

비구동 마스터 암을 이용한 원격로봇의 마스터-슬레이브 제어

A Master-Slave Control for Telerobot using a Non-Actuated Master Arm

°황 석 용, 김 승 호

한국원자력연구소 원자력산업용 로봇기술개발팀

(Tel: 868-8835; Fax: 868-8833; E-mail: syhwang1@nanum.kaeri.re.kr)

Abstract In this paper, a new control scheme for master-slave control of telerobot is proposed. The proposed method can be classified into unilater master-slave control methods in the aspect of the data flow. But the master arm in the proposed control scheme can deliver operator the similar kinesthetic sense as other bilateral force reflecting master arms do. The principle concept is that the sensed operator's force/torque is used as the reference input for a damping controller type of telerobot controller which track the operators efforts. Master arm and master controller can be implemented in a simple form, and it needs not be driven by actuators, but force sensing capability.

Keywords Telerobot, Master-slave control, Force feedback, Kinesthetic feedback, Master arm

1. 서론

로봇을 제어하는 방법은 마스터 암을 이용하여 로봇에 대한 제어 입력을 직접적으로 전달하는 마스터-슬레이브 식의 원격 제어 방식과 미리 계획된 정보 또는 각종의 센서로부터의 정보에 의하여 로봇을 자동제어하는 방식으로 구분할 수 있다. 산업용 로봇과 같이 작업공간과 작업 대상이 정형적인 환경에서 일련의 단순한 작업을 반복적으로 수행하는 경우에는 미리 계획된 경로를 이용하는 등의 자동제어가 바람직한 방식이다. 그러나 우주항공, 심해저, 원자력발전소 등과 같이 비정형적인 환경에서 부여된 작업을 자율적으로 수행할 수 있는 로봇을 이용하기에는 해결해야 할 기술적 문제가 많기 때문에 마스터-슬레이브 식의 원격제어가 일반적으로 사용된다.

핫셀(Hot cell) 내의 고방사선 물질을 취급하기 위한 기계식의 마스터-슬레이브 로봇의 개발[1]을 시작으로 개선된 마스터-슬레이브 방식의 원격로봇 시스템에 대한 연구가 진행되어왔다. 기계식 마스터-슬레이브 방식의 공간적인 제한을 극복하기 위하여 마스터-슬레이브 간의 운동감각적(Kinesthetic) 결합을 기계식에서 전기전자 방식으로 변환 시켰으며, 다양한 종류의 운동감각적 결합 및 운동감각적 피드-백 제어 방식들이 제안되었다. 이들 방식들은 초기 형태의 단방향(Unilateral) 마스터-슬레이브 제어 방식과 양방향 힘반향(Bilateral force reflecting) 마스터-슬레이브 제어 방식으로 구분되며, 단방향 제어 방식은 마스터의 위치, 속도 정보가 슬레이브로 쪽의 단방향으로만 전송될뿐 슬레이브의 정보가 마스터로는 전송되지 않기 때문에 슬레이브와 취급 대상 물체 및 외부환경과의 상호작용력이 고려되어야 하는 작업을 수행하는 것이 매우 어렵다. 대상물체를 잡고 위치시키는 단순한 작업으로부터 디버링, 드릴링, 막대를 구멍에 넣기(Peg in hole) 등의 고난이도를 요구하는 작업을 수행하기 위한 양방향 힘반향 마스터-슬레이브 제어 방식의 연구가 활발히 진행되었다[2,3,4,5].

그러나 단방향 마스터-슬레이브 및 양방향 제어 시스템에 있어서 마스터 암은 기구학적 측면에서 슬레이브 로봇의 기구학적

자유도 이상의 자유도를 갖는 복제형(Replica type) 또는 범용(Universal type)의 구조로, 각 관절들은 힘을 반향하기 위하여 액츄에이터에 의해 구동되어야 한다. 양방향 힘반향형의 마스터 암은 슬레이브 로봇의 기구학적 자유도 이상의 자유도를 갖는 하나의 완전한 로봇으로, 장시간의 운전에 따른 작업자의 피로도 및 안전성을 고려하여 소형 및 경량의 구조를 취하며, 역구동성을 높이기 위하여 기계적 임피던스를 최소화하는 관절부 동력 전달 방식을 필요로한다. 그러므로 양방향 힘반향 마스터 암의 설계제작 및 제어는 슬레이브 로봇에 못지 않는 노력과 경비를 요구한다.

본 논문은 서보 모터 등의 구동기로 구동되는 다관절형의 기구학적 구조를 갖는 기존의 마스터 암과는 달리, 비구동형의 마스터 암을 이용한 새로운 개념에 입각한 원격로봇의 마스터-슬레이브 제어 방안을 제시한다. 제안하는 방식에 있어서 마스터 암은 특정의 기구학적 형태를 취하지 않고 작업자의 손이 용이하게 과할 수 있는 볼 및 막대 등의 간단한 형태로 구현되며 마스터 암에 가하는 작업자의 힘 및 토크 값을 측정하는 센서부가 필요하다.

2. 마스터-슬레이브 제어와 운동감각 인지

2.1 마스터암에 의한 작업자의 운동감각적 인지

마스터 암을 이용한 원격로봇 시스템은 그림 1과 같이 작업자, 마스터 암, 슬레이브 로봇 및 작업 대상 물체와 외부 환경으로 구성된다. 마스터-슬레이브 제어의 기본 개념은 전체 제어계내에 작업자를 포함시켜 원격지에서 작업을 수행하는 슬레이브 로봇 제어 명령의 생성함에 있어 인간의 지능, 감각 및 판단을 이용하고 제어명령을 슬레이브 로봇에 전달하는 매체로 마스터 암을 이용하는 것이다. 사람이 작업을 수행할 때, 여러 감각기관을 동원하여 시각, 청각, 촉각, 힘 등의 정보를 획득하고 뇌에서 판단, 결정된 후 손과 손가락의 근육을 움직이는 일련의 과정을 반복하게 되는데 대부분의 작업에 있어서 가장 중요한 정보는

시각정보와 팔의 운동 감각적 정보이다. 이상적인 원격로봇의 제어 시스템은 작업자가 마치 원격지의 현장에서 작업하는 느낌을 같도록 시각 및 청각적인 정보를 전달하고 팔과 손에 운동 감각을 갖도록 하는 것이다.

마스터 암은 작업자에게 슬래ιβ 로봇에 대한 운동감각을 전달하고 슬래ιβ 로봇에 대한 명령을 생성하는 매체로 사용되는데, 팔과 손의 운동감각은 1) 대상물체 및 외부환경과의 상호작용이 없는 자유공간에서의 움직임에 대한 감각과 2) 대상물체 및 외부환경과의 상호작용에 의한 힘과 토크에 대한 감각의 두가지 경우로 규정할 수 있다. 대부분의 마스터 암은 운동감각적 투명성을 구현하기 위하여 복잡한 형태의 제어기와 양방향의 힘반향이 가능한 다관절형의 복잡한 메카니즘으로 구현된다. 그러나 완벽한 운동감각적 투명성을 보장하는 마스터-슬래ιβ 시스템의 구현은 불가능하다. 이를 보장하는 마스터-슬래ιβ 제어기 설계 및 로봇의 기구학적 측면의 문제가 내제하기 때문이다. 기구학적 측면에서 완전한 투명성을 보장하기 위해서는 슬래ιβ 로봇의 작업공간이 인간의 팔과 동일해야 하며 대상물체를 취급하는 손좌표계와 눈 좌표계 사이의 상관관계가 슬래ιβ 로봇과 모니터링 장치에서 일정하게 유지되어야만 한다. 실제 슬래ιβ 로봇 시스템을 구현함에 있어 기구부의 크기가 인간의 팔에 비하여 마이크로 로봇처럼 극히 작거나 또는 훨씬 클 수도 있으며 공간적인 제약 조건 등으로 모니터링 장치를 임의의 위치에 설치하기도 하며 서로 다른 위치와 자세를 갖는 다수의 모니터링 장치를 사용하기도 한다. 이러한 이유들로 인하여 대부분의 실제 적용시 마스터 암의 운동에 대한 슬래ιβ 로봇의 운동의 사상관계는 정량적이기 보다 정성적으로 이루어진다. 즉 슬래ιβ 로봇의 운동이 마스터 암의 운동을 정확히 일치하기보다는 마스터암의 운동방향에 일정한 비례관계를 따라 추종하는 양상으로 마스터-슬래ιβ 제어가 이루어진다.

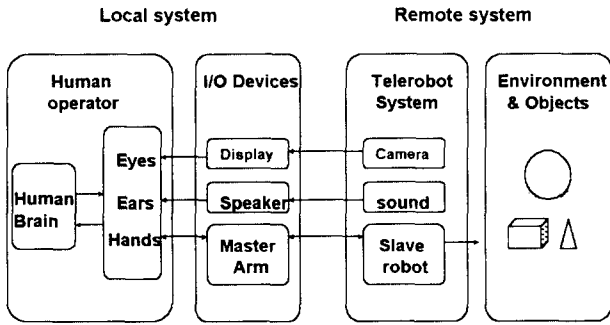


Fig. 1. 원격로봇 시스템의 구성

그림 1. The configuration of the telerobot control system

2.2 기존 마스터-슬래ιβ 방식과 운동감각적 인지

원격로봇을 포함한 원격지의 장치를 원격제어하는 방식은 그림 2 와 같이 두가지로 분류된다. 그림의 첫 번째 경우는 원격 장치의 작업영역이 한정되어 있는 경우에 널리 사용되는데, 입력 장치의 위치를 K_p 의 비례관계에 따라 원격장치의 위치로 사상시키는 방식으로 원격장치의 작업영역이 입력장치에 비해 클수록 또는 빠른 이동이 요구될수록 큰 K_p 의 값을 설정한다. 그림의 두 번째 경우는 이동로봇, 비행기 등과 같이 원격장치의 작업 영역 또는 비행거리가 한정적이지 않는 경우에 사용하는 방식으로 조이스틱 구조의 입력장치 운동 위치를 원격장치의 속도로 사상시키는 방식이다. 비례상수 K_v 는 첫 번째 경우의 K_p 설정과 같은 논리에 따라 설정된다. K_p 의 값이 "1"이 아닌 경우

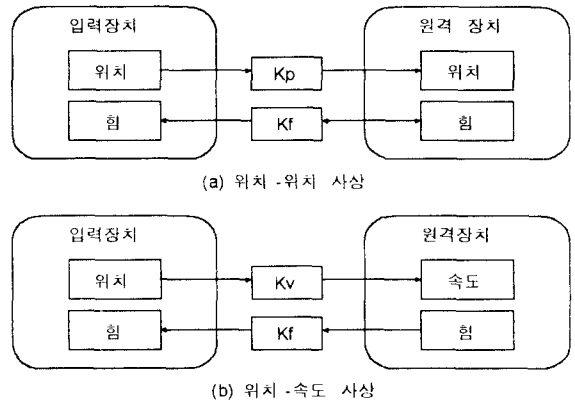


그림 2. 위치-위치 및 위치-속도 사상

Fig. 2. Position to position and position to velocity mapping

두 방식은 원격장치가 입력장치를 취급하는 작업자가 의도하는 방향에 대한 정성적 노력으로 움직인다는 측면에서 유사한 운동감각적 성질을 갖는다. 운동감각적 성질중 원격장치와 대상물체 또는 외부환경과의 상호작용에 의한 힘과 토크에 대한 감각을 작업자에게 전달하기 위해서는 두 방식의 입력장치는 모두 전기, 또는 유공압 액추에이터 등으로 구동되는 복잡한 메카니즘으로 구현된다.

3. 비구동 마스터 암을 이용한 마스터-슬래ιβ 제어시스템 설계

3.1 비구동 마스터 암 마스터-슬래ιβ 제어방식의 개념

비구동 마스터 암을 이용한 원격로봇의 마스터-슬래ιβ 제어의 기본 개념은 그림 3 과 같이 입력장치인 마스터에 가하는 작업자의 힘을 원격장치인 슬래ιβ 로봇의 속도 및 힘으로 사상시킨다. 슬래ιβ 로봇이 자유공간에서 운동할 경우 작업자의 힘은 슬래ιβ 로봇의 속도로 사상되고 운동이 제한되는 공간에서는 작업자의 힘이 슬래ιβ 로봇과 대상물체 및 외부환경과의 접촉력으로 사상된다. 제안하는 방식의 기본개념은, 1) 자유공간에서 움직일때 작업자가 의도하는 방향의 힘 벡터를 슬래ιβ 로봇의 속도 벡터로 사상시키므로 작업자는 운동에 대한 충분한 운동감각을 느낄 수 있으며, 2) 운동이 제한된 경우, 접촉력을 작업자에게 전달하는 기존의 방법과는 달리 작업자가 입력장치에 가하는 힘을 슬래ιβ 로봇이 추종하도록 제어함으로써 접촉에 대한 운동감각을 느끼도록 하는 것이다. 본 방식은 작업자의 힘과 토크 정보를 측정하는 장치만 요구되는데, 기존의 방식들처럼 마스터가 운동할 필요가 없으며 더욱이 액추에이터에 의해 구동될 필요가 없기 때문에 메카니즘의 구현이 극히 쉬우며 제어 시스템 또한 간단하게 구현된다.

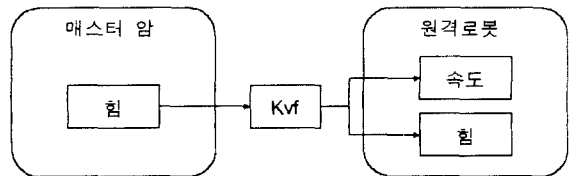


그림 3. 힘-속도/힘 사상

Fig. 3. Force to velocity/force mapping

3.2 제어 시스템 설계

비구동 마스터 암을 이용한 마스터-슬레이브 시스템의 구성은 그림 4 와 같이 작업자, 마스터암, 슬레이브 로봇, 외부 환경으로 구성된다. 마스터 암은 작업자가 취급하기 용이한 구조의 기구로 작업자가 가하는 힘과 토크를 추출하는 센서가 내장된다. 슬레이브 로봇은 작업을 수행하는 기구부, 접촉력을 추출하는 힘/토크 센서, 및 마스터 암으로부터의 힘과 토크를 기준 입력으로 로봇을 제어하는 제어기로 구성된다. 블록선도에서 처럼 본 마스터-슬레이브 시스템은 마스터에 가해지는 힘과 토크 그리고 로봇의 접촉력을 측정하는 2 개의 센서를 필요로 하는 단방향의 마스터-슬레이브 제어시스템으로 슬레이브 로봇의 접촉력을 구동 매개체로 하여 작업자에게 운동감각을 전달하지 않고 마스터에 대한 작업자의 운동감각대로 슬레이브 로봇을 제어하는 것이 기본 개념이다. 제안하는 제어시스템에서 슬레이브 로봇의 제어기는 작업자의 힘/토크 F_o 를 속도 \dot{X}_d 로 변환하고 이를 기준 제어 입력으로 하는 댐핑 제어기(Damping controller)[6] 형태로, 실제 구현에 있어서 그림의 직교공간형의 댐핑 제어기는 조인트 공간형으로 대신할 수 있다.

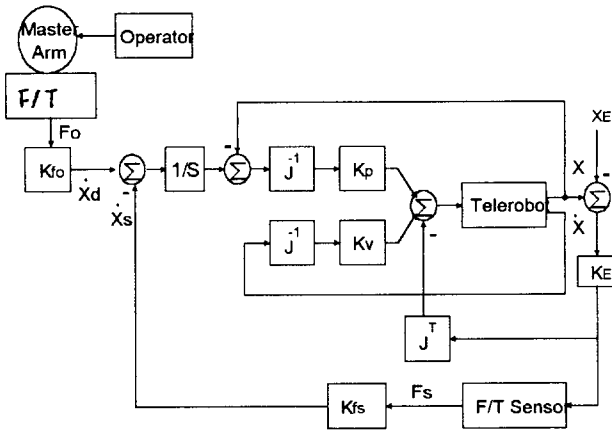


그림 4. 비구동 마스터 암을 이용한 마스터-슬레이브 제어시스템
Fig.4 Master-slave control system using a non-actuated master arm

그림에서 J 는 슬레이브 로봇의 자코비안 행렬을, X 와 \dot{X} 는 로봇 손좌표계의 위치와 속도 벡터를 나타내며 X_E 는 접촉점의 위치를 나타낸다. K_{F_o} 및 K_{F_s} 는 힘과 토크 벡터를 속도 벡터로 변환시키는 어드미턴스(Admittance) 행렬로 대각행렬이다. 댐핑 제어기의 기준 제어입력 \dot{X}_d 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\dot{X}_d = K_{F_o} F_o \quad (1)$$

여기서, $F_o = [F_{ox} \ F_{oy} \ F_{oz} \ M_{ox} \ M_{oy} \ M_{oz}]^T$ 는 작업자의 힘과 토크 벡터를 나타내며 대각행렬 K_{F_o} 를 다음과 같이 정의한다.

$$K_{F_o} = \begin{pmatrix} K_{F_{ox}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{F_{oy}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{F_{oz}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{M_{ox}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{M_{oy}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{M_{oz}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

댐핑 제어기로 변환되는 신호 \dot{X}_s 는 다음 식과 같다.

$$\dot{X}_s = K_{F_s} K_E (X - X_E) = K_{F_s} F_s$$

$$F_s = [F_{sx} \ F_{sy} \ F_{sz} \ M_{sx} \ M_{sy} \ M_{sz}]^T \quad (3)$$

$$K_{F_s} = \begin{pmatrix} K_{F_{sx}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{F_{sy}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{F_{sz}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{M_{sx}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{M_{sy}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{M_{sz}} \end{pmatrix}$$

여기서, K_E 는 로봇과 접촉되는 대상물체의 강성이며, F_s 는 로봇과 외부 대상물체와의 접촉력을 나타낸다. 댐핑 제어기의 기준 입력 \dot{X}_d 에 대한 평형상태에서의 로봇과 대상 물체와의 접촉력은 다음과 같다[6].

$$F_{ss} = K_E^{-1} \dot{X}_d \quad (4)$$

식 (1)을 식 (4)에 대입하면 평형상태 접촉력은 다음과 같다.

$$F_{ss} = K_{F_s}^{-1} \dot{X}_d = K_{F_s}^{-1} K_{F_o} F_o \quad (5)$$

식 (5)에서 $K_{F_s}^{-1} K_{F_o} F_o$ 는 작업자가 마스터 암에 가하는 힘/토크 F_o 를 평형상태의 접촉력으로 변환시키는 행렬로 이를 K_F 로 정의하고 정리하면 다음 식과 같게 된다.

$$K_F = \begin{pmatrix} K_{F_{ox}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{F_{sx}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{F_{oy}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{F_{oz}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{M_{sx}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{M_{sy}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{M_{sz}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

K_F 는 대각행렬이 되는데 이는 결과적으로 작업자의 X-Y-Z 축에 대한 힘과 토크가 축간의 결합이 없이 접촉력/토크 벡터인 F_s 로 전달됨을 의미한다. 각 축에 대한 힘 또는 토크의 전달비는 K_{F_s} 행렬의 (i, i)번째 K_{F_o} 행렬의 (i, i)번째 요소로 나눈 값과 같다. 행렬의 특정 요소 $K_F(i, i)$ 가 1) $K_F(i, i) = 1$ 인 경우 i 축에 대한 접촉력은 작업자가 의도하는 힘 또는 토크와 같게 되고, 2) $K_F(i, i) > 1$ 인 경우 접촉력은 증폭되고, 3) $K_F(i, i) < 1$ 인 경우 접촉력은 감소된다. 따라서 실제 적용시 대상 원격로봇이 큰 힘을 구동하는 경우 $K_F(i, i)$ 의 값을 키워 작업자의 힘을 증폭시키고, 마이크로 로봇처럼 구동력이 작은 경우 $K_F(i, i)$ 값을 줄이는 식으로 조절하여 대상 로봇을 원격제어한다.

4. 원격작업 수행에 대한 고찰

4.1 자유공간에서의 운동

외부 물체와의 상호작용이 없는 자유공간에서 원격로봇이 운동할 때 접촉력 $F_s = 0$ 이므로 댐핑 제어기로 변환되는 속도 $\dot{X}_s = 0$ 이 되어 제어기는 \dot{X}_d 를 추종하는 속도 제어기로 작용한다. 작업자가 마스터 암에 가하는 힘의 방향으로 로봇 손좌표계가 움직이며 힘의 세기에 비례하여 속도가 변화하고 힘을 가하지 않을 때 정지하게 되므로 작업자는 원격로봇의 운동에 대한 충분한 운동감각을 인지하게 된다. 또한 자유공간에서 움직임에 의한 힘과 접촉력에 의한 힘의 구별은 작업자가 원격지의 작업

상황을 감시하면서 작업을 수행하기 때문에 가능하다.

4.2 곡면 추적

그림 5의 경우와 같은 곡면을 따라 로봇 손을 "A" 지점에서부터 "B" 까지 이동시키는 경우를 생각해 보자. "A" 지점에서 작업자가 "Z" 축 방향으로 매스터 암에 힘을 가하면 원격로봇은 "Z" 축 방향으로 이동하게 되어 접촉면에 수직인 방향으로 접촉력 F_s 가 작용하게 된다. 슬래브 로봇의 댐핑 제어기는 F_s 의 성분 중 F_{sz} 의 값이 $(K_{Fsz}/K_{Foz})F_o$ 가 되도록 로봇을 "Z" 방향으로 이동시키며 F_{sx} 성분은 로봇을 "X" 축 방향으로 이동시키도록 작용하여 로봇손이 경사면을 따라 미끄러져 내려오게 된다. 로봇손의 진행속도는 힘을 가하는 방향과 세기에 의해 좌우되는데 접촉면에 가하는 힘이 수직인 방향이면 속도는 감소하고 접선 방향이면 속도가 증가한다.

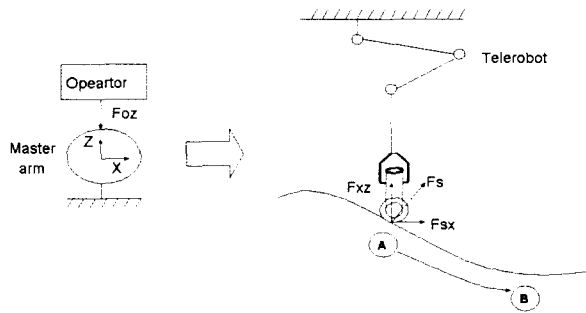


그림 4. 곡면 추적 작업
Fig.4 Curved surface following task

4.3 구멍에 막대 넣기(Peg in hole)

그림 6의 초기 상태에서 작업자는 막대를 구멍속으로 진행시키기 위하여 F_o 방향으로 매스터 암에 힘을 가한다. Y 축에 대하여 그림의 방향으로 토크가 발생하고 제어기는 토크 값을 "0"으로 하기 위하여 막대를 회전시킨다. 두 번째 그림에서처럼 회전된 막대는 F_o 의 F_{ox} 성분에 의하여 구멍의 오른쪽 면에 접촉하게 된다. 다시 막대는 접촉력을 유지하면서 F_{oz} 성분에 의해 "Z" 축 방향으로 이동한후 바닥면에 접촉하게 된다. 작업자가 더 이상 매스터 암에 힘을 가하지 않으면 막대는 접촉력이 발생되지 않은 상태에서 구멍에 넣어진 상태를 유지하게 된다.

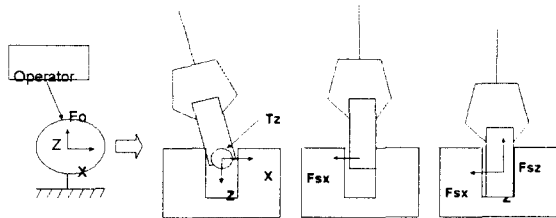


그림 5. 구멍에 막대 넣는 작업
Fig. 5. Peg in hole task

4.4 외부로부터의 힘/토크 작용

그림 6과 같이 로봇 손에 외부로부터의 힘 또는 토크가 작용할 때 로봇 손은 힘과 토크가 작용하는 방향으로 이동 및 회전하게 된다. 이때 작업자가 이동과 회전에 저항하는 방향으로 매스터 암에 힘과 토크를 점진적으로 가하면 이동과 회전 속

도가 줄어들다가 정지하게 된다. 로봇 손이 물체를 집어들면 중력에 의한 힘이 작용하게 되는데 이때 작업자는 물체를 들어올리는 방향으로 매스터 암에 힘을 가하게 되어 실제로 물체를 잡고 있는 운동감각적 효과를 경험하게 된다.

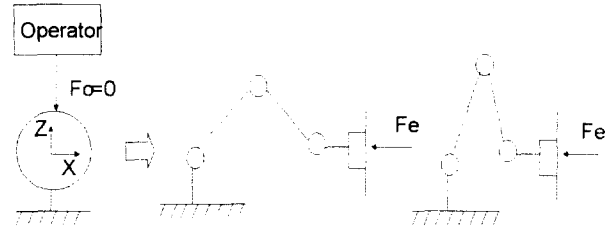


그림 6. 외부의 힘 작용에 의한 자세 변화
Fig. 6. Configuration change by a external force

5. 결론

본 논문에서는 새로운 개념에 입각한 원격로봇의 매스터-슬래브 제어방식을 제안하였다. 제안한 방식의 제어 시스템은 단방향형의 시스템으로, 기존의 단방향 및 양방향 힘방향 제어 시스템이 요구하는 복잡한 매커니즘의 힘방향 매스터 암을 필요로 하지 않으므로 시스템의 구현과 제어가 용이하다. 제안된 제어 방식에 있어서, 매스터 암은 비구동형으로 대스터 암을 취급하는 작업자의 힘과 토크 정보만을 필요로 하는데, 기본 개념은 힘과 토크를 매스터 암에 반향시키지 않고 작업자가 매스터 암에 가하는 힘과 토크를 슬래브 로봇이 추종하도록 하여 자유공간에서의 운동과 접촉력에 대한 운동감각을 인지하게 하는 것이다. 이를 위하여 댐핑 제어기형의 원격로봇의 제어를 설계하고 각종 원격작업의 수행에 대하여 고찰하였다.

제안한 방식은 로봇 매니플레이터, 이동 로봇을 포함한 각종의 원격장치 및 컴퓨터 그래픽으로 구현된 가상의 로봇과 장치들의 시뮬레이션용 입력장치로 활용될 수 있다.

5. 참고문헌

- [1] R. C. Geertz, "Manipulator systems developed at ANL," in Proc. 12th Conference on Remote Systems Technology, pp. 117-136, 1964.
- [2] G. J. Raju, G. C. Verghese, and T. B. Sheridan, "Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., 1989, pp.1316-1321.
- [3] B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback," in IEEE Trans. Robotics Automat., vol. 5, pp. 426-434, Aug. 1989.
- [4] H. Kazerooni, T. I. Tsay, and K. Hollerbach, "A controller design framework for telerobotics systems," in IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., vol. 1, Mar. 1993.
- [5] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., vol. 1, May 1992.
- [6] D. E. Whitney, "Historical perspective and state of the art in robot force control," IEEE Journal of Robotics and Automation, pp.262-268, 1987.