

로봇 원격조종을 위한 멀티 햅틱 제어 환경 개발

최유락[†], 이재철^{**}, 김재희^{***}, 김승호^{****}, 권오석^{*****}

요 약

로봇 원격조종 방법은 1:1, 1:N, N:1, 그리고 N:N의 다양한 방법이 있다. 오퍼레이터가 원격지 로봇을 제어하기 위해서는 로봇의 주변 상황, 모바일 장치의 충돌 가능성, 그리고 매니퓰레이터의 힘을 인지할 수 있어야 한다. 원격조종에서는 데이터 통신과 처리에 소요되는 시간에 따른 지연이 발생하는데, 이 시간 지연은 로봇의 충돌과 햅틱 기반 제어에 있어 양방향 힘 반응에 따른 매니퓰레이터의 바이브레이션과 과도한 힘 반응을 초래할 수 있다. N:N 제어 방식은 근래 개발 중인 조종 기술로 멀티 오퍼레이터가 멀티 로봇을 스위칭하면서 제어하는 구조를 가진다. 이 구조를 구현하기 위해서는 오퍼레이터가 어떤 로봇을 제어할 것인지, 또는 그 로봇의 어떤 장치를 제어할 것인지에 대한 스위칭 기능이 필요하며, 다수의 오퍼레이터가 함께 원격조종을 수행할 때에는 이 스위칭 알고리즘이 반드시 필요하다. 또한 오퍼레이터의 성향에 따라 조종 성향이 달라지므로 이를 일반화하기 위한 방안도 요구된다. 본 논문에서는 다수의 로봇과 다수의 오퍼레이터가 원격으로 로봇들을 제어하여 작업을 수행할 수 있는 햅틱 기반 제어 환경을 구축하는 방안과 구현에 대하여 기술한다.

Development of Multi Haptic Control Environments for Tele-operating Robot System

You-Rak Choi[†], Jae-Cheol Lee^{**}, Jae-Hee Kim^{***},
Seung-Ho Kim^{****}, Oh-Seok Kwon^{*****}

ABSTRACT

There are four methods such as 1:1, 1:N, N:1, and N:N in the tele-operating system for control the remote side robot. The operator must know the information of surroundings of the robot, collision possibility of the mobil equipment, and force feedback of the manipulator. The time delay problem occurs in the tele-operating and it causes vibration and expressive power of the manipulator owing to bi-directional force feedback. N:N control technique having been developed lately has a switching algorithm for the operator to select the target robot or it's partial equipment. When multi-operators work together to accomplish a task with multi-robots, the switching facility must be offered. And the automatic tuning skill to generalize the operator's tendency is needed also. We describes the methodologies and skills for developing a haptic-based tele-operating environments to makes it possible to control the remote multi-robots with multi-operators in this paper.

Key words: Tele-operating(원격조종), Haptic Control(햅틱 제어), Robot(로봇)

※ 교신저자(Corresponding Author) : 권오석, 주소 : 대전 유성구 대학로 99 충남대학교, 전화 : 042) 821-6654, FAX : 042) 822-4997, E-mail : oskwon@cnu.kr

접수일 : 2013년 1월 18일, 수정일 : 2013년 3월 7일

완료일 : 2013년 4월 1일

[†] 정회원, 한국원자력연구원(E-mail : yrchoi@kaeri.re.kr)

^{**} 정회원, 한국원자력연구원(E-mail : jclec2@kaeri.re.kr)

^{***} 준회원, 한국원자력연구원

(E-mail : jaehkim@kaeri.re.kr)

^{****} 준회원, 한국원자력연구원

(E-mail : ROBOTkim@kaeri.re.kr)

^{*****} 준회원, 충남대학교 컴퓨터공학과

※ 본 연구는 원자력연구개발사업과 지식경제 기술혁신사업 지원으로 수행된 연구결과임.

1. 서 론

원격조종 로봇 시스템(Tele-operating Robot System)은 원격지 로봇을 조종하면서 특정 작업을 수행하는 시스템을 의미하며, 작업의 형태에 따라 오퍼레이터와 로봇 구성비가 1-to-1, N-to-1, 1-to-N, 그리고 N-to-N의 다양한 형태로 나타날 수 있다[1,2].

현재의 원격조종 로봇은 주로 1-to-1 형태의 이동 위주이며, 인간의 개입 없이 원격에서 복잡한 작업을 수행하기에는 아직은 기술수준이 낮다. 로봇의 자유도가 부족으로 인해 복잡하고 정교한 작업 수행이 매우 어려우며 다양한 작업에 대한 유연한 대응이 불가능하다. 또한 로봇으로부터 전달받을 수 있는 정보가 제한되어 있어 원격지 로봇의 현재 작업 상태에 대한 오퍼레이터의 인지가 떨어지기 때문에 숙련된 오퍼레이터만이 원격 작업을 원활히 수행할 수 있으며, 제어에 필요한 데이터들의 전송에 따른 시간 지연에 의한 불안정성 및 혼동을 일으키는 요소가 존재하여 원격작업의 신뢰도가 높지 못한 상황이다.

본 논문에서는 Drill-Ship 재난구조용 원격조종 로봇을 개발하면서 이러한 한계를 극복하기 위해 다수 조종자가 원격지에 있는 다수 로봇을 조종할 뿐만 아니라 협조·협업하면서 작업을 수행할 수 있는 햅틱 기반 N-to-N 원격조종 환경 개발에 관하여 기술한다[3].

2. 원격 작업용 로봇 시스템 개발 동향

최근 개발이 용이한 지역에서의 대형유전 자원이

고갈되어감에 따라, 석유와 천연가스를 비롯한 각종 천연자원의 개발 영역을 심해, 북극해 등 극한 환경과 경제성이 낮은 중소형 유전으로 확대시키려는 시도가 증대하고 있다. 또한 풍력, 태양광 발전과 신재생 에너지 개발을 위한 설비들도 입지선정의 어려움을 피하고, 안정적인 발전 경제성을 감안하여 주로 해상에 설치되고 있는 추세이다. 이러한 해상 플랜트가 점점 더 육지에서 멀어지면서, 운영 및 보수(O&M) 인력을 위한 거주구 설치/유지비용이 커짐에 따라 이러한 경제성 문제로 여러 중소형 유전을 동시에 설치하고 O&M하는데 어려움이 증대되고 있다.

최근에는 원격 O&M 로봇 시스템 개발을 통해, 인접한 여러 중소형 해상 플랜트에 각각의 원격 O&M 로봇을 설치한 후, 한 곳으로 연결되어 통합된 마스터 운전실에서 O&M하는 방식을 추진하고 있는데 특히, Statoil Hydro., Shell 같은 오일 메이저 회사들이 적극적으로 기술 개발에 나서고 있는 추세이다. Statoil사, ABB robotics, IBM, SKF, Aker Kvaerner 로 구성된, TAIL IO technology 컨소시엄 프로젝트는 손실률 절감을 통한 생산률 5% 향상, O&M 비용 30% 이상 절감, 안전 향상, 그리고 유전의 운영 기간 연장을 목표로 2006년부터 원격 모니터링 O&M 로봇 시스템을 개발 중에 있다. Northrop, Fraunhofer, CMU 등도 비슷한 개념의 시스템을 개발하고 있다.

3. 로봇 원격 제어

로봇 원격 제어는 오퍼레이터 및 로봇의 수에 따라 다양한 제어 형태로 구성되는데, 로봇 원격 제어

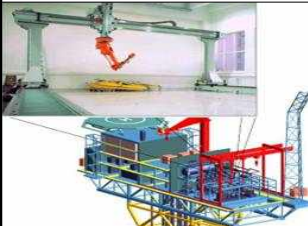
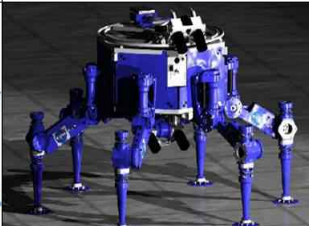


Statoil Hydro	Northrop	Fraunhofer	CMU
<ul style="list-style-type: none"> ○ 인간운영으로 효율이 낮은 중소 필드에서 사용 ○ 원격지에서 자율 충돌 감지 ○ 방폭, 극한 환경에서 강인 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 우주에서의 작업 ○ 우주인 시간 절약 및 우주선 중량 감소 목적 ○ 정전기방식 그리퍼가 특징 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 폭발 위험 및 독극물 환경에서 구동 ○ 미끄러운 곳에서의 이동 ○ 계측, 음향, 가스 등 유지보수 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 사다리, 계단 이동 ○ Gas 감지, 파이프/밸브/피팅의 녹/파손 시각/온도/무접촉 진동 감지
			

그림 1. 개발 중인 원격조작용 로봇

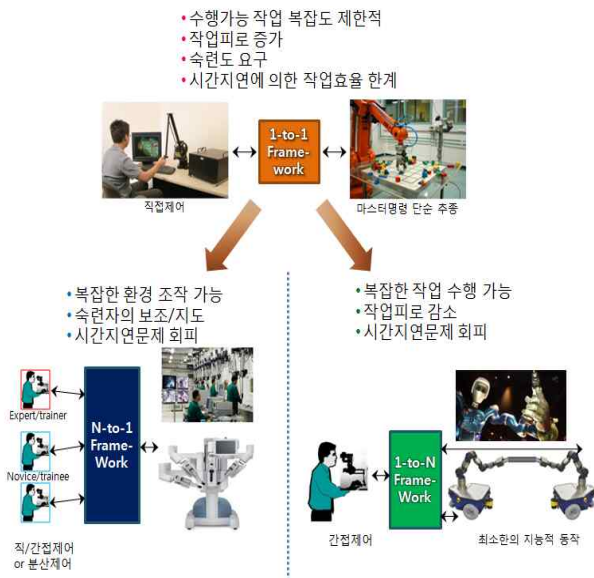


그림 2. 1-to-1 원격조종에서의 문제점 및 해결 방안

분야에서는 로봇의 작업감 인지 문제, 시간 지연에 따른 로봇 제어의 어려움, 그리고 협업을 위한 멀티 로봇 제어 구현 등과 같은 다양한 현안들이 항상 대두된다[4,5]. 로봇의 작업감 인지 문제는 햅틱 기술과 음향 및 영상 같은 멀티미디어 기술로 극복이 가능하다고는 하나, 데이터 송수신에 따른 시간 지연에 있어 햅틱 기술은 자유롭지 못하다.

본 논문에서는 다양한 제어 방식에 대해 설명하고 각 제어 방식의 문제점들과 해결을 위한 방안을 기술한다.

3.1 1-to-1 Shared 방식

오퍼레이터 한명이 원격지 로봇 1대를 제어하는 방식으로 오퍼레이터가 로봇의 모든 동작명령을 전달한다. 수행할 작업의 복잡도에 제약이 많고, 작업자의 피로도 증가 문제가 발생하며, 오퍼레이터에게 높은 숙련도를 요구하며, 시간지연이 존재하는 경우에는 실질적인 제어가 어려운 문제가 발생한다.

Shared Tele-robot Control 방법을 적용할 경우 조종자는 대략적인 명령만을 내려주고 로봇이 나머지 부분을 알아서 추종하는 방식을 채택하게 된다.

원전에서 건드려서는 안 되는 여러 장애물 사이에 있는 밸브를 조여주어야 하는 작업의 경우, 작업자는 여러 장애물들을 피하기 위한 로봇 조종이 필요 없이 로봇에게 가야 하는 방향만을 지시해 주면 로봇의 장애물 회피 알고리즘에 의하여 로봇의 end-effector

를 원하는 위치까지 움직여 작업을 수행하게 되는데 이러한 방식이 1-to-1 Shared 이다.

3.2 N-to-1 방식

오퍼레이터 N명이 원격지 로봇 1대를 제어하는 방식으로 다수 작업자가 1대의 로봇을 협업-제어하게 되면(로봇의 자유도를 분리하여 작업자가 조종하게 한다면), 작업자의 작업부담과 실수할 확률이 낮아져 효율적인 작업이 가능하다. 1대의 로봇만을 사용하기 때문에 로봇 자체를 분리하여 복잡한 작업 수행을 위한 원활한 제어를 수행할 수는 있지만, 한대의 로봇이 수행할 수 있는 작업으로 한정되는 단점이 있다.

3.3 1-to-N 방식

오퍼레이터 1명이 원격지 로봇 N대를 제어하는 방식으로 1대의 로봇이 원격지에서 단독으로 작업을 수행할 때 발생하는 한계를 극복할 수 있다. 크기가 크고 무거운 물체를 들어 옮기는 경우 또는 밸브 개폐 시 로봇 1대로는 힘이 부족한 경우, 다수 로봇 간의 협업이 필요하다. 이때 작업자가 원격에서 다수의 로봇을 1대1로 조종할 수도 있지만, 시간지연이 존재하면 원격조종을 통한 로봇 간 협업은 사실상 어렵다.

3.4 N-to-N 방식

본 논문에서 제안하는 방식으로 여러 명의 오퍼레이터가 여러 대의 로봇을 조종할 수 있는 원격조종 방식으로 본 논문에서는 이 기술의 개발을 위한 필요 기술로 N:N 대응 원격조종용 서비스 엔진 기술, N:N 원격 조종용 마스터 인터페이스 기술, 그리고 원격 작업용 슬레이브 로봇 시스템 기술을 정의한다.

(1) N:N 대응 원격조종용 서비스엔진 기술

- 여러 명의 조작자가 여러 대의 로봇을 조작할 수 있는 운용 시스템으로서 마스터 인터페이스 기술과 슬레이브 시스템 기술, 그리고 시스템 통합기술이 모두 필요하다.

- 원거리에 있는 슬레이브 시스템과 마스터 인터페이스 사이에서 발생하는 통신 시간 지연을 보상할 수 있는 기술, 여러 명의 작업자가 여러 대의 로봇을

협업·협조할 수 있는 기술, 그리고 원격지 물리적 작업 환경 고려 및 작업 지향적인 운용이 가능한 서비스엔진 기술이 포함된다.

- (2) N:N 원격 조종용 마스터 인터페이스 기술
 - 원격지의 물리적인 현실감(영상, 음향, 힘, 마찰력 등)을 느끼면서 조작자가 원격지에 있는 로봇을 조종할 수 있는 인터페이스 기술이 필요하다.
 - 여러 명의 조작자가 여러 대의 로봇을 조종할 수 있는 시스템 구축기술, 자율 동작과 원격조작 간 전환 기술, 그리고 원격지 작업환경 및 작업특성을 고려한 작업 효율성 극대화 위한 기술이 포함된다.

- (3) 원격 작업용 슬레이브 로봇 시스템 기술
 - N:N 원격조종 시스템에 필요한 원격작업용 슬레이브 시스템 구현 및 이의 적용 대상으로써 원격지에 있는 시설물에 대한 다양한 감시·유지·보수 작업을 수행하는 기술이 필요하다.
 - N:N 원격 조작 대응 제어 기술, 자율 동작과 원격조작 간 전환 기술, N:N 원격 조작 대응 멀티 로봇 위치·힘 협업 제어 기술이 포함된다.

4. N-to-N 원격조종 환경 개발

본 논문에서는 N-to-N 원격조종용 햅틱 제어 환경 구축에서 로봇의 작업감 인지 문제, 시간 지연에 따른 로봇 제어의 어려움, 그리고 협업을 위한 멀티

로봇 제어 구현 문제 등을 해결하기 위한 원격조종 시스템 구현 방안을 기술한다.

4.1 N-to-N 원격조종 시스템 구성

본 논문에서 제안하고 있는 N-to-N 제어 방식은 다수의 마스터 제어기, 다수의 슬레이브 로봇, 그리고 마스터 제어기와 슬레이브 로봇 중간에 슬레이브 로봇의 제어의 원활한 수행을 위한 MC(Master Coordinator)와 SC(Slave Coordinator)로 구성되어 있다.

MC는 마스터 제어기와 슬레이브 로봇들의 제어 매칭을 위한 스위칭과 운동량의 스케일링, 그리고 시나리오 기반 작업 수행을 위한 알고리즘들을 포함한다. SC는 오퍼레이터의 조종 성향에 따라 작업 명령에 대한 자동 튜닝 기능을 제공함으로써 슬레이브 로봇의 제어를 원활하게 수행할 수 있는 기능과, 슬레이브 로봇에게 필요한 자율 작업 기능들을 수행할 수 있는 알고리즘들을 제공한다.

본 모델에서 제어를 위한 데이터 전송은 OPRoS (Open Platform for Robot Services)에서 제공하는 RVAP(Remote Variable Access Protocol)의 UDP를 사용하고 있다. 슬레이브 로봇 제어 명령은 다양한 주기(2ms, 4ms, 20ms, 100ms)로 전송만 수행하며 통신에 따른 시간지연을 줄이기 위해 전송 데이터에 대한 수신 확인은 하지 않는다. 이는 마스터 장치의 증가에 따른 로봇 구동을 위한 제어 명령의 대폭적인

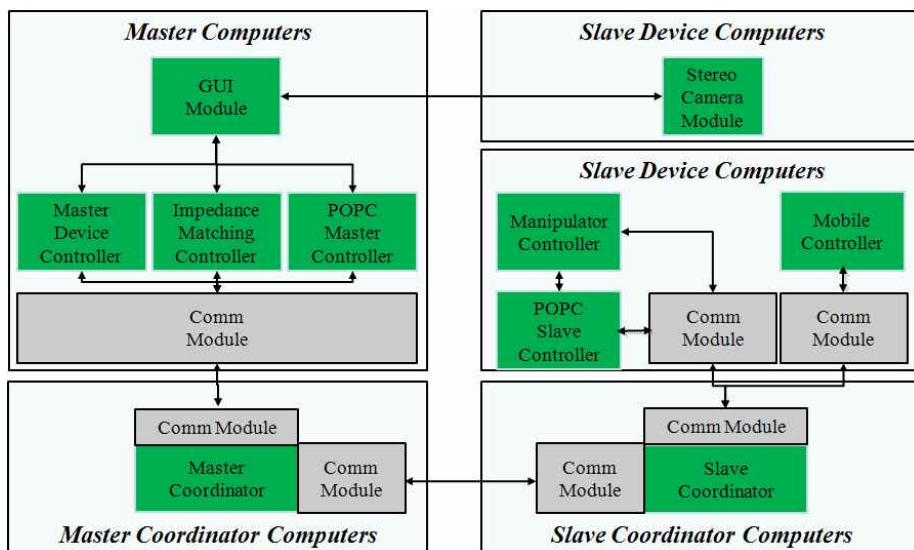


그림 3. N-to-N 원격조종 시스템 다이어그램

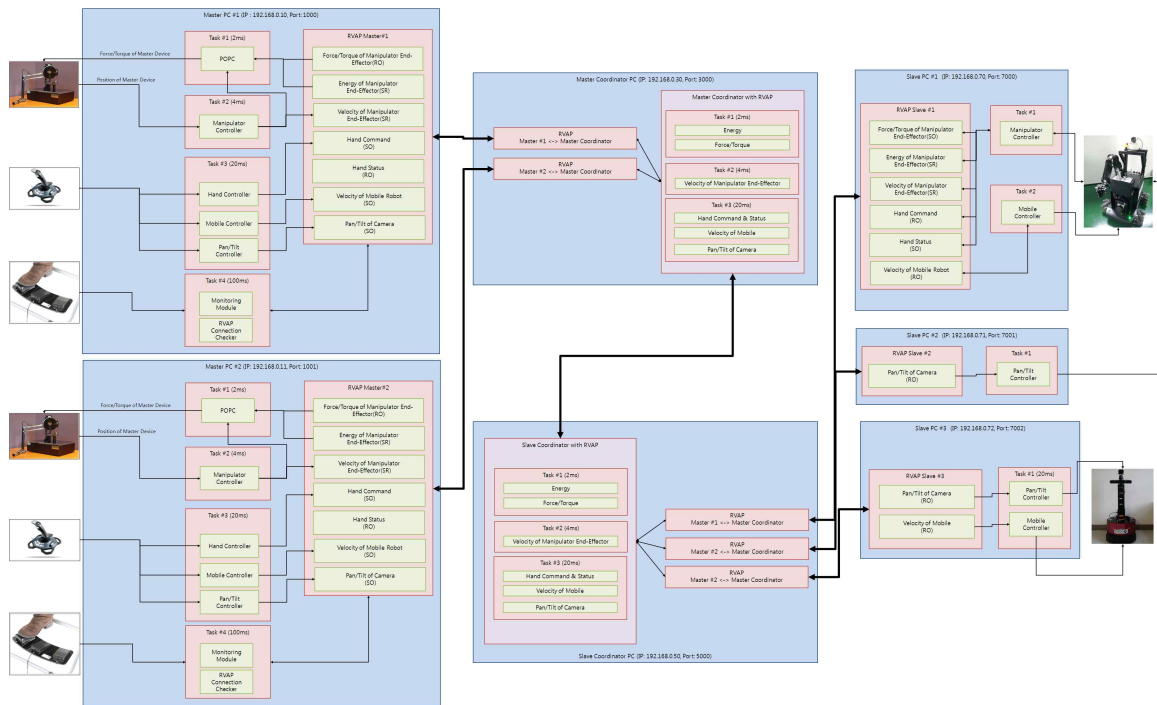


그림 4. N-to-N 원격조종 시스템 다이어그램

증가에 따른 통신시간 지연을 줄이고자 함이나, 매우 빠른 주기로 데이터가 전송되고 이에 따라 로봇의 기계부가 구동되는 형태이므로 데이터의 일부 손실에 대해서는 충분한 감내가 가능하다. 그러나 스위칭 명령과 같이 작업 형태의 변화가 발생하여 시스템 간 상호 약속이 필요한 명령어들은 전송 데이터에 대한 수신 확인을 수행한다.

4.2 시스템 세부 구현

다음의 그림은 그림 3에 표현된 모듈을 기능을 위주로 세부 기능별로 블록화하여 표현한 시스템 다이어그램이다. 현재 개발 중인 원격조종 시스템은 2대의 마스터 장비와 2대의 슬레이브 로봇으로 구성되어 있는데 확장이 가능하다. 마스터 장비와 슬레이브 로봇 사이에는 MC와 SC가 탑재된다. 각각의 모듈에는 RVAP 모듈이 탑재되어 있으며, 이 모듈은 Server인 동시에 Client로서의 역할을 수행한다.

(1) 마스터 인터페이스 구현

- 마스터 장치는 슬레이브 로봇 매니플레이터 제어용 햅틱 마스터 제어기(Phantom 1.5 HF 6DOF), 슬레이브 로봇의 모바일 장비·그리퍼·카메라 팬-틸트 제어를 위한 햅틱 조이스틱(Flight System G940),

그리고 제어 스위칭을 위한 버튼과 페달로 구성되어 있다.

- 마스터 제어기는 힘반영제어 기능을 갖추고 있는데, 슬레이브 로봇 매니플레이터의 힘반영 모듈과의 관계에서 시간지연에 따른 바이브레이션과 같은 불안정성을 완화하기 위하여 TDPA 알고리즘을 탑재하고 있다[5,6]. 이 알고리즘은 마스터 제어기의 이동 위치 정보를 이용하여 데이터 전송 시간지연에 따른 힘 에너지의 증가량을 일정하게 가감해주는 방식으로 안정성을 높여준다[7]. 슬레이브 로봇 매니플레이터에 대한 힘반영제어는 2ms 주기의 통신으로 수행하며, 슬레이브 로봇의 매니플레이터 모션 제어를 위한 명령은 4ms 주기로 수행된다. 조이스틱은 슬레이브 로봇의 모바일 장비·그리퍼·카메라 팬-틸트 제어를 20ms 주기로 수행하는데, 조이스틱 메인 핸들은 슬레이브 로봇이 탑재된 모바일 장치에 부착된 초음파 센서를 이용하여 거리 데이터를 햅틱으로 반영 받아 충돌회피를 위한 기능을 제공한다. 버튼과 페달은 제어 대상 변경과 카메라 영상 디스플레이 변경 같은 스위칭 작동에 활용되며, 100ms 주기로 상태 변경을 체크한다. 이 100ms 주기의 인터럽트에서는 RVAP 연결 확인 및 재연결과 마스터 코디네이터로부터 전송 받는 데이터의 화면 디스플레이 처리

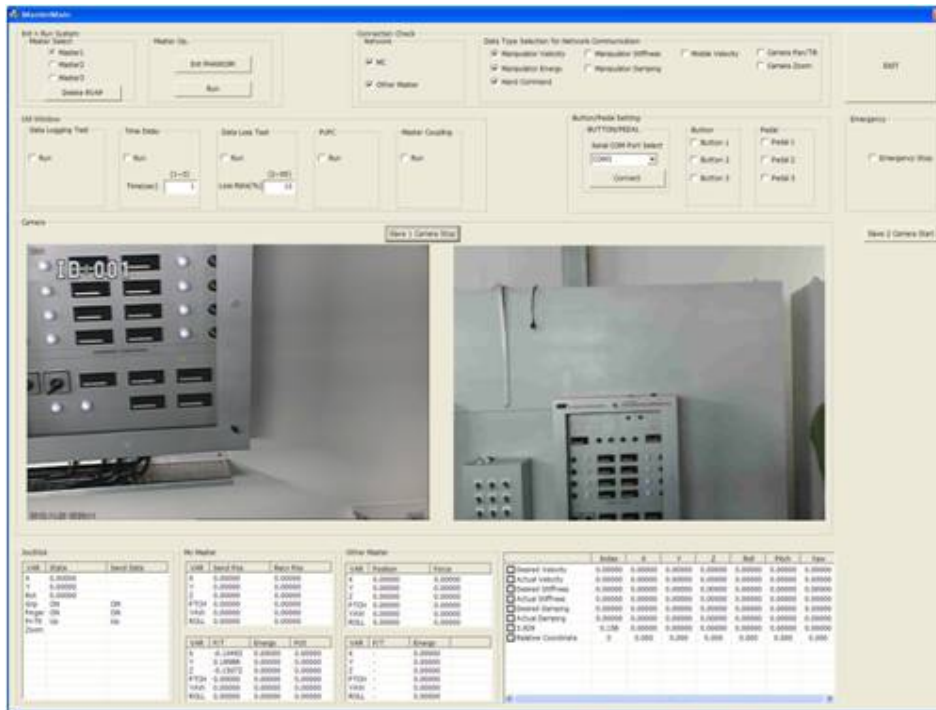


그림 5. 마스터 인터페이스 GUI 화면

를 수행한다. 현재 개발 중인 시스템에서 슬레이브 로봇 두 대에는 각각 1대와 2대의 카메라가 장착되어 있으며, 마스터 인터페이스에서는 3개의 카메라를 선택하여 디스플레이할 수 있도록 구현하였다. 마스터 인터페이스에서 발생하는 모든 데이터는 RVAP 모듈을 통해 마스터 코디네이터로 전송 된다.

- 제어 주기를 위한 인터럽트로는 Phantom 1.5 HF 6DOF의 하드웨어 인터럽트(2ms 주기)와 멀티미디어 타이머를 이용한 소프트웨어 인터럽트(4ms, 20ms, 100ms 주기)를 사용하는데, 소프트웨어 인터럽트의 Jitter는 ±1.5ms 이내로 구현되었다.

- 마스터 인터페이스에서는 통신 지연 발생과 전송데이터 손실을 수행할 수 있는 알고리즘을 탑재하여 Local Network에서 원격조종 시스템을 실험할 때 Internet에서 실험을 수행할 때와 유사한 시간지연과 전송 데이터 손실 환경을 임의로 제공할 수 있다.

(2) MC 구현

- 본 논문에서 제안하고 있는 방식은 다수의 원격지 슬레이브 로봇을 제어하기 위해 다수의 원격제어기를 갖춘 시스템으로 이 구조는 N-to-N 제어 방식으로 1-to-1, N-to-1, 1-to-N 방식을 모두 제공할 수 있다. 이렇게 다양한 제어 방식을 제공하기 위해

서는 마스터 장치가 제어하는 슬레이브 로봇 또는 슬레이브 로봇에 장착된 장치 선택을 자유롭게 스위칭 할 수 있는 기능이 필요하다. 마스터 장치에서는 항상 정해진 단위의 운동량을 슬레이브 로봇으로 전달하는데 슬레이브 로봇의 구조에 따라 로봇의 구동 스케일이 다를 수 있으므로 이에 대한 스케일링 기능도 제공한다. 시나리오 기반 작업을 수행할 때에는 작업의 진행 상황에 따라 작업 모드를 변환해 주는 기능도 필요한데, 이러한 기능들은 MC에서 담당한다. 또한 시나리오 기반 작업 수행을 위한 알고리즘을 제공하여 정해진 작업을 순차적으로 진행할 수 있는 기능을 제공하고 있다.

(3) SC 구현

- SC는 1-to-N 기반 멀티 로봇 자율동작과 원격조작 간 전환 알고리즘과 햅틱 및 사용자 변경에 따른 매개변수 Automatic Tuning 알고리즘을 제공함으로써 협력기반 원격조종 인터페이스를 제공한다 [8].

- 1-to-N 기반 멀티 로봇 자율동작과 원격조작 간 전환 알고리즘은 밸브를 돌리기 위해 A와 B 두 대의 로봇이 서로 협업할 때 A 로봇을 원격 제어함에 있어 B 로봇이 A 로봇의 동작을 추종하여 밸브를

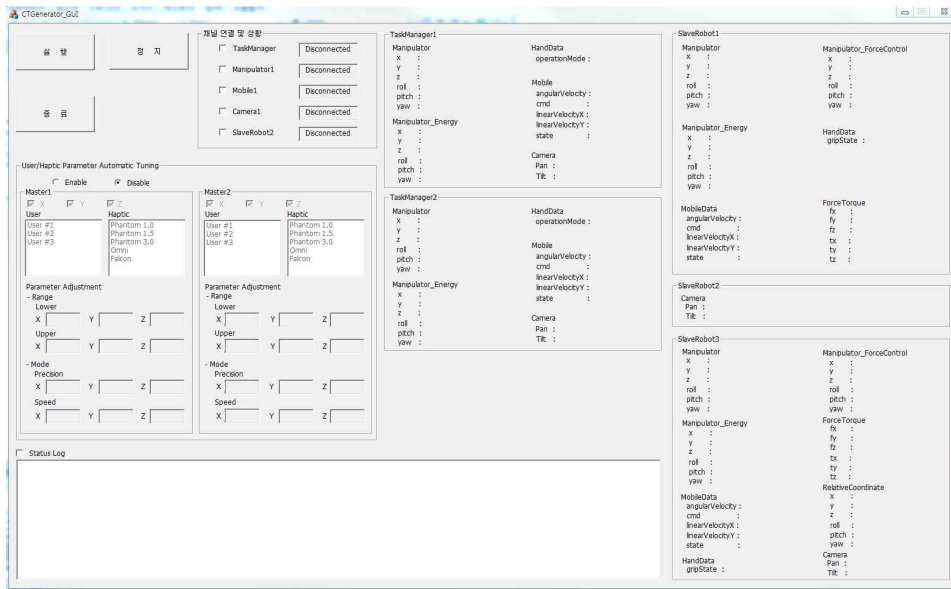


그림 6. MC GUI 화면

돌리게 함으로써 한 대의 로봇 조종으로 두 대의 로봇이 협업할 수 있는 환경을 제공한다[9].

- 햅틱 및 사용자 변경에 따른 매개변수 Automatic Tuning 알고리즘은 마스터 제어기를 사용하는 오퍼레이터가 변경될 때 오퍼레이터의 제어 성향 데이터를 이용하여 로봇 제어를 원활하게 수행할 수 있도록 이동 위치와 힘과 같은 운동량을 오퍼레이터에 적합하게 변환해 주는 환경을 제공한다.

- 이 모듈은 로봇의 제어에 있어 로봇의 자율성을 제공하기 위한 알고리즘들을 제공하는데, 슬레이브

로봇 시스템에서 제공하는 로봇 자율성과는 차이가 있다. 슬레이브 로봇 시스템에서는 모바일 로봇의 이동 시 충돌 방지를 위한 거리감을 이용한 충돌방지 모드나 매니플레이터 동작 범위를 벗어나는 것에 대한 체크와 같은 로봇 시스템의 안전성에 대한 자율성을 제공하는 반면 SC에서는 로봇의 작업에 대한 자율성을 제공한다.

- MC와 SC는 각각 다른 컴퓨터에서 그 기능을 수행하는 방식으로 구현되어 있는데, 이들 간의 통신에 따른 데이터 전송 지연을 없애기 위해 서로 통합



그림 7. 슬레이브 로봇 시스템

하는 연구가 진행되고 있다.

(4) 슬레이브 시스템 구현

- 본 논문에서 제안하는 시스템은 모바일 형태의 슬레이브 로봇을 적용하는 모델로, 슬레이브 로봇에는 매니플레이터, 카메라, 그리고 모바일 장비 등이 탑재될 수 있다. 힘반영제어(Force Feed-back Control) 기반의 매니플레이터를 장착한 슬레이브의 경우 매니플레이터의 안정적인 동작을 위하여 시간지연에 따른 매니플레이터의 바이브레이션을 막아줄 수 있는 TDPA(Time Domain Passivity Control Approach)가 POPC Slave Controller에 탑재되어 있는데, 이와 상응하는 기능이 마스터 인터페이스에도 탑재되어 있다. 카메라의 경우 상황에 따라 여러 대의 카메라를 사용할 수 있도록 구성하였는데, 이는 원격조종 시 여러 대의 카메라로 작업 환경을 감독하면서 제어를 수행하는 것이 제어 효율성을 높여주기 때문이다. 특히 소형 버튼을 누르는 작업을 N-to-1 방식으로 수행할 때 버튼 누르기 작업을 수행하는 매니플레이터의 그리퍼와 주변 화면을 정면과 측면에서 보면서 xz축 방향과 y축 방향의 움직임을 각각 분리하여 제어하면 작업 효율을 높일 수 있다. 물론 이때에는 최소한 카메라를 탑재한 매니플레이터를 장착한 모바일 로봇 한 대와 카메라 영상을 전송해줄 수 있는 모바일 로봇 한 대가 필요하므로 정확히 언급하자면 N-to-N 작업이 되나 실제 작업 수행 중에는 여러 모드가 혼재하게 된다.

- 그림 7의 왼쪽 로봇은 캐스터형 모바일 장치를 이용한 카메라 영상 제공용 로봇이며, 오른쪽은 옴니휠 모바일 장치 위에 휴보 매니플레이터와 카메라를 탑재한 작업용 로봇이다. 이 로봇들은 모바일 장치를 갖추고 있는데, 모바일 장치 측면에는 다수의 초음파 센서가 부착되어 있어 장애물과의 충돌을 회피하기 위한 기능으로 사용된다[10]. 향후 타 기종의 작업용

표 1. 실험 시 주요 처리 시간 지연 조건

순수 네트워크 통신 시간 (마스터 인터페이스→MC→SC→슬레이브 로봇)	6ms
슬레이브 로봇 컴퓨팅 시간	2ms
마스터 제어기 제어 명령 전송 주기	4ms
TDPA용 데이터 전송 주기	2ms
기타 타 모듈의 데이터 처리 시간	4ms 이내

로봇이 추가될 예정이며, 다양한 협업이 가능한 환경을 구현할 예정이다.

5. 제안 방식의 고찰

로봇 원격 조종 환경 구현 연구에 있어 가장 이슈가 되었던 사안들은 제어 데이터 전송 지연과 손실에 따른 로봇의 불안정성과 제어의 어려움 극복, 로봇 협업을 원활하게 수행하기 위한 방안, 로봇의 현재 상황에 대한 오퍼레이터의 인지, 그리고 N:N 제어 기술의 효용성 등이었다.

이러한 문제들에 대한 실험 검증을 위하여 두 대의 마스터 환경과 두 대의 슬레이브 로봇(두 대의 카메라와 작업용 매니플레이터를 장착한 옴니휠 방식의 모바일 로봇 A와 한 대의 카메라를 장착한 캐스터 방식의 모바일 로봇 B)을 이용하여 팬널에 장착된 스파이크 형태의 작은 버튼을 ON/OFF 시키는 실험을 개발된 시스템을 전혀 사용한 적이 없는 오퍼레이터 20쌍을 동원하여 수행하였다. 두 대의 마스터는 각각의 로봇 구동을 제어하거나 작업용 로봇의 매니플레이터를 함께 제어하는 방식을 취하였다.

5.1 제어 데이터 전송 지연과 손실 문제

로봇을 원격 제어함에 있어 오퍼레이터가 제어 명령을 로봇에게 전송하고, 명령이 로봇에 전달되어 작업이 수행되고, 이 상황 데이터들이 원격지 오퍼레이터에게 전해지는 흐름에서 현재 오퍼레이터의 명령과 로봇의 구동에는 시간차이가 발생하게 된다. 오퍼레이터가 마스터 제어를 이용하여 일정 구간 로봇 구동을 명령하였음에도 로봇은 제어 데이터 전송 시간 지연에 따라 시간차를 두고 구동하기 때문에 오퍼레이터는 추가 구동 명령을 수행하는 경우가 많으나, 이 경우 자칫 로봇은 작업 대상에 충돌하거나 과도한 힘을 주는 경우가 발생하게 된다. 로봇 매니플레이터에 대한 과도한 힘의 전달에 대한 헵틱을 일정 시간차 후 오퍼레이터가 인지하였을 경우 오퍼레이터는 힘의 가감을 위해 액션을 취하게 되고 이 일련의 행위는 다시 시간 지연에 따라 반대의 상황을 연출하면서 매니플레이터의 바이브레이션 현상이 발생하기도 한다[11]. 또한 네트워크 통신 수행 중 전송되는 데이터가 손실되는 문제가 발생하여 원격제어에 영향을 줄 수도 있다. 이에 대한 실험 결과는 다음과 같다.

표 2. 제어 데이터 전송 시간 지연과 손실 실험 결과

실험 항목	실험 방법	작업 시간 단축 효과
데이터 전송시간 지연	TDPA	미적용시 적용시에 비해 과도한 버튼 누르기 동작으로 인한 과부하 발생빈도가 높음.
	전송시간 임의 지연	0~3초의 전송 지연 실험 시 전송 지연 시간에 비례하여 작업 시간이 지연됨.
전송 데이터 손실	제어 데이터 손실	0~50%의 데이터 손실 실험 시 작업 시간에 거의 영향을 미치지 않음.
	영상 데이터 손실	0~50%의 데이터 손실 실험 시 작업 시간에 거의 영향을 미치지 않음.

표 3. 로봇 협업 실험 결과

실험 항목	실험 방법	작업 시간 단축 효과
카메라 영상	로봇 A의 카메라만 사용	로봇 A의 전방 카메라만 사용했을 경우 로봇 AB의 전·측방 카메라를 사용했을 때 보다 작업 시간이 평균 80% 증가함.
	로봇 AB의 카메라 사용	
매니플레이터 제어	단일제어	오퍼레이터 한명이 제어할 경우 축 분리 협업 때보다 작업 시간이 평균 65% 증가함.
	축 분리를 통한 협업제어	

5.2 로봇 협업

로봇 A와 B를 작업 현장까지 각각의 마스터 제어기를 이용하여 이동한 후 로봇 A의 매니플레이터에 장착된 카메라는 그리퍼의 전방 스위치쪽 영상을 송출하고, 로봇 B에 장착된 카메라는 그리퍼와 스위치의 측면 영상을 송출하게 한다. 이후 로봇 A의 매니플레이터 구동에 있어 xy축은 오퍼레이터 A가 담당하고 z축 구동은 오퍼레이터 B가 담당하는 실험을 수행하였다.

5.3 로봇의 현재 상황에 대한 오퍼레이터의 인지

햅틱 기능을 사용하지 않을 경우 모바일 장치의 이동 시 충돌 가능성과 매니플레이터의 대상물 터치감을 전혀 예측할 수 없어 로봇과 작업 대상물, 그리고 로봇 주변 장치 파손상황이 수시로 발생하여 작업 수행에 지속적인 문제가 발생하였다.

영상정보 없이는 원격조종이 원천적으로 불가능하였으며, 음향정보 전송이 없을 경우 오퍼레이터 간의 의사소통이 불가능하여 협업 시 소요되는 시간이 평균 25% 이상 증가하는 현상을 보였다.

5.4 N:N 제어 기술의 효용성

제어 데이터 전송 지연과 손실, 로봇 협업, 그리고

로봇의 현재 상황에 대한 오퍼레이터의 인지는 국내 외에서 많은 연구와 실험이 수행되어 왔다. 현재까지 발표된 논문에 의하면 이러한 연구와 실험은 N:N 제어가 아닌 1:N, N:1 그리고 1:1 방식으로 수행되었으며, 따라서 제어 타겟 로봇의 변경이나 로봇 제어 파트의 변경과 같은 제어 타겟 변경의 유연성이 전혀 제공되지 않았다. 본 논문에서 제안하는 방식은 다수의 오퍼레이터가 동일하게 구성된 각각의 마스터 제어환경에서 제어 타겟을 유연하게 선택할 수 있고, 동일 마스터 제어기의 오퍼레이터가 변경되어도 오퍼레이터 성향에 따라 제어 성향 편차가 심하지 않은 상태를 제공함으로써 오퍼레이터가 분산되거나 바뀌는 상황에서도 원활한 원격조종을 수행할 수 있는 환경을 제공하였다. 또한 원격조종 분야에서는 시간 지연 문제가 큰 이슈 중 하나였지만, 본 논문에서 제안한 시스템은 기존의 두 개 통신 노드(마스터 인터페이스↔슬레이브 로봇) 보다 많은 최소 3개(마스터 인터페이스↔MC·SC↔슬레이브 로봇)/최대 4개의 통신 노드(마스터 인터페이스↔MC↔SC↔슬레이브 로봇)를 가지면서도 시간지연 문제까지 극복할 수 있는 환경을 구축하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 멀티 오퍼레이터와 멀티 로봇이 서

로 협업하는 햅틱 기반의 원격 조종 시스템 구현 방법에 있어 로봇의 원격 조종의 이슈가 되는 문제점들과 이들을 해결하기 위한 방안들을 시스템 구현 방법과 각 시스템에 구현되는 알고리즘을 위주로 설명하였으며, 각각의 문제점들에 대해서 구현된 시스템을 이용하여 실험한 결과를 기술하였다.

현재까지 연구개발 상황에서는 스파이크 형태의 버튼 부르기 동작과 같은 간단한 실험만을 수행한 상태이나, 향후 수행될 문 열기와 밸브 돌리기와 같은 다소 난이도 있는 작업들에서는 실험 결과에 나타난 것과는 다르게 시간지연과 협업 문제에서 작업 시간 지연 외에 다른 문제점들이 발생할 수도 있다.

멀티 오퍼레이터와 멀티 로봇이 서로 협업하는 햅틱 기반의 원격 조종 시스템 구현은 세계적으로도 연구개발이 진행되고 있는 상황인데, 시스템 구조와 적용되는 알고리즘에 따라 원격 작업의 효율성에 있어 상이한 결과를 초래할 가능성이 높다. 본 논문에서 제안한 구조와 알고리즘들은 현재까지는 만족할 만한 수준의 작업 효율성을 보여주고 있으며, 향후 복잡한 원격 작업들을 수행하기 위한 알고리즘들을 지속적으로 탑재하면서 극한환경 현장 적용이 가능한 시스템으로 지속 발전시킬 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] K. Hashtrudi-Zaad and S.E. Salcudean, "Analysis of Control Architectures for Teleoperation Systems with Impedance/Admittance Master and Slave Manipulators," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 20, No. 6, pp. 419-445, 2001.
- [2] L.E. Parker, "Multiple Mobile Robot Systems," *Springer Handbook of Robotics*, pp. 921-941, Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [3] R. Murray, "Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 129, pp. 571-583, 2007.
- [4] D. Lee, A. Franchi, P. Robuffo Giordano, H. I.Son, and H.H. B'ulthoff, "Semi-Autonomous haptic Teleoperation of Multiple Unmanned sAerial Vehicles Over the Internet," *Proc. the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1341-1347, 2011.
- [5] N. Diolaiti and C. Melchiorri, "Teleoperation of a Mobile Robot Through Haptic Feedback," *IEEE International Workshop HAVE Haptic Virtual Environments and Their Applications*, pp. 67-72, 2002.
- [6] Chang-Hyun Cho, Jae-Bok Song, Mung-Sang Kim, and Chang-Soon Hwang, "Energy-Based Control of a Passive Haptic Device," *Proc. the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 292-297, 2004.
- [7] Asif Iqbal and Hubert Roth, "Stabilization Of Teleoperated Systems With Stochastic Time Delays Using Time Domain Passivity Control," *SICE-ICCAS 2006*, pp. 393-398, 2006.
- [8] Heon Park, Sang-Chul Lee, Su-Sung Lee, and Jang-Myung Lee, "A Robust Adaptive Impedance Control Algorithm for Haptic Interface," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 8, No. 5, pp. 393-400, 2002.
- [9] Kee-Hoon Kim, W.K. Chung, and Y. Youm, "On the Design Method of a Haptic Interface Controller with Virtual Coupling," *Proc. the International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 71-74, 2001.
- [10] S. Shin, I. No, T. Hwang, M. Oh, J. Ko, and J. Shim, "A Method of Collision Avoidance for Autonomous Mobile Robot using the antenna, IR and ultrasonic," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 15, No. 10, pp. 1236-1246, 2012.
- [11] Kyung-Lyong Han, Oh Kyu Choi, In Lee, Inwook Hwang, Jin S. Lee, and Seungmoon Choi, "Design and Control of Omni-Directional Mobile Robot for Mobile Haptic Interface," *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1290-1295, 2008.



최 유 락

1987년 3월~1991년 2월 충남대
학교 컴퓨터공학과 학사
1991년 3월~1993년 2월 충남대
학교 컴퓨터공학과 석사
2008년 3월~2010년 2월 충남대
학교 컴퓨터공학 박사 수
료

1993년 3월~현재 한국원자력연구원 연구원(책임연구원)
관심분야: 원격제어, 무선센싱, 비파괴검사, 데이터베이스



김 승 호

1972년 3월~1979년 2월 연세대
학교 기계공학과 학사
1979년 3월~1982년 2월 연세대
학교 기계공학과 석사
1982년 3월~1988년 2월 연세대
학교 기계공학과 박사

1988년 3월~현재 한국원자력연구원 연구원(책임연구원)
관심분야: 사이버 나이프, 지능형 로봇



이 재 철

1982년 3월~1986년 2월 경북대
학교 전자공학과 학사
1987년 3월~1989년 2월 경북대
학교 전자공학과 석사
2008년 3월~2010년 2월 충남대
학교 컴퓨터공학 박사 수
료

1988년 3월~현재 한국원자력연구원 연구원(책임연구원)
관심분야: 무선센싱, 자동제어, 지능형 로봇



권 오 석

1973년 3월~1977년 2월 서울대
학교 전자공학과 학사
1977년 3월~1980년 2월 한국과
학기술원 전기 및 전자공
학과 석사
1992년 3월~1994년 2월 한국과학
기술원 전산학 박사 수료

1980년 4월~현재 충남대학교 컴퓨터공학과 교수
관심분야: 지능정보시스템, 영상처리, 패턴인식



김 재 희

1976년 3월~1980년 2월 서울대
학교 기계공학과 학사
1980년 3월~1982년 2월 서울대
학교 기계공학과 석사
1986년 3월~1992년 7월 한국과
학기술원 생산공학 박사

1983년 3월~현재 한국원자력연구원 연구원(책임연구원)
관심분야: 자동제어, 로봇틱스