

고하중 매니플레이터의 양방향 제어 알고리즘

안 성 호 · 박 병 석 · 김 성 현 · 이 종 열 · 윤 지 섭

Bilateral Control Algorithm for Heavy-Duty Power Manipulators

Sung-Ho Ahn · Byung-Suk Park · Sung-Hyun Kim · Jong-Youl Lee · Ji-Sup Yoon
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - When a heavy-duty power manipulator with high reduction ratio joints is used as telemanipulator in teleoperated systems, its control inputs are frequently saturated resulting in deteriorated stability and poor position tracking performance. This paper proposes a bilateral control algorithm for 3-DOF heavy-duty power manipulators, which compensates for saturation. The proposed bilateral control algorithm provides precise position control performance regardless of saturation.

1. 서 론

원격조작 시스템(teleoperated system)은 조작자가 마스터 매니플레이터를 조작함으로써 원격 환경 내에 있는 원격 매니플레이터를 조종하여 원격작업을 수행하는 마스터 슬레이브 매니플레이터(master slave manipulator) 시스템이다. 일반적으로 고감도의 힘반영 기능을 구현하는데는 저감속비의 관절구조를 갖는 원격 매니플레이터가 적합하지만, 저감속비의 관절구조로는 큰 취급하중을 얻기 어렵다. 예를 들어, 원자력 시설물의 해체, 이송 등의 작업에는 취급하중이 큰 고감속비의 관절구조를 갖는 고하중 원격 매니플레이터가 사용된다. 그러나 고하중 원격 매니플레이터는 제어입력의 포화를 빈번히 발생하기 때문에 [1], 이를 원격 매니플레이터로 사용할 경우에는 적분 되말림(windup) 현상으로 인하여 시스템의 안정도가 나쁠 뿐 아니라 위치추종 성능이 나빠지게 된다. 적분 되말림 보상(anti-windup) 기법의 연구가 활발히 진행되어 왔다 [2][3]. 이 기법들은 첫 번째 단계에서 제어입력의 포화를 고려하지 않은 상태에서 제어목적에 적합한 제어기를 설계하고, 두 번째 단계에서 적분 되말림 현상을 보상하는 2단계 설계기법에 기초하고 있다. 그러나 이러한 적분 되말림 보상기법을 제어입력 포화를 갖는 원격 매니플레이터의 양방향 제어에 적용할 경우에는 시스템의 안정도는 향상되지만, 마스터 매니플레이터를 빠르게 움직일 때에는 마스터 매니플레이터에 의해 지정되는 기준위치에 대해 원격 매니플레이터가 느린 추종성능을 가질 수 있으며, 마스터 매니플레이터의 위치와 원격 매니플레이터 말단장치의 위치 사이에 공간적인 일치감을 얻기 힘들다.

본 논문에서는 제어입력 포화를 고려한 3자유도 고하중 원격 매니플레이터의 양방향 제어 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안한 양방향 제어 알고리즘으로 고하중 원격 매니플레이터를 정교하고 안정하게 작업을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

로 사용한 매니플레이터는 하중이 큰 중량물을 취급할 수 있도록 설계된 고감속비의 관절을 갖는 7자유도의 동력 매니플레이터이며, 독일의 Hans Walischmiller사에서 개발한 것으로 천정 크레인의 텔리스코프(telescope)에 부착되어 있으며, 취급하중이 약 100 kgf로 큰 반면에 응답이 매우 느린 특성을 가진다. 마스터 매니플레이터는 의자의 오른쪽 팔걸이 부분에 6자유도를 갖는 매니플레이터를 설치하여 조작자가 편안히 앉은 상태에서 조작할 수 있는 구조이다. 마스터 매니플레이터는 각 축이 직렬 또는 string & pulley 방식으로 구동하는 구조를 가지며, 전후이동, 좌우회전 및 상하회전이 가능한 구조이다. 본 논문에서는 원격 매니플레이터 3축(3-DOF)과 마스터 매니플레이터 3축(3-DOF)을 연계하여 원격조작 양방향 제어시스템을 구성하였다. 원격조작 양방향 제어시스템에서 고감속비의 관절을 갖는 고하중 매니플레이터를 원격 매니플레이터로 사용한 경우에는 마스터 매니플레이터보다 느린 동특성으로 인하여 제어입력의 포화를 빈번히 발생한다 [1]. 그림 1은 제어입력 포화를 갖는 고하중 원격 매니플레이터의 원격조작 양방향 제어시스템 블록선도를 나타낸다.

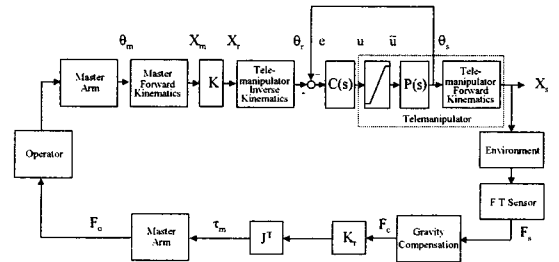


Fig. 1. 제어입력포화를 갖는 원격 매니플레이터의 양방향 제어구조.

그림 1에서 F_s 는 힘/토크 센서의 출력이고 F_o 는 원격 매니플레이터 말단장치가 물체에 접촉시의 접촉력이며, F_e 는 조작자에게 반영되는 힘이다. K 는 위치 보정계수이고 K_r 은 접촉력 제한 보정계수이며, K_s 는 제어입력 포화에 대한 힘제한 보정계수이다. J^T 는 자코비안의 전치행렬이고, u 는 원격 매니플레이터의 제어기에서 계산된 제어입력이고, \tilde{u} 는 원격 매니플레이터의 실제 제어입력이다. X_m 은 마스터 매니플레이터 손잡이의 위치이고 X_r 은 기준위치이며, X_s 는 원격 매니플레이터 말단장치의 위치이다. θ_m 은 마스터 매니플레이터 관절의 각위치이고, θ_r 은 기준 각위치이며, θ_s 는 원격 매니플레이터 관절의 각위치이다. τ_a 는 원격 매니플레이터의 제어입력 포화에 의해 발생하는 마스터 매니플레이터

2. 고하중 매니플레이터의 양방향 제어 알고리즘

2.1 양방향 제어시스템 구성

본 논문에서 양방향 제어시스템의 원격 매니플레이터

구동모터의 토크이고, τ_b 는 원격 매니퓰레이터 말단 장치의 접촉에 의해 발생하는 마스터 매니퓰레이터 구동모터의 토크이며, τ_m 은 포화 또는 접촉에 의해 발생하는 마스터 매니퓰레이터 구동모터의 토크이다. 고감속비의 관절을 가정으로 인하여 느린 동특성을 가지며 제어입력의 포화를 발생하는 3자유도 고하중 원격 매니퓰레이터를 그림 1의 점선으로 표시된 부분과 같이 모델링할 수 있다. 여기서 $P(s)$ 는

$$P(s) = \begin{bmatrix} P_1(s) & 0 & 0 \\ 0 & P_2(s) & 0 \\ 0 & 0 & P_3(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

로 주어진다. 동력 매니퓰레이터는 하모닉 드라이브(harmonic drive)와 웜(worm)으로 구성된 감속기를 갖는 비선형 특성을 가지는 시스템이지만, 제어입력 포화를 제외한 비선형 특성들은 무시하였다. $P_i(s)$, ($i=1,2,3$)는 동력 매니퓰레이터의 제어입력이 포화되지 않은 상태에서의 계단입력의 전압(V)에 대한 각위치(rad)를 나타내며, 다음과 같이 주어진다[4].

$$P_i(s) = \frac{K_{si}}{s(\tau_{si}s + 1)}, \quad i=1,2,3. \quad (2)$$

그리고 $C(s)$ 는

$$C(s) = \begin{bmatrix} C_1(s) & 0 & 0 \\ 0 & C_2(s) & 0 \\ 0 & 0 & C_3(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

로 주어진다. 또한, $\tilde{u}_i(t)$, ($i=1,2,3$)는 $u_i(t)$ 에 대하여 다음과 같은 포화특성을 갖는다.

$$\tilde{u}_i(t) = \begin{cases} u_{i\max}, & u_i(t) > u_{i\max} \\ u_i(t), & -u_{i\max} \leq u_i(t) \leq u_{i\max} \\ -u_{i\max}, & u_i(t) < -u_{i\max} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 고하중 매니퓰레이터의 양방향 제어 문제

양방향 제어시스템에서 고감속비의 관절로 인하여 원격 매니퓰레이터의 제어입력이 포화되면 적분 되달림 현상이 발생하여 시스템이 불안정해지고 기준위치에 대한 원격 매니퓰레이터의 위치추종 성능이 나빠지게 되며 안정하고 정교한 힘반영 성능을 얻기 어렵다. 제어입력 포화를 갖는 원격 매니퓰레이터의 양방향 제어시스템에 대하여 원격 매니퓰레이터의 제어를 기존에 발표된 적분 되달림 보상기법[2][3]으로 설계하면 적분 되달림 현상은 보상된다. 그러나 조작자가 원격 매니퓰레이터의 제어입력 포화를 시각에만 확인 가능하기 때문에 조작자가 제어입력의 포화를 인식하기 어려우므로 조작자가 제어입력이 포화됨과 동시에 원격 매니퓰레이터를 느리게 조작하기 힘들다. 따라서 마스터 매니퓰레이터의 위치에 대한 원격 매니퓰레이터의 추종특성이 나쁘게 된다.

2.3 제안하는 양방향 제어 알고리즘

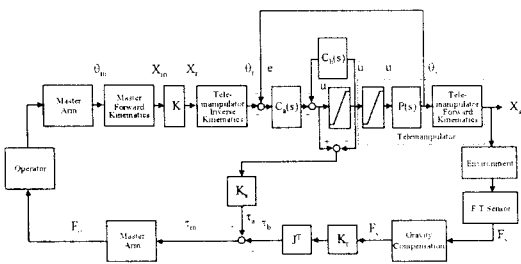


Fig. 2. 제안하는 양방향 제어구조.

그림 2는 3자유도 고하중 원격 매니퓰레이터에 대하여 포화를 보상한 양방향 제어시스템의 블록선도를 나타낸다. 원격 매니퓰레이터 각 관절의 제어기는 2단계 설계기법으로 설계한다. 첫 번째 단계에서는 $C_i(s)$ 를 다음과 같은 불안전 미분 형태의 PID 제어기로 설계한다.

$$C_i(s) = K_{pi} + \frac{K_i}{s} + \frac{K_{Ds}}{s + \gamma_i}, \quad i=1,2,3. \quad (5)$$

여기서 $\gamma_i > 0$ 이다. Biproper하고 최소위상(minimum phase)인 $C_i(s)$ 는 원격 매니퓰레이터의 제어입력이 포화되지 않은 상태에서 원격 매니퓰레이터 각 관절의 각 위치가 기준 각위치를 추종하도록 설계한다. 그리고 두 번째 단계에서는 적분 되달림 현상을 보상하기 위하여 다음을 만족하도록 설계한다. $C_{ai}(s)$, $C_{bi}(s)$, $i=1,2,3$ 을 다음과 같이 설계한다.

$$\textcircled{1} C_a(s) = \begin{bmatrix} C_{a1}(s) & 0 & 0 \\ 0 & C_{a2}(s) & 0 \\ 0 & 0 & C_{a3}(s) \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, $C_{ai}(s)$ 는 biproper하고 최소위상이며 안정하다.

$$\textcircled{2} C_b(s) = \begin{bmatrix} C_{b1}(s) & 0 & 0 \\ 0 & C_{b2}(s) & 0 \\ 0 & 0 & C_{b3}(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C_{bi}(s) = C_{ai}(s)C_i^{-1}(s) - 1. \quad (8)$$

그림 3에서 원격 매니퓰레이터의 제어입력이 포화되지 않으면

$$\tilde{u}_i(s) = u_i(s) \quad (9)$$

가 되고,

$$\frac{C_{ai}(s)}{1 + C_{bi}(s)} = C_i(s) \quad (10)$$

가 된다. 이 때, $C_i(s)$ 와 $C_{ai}(s)$ 가 biproper하고 최소 위상이며 $C_{ai}(s)$ 가 안정하면 식 (8)로 설계된 $C_{bi}(s)$ 는 proper하고 안정하다. 따라서, 식 (10)에서는 불안정한 극점과 영점의 상쇄가 발생하지 않으며, 원격 매니퓰레이터 각 관절의 제어기는 제어목적에 따라 설계된 $C_i(s)$ 와 같게 된다. 한편, 원격 매니퓰레이터의 제어입력이 포화되면

$$u_i(s) = C_{ai}(s)e_i(s) - C_{bi}(s)\tilde{u}_i(s) \quad (11)$$

가 되고, 적분 되달림 보상구조가 된다[5]. 3자유도의 마스터 매니퓰레이터와 3자유도의 원격 매니퓰레이터로 구성된 양방향 제어시스템에서는 원격 매니퓰레이터와 마스터 매니퓰레이터사이에 상호 대응되는 링크가 움직이는 방향은 항상 일치하지 않는다. 따라서 그림 2의 양방향 제어구조에서는 원격 매니퓰레이터 어느 한 관절의 제어입력이 포화될 경우에 마스터 매니퓰레이터의 각 링크가 움직이는 방향과의 반대방향으로 힘을 가하여 조작자가 마스터 매니퓰레이터를 빨리 움직이지 못하도록 한다. 즉, 원격 매니퓰레이터 각 관절에 대한 제어입력의 포화량에 의해 마스터 매니퓰레이터의 각 관절 구동모터에

$$\begin{bmatrix} \tau_{a1}(s) \\ \tau_{a2}(s) \\ \tau_{a3}(s) \end{bmatrix} = K_s \begin{bmatrix} u_1(s) - \tilde{u}_1(s) \\ u_2(s) - \tilde{u}_2(s) \\ u_3(s) - \tilde{u}_3(s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

의 토크를 발생하여 조작자에게 힘반영한다. 여기서

$$K_s = \begin{bmatrix} a_1K_{s11} & a_1K_{s12} & a_1K_{s13} \\ a_2K_{s21} & a_2K_{s22} & a_2K_{s23} \\ a_3K_{s31} & a_3K_{s32} & a_3K_{s33} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$a_j = \begin{cases} +1, & \theta_{mj} \text{가 증가할 때} \\ -1, & \theta_{mj} \text{가 감소할 때} \\ 0, & \theta_{mj} \text{가 변하지 않을 때} \end{cases}, \quad j=1,2,3 \quad (14)$$

이고, θ_{mj} ($j=1, 2, 3$)는 마스터 매니플레이터 j 번 관절의 각위치이다. 따라서, 그림 2의 양방향 제어구조는 원격 매니플레이터의 제어입력이 포화될 때에 적분 되달림 현상을 보상하면서 포화량을 힘으로 변환하여 조작자에게 반영시켜 마스터 매니플레이터의 각 링크들을 천천히 움직이게 함으로써, 기준위치와 원격 매니플레이터 말단장치 사이의 위치오차를 감소시킨다.

원격 매니플레이터의 말단장치가 외부환경과 접촉할 때의 접촉력을 마스터 측에 힘반영하기 위하여 마스터 매니플레이터 관절에서 발생해야 하는 토크는 마스터 매니플레이터에 대한 자코비안(jacobian)의 전치행렬(transpose matrix) J^T 를 구함으로써 얻어진다(6). 그림 2의 양방향 제어구조에서 원격 매니플레이터 각 관절의 제어입력이 포화되지 않은 상태에서 원격 매니플레이터의 말단장치가 물체에 접촉할 경우에는 마스터 매니플레이터의 각 관절 구동모터에

$$\begin{bmatrix} \tau_{b1}(s) \\ \tau_{b2}(s) \\ \tau_{b3}(s) \end{bmatrix} = J^T K_r \begin{bmatrix} F_{\alpha}(s) \\ F_{\sigma}(s) \\ F_{\alpha}(s) \end{bmatrix} \quad (15)$$

의 토크를 발생하여 조작자에게 힘반영한다.

한편, 원격 매니플레이터 각 관절의 제어입력이 포화된 상태에서 원격 매니플레이터의 말단장치가 외부환경과 접촉하면, 접촉력과 포화량에 의하여 마스터 매니플레이터의 각 관절 구동모터에

$$\begin{bmatrix} \tau_{m1}(s) \\ \tau_{m2}(s) \\ \tau_{m3}(s) \end{bmatrix} = K_s \begin{bmatrix} u_1(s) - \tilde{u}_1(s) \\ u_2(s) - \tilde{u}_2(s) \\ u_3(s) - \tilde{u}_3(s) \end{bmatrix} + J^T K_r \begin{bmatrix} F_{\alpha}(s) \\ F_{\sigma}(s) \\ F_{\alpha}(s) \end{bmatrix} \quad (16)$$

의 토크를 발생하여 조작자에게 힘반영한다. 결과적으로, 원격 매니플레이터 말단장치의 접촉력에 대한 힘반영 뿐만 아니라 제어입력 포화에 대한 힘반영에 의하여 조작자는 마스터 매니플레이터를 천천히 움직이게 되고, 마스터 매니플레이터의 위치에 의해 지정되는 기준위치에 대한 원격 매니플레이터 말단장치의 위치추종성능은 향상된다.

3. 실험결과

그림 3은 3자유도 원격 매니플레이터에 대하여 포화를 보상하지 않은 그림 1의 구조로 원격조작 양방향 제어시스템을 구성한 경우의 응답을 나타낸다. 조작자는 마스터 매니플레이터를 (935.0mm, 0.0mm, 0.0mm)에서 출발하여 (916.8mm, -62.8mm, -12.4mm)를 경유하고 (912.3mm, -141.2mm, 25.7mm)에 도착하도록 조작하였다. 이 때, 원격 매니플레이터는 (935.0mm, 0mm, 0mm)에서 출발하여 (920.2mm, -49.7mm, -107.9mm)에서 물체에 접촉하고 불안정하게 진동하다가 마지막 도착위치 (912.2mm, -141.5mm, 26.5mm)에 도착함을 그림 3에서 볼 수 있다.

그림 4는 제어입력의 포화를 보상한 그림 3의 구조로 원격조작 양방향 제어시스템을 구성한 경우의 응답을 나타낸다. 조작자는 마스터 매니플레이터를 (935.0mm, 0.0mm, 0.0mm)에서 출발하여 (919.5mm, -48.1mm, -109.1mm)를 경유하고 (910.0mm, -49.5mm, -15.5mm)에 도착하도록 조작하였다. 이 때, 원격 매니플레이터의 말단장치는 (935.0mm, 0.0mm, 0.0mm)에서 출발하여 (921.7mm, -37.5mm, -102.1mm)에서 물체에 접촉하고 마지막 위치 (909.7mm, -150.9mm, -14.3mm)에 도착함을 볼 수 있다. 그림 4에서 원격 매니플레이터의 말단장치가 물체에 접촉하는 것과 관계없이 제어입력의 포화로 인한 적분 되달림 현상은 보상되며, 원격 매니플레이터의 말단장치 위치는 마스터 매니플레이터 손잡이의 위치에 대하여 우수한 추종성능을 가짐을 볼 수 있다. 결과적으로, 본 논문에서 제안한 양방향 제어 알고리즘으로 고감속비의 관절을 갖

는 원격 매니플레이터를 정교하게 제어할 수 있음을 알 수 있다.

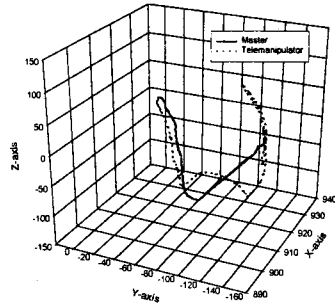


그림 3. 제어입력을 보상하지 않은 경우의 위치추종 응답.

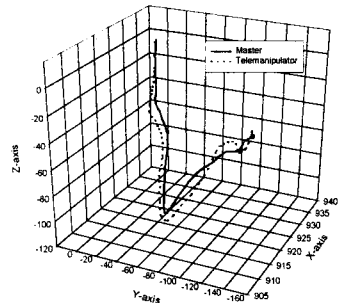


그림 4. 제안한 알고리즘에 대한 위치추종응답.

4. 결 론

본 논문에서는 고감속비의 관절을 갖는 3자유도의 원격 매니플레이터에 대하여 제어입력 포화를 보상한 양방향 제어 알고리즘을 제안하였다. 실험을 통하여 제안한 알고리즘으로 원격 매니플레이터의 정교한 위치추종성능이 얻어짐을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘을 가반하중이 큰 고하중 원격 매니플레이터의 양방향 제어에 적용함으로써 정교하고 안정하게 작업을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 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] 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.
- [3] 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.
- [4] C. L. Phillips, H. T. Nagle, *Digital control system analysis and design*, Prentice-Hall, 1990.
- [5] 안성호, 윤지섭, 이상정, "제어입력 포화를 가지는 원격조작기의 힘반영 제어", 대한전기학회 논문지, 제49권, D편, 제10호, pp. 572-581, 2000.
- [6] P. McKerrow, *Introduction to robotics*, Addison-Wesley, 1986.