



마스터/슬레이브 매니퓰레이터의
설계 및 제어 기술 현황

State of the Art in Design and Control
of Master-Slave Manipulators

한국원자력연구소

29 - 41

h

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 1998 년도 기술보고서로 제출합니다.

제목 : 매스터/슬레이브 매니플레이터의 설계 및 제어 기술 현황

1998년 3월

주 저 자 :	선임연구원	김 기 호(원자력로봇Lab.)
공 저 자 :	책임연구원	김 승 호(“)
	선임연구원	김 병 수(“)
	선임연구원	김 창 회(“)
	선임연구원	정 승 호(“)
	선임연구원	황 석 용(“)
	선임기술원	서 용 칠(“)
	선임기원	이 영 광(“)

감수위원 : 책임연구원 윤 지 섭

요 약 문

극한환경에서 작업자를 대신할 수 있는 원격로봇 또는 원격기계장치에 대한 연구는 큰 관심과 주목을 받고 있다. 특히 매스터/슬레이브 매니플레이터는 엄격한 ALARA 규정에 적용받는 원자력 산업에서 40년 이상 폭넓게 사용되어 왔지만, 복잡하고 다축 자유도로 구성된 시스템의 성공적 운용은 매우 미미하다.

매스터 매니플레이터는 한쪽에서는 조작자와 다른 한쪽에서는 슬레이브 매니플레이터와 서로 인터페이스하는 입력장치로서 원격조작에서 중요한 부분을 차지한다. 양방향 힘반향제어는 매스터와 슬레이브 매니플레이터의 성공적이고 능숙한 운전에서 중요한 역할을 하며, 기계적 하드웨어를 잘 설계하고 제어 방식을 적절하게 실현함으로써 매스터와 슬레이브 시스템의 성능을 고양시킬 수 있다.

본 보고서에서는 매스터와 슬레이브 매니플레이터 시스템에서 인간과 기계의 인터페이스 장치인 매스터 매니플레이터의 설계에 관한 문제를 기술하며, 유사형과 범용형 매스터 매니플레이터를 설계하는데 있어서 중요한 설계변수들의 영향을 정량적으로 평가하고, 이를 토대로 설계조건을 확립한다. 또한 매스터와 슬레이브 매니플레이터에서 사용되는 다양한 양방향 힘반향 제어방식을 고찰하며, 매스터와 슬레이브 매니플레이터 사이의 위치 및 힘 정보 흐름을 조사하며, 각 각의 제어 루프에 대하여 분석하고 이들을 통합하여 실현시키는 방법에 대하여 기술한다.

SUMMARY

The use of remotely operated robots and other mechanical devices as replacements of human workers in hazardous environments is a growing field of research. In particular, master-slave manipulators have been extensively used in the nuclear industries governed by the ALARA principle for more than four decades. There, however, are still few successful implementations of complex and high degree-of-freedom systems. The master manipulator is an input device which interfaces with the human operator on one side and with the slave manipulator on the other. Bilateral force-reflecting control plays a key supporting role in successful dexterous manipulation of the master-slave manipulators. Great increases in performance of the master-slave manipulator system can be achieved through good design of mechanical hardwares and proper implementation of the embedded control strategies.

This report presents some of design issues relevant to designers of the master manipulator as man-machine interface device in the master-slave manipulator system. Significant design parameters for both the replica and universal master manipulators are evaluated. In addition, the report describes the various control schemes of the bilateral force-reflecting master-slave manipulators, discusses the analysis and synthesis of the control loop between the master and

slave manipulator, and examines the necessary position and force information on both sides.

Contents

I. Introduction	1
II. Terminology Definition	3
III. Teleoperation	7
1. Teleoperated System	7
2. Analysis and Comparison of Master Manipulator	10
3. Design of Force-Reflecting Hand Controller	16
IV. Bilateral Control in Teleoperation	22
1. Position-Position Control	22
2. Position-Force Control	28
3. Generalized Impedance Control	33
4. Compliant Control	37
5. Supervisory Control	40
6. Virtual Force Control	41
V. Conclusions	47
References	48

목 차

I. 서 언	1
II. 용어정의	3
III. 원격조작	7
1. 원격조작 시스템	7
2. 매스터 비교 및 검토	10
3. 힘반향 핸드콘트롤러 설계	16
IV. 원격조작의 양방향제어	22
1. 위치-위치 제어	22
2. 위치-힘 제어	28
3. 일반화된 임피던스 제어	33
4. 콤플라이언트 제어	37
5. 관리 제어	40
6. 가상힘 제어	41
V. 결 언	47
참고문헌	48

그림 목차

그림 1. 원격조작시스템	3
그림 2. 제어정보 흐름	9
그림 3. 범용형 핸드콘트롤러	14
그림 4. 신형 핸드콘트롤러의 기구학	20
그림 5. 신형 핸드콘트롤러의 그래픽 시뮬레이션	21
그림 6. 단순한 조인트 대 조인트 제어(유사형)	25
그림 7. 조인트 위치오차를 이용하는 힘반향의 PPC(유사형)	26
그림 8. 직각좌표 위치오차를 이용하는 힘반향의 PPC(범용형)	27
그림 9. 힘/토크센서를 이용하는 힘반향의 PFC(유사형)	30
그림 10. 힘/토크센서를 이용하는 힘반향의 PFC(범용형)	31
그림 11. 양쪽에 힘/토크센서를 이용하는 힘반향의 PFC(범용형)	32
그림 12. 마스터/슬레이브 매니퓰레이터의 2 포트 네트워크 모델	35
그림 13. 임피던스 제어	36
그림 14. 콤플라이언트 제어	39
그림 15. 조작자 그래픽 훈련시스템의 블럭선도	45

표 목 차

표 1. 원격조작 매니플레이터와 산업용 매니플레이터의 차이 - - - -	6
표 2. 핸드컨트롤러의 특징 -	15

I. 서 언

위험한 환경 하에서 수행되는 작업의 원격화에 대한 필요성은 꾸준히 인식되어 왔으며 작업 종사자를 로봇으로 대체하기 위한 연구도 함께 계속되어왔다. 우주 및 원자로 내부 원격탐사와 같은 극한환경에서 요구되는 비정형 작업들은 원격로봇(telerobot) 또는 텔리오퍼레이터(teleoperator)에 의해서만 수행될 수 있다.

원자력 산업에서 요구되는 원격작업은 매스터/슬레이브 매니플레이터(master-slave manipulator)에 의하여 이루어지며 슬레이브 매니플레이터는 조작자(human operator)에 의하여 수동으로 운전된다. 대부분의 고방사선구역 작업들은 복잡하고 예측 불가능하여 미리 작업계획을 수립하기가 어렵기 때문에 이러한 작업들을 안전하고 성공적으로 수행하기 위해서는 조작자의 판단능력, 조작기술, 센서정보 선별 등과 같은 상호작업의 통합이 필요하다. 슬레이브를 이용하여 원격작업을 수행할 때 조작자는 시각, 청각, 촉각 등의 센서정보를 필요로 한다. 조작자는 매스터 매니플레이터 또는 핸드콘트롤러(hand controller)라 불리는 입력장치(input device)를 조작함으로써 원격 작업환경 내에 있는 슬레이브를 조종한다.

조작자와 입력장치, 슬레이브는 원격조작시스템(teleoperated system)을 구성하는 주요 요소들이다. 입력장치는 조작자의 명령을 슬레이브에 전달하고 또한 슬레이브에서 발생하는 외부 지각정보를 손을 통하여 조작자에게 제공해주는 유일한 통신 링크로서 원격조작시스템의 인간과 기계를 인터페이스 시켜주는 중요한 부분이다. 그러나 현재 산업현장에서 사용되고 있는 많은 입력장치들에 비해 이들의 설계 및 사양, 성능에 관한

정량적인 데이터는 잘 확립되어 있지 않다.

본 보고서에서는 현재 개발되어 사용중인 여러 가지 마스터 매니플레이터들의 기구학적 구조와 형태, 설계변수 등을 비교 및 분석하였고, 이를 토대로 증기발생기의 노즐댐 장착 및 탈착 작업에 사용될 슬레이브인 Schilling Titan 매니플레이터를 원격 조종하기 위한 마스터 매니플레이터의 설계를 기술하였다. 또한 마스터/슬레이브 매니플레이터 시스템의 원격조작에 응용되고 있는 다양한 양방향 제어기술을 고찰하였고, 각 제어기술의 제어특징과 제어방식, 제어구조 등을 기술하였다.

II. 용어 정의

원격기술 분야에서 사용되는 용어들의 정의를 재검토하는 것은 용어의 오용에 따른 혼돈을 피하고, 국내에서 동 분야의 요소기술을 이해하고 발전시키는데 있어서 큰 도움이 된다. 본 보고서에서는 기계장치를 원격으로 조종하는 기술과 관련하여 자주 언급되는 중요한 용어들을 원문에 충실히 상술한다.

Teleoperator

- A general purpose, dexterous, cybernetic machine that extends a person's sensing and/or manipulating capability to a location remote from that person.
- 인간의 감지 및 조작 능력을 인간으로부터 멀리 떨어진 곳까지 확장시킬수 있는 일반성, 숙련성, 인공두뇌성 등의 기능을 포함하는 기계로서 외부환경에 대한 정보를 획득하기 위한 인공센서, 인공센서를 외부환경까지 운반하기 위한 운반체, 조작자로부터 명령을 전달하고 또는 조작자에게 정보를 전달해주는 통신 채널, 외부환경에서 기계적인 작업을 수행하기 위한 인공 팔 또는 손 등으로 구성되어진다. 형태로는 manipulator, prosthetic(or orthotic) device, man amplifier, walking machine 등이 있다.

Human operator

- A person who does the observing (monitoring) and the acting

(controlling) in direct control.

- 제어계에서 기계장치를 직접 감시하고 조종하는 사람으로서, 마스터/슬레이브 매니플레이터(master-slave manipulator)에서 실제 임무를 수행하는 슬레이브 매니플레이터가 원하는 목표를 달성할 수 있도록 마스터 매니플레이터를 조종하는 조작자를 지칭한다.

Teleoperation (Telemanipulation)

- Direct and continuous human control of the teleoperators operating at a distance.

- 조작자가 입력장치를 사용하여 원격지있는 Teleoperator를 계속적으로 직접 조종하는 행위를 의미한다.

Telerobot

- An advanced form of teleoperator the behavior of which a human operator supervises through a computer intermediary.

- Teleoperator의 진보된 형태로서 조작자는 원격작업의 목표, 계획, 제한 조건, 유연성, 가정, 제안 등에 관하여 컴퓨터 매개체를 통하여 교신하며, 원격작업의 수행난이도, 문제점, 수행결과 등의 통합정보를 제공받는다. Telerobot은 조작자의 지령 명령과 자신의 인공 감지능력 및 지능을 토대로 하여 주어진 작업을 수행한다. Telerobot은 하드웨어적인 측면에서 Teleoperator와 차이가 없으나, 임무(task)의 조건과 제어계에서 조작자의 지속적인 필요성의 정도 등에 따라 구별된다.

Master-slave teleoperator (manipulator)

- A bilateral teleoperator (manipulator) in which forces and torques are proportionally reproduced from the controls (master) to the actuators (slave).

- 마스터/슬레이브 매니플레이터(master-slave manipulator) 개념은 미국 알곤연구소(Argonne National Laboratory)에서 시작되었으며, 마스터에서 생성된 힘/토크는 슬레이브에서 같은 크기(또는 축척된 크기)로 재생되며 또한 슬레이브에서 생성된 힘/토크도 같은 크기(또는 축척된 크기)로 마스터에서 재생된다.

Telepresence

- Ideal of sensing sufficient information about the teleoperator and the task environment and communicating this to a human operator, and thus allowing the operator to feel physically present at the remote site and to have the illusion of doing the task directly.

- Teleoperator와 원격지 작업환경에 대한 충분한 정보획득을 통하여 조작자가 마치 현장에서 본인이 직접 작업을 수행하는 것처럼 느끼는 것으로서, 조작자의 신체가 아니라 감각을 원격지까지 옮겨 놓는 것을 의미한다. 즉, 조작자는 “I would like to feel that I am there without being there.”를 성취하기 위하여 조작자에게 반향되는 시각, 촉각, 청각 등의 정보를 이용한다.

Teleoperated manipulator and Industrial manipulator

- 원격조작 매니플레이터(Teleoperated manipulator)와 산업용 매니플레이터(Industrial manipulator)는 표 1에서 명시한 바와 같이 제어방식(

제어루프 내에 조작자의 포함 유무), 작업환경(작업영역의 정형성), 주 제어 변수(제어할 출력변수의 물리적 상태), 전동체계(조인트 구동부의 역구동성) 등에 따라 크게 구분된다.

표 1. 원격조작 매니플레이터와 산업용 매니플레이터의 차이

Table 1. Difference between teleoperated manipulator and industrial manipulator

Attribute	Teleoperated manipulator	Industrial manipulator
Control	man-in-the-loop control (master/slave teleoperation)	autonomous, repetitious control
Environment	uncertain and hazardous	well structured and generally fixed
Primary control parameter	output force	position and force
Transmission	backdrivable	non-backdrivable

III. 원격조작

1. 원격조작시스템

원격작업에서 조작자는 입력장치를 조작함으로써 원격 환경 내에 있는 슬레이브 매니플레이터(이하 '슬레이브'라 함)를 조종하여 원격 작업임무를 수행한다. 조작자와 입력장치, 슬레이브는 원격조작시스템(teleoperated system)을 구성하는 주요 요소들이다(그림 1).

원격제어시스템의 제어방식은 센서정보의 흐름에 따라 크게 편방향 제어(unilateral control)와 양방향 제어(bilateral control)로 나누어진다(그림 2). 편방향 제어는 가장 간단하고 기본적인 제어 방식으로서 조작자는 시각정보에 의존하면서 힘 또는 운동 명령을 입력장치를 통하여 슬레이브의 한쪽 방향으로만 전달하며, 슬레이브에서 발생하는 어떤 정보도 조작자에게 전달되지 않는다. 즉, 슬레이브는 단순히 입력장치로부터 입력 명령만을 받는다.

인공 의수(artificial limbs), 달표면 추출기(lunar surface samplers) 등이 편방향 제어방식을 채택하며, on-off 스위치, push button 스위치, 조이스틱, potentiometer, 조작자 수족(operator's limb)의 자세를 측정하는 장치 등을 입력장치로 사용한다. 이 방식은 조작자에게 힘 반향이 요구되지 않으므로, 입력장치들은 크기와 무게가 적고, 기능이 간단하여 비용이 저렴하고, 신뢰성이 있고, 휴대하기 용이하고, 조작자의 피로도를 저감하며, 조작자의 작업영역을 제한하지 않는 등의 장점을 갖는다. Optical fiber의 굽혀짐을 통하여 조작자의 손가락 위치(position)를 감지하는 글러브(glove), 손가락 조인트의 각도를 직접 측정하는 시스템, optical(또는 magnetic) emitter의 위치를 측정하는 시스템, head 운동 궤적을 추종

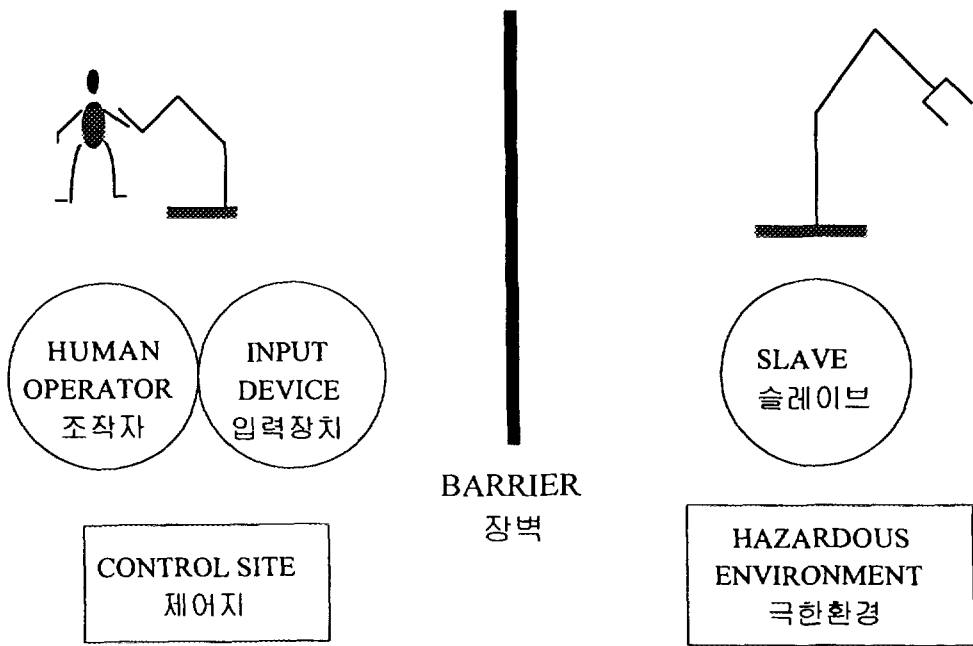


그림 1 원격조작시스템
 Fig. 1. Teleoperated system

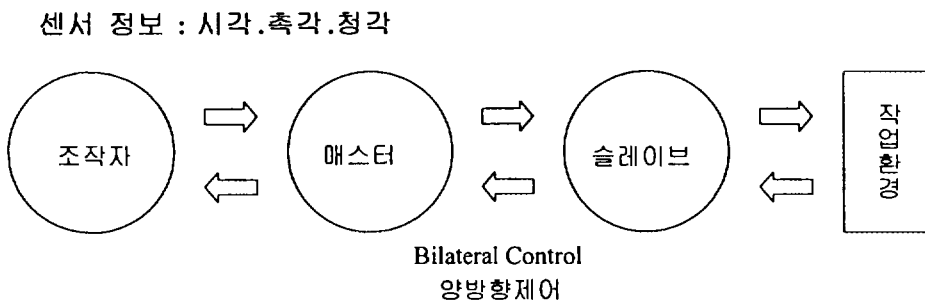
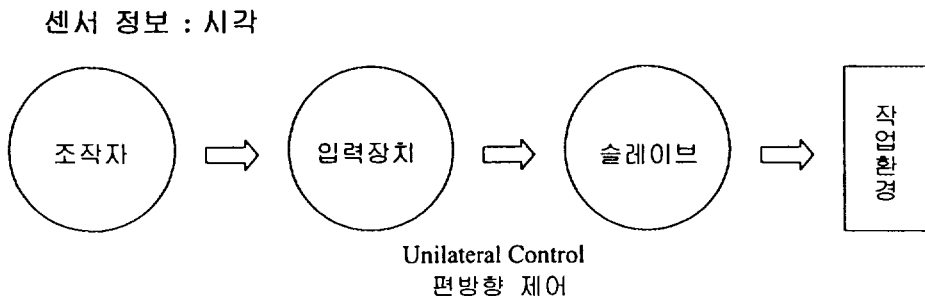


그림 2. 제어정보 흐름
 Fig. 2. Information flow for control

하는 POLHEMUS 시스템 등이 편방향 제어방식을 채택하며 현재 상업적으로 이용 가능하다. 그러나 피이드백 기능이 없기 때문에 본질적으로 개루프제어(open loop control) 방식을 취함으로 여러개의 조인트로 연결된 슬레이브의 말단효과장치(end-effector)와 조작자의 손 사이에 공간적 일치감(spatial correspondence)을 얻는데 어려움이 있으며, 작업의 정확성과 효율성을 감소시킨다. 특히, 조립작업, 가장자리 추종작업(edge-following task) 등은 편방향 제어방식으로는 달성하기 불가능하다.

이와 대조적으로 힘 또는 운동 정보가 입력장치를 통하여 조작자와 슬레이브의 양방향으로 전달되는 것을 양방향제어라 일컬어진다. 일반적으로 양방향제어에서 사용되는 입력장치를 매스터 매니플레이터(이하 '매스터'라 함)라 한다. 양방향제어에서 조작자는 슬레이브 말단효과장치가 외부 물체 또는 작업환경과 접촉할 때 발생하는 힘의 정보(접촉력)를 매스터의 수단을 통하여 제공받는다. 따라서 원격조작에서 조작자는 인간이 감지할 수 있는 오감 중에서 시각과 촉각을 이용함으로써 작업의 생산성을 증대시킬 수 있다. 양방향제어는 힘 피이드백 기능을 요구하므로 제어 구조있어서 편방향제어 보다 매우 복잡하나 최신 원격조작시스템의 서보제어에서 널리 응용되고 있으며 활발한 연구가 진행 중에 있다. 제 4장에서 양방향제어 기술에 대하여 자세하게 기술한다.

2. 매스터 비교 및 검토

제 1절에서 기술한 바와 같이 매스터는 조작자의 명령을 슬레이브에 전달하고 또한 슬레이브에서 발생하는 외부 지각정보를 조작자의 손을 통하여 조작자에게 제공해주는 유일한 통신 링크로서 원격조작시스템의 인간과 기계를 인터페이스 시켜주는 중요한 부분이다. 본 절에서는 현재 산업

현장에서 사용되고 있는 다양한 매스터들의 설계 및 사양, 성능에 관한 정량적인 데이터를 확립하고 분석한다.

가. 기하학적 형태

매스터는 슬레이브와 연결되는 기구학적 형태에 따라 크게 유사형(replica type)과 범용형(universal or generalized type)으로 구분된다. 유사형 매스터는 슬레이브와 비슷한 기구학적 구조를 갖으며, 동일하거나 축소된 기계적 형태를 갖는다. 즉, 매스터와 슬레이브 각각의 조인트에 대하여 일대일 대응(one-to-one correspondence) 기하학 구조와 제어방식을 취한다.

유사형의 각 조인트서보는 슬레이브의 조인트서보와 기구학적으로 서로 대응하여 좌표계의 변환이 필요 없으므로 빠르고 안정된 응답을 얻을 수 있으나, 본질적인 메커니즘 구조와 조인트 제어방식에 기인하는 몇 가지 문제점을 갖는다. 특정 슬레이브에 대하여 특정 매스터가 요구되므로 구조가 서로 상이한 매스터와 슬레이브 쌍이나 여유자유도를 갖는 슬레이브를 제어하는데 어려움이 있다. 여유자유도를 갖는 슬레이브를 제어하기 위해서는 여유자유도를 갖는 매스터가 필요하며, 조작자가 이를 조작하기 위해서는 많은 어려움이 있다. 또한 메커니즘의 구조적 비선형성 때문에 매스터와 슬레이브 간의 운동과 힘을 축척 하는데 있어서 절대적 일치성을 상실하므로, 미세한 위치제어를 하기 위해서는 보다 큰 형태의 매스터를 필요로 한다. 결과적으로 조작자에게 운전 부담을 가중시키며, 위치와 힘 해상도를 손상시키며, 슬레이브와 구조적 유사성 때문에 제작비용을 증대시킨다.

이같은 유사형 매스터의 문제점을 극복하기 위하여 1980년대부터 매스

터와 슬레이브의 형태와 구조가 서로 상이한 범용형 메커니즘의 연구가 진행되어 왔으며, 이러한 마스터는 주로 핸드컨트롤러(hand controller)라 일컬어진다. 범용형 핸드컨트롤러와 슬레이브는 기구학 및 동역학적 성질들이 서로 완전히 상이하며, 직각좌표계에서 핸드컨트롤러의 핸드그립(hand grip)과 슬레이브 말단효과장치 끝점의 위치와 자세를 제어하는 방식을 취한다. 이러한 제어방식은 좌표계 변환이 요구됨으로 계산량 증대로 인하여 제어루프에서 시간지연(time delay)을 유발시켜 제어계를 불안정하게 만들 수 있으며, 기구학적 상이성 때문에 특이성(singularity)문제를 야기시킬 수 있다. 그러나 범용형은 위에서 언급한 유사형이 갖고있는 문제점을 해결하여 원격조작시스템의 성능을 향상시킬 수 있으며, 슬레이브 종류와 형태에 구속받지 않으므로 조작자의 제어 스테이션의 조건에 따라 장치 조작성의 극대화를 꾀하면서 설계에 있어서 보다 유연성을 갖는다. 또한 유사형에서 적용할 수 없는 다양한 제어 방식을 채택하여 실험 및 평가할 수 있는 편리한 플랫폼을 제공하며, 슬레이브의 기구적 구조에 영향을 받지않으므로 다양한 슬레이브와 쉽게 인터페이스하여 사용할 수 있다.

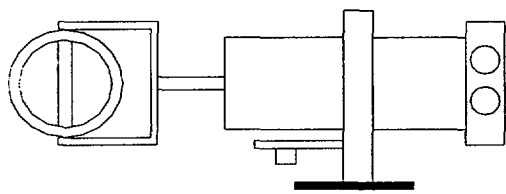
나. 범용형 핸드컨트롤러

핸드컨트롤러는 조작자로부터 입력되는 임의의 위치와 자세 명령을 감지하여 슬레이브에 전달하기 위해서 최소한 6자유도가 필요하며, 슬레이브 말단효과장치에서 발생하는 반력, 촉각정보를 조작자에게 피드백 시키기 위해서 힘반향 기능이 요구된다. 힘반향은 원격작업의 달성시간을 단축시키고, 조작자의 실수를 줄이며, 슬레이브의 물체 또는 작업환경과의 접촉력을 감소시킨다. 본 절에서는 이미 개발된 6자유도의 범용형 힘반향

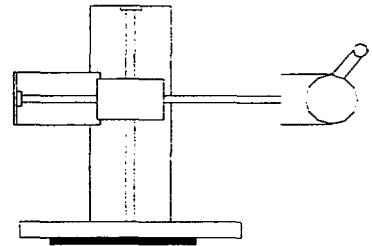
핸드컨트롤러에 대하여 알아본다.

그림 3의 (a)는 직렬링크로 연결된 JPL(Jet Propulsion Laboratory)핸드컨트롤러를 보여준다. 각 링크들은 기계적, 전기적으로 평형을 이루고, 각 링크 조인트들은 케이블과 풀리로 연결되어있다. 힘반향은 핸드컨트롤러와 슬레이브 사이의 위치 오차에 의하여 핸드컨트롤러의 각 조인트에 부착된 직류토크모터를 구동함으로써 이루어진다. 직교형 링크 메커니즘을 이용한 핸드컨트롤러(그림 3의 (b)와 (c))는 X- Y-Z 직교링크(선형운동)위에 3축의 짐발(gimbal)구조(회전운동)가 연결되어있으며, 조작자로부터 입력되는 위치와 자세 명령이 분리된다. Toshiba핸드컨트롤러(그림 3의 (b))와 Cybernet 핸드컨트롤러(그림 3의 (c))는 각각 힘 오차와 위치 오차를 이용하여 조작자에게 힘을 피드백시킨다. 그림 3의 (a),(b),(c)와 달리 병렬링크구조로된 Stewart 플랫폼형의 AEA핸드컨트롤러(그림 3의 (d))는 각각 역구동이 가능한 4개의 링크로 이루어진 3쌍의 액츄에이터(actuator)들을 병렬로 연결하였으며, 핸드그립을 움직임으로 위치와 자세명령을 생성한다. 병렬메커니즘은 직렬메커니즘에 비하여 강도(rigidity)에 있어서는 더 단단하나 작은 작업영역을 갖으며, 직렬메커니즘과 반대로 정기구학 해를 구하는 데에 어려움이 있다.

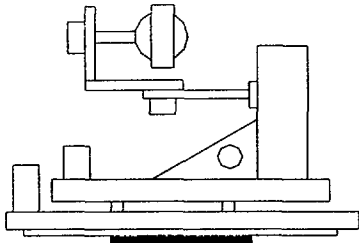
이같은 범용형 핸드컨트롤러의 손목조인트들은 핸드그립의 중심에서 서로 직교하여, 운전시 핸드그립을 쥐고있는 조작자의 손과 슬레이브 말단장치사이에 공간상의 일치감을 제공하므로 조작성을 향상시킨다. 표 2는 조인트 운동범위, 작업영역, 위치정도, 최대출력 힘/토크, 힘반향방식 등의 직렬링크로 연결된 핸드컨트롤러의 설계변수들을 보여준다. 그러나 원격작업의 성능을 증대시키기 위한 이들의 최적설계 값 또는 범위에 대한 기준은 아직 마련되어 있지 않다.



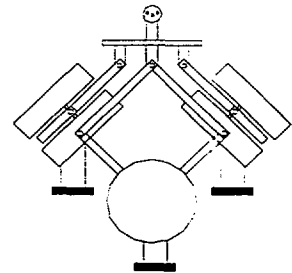
a) JPL Version C



b) Toshiba



c) Cybernet



d) AEA

그림 3 범용형 핸드컨트롤러

Fig. 3. The schematic diagram of hand controllers

표 2. 핸드컨트롤러의 특징

Table 2. Hand controller characteristics

변수 \ 종류	JPL-C	Cybernet	Toshiba
운동범위	J1,J2,=33.5°, J3=31.8cm, J4=326°, J5=295°, J6=340°	X,Y,Z=10.16cm, 요,피치=90°, 롤=180°	X,Y,Z=15cm, 롤=180°, 피치=120°, 요=180°
작업영역	0.053 m ³	0.001 m ³	0.003 m ³
위치정도	J1,J2,=0.016°, J3=0.76cm, J5,J6=0.028°	J4, X,Y,Z=7x10 ⁻³ cm 요,피치,롤=1/90°	?
최대힘/토크출력	35.6 N/1.6 Nm	89 - 111 N	25 N/0.45 Nm
힘반향방식/센서	위치오차/엔코더	위치오차/엔코더	힘오차/힘/토크

3. 힘반향 핸드콘트롤러 설계

본 절에서는 제 1절과 제 2절에서 언급한 매스터의 기술 검토를 토대로 하여 원자력발전소 증기발생기 유지, 보수작업에 사용될 Schilling Titan 매니플레이터(6자유도 유압구동식)를 조종하기 위한 6자유도 범용 힘반향 핸드콘트롤러 설계에 관하여 기술한다.

가. 설계개념 및 고려사항

원격조작(teleoperation)의 궁극적인 목적은 ‘조작자가 마치 원격작업 환경에서 본인이 직접 작업을 수행하는 것 같은 느낌(transparency)’을 갖게 하기 위해서 핸드콘트롤러를 사용하여 슬레이브를 조종하면서 조작자에게 제공되는 시각, 촉각, 청각을 통하여 원격현실감(sense of telepresence)을 성취하는 것이다. 핸드콘트롤러의 기계구조, 구동 액츄에이터, 센서, 제어루프구현 등의 한계 때문에 완전한 transparency를 실현하기는 매우 어렵다. 본 연구에서는 핸드콘트롤러의 transparency를 증대시키기 위하여 아래와 같은 사항을 설계에 반영하였다.

역구동성(backdriveability) : 핸드콘트롤러가 조작자와 슬레이브 사이의 중간 매개체로서 양방향으로 명령, 센서정보를 전달하기 위해서 메커니즘은 역구동이 가능하여야 한다.

백래쉬(backlash) : 조작자 손의 움직임(지령명령)을 정확하게 센싱하기 위하여 조인트 동력전달장치들의 백래쉬를 최소화한다.

기계적 강성(mechanical stiffness) : 강성을 높임으로서 시스템의 주

파수대역(frequency bandwidth)를 확장시켜 조작자에게 반항되는 힘 감도를 최대화하고 시스템의 안정성을 증대시킨다.

작업영역(workspace) : 핸드컨트롤러의 작업영역은 조작자의 효율성과 해상도, 위험도, 피로도에 영향을 미치므로, 슬레이브의 작업환경을 고려하여 위 변수들의 절충을 통하여 작업영역의 크기를 결정한다.

평형성(counterbalancing) : 메커니즘의 불균형은 조작자에게 조작부담을 가중시키고, 중력보상 때문에 제어루프의 계산량을 증대시키므로 각 링크들의 기계적 균형을 유지한다.

크로스커플링(cross coupling) : 핸드컨트롤러와 슬레이브 사이의 좌표계 변환에 따른 계산부담을 줄이고, 기구학을 간소화하기 위하여 각 링크 조인트들의 커플링을 제거한다.

조인트자유도(degree of freedom) : 공간상에서 매스터 핸드그립과 슬레이브 말단효과장치 사이에 위치와 자세의 유일성(uniqueness)을 확보하기 위하여 최소한 6 자유도를 필요로 한다.

이같은 요구조건들은 서로 상호관련이 있으므로 핸드컨트롤러의 성능과 비용을 고려하면서 설계에 적용하였다.

나. 형태 및 특성

위 절에서 명시한 요구조건에 근거하여 설계된 핸드컨트롤러의 형태와

기구학적 개략도가 그림 4에서 보여진다. 설계된 핸드컨트롤러는 6자유도의 직렬링크로 연결되어 있으며 각 링크들은 서로 직교한다. 핸드그립의 위치와 자세는 각각 처음 3개의 선형조인트(직각좌표 구조)와 나머지 3개의 롤-피치-요 손목조인트(짐발 구조)에 의하여 제공되며, 손목조인트 축들은 핸드그립의 중심에서 서로 교차한다. 이같은 기하학적 구조는 핸드그립의 위치와 자세를 기계적으로 서로 분리하여 간단한 기구학적 구조와 동역학 모델을 제공하므로, 핸드컨트롤러와 슬레이브 좌표계 사이의 좌표변환을 빠르게 하고 제어알고리즘의 구조를 단순하게 한다.

요구되는 증기발생기 유지, 보수 작업은 슬레이브(Titan 매니플레이터) 말단장치의 정확한 위치제어가 요구되므로, 핸드컨트롤러의 작업영역을 크게 하여 위치제어의 정밀도를 증대시킨다. 앞 절의 검토를 참조하여 설계된 작업영역은 18x18x18 cm이며, 롤(180°)-피치(120°)-요(120°)의 운동을 갖는다.

각 조인트들은 기어대신 케이블과 풀리로 연결되어 소형 직류모터로 구동되므로 조인트 백래쉬와 마찰, 관성을 줄이고, 역구동성을 향상시키고, 조작자의 힘 해상도를 증대시킨다. 장력조절장치를 사용하여 케이블의 장력을 증대시켜 조인트 콤플라이언스(compliance)를 줄인다. 핸드컨트롤러와 슬레이브 각 조인트에 부착된 엔코더의 위치오차를 이용하여 슬레이브가 외부 물체에 가하는 힘이 조작자에게 반향되도록 한다. 상하 직선운동을 하는 세 번째 축의 무게는 평형물(counterweight)로 균형을 이루었으며, 회전축들의 무게는 구동모터들을 균형 있게 배열하여 보상하였다. 핸드컨트롤러의 베이스는 4개의 선형가이드로 구성된 공압식 지지장치에 의하여 지탱된다. 이동이 가능한 이 지지장치는 발 페달로 구동되며 핸드컨트롤러 베이스의 고도를 조종할 수 있으므로 조작자에게 편안한 조종위

치를 제공한다.

다. 그래픽 시뮬레이션

그래픽시스템은 제작 전에 장치를 미리 시험해 볼 수 있는 수단을 제공한다. 그래픽 소프트웨어(ROBCAD)를 사용하여 그림 5와 같이 설계된 핸드컨트롤러의 기구학적 특성 및 기계적 조작성을 시험, 평가하였다.

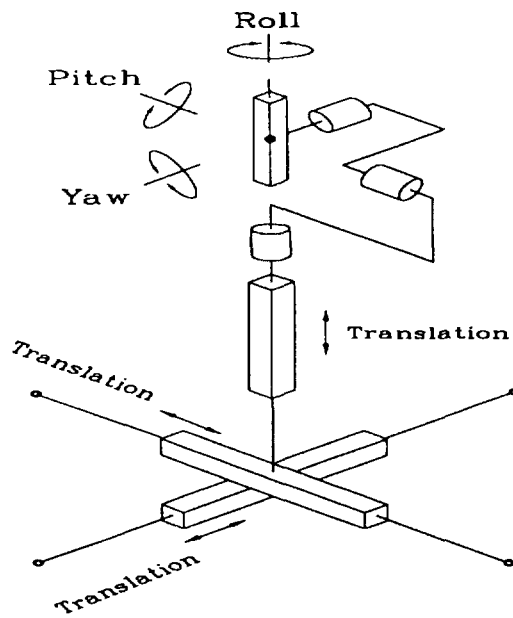
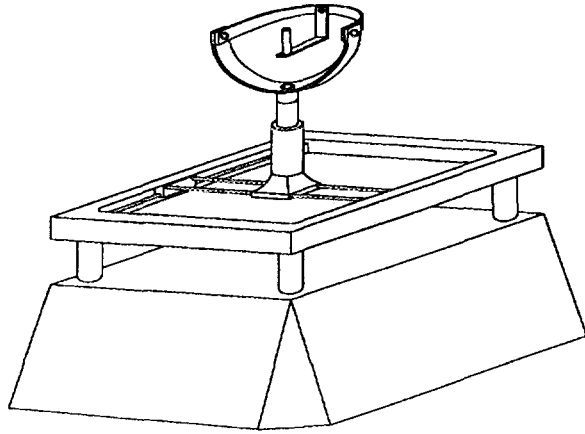


그림 4. 신형 핸드컨트롤러의 기구학
 Fig. 4. The configuration and kinematics of the new hand controller

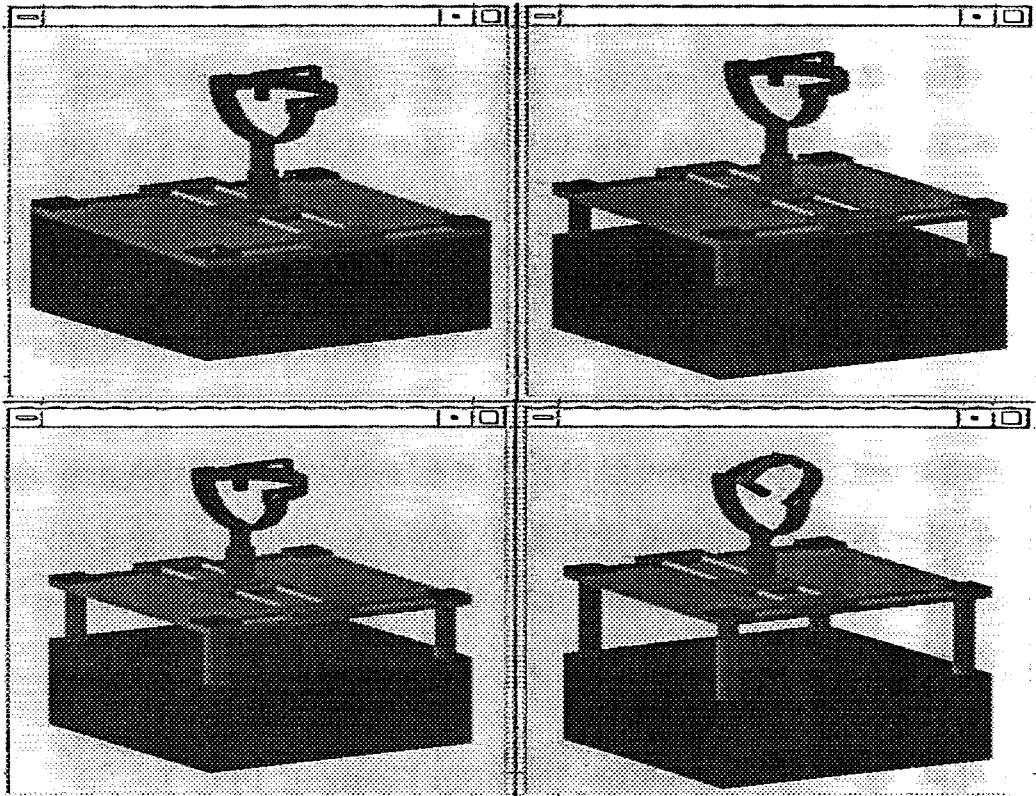


그림 5. 신형 핸드컨트롤러의 그래픽 시뮬레이션

Fig. 5. The graphic simulation of the new hand controller

IV 원격조작의 양방향제어

양방향 제어를 채택하는 원격조작에서 조작자는 매스터(본 장에서 매스터는 유사형과 범용형을 모두 포함 함)의 핸드그립을 통하여 슬레이브에 명령을 전달한다. 슬레이브 말단효과장치의 끝단이 장애물 또는 외부 환경과 접촉할 때, 조작자로 부터의 입력 명령과 슬레이브의 출력사이에 오차(위치 또는 힘의 오차)가 발생한다. 발생한 서보오차는 매스터에 지령 명령으로 작용하여 매스터의 조인트를 구동하므로, 핸드그립을 쥐고 있는 조작자는 서보오차에 상응하는 힘(실제 크기 또는 축척된 크기)을 느낀다. 즉, 슬레이브 말단장치에서 작용하는 힘이 조작자에게 반향되므로 힘반향 제어(force-reflecting control)로 일컬어진다. 이와같이 양방향제어는 조작자를 피이드백 루프에 포함시켜서 제어계를 닫는다. 이것이 일반 제어구조와 구별되는 특징이다.

원격조작의 궁극적인 목적은 사람이 직접 하는 것처럼 슬레이브가 원격지에 있는 물체를 능숙하게 취급할 수 있게하는 것이다. 본 장에서는 이를 실현하기 위한 양방향 제어(또는 힘반향 제어)에 적용된 다양한 제어 구조를 비교 및 분석한다.

1. 위치-위치 제어(Positon-Position Control, PPC)

PPC에서 매스터와 슬레이브는 각각 위치서보로서 작용한다. 그림 6은 유사형 매스터와 슬레이브의 동역학 모델을 고려하지 않은 조인트 공간(joint space)에서의 간단한 PPC 구조를 보여준다. 매스터의 실제 조인트 위치는 슬레이브에 지령입력으로서 전달되며, 이와 비슷하게 슬레이브의 실제 조인트위치는 매스터에 지령입력으로서 사용된다. 조작자가 매스터를

움직일 때 외란은 조작자의 움직임을 방해하는 조인트 위치오차를 발생시키며, 실제 조인트 위치는 슬레이브의 조인트위치 서보의 지령 입력으로 전달되어서 매스터와 슬레이브의 조인트 위치오차가 '0'이 될 때까지 슬레이브의 운동을 일으킨다. 슬레이브가 작업환경에 있는 물체와 접촉할 때 발생하는 조인트위치 오차는 매스터에 의하여 감지되어서 결과적으로 슬레이브가 물체에 인가하는 힘은 조작자에게 감지된다.

PPC구조는 슬레이브가 자유공간(free space)에서 움직이는 경우와 작업환경과 접촉하여 있는 경우에 모두 비교적 안정적이며, 매스터와 슬레이브의 상호시스템 사이에 존재하는 시간지연에 덜 민감하다. 그러나 자유공간에서 움직일 때 시스템은 undesirable drag현상을 보인다. Drag는 매스터 메카니즘과 슬레이브 메카니즘의 각 조인트에서 발생하는 통합 마찰력(viscous, static, Coulomb frictional forces)에 기인한다. 통합 마찰력은 궁극적으로 매스터와 슬레이브의 위치 정확도를 손상시킨다. 따라서 실제 위치오차에 의한 힘뿐만 아니라 위치정확도 손상에 의한 힘이 부가적으로 조작자에게 반향된다. 또한 슬레이브가 빠른 속도로 움직일 때 발생하는 힘(inertial, centrifugal, Coriolis forces, gravitational force)도 위치 정확도를 손상시켜서 drag를 일으킨다. 이러한 원치 않는 현상은 그림 7 및 그림 8과 같이 매스터와 슬레이브에 local force feedback loop를 추가하여 보상하거나, 매스터와 슬레이브의 위치서보에 속도를 추가함으로써 개선될 수 있다. 위치서보에 속도서보를 추가하므로써 PPC 구조는 PD (Proportional-Derivative)제어기와 비슷한 형태를 취한다. Salisbury가 제안한 stiffness제어 개념과 damping제어 개념은 PD 제어기 설계에 응용될 수 있다.

그림 7은 조인트 공간(joint space)에서 유사형 매스터와 슬레이브의

PPC 구조를 보여준다. 슬레이브 말단효과장치가 조작자에게 모니터를 통하여 보이지 않는 벽 또는 장애물과 충돌할 때 슬레이브 제어시스템(오른쪽 루프)은 조인트위치 오차의 증폭으로 인하여 슬레이브 조인트 구동 모터가 가할 수 있는 최대 힘에 도달할 때 까지 과도한 힘을 슬레이브에 가하므로서, 결과적으로 슬레이브 자체와 작업 환경을 파괴할 수 있다. 이러한 사고를 피하기 위해서 매스터 제어시스템(왼쪽 루프)은 슬레이브 조인트위치 오차에 상응하는 서보오차를 피이드 백시켜서 오차를 감소시키는 방향으로 매스터 조인트 모터를 구동시킨다.

그림 8은 직각좌표공간(Cartesian space)에서 범용형 매스터와 슬레이브의 위치 및 자세를 이용하여 힘반향을 실현하는 PPC 구조를 보여준다. 조작자가 쥐고 있는 매스터 핸드그립의 위치 및 자세와 슬레이브 말단효과장치의 위치 및 자세는 각각의 정기구학을 통하여 구해진다. 슬레이브 제어시스템 (오른쪽 루프)의 지령입력인 위치 및 자세 오차는 슬레이브 역기구학을 통하여 조인트 위치로 변환되어 슬레이브 제어를 실현시킨다. 매스터와 슬레이브의 직각좌표계 위치 및 자세 서보오차는 매스터 제어시스템에 입력으로 작용하며, 매스터 역기구학을 통하여 조인트 서보오차로 변환되어 상응하는 조인트 토크를 매스터 조인트모터에 인가하여 구동하므로서 조작자에게 힘을 반향시킨다.

매스터와 슬레이브 각각의 제어시스템 (그림 7 및 그림 8)의 내향 루프(inner loop)에서 위치 및 속도의 피이드백은 조인트 서보오차를 이용하는 다양한 제어기술(역동역학 모델, 비선형 보상 등) 실현을 가능케 한다.

이상적인 양방향(또는 힘반향)제어시스템에서 조작자가 느끼는 힘은 슬레이브가 장애물과 충돌하거나 또는 물체를 들어올릴 때 생기는 힘 또

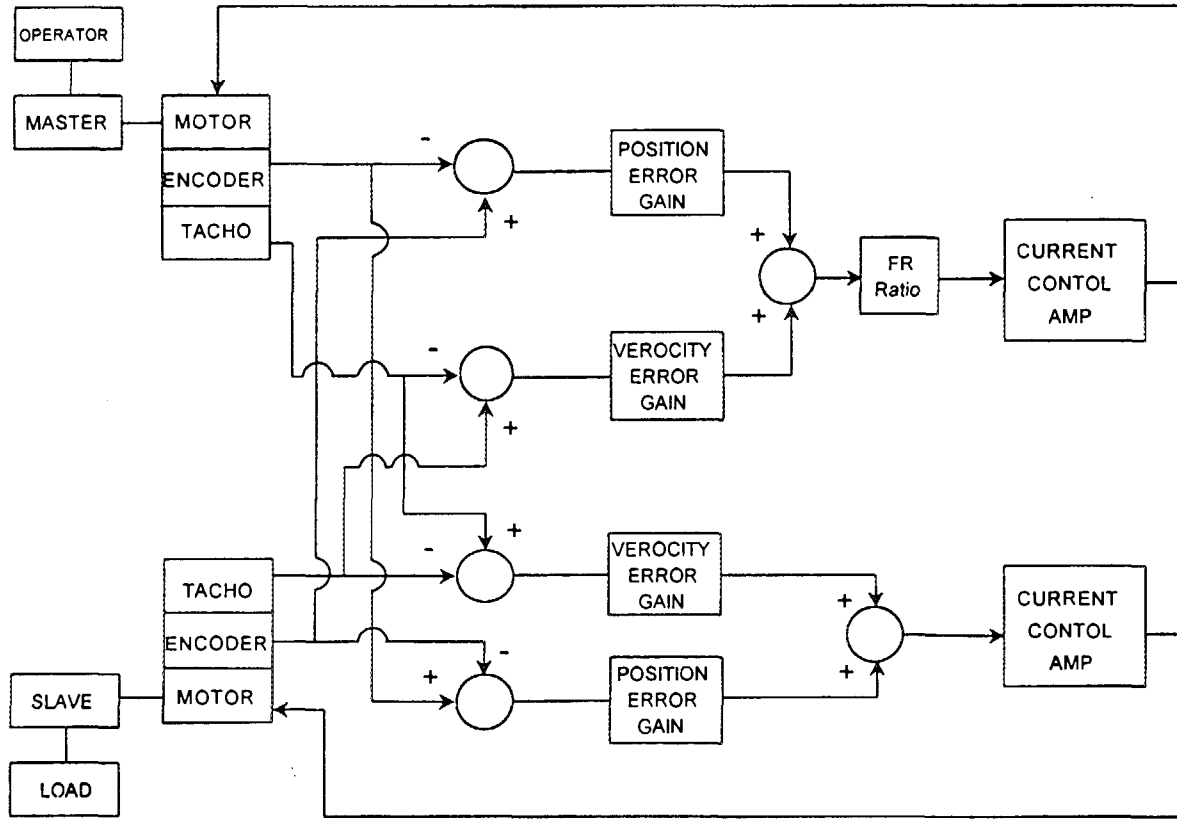


그림 6. 단순한 조인트 대 조인트 제어(유사형)
Fig. 6. Simple joint to joint control(replica type)

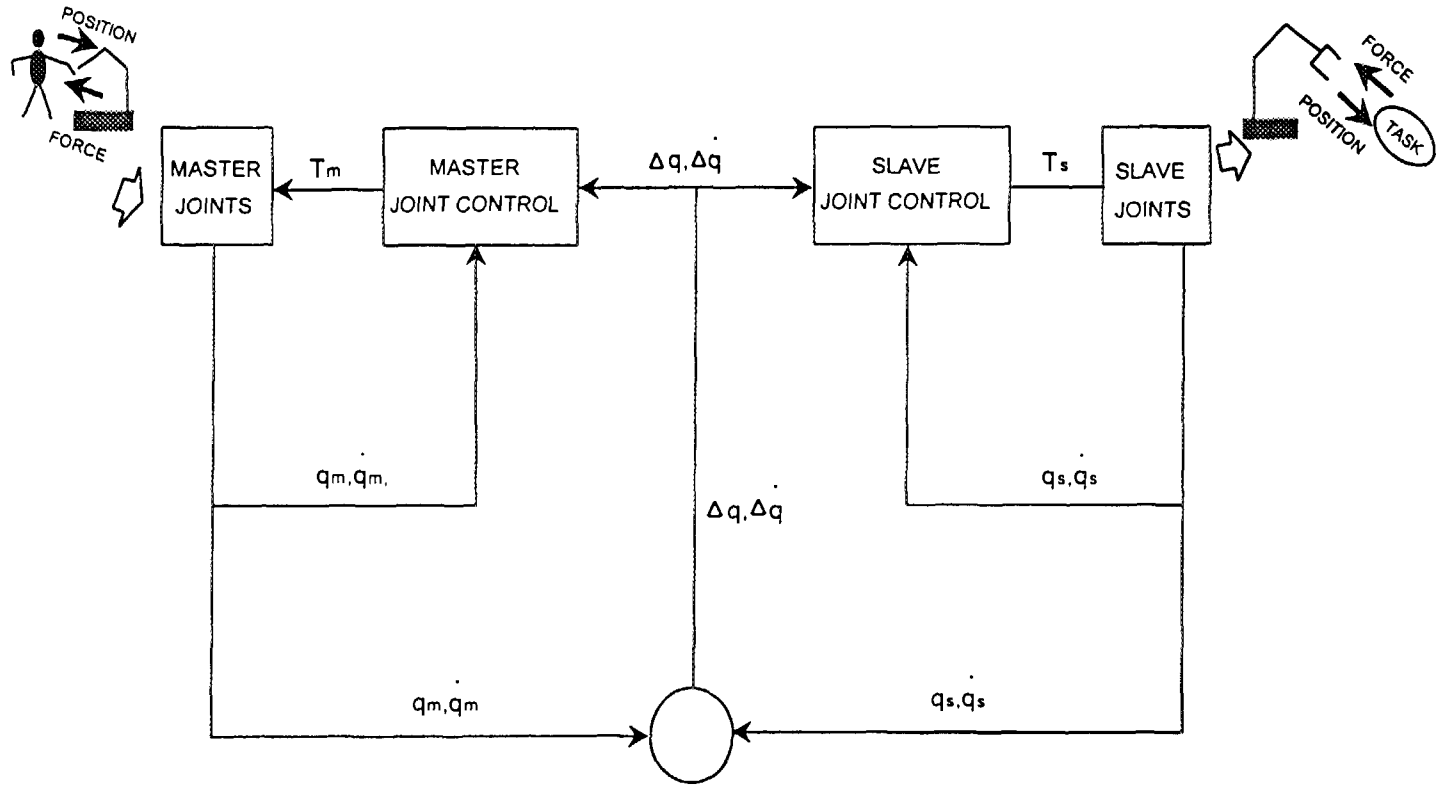


그림 7. 조인트 위치오차를 이용하는 힘반향의 PPC(유사형)

Fig. 7. Position-position control with joint position error based force reflection (replica type)

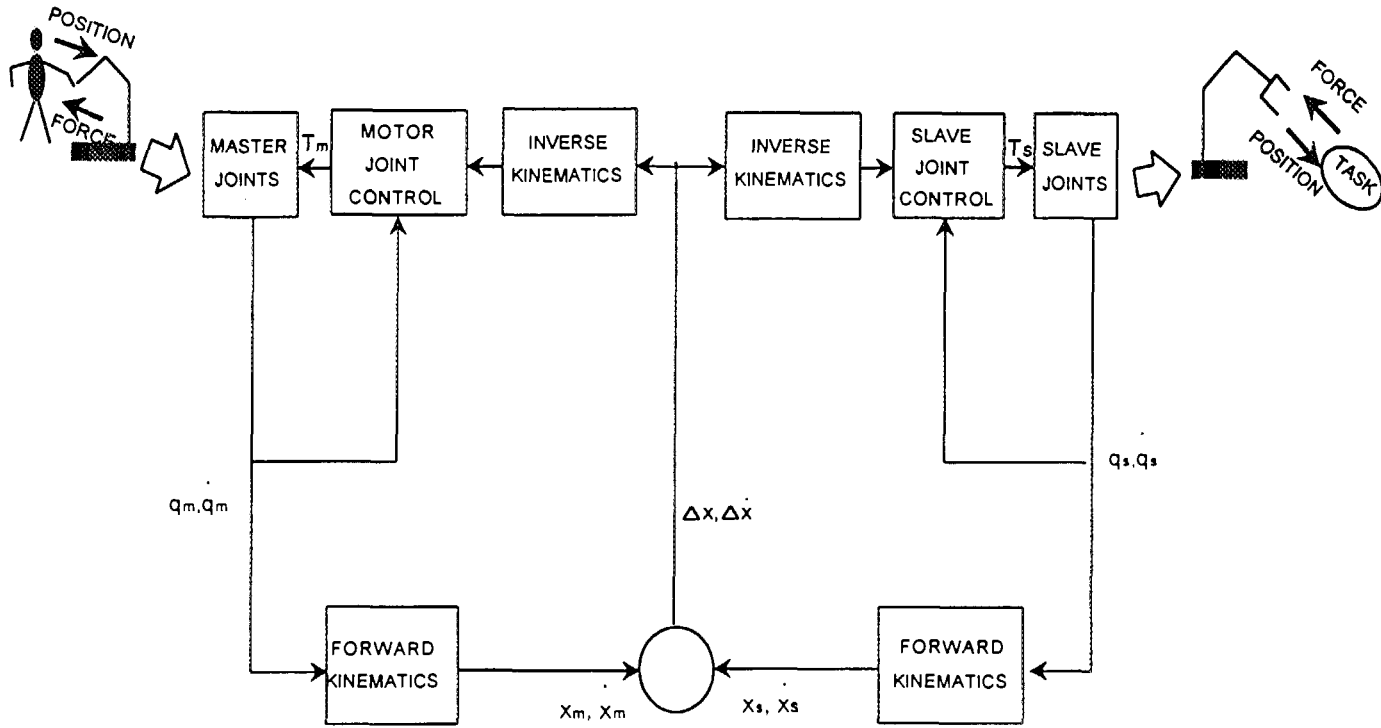


그림 8. 직각좌표 위치오차를 이용하는 힘반향의 PPC(범용형)

Fig. 8. Position-position control with Cartesian position error based force reflection (universal type)

는 토크에 의하여 발생하는 위치오차이다. 그러나 실제로 양방향제어의 서보시스템에서 존재하는 피할수 없는 서보오차 때문에 조작자는 부정확한 힘의 정보를 제공받는다. 이를 개선하기 위한 방법으로 힘/토크 센서정보를 이용하여 조작자에게 힘을 반향을 실현시키는 제어구조를 다음 절에서 기술한다.

2. 위치-힘 제어(Position-Force Control, PFC)

PFC에서 마스터와 슬레이브는 각각 힘 제어기와 위치 제어기로 작용한다. PPC와 같이 조작자 손의 움직임에 의하여 마스터에서 감지된 위치는 슬레이브에 지령입력으로 사용되며, 슬레이브에서 감지된 힘은 마스터에 지령입력으로 사용된다. 따라서 조작자가 마스터를 움직이면 슬레이브는 마스터의 운동 만큼 움직인다. 또한 슬레이브가 외부 물체와 접촉할 때 감지된 힘은 마스터에 지령입력으로 보내져 동량의 힘(또는 축척된 힘)이 조작자에게 역방향으로 반향되게 한다.

그림 9는 조인트 공간에서 슬레이브의 끝 조인트와 말단효과장치 사이에 부착된 힘/토크 센서를 이용하여 힘 반향을 실현하는 유사형 마스터와 슬레이브의 양방향제어 구조를 보여준다. 슬레이브 센서에서 감지된 직각 좌표상의 힘/토크 벡터는 힘 이득을 곱한 후에 마스터 자코비언(Jacobian)의 전치를 통하여 마스터 조인트 토크로 맵핑된다. 맵핑된 마스터 조인트토크는 슬레이브 말단효과장치에 작용하는 힘/토크와 같은 크기의 힘/토크를 마스터 핸드그립에서 생기게 한다. 따라서 힘반향을 실현하기 위해 PPC에서 사용된 위치 피이드백은 PFC에서 더 이상 필요가 없다. 그러나 양방향 위치제어 관점에서 볼 때 마스터와 슬레이브의 기구학적 동일성 때문에 운동 흐름은 마스터와 슬레이브 사이에 서로 일대일

대응하는 조인트들의 위치를 비교하는 조인트공간 제어방식에 국한된다.

마스터와 슬레이브의 기구학이 서로 상이한 범용 시스템의 양방향 제어는 그림 10에서 묘사되어 있다. 힘반향은 그림 9에서 채택한 같은 방법으로 이루어진다. 마스터와 슬레이브의 기구학적 구조가 서로 독립적이기 때문에 양방향 위치제어는 그림 9와 다른 방식을 취한다. 마스터와 슬레이브의 조인트 위치들은 각각의 정기구학을 통하여 직각좌표 위치와 자세, 속도(마스터 핸드그립과 슬레이브 말단효과장치의 상태정보)로 변환된다. 직각좌표 서보오차들은 슬레이브 역기구학을 통하여 슬레이브와 마스터의 조인트 서보오차에 상응하는 값들로 변환되어 슬레이브 위치제어기에 지령으로 입력된다.

슬레이브쪽에 설치된 힘/토크센서를 이용하여 힘반향을 실현하는 제어방식(그림 9 및 그림 10)은 위치 서보오차를 이용하는 방식(그림 6, 그림 7 및 그림 8)보다 우수한 성능을 갖지만, 고주파수의 피드백 샘플링과 마스터 매카니즘의 조인트 마찰력 때문에 고충실도(high fidelity)의 힘반향을 얻기가 어렵다.

기하적 구조가 서로 상이한 범용 마스터와 슬레이브의 양쪽에 설치된 힘/토크 센서를 이용하여 힘반향 제어를 실현하는 제어구조는 그림 11에서 보여진다. 마스터는 단지 슬레이브에서 감지된 힘 만을 반향하기 때문에 마스터의 지령입력은 슬레이브 말단효과장치의 접촉력(슬레이브 힘/토크 센서에서 감지된 힘)뿐이다. 만약 센서가 슬레이브 손목 조인트로부터 말단효과장치 방향으로 멀리 설치되면 센서는 슬레이브의 마찰력, 관성력, 자중이 제거된 실제 접촉력 만을 감지한다. 따라서 조작자는 슬레이브가 외부 물체에 인가한 실제 힘만을 피드백받는다. 이와 같은 제어구조에서 마스터에 의하여 조작자에게 반향된 힘은 마스터와 슬레이브의

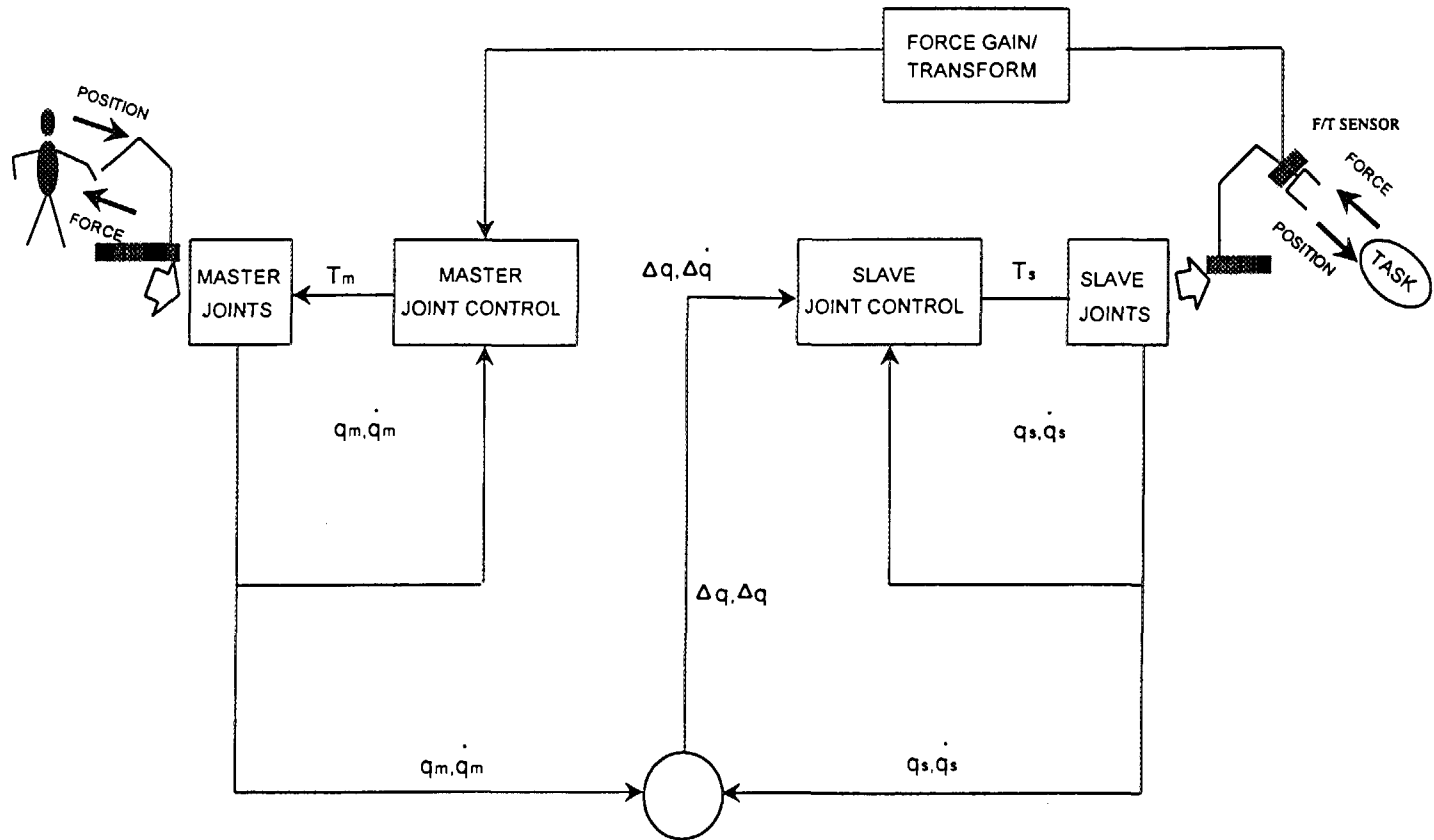


그림 9. 힘/토크센서를 이용하는 힘반향의 PFC(유사형)
Fig. 9. Position-force control with force/torque sensor
based force reflection(replica type)

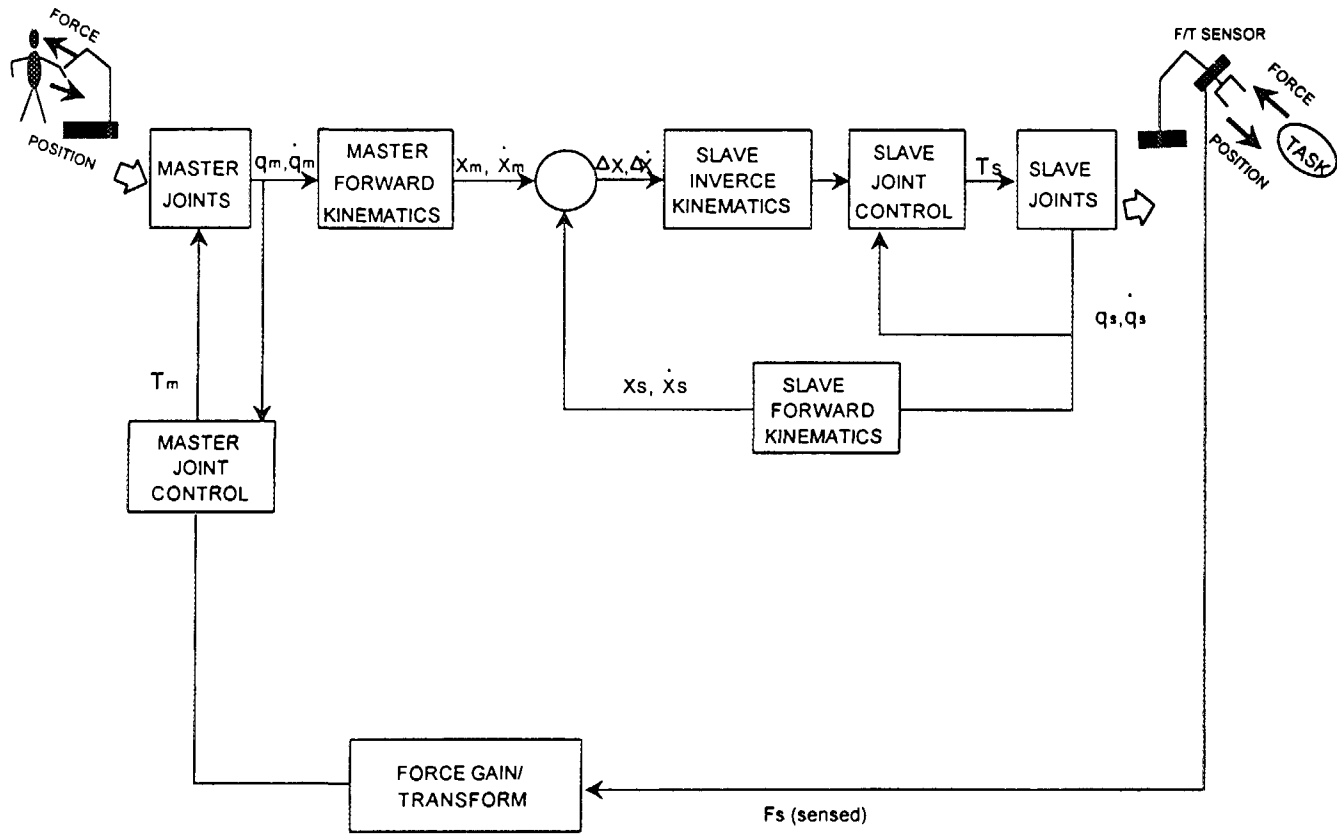


그림 10. 힘/토크센서를 이용하는 힘반향 PFC(범용형)
Fig. 10. Position-force control with force/torque sensor
based force reflection(universal type)

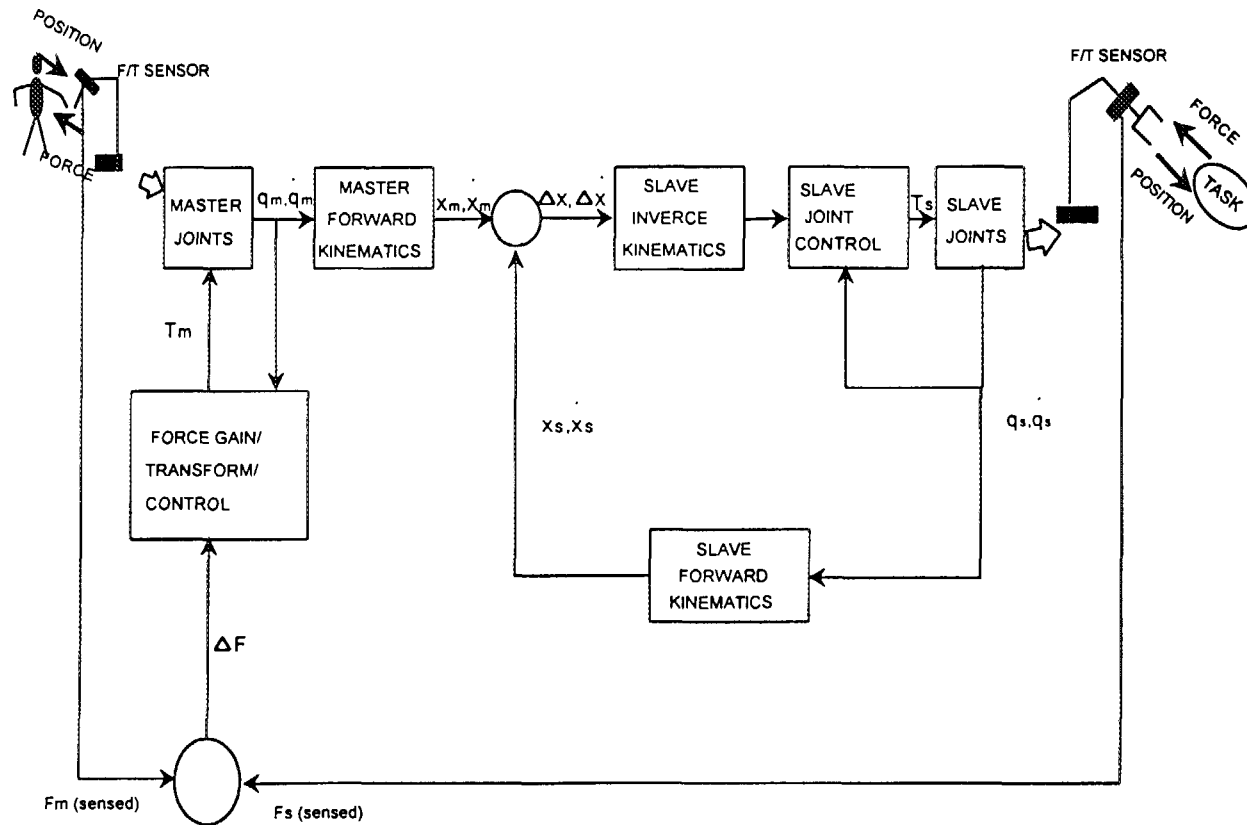


그림 11. 양쪽에 힘/토크센서를 이용하는 힘반향의 PFC(범용형)

Fig. 11. Position-force control with F/T sensors instrumented on both the master and slave side(universal type)

위치서보에 전혀 영향을 받지않으므로, 슬레이브가 자유공간에서 빠르게 움직일 때 PFC구조는 PPC구조 보다 힘반향 측면에서 훨씬 탁월하다. 그림 10에서 사용된 양방향 위치 제어구조는 그림 11에서도 똑같이 적용된다.

그러나 PFC 구조는 슬레이브가 강성이 큰 물체와 갑작스럽게 접촉할 때 안정성을 유지하기 어려우며, 시간 지연에 민감하다. 또한 그림 11과 같은 구조는 마스터와 슬레이브 양쪽에 모두 위치 및 힘/토크 센서를 필요로 하므로 추가적인 비용을 요구한다.

본 절에서 기술한 마스터와 슬레이브(유사형 또는 범용형) 제어시스템의 각 내향 루프(inner loop)는 위치, 속도 등의 피드백을 제공하므로서, 시스템의 성능을 증대시키기 위하여 조인트 서보 수준에서 다양한 제어기술의 응용을 가능케한다.

3. 일반화된 임피던스 제어(Generalized Impedance Control, GIC)

PPC와 PFC의 단점을 보완하고 마스터와 슬레이브 시스템의 조정성, 안정성, 힘 반향성을 고양할 수 있는 고성능 제어기와 모델을 개발하기 위하여 GIC를 양방향제어에 응용하는 연구가 진행되고 있다. GIC는 마스터와 슬레이브 시스템의 정확한 모델, 조작자의 영향 및 작업환경의 특징 등을 필요로 한다.

GIC에서 마스터와 슬레이브는 그림 12와 같이 두 개의 포트로 구성된 네트워크(2-port network)으로 모델링된다. 2-port 네트워크모델은 에너지가 양방향으로 흐르는 네트워크 이론에서 폭넓게 사용되고 있으며, 서로 에너지를 주고 받는 복잡한 네트워크를 선형적으로 표현할 수 있다. 조작자와

매스터의 인터페이스는 매스터 포트 (입력 포트)로 표시되며, 슬레이브와 작업환경의 인터페이스는 슬레이브 포트(출력 포트)로서 표시된다. 매스터와 슬레이브 매니퓰레이터(MSM)는 매스터 포트에서 조작자와 상호 작용하며, 또한 슬레이브 포트에서 원격지에 있는 물체와 상호 작용한다. GIC 구조는 조작자와 원격지 물체 사이에 원하는 힘을 양방향으로 전달하는 채널을 제공할 수 있도록 MSM의 특징인 MSM 서보메카니즘의 임피던스를 조정하는 것이다. 서보메카니즘의 힘 피이드백 채널(슬레이브로부터 매스터)은 슬레이브가 물체와 서로 상호 작용하는 힘을 조작자에게 반향하고, 조작자가 물체를 직접 다루는 경우에 힘 피이드 포워드(forward) 채널(매스터로부터 슬레이브)은 조작자가 물체에 부가하는 힘을 전달한다. 이것은 인간이 손으로 어떤 물체를 다룰 때 원하는 작업을 달성하기 위하여 본인 손의 임피던스를 스스로 조절하는 것과 같다.

임피던스는 출력 토크 또는 힘(T_h, T_m, T_s, T_t 등의 effort variables)에 대한 상응하는 입력 속도($\Omega_h, \Omega_m, \Omega_s, \Omega_t$ 등의 flow variables)의 비로서 정의되며 관성(inertia), 점성(damping), 강성(stiffness) 변수 등의 함수로 표시된다. 그림 12의 2 port network 모델에서 조작자와 작업대상 물체(task)의 동역학은 각각 passive 임피던스, $Z_h=T_h/\Omega_m$, $Z_t=T_t/\Omega_s$ 로 모델링된다(아래첨자 h, m, s, t는 각각 조작자, 매스터, 슬레이브, 작업 대상 물체 등을 표시함). 비록 조작자의 근육운동은 능동적이지만 MSM모델을 개발하는데 있어서 피동적으로 간주하는 것은 충분하다. MSM의 서보 액츄에이터들은 매스터 및 슬레이브 포트에서 피이드백된 위치(θ_m, θ_s) 및 속도(Ω_m, Ω_s)를 이용하여 제어 토크를 생성하므로, 매스터와 슬레이브 포트에서 각 제어 입력토크(U_m, U_s)는 원하는 피이드백 이득 K (2x2 행렬의 desired feedback gain)을 가진

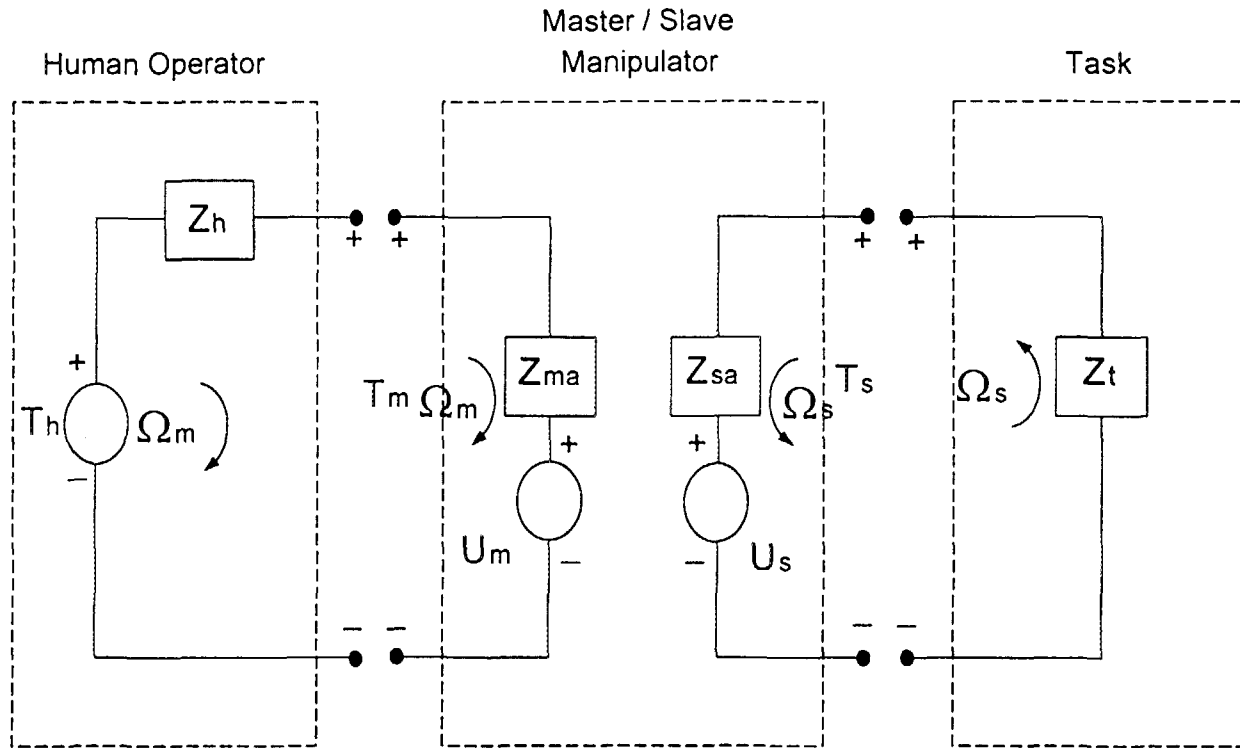


그림 12. 매스터/슬레이브 매니플레이터의 2 포트 네트워크 모델

Fig. 12. Two port network model of mater-slave manipulators

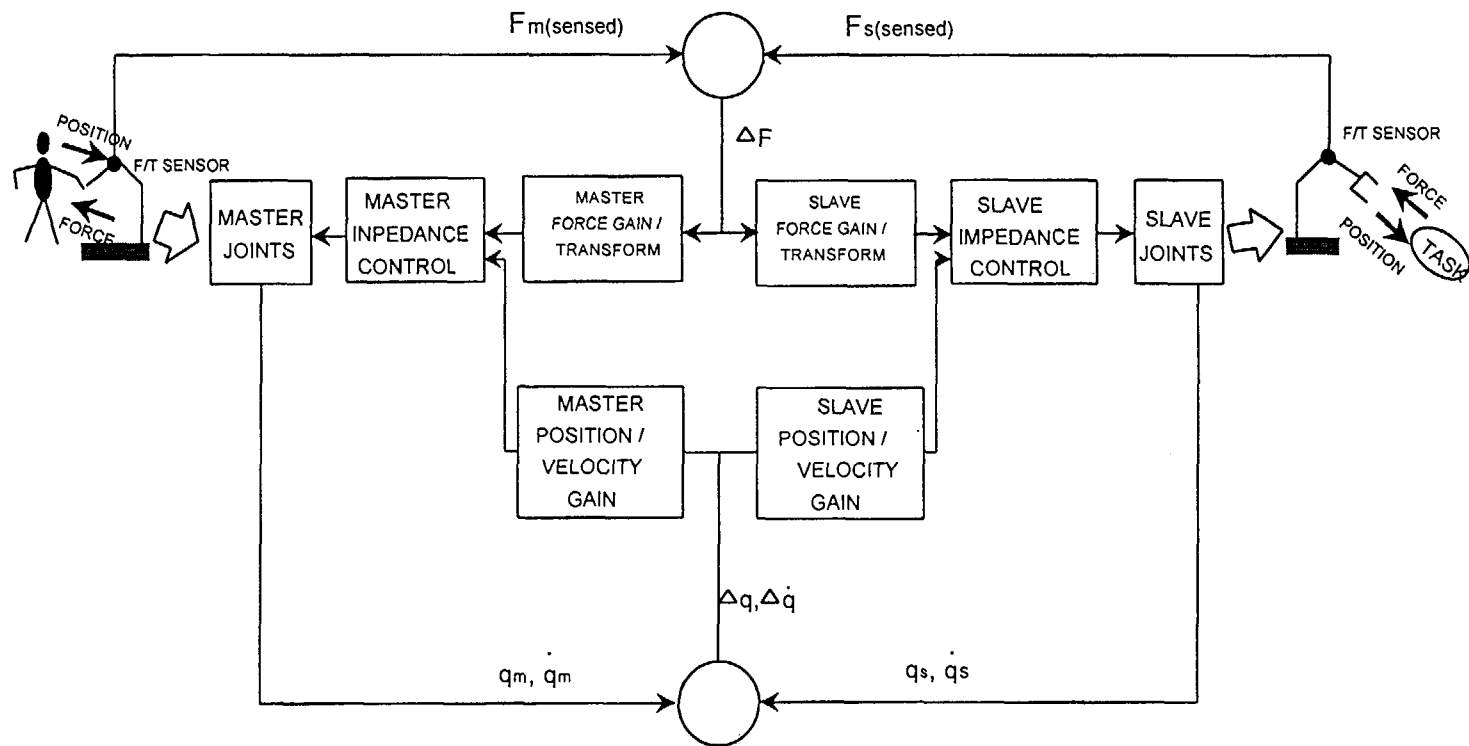


그림 13. 임피던스 제어
Fig. 13. Impedance control

Ω_m 과 Ω_s 의 종속함수로 표시된다. 임피던스 Z_{ma} 는 마스터와 마스터 액추에이터의 동역학을 나타내며, Z_{sa} 는 슬레이브와 슬레이브 액추에이터의 동역학을 나타낸다. 따라서 조작자, 마스터, 슬레이브, 작업대상 물체를 포함하는 통합 네트워크 모델에 제어 입력토크를 고려할 때 조작자에게 보여진 마스터 포트 임피던스 Z_m 는 Z_{ma} , Z_{sa} , K , Z_t 등의 함수로 표시되며, 또한 작업대상 물체에서 본 슬레이브 포트의 임피던스 Z_s 는 Z_{ma} , Z_{sa} , K , Z_h 등의 함수로 표시된다. 조작자가 마스터 및 슬레이브 포트에서 원하는 임피던스 (desired impedance) 들을 명시하면, MSM의 마스터 및 슬레이브 임피던스 (Z_m , Z_s) 들은 피드백 이득 행렬의 각 요소들을 조종하므로서 조정될 수 있다. 조작자가 임피던스를 조정할 수 있는 제어기는 Raju에 의하여 제안되었으며, 2-port 네트워크모델과 1 dof 슬레이브를 사용하여 작업달성시간과 성공률(task completion time and success) 측면에서 힘 피드백만이 유용하다는 것을 보였다. 또한 조작자가 마스터 포트에서 임피던스를 조정하는 것은 조작자의 피로도를 저감하고 지구력을 증대시킬 수 있음을 주장하였다.

MSM의 양쪽에 설치된 힘/토크 센서 신호를 이용하는 GIC는 그림 13에서 보여진다. 이러한 GIC는 PPC와 PFC를 조합한 제어구조로서 위치, 속도, 힘의 정보가 마스터와 슬레이브 양쪽 방향으로 서로 가로지른다.

일반적으로 GIC 구조는 조작자의 임피던스 변수들의 정확한 값들을 필요로 한다. 그러나 조작자의 동역학은 매우 복잡하여 완전한 모델을 얻기가 매우 어렵다.

4. 콤플라이언트 제어(Compliant Control)

PPC와 PFC의 양방향 제어구조에서 슬레이브와 물체사이의 접촉력은

자동적으로 제어되지 않는다. 슬레이브는 전적으로 조작자의 위치 지령 명령에 따라서 움직이며, 조작자는 매스터를 통하여 피이드백된 힘반향을 가지고 슬레이브와 물체사이에 발생하는 원치않는 접촉력을 줄이려고 노력한다. 슬레이브 말단효과장치에 능동적인(active) 콤플라이언스를 추가하는 것은 말단효과장치와 물체 사이의 접촉작용을 부드럽게한다.

그림 14는 직각좌표 공간에서 서보 오차와 콤플라이언스를 토대로하는 범용형 매스터와 슬레이브의 양방향 제어구조를 보여준다. 양방향 위치제어는 inner 루프(슬레이브 오른 쪽)의 피이드백에서 보여진다. 슬레이브 말단효과장치의 힘/토크센서 정보는 콤플라이언트 제어를 통하여 말단효과장치의 위치와 자세 x_{comp} 로 변환되어 조작자의 입력명령(매스터 핸드그립의 위치 및 자세)까지 피이드백된다. 위치제어 측면에서 볼 때 슬레이브의 지령명령은 순수한 매스터 핸드그립과 슬레이브 말단효과장치의 위치 및 자세 오차가 아니라 수정된 직각좌표 위치 및 자세 오차이다. 수정된 직각좌표 서보 오차는 슬레이브 역기구학을 통하여 슬레이브 조인트 위치로 변환되어 슬레이브 조인트 제어기에 지령명령으로 작용한다.

PPC와 PFC의 양방향 위치제어 구조에서 매스터와 슬레이브의 각 조인트들은 단단한(stiff) 위치 서보로 제어되므로, 조작자는 단단한 슬레이브를 조종해야 한다. 따라서 단단한 슬레이브는 물체 또는 환경과 강하게 접촉하거나 충돌하는 경향이 있다. 그림 14와 같이 슬레이브 inner루프에서 힘 피이드백은 단단한 말단효과장치를 유연하게 하므로 슬레이브와 물체 사이의 접촉성과 안전성을 개선할 수 있으며, 조작자는 유연한 말단장치를 가진 슬레이브를 조종하는 효과를 갖는다.

조작자에게 피이드백되는 힘반향은 매스터와 슬레이브의 직각좌표 서보 오차(매스터 핸드그립과 슬레이브 말단효과장치의 위치 및 자세 오차)

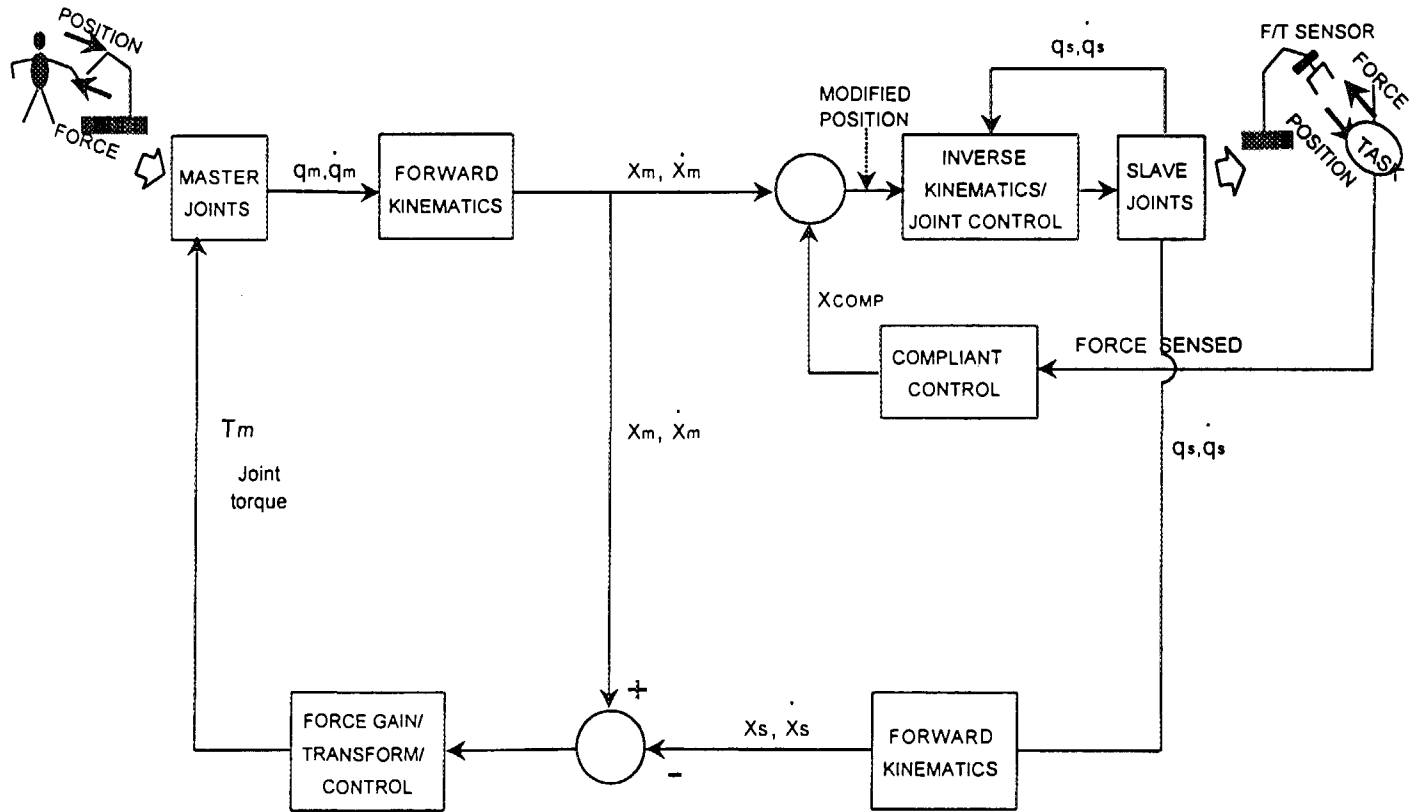


그림 14. 콤플라이언트 제어

Fig. 14. Compliant control

에 의하여 이루어진다. 직각좌표 서보오차는 매스터 자코비언 전치를 통하여 상응하는 매스터 조인트 토크로 변환되어 매스터 조인트 모터를 구동한다. 매스터의 강성은 매스터 핸드그립과 슬레이브 말단효과장치의 직각좌표 위치 오차의 함수로 표시되며, 위치오차가 크면 클수록 매스터의 강성은 더 커지므로 결과적으로 매스터와 슬레이브 사이에 주파수 대역(frequency bandwidth)을 증대시킨다. 반면에 슬레이브 말단장치와 물체 또는 작업환경 사이에 실제 힘 상호작용은 슬레이브의 local 루프에서 콤플라이언트 제어를 통하여 자동적으로 조정된다. 이와 같은 힘반향 구조는 제어시스템의 안정성을 유지하면서, 힘/토크 센서 정보를 매스터에 직접 피드백하는 방식(그림 9 및 그림 10)보다 더 우수한 힘 감도(sensitivity)를 제공한다.

5. 관리 제어(Supervisory Control)

원격조작에서 조작자는 실제 이미지가 아니라 TV 이미지 또는 모니터 이미지를 통하여 원격지에서 작업을 하는 슬레이브의 움직임을 감시하고 조종한다. 우주에서 작업을 수행하는 슬레이브를 지상에서 조종하는 경우에 지상과 우주사이의 상호통신전달 체계에서 피할수 없는 신호 전달의 지연 때문에 지금까지 언급한 양방향 제어 방식들은 적용이 어려운 점이 있다.

관리제어방식은 시간지연의 영향이 지대한 매스터/슬레이브 시스템에서 적용된다. 슬레이브 쪽에 지역 자율성(local autonomy)를 부여하는 관리 제어에서 조작자는 단순히 힘 또는 운동궤적 등의 입력을 지령하는 것 보다 더 높은 상위 수준(higher level)에서 슬레이브에 지령을 보낸다. 관리제어를 실행하기 위해서 슬레이브는 하위수준(lower level)의 지능을

보유해야하며, 조작자는 수행 중인 작업을 감시하고 재프로그래밍한다. 관리제어에서 어느정도의 명령은 조작자에 의하여 직접이루어지며, 반면에 나머지 명령은 자동 모듈에 의하여 이루어지므로 shared 제어라 불려진다.

관리제어방식은 조작자의 피로도를 저감시키며, 예기치 않은 상황의 전개시 빠르게 대응할 수 있으며, 시간지연에 덜 민감하며, 위치, 힘, 콤프라이언스, 임피던스 제어 방식의 정확도를 증대시킬 수 있다. 원자력 환경에서 사용되는 널리 사용되는 마스터/슬레이브 시스템의 양방향 신호전달에서 일어나는 시간지연은 무시할만 하지만 관리제어방식을 적용하므로써 시스템의 성능을 고양시킬 수 있다.

6. 가상힘 제어(Virtual Force Control)

원격작업을 만족할 만한 수준까지 달성하기 위하여 조작자는 마스터와 상호작용을 하면서 상황에 따라서 여러 가지 센서 및 인식 입력, 기능들의 적절한 통합을 필요로 한다. 또한 조작자의 작은 조작 실수는 슬레이브에 과도한 힘을 생성시켜 슬레이브와 작업환경에 큰 손상을 끼칠 수 있다. 조작자의 마스터 조작능력과 원격작업 성취도는 조작자의 훈련정도로서 평가할 수 있으므로 비정형 환경에서 작업을 수행하는 슬레이브를 조종하는 조작자를 훈련시킬 수 있는 시스템의 필요성은 꾸준히 증가하고 있다. 본 절에서는 그래픽을 활용하는 조작자 훈련시스템의 구조와 가상힘반향을 실현하는 제어방식에 대하여 기술한다.

가. 조작자 그래픽 훈련시스템(Operator Training System Using Graphics, OTSUG)

조작자 훈련시스템(OTSUG)은 실제 슬레이브의 그래픽 모델(이하 '가상 슬레이브'라 함), 물체와 작업환경의 그래픽 모델(이하 '가상환경'라 함), 실제 매스터(이하 '매스터'라 함)로 구성된다 (그림 15). OTSUG의 목적은 실제 슬레이브를 실제 작업환경에 투입하여 실제 작업을 수행하기 전에 조작자가 그래픽으로 재현한 가상 슬레이브와 가상 환경으로 구축된 가상통합환경에서 실제작업을 그래픽 시뮬레이션으로 연습하므로써, 조작자의 조종 능력을 배양하고 매스터와 슬레이브 시스템에 익숙케하여 실제 상황에서 조작자의 실수를 줄이고 작업의 효율성을 증대시키는데 있다.

OTSUG를 실현하기 위해서 가상 슬레이브와 가상환경 모델을 그래픽적으로 통합하고, 이들의 상호작용을 매스터와 연결하여 조작자에게 전달해야 한다. 조작자는 매스터를 통하여 가상환경에 있는 가상 슬레이브를 조작하면서 가상 작업을 수행한다. 가상 슬레이브의 현실감을 증대시키기 위하여 실제 슬레이브의 완전한 기구학 및 동역학적 특성이 그래픽 모델링에 포함되며, 가상환경은 컴퓨터의 제한된 능력때문에 실제환경(중요한 물체 및 작업환경만을 고려함)을 근사한다.

OTSUG에서 조작자는 매스터 핸드그립에 힘과 모멘트를 인가하며, 인가된 힘과 모멘트는 상응하는 슬레이브 조인트공간 토크로 변환되어 가상 슬레이브에 적용된다. 결과적으로 조작자가 힘을 작용하는 방향으로 가상 슬레이브를 움직이게 한다. 이와 같은 힘의 전달은 작업공간(task space)의 공간매핑의 형태로서 조작자의 손 움직임(조작자와 매스터 핸드그립)과 작업대상(가상 슬레이브와 작업환경에 있는 물체) 사이에 공간상 일치감(spatial correspondence)을 요구하므로 주로 범용형 매스터와 가상 슬레이브가 사용된다. 범용형의 경우에 가상 슬레이브 작업영역의 특

이성은 매스터 작업영역에 있는 특이성과 다른 위치에 존재하므로 매스터의 비특이성(singularity free) 작업영역을 가상 슬레이브의 비특이성 작업영역 보다 크게 확대하므로서 특이성 문제를 해결할 수 있다.

나. 가상힘 제어구조

원격조작시스템에서 매스터는 조작자가 다양한 작업을 수행하기 위하여 보다 익숙하고 편안하게 느끼면서 조작하는 도구이며, 조작자는 매스터를 통하여 축척된 가상 슬레이브 동역학을 느낀다. 조작자가 느끼는 힘은 가상 슬레이브 말단효과장치와 매스터 핸드그립의 끝점을 연결하는 가상 스프링(virtual spring)에 의하여 실현된다. 가상 스프링은 매스터가 조작자에 인가하는 힘을 결정하는 메카니즘으로서, 조작자에게 피이드백된 힘은 가상 슬레이브가 가상 환경에 있는 물체와 상호작용할 때 발생하는 가상 접촉력이다. 가상접촉력은 가상 스프링에서 생성되어 매스터를 통하여 조작자에게 전달된다. 매스터 핸드그립과 가상 슬레이브 말단효과장치의 끝점은 병치(collocation)하므로 매스터와 가상슬레이브 사이의 힘은 동일한 공간에서 전달된다. 가상 슬레이브가 자유 공간에서 움직일 때 어떤 힘도 조작자에게 피이드백되지 않지만, 가상환경 또는 가상물체와 접촉할 때 조작자는 가상 접촉힘을 느낀다. 그러나 만약 동역학 효과가 가상 슬레이브 모델에 포함되면, 자유공간에서 움직일 때에도 가상 슬레이브를 원하는 방향으로 가속시키기 위해 필요한 동역학적 힘이 조작자에게 피이드백된다.

조작자의 움직임은 조작자가 매스터에 부가하는 조작력(operational force)이며, 이 힘은 가상 슬레이브 조인트 토크로 변환되어 조인트 액추에이터에 인가된다. 따라서, 조작력은 궁극적으로 원하는 운동을 얻기위하

여 가상 슬레이브 말단효과장치에 부가된 힘으로 간주할 수 있다. 실제로 조작자가 자신이 조작하는 매스터의 무게를 예측하여 이를 보정하는데 익숙해지면 매스터에 가해지는 외부 힘(가상 슬레이브 말단효과장치에 작용하는 힘)에 능동적으로 반응하면서 스스로 조작력을 능란하게 조절할 수 있다.

그림 15는 이와 같은 조작력의 개념을 토대로한 매스터와 가상 슬레이브의 양방향 제어구조를 보여준다. 매스터에서 가상 슬레이브에 전달되는 정보는 힘의 증분(incremental force)이다. 즉, 조작자는 매스터를 통하여 위치의 변화가 아니라 힘의 변화(조작력의 변화)를 슬레이브에 보낸다. 매스터 핸드그립과 슬레이브 말단효과장치의 끝 점들이 작업공간에서 병치된 상태에서 조작자가 매스터 핸드그립을 움직이면 직각좌표 위치 오차 $X_m - X_s$ 가 발생한다. X_m 와 X_s 는 각각 매스터와 가상 슬레이브의 정기구학을 통하여 구해진다. 매스터는 직각좌표 서보오차에 기인한 힘 $F_m = G_1(X_m - X_s)$ 을 조작자에게 피이드백 시키기 위하여 조인트 모터를 구동한다. 동시에 가상 슬레이브 말단효과장치에 부가될 힘 $F_s = G_2(X_m - X_s)$ 이 구해지며, 이 힘은 자코비언 전치를 통하여 가상 슬레이브를 구동할 조인트 토크 $T_s = J^T F_s$ 로 변환된다. 이것은 개념적으로 조작자가 가상 슬레이브의 말단효과장치를 직접 움직이는 것과 같다. 이러한 효과는 가상 슬레이브의 정동역학을 이용하여 각 조인트의 가속도, 속도, 위치를 구함으로서 구현된다. 가상 슬레이브의 새로운 직각좌표 위치 및 자세는 가상슬레이브 정기구학을 통하여 구해지며 매스터 위치 및 자세까지 피이드백된다. 이득 G_1 은 매스터 구동모터에 대한 힘을변수(force scaling parameter)로서 가상 슬레이브의 말단효과장치

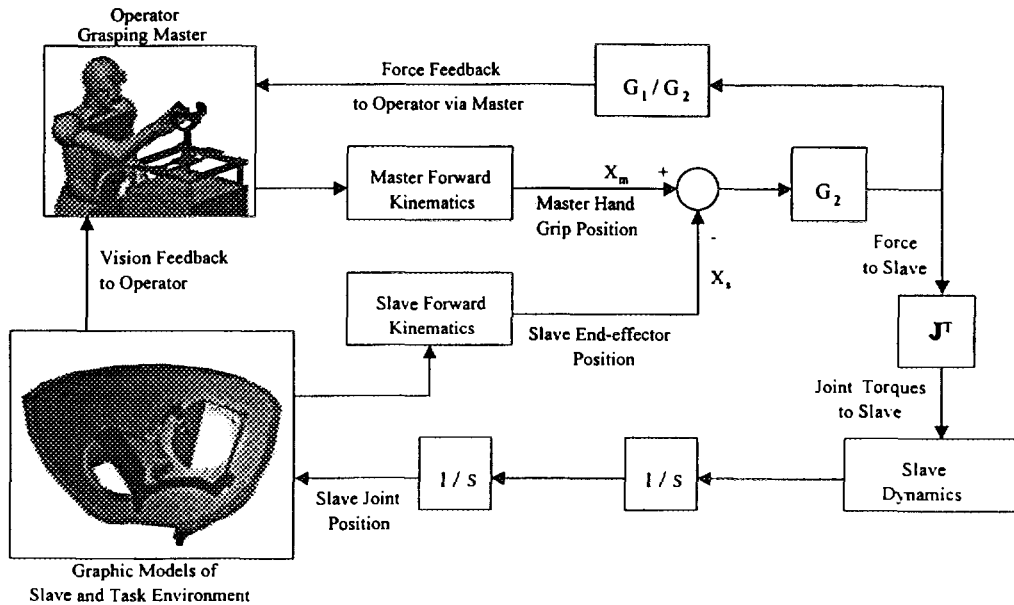


그림 15. 조작자 그래픽 훈련시스템의 블럭선도
 Fig. 15. The block diagram of the OTSUG

끝에 부착된 가상 스프링의 강성이다. G_1 이 크면 클수록 매스터와 가상 슬레이브 사이에 Transparency를 증대시키므로, 조작자가 마치 가상 슬레이브의 말단효과장치를 직접 조작하는 느낌을 증대시킨다. G_2 는 조작자가 느끼면서 발휘하는 힘의 크기를 조절하는 변수로서 가상 슬레이브에 공급되는 조인트 토크의 크기와 관련한다. 작은 G_2 는 가상 슬레이브의 조인트에 작은 토크를 인가하므로 조작자가 느끼는 힘을 감소시키는 역할을 한다. 작은 G_2 로 구동되는 가상 슬레이브는 매우 무겁고 느리게 느껴진다. 반면에 G_2 가 크면 클수록 큰 토크가 조인트에 공급되므로 가상 슬

레이브는 보다 가볍고 빠르게 느껴진다. 따라서 조작자는 자신의 조작 능력과 기술을 스스로 인지하여 주어진 원격작업을 수행하는데 필요한 힘감도를 얻기위해서 시스템의 안정성과 응답성을 고려하면서 최적의 G_1 과 G_2 를 선정할 수 있다.

본 절에서 기술한 바와 같이 가상통합환경(가상 슬레이브 및 가상 환경)과 연결된 실제 매스터의 양방향 제어방식에서 지령의 흐름 정보(조작자로부터 가상 슬레이브 또는 가상 슬레이브로부터 실제 매스터)는 가상 슬레이브와 실제 매스터의 직각좌표 위치 및 자세 서보 오차를 토대로 한 힘의 변화이다. 조작자는 가상 슬레이브의 위치 및 자세를 자신이 원하는 방향으로 조종하기 위하여 힘의 변화를 활용한다. 또한 제어구조를 실현하는데 있어서 역기구학과 역자코비언의 계산을 요하지 않으므로 이들로 인해 일어나는 조인트 위치들의 여러개의 해답과 특이성의 문제를 해결할 수 있다.

IV 결 언

본 보고서에서는 원자력 발전소의 시설물 또는 Hot Cell 등과 같이 작업자의 접근이 극히 제한되는 고방사선 지역에서 절대적으로 요구되는 매스터 및 슬레이브 매니플레이터 시스템(또는 원격조작시스템)에 관하여 기술하였다. 조작자의 입력장치로서 현재 사용되고있는 매스터의 종류와 형태를 비교 및 검토하였으며, 기하적 구조의 상이성에 기인한 매스터의 차이 및 특징을 정량적으로 분석하였다. 조작자와 작업환경(또는 작업물체)사이의 Transparency를 극대화하기 위하여 범용형 매스터 메카니즘의 설계에 필요한 설계조건들을 마련하였으며, 이를 증기발생기 보수작업에 활용될 슬레이브(Titan 매니플레이터)를 조종할 매스터의 설계에 적용하였다.

슬레이브가 외부작업환경과 상호작용할 때 발생하는 접촉력을 조작자에게 피이드백 시킬 수 있는 다양한 방식의 양방향 제어구조를 비교 및 분석하였다. 매스터와 슬레이브에서 이용가능한 위치, 속도, 힘 등의 센서정보를 활용하는 힘 반향 제어방식에 관하여 기술하였으며, 매스터와 슬레이브 쌍의 구조적인 형태의 차이에 따른 조인트 공간 또는 직각좌표 공간 상에서의 제어구조의 특성을 해석하였으며, 또한 가상 힘 생성 및 전달에 관한 양방향 제어방식을 분석하였다.

본 보고서에서 명시한 기술들을 활용함으로써 원격작업이 불가피한 환경에서 사용되는 원격로봇 시스템 또는 매스터/슬레이브 매니플레이터 시스템의 성능, 생산성 및 안전성을 고양시킬 수 있으며, 특히 당실에서 개발중인 원전용 로봇에 적용함으로써 기능을 고도화할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] "A Compact 6 Degree of Freedom Force Reflecting Handcontroller," *Cybernet Product Catalog*, 1996.
- [2] Anderson, R. J. and Davies, B., "Using Virtual Objects to Aid Underground Storage Tank Teleoperation," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1421-1426, 1994.
- [3] Anderson, R. J. and Spong, M. W., "Asymptotic stability for force reflecting teleoperators with time delay," *J. of Robotics Research*, pp. 135-149, 1992.
- [4] Anderson, R. J., "Dynamic damping control: Implementaion issues and simulation results," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 68-77, 1990.
- [5] Anderson, R. J. and Spong, M. W., "Hybrid impedance control of robotic manipulator," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1073-1080, 1987.
- [6] Bejczy, A. K. and Handykken, M., "Generalization of bilateral force-reflecting control of manipulators," *Proc. 4th Symposium Theory and Practice robots and Manipulators(RoManSy)*, pp. 242-255, 1981.
- [7] Bejczy, A. K. and Handykken, M., "Experimental results with a six-degree-of-freedom froce-reflecting hand controller," *Proc. 17th Annual Meeting pm Manual Control*, pp. 465-477, Los Angeles,

- 1981.
- [8] Bejczy, A. K. and Salisbury, J. K., "Kinesthetic Coupling Between Operator and Remote Manipulator," *Proc. ASME Computer Technology*, pp. 197-211, 1980.
 - [9] "Bilateral Stewart Platform," *System Manual, AEA Technology*, 1994.
 - [10] Brooks, T. L., "Telerobotic response requirements," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 113-120, 1990.
 - [11] Chan, T. F. *et al.*, "Generalized bilateral control for dissimilar kinematic teleoperators and application to D&D type tasks," *ANS Topical Meeting Robotics and Remote Systems*, pp. 281-284, 1995.
 - [12] Chapel, J. D., "Performance limitations of bilateral force reflection imposed by operator dynamic characteristics," *Proc. NASA Conf. Space Telerobotics*, pp. 91-100, 1989.
 - [13] Christensen, B. K., "Graphical Model Based Control for Robotics," *Image VI Conference*, July, 1992
 - [14] Corliss, W. R. and Johnsen, E. G., "Teleoperator controls - An AEC-NASA technology survey," *NASA SP-5070*, 1968.
 - [15] Colgate, J. E., "Roboust impedance shaping telemanipulation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 4, pp. 374-384, 1993.
 - [16] Colgate, J. E., "Power and impedance scaling in bilateral manipulation," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp

- 2292-2297, 1991.
- [17] Dudragne, J., *et al.*, "A generalized bilateral control applied to master-slave manipulators", *Proc. 20th ISIR*, pp. 435-442, 1989.
- [18] Das, H. *et al.*, "Operator performance with alternative manual control modes in teleoperation," *Presence*, vol. 1, no.2, pp. 201 - 217, 1992.
- [19] Eppinger, S. D., "Modelling robot dynamic performance for endpoint force control", *Ph.D. thesis, MIT*, 1988.
- [20] Eppinger, S. D. and Steering, W. P., "Understnading bandwidth limitations in robot force control," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 904-909, 1987.
- [21] Fiorini, P., *et al.*, "Integrated interface for advanced teleoperation," *Proc. IEEE Control Systems*, pp. 15-20, October 1993.
- [22] Fraisse, P., *et al.*, "Virtual environment for robot force control," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 219-224, 1993.
- [23] Furuta, K., *et al.*, "Master-slave manipulator based on virtual internal model following control concept," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 567-572, 1987.
- [24] Goertz, R.C. *et al.*, "ANL Mark E4A Electric master-slave manipulator," *Proc. 14th Conf. Remote Systems Technology*, pp. 115-123, 1966.
- [25] Johnsen, E. G. and Corliss, W. R., "Human factors applications in teleoperator design and operation," *John Wiley & Sons, Inc.* 1971.
- [26] Handlykken, M. and Turner, T., "Control system analysis and

- synthesis for a six dof universal force-reflecting hand controller," *Proc. IEEE Int. Conf. Decision and Control*, pp. 1197-1205, 1980.
- [27] Hannaford, B. and Fiorini, P., "A detailed model of bilateral teleoperation," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 117-121, 1988.
- [28] Hannaford, B., "Experimental and simulation studies of hard contact in force reflecting teleoperation," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 584-589, 1988.
- [29] Hannaford, B., "Stability and performance tradeoffs in bi-lateral telemanipulation," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 1764-1767, 1989.
- [30] Hannaford, B., "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 5, no. 4, pp. 426-434, 1989.
- [31] Herbst, L., "Robot specification tradeoffs for specific applications," *Proc. Conf. Robots 9*, pp. 16(1)-16(9), 1984.
- [32] Hirai, S. and Sato, T., "Advanced master-slave manipulator augmented with world model," *Proc. 15th ISIR*, pp. 137-144, 1985.
- [33] Hirzinger, G., *et al.*, "Control structures in sensor-based telerobotic systems," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 267-276, 1991.
- [34] Hogan, N., "Impedance control: An approach to manipulation, Part I, II, III," *Trans. ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 107, pp. 1-24, 1985.

- [35] Kazerooni, H. and Her, M. G., "A virtual exercise machine," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp 232-238, 1993.
- [36] Kankaanranta, R. K. and Koivo, H. N., "Dynamics and simulation of compliant motion of a manipulator," *IEEE J. Robotics and Automation*, vol.4 no. 2, pp. 163-173, 1988.
- [37] Khatib, O., "A unified approach for motion and force control of robot manipulators," *IEEE J. Robotics and Automation*, vo. RA-3, pp. 43-53, 1987.
- [38] Kim, W. S., "Graphical Operator Interface for Space Telerobotics," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 761-768, 1993.
- [39] Kim, W. S., "Developments of new force reflecting control schemes and application to a teleoperation training simulator," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1412-1419, 1992.
- [40] Kim, W. S., *et al.*, "Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 8, no. 2, pp. 176-185, 1992.
- [41] Kirlik, A., *et al.*, "Supervisory control in a dynamic and uncertain environment: A process model of skilled human-environment interaction," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 4, pp. 929-952, 1993.
- [42] Khosla, P. K. and Kanade, T., "Experimental evaluation of nonlinear feedback and feedforward control schemes for

- manipulators," *Int. J. Robotics Research*, vol. 7, no. 1, pp. 18-27, 1988.
- [43] Komada, S., *et al.*, "Hybrid position/force control of robot manipulators based on acceleration controller," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 48-55, 1991.
- [44] Kosuge, K., *et al.*, "Mechanical system control with man-machine-environment interactions," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 239-244, 1993.
- [45] Kotoku, T., *et al.*, "A force display system for virtual environments and its evaluation," *Proc. IEEE Int. Workshop Robot and Human Communication*, pp. 246-251, 1992.
- [46] Kotoku, T., *et al.*, "A robot simulator with force generating function -Configuration space approach-," *Proc. Int. Symposium Measurement and Control in Robotics*, pp. 805-810, 1992.
- [47] Kuban, D. F. and Perkins, G. S., "Dual arm master controller concept," *Proc. National Topical Meeting Robotics and Remote Handling in Hostile Environments*, pp. 433-437, 1984.
- [48] Lawrence, D. A., "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 624-637, 1993.
- [49] Lee, S. and Lee, H. S., "Modeling, design, and evaluation of advanced teleoperator control systems with short time delay," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, pp. 607-623, 1993.
- [50] Lumelsky, V. "On human performance in telerobotics", *IEEE*

- Trans. System, Man, and Cybernetics*, vol. 21, no. 5, pp. 971-982, 1991.
- [51] Luh, J. Y. S., *et al.*, "Resolved acceleration control of mechanical manipulators," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. AC-25, pp. 195-200, 1980.
- [52] Luo, Z. and Ito, M., "Control design of robot for compliant manipulation on dynamic environments," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 9, no. 3, pp. 286-296, 1993.
- [53] Mason, M. T., "Compliance and force control for computer controlled manipulators," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-11, no. 6, pp. 418-432, 1981.
- [54] Matsuhira, N. *et al.*, "Development of A Multipurpose Hand Controller for JEMRMS," *Proc. 24th Aerospace Mechanisms Symp.*, pp. 105-120, 1990.
- [55] McAfee, D.A. and Ohm, T., "Teleoperator Subsystem/Telerobot Demonstrator: Force Reflecting Hand Controller Equipment Manual," *JPL D-5172*, 1988.
- [56] Miner, N. E. and Stanfield, S. A., "An Interactive Virtual Reality Simulation System for Robot Control and Operator Training," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1428-1435, 1994.
- [57] Niemeyer, G. and Slotine, J. J., "Transient shaping in force-reflecting teleoperation," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 261-266, 1991.

- [58] Raju, G. J. *et al.*, "Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1316-1321, 1989.
- [59] Raibert, M. H. and Craig, J. J., "Hybrid position/force control of manipulators," *Trans. ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 102, pp.126-133, 1981.
- [60] Rivin, E. I., "Analysis of structural compliance for robot manipulators," *Robotics & Factories of the Future*, pp. 262-269, 1984.
- [61] Sakari, T. and Tachi, S., "Impedance sacling of a tele-existence master-slave manipulation system by using similarity transformation," *Proc. Int. Symposium Measurement and Control in Robotics*, pp. 295-302, 1992.
- [62] Salisbury, J. K., "Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates," *Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, pp. 95-100, 1980.
- [63] Sheridan, T. B., "Telerobotics," *Automation*, vol. 25, no. 4, pp. 487-507, 1989.
- [64] Sheridan, T. B., "Telerobotics, automation, and human supervisory control," *MIT Press*, 1992.
- [65] Siva, K. V., *et al.*, "Development of a general purpose hand controllers for advanced teleoperation", *Proc. Int. Symposium Teleoperation and Control*, pp. 277-290, 1988.
- [66] Siva, K. V., *et al.*, "The development of a bilateral input device

- for use in teleoperation", *Proc. ANS Topical Meeting Robotics and Remote Systems*, pp. 621-632, 1991.
- [67] Stein, M. R. and Paul, R. P. "Behavior based control in time delayed teleoperation," *Proc. Int. Conf. Advanced Robotics*, pp. 223-228, 1993.
- [68] Strassberg, Y. *et al.*, "A new control scheme for bilateral teleoperating system: performance evaluation and comparison," *Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 865-872, 1992.
- [69] Sweet, L. M. and Good, M. C. "Redefinition of the robot motion-control problem," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 18-25, 1985.
- [70] Tanie, K., *et al.*, "Bilateral remote control with dynamic reflexion," *Proc. 7th Symposium Theory and Practice robots and Manipulators(RoManSy 6)*, pp. 296-308, Italy, 1988.
- [71] Uebel, M., *et al.*, "The effect of bandwidth on telerobot system performance," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 24, n0. 2, pp. 342-348, 1994.
- [72] Vertut, J., *et al.*, "The MA-23 Bilateral Servomanipulator system," *Proc. 24th Remote Systems Technology*, pp. 175-187, 1976.
- [73] Vertut, J., *et al.*, "Advances in a computer aided bilateral manipulator system", *Proc. National Topical Meeting Robotics and Remote Handling in Hostile Environments*, pp. 367-375, 1984.
- [74] Vertut, J and Coiffet, P., "Robot technology, Volume 3B,

Teleoperation and robotics", *Kogan Page*, London, 1985.

- [75] Vibet, C., "Design of robot controllers," *Advanced Robotics*, vol. 2, no. 1, pp. 9-20, 1987.
- [76] Whitney, D. E., "Force feedback control of manipulator fine motions," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 99, pp. 91-97, 1977.
- [77] Whitney, D.E. "Historical perspective and state of the art in robot force control", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1985.
- [78] Wu, C., "Compliance control of a robot manipulator based on joint torque servo," *J. Robotics Research*, vol. 4, no. 3, pp. 55-71, 1985.
- [79] Wu, C. and Paul, R.P., "Resolved motion force control of robot manipulator," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-12, no. 3, pp. 266-275, 1982.
- [80] Yokokohji, Y. and Yoshikawa, T., "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 849-858, 1992.

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS주제코드		
KAERI/AR-488/98					
제목 / 부제	매스터/슬레이브 매니플레이터의 설계 및 제어 기술 현황				
연구책임자 및 부서명 (TR, AR 일 경우 주저자)	김 기 호 (원자력 로봇 Lab)				
연구자 및 부서명	김승호("), 김병수("), 김창희("), 정승호("), 황석용("), 서용철("), 이영광(")				
출 판 지	대 전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	1998 . 3.
페 이 지	57	도 표	유(o) , 무()	크 기	19 x 26 cm
참고사항					
비밀여부	공개(o), 대외비(),	급비밀	보고서종류	기술현황분석보고서	
연구 위 탁 기 관			계 약 번 호		
초록	<p>극한환경에서 작업자를 대신할 수 있는 원격로봇 또는 원격기계장치에 대한 연구는 큰 관심과 주목을 받고 있다. 특히 매스터/슬레이브 매니플레이터는 엄격한 ALARA 규정을 적용받는 원자력 산업에서 40년이상 폭넓게 사용되어왔지만, 복잡하고 다축자유도로 형성된 시스템의 성공적 운용은 매우 미미하다.</p> <p>매스터 매니플레이터는 한쪽에서는 조작자와 다른 한쪽에서는 슬레이브 매니플레이터와 서로 인터페이스하는 입력장치이다. 양방향 힘반향제어는 매스터와 슬레이브 매니플레이터의 성공적이고 능란한 운전에서 중요한 역할을 하며, 기계적 하드웨어를 잘 설계하고 제어 방식을 적절하게 실현함으로써 매스터와 슬레이브 시스템의 성능을 고양시킬 수 있다.</p> <p>본 보고서에서는 매스터와 슬레이브 매니플레이터 시스템에서 인간과 기계의 인터페이스 장치인 매스터 매니플레이터의 설계에 관한 문제를 기술하며, 유사형과 범용형 매스터 매니플레이터를 설계하는데 있어서 중요한 설계변수들의 영향을 정량적으로 평가하고, 이를 토대로 설계조건을 확립한다. 또한 매스터와 슬레이브 매니플레이터에서 사용되는 다양한 양방향 힘반향 제어방식을 고찰하며, 매스터와 슬레이브 매니플레이터 사이의 위치 및 힘 정보 흐름을 조사하며, 각 각의 제어 루프에 대하여 분석하고 이들을 통합하여 실현시키는 방법에 대하여 기술한다.</p>				
주제명키워드					
매스터 매니플레이터, 슬레이브 매니플레이터, 양방향제어, 힘반향제어, 위치제어, 힘제어, 가상힘					

BIOBLIGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Reoprt No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/AR-488/98			
Title / Subtitle	State of the Art in Design and Control of Master-Slave Manipulators		
Project Manager and Dept. (or Main Author)	Kiho Kim (Nuclear Robotics Lab)		
Researcher and Dept.	Seungho Kim(""), Byung Soo Kim(""), Chang Hoi Kim(""), Seungho Jung(""), Suk Yeoung Hwang(""), Yong Chil Seo(""), Young Kwang Lee("")		
Pub. Place	Taejon	Pub. Org.	KAERI
Page	57	Fig. and Tab.	Yes(o) , No ()
Note			
Classified	Open(o), Outside (), Class	Report Type	State-of-the-Art Report
Sponsoring Org.		Contact No.	
Abstract			
<p>The use of remotely operated robots and other mechanical devices as replacements of human workers in hazardous environments is a growing field of research. In particular, master-slave manipulators have been extensively used in the nuclear industries governed by the ALARA principle for more than four decades. There, however, are still few successful implementations of complex and high degree-of-freedom systems.</p> <p>The master manipulator is an input device which interfaces with the human operator on one side and with the slave manipulator on the other. Bilateral force-reflecting control plays a key supporting role in successful dexterous manipulation of the master-slave manipulators. Great increases in performance of the master-slave manipulator system can be achieved through good design of mechanical hardwares and proper implementation of the embedded control strategies.</p> <p>This report presents some of design issues relevant to designers of the master manipulator as man-machine interface device in the master-slave manipulator system. Significant design parameters for both the replica and universal master manipulators are evaluated. In addition, the report describes the various control schemes of the bilateral force-reflecting master-slave manipulators, discusses the analysis and synthesis of the control loop between the master and slave manipulators, and examines the necessary position and force information on both sides.</p>			
Subject Keyword			
Master manipulator, slave manipulator, bilateral control, force-reflecting control, position control, force control, virtual force			