

고하중 원격조작기의 힘반영 유연성 제어

안 성 호* · 윤 지 섭* · 이 상 정**
*한국원자력연구소 · **충남대학교

Force Reflecting and Compliant Control for Heavy-Duty Power Manipulators

Sung-Ho Ahn* · Ji-Sup Yoon* · Sang-Jeong Lee**
*Korea Atomic Energy Research Institute · **Chungnam National Univ.

Abstract - This paper proposes a force reflecting and compliant control scheme for the heavy-duty power manipulators with high ratio gear reducers at its joints. From the experimental results, it can be seen that the proposed scheme has an excellent compliant force control performance.

1. 서 론

원격조작 시스템은 우주공간이나 심해의 탐사, 채굴 및 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. 한편, 주변환경이 고강성으로 이루어져 있는 경우에는 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시에 접촉력이 급격히 증가하므로 접촉시에 유연성을 가지도록 하기 위하여 컴플라이언스(compliance) 제어가 도입되었다[1]-[4]. 그러나 지금까지 발표된 대부분의 연구들은 접촉력이 작은 저하중 작업에 대해 수행되었으며 슬레이브 조작기의 접촉력을 조작자에게 어떻게 전달시켜줄 것인가에 대한 연구결과들이다. 고감속비의 관철을 가지는 고하중 조작기는 제어입력의 포화를 빈번히 발생하기 때문에[5], 적분 되말림(windup) 현상으로 인하여 슬레이브 조작기의 위치 추종 특성과 시스템의 안정성이 나빠지게 된다.

본 논문에서는 고감속비를 갖는 고하중 원격조작기를 슬레이브 조작기로 사용한 원격조작 시스템에 대하여 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시에 유연성을 가지도록 하고 조작자에게 힘반영시켜 조작자가 안정적인 작업을 할 수 있도록 하는 힘반영 유연성 제어기법을 제안한다.

2. 고하중 원격조작기의 유연성 제어문제

그림 1에 제어입력 포화를 가지는 슬레이브 조작기에 대한 양방향 제어시스템의 모델을 보였다[2].

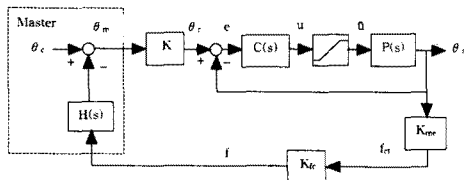


그림 1. 제어입력 포화를 가지는 슬레이브 조작기의 양방향 제어시스템 블록선도

그림 1에서 θ_e 는 조작자의 지령 각위치(angular

position)이고, θ_m 은 마스터 조작기의 각위치이고, θ_r 은 기준(reference) 각위치이며, θ_s 는 슬레이브 조작기의 각위치이다. u 는 슬레이브 조작기의 제어기에서 계산된 제어입력이며, \tilde{u} 슬레이브 조작기의 실제 제어입력이다. f_{cc} 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_s 는 접촉 또는 포화에 의해 조작자에게 반영되는 힘이다. K 는 위치 보정 계수이고, K_{fc} 는 슬레이브 조작기의 접촉에 대한 힘반영비이며, K_{me} 는 슬레이브 조작기와 환경사이의 탄성계수(stiffness)이다. $P(s)$ 는 슬레이브 조작기의 제어입력에 대한 슬레이브 조작기의 각위치(angular position) 출력의 전달함수이고, $H(s)$ 는 마스터 조작기를 쥐고 있는 조작자 손에 인가된 힘에 대한 마스터 조작기의 각위치의 전달함수이다. $C(s)$ 는 슬레이브 조작기의 제어기이다. $\tilde{u}(t)$ 는 일반적으로 다음과 같은 포화 특성을 가진다.

$$\tilde{u}(t) = \begin{cases} u_{max}, & u(t) \geq u_{max} \\ u(t), & -u_{max} \leq u(t) \leq u_{max} \\ -u_{max}, & u(t) \leq -u_{max} \end{cases} \quad (1)$$

슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되면 적분 되말림 현상으로 인하여 기준위치에 대한 슬레이브 조작기의 추종 성능이 나빠지고 시스템이 불안정해질 수 있다.

한편, 원격조작 힘반영 제어시스템에서 슬레이브 조작기가 물체에 접촉시에 유연성을 가지도록 하고 접촉력을 조작자에게 효과적으로 전달하기 위하여 분할 컴플라이언스 제어기법이 도입되었다[1]-[4]. 그림 2는 제어입력의 포화를 고려하지 않은 상태에서의 능동 컴플라이언스 방법의 컴플라이언스 제어루프를 나타낸다[1]. 여기서 $R(s)$ 는 슬레이브 조작기의 위치제어루프 시스템이다. 그림 2는 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 때의 접촉력을 컴플라이언스 제어기를 통해 귀환하여 기준위치 입력을 수정하여 슬레이브 조작기의 위치를 변화시키므로써 유연성을 가지도록 하는 구조이다.

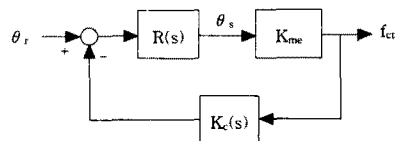


그림 2. 능동 컴플라이언스 제어루프

Kim은 다음과 같은 저역여파기를 이용한 1차선형 능동 컴플라이언스 제어기를 제안하였다[1].

$$K_c(s) = \frac{K_{cc}}{\tau_c s + 1} \quad (2)$$

여기서 K_{α} 는 힘 제한이득을 나타내고 τ_c 는 시정수를 나타낸다. 한편, 그림 2의 슬레이브 조작기의 위치제어 루프 시스템 $R(s)$ 에서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되는 경우에는 위치제어루프가 끊어지게 되고, 또한 적분 되말림 현상으로 인하여 시스템이 불안정해지며 슬레이브 조작기가 물체에 강하게 접촉할 수 있기 때문에 유연한 힘제어 특성을 얻기 힘들다. 따라서 제어입력의 포화를 보상하여 슬레이브 조작기의 추종성능을 향상시키고, 슬레이브 조작기가 고강성의 물체에 접촉할 때에 유연성을 가지고, 동시에 작업자에게 접촉력을 선명하게 느끼게 해주는 기법의 연구가 필요하다.

3. 제안하는 유연성 제어기법

그림 3은 슬레이브 조작기의 제어입력의 포화를 고려한 힘반영 유연성 제어구조를 나타낸다.

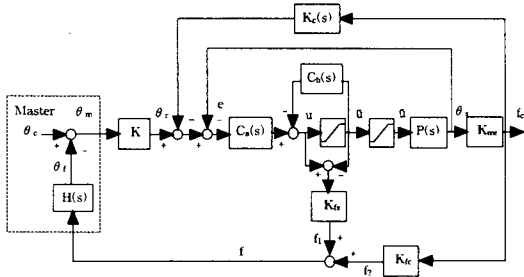


그림 3. 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 고려한 힘반영 유연성 제어구조

3.1 제어입력 포화보상 특성

제안한 제어기법의 주된 관점은 적분 되말림 현상을 보상하는 기능을 가지도록 슬레이브 조작기의 제어를 설계하고, 또한 포화량을 힘으로 변환하여 조작자에게 힘반영시켜 마스터 조작기를 천천히 움직이도록 함으로써, 시변(time varying)인 기준위치에 대해 슬레이브 조작기의 추종성능을 증가시키는 것이다. 그림 3에서 K_{α} 는 슬레이브 조작기의 제어입력 포화에 대한 힘반영 비이다. 슬레이브 조작기의 제어기는 2 단계 설계기법 [7]으로 설계된다. 본 논문에서는 첫 번째 단계에서 $C(s)$ 를 다음과 같은 불완전 미분 형태의 PID 제어기로 설계한다.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{s + \gamma} \quad (3)$$

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 3과 같은 구조로 하여 다음과 같이 설계한다.

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

(ii) $C_b(s) = C_a(s)C^{-1}(s) - 1$. (4)

그림 3에서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않으면

$$\tilde{u}(s) = u(s), \quad (5)$$

$$u(s) = \frac{C_a(s)}{1 + C_a(s)} e(s) = C(s)e(s) \quad (6)$$

의 관계가 성립한다. $C(s)$ 와 $C_a(s)$ 가 biproper하고 최소위상이고, $C_a(s)$ 가 안정하면, 식 (4)로 설계된

$C_b(s)$ 는 proper하고 안정하며 $\{1 + C_b(s)\}^{-1}$ 도 안정하다. 따라서, 식 (6)에서는 불안정한 극점과 영점의 상쇄가 발생하지 않으며, 슬레이브 조작기의 제어기는 제어 목적에 따라 설계된 $C(s)$ 와 같게 된다. 한편, 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되면

$$u(s) = C_a(s)e(s) - \{C_a(s)C^{-1}(s) - 1\}\tilde{u}(s) \quad (7)$$

로 주어지고 적분 되말림 현상을 보상하는 구조가 된다 [8]. 이 때, 그림 3의 힘반영 제어구조에서는 포화량을 힘으로 변환시켜 마스터 조작기를 쥐고 있는 조작자에게

$$f(s) = K_{\alpha}\{u(s) - \tilde{u}(s)\} \quad (8)$$

의 힘을 반영시킨다. 결과적으로, 제안한 그림 3의 힘반영 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.

3.2 입출력 관계

그림 3에서 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 제어입력이 포화되지 않으면 $\tilde{u}(s) = u(s)$ 이고,

$$f(s) = f_1(s) = f_2(s) = 0 \quad (9)$$

이므로 조작자에게 아무런 힘이 반영되지 않는다. 또한, 각위치는

$$\theta_m(s) = \theta_c(s), \quad (10)$$

$$\theta_r(s) = K\theta_m(s), \quad (11)$$

$$\theta_s(s) = \frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)} \theta_r(s) \quad (12)$$

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

슬레이브 조작기가 물체에 접촉한 상태에서 제어입력이 포화되지 않으면

$$\frac{F_{ct}(s)}{\theta_r(s)} = \frac{K_{me}P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)[1 + K_{me}\{K_c(s) + KK_{fc}H(s)\}]} \quad (13)$$

이 되고,

$$f(s) = f_2(s) = K_{fc}f_{ct}(s) \quad (14)$$

의 힘이 조작자에게 반영된다. 따라서, 슬레이브 조작기는 자율적으로 컴플라이언스 제어구조를 가지며, 조작자에게 접촉힘을 반영함으로써 마스터의 위치 변화량이 작게 되어 컴플라이언스를 부가하는 분할 컴플라이언스 제어구조가 된다.

한편, 그림 3에서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되면, 식 (7)이 성립하여 적분 되말림 현상을 보상하는 구조로 되고, 슬레이브 조작기의 각위치는

$$\theta_s(s) = P(s)\tilde{u}(s) \quad (15)$$

가 된다. 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않을 경우에 조작자에게 반영되는 힘은 식 (8)로 주어지고, 접촉할 경우에는

$$\theta_r(s) = K\theta_m(s) - K_{me}K_c(s)P(s)\tilde{u}(s), \quad (16)$$

$$e(s) = \theta_r(s) - P(s)\tilde{u}(s), \quad (17)$$

$$u(s) = C_a(s)e(s) - \{C_a(s)C^{-1}(s) - 1\}\tilde{u}(s)$$

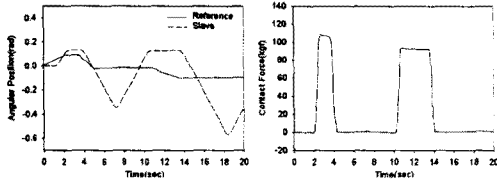
로 되며, 3.1절에서 살펴본 적분 되말림 현상 보상구조가 된다. 이 때, 조작자에게 반영되는 힘은

$$f(s) = K_{\alpha}\{u(s) - \tilde{u}(s)\} + K_{fc}f_{ct} \quad (18)$$

로 주어진다. 적분 되말림 현상 보상구조의 제어기와 포화량에 의한 힘반영은 제어입력의 포화를 벗어나게 하고, 제어입력의 포화로부터 벗어나면 식 (13)와 (14)의 관계가 성립하여 분할 컴플라이언스 제어구조가 된다.

4. 적용실험

고감속비의 관절을 가짐으로 인해 제어입력의 포화를 빈번히 발생하는 고하중 조작기에 대하여 실험하였다. 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 보상하지 않은 그림 1의 힘반영 제어시스템에 대해 그림 2의 능동 컴플라이언스 제어루트를 적용하여 얻은 응답을 그림 4에 보였다.

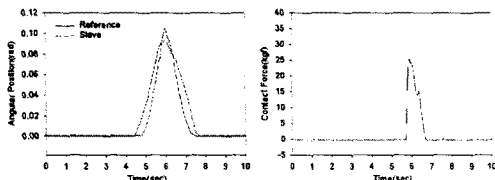


(a) 각위치 (b) 접촉힘

그림 4. 제어입력의 포화를 보상하지 않은 경우의 응답

그림 4에서 슬레이브 조작기는 2.10초에 물체에 접촉하였다. 그러나 슬레이브 조작기는 제어입력의 포화로 인하여 위치추종 특성이 나쁘고, 물체에 접촉한 후에도 불안정하게 진동함을 볼 수 있다. 따라서 제어입력의 포화에 대한 보상이 없는 그림 2의 컴플라이언스 제어루트가 슬레이브 조작기에 유연성을 부가할 수 없음을 알 수 있다.

그림 5는 제한한 힘반영 유연성 제어구조에 대하여 실험한 결과이다. 슬레이브 조작기는 제어입력이 포화된 상태에서 5.75초에 물체에 접촉하였고, 조작자가 접촉에 의해 반영되는 힘을 감지한 후 6.15초에 마스터 조작기를 역방향으로 이동시켰다. 이 때, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 제어입력이 포화된 경우에 적분 되탈림 현상이 보상되며 슬레이브 조작기가 기준위치를 추종함을 그림 5에서 볼 수 있다. 또한, 슬레이브 조작기가 물체에 접촉할 때에 접촉력이 컴플라이언스 제어루트를 통하여 제한되어 위치입력을 감소시켜 제어입력이 역방향으로 포화되었으나, 적분 되탈림 현상 보상구조의 제어기와 포화량의 힘반영에 의해 포화로부터 빨리 벗어나기 때문에 컴플라이언스 제어루트가 형성되고 유연한 힘제어 성능을 얻을 수 있음을 볼 수 있다.



(a) 각위치 (b) 접촉힘

그림 5. 제어입력의 포화를 보상한 경우의 응답

그림 6은 슬레이브 조작기의 접촉력에 대한 위치 변화량을 나타낸다. 그림 6에서 K_{cc} 가 클수록 접촉력에 대한 슬레이브 조작기의 위치 변화량이 증가하고, 위치 변화량은 접촉력에 대하여 선형적으로 변화함을 볼 수 있다.

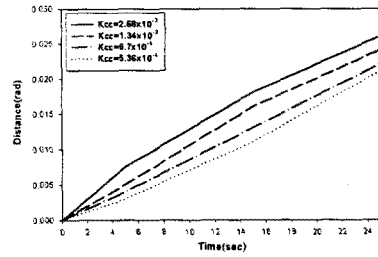


그림 6. 슬레이브 조작기의 접촉력에 대한 위치 변화량

5. 결론

본 논문에서는 고감속비를 갖는 고하중 원격조작기에 대하여 추종성능을 향상시키고, 접촉시에 유연성을 가지게 하여 조작자가 안정적인 작업을 할 수 있도록 하는 힘반영 유연성 제어기법을 제안하였다. 제안한 기법을 동력 조작기에 적용하여 실험한 결과, 안정한 힘반영 특성과 함께 유연한 힘제어 특성을 얻을 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 힘반영 제어기법을 원자력 시설의 해체, 이송 등의 작업이나 방사선물질의 원격취급을 위한 고하중 조작기에 적용함으로써 정교한 작업을 안정하게 할 수 있다는 장점이 있다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 과학기술부의 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [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 et. al., "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 분할 제어", 한국과학기술원 박사학위 논문, 1995.
- [5] 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.
- [6] C. L. Phillips and H. T. Nagle, *Digital control system analysis and design*, Prentice-Hall, 1990.
- [7] 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.
- [8] 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.