

원격조작기의 양방향 힘제어의 구현과 실험

천 자 홍 정 명 진
한국과학기술원 전기 및 전자공학과

Implementation and Experiment of Bilateral Force Control for a Telemanipulator

Ja-Hong Chun Myung-Jin Chung
Dept. of Electrical Eng.
Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

A telemanipulator that reflects grasping force of the slave gripper to the human operator was implemented in order for manipulation to be more delicate and safe. An industrial robot gripper was used as the slave manipulator. The master manipulator was constructed to make it easy for a human operator to direct the slave and to feel the reflected gripping force. Reflected force was generated by the servo-motor of the master. The force signal and position signals of the master and the slave was used to generate driving force signal. Basically position-position type control was used. Miner force feedback is added to improve the performance of the system. Implemented system was tested by colliding two fingers of the slave manipulator, and here switching was used to achive more fast and easy manipulation.

1. 서 론

일반 산업용 로봇은 단순하고 반복적인 작업에는 적용 가능 하나 주변 환경의 변화가 심하거나 작업 내용이 수시로 변화하는 경우에는 사용하기 부적당하다. 이렇게 우주 공간, 심해, 핵 발전소와 같이 인간의 인지 능력, 계획 능력, 조정 능력이 요구되며, 사람에게 위험한 작업장에서의 작업은 작업 환경으로부터 인간을 보호함과 동시에 인간의 능력을 작업 수행에 적용할 수 있는 원격 조작(Telemanipulation)을 필요로 한다.

원격 작업장에서의 작업은 대부분 단방향 제어(unilateral control)로 실행될 수 있으나, 세밀한 조작이 요구될 경우 효과적인 방법은 원격 조작기의 슬레이브 시스템이 작업물을 조작할 때 받는 힘을 조작자가 느낄수 있도록 궤환하는 양방향 힘 제어(bilateral force control)를 사용하는 것이다.

본 논문의 목적은 섬세한 작업에 적합한 원격조작기를 제작하는 것이다. 이를 위하여 매스터 조작기를 제작하고, 서보제어기(servo-controller)를 구성하여 전체 시스템을 구현하였다. 또한 힘센서를 제작하여 슬레이브 조작기의 손가락 인쪽에 부착하여 구현된 시스템의 동적 특성을 개선하였다. 마지막으로 자유 공간 이동시의 속응성을 크게 하기 위하여 공간 이동시는 단방향에서 조작시는 양방향 제어로 스위칭하였다

마지막으로 제작된 원격 조작기의 손가락 사이의 충돌에

대하여 모의 실험과 실제 실험함으로써 조작기의 안정성과 정수성을 보였다.

2. 원격 조작기의 개요

원격 조작(Telemanipulation)이란 인간의 감각 능력과 조작 능력을 원격 작업장까지 확장하는 것이라고 할 수 있다. 원격 조작기의 매스터 시스템(master system)은 청결하고 안전한 곳에 위치하고, 작업자는 매스터 시스템에 명령을 가하며 시각, 청각, 근육 운동 감각 및 촉각과 같은 정보를 궤환 받는다. 원격 조작기에서 실제로 작업물을 다루는 부분인 슬레이브 시스템(slave system)은 작업장에 위치하고 매스터 시스템의 행동을 모사하게 된다[2].

원격 조작기는 제어 방식에 따라 크게 두가지로 나눌 수 있는데 단순히 슬레이브 시스템이 매스터 시스템의 행동을 모사하는 단방향 제어(unilateral control)와 슬레이브 시스템은 매스터 시스템을, 매스터 시스템은 슬레이브 시스템을 서로 모사하는 양방향 제어(bilateral control) 방식으로 나눌 수 있다. 단방향 제어에서는 매스터 시스템에서 슬레이브 시스템으로 전달되는 신호만 존재할 뿐이고 양방향 제어에서는 슬레이브 시스템에서 매스터 시스템으로 전달되는 신호도 존재하므로 정확하고 세밀한 작업을 수행할 수 있다. 전송되는 신호는 여러가지가 될 수 있으나, 원격 조작에서 특히 중요한 신호는 시각(vision)과 힘이다[1]. 폭발물 제거, 부서지기 쉬운 물체를 다루는 경우, 어둠 속에서의 작업등은 힘의 궤환이 필요한 예이다.

양방향 힘 제어 방식에는 주로 위치-위치(position-position) 방식을 사용하는데 위치-위치 제어 방식은 매스터 조작기는 슬레이브 조작기에 의해, 슬레이브 조작기는 매스터 조작기에 의해 각각 위치 제어되는 방식이며 작업자가 느끼는 동적 특성은 작업물의 동적 특성과 원격 조작기 자체의 동적 특성의 합이며, 따라서 정확한 힘 전달이 어렵고 조작하는데 힘이든다. 이상적인 원격 조작기는 작업자가 작업물을 직접 다루는 것처럼 느껴야 하므로 매스터 조작기와 슬레이브 조작기의 연드 이펙터 간은 딱딱하고, 무게가 없고 마찰도 없는 기계적 연결로써 나타내어질 수 있다[4]. 이상적인 조작기의 에너지의 손실

은 없으며, 이런 이유로 실제 시스템에서의 성능 개선은 불안정을 가져오기 쉽다.

원격 조작기의 모델은 다음과 같다. 원격 조작기는 2.1과 같이 나타낼 수 있다. 서보-제어기는 매스터 조작기와 슬레이브 조작기로부터 위치와 힘을 입력 받고 각각의 조작기의 모터를 드라이브하기 위한 토크를 출력하여 각각의 조작기를 움직이기 위한 힘을 생성한다.

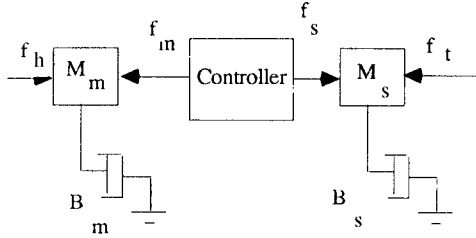


그림 2.1 원격 조작기의 모델

$$f_h = M_m \frac{d^2 x_m}{dt^2} + B_m \frac{dx_m}{dt} + u_m \quad (2.1)$$

$$f_t = u_s - \left(M_s \frac{d^2 x_s}{dt^2} + B_s \frac{dx_s}{dt} \right) \quad (2.2)$$

여기서,

f_m, f_s : 매스터와 슬레이브 조작기에 의해 작업자와 작업물에 가해지는 힘

x_m, x_s : 매스터와 슬레이브 조작기의 위치

u_m, u_s : 매스터와 슬레이브 조작기에 가해지는 제어 명령 힘

M_m, M_s : 매스터와 슬레이브 조작기의 질량

B_m, B_s : 매스터와 슬레이브 조작기의 점성 마찰 계수

f_s : 조작자의 힘

f_t : 작업물의 탄성 계수이다.

즉, 작업자에 의해서 매스터 조작기에 가해지는 힘은 매스터 조작기의 관성력과 마찰력 그리고 매스터쪽에 서보 제어기에 의해 생성된 반발력의 합과 같고, 슬레이브 조작기에서 출력되는 힘은 서보 제어기에 의해 슬레이브쪽에 가해진 힘 제어 명령에서 슬레이브 조작기의 관성력과 마찰력의 합만큼 감소된 값과 같다.

위치-위치 제어 방식의 제어는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$u_m = u_s = K \times (x_m - x_s) \quad (2.3)$$

여기서 K는 양방향 힘 제어기의 탄성 계수이며 임의로 설정할 수 있다. 즉 매스터 조작기와 슬레이브 조작기의 위치 오차에 비례하는 값을 오차를 보정하기 위한 제어 명령으로 식에 준다.

u_m 이 u_s 와 같으므로 이 식을 적용한 MSM은 그림 2.2와 같은 모델로 나타내어 질 수 있다.

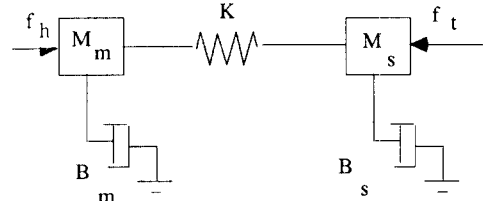


그림 2.2 양방향 위치-위치 제어

먼저 매스터 조작기의 임피던스가 슬레이브 조작기보다 아주 작으므로 매스터 조작기의 임피던스를 무시하고, 입력 임피던스를 구해보면 $K_f = 0$ 이므로, 이 경우의 정상 상태에서 입력 임피던스를 구해보면 다음과 같다.

$$Z_i \rightarrow B_s \text{ as } s \rightarrow 0 \quad (2.4)$$

즉, 조작자는 자유 운동시에도 슬레이브 조작기의 점성 마찰력을 그대로 느끼게 된다. 자유 운동시 슬레이브 조작기의 엔드 이펙터에는 실제로는 힘이 가해지지 않으므로 이상적으로는 조작자도 힘을 전혀 느끼지 않아야 한다. 따라서 위에서 구한 마찰력 성분은 힘의 오차 값이며 감소되는 것이 바람직하다.

원격 조작기의 입출력 다이내믹스를 감소시키는 방법중 하나는 힘의 궤환이다. 매스터-슬레이브 시스템의 슬레이브 조작기에 국부 힘 궤환(minor force feedback)을 하여 슬레이브 조작기에 위치 오차에 비례하는 힘을 가하도록 다음 제어 법칙을 사용 할 수 있다.

$$u_m = K \times (x_m - x_s) \quad (2.5)$$

$$u_s = K_f \times [K \times (x_m - x_s) - f_s] \quad (2.6)$$

여기서 K_f 는 힘 제어 루프 이득이다.

윗식을 적용한 매스터-슬레이브 시스템의 입력 임피던스는 다음과 같이 된다.

$$Z_i \rightarrow \frac{B_s}{1+K_f} \text{ as } s \rightarrow 0 \quad (2.7)$$

즉, 입력 임피던스가 $1/(1+K_f)$ 로 줄어들게된다. 따라서 K_f 를 증가시키수록 입력 임피던스가 감소된다. 그러나 이 값을 증가시키는 데에는 안정성을 보장하기 위한 한계치가 있다.

안정성이 중요한 경우는 물건을 잡았을 경우이다. 즉 K_f 가 영보다 클 경우이며 이때 공진(oscillation)이 생기면 작업 수행에 나쁜 영향을 미치게 된다. 입력 임피던스는 작업물을 잡지

않고 있거나, 잡기 전에 문제가 된다. 이 경우에 입력 임피던스가 크면 작업 수행이 힘이 들거나 시간이 많이 걸리게 된다. 따라서 원하는 조작기는 작업물을 잡지 않았을 경우에는 입력 임피던스가 작고 잡은 후에는 댐핑(damping)이 큰 조작기여야 한다.

입력 임피던스를 최소화할 수 있는 구조는 바로 단방향 위치 제어(unilateral control)이다. 따라서, 만약 물건과 접촉하고 있는지에 관한 판단만 정확하다면, 잡지 않고 있을 때는 단방향 제어로, 잡고 있을 때는 양방향 제어로 동작하는 것이 좋은 제어 방식일 것이다. 이런 제어를 구현하기 위한 제어 규칙을 다음에 제시한다.

3. 원격 조작기의 모델링

슬레이브 조작기는 일반 목적의 산업용 엔드 이펙터인 텔레로보틱스(telerobotics)사의 EP-100/30을 사용하였다. 이 그리퍼는 직렬 연결된 동일한 직류 모터 2개를 기어로 변속하여 토크를 증폭하며 여기에 위치 제어를 위해 광학 엔코더를 장착하고 있다. 그리퍼는 복잡한 비선형적인 구조로 되어있으나 주 관심 영역에서 거의 선형적이며 그리퍼의 손가락 안쪽면에서 느끼는 그리퍼 전체의 질량은 다음과 같이 주어진다.

$$M_s = K_{ism}^2 \times J_{motor} + K_{rsc}^2 \times J_{encoder} \quad (3.1)$$

여기서 K_{ism} : 손가락 안면과 모터 축의 회전 각도 비

K_{rsc} : 손가락 안면과 엔코더 축의 회전 각도 비

J_{motor} : 모터의 관성 모멘트

$J_{encoder}$: 엔코더의 관성 모멘트이다.

여기서 구한 질량은 61 Kg이다. 슬레이브 조작기의 점성 마찰 계수는 실험을 통하여 측정하였다.

점성 마찰 계수는 가해진 힘과 정상 상태의 속도의 비가 되므로 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$B_s = \frac{F_s}{V_s} \quad (3.2)$$

마찰 계수 값은 25 N/(mm/sec)이다.

마스터 조작기에 내장된 직류 서보 모터는 산요(Sanyo)사의 슈퍼-R(Super-R)이며, 광학 엔코더가 부착되어 있다

주어진 모터와 엔코더의 관성 모멘트를 질량으로 환산하는 식은 슬레이브의 경우와 같다. 여기서 구한 질량은 0.3 Kg이다. 점성 마찰 계수는 기계적 시상수 t_m 과 질량으로 부터 구할 수 있다.

(3.3)

구한 계수 값은 25 N/(m/sec)이다. 지금까지 슬레이브 조작기와 마스터의 조작기의 기계적 모델을 구하였다. 여기서 각각의 조작기는 질량과 마찰 계수에 의해 모델링되었다.

그림 2.2에는 구한 모델을 나타내며 만약 마스터와 슬레이브 간에 탄성 계수가 무한히 큰 스프링으로 연결한다면 슬레

이브 조작기와 마스터 조작기 간의 위치 차는 일정하다는 것을 알 수 있다. 또한, 적어도 정지 상태에서는 작업물에 의해서 슬레이브 조작기에 가해지는 힘과 마스터 조작기에서 조작자가 느끼는 힘이 동일할 것이다. 이것이 양방향 임피던스 제어가 하는 일이라고 할 수 있다. 그러나 양방향 임피던스 제어를 하는 경우 그림 2.2에 나타낸 것과 같이 슬레이브 질량이 큰 경우 조작자가 슬레이브의 질량을 그대로 느끼므로 조작감이 들거나 작업 수행에 많은 시간이 걸리게 된다.

그림 2.2와 같이 슬레이브의 동적 특성 파라미터들이 크고 마스터의 동적 특성 파라미터들이 작을 경우는 단방향 위치 제어와 양방향 임피던스 제어를 스위칭 하는 것이 좋은 전략이 될 것이다. 그리하여 조작기가 자유 공간 상에서 동작할 경우는 단방향 위치 제어가 되어 조작자는 슬레이브의 질량과 마찰력을 전혀 느끼지않아 쉽고, 빠르게 동작할 수 있으며, 조작기가 작업물을 조작할 경우는 양방향 임피던스 제어로 동작함으로써 정확한 힘을 교환받아 섬세한 작업을 할 수 있다.

4. 모의 실험

제안된 제어기는 초기에 단방향으로 제어되며 마스터 조작기의 위치가 변화하여 위치 오차가 생기면 슬레이브 조작기가 이동하여 위치 오차를 최소화 한다. 접촉이 일어나면 슬레이브 조작기 엔드 이펙터에 힘 출력이 생기게 되며 접촉을 인지하여 양방향 힘 제어가 이루어 진다.

제어는 다음과 같이 이루어진다.

$$u_m = K \times n(f_s) \times (x_m - x_s) \quad (4.1)$$

$$n(f_s) = \begin{cases} 1, & f_s > 0 \\ 0, & f_s \leq 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

슬레이브 조작기는 다음과 같이 제어 된다.

$$u_s = K_f \times [K \times (x_m - x_s) - f_s] \quad (4.3)$$

이 시스템 방정식과 제어 방식을 포함하는 블록 다이어그램을 그림 4.1에 보이고 있으며, 이 시스템은 비선형 시스템이다.

위치 제어의 전달 함수는 다음과 같다.

$$\frac{x_s}{x_m} = \frac{KK_f}{s^2 M_s + sB_s + KK_f} \quad (4.4)$$

즉, 조작기가 K, K_f 의 이득을 같은 위치 제어 루프를 형성한다.

슬레이브 조작기가 자유 공간 상에서 동작할 경우는 $n(f_s)$ 와 $n(x_s)$ 는 모두 0이 된다. 이때 작업자가 느끼는 입력 임피던스는 다음과 같다.

$$\frac{f_m}{v_m} = sM_m + B_m \quad (4.5)$$

즉, 조작자는 양방향 임피던스 제어의 경우와 달리 매스터 조작기의 다이내믹스만을 입력 임피던스로서 느끼게 된다.

단방향 위치 제어되는 자유 공간상의 작업에서는 매스터와 슬레이브간의 위치 오차와 응답 시간을 최소화할 필요가 있으며 K_f 가 커야 하나, K_f 가 크면 오버슈트가 생길 수 있으므로 다음과 같이 제한하였다.

$$K K_f \leq \frac{B_s^2}{4M_s} \quad (4.6)$$

계산의 편의를 위해 파라미터들을 다음과 같이 정의 한다.

$$M_s' = \frac{M_s}{1+K_f} \quad (4.7)$$

$$B_s' = \frac{B_s}{1+K_f} \quad (4.8)$$

$$K' = K K_f \quad (4.9)$$

이 파라미터를 이용하여 시스템 방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_h = M_m \frac{d^2 x_m}{dt^2} + B_m \frac{dx_m}{dt} + K(x_m - x_s) \quad (4.10)$$

$$f_t = K'(x_m - x_s) - \left(M_s' \frac{d^2 x_s}{dt^2} + B_s' \frac{dx_s}{dt} \right) \quad (4.11)$$

즉, 힘을 궤환함으로써 슬레이브 조작기의 다이내믹스는 거의 $1/K_f$ 로 감소한다. K 는 520이다. 이 값은 위치 오차 1cm에 0.5 Kg 중의 힘이 매스터와 슬레이브 조작기에 가해지는 값이다.

식 (4.6)은 K_f 의 값을 제한한다.

앞에서 제안한 제어 규칙의 특성을 알아 보기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 다음과 같이 수행하였다. 매스터 조작기에 10 뉴톤의 힘을 가할 때 양방향 임피던스 제어와 단방향과 양방향의 스위칭을 나타 내었다. 모의 실험의 결과는 그림 4.2와 4.3에 나타내었다. 그림은 입력 임피던스가 작업 수행에 미치는 영향을 보여 준다.

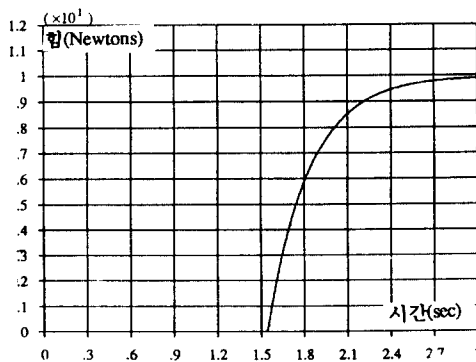


그림 4.2 양방향 방식

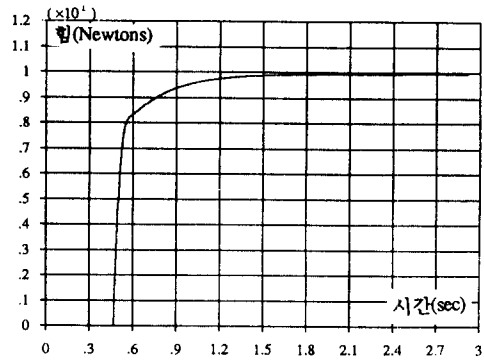


그림 4.3 스위칭 방식

5. 시스템의 구현

전체 시스템의 구성은 그림 5.1과 같다. 기본 구성 요소는 매스터 조작기와 슬레이브 조작기이며 이 두 조작기는 A상, B상의 엔코더 펄스들을 각각의 위치 센서 회로에 공급한다.

위치 센서들은 A, B상의 신호들을 카운트 업/다운하여 위치 정보를 만들어 낸다. 슬레이브는 엔코더에 더해서 힘을 힘 센서 회로에 전달한다.

제어 컴퓨터는 힘 정보와 위치 정보의 두가지 다른 종류의 정보를 목적에 맞도록 처리하여 서보 팩에 전압 명령을 만들어 내보내준다. 각각의 서보 팩은 명령 전압에 비례하는 전류를 생성하여 각각의 조작기에 원하는 토크를 만들어 내게 된다.

이제 전체 시스템을 구성하는 각 부분에 대하여 다루겠다.

서보 제어를 위한 에너지 공급원으로 모트로닉스(Motronics)사의 HSC-100 모터 컨트롤러를 수정 사용하였다. 입력 전압 명령 대 출력 전류 간의 특성은 서보 팩의 밖에서 스크류를 통하여 조절할 수 있으며 이를 조절하여 세팅 하였다.

슬레이브의 힘 출력의 크기를 감지하기 위한 힘 센서는 그 기본 소자로서 인터링크 일렉트로닉스(Interlink Electronics)사의 FSR(Force Sensing Resistor)을 사용하였으며 저항은 넓은 영역에서 힘에 반비례한다. 제작된 힘 센서의 특성을 그림 5.2에 나타내었다.

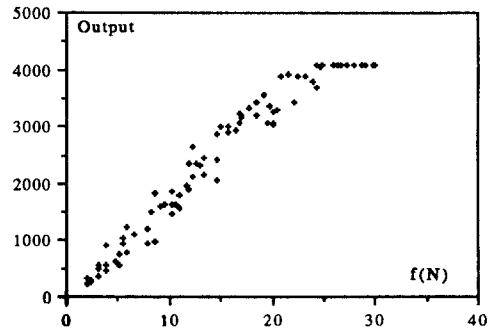


그림 5.2 제작된 힘 센서의 특성

제어를 위해 IBM PC/AT를 사용하였으며 디지털 입출력을 위하여 데이터 트랜슬레이션(Data Translation)사의 DT2801 AD/

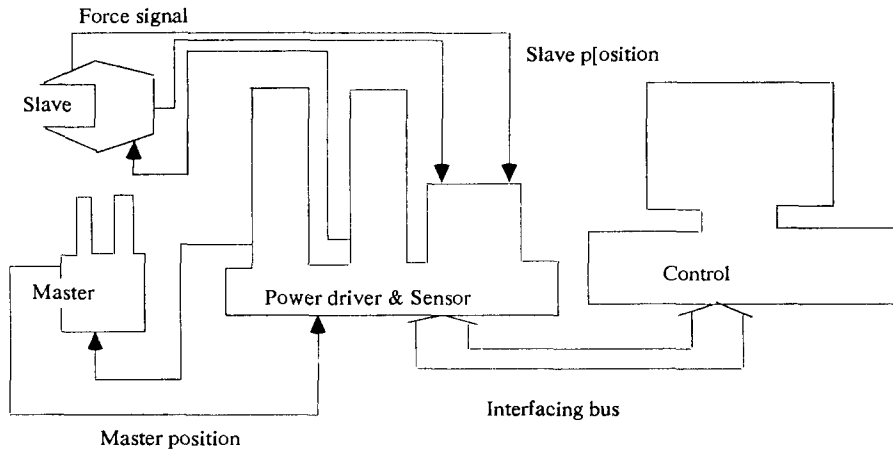


그림 5.1 전체 시스템의 구성

DA/DIO 보드를 사용하였다. DT2801은 IBM PC와 호환성이 있는 아날로그와 디지털의 입출력 보드이며 A/D 변환, D/A 변환, 디지털 입출력을 수행할 수 있다. A/D 변환 부 시스템은 각각 12 비트 분해능을 갖는 16 개의 A/D 채널을 가지며 최대 변환 주파수는 13.7 KHz이다. D/A 변환 부 시스템은 2개의 12비트 D/A 변환기로 구성되어 있으며 디지털 입출력 부 시스템은 8 비트 입출력 포트에 구성되어 있다.

6. 실험 결과

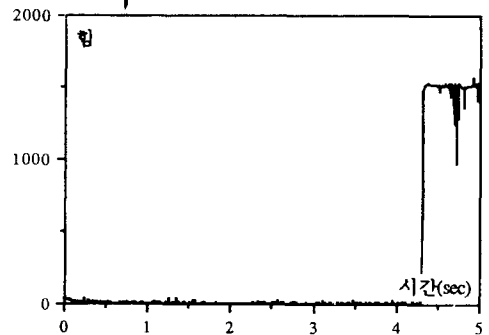
작업자가 엄지와 검지의 두 손가락으로 조작기에 힘을 가하여 슬레이브 그리퍼의 두 손가락끼리의 충돌하게 되는 경우에 대해 실험하였다.

그림 6.(a)와(b)는 같은 힘으로 매스터 조작기를 달았을 경우에 양방향과 단방향의 스위칭 방식과 양방향 제어만을 사용했을 경우의 실험이다.

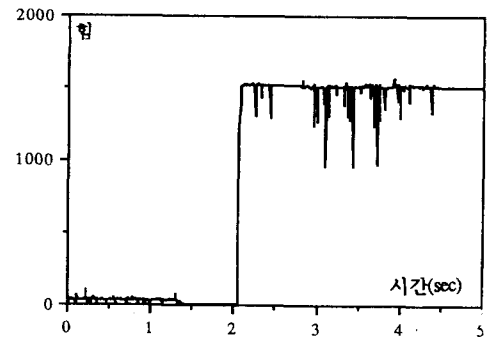
그림 (a)와 (b)를 비교하면 스위칭 방식의 경우가 양방향 방식의 경우보다 빠른 응답 속도를 갖으므로 스위칭 방식의 경우가 양방향 방식의 경우보다 빨리 충돌한다는 것을 알 수 있다. 이것은 매스터 조작기를 조작하는데 조작자는 더욱 힘을 적게 느끼므로 좀더 용이한 조작을 할 수 있었기 때문이다. 실제로 조작자는 양방향 제어의 경우 스위칭 제어보다 큰 저항감을 느꼈다.

7. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 세밀한 작업을 안전하게 수행하기 위한 원격 조작기를 구성하였으며 이를 위한 양방향 힘 제어를 구현하였다. 양방향 힘제어 방식에 사용되는 양방향 위치-위치 제어 방식은 안정성을 보장할 수 있다는 장점을 가졌다. 그러나, 양방향 위치-위치 제어 방식은 조작기 자체의 다이내믹스를 무시하므로, 조작기의 다이내믹스가 아주 클 경우에는 조작자는 조작기 자체의 다이내믹스를 모두 느끼게 되고 따라서 조작기를 조작할 때 조작자가 느끼는 힘은 실제로 작업물에



(a) 양방향 방식



(b) 스위칭 방식

그림 6.1 충돌 실험의 힘

가해지는 힘과 다르게 된다. 이런 단점을 보완하기 위하여 새로운 힘센서 소자를 사용한 힘센서 회로를 제작, 원격 조작기에 부착하고 국부 힘 궤환하여 원격 조작기 자체의 다이내믹스에서 파생되는 오차를 보상하여 좀더 정확한 힘의 전달을 실현하였다. 또한 조작자가 작업물을 잡기전 자유 공간에서 이동할 경우에 속응성을 높이기 위해 자유 공간상의 이동시에는 단방향 위치 제어를 하고 작업물과 접촉 했을 때에는 양방향

힘 제어를 함으로써 안정되고 좋은 속응성을 갖는 원격 조작기를 실현하였다.

본 논문에서는 하나의 자유도를 갖는 원격 조작기의 양방향 힘 제어를 수행하였으나 앞으로 서로 다른 기계적인 구조를 갖는 마스터와 슬레이브로 구성된 2개 이상의 자유도를 갖는 원격 조작기의 엔드이펙터에 가해지는 힘을 양방향 힘제어하는 것이 필요하다.

참고 문헌

[1] T. B. Sheridan, "Telerobotics", Automatica, Vol. 25, No. 4, 1987.
 [2] Jean Vertut, Philippe Coiffet, Robot Technology, Vol. 3A, Prentice Hall, 1984.
 [3] N. Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulator: Part I II III", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 107: 1-24, 1985.
 [4] M. Handlyken, T. Tuner, "Control Analysis and Synthesis for a Six-Degree-of-Freedom Universal Force-Reflecting Hand-Controller", Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 1989.
 [5] Jagannath Raju, Georgy c. Verghese, Tommas B. Sheridan, "Design Issues in 2-Port Network Models of Bilateral Remote Manipulators", Proceedings on Robotics and Automation, pp.1316-1321, 1989.

[6] M. T. Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-11, No. 6, 1981.
 [7] Blake Hannford, Robert Anderson, "Experimental and Simulation Studies of Hard Contact in Force Reflecting Teleoperation", Proceedings 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 584-589.
 [8] J. Winters, L. Stark, "Analysis of Fundermental Movement Patterns Through the Use of In-Depth Antagonistic Muscle Models", IEEE Transactions of Biomedical Engineering", Vol BME-32, pp. 826-839, 1985.
 [9] J. Dudragne, C. Andriot, R. Fournier, J. Vuillemeys, "A Genalized Bilateral Control Applied to Master-Slave Manipulators", 20th ISIR, pp. 435-442.
 [10] M. S. Gausssel, "Principles and Design of Linear Active Circuit", McGraw-Hill, 1965.
 [11] 조 정구, "원격 조정을 위한 로봇트 핸드의 양방향 제어에 관한 연구", 한국 과학 기술원 석사 학위 논문, 1988.

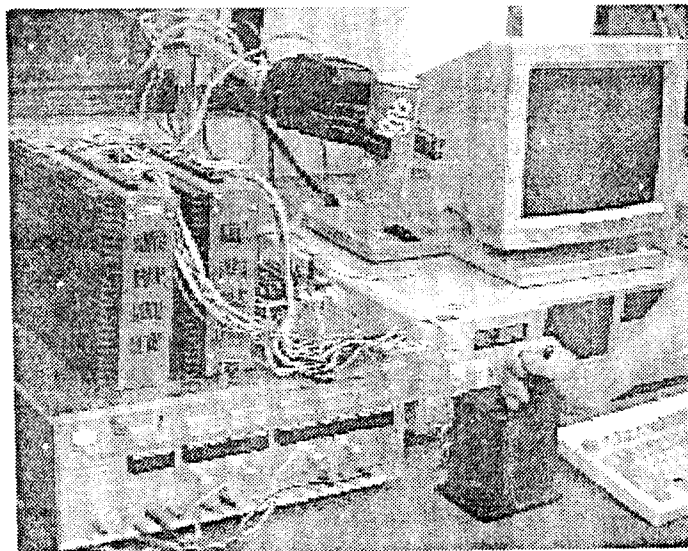


그림 7.1 원격 조작 시스템