

첨단 원격 조정 시스템의 개발현황 및 활용에 대하여

허 훈

고려대학교 제어계측공학과 교수



● 1948년생
● 동역학, 진동 및 제어 분야에서의 비선형 스토캐스틱 시스템 해석과 항공우주 시스템에의 응용에 관심을 갖고 있다.

김 희 국

고려대학교 제어계측공학과 교수



● 1956년생
● 로봇 동역학, 운동역학, 원격 조정시스템의 최적설계, 제어와 응용, 마이크로 프로세서 응용 등에 관심을 갖고 있다.

1. 머리말

인간의 끊임없는 자신의 능력개발에 대한 욕망과 도전은 현대문명에서와 같이 자동화 공장, 우주탐험 우주왕복선(space shuttle), 로봇 등의 발전으로 표출되어 왔으며, 현재에도, 여러 산업분야에서 완전자동화를 위한 인공지능을 갖춘 시스템의 개발에 박차를 가하고 있다. 그러나 현재 오직 단순한 반복작업의 경우에만 인간의 관여 없이 자동화가 이루어지고 있으며 거의 모든 복잡하거나 작업과정이 불확실한 경우는 인간의 지도 및 지능이 필수 불가결한 실정이다. 그러므로 인간의 관여사태가 인공지능의 발전에 따라 반비례로 줄어들지만 필요한 경우는 고차원적인 관여를 필요로 하기 때문에 고성능의 인간-기계 인터페이스(man-machine interface)가 요구될 것이다. 이와 같이 인간-기계 인터페이스는 자동화 시스템의 진화로의 반드시 거쳐야 하는 과정인 것이다.

원격 조종 시스템은 이러한 인간-기계 인터페이스의 한 분야이며 산업 자동화에의 균형있는 발전에 필요하다 하겠다.

이상적인 원격 조종 시스템은 시간지연이나 동적효과가 없는 시스템으로 나타낼 수 있으며, 다시 말하면, 양방향/힘반향 원격 조정 시스템의 경우, 무한대의 강도를 갖는 질량이 없는 기계적 링크에 의해 연결된 두 로봇 팔과 같은 시스템을 의미한다. 그러나 실제 시스템의 경우에는 동적효과, 마찰, 시간지연 등은 무시할 수 없으며, 또한, 조종사의 제한된 입출력 능력과 불확실한 작업환경 등은 원격 조종 시스템의 설계와 제어시 전체 시스템의 성능향상을 위해 아주 중요하다 하겠다. 이러한 첨단 원격 조종 시스템의 개발과 활용은 우주 공간에서의 작업, 원자로 보수작업, 깊은 바다 속에서의 작업, 탄광에서의 작업, 건설작업 등 여러 분야에 걸쳐서 확대되고 있다. 이 글에서는 기존 원격 조종 시스템의 여러 형태, 보조 제어 방법 및 성능비교, 제어방법 등과, 현존

시스템의 개발현황, 만능형 원격 조종 시스템의 기구학적 변환 및 척도변환, 최근 문헌에서 제안되는 새로운 제어 방법 등에 관해서 차례로 논하기로 하겠다.

2. 원격 조종 시스템

원격 조종 시스템은 원격 로봇, 원격 로봇 제어기 그리고 그 조종사가 직접 여러 형태의 입력(힘 혹은 변위)을 가함으로써 원격 로봇을 제어하도록 필요한 제반 가능한 정보전달 및 제어 신호 처리를 수행하는 제어기로서 구성이 된다. 이 시스템의 주요 작용은 조종사가 원격 작업 및 위험한 작업을 수행하도록 지원하는 것이며 그림 1과 같은 여러 가지 정보의 교환을 수행할 수 있는 시스템을 나타낸다. 즉, 원격 조종사의 관여는 원격 조종 시스템에서 가장 중요한 개념이며 이러한 시스템의 성능향상을 위해서 원격 로봇이 작업환경으로부터 느끼는 상호작용의 상태를 그대로 조종사에게 전달함으로써 조종사가 마치 직접 작업을 수행하는 것처럼 느끼게 할 수 있는 정도(level of telepresence)로 증진시켜야 한다. 이 글에서는 시각, 청각, 구개(vocal) 및 그 밖의 정보에 관한 적용 효과는 논의하지 않으며 오직 근운동 감각(kinesthetic)의 정보교환에 관한 원격 시스템의 설계, 제어 및 그 활용에 관해서만 언급하려고 한다.

원격 조종 시스템은 기하학적 형태(geometry), 자유도수(degree of freedom), 제어변수(control variables) 그리고 정보방향(direction of information flow)에, 즉 일방향(unilateral) 혹은 양방향(bilateral) 의해 분류가 되며, 원격 제어기의 가장 간단한 형태로는 각 축의 회전속도를 제어하기 위하여 일반 산업용 로봇 시스템에서 사용되는 스위치 박스(teach pendant)에서부터, 힘/토크 센서를 원격 제어기에 이용, 조종사에 의해 가해진 힘/토크를 측정하여 원격 로봇의 속도, 변위, 혹은 힘을 제어할 수 있는 고정형(isometric type), 스프

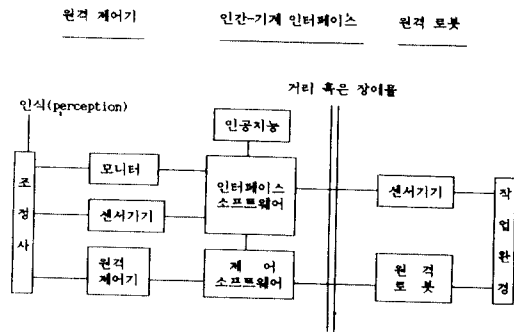


그림 1. 원격조종시스템의 정보교환

링 등의 성질을 이용하여 원격 조종사에 의해 가해진 힘과 변위가 어떤 관계를 만족하도록 제작된 비례형(proportional type), 원격 로봇에 부착된 힘/토크 센서를 이용하여 조종사로 하여금 가해진 힘을 간접적으로 느낄 수 있도록 원격 제어기에 그에 상응하는 힘을 반향시킬 수 있는 양방향/힘반향 원격 제어기 등이 있으며, 후자의 경우 원격로봇과 같은 기하학적 형태를 취하는 복사형(replica type)의 주종형(master slave)과 전혀 다른 기하학적 형태를 취하며 이에 따른 기구학적 변환(kinematic transformation)이 실시간(real time)으로 제어기에서 행해지는 만능형(universal type) 등이 있다.^(1,2)

2.1 보조 제어 방법

이러한 여러 형태의 원격 조종 시스템의 성능향상을 위해서 다양한 소프트웨어의 보조가 있으며 이들의 적용은 원격 제어기의 기종 및 원격 로봇의 기능에 따라 제한이 된다. 몇 가지만 소개를 하면 다음과 같다.

(1) MF(motion filtering) : 불필요하거나 불규칙한 조종사의 수전(jittering)이나 각종 잡음(noise)을 제거하는 것을 말함.

(2) Scaling : 원격 로봇의 제어변위와 원격 제어기의 제어변위 사이의 기구학적 변환시 서로 상이한 변위척도를 적용하는 것을 말함.

(3) RR(re-referencing) : 원격 조종사의 편의

를 위하여 원격 로봇의 지역좌표계의 변환 없이 원격 제어기의 지역좌표계의 상태를 임의로 변경하는 것을 말한다.

(4) RO(re-orientation) : 원격 조종사의 편이를 위하여 제어기의 기준좌표계에 대하여 원격 로봇의 기준좌표계의 방위(orientation)를 변환시켜 주는 것을 말한다.

(5) FR(force-reflection) : 원격 로봇에 부착된 힘/토크 센서를 이용하여 원격 조종사로 하여금 로봇에 가해진 힘을 간접적으로 느낄 수 있도록 원격 제어기에 그에 상응하는 힘을 반향시키는 것을 말한다.

(6) FI(force-indexing) : 조종사의 작업능률을 향상시키기 위해 고정된 크기의 힘반향을 생략하는 것을 말한다(말단효과장치(end-effector) 중량 등).

(7) Compensation : 원격 조종 시스템의 동적성향, 마찰력, 자중을 감소시키는 과정.

(8) MC(motion constraints) : 원격 조종 시스템의 보호 및 제어도를 향상시키기 위하여 인공적인 구속(constraints)를 첨가하는 것을 말한다.

표 1 원격 제어기별 소프트웨어 보조기능

보조기능	스위치박스	고정스티크	양방향/ 주종형	양방향/ 만능형
MF		*	*	*
MC		*	*	*
RRC		*	*	*
RBRC,RBPC			*	*
Compensation			*	*
FR, FI			*	*
VCP				*
Scaling				*
RR				*
RO		*		*
TR	*	*	*	*

* : 적용가능

표 2 원격 제어기별 성능 비교

평가척도	스위치박스	고정형스티크	양방향/ 주종형	양방향/ 만능형
작업시간	4	3	1	2
제작비	1	2	4	3
정밀도	4	3	1	1
신뢰도	1	2	3	4
이동성	1	2	4	3
운동의 자연도	4	3	2	1
제어방식 활용	4	3	2	1
제작 난이도	1	2	3	3
계산량	1	2	3	4
자유자재 (dexterity)	4	3	2	1
제작시 연관성	무관	무관	연관	무관

참고, · 양호성 : 1>2>3>4.

· 운동의 자연도 : 조종사 운동의 자연도.

· 제작시 연관성 : 원격 로봇과 원격 제어기의 제작시 연관성을 말한다.

(9) VCP(variable control point) : 원격 조종 시스템의 제어점의 선택을 자유로이 변환할 수 있도록 기하학적 변환을 제공하는 것을 말한다.

(10) TR(teach and repeat) : 조종사에게 원격 로봇의 경로를 원격 제어기를 이용하여 교시하고(teach), 후에 원격 로봇으로 하여금 반복하게(repeat)하는 것을 말한다.

표 1과 2에는 여러 형태의 원격 제어기의 특성 및 성능에 대해 간단한 비교를 나타낸다. 이 표들에서 주지할 것은 만능형 양방향/힘반향 원격 제어기가 여러 면에서 우수하다는 것이며 이 밖에 더 상세한 설명은 참고문헌을 참고하기 바란다.^(1,2,3,4)

2.2 원격 조종 시스템 제어방법

현존하는 전형적인 제어 방법은 크게는 아래와 같이 분류할 수 있다.⁽¹⁾

(1) DRC(direct rate control) : 원격 로봇 각

축의 각속도를 원격 제어기의 출력을 직접 이용하여 제어하는 방식.

(2) RRC(resolved rate control) : 원격 로봇 제어점(control point)의 각속도를 원격 제어기의 출력을 이용, 적절한 기구학적 변환과 함께 제어하는 방식.

(3) DUPC(direct unilateral position control) : 원격 로봇 각 축의 각도변위를 원격 제어기의 출력신호를 직접 이용하여 제어하는 방식을 말하며 원격 로봇으로부터의 역전신호(feed back)가 없음.

(4) RUPC(resolved unilateral position control) : 원격 로봇 제어점의 속도 변위를 원격 제어기의 출력신호를 직접 이용, 적절한 기구학적 변환과 함께 제어하는 방식을 말하며 원격 로봇으로부터의 역전신호가 없음.

(5) DBPC(direct bilateral position control) : DUPC방법과 유사하며 원격 로봇으로부터의 역전신호가 원격 제어기에 전달됨(그림 2).

(6) RBPC(resolved bilateral position control) : RUPC방법과 유사하며 원격 로봇으로부터의 역전신호가 원격 제어기에 전달됨.

위의 제어 방법에서 직관절 제어(direct joint control)와 분해 운동 제어(resolved motion control)로 분류되었는데 여기서 직관절 제어

는 원격 로봇 각축의 제어가 원격 제어기 각축 출력에 각각 제어되는 것을 나타내며 분해 운동 제어는 원격 로봇의 제어점을 제어하기 위하여 제어기(controller)에서 원격 제어기의 출력신호에 필요한 기구학적 변환을 수행하는 것을 말한다.

DRC와 RRC 등의 제어방법은 스위치박스, 고정형 혹은 비례형 원격 제어기와 같이 많이 사용이 되며, 조종사의 숙련을 요구하므로 생산성 및 작업 효율성이 매우 낮고 표 1과 2에서 볼 수 있는 바와 같이 보조 소프트웨어의 활용에 많은 제한이 있다. 그러나 단순한 작업 수행시는 제작, 제어의 편이성, 적은 비용, 소규모 및 경량성 등으로 인해 많은 응용 사례를 볼 수 있다. DUPC와 RUPC의 방법은 일방향/주종형 혹은 일방향/만능형원격 제어기와 같이 사용되며, 원격 로봇으로부터의 작업환경에 관한 정보를 활용하지 못함으로써 복잡한 작업 수행 능력에 제한성을 가진다. 그러나 원격 제어기에 구동 및 전달 시스템(actuator and trasmission systems)을 부착하지 않음으로써 DRC와 RRC의 경우와 같이 제작 및 제어의 편이성, 적은 비용, 소규모 및 경량화, 근운동 감각의 활용 등의 장점이 있다. DBPC와 RBPC의 제어방법의 경우는, 원격 제어기는 일반 로봇과 같은 성능을 가져야 하며 양방향 정보교환(힘반향 혹은 서보 역전신호)을 통해 원격 로봇에서 발생하는 작업 환경과의 상호작용(interaction)에 관한 정보를 조종사에게 전달함으로써 생산성 및 작업 수행 능력이 매우 뛰어난 것으로 평가되고 있다. 그러나 이러한 제어방법을 사용하는 양방향/힘반향 원격 제어기의 큰 단점은 대규모, 중량성, 동적효과, 마찰 등에 있으며 이로 인한 긴 제작 설치 시간의 필요, 제작비 및 제어의 난이도 증가, 이동성의 어려움 등이 지적되고 있다.

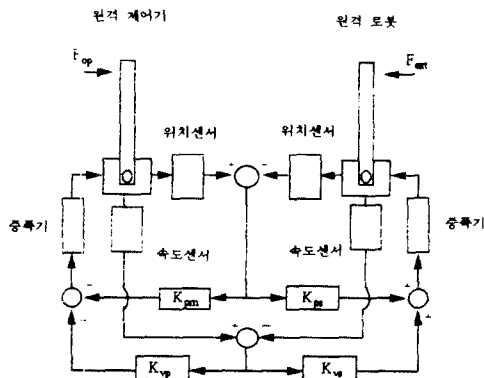


그림 2. 1-자유도 원격 조종 시스템에서의 DUPC

2.3 만능형 원격 제어기

양방향/힘반향 원격 조종 시스템은 근본적으로 두 로봇(원격 로봇과 원격 제어기)이 서로

표 3 일반 산업용 로봇, 만능형 원격 조종기, 원격 로봇의 기능 및 특성

특 성	산업용 로봇	만능형 원격 조종기	원격 로봇
활용특성	자동, 반복적	수동(원격조종)	원격조종
작업환경	단순, 구조적	조종사	복잡, 불확실
규모	대형	소형	소형/중형
무게	중량	경량	경량/중량
구동위치	각축분배	중앙집결(바닥)	각축분배
전달계특성	고강도, 역구동불가	저강도, 역구동가능	저강도, 역구동가능
마찰력	크다	적다	적다
관성	크다	적다	적다/중간
하중 용량	5~200(파운드)	2~10(파운드)	20~50(파운드)
말단효과장치	특수화(교환가능)	손잡이(스틱)	특수화
제어변수	축각도 변위	손잡이의 위치 및 힘	EE 위치 및 힘
작업속도 (Inch/s)	빠를수록 좋음	0~40	0~40

기계적으로나 혹은 전자적으로 연결(couple)되어 있는 것이다. 특히, 만능형 양방향/힘반향 원격 제어기는 제어변수 및 작용환경 등에서 일반 산업용 로봇과 많은 유사점과 상이점을 가지고 있으며 자세히 비교를 할 필요성이 있다. 표 3은 몇 가지 기능, 설계 및 작업환경에서 일반 산업용 로봇과 원격 로봇과 원격 제어기의 특성을 비교하였다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이 원격 제어기는 작업환경이 조종사에 한정되어 있고 이 시스템의 개발시 반드시 조종사의 제한된 기능이 고려되어야 한다는 것을 알 수 있다. 다시 말하면, 원격 조종 시스템은 조종사가 두 로봇을 이용하여 주어진 작업을 수행하는 것이며, 근래에 컴퓨터 기술의 급진적인 발전에 힘입어 조종사의 제한된 정보/작업 수행기능은 전체 시스템에 있어 그림 3에서와 같이 두드러진 병목현상(bottle neck)을 나타내며⁽²⁾ 이는 곧 조종사의 기능을 최대한 활용할 수 있는 시스템의 설계 및 제어 방법의 개발이 매우 중요하다 하겠다.

원격 제어기 설계 및 제작시 중요한 고려 사

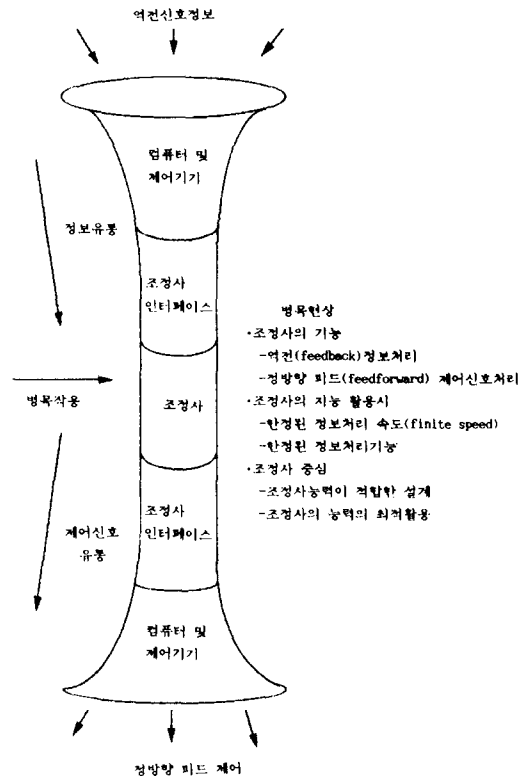


그림 3. 원격 조종사의 병목현상

표 4 원격 제어기 설계 및 제작시 고려사항

기하학 고려사항	작업공간/크기/편이도
	고정형/비 고정형
	자유도수
	만능형/비 만능형
	기하학적 단순도(링크 파라미터)
	기하학적 구조(직렬, 병렬, 혼합)
	링크의 규격표준화(modularity)
제어측면 고려사항	여자유도(redundancy)
	디지털/아날로그
	일방향/양방향/힘방향
	직관적 제어/분해 운동 제어
	위치/속도제어
	위치/힘/혼합제어(제어변수)
	adaptive/non-adaptive 제어
	양방향 대역폭(bandwidth)과 시간지연
	보완기능(compensation capability)
	보조 소프트웨어 활용도
	계산량(computation load)
	작업환경
	안정도
요소측면 고려사항	센서
	구동/전달장치형태
	백래쉬 와 데드밴드(backlash/deadband)
	동마찰/정마찰 크기
	내구성/신뢰도
동적측면 고려사항	말단효과장치에서의 임피던스(impedance)
	균일 유효 관성 분배
	중력상쇄
	강도/컴플라이언스(rigidity/compliance)
조정사 고려사항	조정사 동적 효과(human dynamics)
	위치/반향힘의 분해능(resolution)
	반향힘의 최소, 최대 범위
	이동성 및 소규모/경량성
기타 고려사항	조정사 피로 및 안전
	보수 및 유지의 편이도
	제작 비용

항에 대해 간단히 언급하면, 표 4에서와 같이 원격 제어기의 중량, 규모, 자유자재, 자유도수, 기하학적 형태(직렬, 혼합, 병렬), 기하학적 중속도(주종형, 만능형), 제어방법 및 그에 따른 계측기 설정, 정보전달 방향수(일방향, 양방향), 구동 및 전동 방법, 손잡이 설계, 반향힘의 최대·최소 크기 설정, 자중상쇄, 마찰력 및 구동관성의 최소화, 제작 비용, 활용의 다양성, 이동성 등이 있으며 자세한 것은 참고 문헌을 참고하기 바란다.^(3,4,5)

2.4 원격 조종 시스템의 개발

여러 분야에서 개발된 현존하는 대표적인 원격 조종 시스템에 대해 알아 보기로 한다.⁽⁶⁾ 1948년에 미국 ANL(argonne national laboratory)에서 radioactive한 작업 환경(hot cell)에서의 물체를 원격 제어하기 위하여, Goertz 와 그의 연구팀에 의해 개발된, 기계적으로 연결이 되어진 양방향 주종형(master-slave) 원격 조종 시스템 이후 1958년에는 General Electric은 힘반향과 손가락(articulated fingers)을 갖춘 골격형 원격 제어기에(그림 4) 의해 원격 제어되는 Handyman electro-hydraulic 로봇을 개발하였고, 1970년 중반까지 NASA는 달과 화성에 보내진 흙굴삭기(soil sampler)등과 같은 원격 조종 시스템을 사용

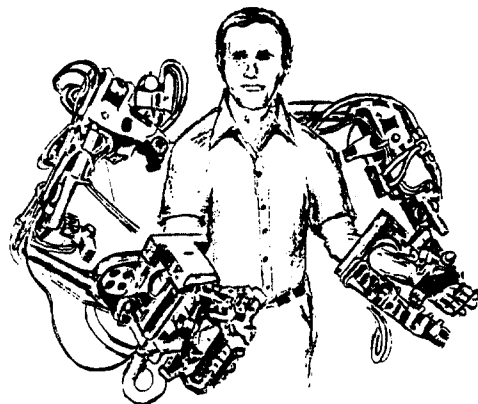


그림 4 Handyman 원격 제어기(GE)⁽²³⁾

하였고 space shuttle의 RMS(remote manipulator system)의 개발에 착수하였다. RMS의 원격제어는 두 3-자유도의 원격 제어기들(직선운동과 회전운동)에 의해서 이루어지고 있다. 이 시스템은 주로 RRC방법으로 사용되고 있으며 비상시 수단(back up mode)으로써 DRC방법이 사용되고 있다. 그러나 주지할 것은 RMS는 본래 7-자유도를 갖춘 시스템이며 현재는 1-자유도를 고정시키고 사용되고 있으며, 현재 NASA에서는 보다 고성능 원격 제어기의 개발을 통해 이로써 구성되는 원격 조종 시스템은 가까운 미래에 설치될 예정인 우주정거장의 조립 및 유지에 활용할 것을 검토하고 있다.

또한, 1970년대 후반기에 Feleoperator System Corporation은 SM-229, 힘반향 주종형 원격 조종 시스템을, 1980년대 초기에 Central Research Laboratory는 Model M2 Maintenance System을, 그리고 ORNL(oak-ridge national laboratory)은 양방향 주종형 ASM(advanced servo-manipulator system)을 개발하여 여러 핵 발전소 및 연구소 등지에서 사용되고 있다.⁽⁶⁾

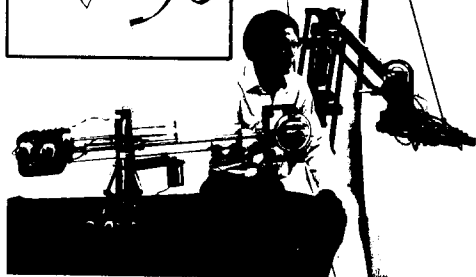
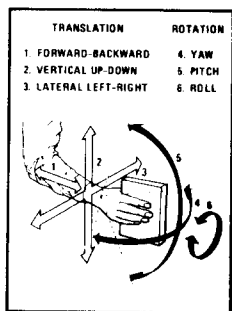


그림 5 만능형 힘반향 원격 조종기(JPL)⁽⁷⁾

그밖에, JPL(jet propulsion laboratory)에서는 1980년에 처음으로 만능형, 힘반향 원격 제어기를(그림 5) 개발하였고 그 특성은 기학적 중력상쇄, 12 "정사각형의 활동범위, 35 oz의 빔반향, 70 oz-in의 토크반향 및 RR-PRRR형태의(R:회전관절, P:미끄럼관절)구조와 경량화를 위해 전달 시스템(transmission system)으로서 케이블을 사용한 것을 들 수 있다.⁽⁷⁾ 1988년에는 텍사스 주립대학(University of Texas at Austin)에서 스트링(string)을 이용한 만능형/힘반향 원격 제어기를 개발하여(그림 6) 산업용 Cincinnati Milacron T3-726 Industrial Robot과 함께 원격 조종 시스템을 구성하였고 1990년에는 이동 가능한 3-자유도 만능형/힘반향 원격 제어기를 개발하여 ORNL에서 HERMIES Mobile System과 7-자유도를 갖춘 CESARM의 원격 제어에 사용되어 핵폐기물 처리 및 핵발전소 보수에 관계된 연구에 활용되고 있다.⁽⁴⁾ 1983년에는 Odetics는 군 경계군무 대체용으로 전선

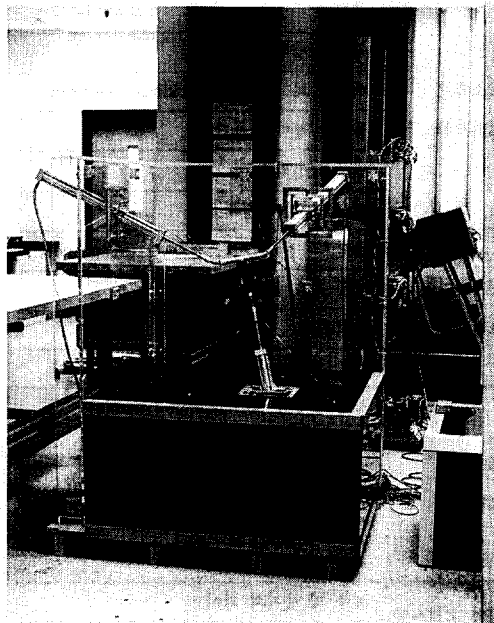


그림 6 9-스트링 만능형/힘반향 원격 제어기⁽⁴⁾

및 신호선이 연결되지 않고 원격 조종이 가능한 Electro-Mechanical Walking Machine 을 개발했는데 이 시스템의 특징은 lift-to-weight 비가 1보다 큰 것이다. (일반 로봇의 경우 1/10 내지 1/100배 정도임)⁽⁶⁾

한편, 서독의 MF3 Manipulator Vehicle, 프랑스의 ME-23 Serve-Manipulator, 일본의 BILARM-83A, 캐나다의 RMS 등이 있고, 이밖에 여러 산업체들이 다양한 상업용 원격 제어기를 개발, 판매하고 있다. (Kraft Telerobotics Inc., Schilling, ISRA Systemtechnik GmbH 등) 이러한 시스템은 광범위한 작업 환경에서 사용이 확대되고 있으며 고성능 원격 조종 시스템의 개발은 생산성 및 효율성의 증대를 위해 더욱 더 요구되고 있는 실정이다.⁽⁶⁾

3. 만능형 원격 조종 시스템의 기구학적 변환

만능형 원격 제어기의 경우 RBPC 등과 같은 다양한 보조 제어방식의 활용으로 그 기능면에서 매우 우수하며 이 시스템의 활용시 원격 로봇과 원격 제어기 사이의 기구학적 상이성을 적절한 변환을 통해서 해결될 수 있으며 이 절에서는 여러 가지 기본적인 기구학적 변환에 관해 논하기로 한다. 네 가지의 변환과 이에 대한 척도변환(scaling)에 대해 소개하고자 한다. 지역변환 대 지역변환(local-to-local), 지역변환 대 지구변환(local-to-global), 지구변환 대 지역변환(global-to-local), 지구변환 대 지구 변환(global-to-global).⁽⁸⁾ 이들에 대한 설명에 앞서 먼저 필요한 용어를 정의하자.

행렬 $[R_A^B]$ 는 계(frame) A에 대한 계 B의 direction cosine을 나타내며, 즉 A의 방위(orientation)을 계 B로 변환시키는 선형 연산자(operator)를 나타낸다. 행렬 $[R_A^B]$ 가 계 A 내의 임의의 벡터 x_A 를 계 B내의 벡터 x_B 로 변환하는 연산자라고 하자.

즉,

$$x_B = [R_A^B] x_A \quad (1)$$

여기서 x_A 와, x_B 는 지구기준좌표계로 표현된 벡터를 나타낸다. 지역계 A의 단위벡터로 x_A 와, x_B 를 표현하면,

$$x_A = [R_O^A] x^{(A)}_A, \quad x_B = [R_O^B] x^{(A)}_B \quad (2)$$

가 된다. 그러므로 위의 관계식을 이용하면 다음 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} x^{(A)}_B &= [R_A^O] x_B = [R_A^O] [R_O^B] x^{(A)}_B \\ &= [R_A^O] [R_O^B] [R_O^A] x^{(A)}_A \\ &= [R_A^B]^{(A)} x^{(A)}_A \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} [R_A^B] &= [R_O^B] [R_O^A], \\ [R_A^B]^{(A)} &= [R_A^O] [R_O^B] [R_O^A] \\ &= [R_A^O] [R_O^B] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $[R_A^B]^{(A)}$ 와 $[R_A^B]$ 는 각각 지역변환 텐서와 지구변환 텐서를 나타낸다.

그림 7에서와 같이, 현재의 원격 제어기의 지역계를 A, 원격 로봇의 지역계를 A'라고 하고 계 0은 지구 기준 좌표계(global reference frame)을 나타낸다고 하자. 그리고 이 계 A와 A'는 언제든지 re-referencing이나 re-orientation에 의해 다시 임의의 점에서 임의의 각도로 정의될 수 있다. 지구기준계의 원점에서부터 계 A와 A', B와 B'를 나타내는 위치벡터들을 r_{OA} 와 $r_{OA'}$ 와 r_{OB} 와 $r_{OB'}$ 로 각각 나

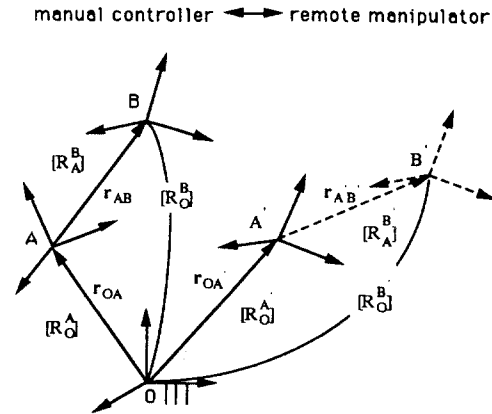


그림 7 원격 조종 시스템의 기구학적 변환

타내자. 지역계 위치벡터, $r^{(A)}_{AB}$ 와 $r^{(A')}_{A'B'}$ 는 각각 계 A에서 계 B까지의 위치벡터와, 계 A'에서 계 B'까지의 위치벡터를 계 A'의 단위 벡터로 나타낸 것이다. 이때 계 B와 계 B'는 원격 제어기와 원격 로봇의 계 A와 A'로부터 변화된 지역계의 상태를 나타낸다.

3.1 지역변환 대 지역변환

지역변환 대 지역변환의 경우에는 다음의 식들이 성립하는 상태를 나타낸다.

$$[R^B_A]^{(A)} = [R^{B'}_{A'}]^{(A)},$$

$$r^{(A)}_{AB} = r^{(A')}_{A'B'}$$

이를 이용하면 원격 제어기의 계 B에 대응되는 원격 로봇의 계 B'는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$[R^{B'}_o] = [R^{A'}_o][R^{B'}_{A'}]^{(A)}$$

$$= [R^{A'}_o]([R^O_A][R^B_o])$$

$$r_{OB'} = r_{OA'} + r_{A'B'} = r_{OA'} + [R^{A'}_o]r^{(A')}_{A'B'}$$

$$= r_{OA'} + [R^{A'}_o][R^O_A]r_{AB} \quad (5)$$

3.2 지역변환 대 지구변환

지역변환 대 지구변환의 경우에는 다음의 식들이 성립하는 상태를 나타낸다.

$$[R^B_A]^{(A)} = [R^{B'}_{A'}],$$

$$r^{(A)}_{AB} = r_{A'B'} \quad (6)$$

이를 이용하면 원격 제어기의 계 B에 대응되는 원격로봇의 계 B'는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$[R^{B'}_o] = ([R^O_A][R^B_o])[R^{A'}_o],$$

$$r_{OB'} = r_{OA'} + r_{A'B'} = r_{OA'} + r^{(A)}_{AB}$$

$$= r_{OA'} + [R^O_A]r_{AB} \quad (7)$$

3.3 지구변환 대 지역변환

지구변환 대 지역변환의 경우에는 다음의 식들이 성립하는 상태를 나타낸다.

$$[R^B_A] = [R^{B'}_{A'}]^{(A)},$$

$$r_{AB} = r^{(A')}_{A'B'} \quad (8)$$

이를 이용하면 원격 제어기의 계 B에 대응되

는 원격로봇의 계 B'는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$[R^{B'}_o] = [R^{A'}_o][R^B_A],$$

$$r_{OB'} = r_{OA'} + r_{A'B'} = r_{OA'} + [R^{A'}_o]r^{(A')}_{A'B'}$$

$$= r_{OA'} + [R^{A'}_o]r_{AB} \quad (9)$$

3.4 지구변환 대 지구변환

지구변환 대 지구변환의 경우에는 다음의 식들이 성립하는 상태를 나타낸다. 즉,

$$[R^B_A] = [R^{B'}_{A'}],$$

$$r_{AB} = r_{A'B'} \quad (10)$$

이를 이용하면 원격 제어기의 계 B에 대응되는 원격로봇의 B'는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$[R^{B'}_o] = [R^B_A][R^{A'}_o],$$

$$r_{OB'} = r_{OA'} + r_{A'B'} = r_{OA'} + r_{AB} \quad (11)$$

3.5 척도 변환

그러면, 척도 변환 (scaling)에 대해서 알아보자^(4,5). 직선운동과 회전운동에 대한 것이 있으며, 그 중 직선운동의 경우에는 원하는 척도 변환 행렬을, $[g_p]$, 표 5, 6에서와 같이 곱함으로써 간단히 해결될 수 있다. 여기서,

$$[g_p] = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \quad (12)$$

이고, a, b 와 c 는 각각 x, y, z 축에 대한 척도

표 5 기구학적 변환 조건

지역변환 대 지역변환	$[R^B_A]^{(A)} = [R^{B'}_{A'}]^{(A)}$ $[g_P] r^{(A)}_{AB} = r^{(A')}_{A'B'}$
지역변환 대 지구변환	$[R^B_A]^{(A)} = [R^{B'}_{A'}]$ $[g_P] r^{(A)}_{AB} = r_{A'B'}$
지구변환 대 지역변환	$[R^B_A] = [R^{B'}_{A'}]^{(A)}$ $[g_P] r_{AB} = r^{(A')}_{A'B'}$
지구변환 대 지구변환	$[R^B_A] = [R^{B'}_{A'}]$ $[g_P] r_{AB} = r_{A'B'}$

표 6 기구학적 변환 및 척도 변환

지역변환-지역변환	$[R^{B'o}] = [R^{A'o}]([R^{O'A}] [R^{O'B}])^*$	$\gamma_{OB'} = \gamma_{OA'} + [R^{A'o}][G_P] \gamma_{AB}$
지역변환-지구변환	$[R^{B'o}] = ([R^{O'A}] [R^{O'B}])^* [R^{A'o}]$	$\gamma_{OB'} = \gamma_{OA'} + [R^{O'A}][G_P] \gamma_{AB}$
지구변환-지역변환	$[R^{B'o}] = [R^{A'o}]([R^{B'A}])^*$	$\gamma_{OB'} = \gamma_{OA'} + [R^{A'o}][G_P] \gamma_{AB}$
지구변환-지구변환	$[R^{B'o}] = [R^{B'A}]^* [R^{A'o}]$	$\gamma_{OB'} = \gamma_{OA'} + [G_P] \gamma_{AB}$

참고, $g_r \neq 1$ 때, $[]^*$ 는 $[\text{Rot}(k, g_r, \phi_{AB})]$ 로 치환.

변환 계수를 나타낸다. 그러나 회전운동의 경우에는 각도변위가 벡터가 아니기 때문에 더 많은 연구가 필요하다. 이 글에서는 한 방법을 소개하기로 한다. 3차원 공간상에서 물체의 방위는 등가축-각도(equivalent axis-angle)로 표현된다는 것을 이용하는 것이다. 즉, 지역좌표계 단위벡터로 표현된 등가축 단위벡터(k)와 그 축에 대한 등가 각도(ϕ_{AB})를 구한 후, 척도 변환 계수(g_r)를 적용하는 방법으로 간단히 원격로봇의 지역제에 대한 현재 상태($[R^{B'A}]$ 혹은 $[R^{B'o}][R^{A'o}]$)를 $[\text{Rot}(k, g_r, \phi_{AB})]$ 로 치환하는 것이다. 표 5, 6은 네 가지 변환에 대한 조건식과 척도변환에 대한 결과식을 나타낸 것이다. 등가 회전축이나 등가 회전 각도를 구하는 방법은 참고문헌을 참고하기 바란다.⁽⁹⁾ 이 밖에도 여러 형태의 척도 변환 방식이 가능하지만 모든 방식의 경우 제어사의 상당한 숙련을 요구하며 RR(re-referencing) 혹은 RO(re-orientation) 등의 보조 소프트웨어의 활용으로 어려움이 다소 경감될 수 있다.

4. 원격 조종 시스템 제어

앞에서 언급한 바와 같이 양방향 원격 조종 시스템은 두 로봇이 서로 제어기(controller)에 의해 전자적으로 연결이 된 시스템을 나타내며 최근 문헌에서 제안되는 제어 방법에 관하여 소개하려고 한다. 1948년 Goertz와 그의 연구팀이 개발한 양방향 제어방식 이후 원격 조종 시스템 제어방식의 발전은 대단히 느리게 이루어져 오고 있다. 1980년에 미국 JPL에서 Bejczy 등에 의해 개발된 6-자유도 만능형/힘

반향 원격 제어기로 구성된 원격 조종 시스템 등이 현재 첨단 원격 조종 시스템으로 여겨지며 현존하는 양방향/힘방향 원격 제어기를 이용한 원격 조종 시스템은 시스템관성, 하중변동, 비선형 마찰(nonlinear friction) 등 여러 동적 거동에 의한 효과를 무시함으로써 전체 시스템의 성능을 향상시키지 못하고 있다. 또 이 때문에 현존 원격 조종 시스템의 이용은 매우 제한되어 있으며 고성능 원격 조종 시스템을 요구하는 경우에도 고성능 구성요소(high-quality components)의 사용의 필요로 인한 원격 조종 시스템 제작비의 증가는 더욱 더 이러한 시스템의 활용 및 개발을 어렵게 했다. 이를 극복하기 위한 노력은 최근문헌에서 많이 보여지고 있으며 간단히 소개하겠다.

4.1 양방향 시스템 모델

두 로봇의 자유도가 각각 n 이라고 할 때, 이러한 원격 조종 시스템의 수학적 모델은 아래와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_M \theta_M + P_M(\theta_M, \dot{\theta}_M) + G_M(\theta_M) &= T_M + T_O \\
 I_S \theta_S + P_S(\theta_S, \dot{\theta}_S) + G_S(\theta_S) &= T_S + T_E
 \end{aligned} \tag{13}$$

여기서 I_M 과 I_S 는 각각 $n \times n$ 인 원격 로봇과 원격 제어기의 관성텐서를 나타내고, P_M 과 P_S 는 각각 $n \times 1$ 인 Coriolis힘과 원심력의 합력을 나타내며, G_M 와 G_S 는 각각 $n \times 1$ 인 중력에 의한 힘을 나타낸다. 그리고 T_M 과 T_S 는 각각 $n \times 1$ 인 구동축의 제어입력을 나타내고, T_O 와 T_E 는 각각 조종사에 의해 가해진 원격제어기의 축에

서 느껴지는 $nx1$ 토크와 원격 로봇과 외부와의 상호작용에 의해 원격 로봇의 축에 가해지는 $nx1$ 외력 토크를 나타낸다. 제어방법에 따라 적절한 형태의 T_M 과 T_S 가 결정되며, 예를 들면 양방향 제어의 경우

$$\begin{aligned} T_M &= -f(\theta_M, \theta_s, \dot{\theta}_M, \dot{\theta}_s), \\ T_S &= f(\theta_M, \theta_s, \dot{\theta}_M, \dot{\theta}_s) \end{aligned} \quad (14)$$

의 형태를, 힘반력 위치 제어의 경우

$$\begin{aligned} T_M &= -T_E, \\ T_S &= g(\theta_M, \theta_s, \dot{\theta}_M, \dot{\theta}_s) \end{aligned} \quad (15)$$

의 형태를 취한다.

이러한 기본적인 모델을 바탕으로 미야자키 등은 조종사의 부재시 원격 조종 시스템이 안정해야 한다는 조건에 대해 Liapunov stability 이론에 근거해서 주종 원격 조종시스템의 양방향 서보방식과 혼합(hybrid) 제어방식을 제안했으며 혼합 제어 방식의 경우 조종사의 입력을 수정하거나 인도할 수 있도록 센서로부터의 정보를 활용하고 있다.⁽¹⁰⁾ 후루타는 원격 조종 시스템이 원격 조종 시스템에 가해지는 조종사의 입력과 원격 로봇에 가해지는 외력을 전체 입력으로 하는 기준 모델(reference model)을 따르도록 하는 Variable Internal Model Following Control Scheme을 제안하고 있다.⁽¹¹⁾ Hirzinger는 힘/토크 센서를 개발, 로봇에 부착하고 조종사가 직접 센서를 잡고 로봇으로부터의 작업 환경과의 상호작용을 직접 느끼고, 이에 적절한 입력힘을 가함으로써 작업을 수행할 수 있는 power extender로서 이용할 것을 제안하였다.⁽¹²⁾ Fong 등은 local processor등을 이용해서 지역적으로(locally) 센서로부터의 정보처리 및 반자동 제어를 수행함으로써 원격 로봇의 운동을 수정하고 또 계산량의 분배 등으로 실시간 제어의 기능을 향상시키고 있다.⁽¹³⁾ 이러한 방법들은 원격 조종 시스템, 조종사, 그리고 작업 환경사이의 동적 상호작용에 관해 제어 모델에서 고려하지 않고 있다.

4.2 Two-Port 모델

양방향 위치 제어방법을 이용하는 원격로봇의 성능 향상을 위해서 Raju 등은 일 자유도 원격 조종 시스템에 대해서 그림 8에서와 같은 two-port 선형모델을 사용하였다.⁽¹⁴⁾ 즉, 원격 조종 시스템이 원격 제어기를 통해서 조종사와, 그리고 원격로봇을 통해서 작업환경과 상호작용이 이루어지는 것을 two-port의 선형 모델화하고 유동변수(flow variable)에 해당하는 속도 변수들을(Ω_o , Ω_E) 비중속 변수로, 작렬 변수(effort variable)에 해당하는 양 port에서의 상호작용 힘 혹은 토크를(T_o , T_E) 종속 변수로 보아 원격 조종 시스템을 다음과 같은 임피던스 행렬로 표현하여 적절한 임피던스를 갖도록 제어법을 구할 것을 제안하였다. 즉,

$$\begin{bmatrix} T_o(s) \\ T_E(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(s) & Z_{12}(s) \\ Z_{21}(s) & Z_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_o(s) \\ \Omega_E(s) \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서 s 는 라플라스(Laplace) 변수를 나타낸다. 이는 조종사는 다양한 작업환경에 대하여 그의 팔의 임피던스를 변화시킴으로써 최적의 성능을 유지한다는 것에 착안한 것이며 조종사와 작업 환경, 원격 조종 시스템과의 최적 임피던스를 유지하도록 하는 제어법의 적용하는 것을 주장하고 있다. Hannaford는 역시 일 자유도원격 조종 시스템의 제어시 위와 같은 선형 two-port 모델에서 원격 로봇과 작업 환경과의 상호작용에 의한 힘(T_E)과 조종사에 의한 원격 제어기에 대한 속도 변위 입력(Ω_o)을 비중속 변수로, 다른 나머지 두 변수들을 종속 변수로 하여 원격 조종 시스템을 다음과 같은 혼합 행렬로 표현하여 제어법을 찾을 것을 제안하였고 이를 바탕으로 실시간에 작업환

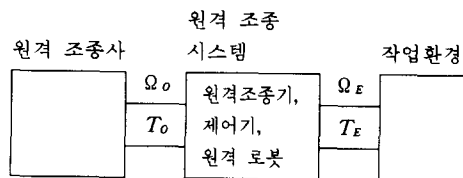


그림 8 원격 조종 시스템의 Two-port 모델

경과 조종사의 임피던스를 측정하여 제어법을 실시간에 변환시키는 양방향-임피던스 제어방법을 제안하였다⁽¹⁵⁾. 즉,

$$\begin{bmatrix} T_o(s) \\ \Omega_E(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_o(s) \\ T_E(s) \end{bmatrix} \quad (17)$$

그러나 이들 방식들은 오프라인(off-line) 최적 임피던스의 설정 혹은 온라인(on-line) 임피던스 측정 등에 어려움이 있으며, 두 방법 모두 단순한 선형 일 자유도 시스템에 대해 제안된 것으로서 실제 다 자유도 시스템에 적용하기 위해서는 보다 더 많은 연구가 선행되어야 한다.

4.3 시간 지연

원격 조종 시스템의 경우 활용 환경에 따라 여러 형태의 시간 지연이 있으며 그 몇 가지는, 두 로봇 시스템사이의 지역적 거리로 인한 정보교환 시간지연, 조종사의 정보인지 및 반응시간, 두 로봇의 동적 반응 시간 및 정보 처리시간 등이 있다. 거리로 인한 대표적인 시간 지연의 예로서는 지상 제어되는 우주 공간에서의 작업과 수면위에서 제어되는 깊은 바다속 작업 등이 있으며 이러한 시간지연은 원격 조종 시스템의 성능에 지대한 영향이 있다. 이러한 원격 조종 시스템에서의 시간지연에 대한 연구는 Sheridan과 Ferrel에 의해 힘반향/양방향 시스템은 0.1 초의 시간지연으로도 불안정성을 나타낸다는 것을 실험에 의해 보인 것을 시작으로 Vertut과 그의 연구진은 안정된 시스템의 반응을 위해서는 시스템 대역폭(bandwidth)의 감소가 필요하다는 것을 보였다.^(16,17) 최근에 Anderson과 Spong은 통신 포트(communication port)의 수동성(passivity)를 유지하도록 하는 제어법을 사용, 거리에 의한 통신시간 지연으로 인한 불안정반응을 제거할 수 있다는 것을 일자유도 힘반향 시스템에 대한 실험을 보여주고 있다.⁽¹⁸⁾ 그러나 시간지연에 대한 해석은 원격 시스템의 구동 시스템의 동적 효과(actuator dynamics), 축과 링크

의 유연성(flexible joint and link), 시스템의 비선형성, 및 시간 지연 해석 그 자체의 난이도 때문에 많은 어려움이 있으며 이에 대한 많은 연구가 필요하다.

이 밖에, 조종사의 만능적인 적응력의 이해 및 원격 조종 시스템의 성능 향상을 위하여 수 많은 노력이 비행 조종사의 모델 등을 통해 이루어져 왔으며 조종사의 모델은 크게 두 가지 방식으로 구분할 수 있다. —알고리즘 모델(algorithmic model)과 구조 모델(structural model). —⁽¹⁹⁾ 알고리즘 모델은 원격 조종 시스템에서 조종사의 기능을 나타내기 위하여 전체 입출력의 거동을 모방할 수 있는 모델을 말하며, 구조모델은 조종사의 기능을 일련의 부시스템(subsystem)의 전달함수(transfer function)로서 표현, 합성하여 나타내는 방법을 말한다. 그러나 만능적인 적응력을 갖춘 조종사의 기능을 모델로서 간단하게 표현하여 원격 조종 시스템에 적용, 이에 적절한 제어법을 개발하는 것은 현재단계로는 매우 어려우며 많은 연구가 선행되어야 한다.

5. 원격 조종 시스템 평가

그러면 원격 조종 시스템의 성능에 대한 평가에 대해 알아보기로 한다.^(2,3,6) 과거에 여러 가지 많은 평가 방식이 제안되었으나 현재까지 산업용 표준은 설정이 되어 있지 않으며 이 중 몇 가지 전형적인 방식은 어떤 지정된 작업에 대해 평균 작업완료 시간을 측정하거나 작업 수행시 범실의 빈번도로서 성능을 평가한다. 가장 대중적인 방식은 시간효과비(time effectiveness ratio)(원격 조종 시스템과 조종사에 의해 직접 소요되는 작업 시간의 비)로써 비교하는 것이며 그 밖에 총 작업 완료시간, 단위 작업완료시간(unit task completion time)(단순 특정작업에 소요되는 작업 완료시간의 비교), 범실률(error success ratio)에 의한 비교 등이 있다. 예로서, 양방향 주종형 원격 조종 시스템을 이용한 작업 완료시간은 직접 조종사에

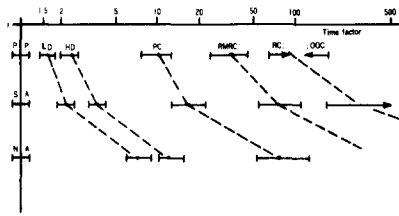


그림 9 원격 조종 시스템의 성능 비교(시간효과비)⁽²⁰⁾

의해 소요되는 작업 완료 시간과 비교할 경우, 8~16배 정도이고, 우주복을 입은 우주인에 의한 작업 완료시간은 8배 정도, DUPC나 DBPC의 경우 60~80배, 스위치 박스의 경우 500배, 스위치 박스로 크레인을 제어할 경우는 무려 500~800배까지의 작업 소요시간이 필요하다. 그림 9는 Vertut에 의해 세 가지 종류의 작업에 대한 실험(PP: 집기와 놓기(pick and place)를 포함하는 위치 이동, SA: 삽입(insert)이나 분리(release)를 포함하는 단순 조립, NA: 삽입과 회전을 포함하는 일반 조립) 결과를 나타낸 것이며, LD는 경량 작업을 위한 양방향 주종형, HD는 중량 작업을 위한 양방향 주종형, PC는 DUPC, RMPC는 RRC, RC는 DRC, OOC는 on-off 제어의 경우에 적용된 원격 조종 시스템을 나타낸다.⁽²⁰⁾

6. 맺음말

이상에서 본 바와 같이 간단하게 원격 조종 시스템에 관한 제반 사항을 고찰하였다. 현존하는 첨단 원격 조종 시스템의 제어방법은 양방향/힘반향 방식이며 시스템의 성능 향상을 위해서 원격 조종 시스템, 조종사, 작업 환경과의 동적 상호작용을 고려한 제어 방식에 대한 연구 및 시간지연 등에 관한 연구가 더 요구되고 있다. 그리고 현재까지 대부분의 원격 조종기의 활용은 고가의 제작경비, 고중량/대규모로 인한 성능 저하 및 이동의 어려움 등으로 인해 대단히 제한되어 있으므로 저가, 경량/소규모 고성능 원격 제어기의 개발이 시급

하다 하겠다. 이를 위해 구조적 설계 및 제어, (21,22) 표준 요소 활용(standard module), 인간-기계 인터페이스 등에 관한 많은 연구가 필요하다. 이러한 고성능의 원격 조종 시스템의 개발은 산업, 우주항공, 바다속 작업, 핵시설 유지, 탄광 작업, 건설 등의 각 분야에서의 활용을 통한 기여 및 작업 효율 증대로 인한 생산성 향상, FMS(flexible manufacturing system) 등에서 지대한 효과를 나타낼 것이며 이를 위해 많은 연구 및 투자가 국내에서도 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Brooks, T. and Bejczy, A., 1985. "Hand Controllers for Teleoperation. A State-of-Art Technology Survey and Evaluation", Pasadena, CA: JPL publication.
- (2) Tesar, D. and Lipkin, H., 1979, "Assessment for the Man-Machine Interface between the Human Operator and the Robotic Manipulator," CIMAR report to DOE and NSF, at the University of Florida, Oct.
- (3) Wayne, J.B., 1985, "Teleoperator Arm Design," chap 9, Handbook of Industrial Robotics, John Wiley and Sons.
- (4) Kim, W.K., 1990, "A Universal Bilateral/Force-Reflecting Manual Controller Design, Control, and Implementation," Ph. D. dissertation, at the University of Texas, at Austin, May.
- (5) Kim, W.K, et al., 1988, "Preliminary Road Map for Teleoperator Control Systems," Internal Report at the University of Texas at Austin, Nov.
- (6) Martin, H.L. and Kuban, D.P., 1985, "Teleoperated Robotics in Hostile Environments," published by Robotics Int'l of SME.
- (7) Bejczy, A.K. and Salisbury Jr. J.K., 1980, "Kinesthetic Coupling between Operator and Remote Manipulator," Int'l Comp. Tech. Conf., ASME, Aug.
- (8) Lipkin, H., Duffy, J. and Tesar, D., 1983, "Kinematic Control of a Robotic Manipulator with a Universal Manual Controller," Master's thesis, at the University of Florida, May.
- (9) Paul, R.P., 1981. "Robot Manipulators", MIT

- Press.
- (10) Myazake, F., et al., 1986, "A New Control Methodology Toward Advanced Tele-operation of Master-Slave Robot Systems," Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, CA, April.
- (11) Fujita, K., Kosuge, K., Shiote, Y. and Hatano, H., 1987, "Master-Slave Manipulator Based on Virtual Internal Model Following Control Concept," Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, NC., March.
- (12) Hirzinger, G., 1983, "Direct Digital Robot Control Using A Force-Torque Sensor," IFAC Real Time Digital Control Applications, Guadalajara, Mexico.
- (13) Fong, C.P., Dotson, R.S. and Bejczy, A.K., 1986, "Distributed Microcomputer Control System for Advanced Tele-operation," Proc. of IEEE Int'l conf. on Robotics and Automation, San Francisco, CA., April.
- (14) Raju, G.J., et al., 1989, Design Issues in 2-Port Network Models of Bilateral Remote Manipulation," Proceedings of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation. Scottsdale, Arizona. May, pp. 1316 ~ 1321.
- (15) Hannaford, B., 1989, "A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback," Journal of IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 4, Aug. pp. 426 ~ 434.
- (16) Sheridan, T.B. and Ferrel, W.R., 1963, "Remote Manipulative Control with Transmission Delay," IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, Sep., pp. 25 ~ 29.
- (17) Vertut, J., et al., 1981, "Short Transmission Delay on a Force-Reflective Bilateral Manipulator," Proc. of 4th Rom-An-Sy, Warsaw.
- (18) Anderson, R. J. and Spong, M.W., 1989, "Asymptotic Stability for Force Reflecting Teleoperators with Time Delay," Proceedings of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, Scottsdale, Arizona, May.
- (19) Mcruer, D., 1980, "Human Dynamics in Man-Machine Systems," Automatica, Vol. 16, pp. 237 ~ 253.
- (20) Vertut, J., 1975, "Experience and Remarks on Manipulator Evaluation," in Sheridan, T.B., Ed., Performance Evaluation of Programmable Robots and Manipulators, U.S. Department of Commerce, NBS SP-459, Oct., pp. 97 ~ 112.
- (21) Kim, W.K. and Tesar, D. 1990, "Study of Structural Design of Force-Reflecting Manual Controllers," ASME Mechanism conf. Chicago, IL. Sep.
- (22) Kim, W.K., Beville, P. and Tesar, D. 1990. "Implementation and Control of a 3-Degree-of-Freedom Force-Reflecting Manual Controller," SPIE Symp. on Advances in Intelligent Systems, Boston, MA. Nov.
- (23) Mosher, R.S. and Wendel B., 1960, "Replecting Electro-Hydraulic. Servo-Manipulator," Electronic-Technology, Des. 