

# 범용 마스터 암을 이용한 원격 조작 시스템의 개발

차 동혁\* 조 형 식  
한국과학기술원 정밀공학과

## A Development of a Teleoperation System Using an Universal Master Arm

Dong Hyuk Cha Hyung Suck Cho  
Dept. of Precision Engineering KAIST

### ABSTRACT

In this paper, an unilateral teleoperation system using an universal master arm is developed. This system is composed of an universal master arm, a slave arm and a telerobot controller. The universal master arm has a vertically articulated type link structure, while an industrial robot is used as a slave arm. As the shapes of master arm and slave arm are different, the workspace mapping is needed, which maps the workspace of master arm to that of slave arm. Experimental results show that the slave arm of the developed system effectively follows the operator's motion.

### 1. 서론

원격 조작 기술은 인간이 작업할 수 없는 위험한 환경하에서 여러 가지 작업을 행하기 위한 목적으로 발달되어왔다. 원격 작업 장치는 작업성을 좋게하기 위해 일반적으로 로봇트 매니플레이터의 형태를 가지게 되었다. 이런 형태의 원격 조작 시스템은 마스터-슬레이브 매니플레이터 (Master-slave manipulator) 로 구성된다. 이 시스템에서는 작업자가 마스터 암을 잡고 동작을 하면 슬레이브 암이 이 동작을 모방하여 움직이게 되며 이에 따라 실제 작업이 이루어지게 된다.

원격 조작 시스템은 제어 기법에 따라 한방향(unilateral) 제어 시스템과 양방향(bilateral) 제어 시스템으로 구분할 수 있다[1]. 한방향 제어에서는 작업시 슬레이브 암과 작업 환경과의 접촉에 의해 발생하는 힘이 작업자에게 전달되지 않는 반면 양방향 제어에서는 작업성을 높여줄 목적으로 이 힘이 작업자에게 전달된다.

원격 조작 시스템에서 사용되는 마스터 암은 슬레이브 암과 기하학적으로 동일한 형상을 가지는 전용 마스터 암과, 슬레이브 암과 형상이 다른 이형 마스터 암으로 나눌 수 있다. 기하학적으로 동형인 경우는 슬레이브 암의 각 관절의 위치를 마스터 암의 대응되는 관절의 위치와 동일하도록 제어하면 되므로 시스템의 제어가 쉬워지며 역운동학 (inverse kinematics)을 풀지않아도 되므로 특이점 문제가 발생하지 않

는 장점이 있다[2]. 그러나 이 방식의 경우 슬레이브 암이 결정되면 마스터 암의 형상은 자동적으로 결정이 되므로 마스터 암의 설계시 작업자의 조작성이 고려되지 않는 단점이 있으며, 하나의 마스터 암이 한 가지 형상의 슬레이브 암밖에 대응하지 못하게 된다.

기하학적으로 형상이 다른 경우는 작업자의 조작이 용이하도록 마스터 암을 설계할 수 있고, 하나의 마스터 암으로 여러 형태의 슬레이브 암을 조작할 수도 있다. 그러나 이 경우는 양자간의 작업영역(work space)이 서로 다르므로 이를 매칭시켜 주어야 하는 어려움이 따르게 된다[3].

본 연구에서는 마스터 암으로는 다관절 구조형 범용 마스터 암을 이용하고, 슬레이브 암으로는 상용화된 산업용 로봇을 이용하는 한방향 원격 조작 시스템의 개발에 관하여 살펴 보기로 한다. 여기서 범용 마스터 암이란 작업자의 조작성을 좋게하면서, 아울러 여러 형태의 슬레이브 암에 적용할 목적으로 개발된 마스터 암을 의미한다. 따라서 이것은 특정한 슬레이브 암에 대해 기하학적으로 동형으로 제작되지 않은 마스터 암이다. 먼저 전체 시스템의 구성에 대해 알아보고 범용 마스터 암의 구조, 슬레이브 암 및 제어기 그리고 원격 조작 시스템 제어기의 구성에 대해 살펴본다. 그리고 개발된 시스템의 성능 및 특성에 관해 알아보도록 한다.

### 2. 전체 시스템의 구성

전체 시스템의 구조는 그림1과 같으며, 크게 다관절 구조형 범용 마스터 암, 슬레이브 암 및 제어기 그리고 원격조작 시스템 제어기로 구성되어 있다. 전체의 동작은 다음과 같이 이루어진다. 작업자가 마스터 암을 움직일때 각 축에 부착된 엔코더로부터 마스터 암의 위치,  $X_m$ , 를 계산한다. 마스터 암과 슬레이브 암의 작업 영역이 상이하므로 작업영역 사상 (work space mapping)을 통해 마스터 암의 위치에 대응하는 슬레이브 암의 기준 위치,  $X_{sr}$ , 를 구할 수 있다. 이 값을 슬레이브 암 제어기로 전달해주면 이에 따라 슬레이브 암이 제어되며 원격 작업을 수행하게 된다.

#### 2.1 다관절 구조형 범용 마스터 암

범용 마스터 암의 설계시 고려되어야할 사항으로는 다음과

같은 것들이 있다. 첫째, 작업자의 조작이 용이한 구조를 가지고 있어야 한다. 즉, 매스터 암은 작업자가 조작하기에 편리한 형상 및 치수이어야 한다. 둘째, 가능한 넓은 작업 영역을 가지고 있어야 한다. 셋째, 장시간의 작업시에도 작업자가 피로를 느끼지 않고 원하는 위치 또는 운동을 정확히 지정해줄 수 있도록 하기 위해서는 균형된 질량을 가진 구조이어야 한다.

본 연구에서 사용된 범용 매스터 암은 3 자유도를 가지는 수직 다관절형 링크 구조이며 그림2에 그 형상이 나타나 있다. 이 암은 3개의 revolute joint를 가지고 있는 RRR 형식의 구조이다. 그림3은 이 암의 구조 및 각 링크의 계수들을 보여 주고 있다.

작업자의 조작성을 높이기 위해 링크2와 링크3의 길이는 각각 사람의 팔의 길이와 비슷하게 하였으며, 작업자의 피로를 줄이고 운동 특성을 향상시키기 위해 링크2와 링크3에 균형 질량(Balance weight)를 부착 하였다. 그리고 각 축의 위치 인식을 위해 엔코더를 부착하였다.

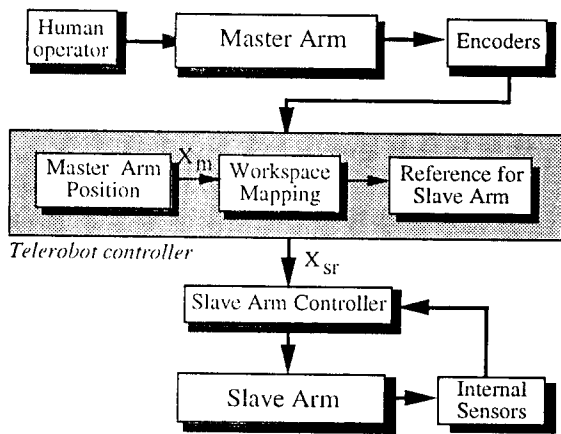


그림 1. 전체 시스템의 구조

## 2.2 슬레이브 암 및 제어기

본 연구에서는 산업용 스카라 로봇을 슬레이브 암으로 사용하였으며 그 제어기로는 본 연구실에서 개발된 PC-based 로

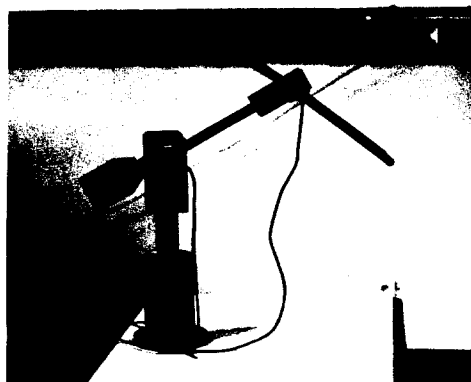
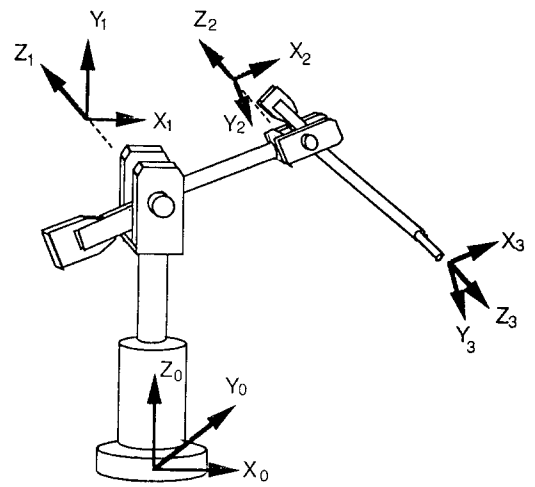


그림 2. 수직 다관절형 범용 매스터 암



(unit : degrees, mm)

joint i	$\theta_i$	$\alpha$	a	d	joint angle range
1	$\theta_1$	-90	0	400	No limitation
2	$\theta_2$	0	300	0	57 ~ -237
3	$\theta_3$	0	266	0	64 ~ -244

D-H Representation of Master Arm

그림 3. 매스터 암의 구조 및 링크 파라메터

봇 제어기[4]가 사용되었다. 그림4는 사용된 PC-based 로봇 제어기의 구조를 보여주며 크게 주 제어기, 축 제어기 및 통신 인터페이스부로 구성되어 있다. 주 제어기로는 IBM PC/AT 가 사용되었으며 4개의 축 제어기에는 각각 Intel사의 8032 CPU 가 내장되어 있다. 주 제어기는 직교 좌표계로 표시된 슬레이브 암의 기준 위치를 원격 조작 시스템 제어기로 부터 전달 받는다. 주 제어기는 역기구학(inverse kinematics)을 풀어 이것에 대응하는 각 관절의 각도를 구한 다음 이 값과 현재의 각도를 비교하여 그 증분을 계산하여 이것을 통신 인터페이스를 통하여 축 제어기로 전달한다. 각 축 제어기는 이 값을 받아 대응하는 축의 움직임을 제어해준다.

## 2.3 원격조작 시스템 제어기

### 2.3.1 작업 영역 사상(workspace mapping)의 개요

매스터 암과 슬레이브 암의 형상이 동일한 경우, 대응되는 각 축의 동작 범위가 동일하다면 두 암의 작업 영역은 그 형상이 동일하다. 이 경우, 두 암의 링크의 길이가 동일하다면 작업영역은 완전히 일치하고, 그렇지 않다면 슬레이브 암의 작업영역은 매스터 암의 그것을 확대 또는 축소할 것과 일치하게 된다. 이 경우는 별도의 작업영역 사상이 필요없이 각 관절의 각도를 대응되는 매스터 암의 관절의 각도와 동일하도록 제어하면 된다.

범용 매스터 암을 이용할 경우 매스터 암과 슬레이브 암은 기구학적으로 서로 다른 형태를 가지고 있으므로 각각의

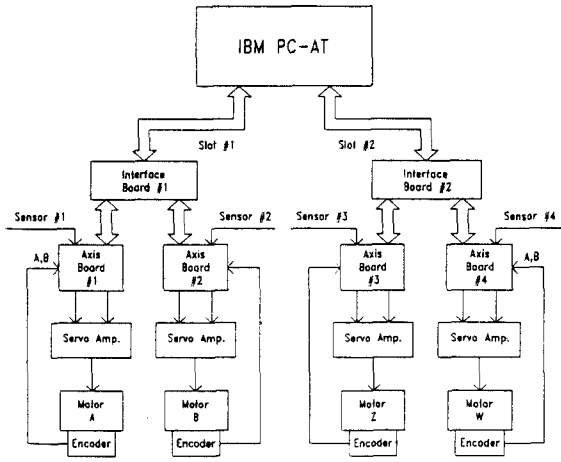


그림 4. 슬레이브 암 제어기의 구조

작업영역도 다르다. 따라서 이들 간의 작업영역 사상이 필요하게 된다. 이때 고려되어야 할 사항들은 다음과 같다. 첫째, 작업영역의 사상시 공간의 왜곡이 없어야 한다. 사상으로 인해 공간의 왜곡이 생긴다면 (예를 들어, 직선이 직선으로 사상되지 않거나, 평면이 평면으로 사상되지 않는 경우), 작업자의 운동 궤적과는 다른 형태의 궤적으로 슬레이브 암이 움직이게 되므로 원하는 원격 작업을 하기 어렵다. 둘째, 슬레이브 암의 사용 가능한 작업 영역을 최대화 하여야 한다. 두 암의 작업영역의 형상, 크기가 서로 다르므로 사상후 매스터 암의 작업영역이 슬레이브 암의 전체 작업영역에 정확히 대응할 수 없으며, 그 결과 슬레이브 암의 작업 영역중 사용할 수 없는 영역이 발생하게 된다. 전체 시스템의 작업 성능을 향상시키기 위하여는 이 사용 불가능한 영역을 최소화 하는 것이 요구된다.

### 2.3.2 작업 영역의 사상

본 연구에서 사용한 매스터 암과 슬레이브 암은 기구학적으로 다른 구조를 가지고 있으므로 각각의 작업영역도 그림5에 나타난 바와 같이 다르다. 따라서 이들 사이의 작업영역 사상이 필요하며 이것을 다음과 같이 2 단계로 나누어 행하였다. 1 단계로 다음과 같은 Affine 변환을 이용하여 매스터 암의 작업 영역을 슬레이브 암의 작업 영역으로 사상하였다.

$$\begin{bmatrix} x_{s1} \\ y_{s1} \\ z_{s1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $x_m, y_m, z_m$ 는 각각 매스터 암의 기준 좌표계에 대한 매스터 암의 위치를 나타내며,  $x_{s1}, y_{s1}, z_{s1}$ 는 각각 슬레이브 암의 기준 좌표계에 대한 슬레이브 암의 위치를 나타낸다. 그리고  $a, b, c$ 는 상수이며 각각 1.525, 1.525, 0.25의 값을 주었다. 위 식은 매스터 암의 작업 영역을  $x, y, z$ 축에 대해 각각 일정 비율로 확대, 또는 축소시켜 얻어진 공간을 슬레이브 암의 작업 영역으로 사용하는 것을 의미한다. Affine 변환은 평행한 두 직선을 역시 평행한 두 직선으로 사상시켜 주는 특성을 가지고 있으며 [5], 특히 (1)식으로 표현되는 변환을

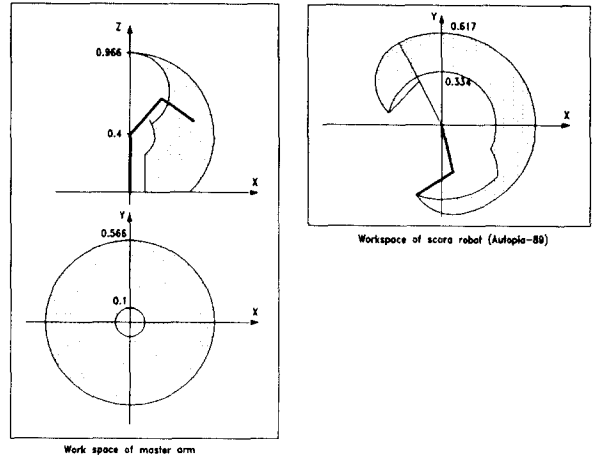


그림 5. 매스터 암과 슬레이브 암의 작업 영역

사용할 경우 직사각형은 직사각형으로, 타원은 타원으로 사상되며, 이들 도형을 포함하는 평면의 기울기는 사상 후에도 보존되는 특성을 가지게 된다.

그런데, 그림5에서 보는 바와 같이 슬레이브 암의 작업 영역은 주로 1, 2, 4사분면에 위치하며 3사분면은 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 사상시 공간의 왜곡이 발생하지 않으면서도 슬레이브 암의 사용 가능한 작업 영역을 최대화 하기 위해 매스터 암의 작업 영역을 그림6과 같이 제한하였으며 그 범위는  $-20^\circ \leq \theta \leq 100^\circ$  이다.

그런데, 1 단계로 사상된 영역은 슬레이브 암의 작업 영역을 초과하므로 이를 다시 작업 영역 내로 보내주기 위한 2차 사상이 필요하게 된다. 이 2차 사상은 다음과 같다.

$$x_{s2} = \begin{cases} R_{min}/R(x_{s1}, y_{s1}) \cdot x_{s1} & (R(x_{s1}, y_{s1}) \leq R_{min}) \\ x_{s1} & (R_{min} \leq R(x_{s1}, y_{s1}) \leq R_{max}) \\ R_{max}/R(x_{s1}, y_{s1}) \cdot x_{s1} & (R(x_{s1}, y_{s1}) \geq R_{max}) \end{cases}$$

$$y_{s2} = \begin{cases} R_{min}/R(x_{s1}, y_{s1}) \cdot y_{s1} & (R(x_{s1}, y_{s1}) \leq R_{min}) \\ y_{s1} & (R_{min} \leq R(x_{s1}, y_{s1}) \leq R_{max}) \\ R_{max}/R(x_{s1}, y_{s1}) \cdot y_{s1} & (R(x_{s1}, y_{s1}) \geq R_{max}) \end{cases}$$

$$z_{s2} = z_{s1} + 0.246 \quad (2)$$

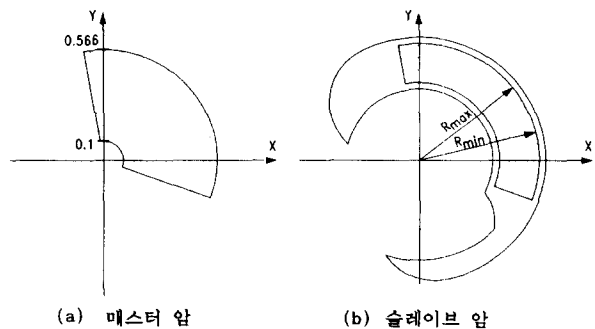


그림 6. 작업 영역의 사상

여기에서

$$R(x_{s1}, y_{s1}) = (x_{s1}^2 + y_{s1}^2)^{1/2}$$

이며, 이것은 X-Y 평면 상에서 원점으로 부터 점  $(x_{s1}, y_{s1})$  까지의 거리를 나타낸다.  $R_{min}$ 과  $R_{max}$ 는 상수이며 그 값은 각각 340mm 와 610mm 이다. 그림6은 본 연구에 사용된 마스터 암의 작업 영역과 이에 대응되는 슬레이브 암의 작업 영역을 보여준다.

### 3. 성능 및 특성 실험

본 연구에서 개발된 원격조작 시스템의 성능 및 특성을 살펴 보기 위해 다음과 같은 실험을 행하였다. 슬레이브 암이 마스터 암을 통해 전달되는 작업자의 운동을 충실히 추종하는 것은 원격조작 시스템에서 기본적으로 요구되는 중요한 기능이다. 앞 장에서 설명한 것과 같은 구성을 가지는 시스템에서 슬레이브 암이 작업자의 운동을 얼마나 충실히 모사하는지를 알아보기 위해 다음과 같은 실험을 하였다.

첫째로 작업자가 마스터 암을 쥐고 X-Y 평면 상에서 원 운동을 하였다. 원의 반경은 4.5cm 이며 그림7(a)에 그 궤적이 나타나 있다. 그림7(b)는 이것을 작업영역 사상한 후의 궤적이며 이것이 슬레이브 암의 기준 궤적이 된다. 사상 후에도 궤적의 형상은 원형을 그대로 유지하며 그 크기는 늘어났음을 알 수 있다. 그림7(c)는 위의 기준 궤적에 대한 슬레이브 암의 실제 운동 궤적이다. 기준 궤적을 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 그림7(d)는 작업자가 X-Y평면 상에서 한 변의 길이가 10cm인 정사각형의 운동을 한 경우의 궤적을 보여준다. 그림7(e), (f)는 각각 이것에 대한 슬레이브 암의 기준 궤적과 실제 궤적을 보여 준다. 그림의 왼쪽 아래 부분에 사각형의 형상이 찌그러진 부분이 보이는데, 이 부분은 1차 사상의 결과가 슬레이브 암의 작업영역을 초과하는 영역으로 사상되어 2차 사상에 의해 그 형상이 찌그러졌기 때문이다. 그림7(g)는 작업자가 X-Z평면 상에서 원운동을 한 경우의 궤적을 보여 준다. 그림7(h), (i)는 각각 이것에 대한 슬레이브 암의 기준 궤적과 실제 궤적을 보여 준다. 작업영역 사상에 의해 X축 방향으로의 확대, Z축 방향으로의 축소가 이루어 지므로 위의 궤적들은 타원형의 형상을 가지게 됨을 볼 수 있다. 각 실험에서 작업자가 마스터 암을 잡고 움직이는 속도는 약 40mm/sec 정도였다.

### 4. 결론

본 연구에서는 슬레이브 암의 형상과 동형이 아닌 범용 마스터 암을 이용한 한방향 원격 조작 시스템의 구성 방식을 제시하였다. 그리고 범용 마스터 암의 설계시 고려해야 할 사항들과 작업영역 사상시 요구되는 성질들에 대해 살펴 보았다. 개발된 시스템은 크게 범용 마스터 암과 슬레이브 암 및 원격 조작 시스템 제어기로 구성된다. 범용 마스터 암은 3자유도의 수직 다관절 링크 구조를 가지며 슬레이브 암은 상용화된 산업용 로봇을 이용하였다. 양자의 형상의 불일치로 인해 요구되는 작업 공간의 사상을 시스템 제어기가 담당한다. 실험 결과는 구성된 시스템에서 슬레이브 암이 마스터 암을 통하여 전달된 작업자의 움직임 충실히 모사할 수 있음을 보여준다.

앞으로의 연구 과제는 작업자의 6축 운동을 모두 표현해줄 수 있는 범용 마스터 암의 개발하는 것과, 실제 작업이 이루어지고 있는 원격 작업 환경에 대해 더 많은 센서 정보를 획득

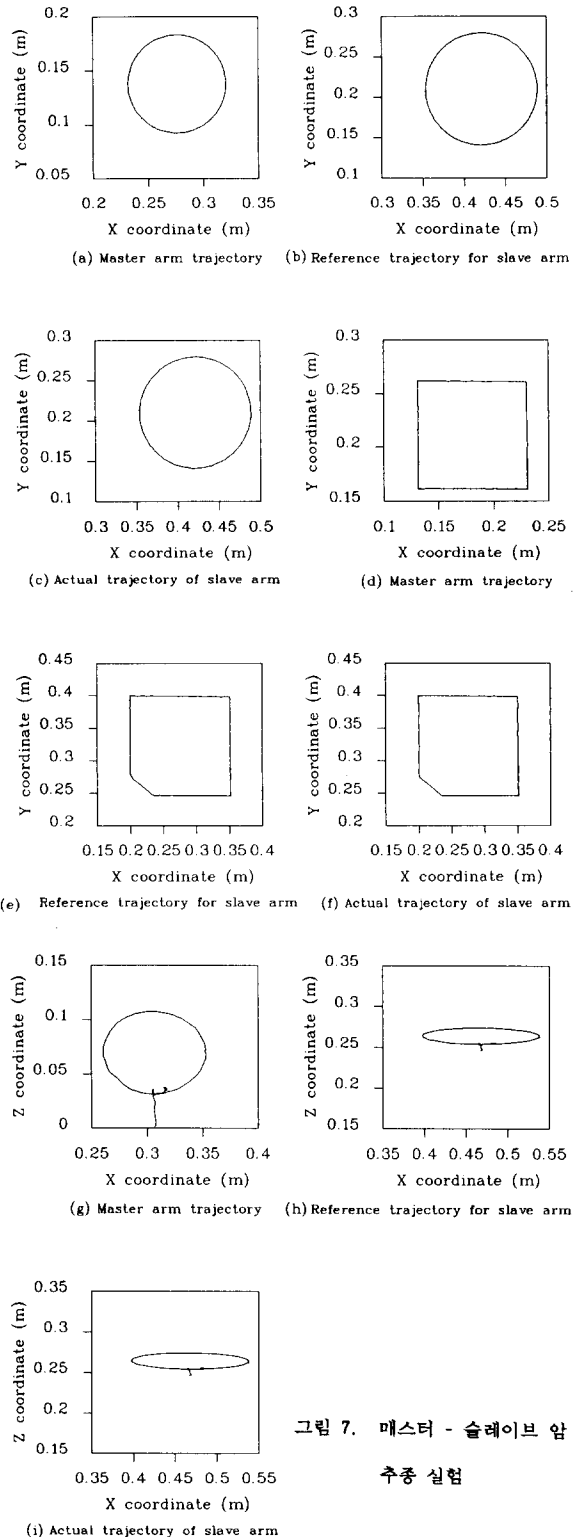


그림 7. 마스터 - 슬레이브 암 추종 실험

독하여 슬레이브 암에 지능화된 작업 수행 능력을 부여하는 것 등이다.

#### 참고 문헌

- [1] J. Vertut and P. Coiffet, "Robot Technology, Vol.3A, Teleoperation and Robotics", Prentice Hall Inc., 1986.
- [2] C. Vibet, "Emerging Methods for Master-Slave Manipulator Design", Int. J. of Robotics and Automation, Vol.1, No.2, 1986.
- [3] Y. S. Park, et. al., "An Extended Workspace Mapping Algorithm and Its Implementation in a Nuclear Telerobotic Control Sytem", IFAC Sym. on Algorithm and Architecture for Real Time Control, 1992.
- [4] K. C. Koh and H. S. Cho, "Development of a PC-based Scara Robot Controller", KACC, 1990.
- [5] "James & James Mathematics Dictionary", Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1968.