2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2000.7.17-20

2축 고하중 조작기의 힘반영 위치제어

안 성 호* · 박 병 석* · 윤 지 섭* · 고 윤 세** · 이 상 정***
*한국원자력연구소 · **공주대학교 · ***충남대학교

Force Reflecting Position Control for 2 Axes Heavy-Duty Power Manipulators

Sung-Ho Ahn* · Byung-Suk Park* · Ji-Sup Yoon* · Youn-Se Koh** · Sang-Jeong Lee***
*Korea Atomic Energy Research Institute · **Kongju National Univ. · ***Chungnam National Univ.

Abstract - Since the heavy-duty power manipulator has high ratio gear reducers at its joints, its dynamic characteristics are 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 telemanipulator systems. This paper proposes a force reflecting position control scheme for 2 axes heavy-duty power manipulator which compensates control input saturation. A series of experiments is shown to give an excellent tracking performance regardless of saturation.

1. 서 론

원격조작 시스템에서 큰 취급 가반하중을 얻기 위하여 고하중 조작기가 슬레이브 조작기로 사용된다. 예를 들어 원자력 시설물의 해체, 이송 등의 작업에는 취급 가반하중이 큰 고감속비의 관절을 갖는 고하중 원격조작기가 사용된다. 고하중 조작기는 제어입력의 포화를 빈번히 발생하기 때문에 슬레이브 조작기의 위치추종 성능과 시스템의 안정도가 나빠지는 등의 적분 되말림(windup) 현상이 발생된다. 특히, 고하중의 슬레이브 조작기가 고감속비의 다축 관절을 가질 경우에는 슬레이브 조작기가 마스터 조작기에 대한 위치추종 특성이 나쁘기 때문에 위치변화가 빈번한 작업에 적용하기 어렵다. 따라서, 고하중 조작기에 대하여 제어입력의 포화를 보상한 제어기법이 필요하다. 한편, 원격조작 힘반영 제어(force reflecting control) 시스템은 조작자가 작업현황을 직접 감시하면서 마스터 조작기를 이용하여 슬레이브 조작기를 원격으로 조작하며, 마스터 조작기를 조작하는 조작자에게 슬레이브 조작기의 작업상황이 힘반영되도록 하는 시스템으로 극한환경에서의 원격작업에 널리 이용되고 있다.

본 논문에서는 고감속비의 관절로 구성되는 2축의 슬레이브 조작기를 2축의 마스터 조작기와 연계시켜 슬레이브 조작기가 정교한 위치추종 특성을 가지도록 하는 힘반영 제어기법을 제안한다. 본 논문에서 제안한 제어기법은 적분 되말림 현상을 보상하는 구조로 슬레이브 조작기의 제어기를 설계하고, 또한 제어입력의 포화량을 힘으로 변환하여 조작자에게 힘반영시켜 마스터 조작기를 천천히 움직이도록 함으로써, 시변(time varying)인 마스터 조작기의 끝단 위치에 대한 슬레이브 조작기의 위치추종 성능을 향상시키는 것이다. 2절에서는 2축 고하중 조작기의 제어문제를 설정하고, 3절에서는 2축 고하중 조작기의 위치제어를 위한 힘반영 제어기법을 제안하고, 이를 적용하여 실험한 결과를 살펴본다.

2. 문제설정

슬레이브 조작기가 고감속비의 관절을 가짐으로 인해 제어입력의 포화를 가지는 경우의 마스터 슬레이브 원격조작 시스템의 모델을 그림 1에 보였다. 그림 1에서, θ_m은 마스터 조작기의 각위치이고, θ_r은 기준 각위치이고, θ_s는 슬레이브 조작기의 각위치이다. (x_m, y_m)은 마스터 조작기 끝단의 위치이고, (x_s, y_s)는 슬레이브 조작기 끝단의 위치이다. u는 슬레이브 조작기의 제어기에 의해 계산된 제어입력이고, $\tilde{u}$는 슬레이브 조작기의 실제 제어입력이다. $C(s)$는 슬레이브 조작기의 제어기이고, $P(s)$는 제어입력에 대한 슬레이브 조작기의 각위치 출력의 전달함수이다.

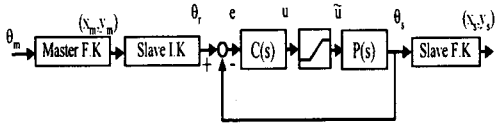


그림 1. 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 가지는 원격조작 시스템의 블록선도

그림 1에서, $P(s)$는 슬레이브 조작기의 각 축에 따라 $P_1(s)$와 $P_2(s)$로 나누어지며,

$$P_i(s)=\frac{K_{si}}{s(\tau_{si}s+1)},\quad i=1,2 \tag{1}$$

으로 주어진다[2]. 여기서 K_{si}는 슬레이브 조작기 각 축의 이득상수이고 τ_{si}는 각 축의 시정수이다. 슬레이브 조작기 제1축에 대하여 K_{s1}은 0.07 *rad/Volt* 이고 τ_{s1}은 0.15이며, 제2축에 대하여 K_{s2}는 0.011 *rad/Volt*이고 τ_{s2}는 0.25이다. 또한 그림 1에서 슬레이브 조작기의 각 축에 대한 제어기 출력 $u(t)$에 대하여 실제 제어입력 $\tilde{u}(t)$는 다음과 같은 포화특성을 갖는다.

$$\tilde{u}_1(t)=\begin{cases}10, & u_1(t)\geq 10\,Volt\\ u_1(t), & -10\,V\leq u_1(t)\leq 10\,Volt.\\ -10, & u_1(t)\leq -10\,Volt\end{cases} \tag{2}$$

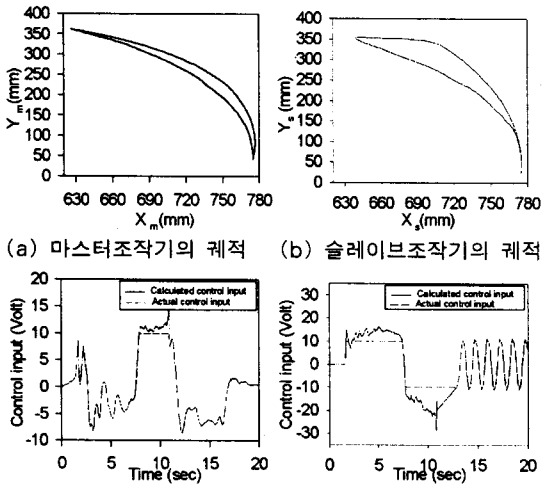
$$\tilde{u}_2(t)=\begin{cases}5, & u_2(t)\geq 5\,Volt\\ u_2(t), & -5\,V\leq u_2(t)\leq 5\,Volt.\\ -5, & u_2(t)\leq -5\,Volt\end{cases} \tag{3}$$

슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되면 적분 되말림 현상으로 인하여 마스터 조작기 위치에 대한 슬레이브 조작기의 위치추종 성능이 나빠지고 시스템이 불안정해질 수 있다. 슬레이브 조작기가 제어입력의 포화를 가질 때의 특성을 분석하기 위해 다음과 같은 PID 제어기를

슬레이브 조작기의 제어기로 사용하여 실험을 수행하였다.

$$C_i(s)=K_{p_i}+\frac{K_{i_i}}{s}+\frac{K_{d_i}s}{s+\gamma},\ \ i=1,2. \qquad (4)$$

PID 계수는 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않은 상태에서 슬레이브 조작기 끝단이 마스터 조작기 끝단의 위치를 추종하도록 설정하였다. 그림 2는 마스터 조작기 제1축과 제2축을 동시에 조작한 경우로서 초기위치(775mm,42mm)에서 시작하여 (626.14mm, 362.65 mm)의 위치에 도달한 후 다시 초기위치로 되돌아 온 경우의 응답이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 마스터 조작기 끝단의 위치에 대한 슬레이브 조작기 끝단의 위치는 상당히 큰 추종오차를 보이고 있다. 또한, 슬레이브 조작기 제2축의 제어입력이 불안정하게 진동하므로 인해 2축 링크(link)가 불안정하게 진동하며 슬레이브 조작기의 끝단위치가 불안정하게 진동함을 볼 수 있었다. 따라서 제어입력 포화를 가지는 슬레이브 조작기에 대하여 적분 되말림 현상을 보상하고 정교한 위치제어 특성을 얻을 수 있는 제어기법의 개발이 필요하다.



(a) 마스터조작기의 궤적 (b) 슬레이브조작기의 궤적

(c) 제1축의 제어입력 (d) 제2축의 제어입력

그림 2. 슬레이브 조작기의 제어입력 포화를 보상하지 않은 경우의 응답

3. 고하중 조작기의 힘반영 위치제어

이 절에서는 고감속비의 관절로 구성되는 2축의 슬레이브 조작기를 2축의 마스터 조작기와 연계시켜 슬레이브 조작기의 정교한 위치추종 특성을 얻을 수 있는 힘반영 제어기법을 제안한다.

3.1 제안하는 힘반영 제어구조

본 논문에서 제안한 힘반영 제어구조를 그림 3에 보였다. 그림 3에서 θ_c는 조작자에 의한 지령 각위치이고, θ_f는 힘반영에 의해 마스터 조작기를 변화시킨 각위치이다. $H(s)$는 조작자에게 반영되는 힘에 대한 마스터의 각위치에 대한 전달함수이고, K_{fs}는 제어입력 포화시 포화량에 대한 힘반영비이다. 슬레이브 조작기의 제어기는 2단계 설계기법으로 설계된다. 첫 번째 단계에서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않은 상태에서 슬레이브 조작기가 마스터 조작기 끝단의 위치를 추종하도록 식 (4)의 $C_i(s)$를 설계하고, biproper하고 최소위상(minimum phase)이 되도록 한다. 두 번째 단계에서는 적분 되말림 현상을 보상하도록 $C_i(s)$를 그림 3과 같은 구조로 하여 다음과 같이 설계한다.

(i) $C_{a_i}(s)$는 biproper하고 최소위상이며 안정하다.

(ii) $C_{b_i}(s)=C_{a_i}(s)C_i^{-1}(s)-1,\ \ i=1,2.$ (5)

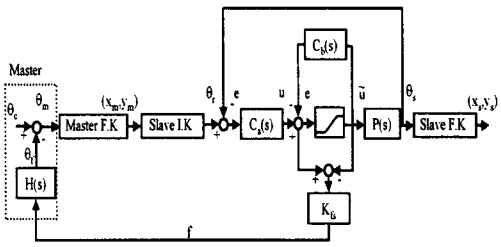


그림 3. 제안한 힘반영 위치제어 구조

그림 3에서 슬레이브 조작기의 제어입력이 포화되지 않으면,

$$\tilde{u}_i(s)=u_i(s),\ \ i=1,2 \qquad (6)$$

가 되고, 식 (5)에 의하여

$$u_i(s)=\frac{C_{a_i}(s)}{1+C_{b_i}(s)}e_i(s)=C_i(s)e_i(s),\ \ i=1,2 \qquad (7)$$

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

$$u_i(s)=C_{a_i}(s)e_i(s)-\{C_{a_i}(s)C_i^{-1}(s)-1\}\tilde{u}_i(s),\ \ i=1,2 \qquad (8)$$

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

$$f_i(s)=K_{fs_i}\{u_i(s)-\tilde{u}_i(s)\},\ \ i=1,2 \qquad (9)$$

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, 마스터 조작기에 대한 위치추종 성능을 향상시키는 구조이다.

3.2 기구학 및 역기구학

슬레이브 조작기 끝단의 위치가 마스터 조작기 끝단의 위치를 추종하도록 하기 위하여 슬레이브 조작기의 위치는 마스터 조작기의 위치와 1:1 로 매핑(mapping)되도록, 위치 보정 계수(scaling factor)를 1로 하였다. 마스터 조작기의 끝단위치는 다음과 같이 주어진다.

$$x_m = L_{m1} C_{m1} + L_{m2} C_{m12} - H_{m2} S_{m1}, \quad (10)$$
$$y_m = L_{m1} S_{m1} + L_{m2} S_{m12} + H_{m2} C_{m1}. \quad (11)$$

여기서, $C_{m1} = \cos(\theta_{m1})$, $C_{m12} = \cos(\theta_{m1} + \theta_{m2})$, $S_{m1} = \sin(\theta_{m1})$, $S_{m12} = \sin(\theta_{m1} + \theta_{m2})$이고, L_{m1}과 L_{m2}는 마스터 조작기 제1축과 제2축의 링크 길이이며, H_{m2}는 마스터 조작기의 제1축에 대한 제2축의 y방향으로의 길이이다.

슬레이브 조작기의 끝단의 위치가 마스터 조작기의 끝단의 위치를 추종하도록 하기 위하여 식 (10)과 (11)을 슬레이브 조작기의 끝단의 위치로 설정하고 슬레이브 조작기의 각 관절에 대한 각위치를 구하면 다음과 같다[4].

$$K = \sqrt{x_m^2 + y_m^2}, \quad (12)$$
$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{y_m}{x_m}\right), \quad (13)$$
$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{(K^2 + L_{s1}^2 - L_{s2}^2)}{2KL_{s1}}\right). \quad (14)$$

여기서, L_{s1}과 L_{s2}는 슬레이브 조작기 제1축과 제2축의 링크(link) 길이이다. 이 때, 기준 각위치는

$$\theta_{r1} = \alpha - \beta, \quad (15)$$
$$\theta_{r2} = \pi - \cos^{-1}\left(\frac{L_{s1}^2 + L_{s2}^2 - K^2}{2L_{s1}L_{s2}}\right) \quad (16)$$

로 구해진다. 식 (12), (13) 및 (14)를 식(15), (16)에 대입하면

$$\theta_{r1} = \tan^{-1}\left(\frac{y_m}{x_m}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{(K^2 + L_{s1}^2 - L_{s2}^2)}{2KL_{s1}}\right), \quad (17)$$
$$\theta_{r2} = \pi - \cos^{-1}\left(\frac{L_{s1}^2 + L_{s2}^2 - K^2}{2L_{s1}L_{s2}}\right) \quad (18)$$

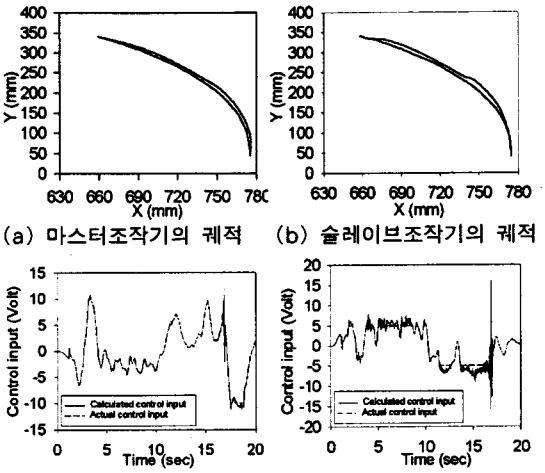
이 되고, 슬레이브 조작기의 끝단의 위치는 다음과 같이 구해진다.

$$x_s = L_{s1} C_{s1} + L_{s2} C_{s12}, \quad (19)$$
$$y_s = L_{s1} S_{s1} + L_{s2} S_{s12}. \quad (20)$$

여기서, $C_{s1} = \cos(\theta_{s1})$, $C_{s12} = \cos(\theta_{s1} + \theta_{s2})$, $S_{s1} = \sin(\theta_{s1})$, $S_{s12} = \sin(\theta_{s1} + \theta_{s2})$ 이다.

3.3 적용실험

그림 3의 구조를 가지는 제안한 힘반영 제어기법을 동력조작기에 적용하여 실험을 수행하여 그림 4와 같은 응답을 얻었다. 그림 4는 마스터 조작기 제1축과 제2축을 동시에 조작한 경우로서, 초기위치(775mm,42mm)에서 시작하여 (659.29mm, 340.447mm)의 위치에 도달한 후 다시 초기 위치로 되돌아 온 경우의 응답이다. 여기서, 슬레이브 조작기의 제어입력의 포화시에 포화량은 작게 유지되고, 슬레이브 조작기는 제어입력의 포화에 관계없이 마스터 조작기의 위치를 잘 추종함을 볼 수 있다.



(a) 마스터조작기의 궤적 (b) 슬레이브조작기의 궤적

(c) 제1축의 제어입력 (d) 제2축의 제어입력

그림 4. 제안한 힘반영 위치제어기법에 대한 응답

4. 결 론

본 논문에서는 제어입력 포화를 가지는 2축 고하중 조작기에 대한 힘반영 위치제어기법을 제안하였다. 제어입력 포화를 가지는 동력 조작기를 슬레이브 조작기로 사용한 제어시스템에 대해 본 논문에서 제안한 기법으로 2축의 고하중 조작기에 대한 힘반영 제어시스템을 구성하고 실험한 결과, 우수한 위치제어 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다. 제안한 힘반영 제어기법을 고감속비의 관절을 가짐으로 인해 제어입력 포화를 발생하는 슬레이브 조작기에 적용할 경우에 안정하고 정교한 위치제어 특성을 얻을 수 있다. 특히 원자력 시설의 해체, 이송 등의 작업이나 방사선물질의 원격취급을 위한 조작기에 적용하면 안정한 제어시스템으로 정교한 작업을 안전하게 수행할 수 있다는 장점이 있다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 과학기술부의 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[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] C. L. Phillips and H. T. Nagle, *Digital control system analysis and design*, Prentice-Hall, 1990.

[3] 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.

[4] L. Scavicco and B. Siciliano, *Modeling and control of robot manipulators*, McGraw-Hill, 1996

[5] 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.