.011}{s(0.25s + 1)} \quad (31)$$

슬레이브 조작기는 슬레이브 조작기의 제어입력으로 $\pm 5V$ 가 인가될 때 $\pm 0.071 rad/s$ 의 속도포화를 발생함을 실험으로 알 수 있었으며, 실제 제어입력 $\hat{u}(t)$ 는 다음과 같은 특성을 가짐을 알 수 있었다.

$$\tilde{u}(t) = \begin{cases} 5V, & u(t) > 5V \\ u(t), & -5V \leq u(t) \leq 5V \\ -5V, & u(t) < -5V \end{cases} \quad (32)$$

$H(s)$ 는 실험에 의하여 다음과 같이 모델링하였다.

$$H(s) = \frac{C_h}{0.08s + 1} \quad (33)$$

여기서 C_h 는 2.91~3.71 cm/kgf이다. K_m 은 0.125 rad/cm로 K_x 는 50 cm/rad로 근사화된다. 힘/토크 센서출력을 중력으로부터 보상하고 교정하여 슬레이브 조작기가 비접촉시에 K_{eff} 가 0이 되도록 하였으며, 슬레이브 조작기가 접촉시의 K_{eff} 는 46 kgf/cm로 측정되었다. K 는 0.5로 설정하였고, K_c 는 0.0013으로 설정하였다. 마스터 조작기의 구동모터를 거쳐 조작자에게 전달되는 힘 전달 특성은 미리 실험을 통하여 파악하였으며, 1 V 입력전압에 대해 약 0.025 kgf가 조작자에게 전달됨을 알 수 있었고, 이 측정치를 아래의 그림 8의 (d)와 그림 9의 (d), (e)로 주어지는 조작자에게로의 힘반영 응답을 구하는데 필요한 환산계수로 사용하였다. 슬레이브 조작기의 제어기인 PID 제어기 $C(s)$ 는 불완전 미분 형태로 설계하였으며, PID 계수들은 제어입력의 포화가 발생하지 않은 상태에서 슬레이브 조작기의 각위치가 기준 각위치를 추종하도록 $K_p=162.86$, $K_i=143.17$, $K_d=0.14$, $\gamma=21.27$ 로 설정하였다. 샘플링 주기 T 는 힘/토크 센서의 신호 갭신주기를 고려하여 0.05초로 설정하였으며, 실제 구현한 디지털 제어기 $C(z)$ 는 쌍선형(bilinear) 변환방법으로 다음과 같이 구현하였다.

$$C(z) = \frac{166.54z^2 - 210.37z + 48.80}{z^2 - 1.3056z + 0.3056} \quad (34)$$

슬레이브 조작기의 주파수 대역은 10 Hz 이하이므로, 주파수 대역이 10 Hz인 컴플라이언스 제어기를 설계하였다.

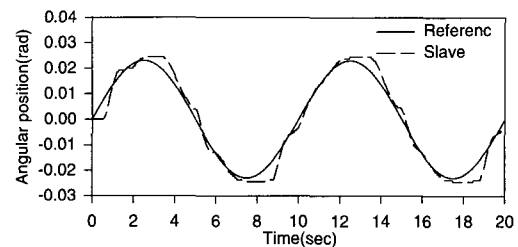
$$K_c(s) = \frac{K_{cc}}{0.016s + 1} \quad (35)$$

$K_c(z)$ 는 쌍선형 변환방법으로 다음과 같이 구현하였다.

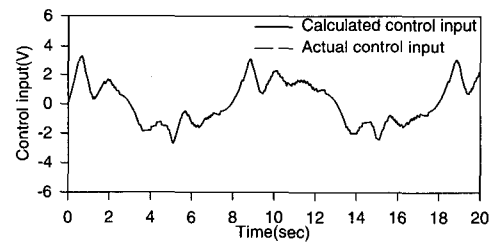
$$K_c(z) = \frac{0.6109K_{cc}(z+1)}{z+0.2218} \quad (36)$$

그림 7은 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은

상태에서 제어입력의 포화가 발생하지 않도록 조작자의 지령위치 입력 $x_c(s)$ 를 충분히 작게 가한 상태에서의 실험결과이다. 슬레이브 조작기의 각위치(θ_s)는 비선형 특성을 보이지만 기준각위치(θ_r)를 잘 추종함을 볼 수 있다. 그러나 이것은 포화가 발생하지 않은 상태에서의 제어기 성능일 뿐이며, 조작자가 고감속비의 관절을 가지는 동력 조작기의 제어입력이 포화되지 않도록 항상 마스터 조작기를 조작할 수는 없다.



(a) Angular position



(b) Control input

그림 7. 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않은 상태에서의 응답

Fig. 7. Responses without control input saturation of the slave manipulator.

슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 보상하지 않은 그림 2의 힘반영 제어시스템에 대해 그림 3의 능동 컴플라이언스 제어루프를 적용하여 구한 응답을 그림 8에 보였다. K_{cc} 를 1.34×10^{-3} rad/kgf로 설정하였다. 그림 8의 (a)는 기준 각위치(θ_r)에 대한 슬레이브 조작기 각위치(θ_s)의 추종응답을 나타내고, (b)는 슬레이브 조작기의 제어기에 의해 계산된 제어입력(u)과 실제 제어입력(\tilde{u})을 나타내고, (c)는 힘/토크 센서 출력으로부터 중력을 보상하여 교정된 힘(f_c)을 나타내며, (d)는 조작자에게 반영되는 힘(f)을 나타낸다. 그림 8에서 슬레이브 조작기는 2.10초에 물체에 접촉하였다. 그러나 슬레이브 조작기는 제어입력의 포화로 인하여 위치추종 성능이 나쁘고, 물체에 접촉한 후에

도 불안정하게 진동하면서 물체에 여러 번 접촉함을 볼 수 있다. 따라서 제어입력의 포화에 대한 보상 없이는 그림 3의 컴플라이언스 제어루프가 슬레이브 조작기에 유연성을 부가할 수 없음을 알 수 있다.

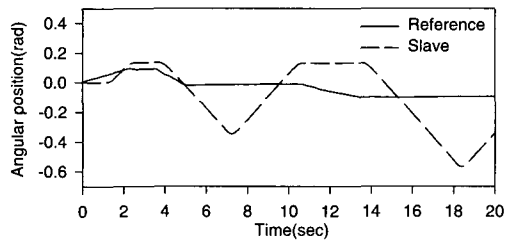
제어입력의 포화를 가지는 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시에 유연성을 가지도록 하는 그림 4의 힘반영 유연성 제어구조에 대해 얻은 응답을 그림 9에 보였다.

$C_1(s)$ 는 biproper하고 최소위상이며 안정하도록 다음과 같이 설계하였다.

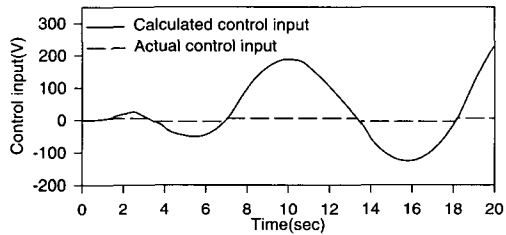
$$C_1(s) = \frac{425.7s^2 + 9419.2s + 7952}{s^2 + 80s + 1600} \quad (37)$$

그리고 $C_2(s)$ 는 식 (9)를 만족하도록 설계하였다. $C_1(z)$ 는 쌍선형 변환방법으로 다음과 같이 구현하였다.

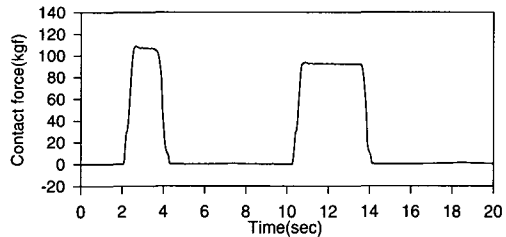
$$C_1(z) = \frac{166.54z^2 - 210.37z + 48.80}{z^2} \quad (38)$$



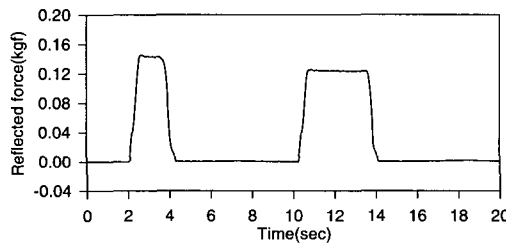
(a) Angular position



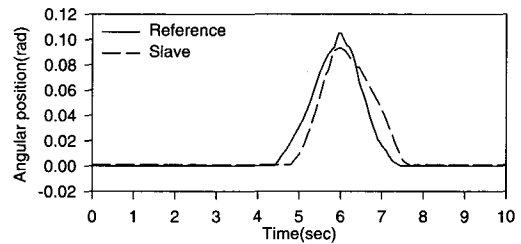
(b) Control input



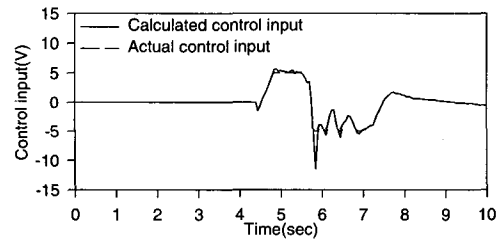
(c) Contact force



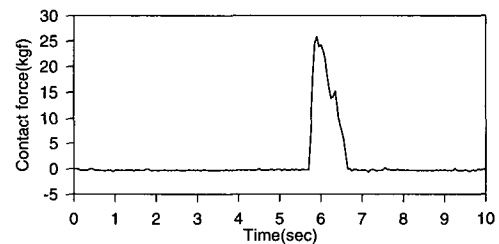
(d) Reflected force



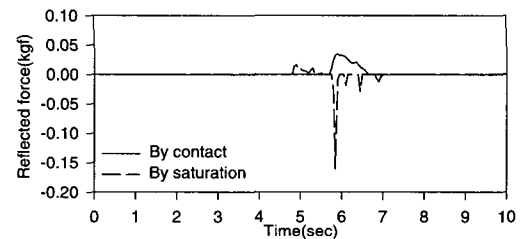
(a) Angular position



(b) Control input

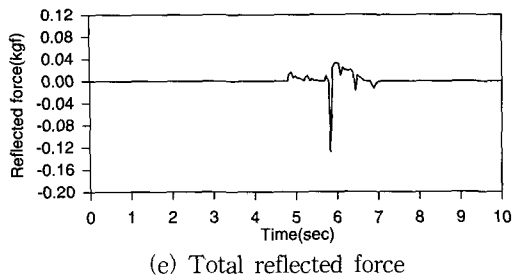


(c) Contact force



(d) Reflected force

그림 8. 제어입력의 포화를 보상하지 않은 경우의 응답
Fig. 8. Responses for the scheme without compensation of saturation.



(e) Total reflected force

그림 9. 제어입력의 포화를 보상한 경우의 응답
Fig. 9. Responses for the proposed scheme with compensation of saturation.

K 와 K_f 값은 제어입력의 포화를 보상하지 않은 경우와 같은 값으로 설정하였고, K_f 는 0.025로 설정하였다. 슬레이브 조작기와 물체에 접촉하지 않을 경우나 접촉할 경우($K_{eff}=46 \text{ kgf/cm}$ 일 때)모두에 대하여 K_{cc} 를 $0 \sim 8.8 \times 10^{-3} \text{ rad/kgf}$ 의 범위로 설정하면 시스템의 절대안정도에 대한 정리 1의 조건들이 만족된다. K_{cc} 는 제어입력의 포화를 보상하지 않은 경우와 같이 $1.34 \times 10^{-3} \text{ rad/kgf}$ 로 설정하였다. 슬레이브 조작기는 제어입력이 포화된 상태에서 5.75초에 물체에 접촉하였고, 조작자가 접촉에 의해 반영되는 힘을 감지한 후 6.15초에 마스터 조작기를 역방향으로 이동시켰다. 이때, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 제어입력이 포화된 경우에 적분 되말림 현상이 보상되며 슬레이브 조작기가 기준위치를 추종함을 그림 9에서 볼 수 있다. 또한, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 때에 접촉력이 컴플라이언스 제어루프를 통하여 제한되어 기준 각위치 입력을 감소시켜 제어입력이 역방향으로 포화되었으나, 적분 되말림 현상 보상구조의 제어기와 포화량의 힘반영에 의해 포화로부터 빨리 벗어나기 때문에 컴플라이언스 제어루프가 형성되고 유연한 힘제어 성능을 얻을 수 있음을 볼 수 있다. 또한, 컴플라이언스는 $4.81 \times 10^{-2} \text{ cm/kgf}$ (탄성계수 20.8 kgf/cm)로 측정되었으며, 제어입력의 포화를 보상하지 않은 경우의 컴플라이언스가 $2.17 \times 10^{-2} \text{ cm/kgf}$ (탄성계수 46 kgf/cm)인 것과 비교하면 컴플라이언스가 2.2배정도 증가함을 알 수 있다.

그림 10은 식 (35)의 컴플라이언스 제어기에 대해 정리 1의 조건들을 만족하는 범위 내에서 K_{cc} 를 다르게 설정하였을 때의 접촉력을 측정된 결과를 나타낸다. 그림 10에서 시스템의 절대 안정도를 만족하는 범위 내에서 K_{cc} 가 클수록 접촉력이 감소함을 볼 수 있다.

이것은 K_{cc} 가 증가할수록 접촉력에 의한 위치 제한량이 증가하여 슬레이브 조작기로의 위치입력이 점점 작아짐으로 인하여 이 위치입력을 추종하는 슬레이브 조작기의 위치 변화량이 작아지기 때문이다.

그림 11은 슬레이브 조작기의 접촉력에 대한 위치 변화량을 나타낸다. 그림 11에서 K_{cc} 가 클수록 유연성이 증가함을 볼 수 있고, 위치 변화량은 접촉력에 대하여 선형적으로 변화함을 볼 수 있다.

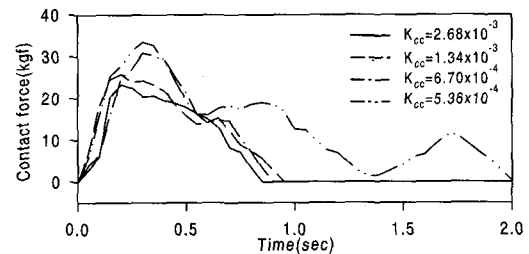


그림 10. K_{cc} 값에 대한 접촉력
Fig. 10. Contact force versus K_{cc} value.

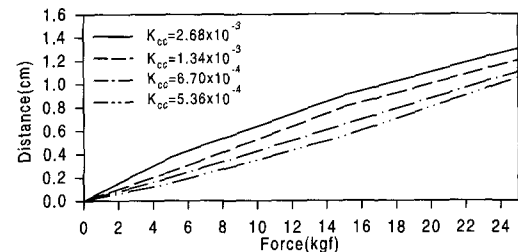


그림 11. 슬레이브 조작기의 접촉력에 대한 위치 변화량
Fig. 11. Position change versus contact force of the slave manipulator.

IV. 결론

고감속비의 관절을 갖는 고하중 조작기를 원격조작 힘반영 제어시스템의 슬레이브 조작기로 사용할 경우에는 마스터 조작기에 비하여 느린 동특성으로 인해 슬레이브 조작기의 제어입력에 포화가 빈번히 발생한다. 제어입력의 포화되면 적분 되말림 현상으로 인하여 슬레이브 조작기의 위치추종 특성과 시스템의 안정성이 나빠지게 되고, 위치제어루프가 끊어짐으로 인하여 슬레이브 조작기가 물체에 강하게 접촉하는 경우가 발생하며 유연한 힘제어 성능을 얻기 힘들다.

본 논문에서는 고감속비를 갖는 고하중 원격조작기에 대하여 추종성능을 향상시키고, 접촉시에 유연성을 가지게 하여 조작자가 정교하고 안정하게 작업을 수행

할 수 있도록 하는 힘반영 유연성 제어기법을 제안하였고, 제안한 제어구조의 안정도를 해석하여 안정하기 위한 조건을 제시하였다. 제안한 유연성 제어기법은 제어입력의 포화에 의한 적분 되달림 현상을 보상하고 슬레이브 조작기의 위치추종 성능을 향상시켜 정밀한 위치제어를 가능하게 하고, 동시에 능동 컴플라이언스 제어기와 힘반영을 통하여 분할 유연성 제어기능을 가지도록 한다. 제안한 기법을 동력 조작기에 적용하여 실험한 결과, 안정한 힘반영 성능과 함께 유연한 힘 제어 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 힘반영 유연성 제어기법을 원자력 시설의 해체, 이송 등의 작업이나 방사선물질의 원격취급을 위한 고하중 조작기에 적용함으로써 정교하고 안정하게 작업을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

참 고 문 헌

- [1] W. S. Kim, B. Hannaford and A. K. Bejczy, "Force reflection and shared compliance control in operating telemanipulators with time delay", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 2, pp. 176-185, 1992.
- [2] W. S. Kim, "Developments of new force reflecting control schemes and an application to a teleoperator training simulator", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1412-1419, 1992.
- [3] S.T. Venkataraman and S.Gulati, J.Barhen and N. Toomarian, "A neural network based identification of environments models for compliant control of space robots", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 9, No. 5, pp. 685-697, 1993.
- [4] 차동혁, "AI 기법을 이용한 원격 로봇의 분할제어", 한국과학기술원 박사학위 논문, 1995
- [5] B. Hannaford and R. Anderson, "Experimental and simulation studies of hard contact in force reflecting teleoperation", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 584-589, 1988.
- [6] W. S. Kim, "Shared compliant control: A stability analysis and experiments", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 620-623, 1990.
- [7] N. M. Kircanski and A. 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*, pp. 214-239, 1997.
- [8] H. A. Fertik and C. W. Ross, "Direct digital control algorithms with anti-windup feature", *ISA Trans.*, vol. 6, no. 4, pp. 317-328, 1967.
- [9] R. Hanus, M. Kinnaert and J. L. Henrotte, "Conditioning technique, a general anti-windup and bumpless transfer method", *Automatica*, vol. 23, no. 6, pp. 729-739, 1987.
- [10] J.K. Park and C.H.Choi, "Dynamic compensation method for multivariable control systems with saturating actuators", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 40, no. 9, 1995.
- [11] 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.
- [12] L. Rundqwist, *Anti-reset windup for PID controllers*, Department of Automatic control", Lund Institute of Technology, Sweden, 1991.
- [13] 안성호, 윤지섭, 이상정, "고감속비의 관절을 가지는 원격조작기의 힘반영 제어", *대한전자공학회 하계종합학술대회*, V권, pp. 35~38, 2000
- [14] 안성호, 윤지섭, 이상정, "원격조작기의 속도포화 보상 힘반영 제어", *제어·자동화·시스템 공학회 논문지* Vol. 6, no. 10, pp. 895~903, 2000
- [15] C. L. Phillips and H. T. Nagle, *Digital control system analysis and design*, Prentice-Hall, 1990.
- [16] K.S. Narendra and J.H. Tayler, *Frequency domain criteria for absolute stability*, Academic Press, New York, 1973.

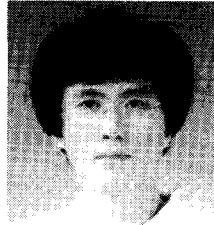
저 자 소 개



安 聖 鎬(正會員)

1964년 5월 9일생. 1986년 영남 대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1988년 동대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년~현재 충남대학교 전자공학과 박사 과정. 1990년~현재 한국원

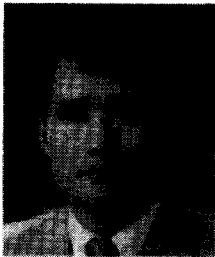
자력연구소 사용후핵연료 원격취급장치개발팀 선임연구원. 주관심분야는 힘반영제어, 원격로봇제어, 강인제어, Anti-windup 제어



李 相 禎(正會員)

1957년 8월 15일생. 1979년 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1981년 동대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1987년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(공학박사). 1988년~현재 충남

대학교 정보통신공학부 교수. 주관심분야는 강인제어, GPS 수신기 설계



尹 智 燮(正會員)

1958년 2월 3일생. 1980년 서울 대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1982년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1987년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1987년 3월~

현재 한국원자력연구소 사용후핵연료 원격취급 장치 개발팀 책임연구원/팀장. 주관심분야는 산업공정 원격취급기술, 생산 자동화 및 계측제어, 로봇 및 센서 적용기술