



# 원격제어 시스템

손재범, 정완균, 염영일

포항공과대학교

## 1. 서론

오래 전부터 인간들은 신체가 가질 수 있는 능력의 한계를 깨닫고 여러가지 도구들을 만들어 사용해 왔다. 이러한 도구들의 발전은 그 결정체로서 인간과 유사한 일을 할 수 있는 로봇에까지 이르게 되었다. 하지만 현재까지의 기술력으로는 인간처럼 사고판단 할 수 있는 로봇의 개발에는 도달하지 못하여, 선택과 판단이 요구되는 작업에서는 여전히 인간이 직접 일을 해야만 한다. 한편 같은 동기로부터 시작하였으나 그 추구하는 바가 다른 흐름이 있었다. 완전히 독립적으로 동작하는 로봇이 아니라, “완전히 사람의 의도에 따라 동작하는 시스템”을 구현하려는 “원격 제어 시스템(teleoperating system)”이 바로 그것이다.

“원격제어(teleoperation)”란 “인간의 감각과 작업능력을 확장하는 일”로 정의되며, 포괄적으로는 장대를 들고 나무의 밤을 따는 일까지 포함될 수 있다. 그러나 일반적으로 통용되는 원격제어의 개념을 이해하기 위하여 다음 두가지 성질을 통하여 간접적으로 정의 내리도록 하자.

첫째, 원격(tele-)이란 단순히 멀리 떨어져 있다는 것이라기 보다는 물건을 정확히 10 $\mu$ m 옮긴다든지 1t의 컨테이너를 드는 등 “인간의 감각이나 작업능력이 미치지 못함”을 의미한다. 둘째, 제어는 “인간에 의한 계속적 제어”를 뜻한다. 원격제어의 주체는 인간이며, 인간은 목적을 달성하기 위하여 계속적으로 제어를 해야한다. 이런 견지에서 보통의 로봇은 인간의 계속적인 접촉이 없으므로 원격제어라고 볼 수 없으며, 전화는 제어의 의미가 포함되어 있지 않으므로 원격제어라고 볼 수 없다.

원격제어는 상황에 따라 작업의 의미로 쓰일때는 “원격조작” 또는 “원격작업” 등으로 표현되기도 하며, 이러한 원격

제어의 구현을 위해 설치된 시스템을 “원격제어 시스템”이라 부른다.

그림 1에 원격제어의 한 예가 보여진다. 그림에서 매니퓰레이터는 원자력발전소의 위험지역안에 있고 조작자는 바깥의 안전한 곳에 있다고 가정하자. 현재 노후된 부품을 하나 교체하려고 한다. 매니퓰레이터는 인간 조작자가 움직이는 동작과 똑같은 동작을 하게 되어 있어서, 조작자는 모니터를 보며 매니퓰레이터를 움직여서 필요한 수리를 한다. 반대로, 매니퓰레이터가 물건을 집거나 벽을 밀면 조작자도 그 힘을 똑같이 느낄 수 있다. 이러한 방식을 통해 인간 조작자는 마치 위험지역안에서 자신이 직접 수리를 하고있는 느낌을 갖게된다.

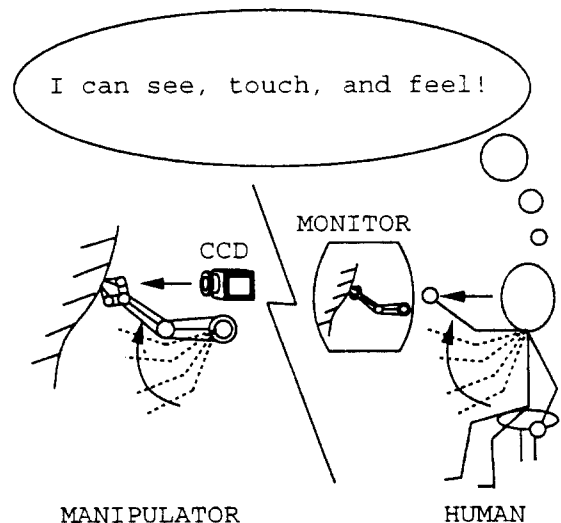


그림 1. 원격제어의 한 예.

## 1.1 용어 정의(Nomenclature)

원격제어 시스템의 역사는 다른 로봇들에 비해 길어 50년 이상을 자랑하고 있다. 그러나 아직까지 사용되는 용어가 잘 통일되지 못하고 있어서, 논문이나 관련 서적을 읽을 때 혼돈을 가져오기도 한다. 그렇기 때문에 원격제어 시스템에서 사용되는 용어들이 어떤 의미로 사용되는지 여기서 한번 짚고 넘어갈 필요가 있다.

### 원격제어기(Teleoperator)

“원격제어기(teleoperator)”는 원격제어(teleoperation) 시에 사용되는 로봇이나 시스템의 통칭이다. 이때 조작자가 직접 명령을 내리는 장치, 즉 입력장치를 “마스터(master)” 시스템, 그 명령을 추종하는 기계를 “슬레이브(slave)” 시스템이라고 하며, 통칭하여 마스터-슬레이브 시스템이라고 부른다.<sup>1)</sup> 원격제어기(teleoperator)가 단순히 슬레이브(slave) 시스템만을 의미하는 경우도 있으며, 마스터(master) 시스템을 인간 조작자를 포함시킨 개념으로 보는 경우도 있다. 마스터-슬레이브 시스템을 원격제어기의 한 종류로 보기도 한다.

### Telerobotics

보는 시각에 따라 원격제어 시스템을 로봇의 일종으로 이해할 수 있다. 이 때 원격제어 시스템을 tele-robot 이라고 하며, 이를 연구하는 로보틱스의 한 분야를 “telerobotics”라고 한다. 이 글에서는 원격제어 시스템을 로보틱스의 입장에서 다루게 된다.<sup>2)</sup>

### 힘반영(Force Reflection)

마스터-슬레이브 시스템에서 슬레이브 시스템으로부터의 정보를 마스터측에 알려주는 방식의 하나로 “힘반영(force reflection)”이라는 것이 있다. 이것은 슬레이브측의 정보(주로 환경과 슬레이브가 접촉함으로써 발생하는 상대적인 힘)를 마스터측의 조작자에게 힘의 형태로 그 정보를 알려주는 것을 말한다. 일반적으로는 슬레이브가 환경과 접촉함으로써 얻어지는 힘을 그대로 조작자에게 재현하여 조작자가 마치 슬레이브의 위치에서 환경과 직접 접촉하고 있는 것과 같은 일체감을 느끼도록 한다. force feedback이 제어에서의 단순한 페루프 귀환 의미가 아니라 힘반영(force reflection)을 의미하는 경우도 있어서 주의를 요한다.

- 1) 이석한 박사(1992)는 R-station (remote station), C-station (control station) 또는 R-unit (remote unit) S-unit (server-unit) 이란 말을 사용하였다.
- 2) 분야에 따라 용어나 그 용어의 의미가 달라질 수 있다. 예를 들어, 전산 분야에서는 네트워크상을 돌아다니며 필요한 정보를 가져오거나 인간이 원하는 작업을 대신 해 주는 소프트웨어도 로봇이라고 부른다.

## 양방향 원격제어(Bilateral Teleoperation)

양방향 원격제어(bilateral teleoperation)이란 마스터 측에서 슬레이브 측으로 정보를 전달하는 것 처럼, 슬레이브 측에서도 마스터의 조작자 측으로 정보를 전달해 주는 형태의 원격제어를 의미한다. 여기서의 정보는 물리적 형태의 정보(힘, 촉각, 냄새, 시각등)를 의미하며, 보통의 경우에는 힘반영(force reflection)이 제공되는 원격제어를 일컫는다.

### 원격 존재감(Telepresence)

원격존재감이란 원격제어의 궁극적인 목표로, 원격조작기와 작업 환경에 대한 정보가 인간에게 전달되는 이상적인 상황이다. 다시 말하면, 인간은 자신이 슬레이브의 위치에서 슬레이브 그 자체인 것처럼 느끼고, 슬레이브는 그 자신이 인간 조작자인 것처럼 동작하는 것이다. 이는 가상현실(virtual reality)<sup>3)</sup> 분야의 궁극적인 목표와 일치한다.

## 2. 원격제어 시스템의 역사<sup>4)</sup>

원격제어 시스템의 기원은 16세기 훨씬 이전부터 사용되어 왔던 부젓가락이나 꼬챙이같이 간단한 도구에서 시작한다고 볼 수 있다. 그리고 19세기 초반, 땅을 고르는 일이나 건축과 같은 분야에서 원시적인 형태의 원격시스템을 찾을 수 있다. 1940년대 초반에는 장애인인 옷에 부착된 가죽끈을 당기면 의수가 동작하는 형태의 원격시스템도 나타났다. 그러다 1945년경 최초의 현대식 마스터-슬레이브형 원격제어 시스템이 시카고 근방에 위치한 ANL (Argonne National Laboratory)<sup>5)</sup>의 R. Goertz에 의하여 개발되었다. 이 시스템은 기계식 펜터그래프 메카니즘에 기초하여 방사능 물질 처리용 차폐실의 작업을 차폐실 바깥에서 할 수 있도록 한 것이었다. 곧 전기식 서보 메카니즘이 기존 시스템의 direct mechanical tape과 able linkage를 대체하였고 (Goertz and Thompson, 1954) 폐회로방식의 원격 비전 시스템도 도입되어 현재와 같이 조작자가 임의의 먼 거리에 떨어져 있어도 상관이 없게 되었다.

그 뒤 1950년대 중반에 많은 기술적 발전들(Johnsen

- 3) 1970년대 Videoplacement라는 개념을 창안한 크루거(Myron Krueger)는 인공현실 (Artificial Reality) 라는 용어를 만들어 냈다. 이후 1989년 데이터 글러브(data glove)로 유명한 VPL Research사의 사상이었던 제론 레니어 (Jaron Lanier)에 의해 가상현실 (Virtual Reality) 라는 말로 대체되어 오늘에 이른다.
- 4) 2장 역사는 Thomas B. Sheridan의 1989년 Automatica에 실린 “Telerobotics”의 내용을 다루고 있으며, 3, 4장은 그 구성의 일부를 여기서 채택하였다.
- 5) 최초의 핵잠수함인 노틸러스호의 엔진을 설계한 연구소로도 유명하다.



그림 2. HMD.

and Corliss(1967), Heer(1973), Vertut and Coiffet (1984) 참조)이 있었다. 그 중 6자유도 힘반영(force reflection), 협력양팔식 원격제어기(coordinated two-arm teleoperators), 그리고 원격 카메라의 위치를 조정함으로써 시각적 원격존재감(telepresence)을 구현한 HMD<sup>6)</sup> 그림 2 등이 괄목할만하다. 특히 Mosher에 의해 개발된 General Electric Co. Handyman은 10자유도(두손가락 각각 2자유도씩)의 전기유압식 두 팔을 가지고 있었다.

이러한 새로운 서보메카니즘 기술을 인간의 의수에 적용하려는 관심이 1950년대 후반에 시작되었다. 아마 최초의 성공은 모스크바의 Kobrinskii (1960)에 의해 제작된 절단된 부위나 상박(upper arm)의 근육에서 발생하는 미소한 근전도 신호(myoelectric signal)를 이용한 하박(lower arm) 의수라고 볼 수 있을 것이다. 곧이어 미국이나 유럽에서도 휠체어에 장착되어 허나 모터 신호로 명령을 내리는

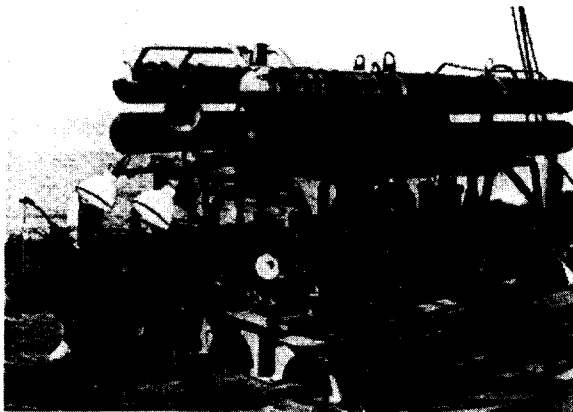


그림 3. 해저용 원격제어 시스템 CURV.

6) Head-Mounted Display. 주로 액정방식으로 머리에 착용하며, 오른쪽 눈과 왼쪽 눈에 다른 화상을 디스플레이하여 입체로 보이게 한다. 현재 1280×1024 정도의 해상도까지 지원하는 제품이 있다.

원격조작기 등 유사한 성과들이 나타났다. 당시에는 “원격 촉각(teletouch)”에 관해 거의 관심이 없었지만, 원격촉각의 감지와 반영방식에 관한 연구도 있었다(Strickler, 1966).

1960년대 초반부터 원격매니플레이터와 비디오 카메라가 미국, 소련, 프랑스 해군등에 의해 잠수함에 장착되었으며, 실험적으로 사용되었다. 예를 들어 미해군의 CURV(Cable controlled Underwater Recovery Vehicle, 그림 3)는 1966년 스페인 Polomares에서 항공사고로 떨어진 핵폭탄을 깊은 해저바닥으로부터 회수하는데 성공적으로 사용되었다. 근해광물의 추출과 관련된 회사들과 해저케이블 회사들은 곧 잠수부를 대체하기 위하여, 특히 해저 깊은 곳에서 행해지는 석유나 가스 드릴작업용으로 이 기술에 관심을 돌리게 되었다.

1960년대 초반 달을 대상으로 한 원격시스템의 연구가 시작되었다. 지구와 달 사이의 전송시간 지연문제가 문제점으로 제기되었고, 지구와 달 사이의 페루프 제어방식은 안정성 문제때문에 실용적이지 못함이 밝혀졌다. 1965년까지의 실험은 시간지연에 의해 발생하는 원격작업과 월면차 제어의 문제들을 보여주었다(Ferrell, 1965). 특히 안정성을 유지하기 위한 유일한 방법은 귀환신호를 기다리지 않고 open loop로 움직인 후 다음의 open loop 동작을 하기 전에 전의 움직임에 대한 확인을 기다리는 것 뿐이었다(“move-and-wait” 방식). 실험결과는 큰 시간지연이 있는경우 간단한 원격 작업이라도 매우 오랜 시간이 걸리는 이유를 보여주었다.

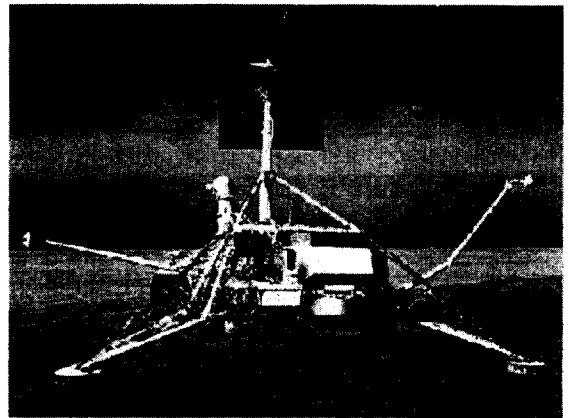


그림 4. Surveyor5.

“Surveyor”<sup>7)</sup>(그림 4)라 불린 달을 대상으로 한 초기의 원격제어기는 실제 우주작업을 통해 시간지연에 의한

7) 1966년부터 1968년까지 7호기까지 존재한 Surveyor 시리즈는 모두 텔레비전 카메라를 장착하였으며, 3호기와 7호기는 토양 채취를 위한 삽을, 5,6,7호기는 자석과 화학분석기까지 장착하였다

“move-and-wait” 문제를 생생하게 보여주었으며, 그 후 얼마 지나지 않아 시간지연에서 일어나는 문제를 극복하기 위하여 supervisory control 방식이 제안되었는데(Ferrell and Sheridan, 1967), 이 제어방식은 통신채널상에 시간지연이 없더라도 유익하게 사용될 수 있다는 것도 보여졌다.

한편 Crossman등(1974)은 원격제어와 관련해 동시에 복수개의 시스템을 제어하기 위한 인간의 주의력 할당에 관한 연구를 하였고, Tomovic(1969)은 human motor control에 있어서 신체의 동작을 위하여 상위계층에서 하위계층으로 주어진 명령은 어느정도의 시간동안은 효력이 없다는 human motor control의 계층적 성향을 지적하였다.

U.S. space agency의 핵 로켓 프로젝트가 60년대 원격제어 시스템의 발전에 중대한 공헌을 하였으나 프로젝트의 취소 이후 1970년대에 들어서는 우주 원격작업과 우주 원격로봇에 대한 지원이 거의 없어지게 되었다. 반면 소련은 최초의 원격제어 월면차인 Lunakhod의 성공 등 관련연구를 계속하였다.

1970년대에 들어서면서 서구의 원격작업에 대한관심은 해저 석유에 대한 경제적 요구로 인해 해저로 돌려졌다. 프랑스에서는 ERIC vehicle, 미국에서는 Hydroproducts RCV 150라는 작은 무인 잠수함들이 개발되었다. 이들은 원격 제어 비디오와 작업능력뿐 아니라 항해를 위한 추진기까지 포함하였다.

1970년대까지 산업용 로봇학 또한 엄청난 발전이 있었다. 미국의 Unimation, General Electric, Cincinnati Milacron, 일본의 히타치, 후지츠 등에서부터 유럽에 이르기까지 용접과 도색작업에 비교적 간단한 조립라인용 로봇을 이용하기 시작하였다. 1980년대에 이르러 산업용로봇은 손목 힘 센서와 간단한 컴퓨터 비전, 비교적 간단한 프로그래밍에 사용되는 버튼형 “teach-pendant” control box등을 장착하게 되었다. 이러한 발전과 함께 우주공간, 해저 또는 다른 극한환경에서 일하기 위한 원격제어 시스템은 산업용 로봇과는 다른 길을 걸어가게 되었다.

산업용 로봇은 속도와 정확도가 필요한 환경에서 예측가능한 작업을 반복함으로써 그 가치를 증명한바 있다. 인간의 프로그래밍은 대량생산을 위한 것이며, 작업중 다시 프로그래밍하는 일은 거의 없다. 반면 원격작업은 거의 혹은 전혀 같은 동일한 작업을 반복하는 일이 없다. 산업용 로봇의 작업이 오랜시간동안 인간에 의해 감시되지 않아도 좋은반면 직접 원격작업을 할 경우에는 인간은 계속 그 제어 루프속에 남아 있어야 하며, 인간은 의도한대로 결과가 나오고 있는지를 계속 관찰하면서 결과가 제대로 나오지 않을 경우 새로운 명령을 발생시켜야 한다.

### 3. 원격제어 시스템의 적용

#### 3.1 우주공간(Space)

우주탐사용 원격로봇의 첫번째 예제는 캐나다의 Spar Aerospace Ltd.라는 회사에서 만든 20미터 크기의 RMS (Remote Manipulator System)이다. 이 RMS는 캐나다 당국과의 계약하에 Canadarm(그림 5)이란 이름이 붙고, 미국 NASA의 스페이스 셔틀 프로그램에 기증되었다. 그 이후 다음 제품을 NASA에서 주문하게 되어 약 4억 달러에 팔리게 되었다. 이 Canadarm은 6자유도이며, 조작자가 창이나 온라인 비디오를 통하여 보면서 속도 입력을 위한 두개의 3축 조이스틱으로 조정하게 되어있는데 한 조이스틱은 병진을 위한 것이고 또 하나는 회전을 위한 것이다. 중량을 고려하여 팔이 매우 가볍도록 만들어졌다. 이것은 지구 중력하에서는 자중을 견딜수 없지만, 우주공간에서는 매우 느린 속도로 동작하면서 수백 킬로그램을 쉽게 움직일 수 있다. 마스터-슬레이브 제어는 이러한 낮은 각속도하에서는 적당하지가 못하며 적당한 컴퓨터 보조가 좌표변환을 이용한 resolved-rate control 의 형태로 존재한다(Whitney, 1969). 현재 개조와 발전을 거듭하며 NASA나, 맥도널 더글라스, 도시바, 포커, 보잉, 락웰사 등의 항공사에 팔리고 있다.

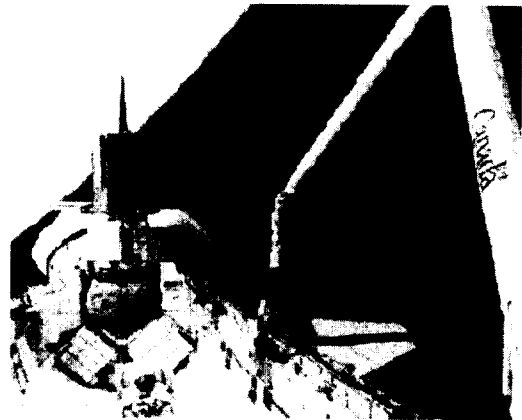


그림 5. Canadarm.

이후 한때 미국 우주 계획의 새로운 관심은 범용 작업기인 “Flight Telerobotic Servicer” (FTS)를 설계하는 것이었다. 이 FTS는 조작자가 타고 우주 공간을 날아다니면서 거의 사람 팔의 길이와 같은 두 로봇 팔로 작업을 하도록 계획되었으나, 1991년 취소되었다.

현재 NASA/JSC(Johnson Space Center)의 Automation Robotics and Simulation Division에서는 우주 원격제어를 위한 세계의 프로젝트가 진행중에 있다. MYO 프로젝트는 조작자의 피로도를 줄이기 위하여 근전도 신호(myoelectric signal)를 사용하여 슬레이브를 조종하려는

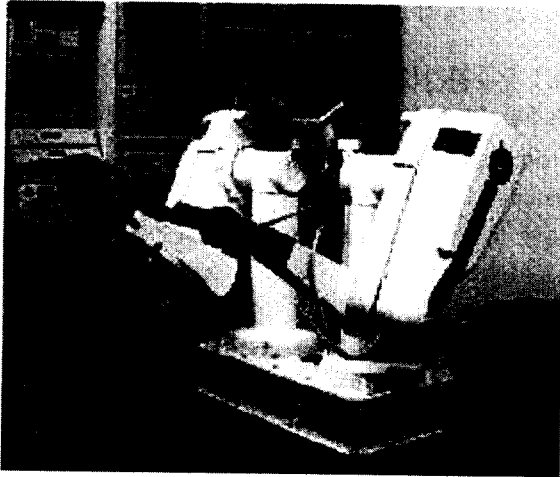


그림 6. DART.

계획이다. 1990년 시작한 DART(Dexterous Anthropomorphic Robotic Testbed) 프로젝트와 1992년 시작한 FITT(Full-Immersion Telepresence Testbed) 프로젝트는 최종적으로는 통합되어 하나의 통합된 원격제어 시스템을 구성하게 되어있다.

DART(그림 6)는 개조한 PUMA-562 매니퓰레이터를 이용한 두 팔을 가진 슬레이브 로봇으로, 최대한 인간의 능력에 가깝고, 우주공간에서 효율성 있도록 설계되었다. 양 팔 각 3축의 끝에 로봇 핸드와 평형 gripper를 부착하고, 두개의 칼라 카메라가 있으며, 전체 26 자유도를 가진다. 한편, FITT(그림 7)는 우주 공간상에서의 원격로봇의 제어와 훈련을 위해 몇가지 첨단 원격존재감 기술과 가상현실 요소를 집적하는 testbed 시스템을 개발하는 것을 목적으로



그림 7. FITT.

하고있다. 이 시스템은 모터로 회전시킬 수 있는 의자, 입체 비전을 위한 VR4<sup>8)</sup> HMD(Head-Mounted Display), 손의 움직임을 측정할 수 있도록 한 한쌍의 CyberGlove로 구성되어 있다. 힘반영을 위한 EAM(Exoskeleton Armx Master)(그림 8) 또한 장착가능하며, 컴퓨터와의 교신을 위해 말하는 사람과는 상관없이 인식하는 음성인식 시스템 또한 가능하다.

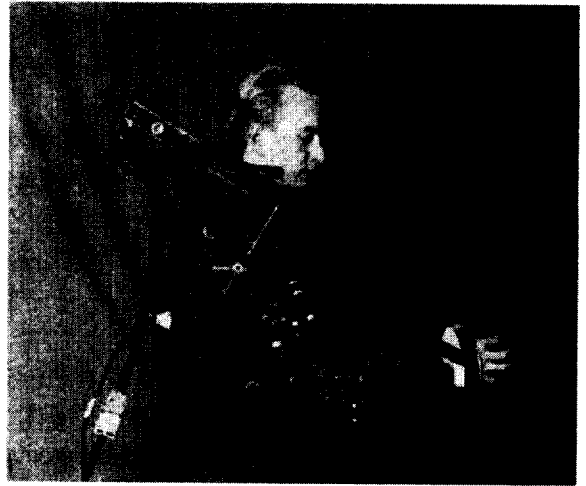


그림 8. EAM.

### 3.2 해저

1980년까지 ROV(Remotely Operated Vehicle)이라 불리는 해저 원격제어 시스템이 근해 석유회사나 가스회사 등에 의해 널리 퍼지게 되었다. 이러한 발전은 300 미터 깊이에 시간당 만달러를 훑아하는 잠수부들의 비용에도 그 원인의 일부가 있었다(회사들은 바닷속을 올라가고 내려가는데 걸리는 시간낭비와 장비를 위한 비용을 감수해야만 했다). 하지만 아마 훨씬 중요한 이유는 생명의 위험때문인 것으로 보인다-북해 석유작업에만 50명이 넘는 잠수부들이 목숨을 잃었다. 이러한 비용과 위험 수치가 유인 잠수정에 비하여 ROV를 훨씬 비중있게 만들었다.

석유채굴의 이득이 줄어들며 따라 근해 작업의 추세도 느려지고 있지만, ROV 기술의 발전은 계속되고 있다. 대부분의 해저 매니퓰레이터는 높은 압력과 열악한 환경을 만족시키기 위하여 유압으로 동작한다. 또한 직접구동형 마스터-슬레이브와 조정용 조이스틱이 ROV와 유인 잠수정에 장착되고 있다.유인 잠수정에 장착되는 경우, 원격제어기는 불과 몇미터 떨어지지 않은 곳에서 잠수정의 창문을 통해서 인간 조작자에 의해 제어된다. 대부분의 중요한 조립작업은 해수면 위에서 이루어지며 아주 세밀한 기술적 요구가 거의 없

8) Virtual Research사에서 판매중인 HMD의 하나. 247×230의 해상도를 가진다. 이후 개발된 VR5는 640×480의 해상도를 가진다.

이 단지 고정과 검사정도의 일만 하면되는데, 그정도의 간단한 유지로도 신뢰성이 좋다고 한다. ROV의 또 한가지 재미있는 사용처는 잠수부를 감독하는 것이다. 안전을 위한다는 이유도 있고, 그들에게 들어가는 높은 비용에 걸맞게 일하고 있는지를 감시하는 역할도 하는 것이다.

해양지질학자와 해양생물학자들은 과학조사를 위하여 ROV를 사용할 것에 대해 깊은 관심을 가지게 되었다. 과학자들은 특 트인 넓은 시야를 가지는 유인잠수정을 좋아하지만, 그러한 장비의 위험과 비용은 싫어할 수 밖에 없다. 때때로 유인잠수정과 ROV가 함께 사용되기도 한다. 예를들어 1987년의 Woods Hole Oceanographic Institution의 타이타닉호 탐사<sup>9)</sup> 때는 Alvin이라는 2인승 유인잠수정과 Argo와 Jason Junior (그림 9)라는 두개의 무인 잠수정을 함께 사용하였다(Ballard, 1986). Argo는 소나, 비디오, 사진기 등을 장착한 3500 미터의 기다란 케이블에 매달린 무거운 잠수정이었고, Jason Junior는 지름이 0.5 미터가 되지 않는 작은 “헤엄치는 비디오 카메라”였다. 석유회사와는 달리 해양 생물학자들은 연구중인 생물들을 해치지 않도록 완만하고 내밀한 형태의 잠수정을 필요로한다. 작업에 필요로 하는 힘은 훨씬 작아도 석유 탐사정보보다 훨씬 높은 기민성과 유연능력을 가진 것을 원하는 것이다.



그림 9. Jason Jr.

### 3.3 원자력 발전소

원자력 발전소용 원격제어 시스템의 연구는 우주개발을 제외하고는 많은 원격제어의 적용분야들 중에서 가장 규모가 크다고 할 수 있다. 이는 방사능에 노출될 위험이 있는 곳에서 얼마나 절실하게 원격제어 시스템을 필요로 하는지를 대변해준다. 여기서는 힘반영 마스터-슬레이브 시스템에 많은 비중을 두며, 양팔 협력형으로 제작하는 것이 거의 표준처럼 되어있다. 원자력 발전소용으로 사용되는 시스템은 오랫동안 높은 방사성 밀폐공간등을 고려하여 매우 신뢰성이 좋아야만 한다. 현재 원자력 발전소용 원격로봇들은 증

기 보일러의 튜브수리나 다른 보수작업들을 위하여 이동성과 기능성이 훨씬 좋아지고 있다. 예를 들어 일본에서는 금이갔는지를 살피기 위해 파이프 바깥면을 따라 기어가는 로봇 시스템까지 개발되었다.

### 3.4 장애인을 위한 보조기구

세계 제2차 대전 이후, 전쟁으로 인해 발생한 많은 장애인들을 위해 인공자동의수(artificial prosthetic arm)를 개발하고자 하는 많은 연구가 진행되어 왔다. 1961년에 Wiener가 기계장치 제어에 생물학적 신호를 사용할 수 있다는 가능성을 제시하고, Reiter가 근육 수축시에 발생하는 미세한 전압신호인 근전도신호(myoelectric signal)를 이용하여 제어되는 손을 개발한 이후, 소수의 연구단체나 학교에서 지속적인 개발시도가 이루어져 왔다.

외부 동력으로 동작하게 하는 인공 자동의수의 연구되어 온 상황을 간단히 살펴보면 다음과 같다. 1950년 이후로부터 IBM 팔, 러시아인 근전도 의수(Russian EMG controlled hand), 비나톤 팔(Vienatone hand), 보스톤 Elbow, 오토복 핸드(Otto Bock Hand), 휘데리티 핸드(Fidelity Hand), 이텔리언 팔, 유타 팔(Utah Arm) 등 미국, 일본, 유럽 등 각지에서 이밖에도 많은 자동의수들이 개발되어져 왔다. 이들 중 유타팔과 오토복핸드는 상품화까지 성공한 가장 진보된 자동의수로서, 장애인의 어깨나 등에 부착된 여러 개의 전극에서 측정된 근전도 신호에 따라 의수의 각부관절이 움직임으로써 장애인이 스스로 간단한 동작을 할 수 있게 되어있다.

현재 많은 팔 장애인들이 근전도 신호(myoelectric signal)의 디지털 처리 기능과 현대식 구동 기능을 갖추고 자연스럽게 보이는 손까지 달린 의수를 착용하고 있다. 또, 몸에 실제로 착용하는 기구, 즉 의수같은 형태와는 달리 휠체어나 침대에 장착하는 원격제어 시스템도 있다. 이러한 시스템들은 그 적용의 특성때문에 아주 특별한 요구사항을 만족시켜야만 한다. 충분한 기능을 갖추어야 할 뿐 아니라 너무 이상하게 생겨서 시선을 끌지 않아야 한다. 대부분의 장애인들은 많은 기능을 가진 것이 아니더라도 이상하게 보이지 않는 것을 더 좋아하는 경향이 있다. Tachi(1981)은 장남을 위한 원격제어 전기기계 길안내 개의 개발을 언급하고 있다.

최근 오토복 (Otto Bock)사에서 나온 의수(그림 10)는 근전도 신호를 사용하여, 물건을 잡는 속도와 힘을 조절할 수 있도록 되어있다. 손가락은 초당 15mm에서 130mm까지 움직일 수 있으며, 잡는 힘은 0N에서 100N까지 조절이 가능하다. 국내에서는 1994년 포항공대에서 최초로 Biro I이라는 자동의수의 개발에 성공하였다. 그림 11에 보이는 Biro I은 손가락과 손목, 팔꿈치의 3자유도를 가지며, 오토복사의 근전도 센서 3개를 통해 제어하도록 구성되어 있다.

9) 1985년 R. Ballard 박사는 타이타닉호의 침몰장소를 발견하고, 그 이듬해부터 침몰선 탐사작업에 들어간다.

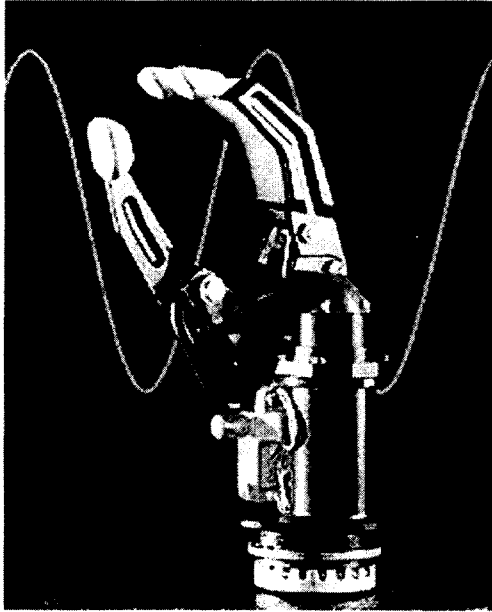


그림 10. Otto Bock사의 자동의 수.

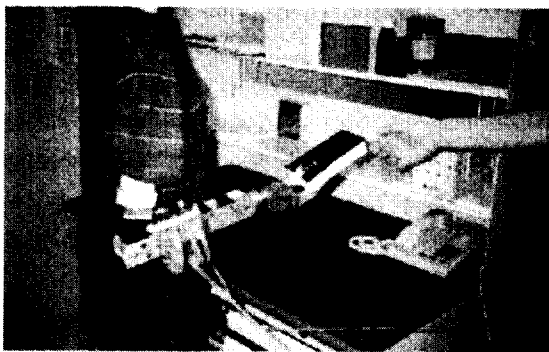


그림 11. POSTECH Biroarm I.

### 3.5 원격수술 (Telesurgery)

원격수술은 매우 촉망받는 분야중의 하나이지만, 동시에 매우 정확하고 힘든 기술적 수준이 요구된다. 이때문에 내시경(endoscope)과 같은 간단한 탐색이나 진단만 원격제어가 담당해오다가, 점점 원격제어를 통하여 직접 수술을 하려는 방향으로 나아가고 있다. JPL(Jet Propulsion Laboratory)은 기존에 축적되어온 NASA의 원격기술을 바탕으로 Robot Assisted Microsurgery System(RAMS)이라 불리는 의료용 원격시스템을 개발중에 있다. 이 시스템은 우수한 미세수술 전문의의 협력하에 개발되고 있으며, 뇌, 눈, 귀, 코등에 새로운 수술방식을 가능하게 할 것이다. 그 결과는 실제 적용을 통하여 평가될 것이며, Microdexterity Systems, Inc.(MDS)와의 협력으로 상용화 될 예정이다. 여기서 MDS는 수요 창출, 의학적 실험, 법적 허가와 기술의 상용화등을 맡게 되고, JPL은 시스템을 설계, 개발하고 검증하는 역할을 하게 된다.

RAMS의 구조는 프로그램 가능한 6자유도의 마스터-슬레이브형 원격매니퓰레이터이다. RAMS의 첫번째 제어모드는 task-frame referenced manual force feedback과 textural feedback을 포함하는 원격작업용이지만, 조작자가 대화형 지시나 로봇 경로의 자동 제어를 지정할 수도 있다. RAMS는 미세수술의 스케일만 바꿔줄 뿐 아니라, include feature를 제어하고, 종양의 표면을 따라 이동하는 등 시술자에게 좋은 시술이 되도록 도와준다.

JPL의 RAMS 기술팀은 이미 마스터와 슬레이브 팔의 프로토타입을 개발하고 원격조작 시스템으로 세팅하였다. 슬레이브 팔은 그 끝을 25마이크론의 정밀도로 움직일 수 있으며, 마스터 팔은 입력 움직임을 30마이크론까지 측정할 수 있다. 현재 시뮬레이션용 미세수술대에서 시스템의 가능성을 테스트 중에 있다.

한편 일본 나고야 대학의 후쿠다 실험실은 원격수술을 위한 능동형 catheter 조작 시스템과 같은 의료보조 시스템을 개발중에 있다. 이것은 멀티미디어 원격의료 시스템이라고 불리며, 마이크로 로보틱스, 원격제어, 멀티미디어, 가상현실과 같은 기술들을 모두 통합하며, 그 실험설비는 나고야 대학으로부터 약 350 킬로미터 떨어진 동경의 와세다까지 고속 광케이블을 통하여 조이스틱으로 조작하게끔 되어있다.



그림 12. RAMS.

### 3.6 기타 적용

#### 건설 및 유지보수

건설분야에서는 원격제어기에 대한 많은 형태의 요구가 있으며, 각각 다른 기술적인 면을 필요로 한다. 땅을 고르는 작업이나 건축자재의 조립은 보통 공장에서의 조립과는 다른 면이 있다. 또한 파워라인을 수리하고, 나무로부터 가지를 쳐내고, 다리의 상태를 감시또는 유지보수를 하고, 고층 빌딩의 창문을 닦거나, 공장 설비중 작업자에게 위험한 환경을 청소하는 것(Edahiro, 1983) 도 원격제어의 적용가능

성이 보인다.

### 창고관리(Warehousing)

창고관리를 위한 원격로봇은 수십년전부터 직접적인 형태로 존재해 왔다. 이 경우 3차원 공간의 한 장소에 가서, 어떤 물건이나 컨테이너를 집어 중앙위치로 갖고오는 역할을 하도록 프로그램된 원격로봇을 기초로 한 건물이 한 예이다.

### 화재진화(Firefighting)

이것은 아직 발전되지 않은 원격제어의 한 형태이다. 그러나 이것이 단순히 위험한 화재속에서 소방관의 시정각을 넓히는 정도에 불과할 지라도 큰 역할을 하게된다. 예를 들어 생명을 잃는 일 없이 소방관과 위험에 처한 사람 모두를 신속하게 구조 할 수 있다.

### 치안(Policing)

치안기능의 한 예는 작업시간이 지난 공장이나 상점의 경비 업무이다. 현재 비디오 카메라와 마이크를 달고 미리 계획된 경로와 스케줄을 따라 이동하도록 하는 원격로봇이 있다. 물론 중앙의 조작자의 의도에 따라 수동으로 제어될 수도 있다. 많은 전기기계식 경비는 한명의 인간 조작자에 의해 감시되고 제어될 수 있다.

### 군용작업(Military Operation)

원격제어기는 군인이 어떤 위험한 지역에서 자신을 노출시키지 않고 정찰과 임무 수행을 하는 수단으로서 군용기술자들의 관심을 끌고 있다. 이 예로 지뢰나 다른 폭발물의 발견과 제거, 적의 사격에 노출되지 않은 상태에서의 적 동정 관찰, 원격조작 비행기등을 들 수 있다. "battlefield robotics"는 인간 조작자의 필요성때문에 주로 원격제어기를 의미한다. "스타워즈" 기술조차도 궁극적인 책임이 컴퓨터에 주어지는 것은 상상하기 어려운 것이다.

## 4. Telesensing

### 4.1 원격 비전(Television)

현재 텔레비전과 같은 화상전송 기술은 높은 해상도, 명암, 속도, 색상등을 자랑하며 고도로 발전하여 왔으며, 그 자체로는 원격작업을 위하여 충분한 기술이 되고 있다. 그러나 원격작업을 위한 비전시스템에서는 보통의 TV와는 다른 몇 가지 문제들이 발생하게 된다. 이 중 가장 두드러진 것이 바로 "깊이 인식(depth perception)"으로, 원격 작업이 직접적인 작업에 비하여 효율이 떨어지는 주요 원인이 된다.

물론 상대적 크기, 그림자, 가려진 부분이나 상황에 대한

지식등의 시각적인 단서들이 존재할 수도 있으나, 두 눈을 사용함으로써 얻어지는 입체감각, 밝기나 원근에 대한 눈의 조절작용, 그리고 머리를 움직여서 여러 각도를 볼 수있는 능력등은 보통의 비디오 화상에는 존재하지 않는다. 그러나 이것들이 원격존재감(telepresence)에 있어서 매우 중요하다는 사실은 이미 잘 알려져 있는 바이다(Spain and Pepper, 1984).

가장 촉망되는 것은 어떤수의 사람이라도 끼고있는 극성안경에 동기화시켜 수직 극성과 수평 극성의 비디오 라인을 번갈아 표현하는 디스플레이 화면에 액정 편광기를 사용하는 기술이다. 현재 상용화 되어 있는 제품들중 가장 유명한 StereoGraphics사의 CrystalEyes가 그림 13에 나와있다. 최근 이 회사는 CrystalEyes가 600 달러선인데 비해 오락이나 멀티미디어등으로 사용 가능한 200 달러가 채 못미치는 SimulEyes라는 저렴한 제품을 내놓았다.

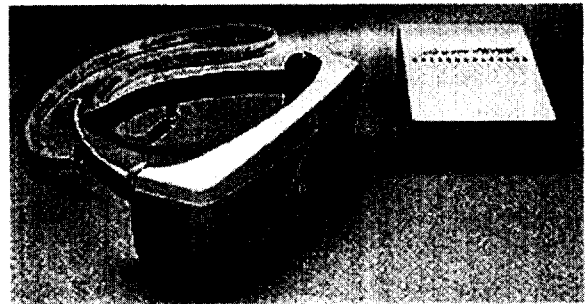


그림 13. CrystalEyes.

### Header Tracking

Header Tracker는 비디오 디스플레이가 조작자의 머리에 고정되고, 조작자의 머리의 움직임에 따라서 카메라가 따라 움직인다. 조작자는(멀리 떨어져 있는) 카메라의 위치에 자기 자신이 존재하는 것처럼 느낄 수 있다.

### Augmented Reality

실제 화상에 부가적인 정보를 넣어주는 것이 조작자에게 도움이 될 수 있다. Kim et al.(1985), Winey (1981) 등은 기준점으로부터의 거리에 따른 격자선을 컴퓨터로 생성하여 비디오 화상에 겹쳐넣어주는 것이<sup>10)</sup> 관찰자가 물체의 상대적 깊이를 이해하기 쉽다는 것을 보였다. 비행기 조종사의 "head-up" 디스플레이와 같이 비디오 화상에 다른 중요한 그래픽을 넣어주는것도 조작자가 컴퓨터 화면과 비디오 화상을 번갈아 쳐다보지 않아도되게 해주는 한 방법이 되고 있다. 또, 실제 원격제어기를 쳐다보면서, 현재 상황에 대한 정보를 얻어낼 수 있는 Optical See-Through HMD와 같은 형태도 있다(그림 14, 15).

\* 여기서 깊이(depth)란 물체의 원근을 말하는 용어이다

10) 이것을 superposition이라고 부른다



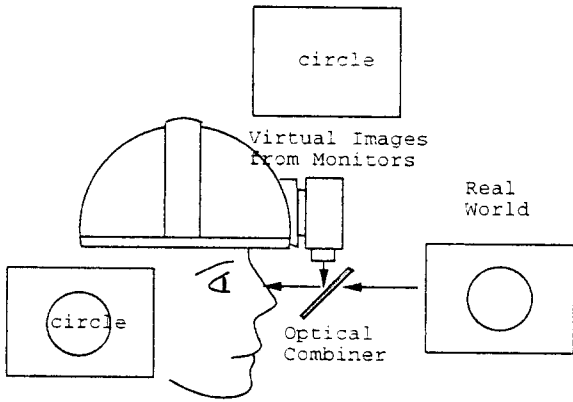


그림 14. Augmented Reality를 위한 HMD.

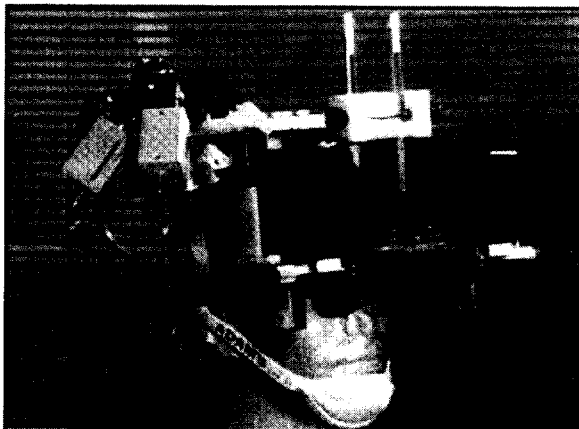


그림 15. Optical See-Through HMD.

### AOI(Area of Interest) 시스템

AOI(Area of Interest) 시스템은 조작자가 보는 중심영역은 고해상도로, 그리고 시야의 주변은 저해상도로 디스플레이 하는 시스템이다. 조작자의 집중력을 높여주고, 비용도 절감될 수 있는 이 시스템은 초기에는 고해상도와 저해상도를 같이 표현하는 기술적으로 많은 어려움이 있었다. 특히 두종류의 해상사이의 경계선이 발생하는 것을 처리하기 어려웠으나, General Electric사에서 두종류의 해상도를 혼합하는 광학마스크를 도입하여 이 문제를 해결하게 되었다.

### VRD(Virtual Reality Display)

1992년 워싱턴 대학의 인간공학 연구소(HIT: Human Interface Technology Laboratory)는 컴퓨터로 조정되는 레이저 광선을 이용하여 직접 눈의 망막에 화상이 맺히도록 함으로써 선명도를 높이고 입체영상을 즐길 수 있는 VRD(Virtual Reality Display)를 개발하였다. 이 시스템은 VRD칩을 안경다리에 부착시켜 이곳에서 쏘아진 레이저 광선이 안경렌즈에 반사되어 망막에 상을 맺히게 하는 원리를 사용하고 있으며, 400×300의 해상도와 초당 66 프레임, 시야 35도까지 지원된다.

## 4.2 Resolved force sensing

Resolved force sensing은 인간 신체의 관절, 근육과 힘줄의 감각기관이 손으로부터 환경에 가해지는 또는 환경으로부터 손에 가해지는 모든 힘과 토크 성분들의 벡터합의 크기를 측정하는 것을 말한다(간단히 말하면 손에 가해지는 상대적인 힘을 느끼는 것이다). 힘반영 마스터-슬레이브 시스템에서 이 힘은 (1) 소위 손목 힘센서라고 불리는 로봇의 손목부위에 장착된 스트레인 게이지 브리지를 이용하거나 (2) 마스터와 슬레이브에 각각 부착된 위치센서를 이용하거나 (3) 전기모터의 전류나 유압 구동기의 압력차를 이용하기도 한다.

컴퓨터의 계산능력이 미흡하던 과거에는 힘반영을 위하여 마스터와 슬레이브가 같은 기구학적 구조를 가져야만 했으나, 좌표변환을 이용하면 같은 기구학적 구조가 아니더라도 상관없이 있다는 사실이 보여졌다(Corker and Bejczy, 1985). 또한 속도제어용 조이스틱에도 이러한 힘반영이 적용될 수 있다는 사실도 보여졌다.

Resolved force sensing을 위한 힘반영은 기본적으로 힘 기준 힘반영과 위치기준 힘반영으로 나눌 수 있다. 그러나 각자의 단점들 때문에 요즘은 두가지 방식을 조합하여 많이 사용하며, 속도 신호나 가속도 신호까지 이용하기도 한다.

### 힘기준 힘반영

(1) 슬레이브에 장착된 손목 힘센서를 이용하여 힘을 측정한다. (2) 측정된 힘을 슬레이브의 기준 좌표계로 변환시킨다. 이 좌표변환된 힘이 마스터암을 쥐고있는 조작자의 손에 반영되어야 할 힘이다. 그러므로, (3) 마스터암의 자코비안(jacobian)을 이용하여 이와 등가한 힘을 내어주게 되는 마스터암의 구동력을 얻을 수 있다(그림 16).

이 방식은 실제 구현에 있어서 노이즈와 필터링으로 인한 phase lag사이의 절충이 필요하다. 힘센서나 가속도 센서는 항상 노이즈를 동반하므로 이를 제거하고 정밀한 힘을 측정하기 위하여 노이즈의 주파수에 준하는 필터링이 필요하다. 그러나 강한 필터를 사용할 수록 phase lag현상이 발생하여 마스터와 슬레이브의 움직임간에 시간차가 발생한다. 여타

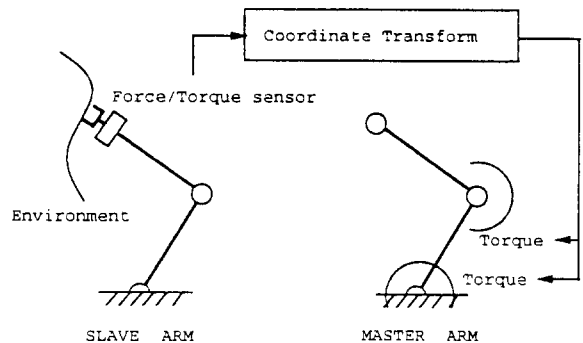


그림 16. 힘기준 힘반영.

로봇 시스템과는 달리 인간은 매우 조금의 시간차에도 민감하므로, 여기서 절충의 선택을 해야만 한다.

### 위치기준 힘반영

위치기준 힘반영 방식은 마스터와 슬레이브의 위치 차이에 일정한 값을 곱한만큼의 힘을 반영해준다. 그림 17과 같이 마스터와 슬레이브의 위치에 오차가 전혀 없다고 가정을 하면, 슬레이브가 작업대상과 접촉함으로써 생기는 위치오차에 의하여 그 힘을 추정해 낼 수 있고, 그만큼의 힘을 반영해 주게 된다. 만약 작업대상과 슬레이브의 정확한 탄성계수를 알 수 있으면 후크의 법칙으로부터 정확한 힘을 알아낼 수 있으나, 원격제어에서 작업대상이 일정한 경우는 거의 없으므로, 그 상대적인 크기만을 알 수 있다는 단점이 있다. 위치기준 힘반영의 실제 적용에 있어서 높은 차수의 제어를 사용할 경우 phase lag 에 의한 위치 오차때문에 역효과를 줄 수 있고, 정확한 작업대상의 느낌을 반영할 수 없는 등의 단점때문에 단독으로 사용되는 경우는 거의 없고, 힘기준 힘반영과 함께 사용된다.

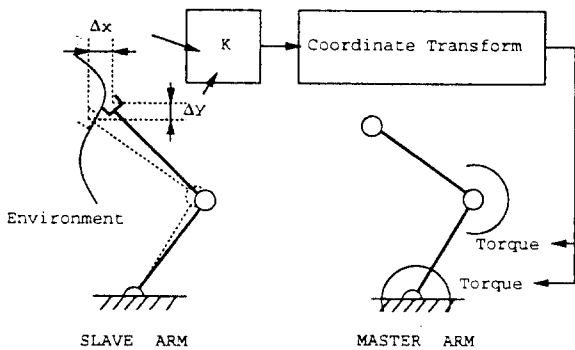


그림 17. 위치기준 힘반영.

### 4.3 원격촉각

원격촉각은 여러가지 형태의 힘을 느끼는 것을 의미할 수 있지만, 정확히 말하면 피부가 압력차를 느끼는 것, 즉 피부가 힘의 패턴을 감지하는 것을 말한다. 이러한 힘의 패턴은 대체로 배열식 센서를 사용하여 측정을 하는데, 촉감의 측정에 있어서는 센서가 감지할 수 있는 압력과 변형, 해상도 등이 주요 연구 대상이 되고 있다. Capacitive tactile array sensor는 구리선의 배열을 2층으로 교차배열하여, 힘이 가해질 경우 구리선 사이의 길이가 줄어 구리선 사이의 capacitance가 늘어나는 원리를 이용한다. 이 외에도 광학을 사용한 방식, tensor cell을 이용한 방식등이 있다. 이러한 촉감센서를 원격제어를 위하여 사용하기 위하여는 슬레이브에 장착해야 한다는 제한때문에 이에 맞는 형태를 선택하여 사용하게 된다.

촉각반영의 경우, 한때는 이렇게 측정된 압력 패턴을 그래픽의 형태로 조작자에게 보여주거나 마스터 암이나 조이

스틱을 쥐고있는 조작자의 신체의 다른 부분에 힘반영을 시키는 방식이 유행하였으나, 현재는 이러한 단계를 지나서 핀배열을 이용하여 진동을 발생시키는 방식과 핀배열을 이용하여 직접 힘을 가하는 방식이 유행하고 있다.

Virtual Technologies, Inc. 에서 CyberGlove의 옵션으로 판매하고 있는 CyberTouch라는 제품은 진동식 촉각 반영을 제공해 준다. CyberTouch는 작은 진동 발생기를 각 손가락과 손바닥에 장착하게 되어있으며, 진동 발생기는 촉감의 강도를 변화시키기 위하여 따로 제어 될 수 있다. 진동 발생기의 배열은 펄스나 계속적인 진동과 같은 간단한 촉감을 발생시킬 수 있으며, 복잡한 촉감 패턴을 제공하기 위하여 결합하여 사용될 수도 있다.

한편 직접 힘의 패턴을 전달하는 방식은 진동식에 비하여 구현이 쉽지가 않으며, 반면 많은 연구가 뒤따르고 있다. Fearing (1992) 은 핀을 가로세로 5×5의 배열로 배치하여, 공압을 통해 압력 패턴을 전달하고자 하였으나 구동방식으로 발미암아 마스터 암에 설치하지는 못하였다. 한편 Hasser와 Weisenberger (1993)는 형상기억합금을 이용하여 6×6의 크기로 마스터의 손가락 끝에 장착에는 성공하였지만, 그 힘의 크기가 너무 작아 한 요소당 0.2N에 불과하였다. 최근 Kontarinis (1995)는 그림 18과 같이 지렛대 원리를 이용하여 6×4로 1N 정도의 힘을 내며, 핸드에 장착 가능한 촉각반영을 성공하였다. 그러나 그 해상도와 장치의 크기등은 아직 많은 발전을 필요로 하고있다.

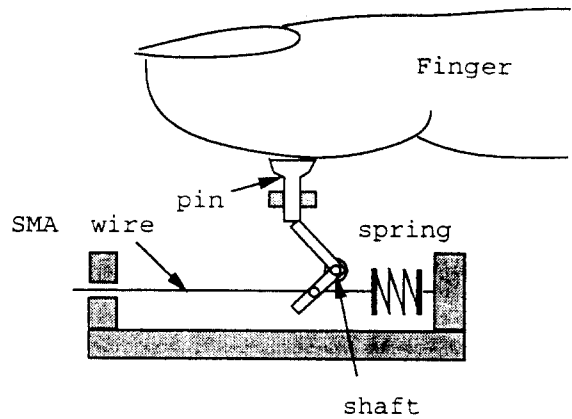


그림 18. Kontarinis의 촉각반영 방식.

### 4.4 근접감각(Proximity sensing)

인간은 보통 시각적으로밖에 근접 정도를 느낄 수 없지만, 고양이는 수영이나 후각을 통해서, 또 박쥐와 장님은 소리나 얼굴에 느껴지는 진동을 통해서 물체가 가까이 있는 정도를 알 수 있다. 원격제어 시스템에서 전자기 시스템이나 광학 시스템은 장애물과 충돌을 피하고, 작업 대상물에 접근할 때 언제 속도를 늦추어야 하는지를 결정하는데 근접도를 측정하기 위하여 사용될 수 있다(Bejczy et al, 1980).

종종 촬영거리 조절기에 이용되는 근거리 음파 탐지기 또한 사용될 수 있다. 이러한 부가적인 정보들은 컴퓨터 그래픽을 이용하여 표현될 수 있으며, 만약 사람의 눈에 부담이 될 것 같은 경우에는 소리의 형태로 표현될 수도 있을 것이다.

## 5. Teleactuating

### 5.1 다자유도 end-effectors

인간의 손에서 볼 수 있듯이, 다자유도를 가진 end-effector는 확실히 필요한 것임을 알 수가 있다. 그러나 아직 몇 가지 실험실의 프로토타입을 넘어서지를 못하고 있는 것이 현실이다. 많은 상용 매니플레이터는 간단한 평형 gripper를 장착하고 있으며, 몇몇은 갈고랑쇠나 자석식 또는 gripping mechanism, 용접, 착색 등을 위한 특수 장치를 장착한다. 1 자유도 end-effector에는 parallel-jaw gripping이 가장 뚜렷한 기능으로 보이지만, 2 자유도 이상에서는 그 기능이 뚜렷하지 않다.

### 5.2 양팔 협력형 시스템

이것은 훨씬 다양한 작업을 가능하게 해주며, 현재는 원자력 발전소용으로서 거의 표준처럼 되었다. 그러나 아직까지 산업용이나 해저용으로는 거의 볼 수 없다. 하지만 우주개발용과 각종 프로토타입으로는 매우 많은 예제들을 찾을 수 있다.

### 5.3 여유자유도 hand-arm-vehicle 시스템

원자력 발전소 유지와 폭탄 제거 등에서 팔달린 원격조종 vehicle은 큰 요구가 있어왔다. 그러한 기구들에서 특별한 문제들은 중심을 잃지않고 계단을 오르고, 팔이나 vehicle이 물체에 접근하는 정도에 따라 힘반영을 주는 것 따위이다. Clement *et al.*(1988) 은 모바일(mobile)과 매니플레이터의 결합형인 원격조작기 Centaure를 개발하였다. 이후 바퀴달린 모바일이 아니라 4개의 발과 2개의 팔, 핸드, 카메라가 달린 형태의 원격 제어시스템이 등장하였다. 이러한 형태들은 유럽신화의 센타우루스를 본따 모두 Centaur라 불리고 있다.

마스터 암과 같이 손에 쥐고하는 하는 형태가 아닌, “exo-skeleton” 즉 인간의 골격을 따라 장착하는 마스터와 이와 동형의 슬레이브를 사용하게 되면 따로 기구학을 풀 필요가 없기때문에 여유자유도 매니플레이터에서 생기는 특이점 문제를 자동적으로 해결하게 된다. 그래서 최근 마스터와 슬레이브를 모두 자체 설계제작한 원격제어 시스템은 여유자유도를 가지는 것이 많다.

### 5.4 Hand control devices

Hand control device는 보통 속도 제어용과 위치 제어용

으로 나눌 수 있다. 속도 제어용은 조이스틱의 형태를 많이 띠며, 6 자유도의 경우 병진운동을 위한 조이스틱과 회전운동을 위한 조이스틱의 2개로 구성된다. 이는 암이 길고 움직임이 느린 우주 작업에서 많이 사용되어 왔다. 그러나 이러한 속도 제어용 기구로서는 힘 귀환이 적당하지 않다는 것이 증명되었다.

한편 위치 제어용은 주로 마스터 암(master arm)의 형태를 가진다. 이것은 빠른 움직임이 요구되는 원자력 발전소 같은 곳에서 많이 사용된다. 마스터 암이 슬레이브 팔과 기구학적으로 동일구조를 가질 수도 있지만, Brooks and Bejczy (1985) 는 꼭 같은 형태가 아니더라도 상관없다는 것을 보였다. 마스터와 슬레이브가 다른 기구학적 구조를 가지더라도 간단한 알고리즘을 사용하여 위치 제어용 마스터 암의 관절 각 위치나 속도 제어용 조이스틱의 관절 각속도를 슬레이브 end-effector에 일치하는 방향명령으로 변환시킬 수 있기 때문이다(Whitney,1969).

최근들어서 레이저 기술과 마이크로일렉트로닉스는 한 손으로 병진속도와 회전속도 명령을 모두 내릴 수 있는 isometric 6축 hand controller의 개발을 가능하게 하였다(Hirzinger,1987). 이것은 예를들어 왼손으로는 6자유도의 vehicle을 조작하고, 오른손으로는 6자유도 팔을 조작하는 것이 가능해진다. 그러나 어떤 축에 대한 feedback 정보가 부족할 경우 사용자는 독립적으로 어떤 한 축을 움직이기가 힘들다는 것을 발견하였다.

Cybernet Systems, Co.에서는 1축부터 6축까지의 힘반영 마스터 암을 판매하고 있다. 이중 6-DOF PER-Force

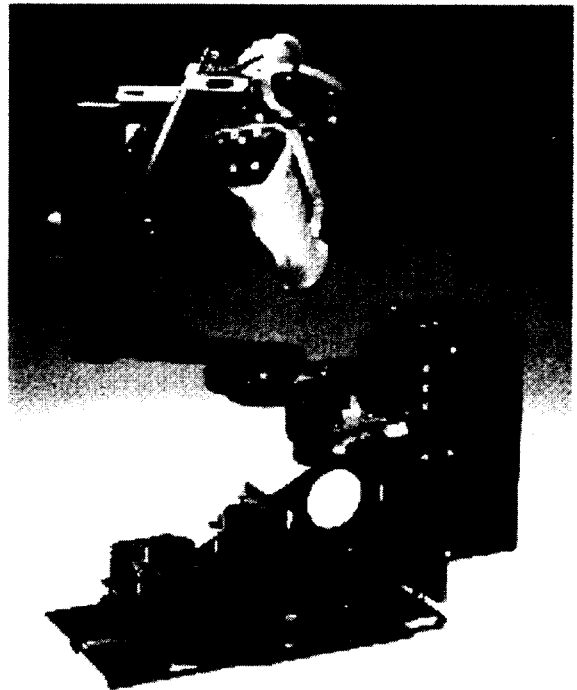


그림 19. 6-DOF PER-Force Handcontroller.

Handcontroller는 3개의 선형축과 3개의 회전축을 이용하여 6자유도를 가지며, 각각의 축에 6개의 작은 brushless DC 서보모터가 장착되어 6축 힘반영까지 가능하다(그림 19).

포항공대에서 1994년 말 완성된 세번째 마스터 암인 POSTECH Master Arm III는 기본적으로 Balaman 구조를 채택하여 2개의 공압실린더를 이용한 중력상쇄, 비연성화된 기구학등의 특징을 가진다. 위치 파악을 위한 전 3축은 potentiometer와 encoder 모두 사용이 가능하며, 회전을 위한 후 3축에는 potentiometer가 부착되어 있다. 3축 힘반영을 위하여 3개의 AC 서보모터가 부착되어 있어 있으며, 커다란 힘을 낼고 동시에 역구동성을 가지도록 풀리를 사용하여 동력을 전달한다.(그림 20).

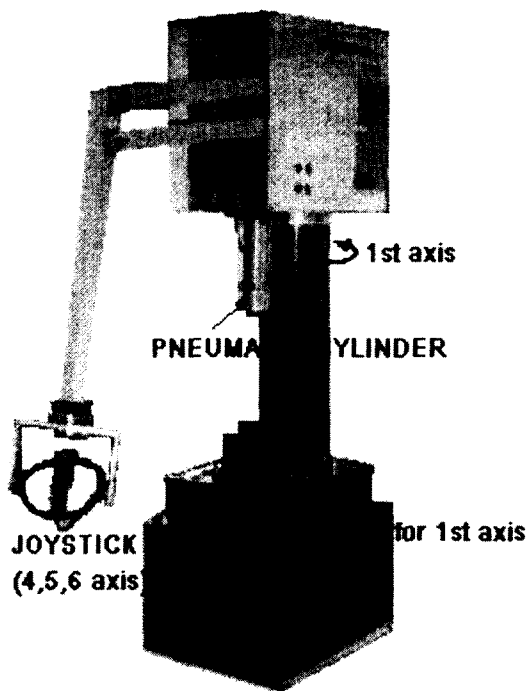


그림 20. POSTECH Master Arm III.

#### 힘반영 마스터 암의 설계

힘반영 마스터 암의 설계는 기본적으로는 매니플레이터의 설계와 동일하다. 바꾸어 말하면 3축 힘반영이 가능한 마스터암은 3축 매니플레이터로도 동작할 수 있다는 것을 의미한다. 마스터 암으로 동작하기 위하여는 이에 추가하여 인간 조작자를 위하여 기본적인 몇가지 제한조건이 부가된다.

첫째, 조작자의 피로를 고려하여 움직이기 쉬워야 한다. 가볍게 만드는 것도 한 방법이 될 수가 있고, counter balancing등을 사용하여 중력상쇄를 시킬 수도 있다. 물론 회전 관성이 조작자에게 주는 부담까지 고려를 해야한다. 너무 가볍게 만들면 조작자의 힘을 견디지 못하여 변형이나

파괴가 일어날 수 있으므로, 이 사이에서 절충이 필요하다. 둘째, 반응속도가 빨라야 한다. 인간은 약간의 시간지연에도 민감하게 반응하고, 시간지연은 시스템 전체를 불안정하게 만들 수 있다. 공압이나 유압은 그 반응속도가 떨어지고, 마찰저항때문에 조작자가 쉽게 피로해지므로, 주로 모터를 사용하게 된다. 셋째, 역구동성이 있어야 한다. 힘반영 도중에도 인간이 마스터 암을 밀면 밀릴 수 있어야 한다. 그런 이유로 기어는 거의 사용되지 않는다.

#### 5.5 복수조작자 협력제어

이것은 복잡한 다자유도의 원격로봇을 제어하는 한 방법이다. 예를 들어 한 조작자가 vehicle의 제어를 맡고, 다른 한 조작자가 팔의 제어를 맡는다. 복수 조작자 협력제어가 좋을지, 아니면 한 조작자가 vehicle과 팔의 모든 조작을 맡는 것이 좋을지는 아직 뚜렷하지 않다. 간단한 실험들은 여러개의 독립된 일들을 한 조작자가 맡기는 매우 힘들다는 사실을 밝혀냈다. 현재는 이에 대한 연구는 줄어들어 거의 보이지 않는 것 같다.

#### 5.6 교환가능한 end-effector

이것은 다양성을 구현하는 또 다른 방법이며, 목수, 외과 의사나 다른 기술자들의 작업이나 마찬가지로 볼 수 있다. 미래의 원격조작기는 범용 핸드 뿐 아니라 환경에 대해 어떤 작업을 하거나 측정하기 위한 아주 많은 특별한 tool 들을 가지고 일할 수 있을지도 모른다. 범용 end-effector 와 특정한 목적의 end-effector 사이에 어떻게 절충해야 할지는 명확하지 않다.

#### 5.7 시각제어

눈 추적(eye tracking)은 적외선 다이오드와 광트랜지스터를 사용하여 시각 초점, 즉 보고있는 위치를 감지하는 기술이다. 눈은 그 반응시간이 0.02초에서 0.03초 정도로 매우 빠르기 때문에 마스터축 명령을 내리는 데 있어서 매우 신속히 동작할 수 있다. Sentient System Technology사는 신체장애자들을 위하여 눈으로 체크판처럼 생긴 LED를 일정시간 이상 응시함으로써 컴퓨터의 키보드를 대신할 수 있는 Eye-Typer 300이라는 시스템을 개발하였다. 또, Analytics사는 NASA의 요청으로 입력으로 눈과 음성을 조합하여 사용하는 눈 추적 시스템인 OASIS를 개발하였다.

#### 5.8 음성제어(voice control)

마스터 팔이나 조이스틱으로 주는 위치나 속도명령과는 달리 음성 명령을 통해 원격 조작을 수행하는 것도 귀추된다. 물체를 쥐는 힘의 크기의 결정시, 제어 게인(gain)의 설정시, 마스터와 슬레이브간의 위치 또는 힘 비율의 결정시 등에 이러한 음성 명령을 사용할 수도 있다(Bejczy et

al., 1980). 컴퓨터를 이용한 음성 인식과 조합 자체는 컴퓨터 언어학자들의 연구분야로 원격제어측에서 따로 연구할 하지는 않지만, 이를 원격제어 시스템에 도입하려는 움직임이 많이 눈에 띈다.

## 6. 통신채널

실제 마스터와 슬레이브가 어느정도 이상의 거리를 두고 설치되어 있을 경우, 그 데이터 전송 자체에서 문제가 발생한다. 이때는 마스터-슬레이브 시스템이 아니라 마스터-통신채널-슬레이브 시스템이라고 불리어도 좋을 정도로 통신채널도 중요해진다. 여기서 생기는 가장 큰 문제로 시간지연과 채널 확보, 디지털 화상전송을 위한 데이터 압축등을 들 수 있다.

### 6.1 시간지연

마스터가 지구상에 있고, 슬레이브가 우주상에 있는 경우 등에서는 수초 이상의 시간지연이 발생한다. Ferrell(1966)은 시간지연이 1초가 넘을경우 힘반영이 시스템을 불안정하게 만든다는 사실을 밝혔다. 이후 시간지연 문제는 원격제어에 있어서 큰 논점이 되어왔다.

#### 예측 디스플레이(Predictive Display)

마스터와 슬레이브간에 시간 지연이 있으면 조작자는 시간 지연만큼 과거의 슬레이브의 움직임밖에 볼 수가 없다. Noyes와 Sheridan(1984)는 이러한 경우 현재의 슬레이브의 움직임을 예측하여 비디오 화면에 겹쳐 보여주는 예측 디스플레이(predictive display)를 사용하여 원격조작의 효율을 높일 수 있음을 보였다. Bejczy (1990) 등은 긴 시간 지연이 있을경우 예측 디스플레이(predictive display)를 사용하여 free motion동안 원격조작의 효율을 높일 수 있음을 보였다. 그러나 일반적인 3차원 작업을 위해서는 two-view 또는 입체영상을 지원하는 예측 디스플레이가 필요하다는 것도 밝혀졌다. 이후 다음 순간의 예측을 위한 좌표변환 방식이 많이 개발되었으나, 작업대상과 접촉하는 것에 대하여는 아직 이렇다할 해결책을 보여주지 못하고 있다. 작업대상의 모델이 완벽하게 들어가 있지 않은 경우 예측이 전혀 불가능하고, 들어가 있더라도 접촉순간의 움직임을 예측하는 것도 힘든 문제이다. 현재 이를 해결하기 위하여 Mitsuishi (1995) 등에 의해 연구가 진행되고 있다.

#### 시간지연하의 힘반영

긴 시간 지연하에서 힘반영을 주는 것은 작업대상의 모델이 주어져 있더라도 힘든 문제이다. 그래서 대부분의 연구는 1초이내의 짧은 시간지연에 대하여 행해지고 있다. 짧은 시간지연하에서는 제어기에 Smith's principle을 이용해 지

배방정식(governing equation) 자체가 시간지연을 고려하도록 하는 방식이 많이 사용된다. 그 외의 것들에 대하여는 뒤의 제어이론 부분에서 다루고, 여기서는 특별히 다루지 않는다.

### 채널 확보

우주 개발과 같은 커다란 프로젝트는 그 자체를 위한 충분한 통신채널을 보유할 수 있다. 그러나 일반적인 원격제어 시스템이 데이터와 화상을 실시간으로 전송하기 위한 채널을 얻는 것은 쉬운 일이 아니다. 그러한 이유로 근래 인터넷(internet)을 원격제어를 위한 통신채널로 사용하려는 시도가 많이 일고있다. 그러나 인터넷을 통한 채널은 lag<sup>11)</sup>에 대한 부담을 항상 안게된다는 단점이 있다. Goldberg (1995) 등은 머큐리 프로젝트를 통하여 WWW(World Wide Web)<sup>12)</sup>을 이용한 원격제어 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 CCD 카메라가 장착된 공압 구동식 슬레이브 로봇을 세계 어디서든 WWW로 접속한 사용자가 이 로봇을 구동시켜 카메라에 비친 화상을 보는 것을 가능하게 해준다. 참고로 접속 위치는 다음과 같다.

<http://www.usc.edu/dept/raiders/>

## 7. 원격제어 시스템 이론

### 7.1 모델링및 제어 이론

원격제어 시스템은 마스터와 슬레이브 각자뿐 아니라 서로가 가지는 관계까지도 제어해야 하므로 일반적인 로봇시스템의 두배정도의 계산량이 요구된다. 때문에 한때 그 제어방식이 기초적인 PID 제어에 머물고 힘반영 방식에만 약간씩의 개선이 있어왔으나, 컴퓨터의 비약적인 발전에 힘입어 기존에 개발된 로봇제어 이론을 사용할 수 있게 되었다. 1980년대 후반에 이르러서는 이를 바탕으로 하여 많은 원격제어 이론들이 쏟아져 나오기 시작했다.

#### 2-n Port Network Model

힘제어(force control)에는 크게 임피던스 제어(impedance control) 방식과 하이브리드 제어(hybrid control) 방식이 있다. 이중 하이브리드 제어는 다루고자 하는 작업대상의 모델을 시스템이 알고있어야 하는 단점이 있기때문에 원격제어용으로는 적당하지가 못하다. Hogan(1985)이 제안한 임피던스 제어방식은 복잡한 시스템의 기술에 유리하

- 
- 11) 인터넷상에서 과중한 부하등의 이유로 잠시 채널이 막히거나 시간지연이 생기는 일
  - 12) 1992년 CERN에서 시작한 "WWW(World Wide Web)"은 인터넷상에서 하이퍼텍스트(hypertext)를 위한 표준 그래픽 인터페이스를 제공해 준다.

고, 정확한 모델을 필요로 하지 않으므로 원격제어에 도입되어 많이 활용되고 있다. Raju (1988, 1989) 등은 원격제어 시스템을 2-n 포트 임피던스 네트워크로 모델링하는 기법을 제안하여 슬레이브 포트에서의 passive task object와 마스터 포트에서의 passive human impedance에 대하여 안정성을 보였다. Raju의 2-n 포트 임피던스 네트워크 모델도 원격제어를 위한 임피던스 제어에 속하지만, 많은 원격제어의 기초가 된 이론이므로 따로 여기에서 좀 더 설명하도록 한다.

양방향 원격제어 시스템과 같이 복잡한 시스템은 전기와 기계, 생리학적 요소들의 상호작용을 모두 포함한다. 이를 다루기 위하여는 전기, 기계, 생리학적 요소에 관계없이 일반화시켜 기술할 수 있는 방식이 필요하게 된다. 이러한 접근 방식들 중에서 어떠한 시스템이든지 에너지의 흐름에 해당하는 링크(link)와 뉴턴의 법칙이나 kirchhoff의 법칙과 같이 제한조건에 해당하는 노드(node)로 시스템을 표현하는 bond graph란 것이 있다. 이 방식에 따르면, 시스템의 모든 state는 일반화된 양인 “effort”와 “flow”에 대하여 기술될 수 있다. 역학 시스템과 전기 시스템의 일반적인 경우, “effort”는 힘과 전압을 의미하며, “flow”는 속도와 전류를 의미한다.

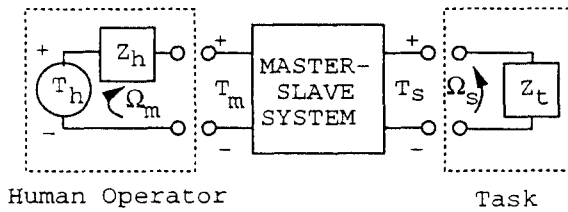


그림 21. 원격제어 시스템의 네트워크 모델.

마스터-슬레이브 시스템<sup>13)</sup>은 두개의 포트를 가지는 전기 네트워크(electrical network)과 유사하게, 두개의 포트를 가지는 기계적 네트워크(mechanical network)으로 모델링될 수 있다. 그림 21에서와 같이 마스터-슬레이브 시스템은 입력부(또는 마스터 포트)에서 조작자(human operator)와 상호작용을 가지며, 출력부(또는 슬레이브 포트)에서 작업 대상(task)과 상호작용을 가진다.(그림에서 첨자  $m$ 은 마스터를,  $s$ 는 슬레이브를 의미한다.)

각 포트에서 관심을 두는 co-energy variable은 effort variable (토크  $T_m$ 과  $T_s$ )과 flow variable(속도  $\Omega_m$ 과  $\Omega_s$ )이다. 각 포트에서의 co-energy variable중 아무것이나 하나를 독립변수(independant variable)로 선택할 수 있다. 그러면 종속변수(dependant variable)의 값은 시스템에 따른 파라미터들에 의해 결정된다. 다시말하면, 힘을 넣어줌으

로써 속도가 결정되거나, 원하는 속도를 넣어줌으로써 힘이 결정된다는 것을 의미한다.

만약 flow variable을 입력으로 생각하면 (즉, 속도  $\Omega_m$ 과  $\Omega_s$ 를 입력으로 생각하면), 마스터-슬레이브 시스템은

$$\underline{T}(s) = \begin{bmatrix} T_m(s) \\ T_s(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\underline{\Omega}(s) = \begin{bmatrix} \Omega_m(s) \\ \Omega_s(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

일때,

$$\underline{T}(s) = [Z(s)] \underline{\Omega}(s) \quad (3)$$

또는

$$\begin{bmatrix} T_m(s) \\ T_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(s) & Z_{12}(s) \\ Z_{21}(s) & Z_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_m(s) \\ \Omega_s(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

에 의해 정의되는 임피던스 행렬(impedance matrix)  $[Z(s)]$ 로 표시될 수 있다. 그리고, effort variable인 토크  $T_m$ 과  $T_s$ 는 이 행렬에 의해서 자동으로 결정된다.

반면, 마스터-슬레이브 시스템의 입력이 effort variable이라고 하면(즉, 입력이 토크  $T_m$ 과  $T_s$ 라고 하면), 시스템은

$$\underline{\Omega}(s) = [Y(s)] \underline{T}(s) \quad (5)$$

또는

$$\begin{bmatrix} \Omega_m(s) \\ \Omega_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}(s) & Y_{12}(s) \\ Y_{21}(s) & Y_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_m(s) \\ T_s(s) \end{bmatrix} \quad (6)$$

로 정의되는 어드미턴스 행렬(admittance matrix)  $[Y(s)]$ 로 표현될 수 있다.

위의 두 경우는 두 포트(port) 모두 토크 입력  $T_m, T_s$ 이거나 속도 입력  $\Omega_m, \Omega_s$ 인 경우이다. 이와는 달리 마스터 포트의 입력은 토크  $T_m$ 로 보고, 슬레이브 포트의 입력은 속도  $\Omega_s$ 로 볼 수도 있다. 이와 같이 한 포트에서의 입력은 effort variable이고, 다른 포트에서의 입력은 flow variable 일때를 고려하면 2개의 다른 표현들이 추가로 얻어질 수 있다. 이런 것들은 보통 hybrid model of 2-port 라고 한다. 예를 들어, 마스터 포트에서 flow가 명시되고, 슬레이브 포트에서 effort가 명시되면,

$$\begin{bmatrix} T_m(s) \\ \Omega_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_m(s) \\ T_s(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

와 같은 식이 얻어진다. 여기서  $[H(s)]$ 를 h-matrix (하이브리드 행렬)이라고 하며, h-matrix를 사용한 모델링들도 있다(Hannaford (1989)).

위의 기술 방식들은 모두다 같은 시스템을 다른 방식으로

13) Raju는 이를 MSM(master-slave manipulator)라고 표현하였다.

표현하는 것에 불과하므로, 각 행렬의 요소들은 다른 기술 방식에서 나타난 행렬의 요소들에 대하여 계산해 낼 수 있다.

마스터-슬레이브 시스템을 모델링하는 첫번째 단계는 실제 시스템의 하드웨어를 기술하는데 있어서 위의 표현방식들 중 어느것이 가장 적절한지를 판단하는 것이다. 시스템의 각 포트에서는 측정된 flow, 즉 위치와 속도의 피드백 신호를 이용해 제어 토크를 발생시키기 위하여 서보구동기 (servo-actuator) 가 사용된다. 그러므로, 마스터와 슬레이브의 서보구동기의 제어동작은 dependant torque (effort) source들인  $U_m\{\Omega_m(s), \Omega_s(s)\}$ 와  $U_s\{\Omega_m(s), \Omega_s(s)\}$ 로 모델링될 수 있다. 또한 마스터의 구동기(actuator)와 암 (arm) 의 동력학은 임피던스  $Z_{ma}(s)$ 로 표현될 수 있고, 슬레이브의 구동기와 암(arm)은 임피던스  $Z_{sa}(s)$ 로 표현될 수 있다(그림 22).

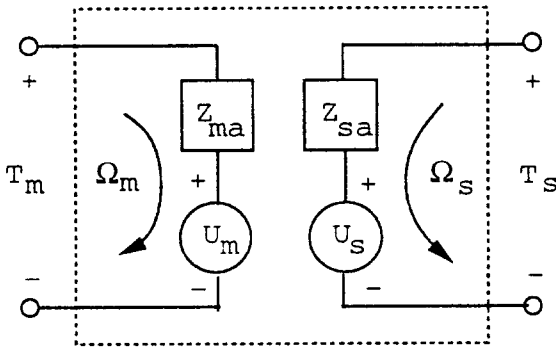


그림 22. 시스템 포트 임피던스.

위치, 속도로 입력 토크를 만들어주는 제어 법칙 (control law)을 다음과 같은 형태로 보자.

$$\begin{bmatrix} U_m(s) \\ U_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{11}(s) & f_{12}(s) \\ f_{21}(s) & -f_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_m(s) \\ \Omega_s(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

diagonal component인  $f_{11}$ 과  $f_{22}$ 에 붙은 (-) 기호는 각 포트의 응답 (제어) 토크가 그 포트의 flow와 반대가 되어야 하기때문에 붙여주게 된다. 그러면 마스터 포트의 토크 (torque) 는 그림 22로부터 얻어지는 식

$$T_m(s) = Z_{ma}(s) \Omega_m(s) - U_m(s) \quad (9)$$

에 위의 행렬식의  $U_m(s)$  에 치환하여

$$T_m(s) = [Z_{ma}(s) + f_{11}(s)] \Omega_m(s) - f_{12}(s) \Omega_s(s) \quad (10)$$

가 된다. 슬레이브 포트에 같은 방식을 사용하고, 전체를 행렬식으로 표시하면 마스터-슬레이브 시스템은

$$\begin{bmatrix} T_m(s) \\ T_s(s) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} Z_{ma}(s) + f_{11}(s) & -f_{12}(s) \\ -f_{21}(s) & Z_{sa}(s) + f_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_m(s) \\ \Omega_s(s) \end{bmatrix} \quad (11)$$

와 같은 임피던스 행렬 (impedance matrix) 로 기술된다.

임피던스 행렬의 요소  $Z_{ij}$ 는 부하가 없을때 (즉, 개회로 상태일때) 의 effective impedance를 의미하므로 2-port network의 “개회로 임피던스 파라미터 (open-circuit impedance parameter)” 라 불린다. 마스터-슬레이브 시스템에 대하여 이 파라미터들은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Z_{11}(s) &= \frac{T_m(s)}{\Omega_m(s)} \Big|_{\Omega_s(s)=0} = Z_{ma}(s) + f_{11}(s) \\ Z_{12}(s) &= \frac{T_m(s)}{\Omega_s(s)} \Big|_{\Omega_m(s)=0} = -f_{12}(s) \\ Z_{21}(s) &= \frac{T_s(s)}{\Omega_m(s)} \Big|_{\Omega_s(s)=0} = -f_{21}(s) \\ Z_{22}(s) &= \frac{T_s(s)}{\Omega_s(s)} \Big|_{\Omega_m(s)=0} = Z_{sa}(s) + f_{22}(s) \end{aligned} \quad (12)$$

그러므로, 이 식으로부터 피드백 행렬 (feedback matrix) 의 요소  $f_{ij}(s)$ 를 적당히 선정함으로써  $[Z(s)]$ 의 요소들을 독립적으로 조정할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이런 요소들은 직관적으로 이해하기 힘들기 때문에, 마스터-슬레이브 시스템을 조작자에게 표현되는 마스터 포트 임피던스  $Z_m(s)$ 와 task에게 표현되는 슬레이브 포트 임피던스  $Z_s(s)$ 로 표현하는 것이 더 좋다.  $Z_m(s)$ 은  $Z_{ij}(s)$  뿐 아니라, 작업대상 (task) 의 임피던스  $Z_h(s)$ 에도 종속되고, 이와 유사하게  $Z_s(s)$ 는 인간 조작자의 임피던스  $Z_h(s)$ 에 종속된다. 그러므로, 포트 임피던스  $Z_m(s)$ 와  $Z_s(s)$ 를 구하기 위하여는, 두 포트들의 부하 (load)에 관한 지배방정식 (governing equation) 이 포함되어야 한다.

이를 고려하면, 마스터 포트에서

$$\begin{aligned} T_h(s) - Z_h(s) \Omega_m(s) &= T_m(s) \\ &= Z_{11}(s) \Omega_m(s) + Z_{12}(s) \Omega_s(s) \end{aligned} \quad (13)$$

또는

$$\Omega_m(s) = \frac{T_h(s) - Z_{12}(s) \Omega_s(s)}{Z_{11}(s) + Z_h(s)} \quad (14)$$

이면,

$$\begin{aligned} T_s(s) &= Z_{21}(s) \Omega_m(s) + Z_{22}(s) \Omega_s(s) \\ &= Z_{21}(s) \left[ \frac{T_h(s) - Z_{12}(s) \Omega_s(s)}{Z_{11}(s) + Z_h(s)} \right] \\ &\quad + Z_{22}(s) \Omega_s(s) \\ &= \left[ \frac{Z_{21}(s)}{Z_{11}(s) + Z_h(s)} \right] T_h(s) + Z_s(s) \Omega_s(s) \end{aligned} \quad (15)$$

로

$$Z_i(s) = Z_{22}(s) - \frac{Z_{12}(s)Z_{21}(s)}{Z_{11}(s) + Z_k(s)} \quad (16)$$

이 된다.

이와 유사하게, 슬레이브 포트에 task가 존재할 때, 마스터 포트에서 조작자가 느끼는 임피던스는

$$Z_m(s) = Z_{11}(s) - \frac{Z_{12}(s)Z_{21}(s)}{Z_{22}(s) + Z_k(s)} \quad (17)$$

가 된다.

만약 dependant source를 형성하는 제어신호들이 마스터 포트와 슬레이브 포트의 위치와 속도에 관한 nondynamic linear combination으로 선택되면, 임피던스 행렬 (impedance matrix)  $[Z(s)]$ 는 원하는 특성을 만족시키기 위하여 조정될 수 있다.

### 임피던스 제어 (Impedance control)

Raju 이후 2-n 포트 네트워크를 이용한 방식에 많은 개선과 발전이 있었으며, 이와는 다른 방식으로 임피던스 개념을 적용시킨 이론들도 많이 있었다. Anderson과 Spong은 h-matrix를 사용한 임피던스 제어를 제시하였고, 요코코지와 요시카와(1992)는 마스터-슬레이브 시스템에 있어서의 세가지 이상적인 반응 (ideal response)를 정의하고, 2-n port network 모델을 적용하여 이상적인 반응을 얻을 수 있는 동력학적 제어 방식을 제안하였다. (세가지 이상적인 반응은 뒤의 "Maneuverability의 평가지수" 부분에서 다룬다.)

한편, 야마키타 (1995)는 인간 신체의 제어구조는 bilinear impedance 제어의 형태를 가지며, 두가지의 근육, 즉 굴근 (flexor) 과 신근 (extensor) 이 생성해내는 힘의 차에 의해 동작한다(그림 23)는 사실을 본따 본따 핸드와 팔을 따로 고려하는 양방향 임피던스 제어방식을 소개하고, 시스템의 안정성을 시간지연이 있을경우와 없을 경우에 대하여 분석하였다.

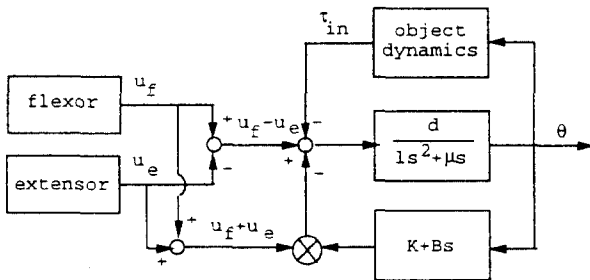


그림 23. 인간 팔의 Bilinear Model.

### SCC(Shared Compliant Control)

Kim과 Hannaford (1989), Bejczy (1992)는 외력에 비례하여 제어 게인을 감소시킴으로써 시스템의 안정성을 높

이는 SCC (shared compliant control)을 제안하였다. 그 구현방식은 그림 24과 같이 슬레이브가 외부와 접촉함으로써 발생하는 힘/토크 신호를 힘/토크 센서로 측정하여 저주파 필터를 거쳐 자체내에서 피드백 시키는 형태를 취한다. 이렇게 해서 물체와 접촉운동을 할 때 슬레이브 시스템에 active compliance를 제공해 주게 된다(즉, 슬레이브 시스템이 훨씬 유연한 움직임을 갖게 한다.). 그런데, 그림으로부터 SCC의 형태를 잘 살펴보면 position-based impedance control의 한 경우라는 것을 알 수 있다.

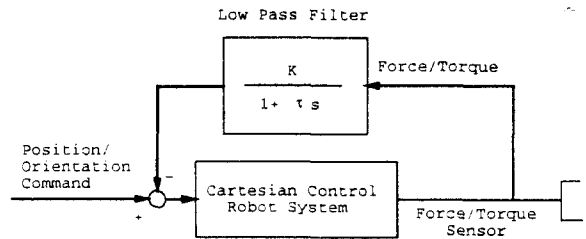


그림 24. 저주파 필터링된 힘/토크 피드백을 이용한 SCC.

SCC는 시간지연이 있을경우 특히 유용해, 그림 25와 같이 사용된다. 시간지연이 1초가 넘을 경우는 안정성을 위하여 힘반영 루프를 끊어버리고 있다.

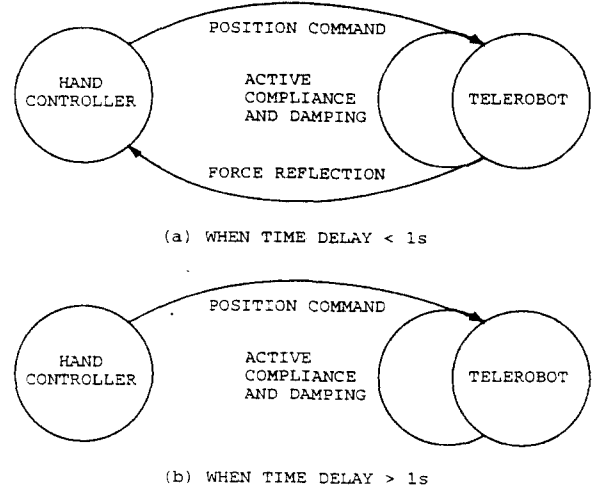


그림 25. Shared controlscheme using active compliance.

### 강건제어 (Robust Control)

강건제어는 불확실하거나 외란이 있는 시스템에 대하여 안정성을 보장하는 제어방식이다. Tsay, Kazerooni(1992)와 Hollerbach (1993)등은  $H_\infty$  제어이론과 model reduction 기술에 근거한 강건 양방향 제어기를 제시하였다. 또, 위치센서 없이 힘신호만을 사용하는 제어기도 또한 제시되었다. 한편 Jeong 과 Lee (1994)는  $H_\infty$  제어를 사용하여 시간지연으로부터 발생하는 불안정성을 극복하려고 시도하였다. Leung, Francis와 Apkarian (1995)는  $H_\infty$  최적제



어와  $\mu$ -synthesis framework에 근거한 방식을 제시하였고, 정해진 최적 성능을 만족시키면서 미리 입력한 시간지연에 대한 안정성을 이끌어 내었다. Son 등(1996)은 Morari가 제안한 강건제어기의 일종인 IMC(Internal Model Controller)를 원격제어에 도입하였다. 강건제어는 시간지연 뿐 아니라, 인간 조작자의 불확실성까지 극복할 수 있는 가능성 때문에 원격제어 분야에서의 많은 발전이 예상된다.

## 7.2 시뮬레이션

시뮬레이션 분야는 원격제어 로봇 시스템에 있어서 별로 발전하지 못하고 있는 것 중의 하나이다. 그 이유는 첫째로 완전한 시뮬레이션이 되려면 조작자를 전체 제어계 속에 포함시켜주어야 한다. 그러나, 인간의 신체와 판단을 어떤 수식으로 표현하여 모델링한다는 것은 매우 어려운 일이 아닐 수 없다. 이러한 이유로 완전한 컴퓨터 시뮬레이션보다는 차라리 인간과 마스터 팔은 시뮬레이션계 속에 넣어버리는 복합적인 방식도 사용되고 있다.

인간의 판단을 모델링하기 위하여 Petri-Net을 이용하는 방식도 많이 사용된다.

## 7.3 Performance Measure

일반적인 로봇 시스템은 그 용도에 따라 워크스페이스(workspace)의 크기나 형태, 가반중량(payload)등 그 시스템의 성능을 평가할 수 있는 기준을 가지고 있다. 그리고 이러한 기준들은 어떤 로봇이 다른 로봇보다 좋다고 말할 수 있는 근거가 된다. 그러나 원격제어 시스템의 경우에 있어서는 아직까지 이러한 통용되고 있는 기준이 미흡한 실정이다.

## Maneuverability의 평가지수

요코코지와 요시카와는 마스터-슬레이브 시스템에 있어서의 세가지 이상적인 반응(ideal response)를 정의하고, 이에 근거하여 시스템의 maneuverability를 평가하는 효율지수(performance index)를 제안하였다. 그 이상적인 반응은 다음과 같다: (1) 조작자가 시스템에 어떤 힘을 가하였을 때, 환경에 상관없이 마스터와 슬레이브의 위치 반응이 동일하다. (2) 조작자가 시스템에 어떤 힘을 가하였을 때, 환경에 상관없이 마스터와 슬레이브의 힘 반응이 동일하다. (3) 조작자가 시스템에 어떤 힘을 가하였을 때, 환경에 상관없이 마스터와 슬레이브의 위치 반응과 힘 반응이 동일하다. 즉, 세번째 경우는 앞의 두 조건을 모두 만족시키는 경우가 된다. 평가지수는 이 세 정의에 따라 인간이 보일 수 있는 주파수영역 내에서 마스터와 슬레이브간에 보이는 위치 반응과 힘 반응이 얼마나 비슷한가로 그 maneuverability를 측정하게 된다.

## 실험 방법론(Methodology of Experiment)

원격제어 시스템의 평가에서 또 하나 필요한 부분은 실험의 방법론이다. 원격제어 실험은 언제나 인간 조작자를 동반하므로, 절대적인 비교가 될 수 없기때문에 그 체계적인 실험방법론이 필요하다.

가장 기본적으로 통용되는 실험방법은 어떤 한 작업을 수행하는데 있어서 얼마나 시간이 걸리는지 측정하여 그 시간으로 제어기의 성능을 평가하는 것이다<sup>14)</sup>

한편 Son (1996) 등은 (1) 슬레이브가 작업환경에 접촉하지 않고, 마스터의 움직임을 따라가는 정도를 판단하는 unconstrained motion, (2) 슬레이브가 작업환경과 접촉한 상태로 일정한 힘을 유지하는 실험을 통해 힘을 유지할 수 있는 범위와 힘이 일정하게 유지되는 정도를 판단하는 force regulation, (3) 슬레이브가 작업환경과 접촉한 상태로 표면을 따라 일정한 힘을 유지하며 이동하는 constrained motion tracking 의 세가지 기본적인 작업을 정의하고 실험을 통하여 시스템의 성능을 평가하고자 하였다.

## 7.4 고장 진단및 위급상황 대처 기술

원격제어 시스템과 같이 복잡한 시스템에서 언제 어떤 부분이 고장났는지를 알아내는 것은 인간 조작자에게는 매우 힘든 일이 된다. 또, 고장은 아니지만 작업중 어떤 예기치 못한 변수에 의해서 문제가 발생하기도 한다. 이를 대비하여 최근 들어서 많은 진단 기술들이 개발되고 있다. 그 중 몇몇은 베이지안이나 다른 통계적 유추를 이용하기도 하고, 어떤 것들은 측정된 신호와 정상적인 동작시 나타나게 되는 on-line 모델과의 비교를 통해서 판단하기도 한다.

## 8. 결 론

이상에서 원격제어 시스템의 역사, 적용에서 이론까지 간략하게 다루어 보았다. 과학기술이 발달하고 생활 수준이 향상됨에 따라 인간은 소위 3D 직종을 기피하려는 경향을 갖게 되었다. 또한 작업환경의 변화가 심하고 위험한 심해저나 원자력 발전소, 우주공간에서의 작업등은 인간이 맡게 되면 엄청난 인건비가 소요되고, 작업자의 안전을 보장할 수가 없게된다. 로봇을 이용하여 이러한 작업들을 대처하게 될 경우 무엇보다도 작업자를 보호할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 순간적인 판단과 작업을 반복하거나 돌발적인 사고에 대처하는 능력이 로봇에게는 절대적으로 부족하기 때문에, 반대급부적으로 원격 제어 시스템의 가치가 점점 높아지고 있다.

원격 제어 시스템은 우주 공간, 방사능 지역 등에서의 작업시 인간을 보호하고, 작업의 효율성 증대에 기여할 뿐만

14) 이를 CT (completion time) 시수라고 한다.

아니라, 최근에 활발히 연구가 진행되고 있는 초정밀 로봇을 이용한 원격 수술(telesurgery)이나 사람이 들 수 없는 무게를 작업자의 의도대로 다룰 수 있게 하는 등 인간의 한계를 극복하는 데도 큰 몫을 담당할 것으로 기대되기 때문에 계속적인 연구를 필요로 하고 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김승재, 생체 전기 신호를 이용하는 자동의수와 제어 방법 개발, 석사학위논문, 포항공대, 1995.
- [2] 서종한, 가상현실의 세계, 1994, 진영출판사.
- [3] W. R. Ferrell, "Delayed Force Feedback", *Human Factors*, Oct. 1966, pp.449-455.
- [4] N. Hogan, "Impedance Control : An Approach to Manipulation : Part I, II, III", *ASME Jr. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.~107, March 1985, pp.1-23.
- [5] N. Hogan, "Adaptive Control of Mechanical Impedance by Coactivation of Antagonist Muscles", *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.AC-29, No.~8, August 1984, pp.681-689.
- [6] Raju, G. J., "Operator Adjustable Impedance in Bilateral Remote Manipulation", *Ph.D. Thesis, MIT, 1988*.
- [7] B. Hannaford, B and P. Fiorini, "A Detailed Model of Bilateral Teleoperation", *ICRA, Proc. IEEE Int. Conf. System, Man, and Cybernetics*, Vol.1, August 1988, pp.117-121.
- [8] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay", *Proc. IEEE Int. Conf. System, Man, and Cybernetics*, Vol.1, Aug 1988, pp.131-138.
- [9] B. Hannaford, "A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback", *ICRA<sup>15</sup>*, Vol.5, No.4, August 1989, pp.426-434.
- [10] N. Hogan, "Controlling Impedance at the Man / Machine Interface", *ICRA*, 1989, pp.1626-1631.
- [11] G. J. Raju, G. C. Verghese, and T. B. Sheridan, "Design Issues in 2-port Network Models of Bilateral Remote Manipulation", *ICRA*, 1989, pp.1316-1321.
- [12] T. B. Sheridan, "Telerobotics", *Automatica*, Vol.25, No. 4, 1989, pp.487-507.
- [13] A. K. Bejczy, W. S. Kim and S. C. Venema, "The Phantom Robot : Predictive Displays for Teleoperation with Time Delay", *ICRA*, 1990, pp.546-551.
- [14] S. R. Yoo, "A Study on the Master Arm for Teleoperation", M.S. Thesis, POSTECH, 1992.
- [15] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling", *ICRA*, Vol.1, May 1992, pp.849-858.
- [16] S. Lee and H. S. Lee, "An Advanced Teleoperator Control System : Design and Evaluation", *ICRA*, Vol.1, May 1992, pp.859-864.
- [17] 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, April 1992, pp.176-185.
- [18] T. I. Tsay and H. Kazerooni, "A Design Framework for Telerobotics using the  $H_{\infty}$  Approach", *American Control Conf.*, Nov.1992, pp.2931-2935.
- [19] D. S. Cha, "A Study on the Stability of Force Reflecting Teleoperation", M.S. Thesis, POSTECH, 1993.
- [20] H. Kazerooni, T. I. Tsay, and K. Hollerbach, "A Controller Framework for Telerobotic Systems", *IEEE Trans.- Robotics and Automation*, Vol.1, No.1, March 1993, pp.50-62.
- [21] T. B. Sheridan, "Space Teleoperation Through Time Delay : Review and Prognosis", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.9, No.5, Oct.1993, pp.592-606.
- [22] D. A. Lawrence, "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation", *IEEE Trans.- Robotics and Automation*, Vol.9, No.5, Oct.1993, pp.624-637.
- [23] Y. Strassberg, A. A. Goldenberg, and J. K. Mills, "Stability Analysis of a Bilateral Teleoperating System", *ASME Jr. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.115, Sep.1993, pp.419-426.
- [24] M. R. Stein and R. P. Paul, "Operator Interaction for Time-Delayed Teleoperation with a Behavior-Based Controller", *ICRA*, 1994, pp.231-236.
- [25] D. A. Lawrence, and J. D. Chapel, "Performance Trade-Offs for Hand Controller Design", *ICRA*, 1994, pp.3211-3216.
- [26] S. Lee, and K. Jeong, "Design of Robust Time Delayed Teleoperator Control System", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 1994, pp.1413-1420.

[27] H. S. Choi, "Design and Control of POSTECH Master Arm III", M.S. Thesis, POSTECH, 1995.

[28] G. M. H. Leung, B. A. Francis, and J. Apkarian, "Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay via  $\mu$ -Synthesis", ICRA, Vol.11, No.1, Feb. 1995, pp.105-116.

[29] M. Mitsuishi, T. Hori, and T. Nagao, "Predictive, Augmented and Transformed Information Display for Time Delay Compensation in Tele-Handling/Machining", ICRA, Vol.1, May 1995, pp.45-51.

[30] D. A. Kontarinis, J. S. Son, W. Peinse, and R. D. Howe, "A Tactile Shape Sensing and Display System for Teleoperated Manipulation", ICRA, Vol.1, May 1995, pp.641-646.

[31] K. Goldberg, M. Mascha, S. Gentner and N. Rothenberg, "Desktop Teleoperation via World Wide Web", ICRA, Vol.1, May 1995, pp.654-659.

[32] J. B. Son, "Modeling and Control of Teleoperating

System", M.S. Thesis, POSTECH, 1996.

[33] J. B. Son, Y. Youm, W. K. Chung, and K. W. Jeong, "An Easily Attainable and Effective Bilateral Control for Teleoperation", ICRA, April 1996

### 참고 WWW 사이트

[1] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/>

[2] <http://peewee.chinalake.navy.mil/clmf/curv1.html/>

[3] <http://risbot.rist.re.kr/>

[4] <http://www.anl.gov/>

[5] <http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/>

[6] <http://www.cs.utah.edu/projects/robot/>

[7] <http://www.cybernet.com/>

[8] <http://www.newswire.ca/spar/>

[9] <http://www.quake.net/virtex/products.html>

[10] <http://www.research.ibm.com/>

## 저 자 소 개

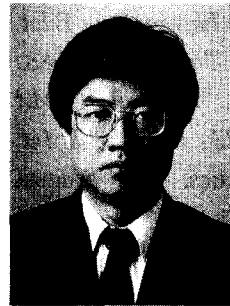


### 염 영 일

1969.2 Utah State Univ. 기계공학과 학사 1971.8 Univ. of Wisconsin 기계공학과 석사 1973.2 Univ. of Wisconsin 공학역학 석사 1976.2 Univ. of Wisconsin 공학역학 박사 1975~1978 Univ. of Iowa 대우조교수 1978~1987 Catholic Univ. of

America 조/부교수 1987 포항공과대학교 기계공학과 교수 1992~1994 포항공과대학교 교무처장 1994~ 포항공과대학교 부총장 790-784 (790-784) 경북 포항시 효자동 산 31

TEL. 0562) 279-2002 / FAX. 0562) 279-2020



### 정 완 군

1981.2 서울대학교 기계설계학과 학사 1983.2 KAIST 기계공학과 석사 1987.2 KAIST 정밀공학과 박사 1988 Carnegie Mellon University 교환교수 1991 Univ. of California, Berkeley 교환교수 1993 포항공과대학교 기계공학과 부교수



### 손 재 범

1989.3~1993.2 KAIST 정밀공학과 학사 1994.3~1996.2 포항공과대학교 기계공학과 석사 1996.3~현재 포항공과대학교 위촉연구원