

A Force Reflecting Control for Telemanipulators with Control Input Saturation

安 聖 鎬* · 尹 智 燮** · 李 相 禎***
(Sung-Ho Ahn · Ji-Sup Yoon · Sang-Jeong Lee)

Abstract - When the manipulator consisting of high ratio gear reducers at its joints is used as the slave manipulator in teleoperated systems, its dynamic characteristic is much slower than that of the master manipulator and it is likely to encounter the saturation in the input magnitude. The control input saturation generates an windup phenomenon that the system stability and position tracking performance of the slave manipulator are to be deteriorated. This paper proposes a force reflecting control scheme and its design method which compensates the control input saturation with absolute stability. The proposed scheme is shown to give a stable force reflection while compensating for control input saturation effectively.

Key Words : force reflecting control, teleoperation control, anti-windup control, heavy-duty power manipulator

1. 서 론

원격조작 힘반영 제어(force reflecting control) 시스템은 조작자가 작업현황을 직접 감시하면서 마스터 조작기를 이용하여 슬레이브 조작기(manipulator)를 원격으로 조작하며, 마스터 조작기를 쥐고 있는 조작자의 손에 슬레이브 조작기의 작업상황이 힘반영되도록 하는 시스템으로 극한환경에서의 원격작업에 널리 이용되고 있다. 힘반영 제어기법에 관하여 많은 연구가 진행되어 왔다[1]-[6]. Kim[1]은 1차유도의 원격조작기에 대하여 위치 기준형(position-position) 힘반영 제어기법과 힘 기준형(position-force) 힘반영 제어기법의 간략화된 모델을 제시하였다. Luo 등[2]은 동적 환경에 대한 유연성(compliant) 제어기법을 제시하였으며, Kim 등[3]은 시간지연을 가지는 원격조작기에 대한 힘반영 및 유연성 제어기법을 제시하였다. Raju 등[4]과 Hannaford[5]는 두 개의 포트(port)로 구성된 네트워크의 모델을 사용하여 마스터와 슬레이브 시스템의 힘반영 성능을 향상시킬 수 있는 임피던스(impedance) 제어기법을 제시하였다.

일반적으로 고감도의 힘반영 기능을 구현하는 데는 저감속비의 관절구조를 갖는 슬레이브 조작기가 적합하지만, 저감속비의 관절로는 큰 취급 가반하중을 얻기 어렵기 때문에 저감속비의 관절을 갖는 조작기는 고하중 작업에 적합하지 않다. 예를 들어, 원자력 시설물의 해체, 이송 등의 작업에는 취급 가반하중이 큰 고감속비의 관절을 갖는 고하중 원격조

작기가 사용된다. 그러나 고하중 조작기는 제어입력의 포화를 빈번히 발생하기 때문에[7], 이를 슬레이브 조작기로 사용할 경우에는 슬레이브 조작기의 추종성능이 나쁠 뿐 아니라 시스템의 안정도가 나빠지는 등의 적분 되말림(windup) 현상이 발생된다. 따라서 고하중 조작기를 정교한 작업이나 위치변화가 빈번한 작업에 적용하기 위하여 제어입력의 포화를 보상한 힘반영 제어기법이 필요하다. 적분 되말림 현상을 보상(anti-windup)하는 기법에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다[8]-[12]. Ferik과 Ross[8]는 포화량을 적분기 입력으로 제한하여 포화량을 감소시키는 역 계산(back calculation) 기법을 제안하였고, Hanus 등[9]은 기준 입력신호와 출력신호의 차이인 오차신호가 제어기의 상태변수에 영향을 미치지 못하도록 하는 컨디셔닝(conditioning) 기법을 제안하였고, Park과 Choi[10]는 관측자와 상태변수 제한을 결합한 구조의 관측자(observer) 기법을 제안하였으며, Zheng 등[11]은 IMC (internal model control) 구조에서의 적분 되말림 현상 보상기법을 제시하였다. 이 기법들은 첫 번째 단계에서 제어입력의 포화를 고려하지 않은 상태에서 제어목적에 적합한 제어를 설계하고, 두 번째 단계에서 적분 되말림 현상을 보상하는 2 단계 설계기법에 기초하고 있다. 그러나 이러한 적분 되말림 보상기법을 제어입력의 포화를 가지는 원격조작기의 힘반영 제어에 적용할 경우에는 적분 되말림 현상은 보상되지만, 마스터 조작기가 빠르게 움직일 때에는 마스터 조작기에 의해 지정되는 기준위치(reference position)에 대해 원격조작기가 느린 추종성능을 가질 수 있다. 이러한 문제점에 대하여, 안성호 등[13][14]은 고감속비의 관절을 가짐으로 인해 제어입력의 포화를 발생하는 원격조작기에 대하여 적분 되말림 현상의 보상뿐만 아니라 기준 위치에 대한 슬레이브 조작기의 추종성을 증가시키는 구조를 제안하였다. 그러나, 이 구조에서는 제어입력의 포화에

* 正 會 員 : 韓 國 原 子 力 研 究 所 先 任 研 究 員
 ** 正 會 員 : 韓 國 原 子 力 研 究 所 責 任 研 究 員 · 工 博
 *** 正 會 員 : 忠 南 大 電 子 工 學 科 教 授 · 工 博
 接 受 日 子 : 2000 年 5 月 24 日
 最 終 完 了 : 2000 年 9 月 4 日

대한 힘반영비가 증가할수록 추종성능이 향상되지만 너무 크게 설정할 경우에 시스템이 불안정해질 수 있으므로, 이의 설정기준에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 [13][14]에서 제안한 힘반영 제어구조에 대하여 안정도를 해석하고, 시스템의 절대안정 조건과 안정한 힘반영 특성을 얻기 위한 힘반영비 설정기준을 제시한다. 본 논문에서 제안하는 기법으로 힘반영 제어시스템을 구현함으로써 제어입력의 포화를 가지는 고하중 조작기를 안정하고 정교하게 힘반영 제어할 수 있다는 장점이 있다. 2절에서는 제어입력 포화를 가지는 원격조작기의 힘반영 제어에 대한 문제점과 제안한 제어입력 포화보상 힘반영 제어구조의 특성을 살펴보고, 3절에서는 제안한 힘반영 구조가 절대 안정하기 위한 조건과 안정한 힘반영 특성을 얻기 위한 힘반영비 설정기준을 제시한다. 4절에서는 고하중 동력 조작기에 적용하여 실험한 결과를 제시한다.

2. 제어입력 포화를 보상한 힘반영 제어

2.1 제어입력의 포화를 가지는 힘반영 제어시스템

원격조작 힘반영 제어시스템은 그림 1과 같이 조작자가 조작하는 마스터 조작기, 마스터를 추종하는 슬레이브 조작기, 제어용 컴퓨터, 다축제어기, 구동모터 및 드라이버, 힘/토크 센서 등으로 구성된다.

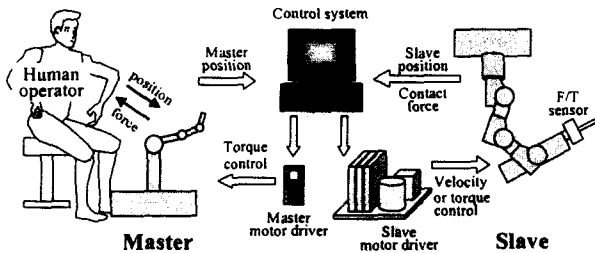


그림 1 힘반영 제어시스템의 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of the force reflecting control system

그림 2에 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 가지는 힘반영 제어시스템의 모델을 보였다[1][6]. 그림 2에서 f_{ct} 는 힘/토크 센서의 출력에 대하여 중력을 보상하고 교정한 후 측정된 값이다. 따라서, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않을 때의 K_{eff} 는 0이고 f_{ct} 도 0이며, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 때의 K_{eff} 는 일정하며 비선형 특성은 무시 가능하다고 가정한다. 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 경우에는 x_s 로부터 θ_s 로의 개환루프는 형성되지만, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않을 경우에는 x_s 로부터 θ_s 로의 개환루프는 형성되지 않는다.

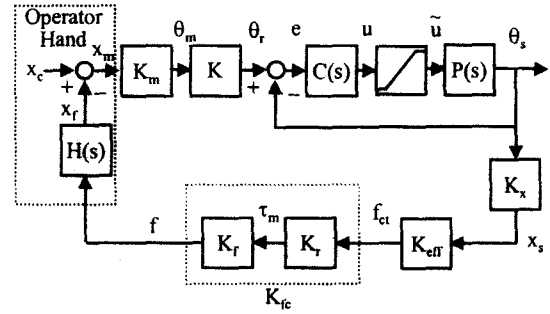


그림 2 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 가지는 힘반영 제어시스템의 블록선도

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

$P(s)$ 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[15]. 여기서 K_s 는 이득상수이고 τ_s 는 시정수이다. 또한 $H(s)$ 는 마스터 조작기를 쥐고 있는 조작자 손에 인가된 힘에 대한 마스터 조작기 위치의 전달함수이고,

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

로 주어진다[1]. 여기서 C_h 는 조작자가 쥐고 있는 마스터 조작기의 컴플라이언스(compliance)이고 τ 는 시정수이다. $C(s)$ 는 슬레이브 조작기의 제어기이다. $\tilde{u}(t)$ 는 $u(t)$ 에 대하여 일반적으로 다음과 같은 포화특성을 갖는다.

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

슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되면 적분 되달림 현상으로 인하여 기준위치에 대한 슬레이브 조작기의 추종성능이 나빠지고 시스템이 불안정해질 수 있으며 정교한 힘반영 특성을 얻기 어렵다. 따라서 이와 같은 문제에 대한 대책 없이는 힘반영 제어시스템을 정교한 작업에 적용할 수 없으며, 제어입력 포화를 가지는 슬레이브 조작기에 대하여 적분 되달림 현상을 보상하고 정교한 위치제어 특성을 얻을 수 있는 제어기법의 개발이 필요하다.

2.2 제어입력 포화를 보상한 힘반영 제어구조

제어입력의 포화를 보상한 [13][14]의 힘반영 제어구조는 그림 3과 같다.

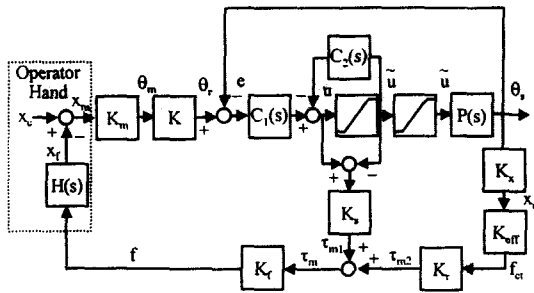


그림 3 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 보상한 힘반영 제어구조

Fig. 3 Force reflecting control scheme compensating for control input saturation

그림 2와 3에서

$$K_{fc} \triangleq K_f K_r, \tag{4}$$

$$K_{fs} \triangleq K_f K_s, \tag{5}$$

로 둔다. 슬레이브 조작기의 제어기는 2 단계 설계기법[11]으로 설계된다. 본 논문에서는 첫 번째 단계에서 $C(s)$ 를 다음과 같은 불완전 미분 형태의 PID 제어기로 설계한다.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{s + \gamma}. \tag{6}$$

여기서 $\gamma > 0$ 이다. 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 보상하기 위하여 그림 3과 같은 구조로 하여 다음을 만족하도록 $C_1(s), C_2(s)$ 를 설계한다.

$$(i) \quad C(s) = \frac{C_1(s)}{1 + C_2(s)}. \tag{7}$$

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

$$(iii) \quad C_2(s) = C_1(s)C^{-1}(s) - 1. \tag{8}$$

그림 3에서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않으면

$$\tilde{u}(s) = u(s) \tag{9}$$

가 된다. 이 때, $C(s)$ 와 $C_1(s)$ 가 biproper하고 최소위상이고 $C_1(s)$ 가 안정하면, (8)로 설계된 $C_2(s)$ 는 proper하고 안정하다. 따라서, (7)에서는 불안정한 극점과 영점의 상쇄가 발생하지 않으며, 슬레이브 조작기의 제어기는 제어목적에 따라 설계된 $C(s)$ 와 같게 된다. 한편, 슬레이브 조작기의

제어입력이 포화되면

$$u(s) = C_1(s)e(s) - C_2(s)\tilde{u}(s) \tag{10}$$

로 주어지고, 적분 되말림 현상을 보상하는 구조가 된다[11]. 이 때, 그림 3의 힘반영 제어구조에서는 포화량을 힘으로 변환시켜 마스터 조작기를 쥐고 있는 조작자에게

$$f(s) = K_{fs}\{u(s) - \tilde{u}(s)\} \tag{11}$$

의 힘을 반영시킨다. 결과적으로, 그림 3의 힘반영 제어구조는 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화될 경우에, 적분 되말림 현상을 보상하면서 포화에 의한 힘을 조작자에게 반영시켜 마스터 조작기를 천천히 움직이게 함으로써, 기준위치에 대한 슬레이브 조작기의 추종성을 향상시키는 구조이다.

그림 3의 힘반영 제어시스템은 비선형 포화요소를 포함하고 있으므로 이에 대한 안정도 해석이 필요하다. 그리고 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 때의 힘반영비(K_{fc})가 증가할수록 힘반영 성능은 향상되지만, 너무 크게 설정할 경우 시스템이 불안정해질 수 있다[1]. 제어입력의 포화에 대한 힘반영비(K_{fs})가 클수록 포화시에 조작자에게 전달되는 힘이 증가하여 조작자가 마스터 조작기를 천천히 움직이게 되어 마스터 조작기의 각위치의 변화량이 작아지게 되며, 결과적으로 기준 각위치의 변화량이 작게되어 기준 각위치에 대한 슬레이브 조작기의 추종성능이 증가하게 된다. 그러나, K_{fs} 을 너무 크게 설정할 경우에는 비선형 포화요소를 포함하는 시스템이 불안정해질 수 있다. 따라서, 그림 3의 힘반영 제어시스템에 대한 안정성 해석과 함께 안전한 힘반영 성능을 얻을 수 있는 힘반영비 K_{fc} 와 K_{fs} 의 설정기준에 대한 연구가 필요하다.

3. 안전한 힘반영 성능을 위한 힘반영비 설정기준

이 절에서는 제어입력의 포화를 보상한 그림 3의 힘반영 제어구조에 대하여 안정도를 해석하고 안전한 힘반영 성능을 얻기 위한 힘반영비 설정기준을 제시한다.

3.1 입출력 관계

그림 3에서 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 제어입력이 포화되지 않으면 $\tilde{u}(s) = u(s)$ 이므로 $\tau_1(s) = 0$ 이고, $f_{cr} = 0$ 이므로 $\tau_2(s) = 0$ 이 된다. 따라서, $f(s) = 0$ 이 되며 조작자에게 아무런 힘이 반영되지 않는다. 이 때, 각위치는

$$\theta_m(s) = K_m x_c(s), \tag{12}$$

$$\theta_r(s) = K \theta_m(s), \tag{13}$$

$$\theta_s(s) = \frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)} \theta_r(s) \tag{14}$$

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

$$f(s) = K_{fc} f_c(s) \quad (15)$$

의 힘이 조작자에게 반영된다.

그림 3에서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되면 (10)이 성립하여 적분 되말림 현상을 보상하는 구조로 되며, 슬레이브 조작기의 각위치는

$$\theta_s(s) = P(s) \tilde{u}(s) \quad (16)$$

가 된다. 이 때, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않을 경우에 조작자에게 반영되는 힘은 (11)로 주어지고, 접촉할 경우에는

$$f(s) = K_f \{u(s) - \tilde{u}(s)\} + K_{fc} f_c(s) \quad (17)$$

로 주어진다. 따라서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화될 경우에는 적분되말림 현상을 보상하면서 조작자에게 포화에 의한 힘을 반영시켜 마스터 조작기를 천천히 움직이게 한다.

3.2 안정도 해석

그림 3의 힘반영 제어시스템의 안정도를 해석하기 위하여 비선형 궤환을 갖는 선형시스템의 일반적인 형태로 그림 4와 같이 나타낼 수 있다[16].

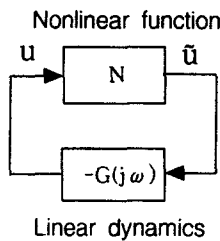


그림 4 비선형 궤환을 갖는 선형시스템의 일반적인 형태

Fig. 4 A configuration of linear system, $G(j\omega)$, with nonlinear feedback, N , for stability analysis

보조정리 : 그림 4에서 $G(j\omega)$ 는 원점에 있는 단일극점 이외의 모든 극점들이 안정하고, 비선형 궤환 N 은 다음과 같은 조건을 만족한다고 가정한다.

$$0 < k_1 \leq \frac{N(\sigma, t)}{\sigma} \leq k_2 = 1. \quad (18)$$

이 경우, 다음 조건을 만족하는 실수(real constant) α 가 존

재하면 그림 4의 폐루프 시스템은 절대 안정하다.

$$\text{Re} \{ [G(j\omega) + 1](1 + \alpha j\omega) \} \geq 0, \quad \forall \omega. \quad (19)$$

증명. [16] 참조.

그림 3의 힘반영 제어구조의 절대안정도를 만족하기 위한 조건은 다음의 정리 1과 같이 주어진다.

정리 1 : 다음의 조건을 만족하는 실수 α 가 존재하면 그림 3의 힘반영 제어시스템은 절대 안정하다.

(i) 접촉하지 않을 경우 :

$$\text{Re} \left[\frac{C_1(j\omega) \{C^{-1}(j\omega) + P(j\omega)\} (1 + \alpha j\omega)}{1 + KK_m K_f C_1(j\omega) H(j\omega)} \right] \geq 0, \quad \forall \omega. \quad (20)$$

(ii) 접촉할 경우 :

$$\text{Re} \left[\frac{C_1(j\omega) \{C^{-1}(j\omega) + P(j\omega) + KK_m K_f K_x K_{eff} H(j\omega) P(j\omega)\} (1 + \alpha j\omega)}{1 + KK_m K_f C_1(j\omega) H(j\omega)} \right] \geq 0, \quad \forall \omega. \quad (21)$$

증명 : 그림 3에서 $\tilde{u}(j\omega)$ 로부터 $-u(j\omega)$ 로의 전달함수 $G(j\omega)$ 는 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않을 경우에

$$G(j\omega) = \frac{C_1(j\omega) \{C^{-1}(j\omega) + P(j\omega)\}}{1 + KK_m K_f C_1(j\omega) H(j\omega)} - 1 \quad (22)$$

로 주어지고, 접촉할 경우에

$$G(j\omega) = \frac{C_1(j\omega) \{C^{-1}(j\omega) + P(j\omega) + KK_m K_f K_x K_{eff} H(j\omega) P(j\omega)\}}{1 + KK_m K_f C_1(j\omega) H(j\omega)} - 1 \quad (23)$$

로 주어진다. $P(j\omega)$ 는 (1)과 같이 원점에 있는 단일극점 이외의 모든 극점들이 안정하고, $H(j\omega)$ 는 (2)와 같이 주어지며 안정하다. 2.2절에서 $C(j\omega)$ 와 $C_1(j\omega)$ 를 biproper하고 최소위상이도록 설계하였고, $C_1(j\omega)$ 를 안정하도록 설계하였으므로, (22)와 (23)의 $G(j\omega)$ 는 원점에 있는 단일극점 이외의 모든 극점들이 안정하다. 따라서 보조정리의 (19)에 따라 (20)과 (21)이 절대안정도를 위한 충분조건이 된다. ■

3.3 정상상태 위치추종 특성

그림 3의 힘반영 제어구조에서 정상상태에서의 슬레이브 조작기의 위치추종 특성은 다음과 같다.

정리 2 : 그림 3에서 $x_c(s)$ 가 계단입력으로 주어질 때, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않거나 접촉할 경우 모두에 대하여 $\theta_r(s)$ 에 대한 $\theta_s(s)$ 의 정상상태 오차는 0이다.

증명 : $x_c(s)$ 가 계단입력으로 주어질 때에 그림 3의 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화된 경우에는 슬레이브 조작기의 제어기는 적분 되말림 보상구조를 가지도록 설계하였으므로, 슬레이브 조작기가 접촉하거나 접촉하지 않을 경우 모두에 대하여 정상상태에서의 슬레이브 제어입력은 포화되지 않은 상태로 볼 수 있다[11]. 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 포화되지 않으면 $\theta_s(s)$ 는 (14)로 주어지고 $\theta_r(s)$ 는

$$\theta_r(s) = KK_m x_c(s) \quad (24)$$

로 주어진다. (1)과 (6)을 (14)에 대입한 결과와 (24)로부터, $x_c(s)$ 가 계단입력으로 주어질 때의 정상상태 오차는

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s(\theta_r(s) - \theta_s(s)) = 0 \quad (25)$$

가 된다. 한편, 슬레이브 조작기가 접촉한 상태에서 포화되지 않을 경우에

$$\theta_s(s) = \frac{KK_m P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)\{1 + KK_m K_x K_{eff} K_{fc} H(s)\}} x_c(s) \quad (26)$$

$$\theta_r(s) = \frac{KK_m \{1 + P(s)C(s)\}}{1 + P(s)C(s)\{1 + KK_m K_x K_{eff} K_{fc} H(s)\}} x_c(s) \quad (27)$$

로 주어진다. $x_c(s)$ 가 계단입력으로 주어질 때 정상상태 오차는 (1), (2)와 (6)을 (26)과 (27)에 대입하면

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

이 된다. ■

3.4 힘반영비 설정

그림 3의 힘반영 구조에 대하여 안정한 힘반영 성능을 얻기 위한 힘반영비 K_{fc} 와 K_{fs} 의 설정기준을 제시한다. 그림 3은 적분 되말림 현상을 보상하는 구조를 가지므로 슬레이브 조작기가 접촉하거나 접촉하지 않을 모두의 경우에, 한정된 크기의 $x_c(s)$ 에 대해 정상상태에서 슬레이브 제어입력은 포화되지 않은 상태로 볼 수 있다[11]. 따라서, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉한 상태에서 제어입력이 포화되지 않은 경우에도 안정한 힘반영 성능을 얻을 수 있도록 하기 위하여 K_{fc} 는 제어입력이 포화를 고려하지 않은 상태에서 먼저 설정하고, K_{fs} 는 설정된 K_{fc} 에 대하여 비선형 요소를 포함하는 페루프 시스템이 안정하도록 설정한다.

정리 3 : 그림 3에서 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하고 제

어입력이 포화되지 않을 경우를 고려하자. $\angle(M(j\omega)) = -180^\circ$ 일 때

$$K_{fc} < \left| \frac{1}{M(j\omega)} \right| \quad (28)$$

이면 페루프 시스템은 안정하다. 여기서

$$M(j\omega) = \frac{KK_m K_x K_{eff} H(j\omega) P(j\omega) C(j\omega)}{1 + P(j\omega) C(j\omega)} \quad (29)$$

이다.

증명 : 그림 3에서, 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않은 경우에는 $\tilde{u}(s) = u(s)$ 이고 K_{fs} 를 통한 힘반영은 이루어지지 않는다. 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 경우의 루프 전달함수는 $K_{fc}M(s)$ 이다. (1), (2)와 (6)에 대하여 $s = j\omega$ 로 두고 (29)에 대입하면 $M(j\omega)$ 는 안정하며 최소위상이 된다. 따라서 $\angle M(j\omega) = -180^\circ$ 일 때

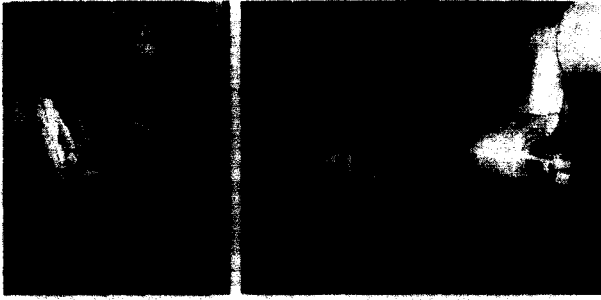
$$|K_{fc}M(j\omega)| < 1 \quad (30)$$

이면 페루프 시스템은 안정하다[17]. 결과적으로, (28)이 만족되면 슬레이브 조작기가 물체에 접촉한 상태에서 제어입력이 포화되지 않을 경우에 페루프 시스템은 안정하다. ■

주 : 그림 3의 힘반영 제어구조에 대하여, 안정성을 유지하면서 힘반영 성능을 좋게 하기 위하여, (28)을 만족하면서 K_{fc} 를 가능한 한 크게 설정한다. K_{fs} 를 너무 크게 설정하면 비선형 요소를 포함하는 시스템이 불안정하게 될 수 있으므로, 설정된 K_{fc} 에 대하여 정리 1의 (20)과 (21)을 만족하도록 K_{fs} 를 설정한다. 이 때, 그림 3의 페루프 시스템은 절대 안정하다.

4. 동력 조작기에 응용 예

이 절에서는 고감속비의 관절을 갖는 동력 조작기를 슬레이브 조작기로 사용하고 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 보상하지 않은 경우의 실험결과를 살펴본다. 또한, 제어입력의 포화를 보상한 그림 3의 힘반영 제어구조에 대하여 본 논문에서 제시한 설계기준을 만족하는 경우와 만족하지 않는 경우에 대해 실험한 결과를 살펴본다. 본 논문에서 대상으로 한 힘반영 제어시스템의 형상은 그림 5와 같다. 6자유도의 마스터 조작기는 의자의 오른쪽 팔걸이 부분에 설치되어 있어 조작자가 편안히 앉은 상태에서 조작할 수 있는 구조이다. 마스터 조작기는 한국원자력연구소에서 설계 및 제작한 것으로 각 축이 직렬 또는 string & pulley 방식으로 구동되도록 하는 구조를 가지며, 전후이동, 좌우회전 및 상하회전이 가능한 구조이다. 마스터 조작기의 구동모터의 회전축에는 토크 제어형 드라이버와 서보모터가 연결되어 있다.



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

그림 5 실험에 사용한 힘반영 제어시스템 형상
Fig. 5 Picture of the experimental setup

슬레이브 조작기는 취급 가반하중이 큰 중량물을 취급하기 위하여 설계된 고감속비의 관절을 갖는 7자유도의 동력 조작기이다. 동력 조작기는 원자력 시설의 해체, 이송 등에 사용되는 조작기로서 취급 가반하중이 100 kgf으로 큰 반면에 응답이 매우 느린 특성을 가진다. 본 논문에서는 중력방향으로 움직이는 마스터 조작기의 한 축과 슬레이브 조작기 한 축이 연계 제어되도록 하였다. 마스터와 슬레이브 조작기의 각위치를 측정하기 위하여 관절부위의 끝에 광학 위치 센서(encoder)를 부착하였고, 슬레이브 조작기와 물체와의 접촉힘을 측정하기 위하여 조작기의 종단에 힘/토크 센서를 부착하였다. 힘/토크 센서와 제어용 컴퓨터 사이의 신호전달은 RS-232 방식으로 하였고 통신속도는 9600 bps로 설정하였으며, 힘/토크 센서로부터의 신호 갱신주기는 0.05초이다. 슬레이브 조작기는 하모닉 드라이브(harmonic drive)와 웜(worm)으로 구성된 감속기를 가지는 비선형 특성이 큰 시스템이지만[7], 본 논문에서의 연구대상인 제어입력의 포화를 제외한 다른 비선형 특성들은 무시하였다. $P(s)$ 는 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않도록 계단입력의 전압(V)을 가하여 각위치(rad)를 측정하여 다음과 같이 모델링하였다.

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

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

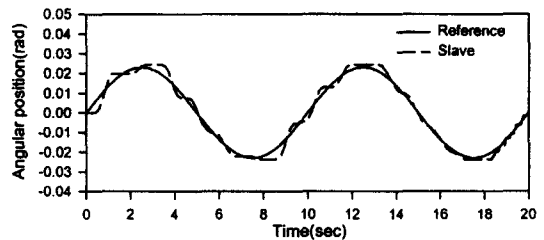
$$\tilde{u}(t) = \begin{cases} 5V, & u(t) > 5V \\ u(t), & -5V \leq u(t) \leq 5V \\ -5V, & u(t) < -5V \end{cases} \quad (32)$$

$H(s)$ 는 실험에 의하여 다음과 같이 모델링하였다.

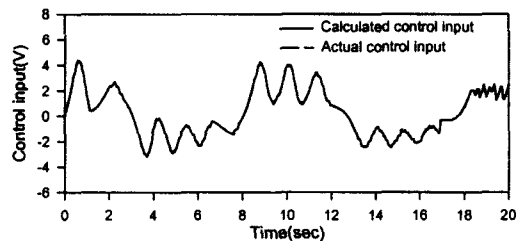
$$H(s) = \frac{C_h}{0.08s+1} \quad (33)$$

여기서 $C_h = 2.91 \sim 3.71 cm/kgf$ 이다. K_m 은 $0.125 rad/cm$ 로 근사화 되고 K_x 는 $50 cm/rad$ 로 근사화 된다. 힘/토크 센서로부터의 출력에 대하여 중력을 보상하여 f_{ct} 를 측정할 수 있도록 하였고, 슬레이브 조작기가 접촉하지 않을 때는 $f_{ct}=0$ 와 $K_{eff}=0$ 가 되도록 하였다. 슬레이브 조작기가 접촉시의 K_{eff} 는 $54 kgf/cm$ 로 측정되었으며 K_{eff} 의 비선형 특성은 무시할 수 있었다. 마스터 조작기에는 힘/토크 센서를 부착하기 어려웠기 때문에, 그림 7의 (d)와 그림 8, 9의 (d), (e)로 주어지는 조작자에게로의 힘반영 응답을 구하기 위하여, 접촉에 대한 힘반영 응답은 미리 측정된 K_{fc} 를 f_{ct} 에 곱하여 구하였으며, 포화에 대한 힘반영 응답은 포화량에 K_{fs} 를 곱하여 구하였다. K 는 0.5로 설정하였고, K_{fc} 는 (28)을 만족하도록 0.0013으로 설정하였다. 슬레이브 조작기의 제어기는 (6)의 PID를 사용하였으며, PID 계수들은 제어입력의 포화가 발생하지 않은 상태에서 슬레이브 조작기의 각위치가 기준 각위치를 추종하도록 $K_p = 380$, $K_i = 875$, $K_d = 0.0102$, $\gamma = 21.27$ 로 설정하였다. 힘반영 제어시스템은 디지털 제어시스템으로 구현할 때에 샘플링 주기 T 는 힘/토크 센서의 신호갱신 주기를 고려하여 0.05초로 설정하였다. 샘플링 주파수는 매우 느린 동특성을 가지는 고하중 조작기의 동작주파수에 대한 Nyquist rate와 조작자가 조작하는 마스터 조작기의 동작주파수에 대한 Nyquist rate 보다 크기 때문에 연속시간 시스템에서의 설계를 디지털 시스템으로 변환하여 구현 가능하다[18]. 디지털 제어기 $C(z)$ 는 쌍선형(bilinear) 변환에 의해 다음과 같이 구현하였다.

$$C(z) = \frac{402z^2 - 481z + 110}{z^2 - 1.3056z + 0.3056} \quad (34)$$



(a) Angular position

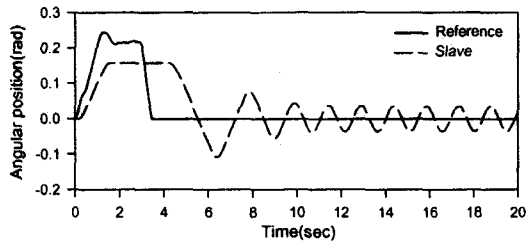


(b) Control input

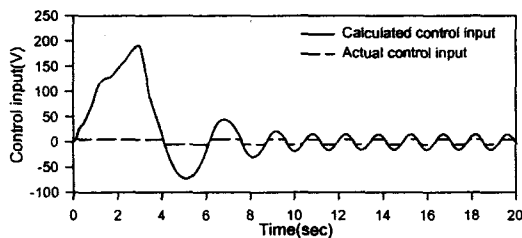
그림 6 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않은 상태에서의 응답

Fig. 6 Responses without control input saturation of the slave manipulator

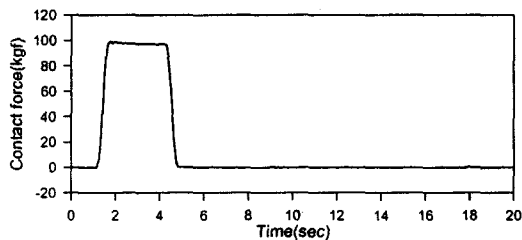
그림 6은 그림 2의 힘반영 제어구조에 대하여 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 제어입력의 포화가 발생하지 않도록 조작자의 지령위치 입력 $x_c(s)$ 를 충분히 작게 가한 상태에서의 실험결과이다. 슬레이브 조작기의 각위치(θ_s)는 비선형 특성을 보이지만 기준 각위치(θ_r)를 잘 추종함을 볼 수 있다. 그러나 이것은 포화가 발생하지 않은 상태에서의 제어기 성능일 뿐이며, 조작자가 고감속비의 판절을 갖는 동력 조작기의 제어입력이 포화되지 않도록 항상 마스터 조작기를 조작할 수는 없다.



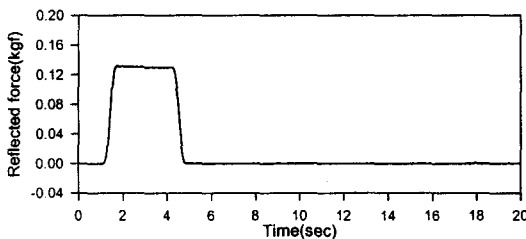
(a) Angular position



(b) Control input



(c) Contact force



(d) Reflected force

그림 7 제어입력 포화를 보상하지 않은 상태에서의 특성
Fig. 7 Responses without compensating for control input saturation

제어입력의 포화를 보상하지 않은 그림 2의 힘반영 제어

구조에 대하여 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 때의 특성을 그림 7에 보였다. 그림 7의 (a)는 기준 각위치에 대한 슬레이브 조작기 각위치의 추종응답을 나타내고, (b)는 슬레이브 조작기의 제어기에 의해 계산된 제어입력(u)와 실제 제어입력(\hat{u})을 나타내고, (c)는 힘/토크 센서 출력으로부터 증력을 보상하고 교정한 후 측정된 힘(f_a)을 나타내며, (d)는 조작자에게 반영되는 힘(f)을 나타낸다. 슬레이브 조작기는 1.20초에 물체에 접촉하였다. 조작자는 반영된 힘을 감지하지만 마스터 조작기를 정지시켜 슬레이브 조작기를 물체에 접촉시킨 상태를 유지하다가 3.05초에 마스터 조작기를 역방향으로 움직였다. 이 때, 슬레이브 조작기는 마스터에 의해 생성되는 기준위치를 즉각 추종하지 않고 4.85초까지 접촉상태를 유지하다가 물체로부터 분리되며, 물체로부터 분리된 후에도 불안정하게 진동함을 (a)에서 볼 수 있다. 또한, 슬레이브 조작기는 제어입력이 포화되어 위치제어 루프가 끊어진 상태에서 물체에 접촉하기 때문에 슬레이브 조작기는 물체에 강하게 접촉함을 (c)에서 볼 수 있다. 결과적으로, 슬레이브 조작기의 제어입력 포화에 대한 보상 없이는 정교한 힘반영 제어성능을 얻을 수 없음을 알 수 있다.

그림 3의 제어입력 포화를 보상한 힘반영 제어구조에 대하여, 본 논문에서 제시한 설계기준을 만족하지 않도록 설계한 경우와 만족하도록 설계한 경우에 대해 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 때의 특성을 살펴보았다. $C_1(s)$ 는 biproper하고 최소위상이며 안정하도록 다음과 같이 설계하였다.

$$C_1(s) = \frac{993s^2 + 23395s + 48626}{s^2 + 80s + 1600} \quad (35)$$

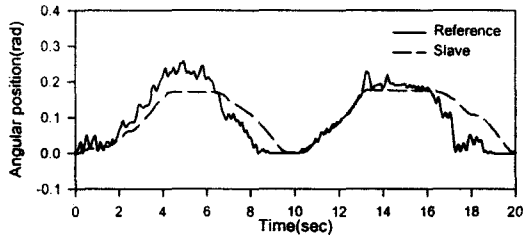
그리고 $C_2(s)$ 는 (8)을 만족하도록 설계하였다. $C_1(z)$ 는 쌍선형변환 방법으로 다음과 같이 구현하였다.

$$C_1(z) = \frac{402z^2 - 481z + 110}{z^2} \quad (36)$$

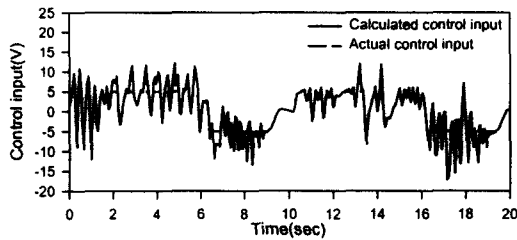
K_{fc} 는 제어입력의 포화를 보상하지 않은 경우와 마찬가지로 0.0013으로 설정하였다. 이 때, 시스템의 절대안정도에 대한 정리 1의 조건들을 만족하는 K_{fs} 의 범위는 0~0.05이다.

그림 8은 K_{fs} 를 0.15로 설정한 경우의 응답을 나타낸다. 이 K_{fs} 값은 절대안정도에 대한 정리 1의 조건들을 만족하지 않는다. 그림 8에서, 조작자는 슬레이브 조작기를 첫 번째로 4.00초에 물체에 약하게 충돌시켜 접촉상태를 유지하려고 의도하였고 6.30초에 마스터 조작기를 역방향으로 이동시켰으며, 두 번째로 12.95초에 강하게 충돌시켜 접촉상태를 유지하려고 의도하였으며 16.10초에 마스터 조작기를 역방향으로 이동시켰다. 이 때, 그림 8의 (e)의 힘이 조작자에게 반영되어 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않거나 접촉할 모두의 경우에 기준 각위치가 불안정하게 진동함을 (a)에서 볼 수 있다. 결과적으로, K_{fs} 가 너무 크게 설정되었

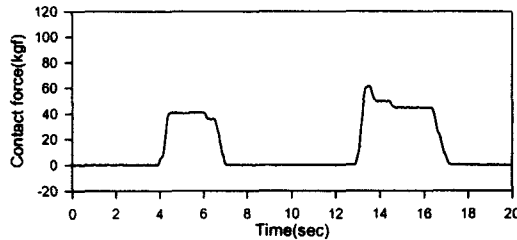
기 때문에 마스터 조작기가 불안정하게 진동하며 슬레이브 조작기의 접촉력을 조작자에게 정교하게 전달하지 못함을 알 수 있다.



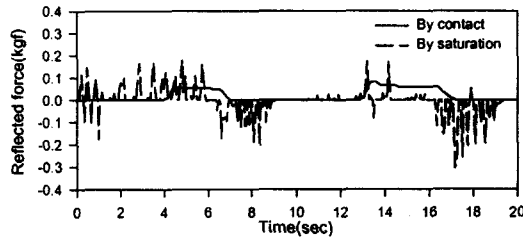
(a) Angular position



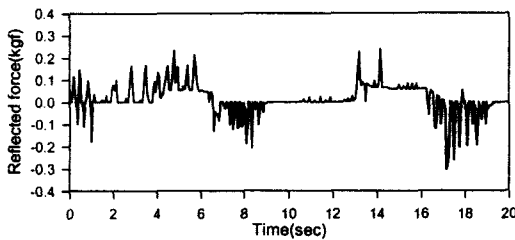
(b) Control input



(c) Contact force



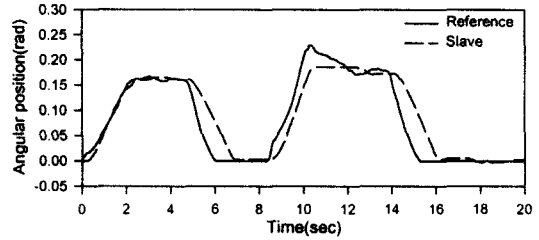
(d) Reflected force



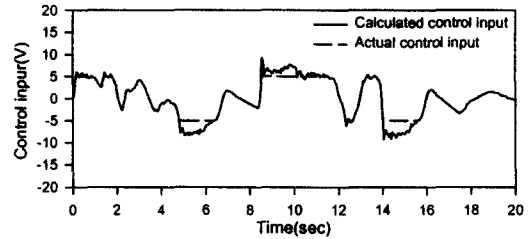
(e) Total reflected force

그림 8 제안한 구조에 대하여 설계기준을 만족하지 않는 경우의 응답($K_f=0.15$)

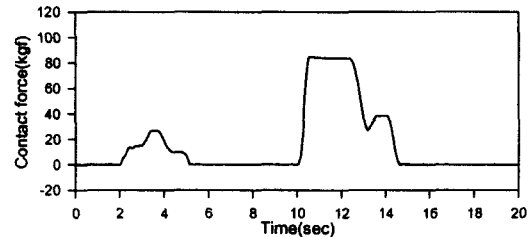
Fig. 8 Responses for the proposed scheme without satisfying the design condition ($K_f=0.15$)



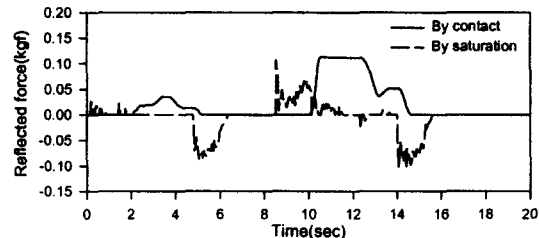
(a) Angular position



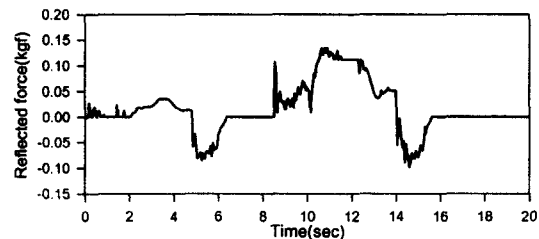
(b) Control input



(c) Contact force



(d) Reflected force



(e) Total reflected force

그림 9 제안한 구조에 대하여 설계기준을 만족하는 경우의 응답($K_f=0.025$)

Fig. 9 Responses for the proposed scheme with satisfying the design condition ($K_f=0.025$)

그림 9는 정리 1의 조건들을 모두 만족하도록 K_f 를

0.025으로 설정한 경우의 응답을 나타낸다. 첫 번째 접촉에서 슬레이브 조작기를 2.10초에 물체에 약하게 충돌시켜 접촉한 상태를 유지하고 있다가 4.75초에 마스터 조작기를 역방향으로 움직일 때에 슬레이브 조작기는 5.15초에 물체로부터 분리되고, 두 번째 접촉에서 슬레이브 조작기를 10.10초에 강하게 충돌시켜 접촉한 상태를 유지하고 있다가 13.95초에 마스터 조작기를 역방향으로 움직일 경우에 슬레이브 조작기는 14.6초에 물체로부터 분리됨을 (a), (c)에서 볼 수 있다. 또한, 제어입력의 포화에 마스터 측에 힘반영시켜 마스터 조작기의 핸들을 천천히 움직이게 하여 슬레이브 조작기의 접촉 및 제어입력의 포화에 관계없이 기준 각 위치에 대한 슬레이브 조작기의 각위치의 추종특성이 증가함을 (a), (b), (e)에서 볼 수 있다. 그리고, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉한 상태에 있을 때에 제어기의 포화량이 작게 유지되기 때문에 마스터 조작기를 역으로 움직이면 슬레이브 조작기는 기준위치를 곧바로 추종함을 볼 수 있다. 결과적으로, 시스템의 절대안정도를 만족하는 범위에서 K_f 를 설정하면 안정한 힘반영 특성과 더불어 슬레이브 조작기의 위치추종 특성을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

원격조작 힘반영 제어시스템에서 슬레이브 조작기가 제어입력의 포화를 가지는 경우에는 적분 되말림 현상으로 인하여 슬레이브 조작기의 위치 추종특성이 나빠지고 시스템이 불안정해지기 때문에 이를 보상하는 제어기법의 연구가 필요하다. [13][14]에서는 슬레이브 조작기의 제어기를 적분 되말림 현상을 보상하는 구조로 설계하고 제어입력의 포화량을 힘으로 변환하여 마스터 측에 힘반영하여 마스터 조작기를 천천히 움직이게 함으로써 적분 되말림 현상의 보상과 함께 기준위치에 대한 슬레이브 조작기의 추종성을 증가시키는 힘반영 제어구조를 제안하였다. 그러나 이 구조에서 슬레이브 조작기의 접촉에 대한 힘반영비와 슬레이브 조작기의 제어입력 포화에 대한 힘반영비를 너무 크게 설정하면 시스템이 불안정해질 수 있으므로 이의 설정기준에 대한 연구가 필요하고, 제어입력의 포화로 인한 비선형 시스템의 안정도 해석이 필요하다.

본 논문에서는 제어입력의 포화를 보정한 [13][14]의 힘반영 제어구조에 대해 안정도를 해석하여 절대안정 조건을 제시하였으며, 안정한 힘반영 특성을 얻기 위한 힘반영비 설정기준을 제시하였다. 제어입력의 포화를 가지는 동력 조작기를 슬레이브 조작기로 사용한 힘반영 제어시스템에 대해 제안한 기법으로 설계하여 실험한 결과, 안정한 힘반영 특성을 얻을 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 힘반영 제어기법을 제어입력의 포화를 발생하는 슬레이브 조작기에 적용할 경우에 안정하고 정교한 힘반영 특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 특히 원자력 시설의 해체, 이송 등의 고하중 작업이나 방사선물질의 원격취급을 위한 조작기에 적용하여 정교한 작업을 안정하게 수행함으로써 안전성을 향상할 수 있다는 장점이 있다.

기 호 설 명

x_c	조작자가 지령하는 위치
x_f	힘반영에 의해 마스터 조작기를 변화시킨 위치
x_m	마스터 조작기의 위치
x_s	슬레이브 조작기가 물체에 접촉하는 면의 위치
θ_m	마스터 조작기의 각위치
θ_r	기준 각위치
θ_s	슬레이브 조작기의 각위치
u	슬레이브 조작기의 제어기에서 계산된 제어입력
\tilde{u}	슬레이브 조작기의 실제 제어입력
f_{ct}	슬레이브 조작기가 물체에 접촉시의 접촉력
τ_{m1}	슬레이브 조작기의 제어입력 포화에 의해 발생하는 마스터 조작기 구동모터의 토크
τ_{m2}	슬레이브 조작기의 접촉에 의해 발생하는 마스터 조작기 구동모터의 토크
τ_m	포화 또는 접촉에 의해 발생하는 마스터 조작기 구동모터의 토크
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 위치 변화량의 비
K_r	접촉에 대한 힘제한 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

감사의 글

본 연구는 2000년도 과학기술부 원자력연구개발사업의 지원에 의하여 수행되었습니다

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] Z. W. Luo and M. Ito, "Control design of robot for compliant manipulation on dynamic environments", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 9, no. 3, pp. 286-296, 1993.
- [3] 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.

- [4] G. J. Raju, G. C. Verghese and T. B. Sheridan, "Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1316-1321, 1989.
- [5] B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback", IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 5, no. 4, pp. 426-434, 1989.
- [6] M. Uebel, M. Ali and I. Minis, "The effect of bandwidth on telerobot system performance", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol. 24, no. 2, pp. 342-348, 1994.
- [7] 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.
- [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, 제6권, 10호, pp. 894-902, 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.
- [17] G. F. Franklin, D. Powell and A. E. Naeini, Feedback control of dynamic systems, Addison-Wesley, 1994.
- [18] J. E. Slotine and W. Li, Applied nonlinear control, Prentice-Hall, 1991.

저 자 소 개



안 성 호 (安 聖 鎬)

1964년 5월 9일생. 1986년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업. 1988년 8월 동대학원(석사). 1994년 3월~현재, 충남대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 1990년 7월~현재, 한국원자력연구소 사용후핵연료 원격취급장치

개발실 선임연구원. 관심분야는 힘반영제어, 원격로봇제어, 강인제어, anti-windup 제어, 비연화제어.

Tel : 042-868-2518, Fax : 042-868-2854

E-mail : shahn2@kaeri.re.kr



윤 지 섭 (尹 智 燮)

1958년 2월 3일생. 1980년 2월 서울대학교 기계공학과 졸업. 1982년 2월 한국과학기술원 기계공학과(석사). 1987년 2월 동대학원(공학박). 1987년 3월~현재, 한국원자력연구소 사용후핵연료 원격취급장치개발실

책임연구원/실장. 관심분야는 산업공정 원격취급기술, 생산 자동화 및 계측제어, 로봇 및 센서 적용기술

Tel : 042-868-2855, Fax : 042-868-2854

E-mail : jsyoon@kaeri.re.kr



이 상 정 (李 相 禎)

1957년 8월 15일생. 1979년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업. 1981년 2월 동대학원(석사). 1987년 2월 서울대학교 제어계측공학과(공학박). 1988년~현재, 충남대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 강인 제

어, GPS 수신기 설계

Tel : 042-821-6582, Fax : 042-823-4494

E-mail : eesjl@cslab.chungnam.ac.kr