

'99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원격조작기의 토크포화 보상 힘반영 제어

Force Reflecting Control with Torque Saturation Compensation for Telemanipulators

안성호, 윤지섭

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

이상정

충남대학교
대전광역시 유성구 궁동 220

요약

슬레이브 조작기가 고 감속비의 드라이브를 가짐으로 인해 토크포화를 가지는 힘 기준형 마스터 슬레이브 힘반영 제어시스템에 대하여 토크포화를 보상한 힘반영 제어기법을 제안하였다. 제안한 힘반영 제어기법은 토크포화를 보상하는 것 뿐 만 아니라 마스터 위치에 대한 슬레이브 위치의 추종성을 보증하고 페루프 시스템의 내부 안정도를 만족한다. 제안한 힘반영 제어기법은 극한 환경 하에서 가반 중량이 큰 원격조작기를 정교하게 힘반영 제어하는데 적용될 수 있다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 기법의 우수성을 확인하였다.

Abstract

A force reflecting control method with torque saturation compensation is proposed for master slave force reflecting control systems which the slave manipulator has a torque saturation due to high reduction rate driver. The proposed force reflecting control method guarantees that the slave manipulator tracks the master position and the internal stability of the closed loop is satisfied. The proposed force reflecting control method enables the teleoperated manipulator treating heavy weight materials to be elaborately controlled maintaining force reflecting. The excellence of the proposed method is confirmed with a simulation.

1. 서론

극한환경에서 정교한 작업을 수행하기 위하여 마스터(master) 슬레이브(slave) 힘반영 원격조작시스템이 널리 도입되고 있다[1]. 마스터 슬레이브 힘반영 원격조작시스템은 조작자가 작업현황을 직접 감시하면서 마스터를 조작하여 원거리의 슬레이브 조작기(manipulator)를 원격으로 조작하는 시스템이다. 일반적으로 고감도의 힘반영 기능을 구현하기 위해서는 슬레이브 로봇이 저감속비의 관절구조를 갖게 한다. 그러나 저감속비의 관절로는 높은 취급 기반 하중을 얻기 어렵기 때문에 고 하중 작업에 적합하지 않다. 예를 들어 원자력 시설의 해체에서는 여러 시설물의 절단 등의 작업을 수행하므로 취급 가반 중량이 큰 고 감속비의 원격조작기가 필요하다. 높은 취급 기반 하중을 얻기 위해 슬레이브 조작기다 고 감속비의 드라이브를 가질 때, 조작자가 마스터를 빨리 움직이면 감속으로 인하여 슬레이브가 토크(torque) 제한치에 도달하게 되어 슬레이브는 마스터를 빨리 추종할 수 없게 된다. 따라서 고 감속비의 드라이브를 가지는 슬레이브 조작기를 정교한 작업에 적용하기 위하여 힘반영 원격조작의 도입이 절실히 요구된다.

마스터 슬레이브 힘반영 제어기법은 위치 기준형 힘반영 기법과 힘 기준형 힘반영 기법으로 크게 나눌 수 있다[2][3][4]. 위치 기준형 힘반영 기법은 마스터와 이를 추종하는 슬레이브의 상대 위치 오차를 궤환시켜 마스터를 움직이는 조작자의 손에 역힘이 가해지도록 하여 마스터를 천천히 움직이게 하고, 슬레이브는 실제의 마스터 위치를 추종하는 기법이다. 이 기법은 슬레이브가 자유구동을 할 경우나 주변환경과 접촉할 경우에 모두 비교적 안정적이지만 마스터와 슬레이브의 위치 추종 오차가 존재하는 모든 경우에 마스터 측에 힘반영이 이루어지므로 실제로 조작자가 마스터 조작기를 조작하는 데에 과도한 힘이 요구되는 단점이 있고, 또한 접촉동작 시 민감한 힘반영이 이루어지지 않는다.

힘 기준형 힘반영 제어기법은 슬레이브가 물체에 충돌하는 즉시 외력을 측정하여 마스터를 움직이는 조작자의 손에 역힘이 가해지도록 하는 기법이다. 이 기법은 슬레이브가 물체에 충돌하기 전에는 슬레이브가 조작자의 지령(command) 위치를 추종하게 되므로 조작자는 슬레이브의 위치 서보에 영향을 받지 않기 때문에 힘들지 않게 입력장치를 구동할 수 있으나, 슬레이브의 마스터 위치 추종 성능이 부드러워지 못한 단점이 있다. 또한 이 기법에서 힘반영비가 커지면 시스템이 불안정해지고, 시간 지연에 대해 민감하다.

제어기의 출력신호와 플랜트(plant)의 실제 입력신호 사이에 포화가 발생할 때 큰 오버슈터(overshoot)와 오랜 정상상태 도달시간(large settling time) 등의 windup 현상을 일으킨다. 이 현상은 시스템의 성능을 나빠지게 할 뿐 만 아니라, 궤환 루프(feedback loop)가 끊어지기 때문에 전체 시스템의 안정도를 해치게 되어 실제 플랜트 제어 시에 매우 심각한 문제로 대두 될 수 있으며, 이를 방지하는 anti-windup에 관한 연구가 많이 연구되어 왔다[5][6][7].

본 논문에서는 힘 기준형 마스터 슬레이브 힘반영 제어시스템에서 슬레이브 조작기가 고 감속비의 드라이브를 가지는 경우에 대하여 토크포화를 보상한 힘반영 제어기법을 제안하고자 한다.

앞으로 2절에서는 본 논문에서 적용한 힘 기준형 마스터 슬레이브 힘반영 제어시스템의 모델링과 제어문제를 살펴보고, 3절에서는 슬레이브 토크 포화를 보상한 힘반영 제어기법을 제안한다.

4절에서는 시뮬레이션을 통하여 제안한 제어기법의 성능을 살펴보고, 마지막으로 5절에서는 결론을 맺는다.

2 마스터 슬레이브 힘 반영 제어 시스템

2.1 원격조작 힘 반영 제어시스템 구성

힘반영 제어 알고리즘을 개발하기 위하여 그림 1과 같은 원격조작 힘반영 제어 시스템을 구성하였다. 원격조작 힘반영 제어 시스템은 운전원이 조작하는 마스터부와 마스터의 위치를 추종하는 슬레이브부 그리고 제어용 컴퓨터, 다축제어기, 구동모터, 드라이버, 및 힘 측정 센서로 구성된다.

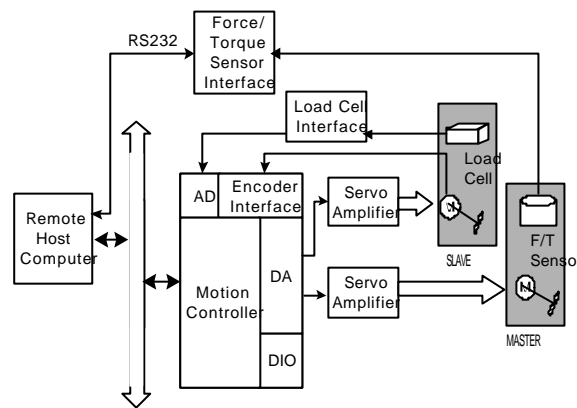


그림 1. 원격조작 힘반영 제어시스템 구성

마스터부와 슬레이브부에는 서포트(support) 위에 길이 방향으로 브라켓(bracket)이 설치되어 있다. 각 서포트 테이블의 양단에는 플라이 휠(fly wheel)이 나란히 설치되어 있으며, 이 중 한 개의 회전축에는 모터가 직렬로 연결되어 있고 대응되는 플라이 휠과 string-pulley 방식으로 연결된다. 두 플라이 휠 사이를 연결하는 강철선의 중간부분은 센서브라켓에 고정되어 플라이 휠이 회전운동을 직선운동으로 변환시켜 준다. 마스터부에 설치된 브라켓은 조작자에 의해 구동되고 직선운동을 하고, 슬레이브부에 설치된 브라켓은 슬레이브 모터의 회전운동에 따라 마스터 브라켓의 위치를 추종한다. 마스터부와 슬레이브부 양측 모두 모터 축에 풀리(pulley)로 연결되어 있고, 풀리의 원주에 강선을 감아 고정시켰으며, 강선의 중간부분을 선형베어링에 올려진 대차에 고정하여 모터의 회전운동을 대차의 직선 운동으로 바꾼다. 슬레이브 측의 대차에는 로드셀(load cell)을 설치하여 외부 물체와 접촉할 경우 발생하는 힘을 측정할 수 있다. 또한 슬레이브 모터축은 100:1의 감속비를 가진 하모닉 드라이브에 직결되어 있으며, 마스터 모터는 감속기가 연결되어 있지 않다.

2.2 힘 기준형 힘반영 제어시스템의 모델링

그림 2는 힘 기준형 힘반영 제어시스템의 모델링을 나타낸다. 힘 기준형 힘반영 제어에서는 슬레이브가 마스터의 위치를 추종하다가 슬레이브가 물체에 접촉할 때 역힘을 마스터로 반환시켜 마스터를 움직이는 조작자의 손에 힘반영시킨다.

그림 2에서 x_c, x_m, x_r 은 각각 위치 지령입력, 실제 마스터 위치, 슬레이브 위치이고, x_r 은 조작자의 손의 힘반영을 거쳐 역힘에 의해 마스터를 역구동시키는 환산된 위치이다. p_m, p_r 는 마스터 및 슬레이브의 위치에 대한 펄스(pulse) 신호들이다. $C(z)$ 는 슬레이브 제어기이고, K_f 은 힘반영비이다. 또한 K 는 거리에 대한 펄스의 비이다. K_{ms} 는 슬레이브가 물체에 충돌할 때 슬레이브와 환경사이의 탄성계수이다. $P(s)$ 는 슬레이브 모터와 하모닉 드라이브를 포함한 슬레이브의 전달함수이다. $H(s)$ 는 마스터를 쥐고 있는 인간 손의 전달함수이다.

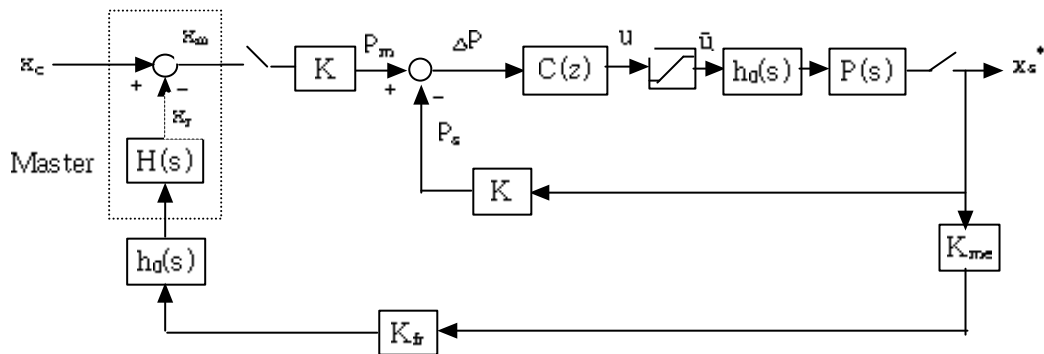


그림. 2 힘 기준형 힘반영 제어시스템

2.3 토크 포화를 가지는 슬레이브 시스템의 힘반영 제어시스템의 특성

그림 2의 힘 기준형 마스터 슬레이브 힘반영 제어시스템을 구성하여 시뮬레이션(simulation)하여 그 특성을 살펴보았다. 디지털 제어기의 샘플링 주기는 50msec 로 하였다.

슬레이브가 물체에 충돌하지 않고 자유운동을 할 경우, 위치 지령입력 $x_c(s)$, 마스터 위치 $x_m(s)$ 및 슬레이브의 위치 $x_r(s)$ 가 그림 3에 나타나있다. 또한 슬레이브 제어기의 출력신호와 포화된 슬레이브 제어신호의 특성이 그림 4에 나타나있다. 그림 3에서 힘 기준형 힘반영 제어시스템에서는 슬레이브가 물체에 충돌하지 않고 자유운동을 할 때는 마스터의 위치 지령입력 $x_c(s)$ 가 마스터의 위치 $x_m(s)$ 와 같음을 볼 수 있다. 그림 3, 4에서 슬레이브의 토크포화로 인하여 마스터의 위치에 대한 슬레이브의 위치오차는 상당히 크다는 것을 볼 수 있다.

슬레이브가 자유운동을 하다가 1초에 물체에 접촉하여 조작자가 역힘을 느껴서 1.1초에서 1.5초까지 반대 방향으로 마스터를 움직이다가 1.5초에 멈춘 경우, 위치 지령입력 $x_c(s)$, 실제 마스터

위치 $x_{me}(s)$ 및 슬레이브의 위치 $x_r(s)$ 가 그림 5에 나타나있다.

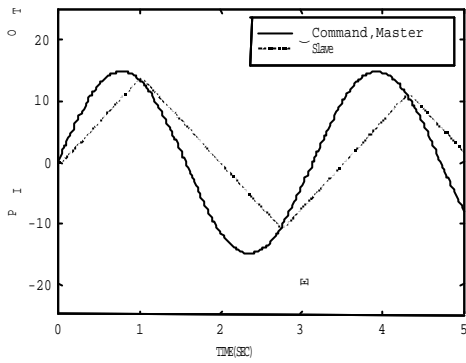


그림 3. 마스터 위치에 대한 슬레이브의 추종특성

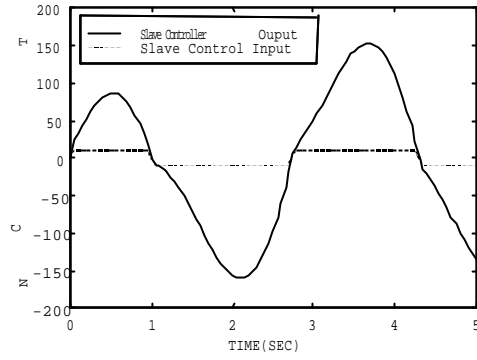


그림 4. 슬레이브 제어기의 출력신호와 포화된 슬레이브 제어입력 신호

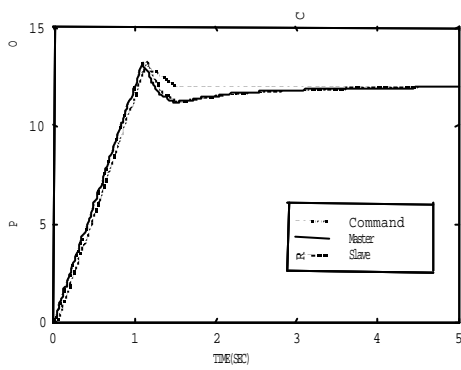


그림 5. 슬레이브가 물체에 접촉할 때의 위치추종 특성

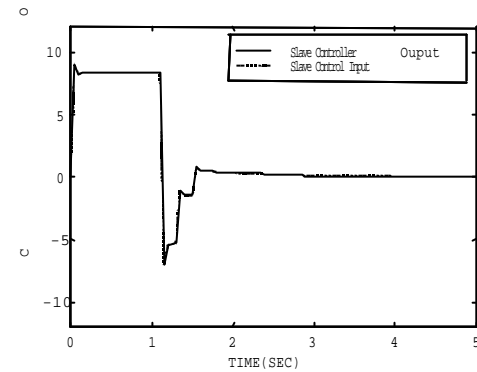


그림 6. 슬레이브가 물체에 접촉할 때의 제어신호 특성

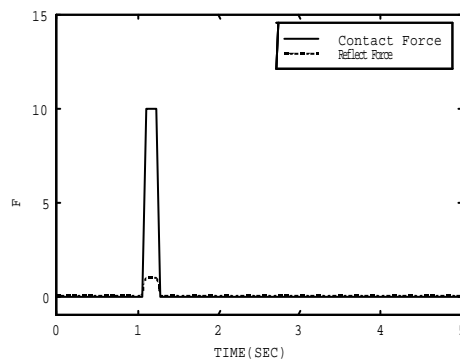


그림 7. 슬레이브가 물체에 접촉할 때의 힘반영 특성

또한 슬레이브 제어기의 출력신호와 포화된 슬레이브 제어신호의 특성이 그림 6에 나타나있고, 힘 반영 특성이 그림 7에 나타나 있다.

이상의 결과로부터, 토크포화를 가지는 슬레이브 조작기에 대한 힘반영 제어에서는 조작자가 마스터를 빨리 움직일 때 슬레이브의 토크의 포화로 인하여 마스터에 대한 슬레이브의 위치추종 특성이 나빠짐을 알 수 있다. 또한 마스터의 위치이동 방향이 바뀔 때 마스터의 이동방향과 슬레이브의 이동방향이 서로 다른 현상이 발생함을 알 수 있다. 이러한 현상을 가진 힘반영 제어시스템을 원자력 시설의 해체, 절단 등의 안전을 필요로 하는 작업이나 정교함을 요구하는 작업에 적용하는데는 문제가 있다. 따라서 슬레이브의 토크포화를 보상한 힘반영 제어기법의 개발이 요구된다.

3. 슬레이브 조작기 토크포화를 보상한 힘반영 제어

이 절에서는 앞 절에서 살펴 본 원격조작 힘 반영 제어시스템에 대하여 슬레이브 조작기의 토크포화를 보상한 힘반영 제어기법을 제안한다. 제안한 제어기법은 토크포화에 대한 보상뿐 만 아니라 슬레이브의 마스터의 위치 추종성을 보증하고, 또한 폐루프 시스템의 안정성을 보증하도록 한다.

원격조작 힘 반영 제어시스템에서 제어대상인 (1)의 슬레이브 시스템은 안정하고 strictly proper하다. 슬레이브 제어기 $C(z)$ 를 그림 8의 Internal Model Control(IMC) 구조에 기반하여 설계한다. 슬레이브 시스템의 움직임은 샘플링 주파수에 비하여 아주 느리므로 aliasing 현상은 고려하지 않는다.

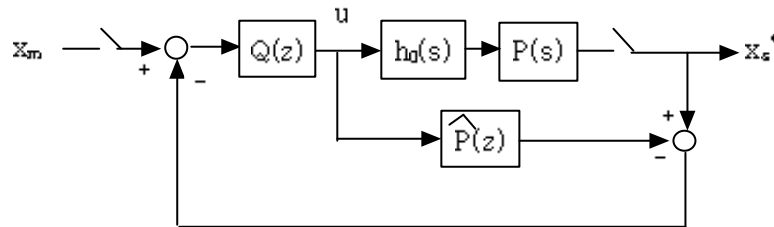


그림 8. Sampled Data IMC System

$\hat{P}(s)$ 는 $P(s)$ 의 모델이고, $P(z)$ 와 $\hat{P}(z)$ 는 각각

$$P(z) = Z[\mathcal{L}^{-1}\{h_0(s)P(s)\}] \quad (1)$$

$$\hat{P}(z) = Z[\mathcal{L}^{-1}\{h_0(s)\hat{P}(s)\}] \quad (2)$$

이다. 여기에서 $h_0(s)$ 는 zero order hold이다. 또한,

$$H(z) = Z[\mathcal{L}^{-1}\{k_0(s)H(s)\}] \quad (3)$$

이다. 그림 8에서 출력 x_s^* 는

$$x_s^* = \frac{Q(z)P(z)}{1 - Q(z)[P(z) - \hat{P}(z)]} x_m^* \quad (4)$$

로 주어진다. 제어대상 플랜트의 모델이 완전할 때, 즉 $\hat{P}(s) = P(s)$ 일 때,

$$\hat{P}(z) = P(z) \quad (5)$$

이므로, (4)는

$$x_s^* = Q(z)P(z)x_m^* \quad (6)$$

$P(z)$ 는 최소 위상(minimum phase) 시스템이므로 $Q(z)$ 를

$$Q(z) = f(z)P^{-1}(z) \quad (7)$$

로 둔다. 여기에서 $f(z)$ 는 $Q(z)$ 가 proper하고 안정하게 설정한다. 이 때, (5)는

$$x_s^* = f(z)x_m^* \quad (8)$$

가 된다. (8)에서 $f(1) = 1$ 이 되도록 설정하면, x_s^* 는 x_m^* 의 정상상태를 추종한다. 또한, $Q(z)$ 가 proper하고 안정하기 때문에 폐루프 시스템의 내부 안정도(internal stability)는 만족된다[8].

그림 8의 IMC 시스템은 그림 9의 단일 궤환 시스템으로 재구성 가능하다.

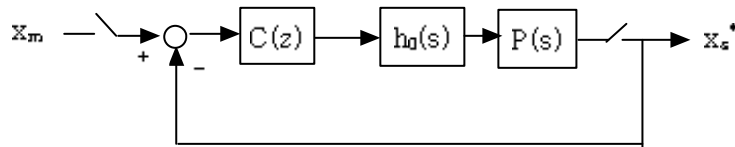


그림 9. 단일 궤환 시스템

그림 8, 9에서,

$$C(z) = \frac{Q(z)}{1 - P(z)Q(z)}, \quad (9)$$

$$Q(z) = \frac{C(z)}{1 + P(z)C(z)} \quad (10)$$

의 관계가 성립한다[8]. (7)(9)로부터

$$C(z) = \frac{f(z)}{1 - f(z)} P^{-1}(z) \quad (11)$$

가 된다.

결과적으로, $f(1) = 1$ 설정할 때 $C(z)$ 는 x_r^* 가 $f(z)$ 의 특성으로 x_{me}^* 의 정상상태를 추종하도록 보증하고, 폐루프 시스템의 내부 안정도를 만족시킨다.

슬레이브 토크포화를 보상한 힘반영 제어시스템이 그림 10에 나타나있다. 여기에서 $f(z)$ 를 biproper하고 $f(1) = 1$ 이 되도록 설정한다.

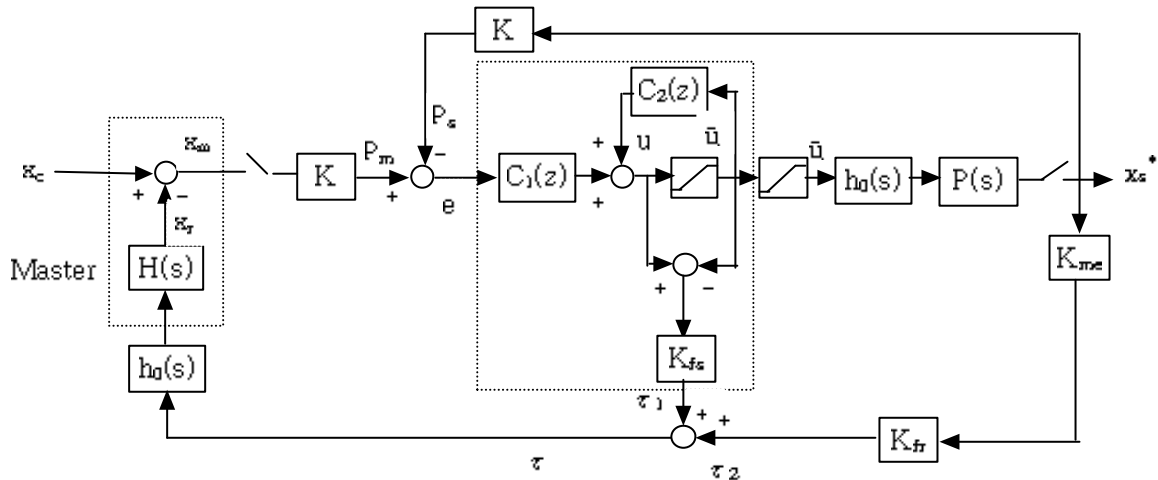


그림 10. 토크포화를 보상한 힘 기준형 힘반영 제어시스템

그림 10에서 포화현상이 발생하지 않을 때,

$$\begin{aligned} \frac{u}{e} &= \frac{\tilde{u}}{e} = \frac{C_1(z)}{1 + C_2(z)} \\ &= C(z) \end{aligned}$$

$$= \frac{f(z)}{1-f(z)} \dot{p}^{-1}(z) \quad (12)$$

로 되며, $C(z)$ 는 x_s^* 가 $f(z)$ 의 특성으로 x_m^* 의 정상상태를 추종하도록 보증한다. 또한, 포화현상이 발생했을 때,

$$u = C_1(z)e - C_2(z)\ddot{u} \quad (13)$$

$$\ddot{u} = \text{sat}(u) = \text{sat}[C_1(z)e - C_2(z)\ddot{u}] \quad (14)$$

의 특성을 가진다.

슬레이브가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 슬레이브 토크포화가 발생되지 않았을 때, $\tau_1 = \tau_2 = 0$ 이고, 마스터의 위치 x_m 은 위치 지령 입력 x_c 와 같고, 슬레이브의 위치 x_s^* 는

$$x_s^* = \frac{KC(z)P(z)}{1+KC(z)P(z)} x_m^* \quad (15)$$

로 마스터의 위치 x_m^* 을 추종한다.

슬레이브가 물체에 접촉하지 않은 상태에서 슬레이브 토크포화가 발생될 때, 조작자는

$$\tau = K_f(u - \ddot{u}) \quad (16)$$

의 역힘을 느끼고, 마스터를 역구동시키는 위치 $x_r(s)$ 는

$$x_r(s) = k_f k_0(s) H(s) [u(e^{sT}) - \ddot{u}(e^{sT})] \quad (17)$$

이고, 조작자의 지령위치 $x_c(s)$ 에 대하여 마스터의 위치 $x_m(s)$ 은

$$x_m(s) = x_c(s) - x_r(s) \quad (18)$$

이 된다. 이 때

$$u = K[C_1(z)x_m^* - x_s^*] - C_2(z)\ddot{u} \quad (19)$$

$$\ddot{u} = \text{sat}[K[C_1(z)x_m^* - x_s^*] - C_2(z)\ddot{u}] \quad (20)$$

의 특성으로 u 는 포화영역에서 벗어나고, 슬레이브 위치는

$$\dot{x}_r^* = P(z) \text{sat}[K[C_1(z)x_{ms}^* - x_r^*] - C_2(z)\dot{x}_r^*] \quad (21)$$

가 된다.

4 시뮬레이션 및 결과

이 절에서는 앞 절에서 얻어진 토크포화를 보상한 힘반영 제어기법을 시뮬레이션을 통하여 성능을 살펴본다.

그림 10의 슬레이브 토크포화를 보상한 힘 기준형 힘반영 제어시스템에 대하여, 슬레이브가 물체에 충돌하지 않고 자유운동을 할 때의 마스터의 위치 지령입력 $x_c(s)$, 실제 마스터 위치 $x_{ms}(s)$ 및 슬레이브 위치 $x_r(s)$ 가 그림 11에 나타나있다.

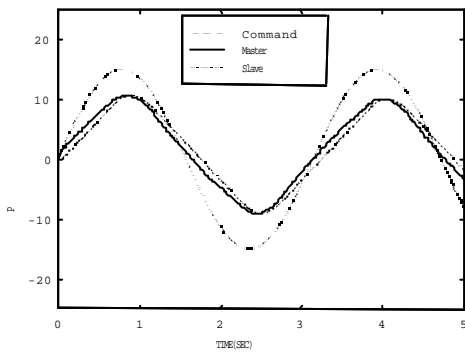


그림 11 토크포화를 보상한 경우에 대한 슬레이브의 마스터 위치 추종특성

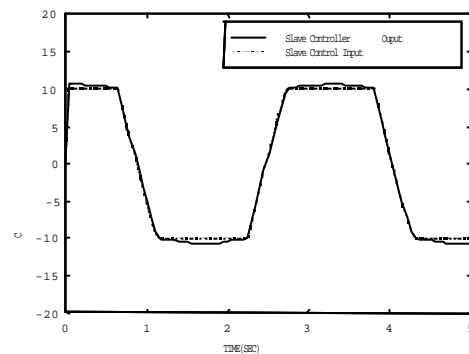


그림 12 토크포화를 보상한 경우에 대한 슬레이브 제어기 출력신호와 슬레이브 제어신호

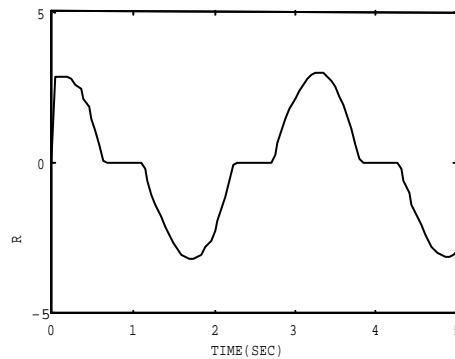


그림 13 토크포화를 보상한 경우에 대한 힘반영 특성

또한 슬레이브 제어기의 출력신호 u 와 슬레이브 제어신호 z 의 특성이 그림 12에 나타나있고, 조작자의 손에 전달되는 힘반영 특성이 그림 13에 나타나있다. 그림 11, 12, 13을 통하여 본 논문에서 제안한 힘반영 제어기법은 슬레이브 토크포화가 발생할 때 조작자의 손에 역힘을 발생시켜 마스터를 빨리 움직이지 못하도록 하고 또한 포화영역에서 빨리 빠져나오게 함으로서 상대적으로 느리게 움직이는 슬레이브의 마스터 추종특성이 향상됨을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 원자력 시설의 절단, 해체 등의 극한환경 하에서 작업에 사용되는 가반 중량이 큰 원격조작기를 정교하게 힘반영 제어하는데 사용될 수 있는 토크포화를 보상한 마스터 슬레이브 힘반영 제어기법을 제안하였다.

가반 중량이 큰 원격조작기는 고 감속비의 드라이브를 가지므로 마스터를 빨리 움직이면 슬레이브는 토크포화가 발생하여 슬레이브의 마스터 위치추종 특성이 나빠진다. 또한 마스터의 위치이동 방향이 바뀔 때 마스터의 이동방향과 슬레이브의 이동방향이 서로 다른 현상이 발생하여 정교한 작업을 원활하게 수행하는데 어려움이 있다. 일반적인 힘 기준형 힘반영 제어에서는 슬레이브가 물체에 접촉하지 않고 자유구동을 할 때에는 슬레이브의 토크포화가 발생하더라도 조작자의 손에는 힘반영 되지 않기 때문에 시스템의 불안해질 수 있고, 슬레이브의 마스터의 위치추종 성능이 나빠진다.

본 논문에서 제안한 힘반영 제어기법은 슬레이브 조작기의 토크포화 발생 시 마스터에 힘반영시켜 마스터를 빨리 움직이지 못하게 하고, 또한 포화영역에서 빨리 빠져 나오도록 함으로서 슬레이브의 마스터 위치 추종성과 시스템의 안정도를 증가시켰다. 또한 제안한 기법은 IMC 제어기법을 기반으로 설계하였기 때문에 페루프 시스템의 내부 안정도가 보장된다.

본 논문에서 제안한 제어기법을 힘 기준형 힘반영 제어시스템의 적용하여 시뮬레이션을 수행하여 제안한 제어기법의 우수성을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 힘반영 제어기법은 원격조작기를 방사선 지역 등의 극한 환경에서 절단, 해체 등의 정교한 작업에 힘반영 제어를 가능하게 한다는 장점이 있고, 또한 방사선물질의 원격취급에 있어 안정성이 향상된다는 장점이 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 박영수, 윤지섭, 이원혁, "하모닉 드라이브를 사용한 로봇 관절의 힘반영 제어기 개발," 한국정밀공학회 '98 추계 학술대회 논문집, pp. 685-688, 1998.

- [2] Raju G. J., Verghee, G. C. and Sheridan T. B., "Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation," Proc. IEEE Int. Conf Robotics and Automation, pp. 1316-1321, 1989.
- [3] Hannaford B., "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 5, no. 4, pp. 426-434, 1989.
- [4] W. S. Kim, B. Hannaford, and A. K. Bejczy, "Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay", *IEEE Trans Robotics and Automation*, vol.8, no.2, pp.176-185, 1992.
- [5] 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.
- [6] M. V. Kothare, P. J. Campo, M. Morari, C. N. Nett, "A unified framework for the study of anti-windup designs," *Automatica*, vol. 30, no. 12, pp. 1869-1883, 1994.
- [7] A. Cheng, M. V. Kothare and M. Morari, "Anti-windup design for internal model control," *Int. J. Control*, vol. 60, no. 5, pp. 1015-1024, 1994.
- [8] M. Morari and E. Zafiriou, "*Robust Process Control*," Prentice-Halls, Englewood Cliffs, 1989.