

# 복강경 수술로봇을 위한 실시간 운영체제 기반 제어 시스템의 개발

송승준<sup>2,3</sup>, 박준우<sup>1</sup>, 신정욱<sup>1</sup>, 김윤호<sup>3</sup>, 이덕희<sup>1</sup>, 조영호<sup>1</sup>, 최재순<sup>3</sup>, 선경<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>국립암센터 연구소 의공학연구과, <sup>2</sup>고려대학교 BK21 의용생체공학, <sup>3</sup>고려대학교 한국인공장기센터

## Development of a Real-time OS Based Control System for Laparoscopic Surgery Robot

Seung Joon Song<sup>2,3</sup>, Jun Woo Park<sup>1</sup>, Jung Wook Shin<sup>1</sup>, Yun Ho Kim<sup>3</sup>, Duk Hee Lee<sup>1</sup>, Yung Ho Jo<sup>1</sup>, Jae Soon Choi<sup>3</sup>, Kyung Sun<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Biomedical Engineering Branch, Research Institute, National Cancer Center,

<sup>2</sup>Department of Biomedical Engineering, Brain Korea 21 Project for Biomedical Science, College of Medicine, Korea University,

<sup>3</sup>Korea Artificial Organ Center, Korea University

(Received July 6, 2007. Accepted November 29, 2007)

### Abstract

This paper reports on a realtime OS based master-slave configuration robot control system for laparoscopic surgery robot which enables telesurgery and overcomes shortcomings with conventional laparoscopic surgery. Surgery robot system requires control system that can process large volume information such as medical image data and video signal from endoscope in real-time manner, as well as precisely control the robot with high reliability. To meet the complex requirements, the use of high-level real-time OS (Operating System) in surgery robot controller is a must, which is as common as in many of modern robot controllers that adopt real-time OS as a base system software on which specific functional modules are implemented for more reliable and stable system. The control system consists of joint controllers, host controllers, and user interface units. The robot features a compact slave robot with 5 DOF (Degree-Of-Freedom) expanding the workspace of each tool and increasing the number of tools operating simultaneously. Each master, slave and GUI (Graphical User Interface) host runs a dedicated RTOS (Real-time OS), RTLinux-Pro (FSMLabs Inc., U.S.A.) on which functional modules such as motion control, communication, video signal integration and etc, are implemented, and all the hosts are in a gigabit Ethernet network for inter-host communication. Each master and slave controller set has a dedicated CAN (Controller Area Network) channel for control and monitoring signal communication with the joint controllers. Total 4 pairs of the master/slave manipulators as current are controlled by one host controller. The system showed satisfactory performance in both position control precision and master-slave motion synchronization in both bench test and animal experiment, and is now under further development for better safety and control fidelity for clinically applicable prototype.

Key words : real-time OS, laparoscopic surgery, surgical robot, telesurgery

### 1. 서론

**최** 근 의료 분야에서 의료용 로봇은 개발 및 연구의 범위가 확대되고 있다. 한 연구조사에 따르면, 일반외과, 정형외과, 신경외과, 구강 및 악안면외과, 비뇨기과, 외상 및 방사선학적 수

술 등의 범주에서 현재 의료용 로봇이 적용되고 있다. 그러나, 이들 로봇 중 23% 만이 환자에게 시험되고 있고, 14% 만이 상용화되어 적용되고 있다. 의료 시술에 있어서 로봇 장치는 수술실에서의 로봇 시스템과의 통합의 어려움, 안전성, 높은 가격 그리고 로봇 방식의 보조 시술에 대한 정량적 이익의 부족 등의 이유로 아직은 광범위하게 적용되지는 않고 있는 실정이다[1].

수술 시 절개부위를 최소화함으로써 환자의 불편과 고통을 최소화하는 동시에 수술 및 회복의 효과를 최대화하는 최소침습수술(minimally invasive surgery)은 다양한 관련 기술의 발달에 힘입

본 연구는 2003년도 한국학술진흥재단(KRF-2003-037-D00027)의 지원과 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-11368-0) 지원으로 수행되었음.

Corresponding Author : 최재순  
서울특별시 성북구 안암동 5가 고려대학교 병원 한국인공장기센터 (136-705)  
Tel : 02-920-6459 / Fax : 02-922-4204  
E-mail : aequitas@korea.ac.kr

어 광범위한 외과수술 영역에서 차세대 수술기법으로 임상적용례를 넓혀가고 있다[2,3]. 최소침습수술은 그러나 수술자의 수술 동작의 자유도에 많은 제약을 요하고 수술 부위의 실제 상황에 대한 시각, 청각, 촉각적 각종 정보가 제한적으로 제공되어 의사의 입장에서 그 훈련과 시술에 적지 않은 어려움이 따르는 수술기법이고 이를 보완하기 위한 다양한 수술기구와 시스템의 개발이 이루어지고 있다. 그 중에서도 마스터-슬레이브 구성의 로봇을 이용하는 복강경 수술 시스템은 다양한 응용 및 발전 가능성을 바탕으로 임상적용 및 관련 기술 개발 연구가 활발히 이루어지고 분야의 하나이다[4,5].

복강경, 흉강경 등 내시경 수술을 위한 로봇시스템으로 현재 임상에서 사용되고 있는 로봇시스템은 da Vinci 로봇 시스템[6]과 ZEUS 로봇 시스템[7]이 있다. 이 두 시스템은 이미 다양한 임상실험을 통하여 각각 유럽과 미국에서 규제 승인을 획득하였다[8]. 개발사의 통합으로 현재는 da Vinci 시스템이 유일한 상용 시스템이며, da Vinci 시스템의 경우 수술자의 손목 관절의 움직임을 반영하는 고자유도 수술도구와 고해상도 입체 내시경 영상 등의 장점을 가진 반면, 촉각 혹은 반력 피드백 기능의 부재와 수술 시 신속하고 유연한 로봇 거치의 어려움, 전체 시스템 및 사용횟수가 제한된 수술도구의 높은 가격 등이 단점으로 지적되고 있으며, 이러한 단점의 해결과 의료계의 광범위하고 새로운 다양한 요구에 부응하기 위해 현재도 여러 연구그룹에서 새로운 로봇 시스템을 연구개발하고 있다.

내시경 로봇 시스템에 관련한 연구의 방향은 창의적인 수술도구, 즉 슬레이브 로봇 구조의 개발, 힘반향 기술 개발, 원격수술과 의학영상 결합 등 컴퓨터 통합 시스템으로서의 장점을 살리는 소위 지능형 수술 시스템의 구현을 위한 다양한 기술 개발, 로봇 시스템을 활용한 새로운 수술 술기와 정량적 훈련과 평가방법에 대한 연구 등이 주를 이루는데, 그 핵심에 기본적으로 시스템 수준에서 고도의 정밀제어기능과 다양한 확장성을 동시에 제공할 수 있는 제어시스템이 요구됨은 자명하다. 상용화된 da Vinci 를 포함하여 현재까지 개발된 대부분의 수술로봇 시스템의 제어시스템은 마스터와 슬레이브 로봇을 동시에 제어하는 단일 통합형 제어기 구조로서, 시스템 수준의 제어 연산을 담당하는 커스텀 설계 혹은 PC 기반의 중앙 제어기와 각 조인트의 서보제어를 위한 분산된 서보 제어기들이 하나의 통신 백본을 공유하는 형태로 구성되어 있고, 중앙제어기의 경우 커스텀 설계의 전용 소프트웨어 혹은 주로 Windows (Microsoft Co., U.S.A.) 가 기반 O/S로 사용되고 있다. Da Vinci의 경우 중앙의 주/부 DSP (Digital Signal Processor) 와 조인트 서보 제어를 위한 24개의 마이크로컨트롤러를 집중한 48자유도의 동시 제어가 가능한 커스텀 설계의 제어시스템을 구성하고 있고[9], Hashizume 등의 힘반향 기능을 갖춘 복강경 수술로봇[10], Bauernschmitt 등의 심장수술을 위한 실험용 내시경 로봇 시스템[11], Cavusoglu 등의 원격 수술 로봇, Podsekowski 등의 심장 수술을 위한 컴팩트 슬레이브 매니퓰레이터를 가진 내시경 수술로봇[12], Hsu 등의 뇌정위 수술 위한 병렬 로봇

[13], Zhang 등의 고주파 절제술 위한 수술로봇[14] 등에서는 Windows, Linux 등 일반 범용 운영체제 기반의 PC를 중앙 제어기로 하고 단일 통신 백본(backbone)에 모든 조인트 서보 제어기들을 연결한 구조를 대동소이하게 취하고 있다. 이러한 제어기 구조는 기본적으로 마스터, 슬레이브를 원격지에 따로 두는 원격수술 응용을 고려하고 있지 않으며, 고성능의 연산장치 혹은 지능형 수술을 위한 다양한 정보처리 및 사용자 인터페이스 장치와 연계하는데 일정한 한계를 가지고 있다.

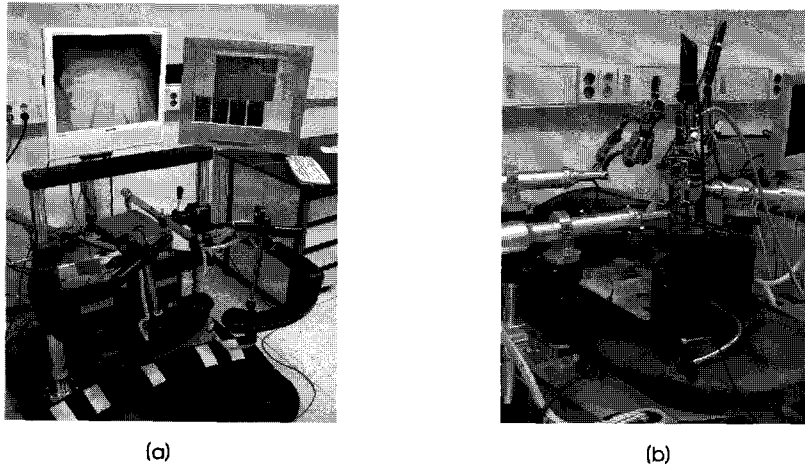
저자들은 암 수술을 위한 소형 복강경 수술 로봇 시스템을 개발하면서, 그 제어 시스템을 전술한 바와 같은 기존 시스템의 단점을 해결하기 위해, 실시간 운영체제 기반의 분산 제어 시스템 구조를 채택하였다. 로봇 시스템은 수술 시 복강 내부 영역에서의 일반적 복강경 수술 동작 자유도 구현을 위해 마스터와 슬레이브 간에 일대일로 대응되는 5개의 조작관절로 구성되며, 각 조작관절에는 조작의 크기를 인식하는 인코더와 실제 관절의 구동을 위한 브러시리스(brushless) 및 직류 전동기가 내장되어 있다. 각 관절은 전용 서보제어기로 구동되며 이들 제어기들 간의 동조 움직임을 제어하는 상위 수준의 제어기가 고속 네트워크 대응형 시스템으로 구성되어 마스터와 슬레이브 로봇 전체 제어를 수행하고, 전체 시스템은 제어 안정도를 높이고 고급정보처리 기능의 통합을 용이하게 하기 위해 실시간 운영체제(Realtime OS)를 기반으로 한 분산 제어 시스템 형태로 구축되었다. 사용된 운영체제는 Linux를 기반으로 한 Real-time Linux의 하나인 RTLinux-Pro (FSMLabs Inc., U.S.A., 이하 RTLinux) 로, 이 운영체제는 종전의 범용의Linux kernel을 일부 수정하여 절대 실시간(hard real-time) 기능을 가진 실시간 운영체제로 구현한 것이다. 이 같은 형태는 범용 Linux가 동시에 구동되므로 제어 연산과 같은 실시간 프로세스와 다양한 주변 시스템과의 연결을 위한 일반 프로세스가 적절한 동시성을 가지면서 동시에 운영될 수 있어 제안된 로봇 시스템에 적합한 구조로 판단하였다.

본 논문에서는 제안된 실시간 운영체제 기반의 복강경 수술 로봇 제어 시스템의 각부 구현 방법을 기술하고, 제작된 시작품을 이용한 위치 추종 성능시험 결과를 제시하며, 개선점 및 추가 연구개발에 대해 논하였다.

## II. 시스템 하드웨어 구성

### A. 복강경 수술 로봇의 구성

복강경 수술 로봇은 복강 내에서 복강경과 수술기구를 제어하여 원격 수술 작업이 가능한 수술로봇 (슬레이브 로봇)과 조종로봇 (마스터로봇)으로 구성된다 (그림 1). 슬레이브 로봇에서 수술 기구는 기본적으로 복부의 피부와 근육층을 관통하는 트로카(trocar)에 삽입되어 동작하게 된다. 트로카에 삽입된 수술도구는 피치(pitch)방향 구동, 요(yaw)방향의 요동구동, 수술도구 길이 축을 중심으로 회전하는 회전구동, 수술도구 길이 방향의 이송운동 그리고 수술 병변의 절개 및 절단 등의 작동을 담당하는 수술도



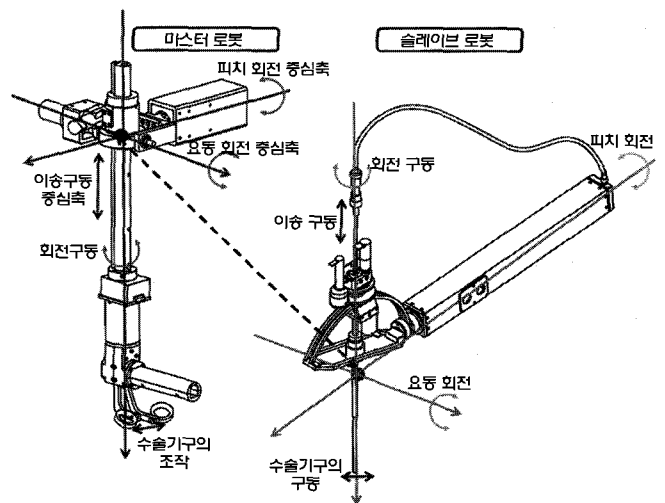
**그림 1.** 복강경 원격 수술 로봇 시스템의 기본 구성: a) 조작자에 의해 조작되는 마스터 로봇과 b) 직접 수술에 적용되는 슬레이브 로봇  
**Fig. 1.** Basic configuration of the laparoscopic telesurgery robot system : a) master robot operated by surgeon and b) slave robot that does the operation on patient

구 작동 구동 중 5가지 구동을 하게 된다. 마스터 로봇은 이에 동일하게 대응되는 5개의 자유도를 구현하여야 하며, 제안된 시스템에서는 각 관절구조가 슬레이브 로봇의 그것과 동일한 구조로 1:1 대응되도록 설계하였다(그림 2). 마스터 로봇은 조작자의 양 손으로 조작이 가능하도록 슬레이브의 암 중 선택된 두 개의 암과 동기화되는 두 개의 로봇 암(arm)과 각종 기능 모드 선택을 위한 발판 페달 (foot pedal) 로 구성된다. 슬레이브 로봇은 수술 기구를 위한 세 개의 암과 복강경 카메라를 위한 한 개의 암으로 구성된다. 조작자는 발판 페달 및 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)를 이용하여, 슬레이브 로봇의 수술 기구 암과 복강경 카메라 암을 선택하여 제어 가능하도록 구성하였다. 수술 기구는 5 mm 직경 규격의 상용 복강경 수술도구가 모두 장착 가능하며, 카메라는 10 mm 직경 규격의 것이 사용 가능하다[15].

초기 복강경 수술 로봇의 연구에서 수술 기구의 제어는 주 조작자에 의해 양손으로 행해지고, 보조 조작자에 의해 수동으로 복강경 기구를 제어하는 방식이 주를 이루었다. 그러나, 복강경 기구 또한 정확하고 손떨림 현상 방지를 위하여 로봇에 의한 제어가 가능한 형태로 연구되고 있다. 한 예로, 조작자는 수술기구의 제어를 위해 양손을 사용하고 조작자의 음성 명령에 따라 복강경 기구의 로봇 제어가 가능한 구조의 로봇 시스템이 개발되었다[16]. 본 논문에서는 주 조작자에 의해 수술 기구와 복강경 기구가 모두 제어 가능한 구조를 제안하였다. 조작자는 발판 페달을 이용하여 시스템의 일시 정지 기능을 수행할 수 있는 구조를 가졌고, 시스템의 일시 정지 상태에서 또 다른 발판 페달을 이용하여 슬레이브 로봇의 수술 기구와 복강경 기구를 선택 할 수 있도록 구성하였다. 또한, 일시 정지 상태에서 현 상태에 필요한 수술 기구의 교체 작업이 가능한 구조를 채택하였다. 조작자는 제어 할 기구가 선택되면 다시 발판 페달을 이용하여 시스템을 활성화 시키고 기구를 제어한다. 조작자는 발판 페달 뿐만 아니라 GUI 모니터의 터치 스크린을 이용하여 같은 기능을 수행 할 수 있다.

**B. 제어 시스템 하드웨어**

본 논문에서 제안된 복강경 수술 로봇 제어시스템은 슬레이브와 마스터 로봇 각각에 Linux 기반의 PC를 주 제어기로 하여 각 로봇 팔 마다 하나의 CAN (Controller Area Network) 버스를 할당하고, 각 버스 상에 각 축의 모터를 구동하기 위한 상용의 서보(servo) 제어를 병렬 연결하는 방식으로 하드웨어를 구성하였다. 각 주 제어기들 및 사용자인터페이스 및 시스템감시 모듈 간의 연결은, 각 서보 제어를 실시간으로 관리하는 동시에, 고용량의 연산과 다양한 하드웨어의 인터페이스의 적용이 가능하도록 하기 위해 리눅스 (Linux) 기반의 상용 실시간 운영체제의 하나인 RTLinux



**그림 2.** 마스터(좌), 슬레이브(우) 매니플레이터에 구현된 복강경 수술 기구 동작 자유도와 대응 관계  
**Fig. 2.** The 5 DOF of laparoscopic surgery tool motion implemented in the master (left) and the slave (right) manipulator and the correspondence between them

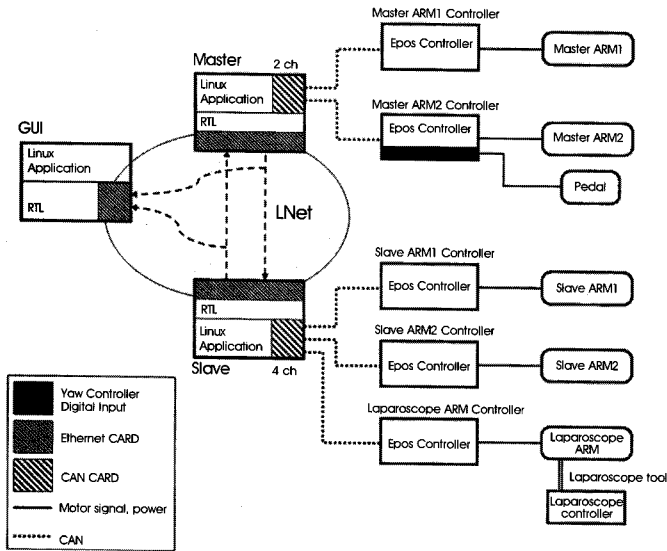


그림 3. 마스터 로봇과 슬레이브 로봇, GUI로 구성된 전체 시스템 블록도  
 Fig. 3. Total system block diagram by constructing to master robot, slave robot and GUI

를 운영체제로 하는 PC들의 클러스터 형태를 적용하였다.

각종 제어 신호와 같이 제어 시스템간의 공유가 필요한 데이터의 통신을 위해, 그림 3과 같이 Gigabit ethernet 망에 각 단위 PC들이 버스 구조로 연결되는 형태로 구성되었다. 이 연결은 RTLinux 운영체제에서 제공하는 실시간 UDP/IP 프로토콜 스택인 Lnet™을 사용하였다. 이 연결을 통해 전송되는 마스터 로봇의 동작 명령으로부터 슬레이브 로봇의 해당 각 축의 구동 명령을 생성하고, 이를 해당 CAN 버스를 통해 각 서보제어기에 전달하면, 단위 모터의 위치 및 속도의 제어는 각 서보제어기가 수행하는 형태로 전체 제어 신호의 흐름이 구성되었다.

### III. 시스템 소프트웨어 구성

#### A. 제어 시스템 소프트웨어

전체 시스템의 데이터 흐름 통제 프로세스는 마스터 로봇 제어 PC에 두어 모든 시스템 요소에서 발생하는 데이터 및 제어 신호가 이 프로세스에 집중된 후 다시 필요한 각 세부 대응 요소로 중계되

도록 구성되었다. 이러한 데이터 통신을 위한 인터페이스 프로세스는 각 PC 마다 절대 실시간(hard real-time) 프로세스로서 구현하였다. 각 기능 구현 프로세스는 이러한 통신 프로세스의 상부에서 기능별 특성에 따라 연성실시간(soft real-time) 프로세스 혹은 절대 실시간 프로세스로서 구현된다. 표 1은 적용된 기능 별 구현 프로세스의 요약이다. 이 중 사용자인터페이스 부분의 경우 텍스트 기반의 내부 상태 정보 도시 수준의 간략형 인터페이스는 처리시간이 상대적으로 극히 짧으므로 실시간 프로세스로 구현하였으나, 로봇의 3차원 움직임 표시, 복강경 영상처리 및 통합 도시, 동작 상태에 대한 2차원 그래프 등으로 구성되는 확장형 그래픽 사용자 인터페이스의 경우 그래픽스 부분은 실시간성이 요구되지 않고, 처리시간이 길고 지연될 수 있어, 실시간 프로세스로 두지 않고, 외부에 연성 실시간 프로세스로 두어 구현하였다.

로봇제어 시스템은 초기에 마스터와 슬레이브, 그리고 그래픽 사용자 인터페이스(Graphic User Interface, 이하 GUI)에 대한 일련의 초기화 작업을 수행한 후 운전모드에 들어간다. 운전 중에는 마스터 로봇의 제어가 암의 각 축의 위치 변화를 인코더 혹은 브러쉬리스 직류모터의 위상감지용 홀센서를 통하여 감지하여, 슬레이브 로봇 암의 각 축을 이에 비례하여 구동시키기 위한 적절한 스케일링(scaling) 및 변환 작업을 수행한 다음, 생성된 슬레이브 위치명령 정보를 연속적으로 슬레이브 로봇 측과 GUI측에 전달한다. 정보를 수신한 슬레이브 로봇은 대응되는 암의 축을 정보에 맞게 구동시킨다. 또한 마스터 위치 변화 정보와 슬레이브 위치 변화 정보를 함께 수신한 GUI측은 조작자가 육안으로 확인 할 수 있도록, 변화 정보를 화면에 디스플레이한다. 스케일링을 위한 파라미터들은 GUI상에서 변경 가능하도록 구성되었으며, 별도의 메모리에 저장하여 시스템의 재작동 시에도 기억하도록 구성되었다.

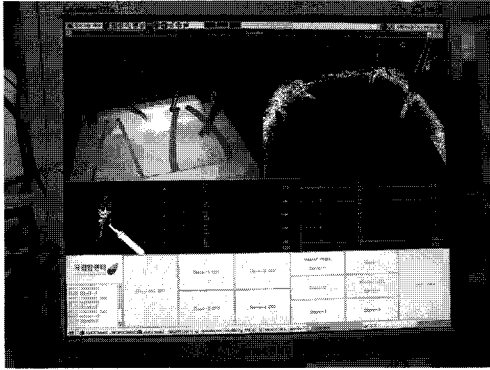
#### B. 그래픽 사용자 인터페이스

Ethernet 연결을 통한 별도의 리눅스 기반의 PC로 GUI를 구현하여 복강경 영상 도시는 물론 로봇의 운전 상황 실시간 모니터링 및 조작 환경 변경이 가능하고 데이터 흐름의 중앙 감시가 가능하도록 하였다(그림 4). 이 인터페이스는 복강경 영상과 영상인식을 위한 영상처리 결과를 실시간으로 도시하는 부분과 로봇 각 축의 서보 제어 상태를 표시하는 그래프 부분, 기타 각종 기능 선택입력을 위한 인터페이스를 포함한다(표 2). 복강경 영상인식은 복강경

표 1. 각 단위 기능 별 프로세스 구현

Table 1. Functional classification of process

기능 별 분류	기능 구현	기능 구현 프로세스	비고
단위 기능	마스터 로봇 제어	절대 실시간 프로세스	제어 성능에 직결됨
	슬레이브 로봇 제어	절대 실시간 프로세스	제어 성능에 직결됨
간략형 사용자 인터페이스 및 데이터 흐름의 중앙 통제	간략형 사용자 인터페이스 및 데이터 흐름의 중앙 통제	절대 실시간 프로세스	제어 성능에 직결됨
	확장형 그래픽 사용자 인터페이스	연성 실시간 프로세스 & 절대 실시간 프로세스	그래픽 렌더링 부분만 연성 실시간 프로세스



**그림 4.** 복강경 영상 처리와 실시간 모니터링 위한 GUI  
**Fig. 4.** Graphical User Interface(GUI) for laparoscopic image processing and real-time monitoring

영상 내의 각 개체 간의 경계와 영역을 구분하여 추후 이를 기반으로 반자동수술 기능을 구현하려는 기초 기술로서, 현재는 역치 적용과 Watershed 기법을 사용하여 영역을 자동 분할하는 기법을 일부 시도해 본 상태이다. 복강경 영상 입력을 위해서는 프레임 그래버 (RTV-24, Adlink Technology Inc., U.S.A.)와 Linux kernel 내의 VideoForLinux 라이브러리를 사용하였고, 전체적인 그래픽 인터페이스는 Qt (Trolltech Co., U.S.A) 라이브러리와 OpenGL을 사용하였다.

**C. 로봇 모션 제어**

*서보제어기와 로봇 제어기간의 통신체계*

마스터/슬레이브 제어기와 각 로봇 암의 조인트 제어기 간의 통신에는 직렬 버스 방식의 CAN을 사용하였다. 최소 3선의 단순하고 부피가 적은 통신 선로를 통해 1 Mbps까지 직렬 통신이 가능하며, 충돌 방지, 오류제어 등의 처리기제가 표준 상에 구현되어 있어 신뢰성 있는 통신이 가능하고, 버스 방식이므로 다수의 제어기가 효율적으로 통신 선로를 공유 할 수 있어 본 시스템의 목적에 부합하였다. 본 시스템에서는 로봇의 각 축마다 고유한 CAN 주소를 갖도록 하고, 모터/엔코더 제어 신호가 상호 교환되도록 각 축 당 400 패킷/초의 데이터를 발생시키도록 구성하였다. 이는 모션 샘플링 주기로 400 Hz에 해당하며, 한 개의 CAN 채널에서 5개의 로봇축을 담당하도록 하고, 통신대역폭(bandwidth)의 여유를 감안하여 임의로 결정한 수치이다. 힘반향 제어를 위해서는 근래에

들어 컴퓨터의 연산 성능의 발전으로 대개의 경우 1 kHz 이상의 모션 샘플링 주기를 사용하나[17], 500 Hz 에서도 구현이 가능하며[18], 실제 축각 자체의 분석 연구 결과에서는 400 Hz 정도가 손가락에의 반력 재연을 위해 요구되는 최대 주파수인 것으로 제시되고 있다[19,20].

*로봇 각 축의 서보제어기*

로봇의 각 축을 구동시키는 모터는 사용 축의 목적 및 용량에 따라 소형의 브러쉬리스 및 직류 전동기를 사용 하였다. 로봇 각 축의 모터 제어 및 시스템 제어기와의 통신 수행을 위해 각 단위 축 제어기마다 개별 서보제어기 (EPOS™, Maxon Motors Inc., Swiss) 를 사용하였다. 모터 제어는 지령위치 추종을 위한 위치 제어 루프와 그 출력인 속도 명령 추종을 위한 속도 제어 루프의 두 단계로 구성되며, 위치 및 속도 루프 다음으로 전류 제어 단계를 구분해 두어 외부에서 자체 제어 알고리즘 계산 후 전류지령을 제어기에 내리는 것이 가능하도록 되어 있으며, 제어 방식은 비례-적분-미분 (PID) 제어 방식이다. 위치제어 루프의 샘플링 주기는 1 kHz, 전류제어 루프의 샘플링 주기는 10 kHz 이다. 본 시스템은 일종의 multi-rate control 방식의 형태로, 모션 샘플링 주기는 400 Hz 이나, 위치제어의 샘플링 주기는 1 kHz로 충분한 안정도로 위치 제어가 가능하다.

*PID 제어기의 구현*

마스터에서 전달 받은 위치 정보를 슬레이브 각 축 제어기로 전송하면, 각 축별 제어기는 PID 제어를 실행하여 각 축모터를 구동하고, 모터의 엔코더 또는 홀센서에서 피드백 받은 모터의 위치 정보를 바탕으로 위치 제어를 수행한다. PID 제어기의 각 이득 계수는 Ziegler-Nichols 기법을 기반으로 반복 실험을 통한 시행착오 (trial and error) 방식으로 각 축 별로 적절한 값을 정하였다.

*마스터-슬레이브 동기화 모션 및 기타 기능*

로봇의 제어를 위해서는 일반적으로 시스템의 기구학 방정식이 정의되고, 실시간 변화 하에 주어지는 로봇 축의 최종단의 목표 위치에 맞추어 역기구학 방정식의 해를 구하여 각 축의 목표 위치와 속도를 생성하는 과정이 이루어져야 한다. 그러나, 본 시스템의 경우 마스터/슬레이브 로봇의 구조를 기구학적으로 각 축의 운동이 1:1로 대응되는 형태로 설계하여 기본적인 운전을 위해서는 역기구학 해석을 생략할 수 있도록하였다. 본 시스템에서는 슬레이브

**표 2.** GUI의 제어 기능 분류  
**Table 2.** Control function classification of GUI

제어 기능	세부 사항
선택/변경 기능	좌/우 두 개의 마스터 매니플레이터와 다수의 슬레이브 로봇 간의 연결 관계를 선택/변경하는 기능
일시 동작 고정 기능	수술자의 자세 교정 등을 위해 슬레이브 로봇의 동작을 일시 고정시키는 'Clutch mode' 기능
카메라 자세 조정 기능	복강경 카메라를 장착한 슬레이브 로봇의 자세를 조정하는 기능
선택적 제어 정지 기능	수술 도구 교환을 위해 슬레이브 로봇을 선택적으로 제어를 정지하는 기능

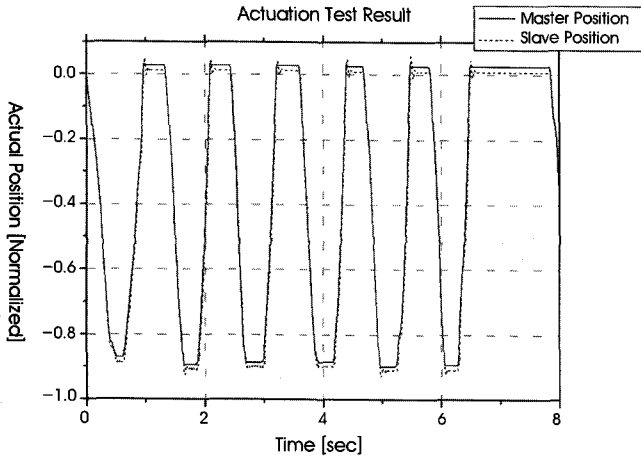


그림 5. 액추에이션 축의 위치 추종에 대한 결과 파형  
 Fig. 5. Result of the position waveform of the actuation axis.

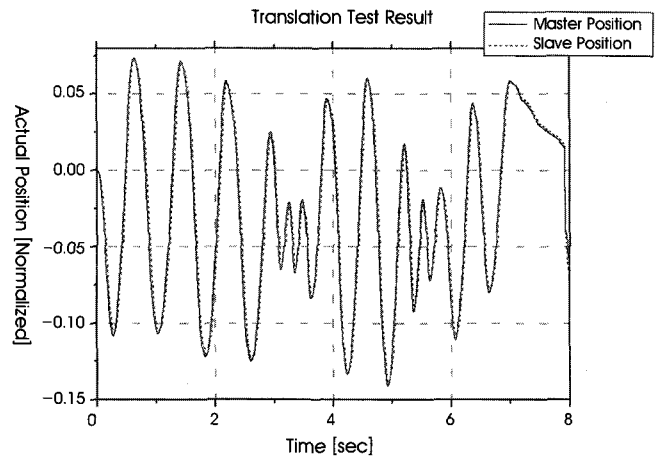


그림 6. 이송 축의 위치 추종에 대한 결과 파형  
 Fig. 6. Result of the position waveform of the translation axis.

로봇의 각 단위 축이 대응되는 마스터 로봇의 축의 위치변화를 목표 위치 지령으로 받아 그대로 추종하도록 하는 단순한 방법을 사용하였으며, 필요한 슬레이브 로봇 구동의 적절한 성능의 구현이 가능하였다.

기타 기능으로 마스터 로봇의 자세 변화, 수술자의 휴식, 수술 도구의 교환, 다중의 슬레이브 로봇 암 중 특정 암 선택의 변경 등을 위해 마스터-슬레이브 동기화 상태를 일시적으로 중단시키는 ‘클러치 (clutch)’ 기능, 슬레이브 로봇 암의 자세 교정, 수술 도구의 교환 등을 위해 슬레이브 로봇 암의 각 축을 전체 혹은 선택적으로 수동 조작할 수 있도록 자동제어루프를 일시 중단시키는 기능, 현재의 마스터-슬레이브 연동 구조를 일시적으로 멈추고, 마스터의 한 암과 슬레이브 중 복강경카메라가 설치된 암을 연결하여 카메라의 자세를 조종하는 카메라 조종 모드, 수술 동작의 정량적 기록과 사후 분석을 위해 수술 동작을 실시간으로 기록하는 ‘로깅 (logging)’ 모드 등이 추가적으로 구현되었다.

마스터 로봇의 제어기의 소프트웨어는 마스터 로봇 암 하드웨어와의 통신 이외에 네트워크를 통해 추가의 동작지령을 다중으로 받아들일 수 있는 구조로 구성되어 있어 별도로 개발 중인 수술시물레이터와 연계 혹은 주 수술자 이외의 다수의 보조 수술자와의 원격 협업이 가능하다.

또한, 비정상적인 상황에서의 안정성 유지를 위해, 각 축의 구동에 대한 절대 한계값을 설정하여 과도한 위치 이동에 대한 동작 방지 기능을 두었고, 1초 간격으로 각 모터의 상태정보를 주 제어기에서 감시하여 지속적으로 시스템의 운전 상태가 모니터링 되도록 하였다.

#### IV. 성능 시험 및 동물 실험 결과

개발된 시스템의 신뢰도 및 안정성을 시험하기 위해 복강경 수술 연습용 모의 환자 장치에 슬레이브 로봇을 설치하고, 고분자 소

재 모의 조직(tissue) 등을 대상으로 실제 수술 시와 유사한 수준의 동작 부하 및 속도로 동작시키면서, 로봇의 동작 성능을 시험하였다. 동작은 사용자의 임의 동작과 보다 정량적 파악을 위한 정현파 형태의 모의 동작의 두 가지 형태를 지령으로 사용하였다.

그림 5는 마스터 로봇의 도구 작동 축을 조작자가 임의로 조작할 때 슬레이브 로봇의 추종 양상을 본 파형이다. 마스터 축의 변화에 따른 슬레이브 축의 위치 추종이 원활하게 이루어짐을 알 수 있다. 그림 6~7은 이송 및 회전 축에 대한 것으로 동일하게 마스터 축의 변화에 따른 슬레이브 축의 위치 추종이 원활하게 이루어짐을 알 수 있다. 그림 8~9는 피치 및 요 축에 대한 것으로 위치 추종이 원활하게 이루어짐을 알 수 있다. 요 축의 경우 실제 수술 시 조작 환경에 대한 제한이 있으므로, 반경 한계값을 적용하였고, 이에 따라 한계값 이상의 위치 변경을 마스터 로봇에서 시도하여도 슬레이브 로봇은 한계값을 넘지 않도록 구동되고 있음을 볼 수 있다.

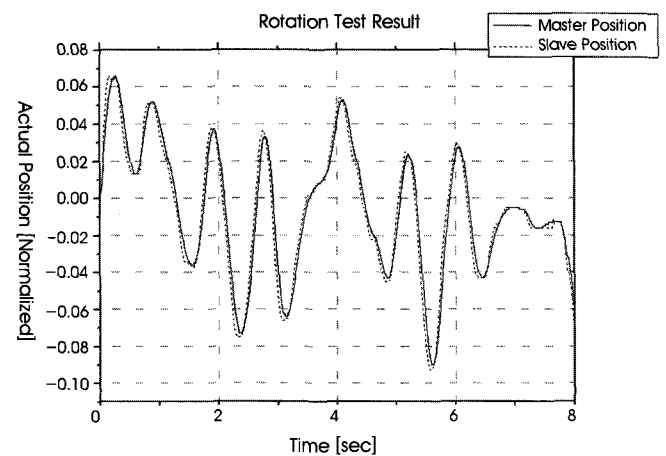


그림 7. 회전 축의 위치 추종에 대한 결과 파형  
 Fig. 7. Result of the position waveform of the rotation axis.

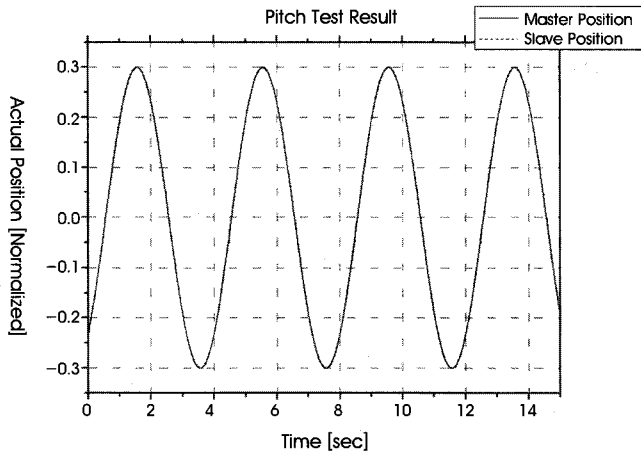


그림 8. 피치 축의 위치 추종에 대한 결과 파형  
 Fig. 8. Result of the position waveform of the pitch axis.

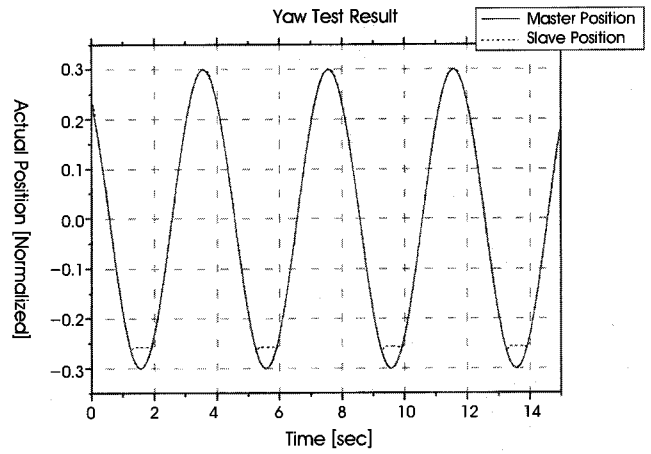


그림 9. 요 축의 위치 추종에 대한 결과 파형  
 Fig. 9. Result of the position waveform of the yaw axis.

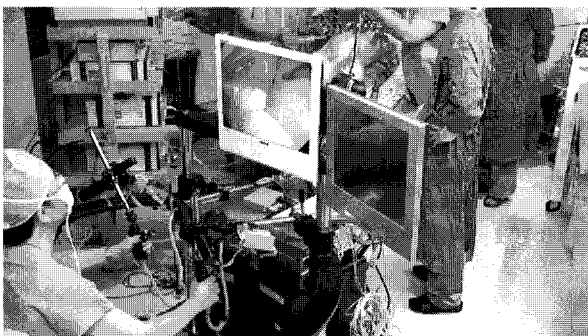
클러치 모드, 카메라 모드 전환 및 카메라 조종, 모션 로깅, 모션 스케일링, 슬레이브 로봇 암 선택, 슬레이브 로봇 자동제어 일시정지 모드 등 각종 기본 시스템 제어 모드들도 불규칙한 이상 동작 발생 등의 오류 없이 안정적으로 설계된 기능을 수행함을 확인 하였다.

전기수술기와의 연동 시 전자파 잡음 영향 시험에서도 이상 동작 없이 제어 하드웨어들이 정상 구동함을 확인하였고, 실제 동물 실험 중에도 전기 수술기 사용으로 인한 로봇 시스템에의 영향은 발견되지 않았다.

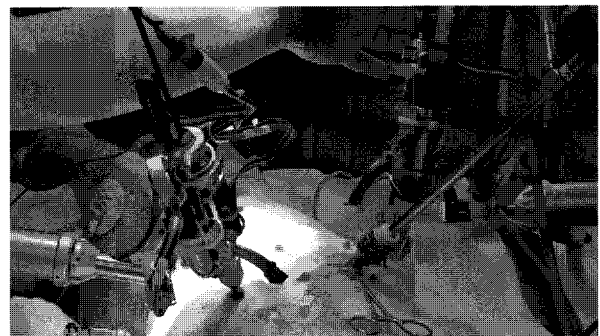
개발된 시스템의 실제 적용 상황에서의 성능 평가를 위해 동물 실험을 수행하였다. 약 60 Kg의 돼지를 대상으로 복강경 담낭절제술을 수술 프로토콜 모델로 하여 투관침 (trocar)의 위치를 설정하고, 슬레이브 로봇으로서 수술도구용 로봇 팔 2대와 복강경 카메라용 로봇 팔 1대를 설치하여, 시스템의 성능을 시험하였다(그림 10). 동물실험은 인체 수술 시와 동일한 조건과 프로토콜을 따라 인도적 주의 하에 수행하였다. 본 실험에서는 후술하는 서보 제어기 과부하 문제로 인해 전체 수술 과정을 수행하지는 못하였으며,

로봇의 각 축의 동작 상태와 동작범위만을 시험 평가 하였다.

동물실험에서는 수술로봇의 동작 상의 특이한 문제점은 발견되지 않았고, 일반 벤치테스트에서와 동일한 양태를 보였다. 그러나, 동물실험 상황에 적용해 본 결과 현재 설계의 슬레이브 로봇의 동작 범위가 일부 부족하여 수술 부위 전체를 도달할 수 있는 적절한 초기 설치 위치를 설정하는데 어려움이 있었고, 이와 관련하여 기계적 허용 한계 이상의 동작지령이 슬레이브에 부과되면서 모터 및 서보제어기에 과부하로 인한 손상 및 기능 이상이 발생하는 문제점이 드러났다. 슬레이브 로봇의 각 축에 적절한 절대 한계 위치 센서를 두거나, 절대 위치 인코더를 사용하면 제어 시스템은 보호될 수 있으나 현재의 시스템은 기구의 부피를 최소화하는 관점에서 설계되어 이러한 부가적 센서나 상대적으로 부피가 큰 절대위치 인코더를 포함하지 않고 있다. 향후에는 자체적으로 소형의 절대한계위치 센서를 고안하여 적용하거나, 일부 공간 제약이 적은 부위에는 절대위치 인코더를 적용하는 등의 방식을 통해 물리적 절대한계위치를 계측하는 방식으로 설계를 변경할 예정이다.



(a)



(b)

그림 10. 동물실험 장면: a) 수술자 콘솔과 슬레이브 로봇 전경, b) 동물의 복부에 설치된 모습

Fig. 10. Photos of the animal experiment: a) overall scene showing the surgeon console (front) and the slave robot (rear), b) the slave robot arms installed on the abdomen of the animal

## V. 결론 및 토의

본 시스템은 다른 로봇 시스템과는 달리 마스터 로봇과 슬레이브 로봇의 조차 관절의 동작이 1:1로 대응되어 복잡한 제어 알고리즘이 필요하지 않고 이에 따라 구조가 단순하며 대응 성능이 빠르고 상대적으로 신뢰도가 높은 장점을 지녔다. 개발된 시제품은 수술 시와 유사한 수준의 부하 및 동작 조건에서의 각종 시험에서 시스템의 추종 성능이 적합한 수준임을 확인 하였다. 다양한 추가적 기능과 개선된 편의성과 안전성을 위한 보완이 필요하며 관련된 개발이 진행 중에 있다.

## 참고문헌

- [1] P. Pott, A. Kopfle, A. Wagner, E. Badreddin, R. Manner, P. Weiser, H.-P. Scharf, and M. Schwarz, "State of the Art of Surgical Robotics," *Perspective in Image-Guided Surgery: Proceedings of the Scientific Workshop on Medical Robotics, Navigation and Visualization*, Remagen, Germany, 2004, pp. 375-382.
- [2] A. R. Lanfranco, "Robotic Surgery: A Current Perspective," *Annals of Surgery*, vol. 239, pp.14-21, 2004.
- [3] A. Garcia-Ruiz, M. Ganger, J. H. Miller, C. P. Steiner, J. F. Hanh, "Manual vs Robotically Assisted Laparoscopic Surgery in the Performance of Basic Manipulation and Suturing Tasks," *Archives of Surgery*, vol. 133, no. 9, pp.957-961, 1998.
- [4] V. Sangveraphunsiri, T. Karmwilaikom, "Development of a Six Degree-of-Freedom Master-Slave Manipulator System," in *Proc. 15th Thailand Mechanical Engineering Network*, Nov. 2001.
- [5] A. Clement-Claude, "Laparoscopic Radical Prostatectomy with a Remote Controlled Robot," *The Journal of Urology*, vol. 165, pp.1964-1966, 2001.
- [6] G. S. Guthart and J. K. Salisbury, "The Intuitive (TM) telesurgery system: Overview and application," in *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, U.S.A., Apr. 2000, pp. 618-621.
- [7] S. E. Butner, M. Ghoudoussi, and Y. Wang, "Robotic surgery the transatlantic case," in *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, Washington D.C., U.S.A., May 2002, pp. 1882-1888.
- [8] G. Sung and I. Gill, "Robotic laparoscopic surgery: a comparison of the da vinci and zeus systems," *Urology*, vol. 58, no. 6, pp. 893-898, 2001.
- [9] G. S. Guthart, J. K. Salisbury, Jr., "The Intuitive™ Telesurgery System: Overview and Application," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, U.S.A., Apr. 2000, pp. 618-621.
- [10] J. Arata, M. Mitsuishi, S. Warisawa, M. Hashizume, "Development of a Dextrous Minimally-Invasive Surgical System with Augmented Force Feedback Capability," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Aug. 2005, pp. 3207-3212.
- [11] M. Harmann, I. Nagy, A. Knoll, E. U. Shirmbeck, and R. Bauernschmitt, "The Endo[PA]R System for Minimally Invasive Robotic Surgery," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, Sep. 2004, pp. 3637-3642.
- [12] Z. Nawrat, L. Podsedkowski, K. Mianowski, P. Wroblewski, P. Kostka, M. Baczynski, Z. Malota, G. Granosik, E. Jezierski, A. Wroblewska, Z. Religa, "RobIn Heart in 2002 - Actual State of Polish Cardio-Robot", in *Proc. 3rd International Workshop on Robot Motion and Control*, 2002, pp. 33-38.
- [13] T. C. Tsai, Y. L. Hsu, "Development of a Parallel Surgical Robot with Automatic Bone Drilling Carriage for Stereotactic Neurosurgery", in *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2004, col. 3, pp. 2156-2161.
- [14] Q. Du, Q. Huang, C. Liu, W. Zhang, "Research on Control System of Radio Frequency Ablation Surgical Robot," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Dec. 2006, pp. 1287-1292.
- [15] J. C. Lee, J. W. Park, S. Y. Hong, C. H. Lee, J. W. Shin, S. J. Park, Y. Jo, "A New Compact Slave Manipulator for Telerobotic Abdominal Surgery," in *Proc. 17th International Conference of Society for Medical Innovation and Technology*, Sep. 2005.
- [16] H. Reichenspurner, R. Demaino, M. Mack, D. Boehm, H. Gulbins, C. Detter, B. Meiser, R. Ellgas, and B. Reichart, "Use of the Voice Controlled and Computer-Assisted Surgical System, Zeus for Endoscopic Coronary Artery Surgery Bypass Grafting," *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, vol. 118, pp. 11-16, 1999.
- [17] S. Katsura, K. Ohnishi, and K. Ohishi, "Transmission of Force Sensation by Environment Quarrier Based on Multilateral Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 898-906, 2007.
- [18] S. E. Salcudean, M. Zhu, W. H. Zhu, and K. Hashtrudi-Zaad, "Transparent Bilateral Teleoperation under Position and Rate Control," *International Journal of Robotics Research*, vol. 19, no. 12, pp.1185-1202, 2000.
- [19] D. G. Gersem, "Kinaesthetic Feedback and Enhanced Sensitivity in Robotic Endoscopic Telesurgery," *PhD Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven*, Belgium, Feb. 2005.
- [20] K. B. Shimoga, "A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation. I. Finger Force Feedback," in *Proc. IEEE Annual International Symposium on Virtual Reality*, Sep. 1993, pp. 263-270.