

# 가상환경에서 힘 반영 촉각장치를 이용한 소형 원격조정 시스템

김대현\*, 김영동\*, 이현의\*\*

\*조선대학교 제어계측공학과, \*\*조선대학교 공업전문대학 전자과

## Mini-Teleoperation system with a Force-Feedback Haptic Interface within a Virtual Environment

Dae-Hyun Kim\*, Young-Dong Kim\*, Hyun-Eui Lee\*\*

\*Chosun University, \*\*Chosun University Technical College

### Abstract

This paper presents some of challenges of creating feedback force, through manipulation of master manipulator, allowing the user to feel objects within a virtual environment. A sense of touch for the virtual environments was generated by a virtual compliance control method. In this system data communication between the master and slave, we used TCP protocol. In the experiments, A position error between the master and slave arm was about 13.56° in case that the master and slave arm had not compliance properties of the virtual object, while they have the its properties the position error reduced by 2.43° .

언스 특성이 고려되어야 한다.

본 논문에서는 가상 컴플라이언스 특성을 도입하여 슬레이브 암을 마스터 암이 갖는 컴플라이언스 특성을 슬레이브 매니플레이터에 동조 시켰다. 접촉환경으로는 변형이 쉬운 일반적인 종이컵을 사용하여 종이컵이 갖는 컴플라이언스 특성을 마스터와 슬레이브 암이 갖도록 하였다. 그리고 동력변환 장치가 갖는 문제점을 개선하기 위해 마스터와 슬레이브 매니플레이터에 새로운 형태의 액츄에이터인 초음파 모터(ultrasonic motor)[8]를 사용하였다. 초음파 모터는 기존 위치 제어는 물론 동시에 토크 제어를 가상 컴플라이언스 특성을 이용하여 구현할 수 있는 장점이 있다[9,10]. 본 논문에서 구현한 원격조정 시스템은 실제 작업환경을 시각적으로 제시하는 3차원 그래픽 처리부분과 마스터와 슬레이브 암을 각각 제어하는 부분으로 구성되어 있다. 각각의 제어부들의 빠른 데이터 교환을 위해 지역 네트워크를 통한 이더넷 통신을 하도록 구성하였다.

### I. 서론

마스터-슬레이브 매니플레이터 시스템은 인간의 작업이 어려운 환경에서 다양한 작업을 위해 사용되어 왔다. 이러한 마스터-슬레이브 매니플레이터 시스템은 인간에 의해 제어되어지는 마스터 암과 마스터 암의 동작에 의해 제어되어지는 슬레이브 암으로 구성되어진다[1]. 일반적인 양방향(bilateral) 마스터-슬레이브 매니플레이터 시스템에서 작업환경과 접촉 작업시 슬레이브 암에 전해지는 역감(reflecting force)이 마스터 암을 통해 인간에게 전해지도록 마스터 암은 제어되고 설계되어져 왔다[2,3]. 또한 슬레이브 암은 마스터 암에 의한 위치제어를 받게 되므로 대부분의 원격조정 시스템들에서 슬레이브 암의 작업 능력은 작업자에 매우 의존적이다. 따라서 슬레이브 암에도 마스터 암과 같이 접촉환경에 대한 컴플라이

### II. 가상 컴플라이언스 제어와 가상환경

#### II-1. 액츄에이터의 가상 컴플라이언스 제어

제어신호  $i$  에 비례하게 출력토크  $T$  을 발생하는 토크발생 소자가 있을 때 출력토크와 제어신호의 관계는 다음과 같다.

$$T = u \cdot i \tag{1}$$

여기서  $u$  는 비례정수 ( $-T_i \leq u \leq T_i$ ),  $T_i$  는 입력 토크이다. 토크발생 소자의 출력각도와 각속도를 검출할 수 있다면 제어신호  $i$  는 식(2)와 같이 된다.

$$i = k(\theta_D - \theta_o) - bu \tag{2}$$

단,  $k$  는 정수,  $u$  는 각속도,  $\theta_D$  는 목표각도,  $\theta_o$  는 출력각도이다. 이때 제어신호  $i$  를 토크발생 소자로 제환시키면 식(1)과 식(2)로부터 다음과 같은 토크가 발생한다.

$$\begin{aligned} T &= u \cdot i \\ &= u \{ k(\theta_D - \theta_o) - bw \} \\ &= uk(\theta_D - \theta_o) - ubw \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $B = ub$  점성계수,  $K = uk$  탄성계수로 놓으면 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$T = K(\theta_D - \theta_o) - Bu \quad (4)$$

식(4)로부터 출력 토크를 점성과 탄성계수를 이용하여 발생시킬 수 있음을 알 수 있고, 이러한 탄성과 점성계수는 제어프로그램 혹은 하드웨어에서 이득값으로 설정할 수 있다. 그림 1은 가상 컴플라이언스 제어시스템의 블록선도를 나타낸다.

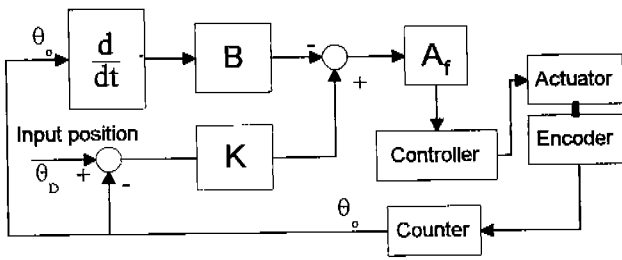


Fig. 1. Block diagram of the virtual compliance control for the actuator.

## II-2. 가상환경의 컴플라이언스 특성

가상환경은 탄성, 점성 그리고 비선형의 3가지 기초요소가 병렬구성 되어져 있으며, 매니플레이터가 가상환경과 접촉순간에 발생하는 힘은 그림 2와 같이 점성과 탄성 요소에 많이 의존한다[11]. 이것은 가상 컴플라이언스 특성으로부터 가상환경 제시가 가능하다는 것을 뜻한다. 그림 2로부터 매니플레이터 말단부(end-effector) 위치를  $x_d$ , 매니플레이터가 가상환경과 접촉시 발생하는 위치변위를  $x$  라 하면 아래의 식으로 표현 가능하다.

그림 2로부터 매니플레이터 말단부(end-effector) 위치를  $x_d$ , 매니플레이터가 가상환경과 접촉시 발생하는 위치변위를  $x$  라 하면 아래의 식으로 표현 가능하다.

$$F_e = K_e x + D_e \dot{x} \quad (5)$$

$$X_d = x_d - x \quad (6)$$

$$F = K_m X_d + D_m \dot{X}_d \quad (7)$$

여기서  $F_e$  는 가상환경으로부터 발생하는 힘,  $F_m$  는 매니플레이터에서 발생된 힘을 뜻한다. 힘의 평행상태로부터  $F_e$  와  $F_m$  이 같다고 하면

$$K_e x = K_m X_d, \quad D_e \dot{x} = D_m \dot{X}_d \quad (8)$$

가 성립되며, 매니플레이터의 탄성과 점성은 가상환경의 탄성과 점성으로 식(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_m = \frac{x}{x_d - x} \cdot K_e \quad (9)$$

$$D_m = \frac{\dot{x}}{\dot{X}_d} \cdot D_e$$

식(9)으로부터 가상환경을 구성하는 점·탄성 정보는 액추에이터의 점·탄성 정보로 변환할 수 있다. 따라서 가상 컴플라이언스 특성에 의하여 매니플레이터가 가상환경을 제시할 수 있고 식(4)과 같은 특성을 갖는 액추에이터를 사용하였을 때 그 실현은 확실시 된다.

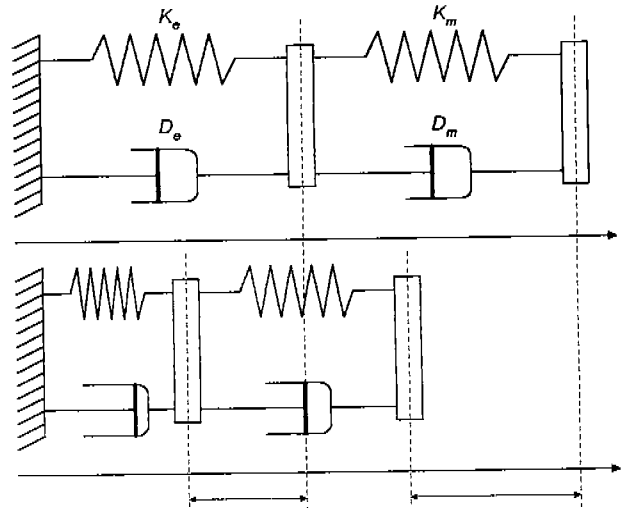


Fig. 2. Virtual environment when a manipulator is contacting ( $K_e$  defines the virtual spring,  $B_e$  the virtual damper,  $K_m$  the spring and  $B_m$  the damper of the manipulator)

## III. 원격조정 시스템

본 논문에서 구성되어진 원격조정 시스템은 그림 3과 같이 3대의 컴퓨터가 네트워크를 통해 구성되어진다[12]. 힘-반영 촉각장치는 작업자에 의해 수동적으로 조정되어지는 마스터 암으로 사용되었으며, 슬레이브 암은 자체 개발되었던 4축 전완로봇[13]을 사

용하였다. 여기서 마스터 암과의 자유도를 갖게 하기 위해 슬레이브 암은 2축을 고정시켜 2 자유도를 가지게 하였다.

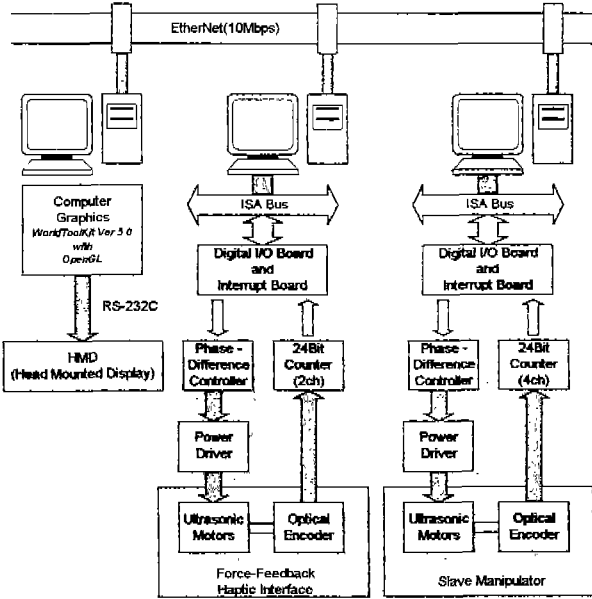


Fig. 3. The whole structure of control hardware

이 시스템에서 슬레이브 암의 실작업 환경에 대한 화상정보나 음성정보의 궤환은 없으나 가상환경 개념을 도입하여 컴퓨터에서 3차원 가상 작업환경을 제시하였다. 이러한 시스템에서 고려되어야 할 사항들은 다음과 같다.

- ① 슬레이브 매니플레이터는 실제 인간이 작업하는 것과 같이 제어되어야 한다.
- ② 네트워크를 통한 데이터통신의 한계성이나 데이터 전송 시간 지연이 존재하더라도 제어는 쉬어야 한다.
- ③ 3차원 그래픽은 실작업 환경과 같이 표현되어야 한다.
- ④ 작업대상물과의 접촉이 있을 경우 그 느낌을 똑같이 마스터 매니플레이터가 제시하여야 한다.
- ⑤ 작업자가 조작하는 마스터 매니플레이터는 안정성을 가져야 한다.
- ⑥ 모든 처리는 실시간으로 이루어져야 한다.

### III-1. 3차원 그래픽 처리부

3차원 그래픽의 처리를 위한 컴퓨터는 Windows NT 기반을 사용하였으며 마스터의 제어 컴퓨터와 빠른 정보 교환을 위해 네트워크를 통한 이더넷

(ethernet) 통신을 하도록 구성하였다. 마스터 제어부로부터 힘 반영 촉각장치의 위치정보를 수신하여 제시될 접촉력을 계산하여 그 결과를 마스터 제어부로 다시 송신한다. 또한 이를 바탕으로 가상물체의 변형에 대한 3차원 그래픽 처리를 한다. 3차원 그래픽 구현은 WorkdToolKit[14]와 OpenGL[15]을 사용하여 그림 4와 같이 외부모니터와 HMD(Head-Mounted Display)를 통해 작업자에게 제시하였다.

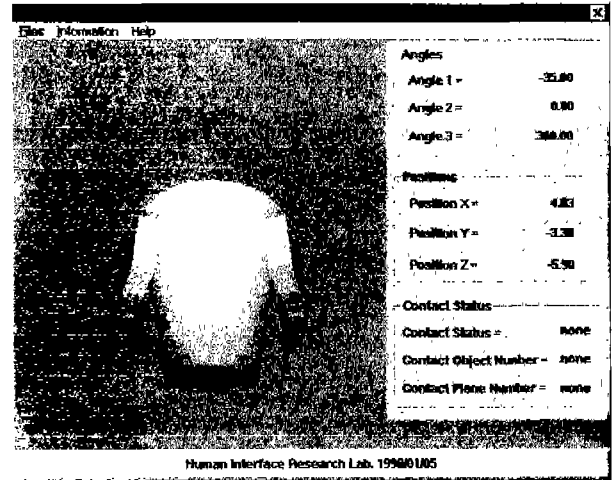


Fig. 4. Virtual environment based on 3D graphics

### III-2. 마스터 제어부

마스터 제어부는 전체 시스템을 통합 제어하는 부분으로 그림 5와 같이 슬레이브 암과 3차원 그래픽 구현부에 마스터 암의 말단부 위치정보를 송신하고 3차원 그래픽 구현부로부터 접촉력 정보를 수신하여 마스터 암을 통해 역감을 작업자에게 제시한다. 본 논문의 마스터 암은 이동범위가 매우 제한적이지만, 작업대상체를 잡았을 때 역감을 제시하기에 충분한 이동범위를 갖는다. 표 1은 마스터 암의 실제 파라미터를 나타낸다.

Table 1. Physical parameters of the master arm

	Link 1	Link 2
Mass of link	15 g	14.2 g
Length	8.2 cm	8.0 cm
Type of motor	USR30-E3	
Maximum exerted force	3 N	
Backdrive friction	0.33 [ Nms/rad ]	
Inertia	0.031gm <sup>2</sup>	
Backlash	0	
Device stiffness	High	

마스터 암의 관절위치는 인터럽트 주기에 따라 읽혀져 24-Bit 카운터와 디지털 I/O 보드를 통하여 컴퓨터로 입력되어진다. 읽혀진 데이터들은 내부 제어 프로그램에 의해 기준 위치좌표로 변환되어 네트워크를 통해 3차원 그래픽 처리부로 전송되어지며, 위치좌표 변환전의 카운터 값은 슬레이브 제어 컴퓨터로 전송된다.

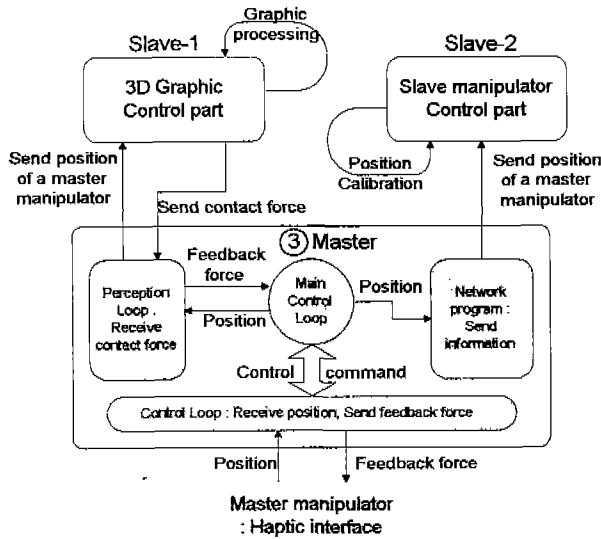


Fig. 5. Process of the master control loop

마스터 제어부는 슬레이브 제어부로 2 종류의 명령체계를 송신한다. 하나는 제어기를 제어하는 명령체계로서 알파벳 코드로 이루어진 문자열의 집합이다.

“JOINT-1 CONTROLLER ON” 또는  
“JOINT-2 CONTROLLER OFF”

이 명령체계는 단순히 슬레이브 암의 각 관절을 제어하는 제어기의 ON/OFF를 제어하며 필요시 슬레이브 제어 프로그램에서 직접 제어할 수 있다. 다른 명령체계는 각 관절의 위치 제어명령으로서 관절 변수인 6값이 4-Byte의 엔코더 카운터 값으로 변환되어 문자열을 구성한다.

“JOINT-1 : 2040, JOINT-2 : 3005”

송신된 문자열은 모든 관절에 대한 위치정보를 가지고 있으며, 슬레이브 암 제어 프로그램에서 각 관절의 정보로 분리하여 사용한다.

### III-3. 슬레이브 제어부

슬레이브 위치는 마스터 매니퓰레이터 제어부로부터 관절위치의 정보를 받아 제어 프로그램 내에서 관절

의 위치를 제어하며 다음과 같은 기능을 갖는다.

- ① 슬레이브 암의 각 관절을 제어
- ② 마스터 제어부로부터 관절 위치정보를 수신하여 관절 제어명령으로 변환 처리
- ③ 슬레이브 암의 위치정보 수집 및 송신정보와의 비교 및 오차보정

슬레이브 암은 능동적 움직임을 가지기 때문에 그림 1을 바탕으로 하는 가상 컴플라이언스 특성에 관성항을 고려한 임피던스 제어에 의해 제어하였다[13]. 마스터 암이 식(9)에 의해 수동적으로 작업자에게 가상환경의 컴플라이언스 특성을 이용하여 역감을 제시한다면 슬레이브 암은 역으로 같은 특성을 가지고 작업대상체와 접촉작업을 행할 수 있다. 이것은 인간의 관절이 가지는 임피던스 특성을 모델화 한 것으로 실제 작업자가 작업대상체를 다루는 것과 같은 효과를 가져온다[18,19]. 슬레이브 암 또한 각 관절에 진행과형 초음파모터를 구동 액추에이터로 사용하였다. 그림 6는 자체 시험 제작한 마스터 암과 슬레이브 암의 외관을 나타낸다.

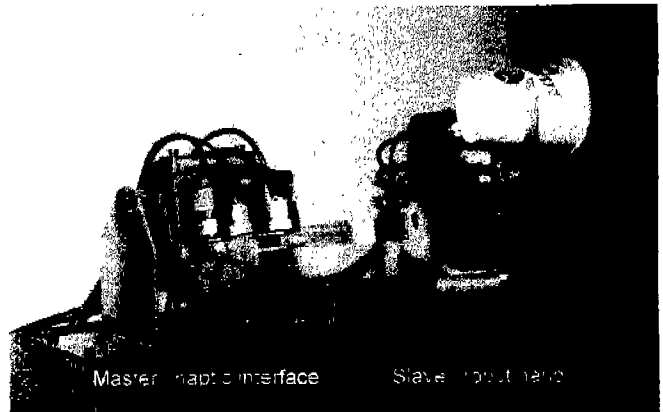


Fig. 6. Perspective view of the master and slave arm.

### III-4. 네트워크를 통한 데이터 전송

네트워크를 통한 데이터 전송을 위해 TCP 프로토콜을 사용하였다. TCP 프로토콜은 오차 및 손실데이터 검출을 할 수 있으므로 정확한 데이터 전송이 이루어 질 수 있다[20,21]. 그림 7은 원격조정 시스템의 데이터 전송 블록도 이다. 3차원 그래픽 처리부와 슬레이브 제어부는 마스터 제어부와 연결형 스트림 소켓을 사용하였다. 슬레이브는 소켓이 생성되면 소켓의 연결을 위해 마스터로 접속요청(request)을 보내게 되며 이에 응답한 마스터는 슬레이브에게 요청응답

(acknowledgement)을 보낸다. 성공적으로 연결이 되면 마스터와 슬레이브간의 데이터 전송이 이루어지며 마스터에 접속된 슬레이브들은 마스터를 통해 서로가 데이터 송수신을 할 수 있는 상태가 된다. 모든 통신이 끝나게 되면 마스터와 슬레이브의 소켓들은 해제된다.

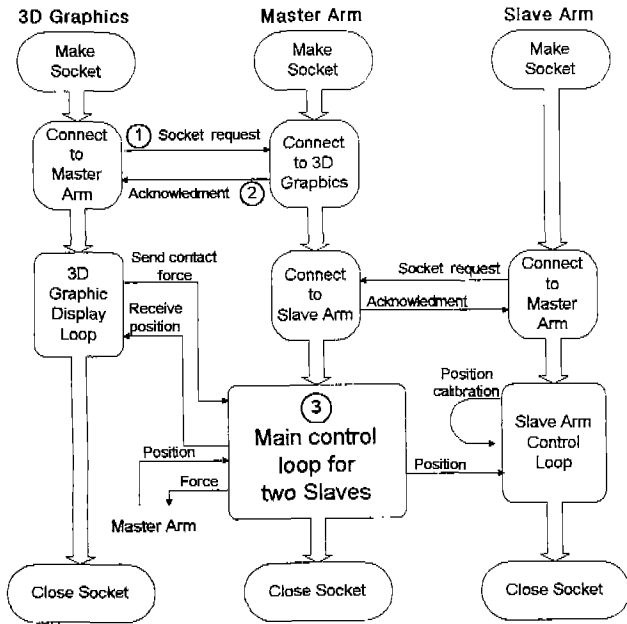


Fig. 7. Design of data communication of the teleoperation system

#### IV. 실험 및 고찰

원격조정의 실험은 가상물체에 대한 컴플라이언스 특성을 마스터와 슬레이브에 적용시키지 않을 때와 각각 적용시켰을 때, 그리고 모두 적용시켰을 때로 나누어서 각각의 위치응답의 오차를 비교하여 보았다. 사용된 가상환경은 변형이 쉽고 탄성성분이 많은 종이컵으로 하였다. 그리고 실험에 사용된 시스템은 그림 8과 같다.

모든 액추에이터 제어기로는 위상차 제어 방식의 자체 제작한 제어기를 사용하였다. 제어 프로그램에서는  $K_e$ 와  $B_e$ 의 가상 컴플라이언스 파라미터를 이용하여 액추에이터의 A상과 B상의 위치상차 데이터를 식(4)를 이용하여 8-Bit의 토크 신호로 제어기에 입력된다. 따라서 입력되어지는 토크 제어신호는 0에서 255값의 사이로 스케일링 되어진다. 또한 샘플링 주기는 하드웨어적인 카운터에 의해 마스터 제어부에서는 800Hz를, 슬레이브 제어부에서는 자체 위치오차 보정을 위해 500Hz를 사용하였다. 또한 20명의 지원자를 통한 임상실험에 의해 종이컵의 탄성을 느낄 수

있는 최적의 파라미터인  $K_e$ 와  $B_e$ 의 값을 각각 250과 40로 하여 사용하였다. 그리고 모든 장치들의 액추에이터는 초음파 모터를 사용하였고, 인터럽트 주기에 의해 디지털 I/O 보드를 이용하여 제어를 제어하였다.

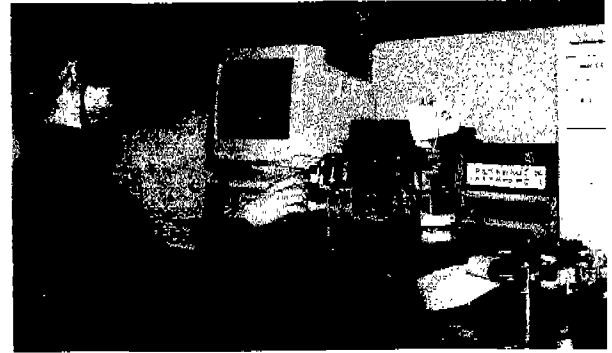


Fig. 8. Experiment of the teleoperation using a force-feedback haptic interface

첫 번째로 가상물체에 대한 컴플라이언스 특성을 마스터와 슬레이브 암에 고려하지 않고 단순한 위치 제어만으로 가상물체를 여러 번 잡았을 때의 실험을 하였다. 그림 9는 이때의 마스터와 슬레이브의 한쪽 암에 대한 위치/시간 응답을 나타낸다. 마스터와 슬레이브 암의 위치 오차는  $13.56^\circ$  로서 매우 크게 발생되었다. 이것은 피험자가 단순히 그래픽의 처리만을 의존으로 작업을 하였기 때문에 실제의 작업감각을 느낄 수가 없는데서 비롯된 작업 정밀성의 오차이다.

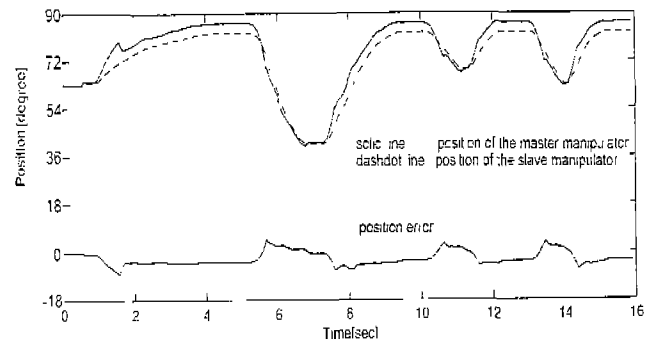


Fig. 9. Position/time response of the master and slave manipulator in case that master and slave have not spring/damper properties of the virtual object.

두 번째 실험으로 마스터 암을 통해 가상물체의 컴플라이언스 특성의 역감을 피험자에게 제시하였다.

이때 슬레이브 암은 가상 컴플라이언스 특성에 동조시키지 않고 위치제어만을 하였다. 그림 10은 이때의 위치/시간 응답 그래프이다. 그래프에서 실선은 마스터의 위치 변화를 나타내며 점선은 슬레이브의 위치 변화이다. 마스터와 슬레이브 암의 위치오차는 평균  $2.43^\circ$  로서 많은 오차를 줄일 수 있었다. 이것은 가상물체에 대한 컴플라이언스 특성의 역감이 마스터 암을 통해 피험자에게 효과적으로 제시되어 마치 실세계에서 피험자가 작업을 하는 것과 같은 작업의 정밀성이 피험자에 의해 향상되었다고 할 수 있다. 따라서 위치오차를 감소시킨 원격조정의 결과를 얻을 수 있었다.

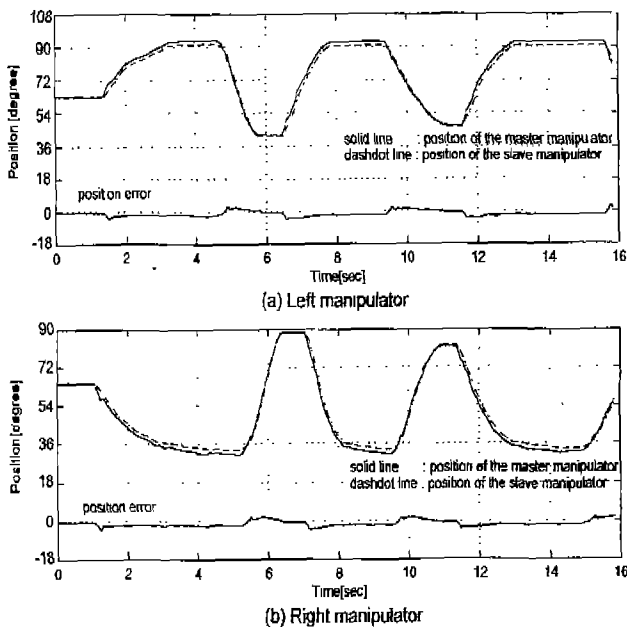


Fig. 10. Position/time response of the master and slave manipulator in case that master manipulator has spring/damper properties of the virtual object.

세번째 실험은 가상물체 변형에 대한 실험으로 가상물체와의 접촉작업을 고려하여 슬레이브 매니플러 세번째 실험은 가상물체 변형에 대한 실험으로 가상물체와의 접촉작업을 고려하여 슬레이브 매니플레이터는 그림1과 같은 가상 컴플라이언스 제어를 하였다. 이때 컴플라이언스 특성은 가상물체의 역감을 제시한 컴플라이언스 특성에 동조하였다. 가상물체가 변형을 이룰 때 발생하는 탄성 역감을 느끼기 위해 많은 힘으로 가상물체에 변형을 가하였다. 그림 11은 이때의 매니플레이터들의 위치/시간 응답을 나타낸다. 마스터의 위치는 가상물체 표면에서 내부로 투과되었지만 슬레이브의 위치변화는 가상물체 표면에서

머물렀다. 하지만 마스터의 위치변화에 비례하는 힘을 슬레이브가 제시하였다. 이것은 슬레이브의 컴플라이언스 제어로부터 발생된 현상으로 접촉작업시 컴플라이언스 제어의 유효성과 작업대상체에 대한 작업의 안정성을 뜻한다.

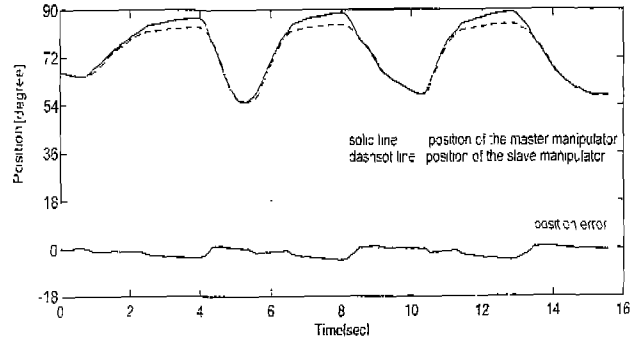


Fig. 11. Position/time response of the master slave manipulator in case that master and slave have spring/damper properties of the virtual object.

## V. 결론

본 논문에서는 마스터-슬레이브 원격제어 시스템을 구성하여 이를 바탕으로 간단한 원격조정 실험을 하였다. 마스터 암이 사용자를 통해 수동적으로 가상물체를 그레핑(grasping) 하였을 때 슬레이브가 성공적으로 이를 수행하였다. 또한 슬레이브가 외부환경과 반응할 때, 컴플라이언스 특성이 마스터 암을 통해 피험자에게 역감으로 제시됨으로써 가상환경에서 능동적인 원격 제어를 할 수 있었다. 원격조정 실험으로부터 가상환경의 역감을 마스터 암에 고려하지 않았을 때는 원격조정의 위치오차가 약  $13.56^\circ$  를 보였지만, 역감이 마스터 암을 통해 사용자에게 제시되었을 때에는 위치오차를  $2.43^\circ$  로 줄일 수가 있었다. 이것은 슬레이브 암의 실 작업환경에 대한 현실감을 피험자가 느낄 수 있어 작업의 정밀성이 향상되었다. 따라서 마스터 암이 외부환경에 대한 컴플라이언스 특성의 역감을 제시하지 않은 시스템에서는 시각에 많이 의존하여 정확한 위치 제어가 어려웠지만 역감의 특성이 제시된 시스템에서는 개선된 위치제어와 현실감을 얻을 수 있었다. 또한 슬레이브 암이 마스터 암이 갖는 가상 컴플라이언스 특성을 가지고 있을 때 작업대상체에 대한 작업의 안정성을 가졌다.

이와 같은 특성을 바탕으로 마스터 암으로 제작된 역감장치는 작업공간의 자유도와 기계적인 안정된 설계의 향상으로 범용적인 촉각장치로 발전할 수 있음

을 확인하였다. 이러한 촉각장치는 원격조정용 마스터 암으로 사용 및 가상 수술 시뮬레이터의 역감 제 시용 장치로서 가상현실의 촉각 응용분야에 사용될 수 있다고 본다.

### 참 고 문 헌

- [1] K. Watanabe, H. Hashimoto, et al., "Development of Dual Arm Master-Slave Manipulator System", Proc. of the 4th RSJ Annual Conf. pp. 75, 1986.
- [2] B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinematic feedback", IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 5, No. 4, Aug., 1989.
- [3] B. Hannaford, "Stability and performance trade-off in bilateral telemanipulators", IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation, May, 1989.
- [4] T. Sashida, T. Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors," Oxford Clarendon Press, 1993.
- [5] A. Kato, K. Ito, and M. Ito, "Compliance Control of Circular Traveling Wave Motor," in Proc. of IEEE IECON, pp538-542, 1991.
- [6] 김영동, "초음파모터의 위상차 제어", 조선대학교 생산기술연구소, Vol. 10, No. 1, pp. 66-74, 1996.
- [7] L. B. Rosenberg and B. D. Adelstein, "Perceptual decomposition of virtual haptic surfaces", In Proceedings IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality, pp. 46-53, October 1993.
- [8] G. J. Raju, G. C. Verghese, and T. B. Sheridan, "Design issues in network models of bilateral remote manipulation", IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation, May, 1989.
- [9] D. H. Kim, D. Shin, Y. D. Kim, "Compliance Control for the Direct Drive Forearm of Humanoid Robot using Ultrasonic Motors", Proc. of the 2nd Asian Control Conference, Vol.2, pp.171-174, 1997.
- [10] Sense8 Corporation: WorldToolKit™ Reference Manual, Mill Valley, Sense8 Corporation Press, 1995.
- [11] Richard S. Wright JR, and Michael Sweet : OpenGL SuperBible, CA : Waite Group Press, 1996.
- [12] Neville Horgan, "The mechanics of multi-joint posture and movement control," Biomedical Cybernetics, Vol. 52, pp. 315-331, 1993.
- [13] S. Cannon and G. I. Zahalak, "The mechanical behavior of active human skeletal muscle in small oscillations," Journal of Biomechanics, Vol. 15, pp. 111-121, 1982.
- [14] M. Otsuka, N. Matsumoto, T. Idogaki, K. Kosuge, T. Itoh : Bilateral telemanipulator system with communication time delay based on force-sum-driven virtual internal model, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 344-350, 1995.
- [15] S. Manorotkul and H. Hashimoto, "Virtual impedance with Position Error Corection for Teleoperation with Time Delay", Proc. 4th Int. Workshop on Advanced Motion Control, Vol. 2, pp. 524-528, 1996.