

실시간 운영체제 기반의 복강경 수술 로봇의 모터제어 시스템에 관한 연구

송승준* · 김 용* · 최재순** · 배진웅***
*동국대학교 . **국립암센터 . ***특허청

A Study of a RealTime OS Based Motor Control System for Laparoscopic Surgery Robot

Seung-Joon Song* · Yong Kim* · Jae-Soon Choi** · Jin-Yong Bae***

*Dongguk University . **National Cancer Center . ***Korean Intellectual Property Office

Abstract - This paper reports on a Realtime OS based motor control system for laparoscopic surgery robot which enables telesurgery and overcomes shortcomings with conventional laparoscopic surgery. The system has a conventional master-slave robot configuration and the control system consists of joint controllers, host controllers, and power units. The robot features (1) a compact slave robot with 5 DOF (Degree Of Freedom) expanding the workspace of each tool and increasing the number of tools operating simultaneously, and (2) direct 1:1 correspondence in the joint of master and slave robot that simplifies control algorithm and enhances reliability. Each master, slave and GUI (Graphical User Interface) host has a dedicated RTOS (RealTime OS). RTLinux-Pro (FSMLabs Inc., U.S.A.) Each master and slave controller set pair has a dedicated CAN (Controller Area Network) channel for control and monitoring signal communication. Total 4 pairs of the master/slave manipulators as current are monitored by one host controller for operation monitoring and higher level motion control. The system showed acceptable performance in both position control precision and master-slave motion synchronization, and is now under further development for better safety and control fidelity for clinically applicable prototype.

로운 움직임을 위해 마스터와 슬레이브 간에 일대일로 대응되는 5개의 조작관절로 구성되며, 각 조작관절에는 조작의 크기를 인식하는 인코더와 실제 관절의 구동을 위한 BLDC 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 간의 통신을 수행하고, 전체 시스템은 제어 안정도를 높이기 위해 실시간 운영체제(Realtime OS)를 기반으로 한 분산 제어 시스템 구조로 구축하였다[9-10].

본 논문에서는 제안된 복강경 수술 로봇 모터제어 시스템의 시작품을 제작하여, 수술 시와 유사한 수준의 동작 부하 및 속도로 동작시키면서, 로봇의 동작을 시험하여 전임상 동물 실험 모델을 목표로 신뢰도가 향상되고 안정성이 확보된 새로운 시스템을 제안하고자 한다.

2. 본 론

2.1 제안된 복강경 수술 로봇의 구성

2.1.1 복강경 수술 로봇의 개요

복강경 수술 로봇은 그림 1과 같이 복강내에서 복강경과 수술기구를 제어하여 원격 수술 작업이 가능한 수술 로봇(슬레이브 로봇)과 조종로봇(마스터 로봇)으로 구성된다.

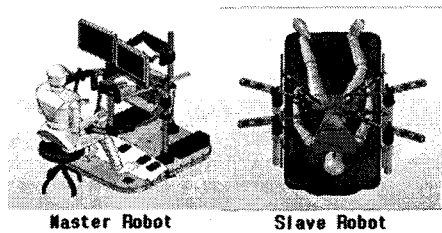


그림 1. 복강경 수술 로봇

1. 서 론

복강경 수술 분야에 있어서 로봇의 이용은 안전도 및 의사와 엔지니어의 의학 및 공학관련 전문 분야에 대한 상호 이해부족 및 환자의 거부감 등의 문제로 수술실에서 환자의 수술 집도를 전적으로 로봇에게 수행시키는 것은 아직은 미래의 일이다. 따라서 수술 분야에 있어서 로봇의 적용에 관한 연구는 의사와 로봇이 수술을 공동으로 집도하는 이른바 원격제어(Teleoperation)와 수술보조용 로봇에 집중되어 있다. 원격 제어란 의사의 경험과 로봇의 조정밀한 작업수행 능력을 결합하여 결과적으로 수술 집도는 로봇이 수행하고, 그 로봇은 의사가 조정하는 방법이며, 이때 수술을 집도하는 로봇의 각종 첨단 센서를 통하여 의사는 자신이 직접 수술을 하는 것과 같은 동일한 감각(Telepresence)을 느끼게 함으로써 수술 시 전혀 이질감 없이 자신의 경험과 능력을 충분히 발휘할 수 있는 환경을 설정하는 것이다[1-7].

본 논문에서는 기존 복강경 수술의 단점을 극복하고 원격수술을 가능하게 하는 로봇 복강경 수술 시스템을 위한 모터 제어 시스템과 시스템의 실시간 응답을 위한 실시간 운영체제 기반의 제어 시스템에 관하여 논하고자 한다[8].

제안된 시스템은 수술 시 복강 내부 영역에서의 자유

2.1.2 복강경 수술 로봇의 조작 관절 동작 환경

수술 로봇(슬레이브 로봇)에서, 수술 기구는 기본적으로 복부의 피부와 근육층을 관통하는 트로카에 삽입되어 동작하게 된다. (그림 2)와 같이 트로카에 삽입된 수술도구는 피치(Pitch)방향의 피치(Pitch)구동, 요(Yaw)방향의 요동구동, 수술도구 길이 축을 중심으로 회전하는 회전구동, 수술도구 길이 방향의 이송운동 그리고 수술 병변의 절개 및 절단 등의 작동을 담당하는 수술도구 작동구동 중 5가지 구동을 하게 된다.

조작 로봇(마스터 로봇) 또한, 이에 대응되는 5개의 조

작 관절을 가지고 구동된다.

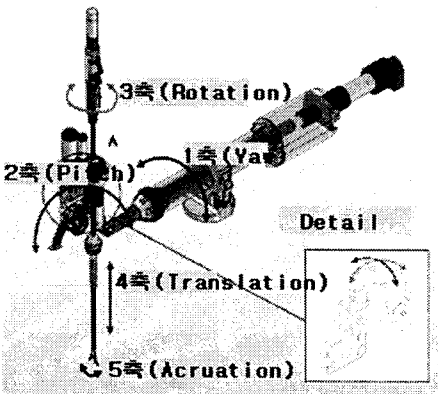
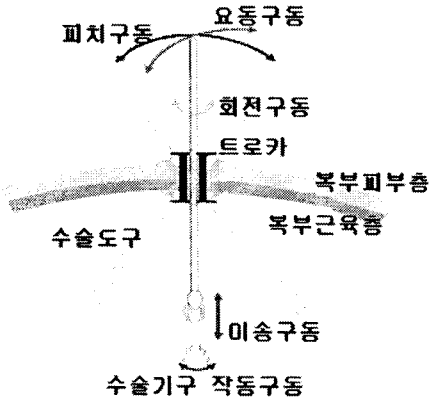


그림 2. 복강경 수술의 조작 관절 동작관경

2.1.3 복강경 수술 로봇의 시스템 구성

제안된 복강경 수술 로봇은 Linux 기반의 PC를 주 제어기로 하여 하나의 CAN 버스 상에 로봇 각 축의 모터를 구동하기 위한 상용의 모터 서보제어기와 증폭기를 모두 병렬 연결하는 방식으로 하드웨어를 구성하였다. 고용량의 연산과 다양한 하드웨어의 인터페이스의 적용이 필요하므로 전체 시스템의 운용을 위하여 그림 3과 같이 Linux 기반의 상용 실시간 운영체제의 하나인 RTLinux-Pro를 운영체제로하는 PC들의 클러스터 형태를 적용하였다. RTLinux-Pro의 사용으로 각 단위 축 제어기(joint controller)에 대한 서보 제어기의 제어 기능을 실시간으로 처리 할 수 있게 되었고 고용량의 수학 계산을 위한 병렬 처리 시스템 형태로의 확장이 용이하게 되었다.

각종 제어 신호와 같이 제어 시스템간의 공유가 필요한 데이터의 통신을 위해 Ethernet 망에 각 단위 PC들이 버스 구조로 연결되는 형태로 구성되었다. 이 Ethernet 연결을 통해 전송되는 마스터 로봇의 동작 명령으로부터 슬레이브 로봇의 해당 각 축의 구동 명령을 생성하고, 이를 해당 CAN 버스를 통해 각 서보 제어기에 전달하면, 단위 모터의 위치 및 속도의 제어는 각 서보 제어기가 수행하는 형태로 이루어졌다.

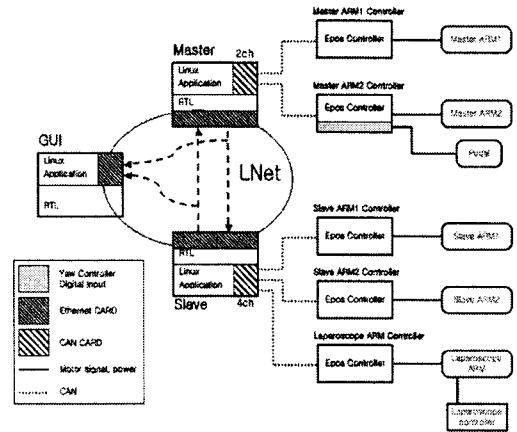


그림 3. 시스템 인터페이스

2.1.4 복강경 수술 로봇의 로봇 각 축의 서보 제어

복강경 수술로봇의 전자 제어 시스템은 다음과 같이 크게 두 가지로 나뉜다.

- 로봇 각 축의 서보제어기
- 서보제어기와 로봇 제어기간의 통신

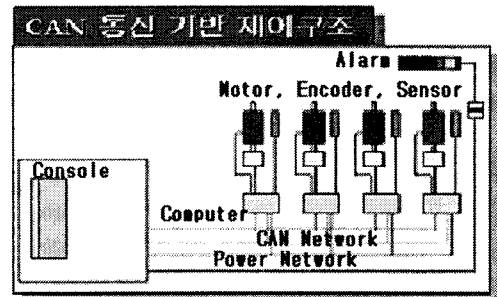


그림 4. CAN 통신 기반 제어 구조

각 단위 축 제어기는 마스터-슬레이브 로봇 간의 동기 동작을 위해, 상호 대응되는 마스터-슬레이브 제어기 간의 데이터 통신이 필요하고, 전체 시스템을 감시하는 주 제어기와와의 통신도 필요하다. 이러한 통신을 위해 그림 4와 같이 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 각 로봇의 축마다 한 개의 독립된 CAN 채널을 갖도록 하고, 모터/엔코더 제어 신호가 상호 교환되도록 각 축 당 500 패킷/초의 데이터를 발생시키도록 제안하였다.

로봇의 각 축을 구동시키는 모터는 사용 축의 목적 및 용량에 따라 테이블 1과 같이 소형의 BLDC 및 직류 전동기를 사용 하였고 이들의 위치와 속도를 제어하는 각 단위 축 제어기는 상용 서보 제어기(EPOS, MaxonMotors Inc., Swiss)를 사용하였다.

구분	선정기준	최고속도	최대전속	최대전속	기어효율	중단부하	기어비	최종단
		rpm	a	mm/s	%	Nm		mm
Actuation	1. 무게	5000	1	4.4	81%	0.15	19	67.71
	2. 최종단토크							
	3. 속도							
	4. 적경							
Translation	2. 최종단토크	5000	1	4.4	81%	0.15	29	103.35
	3. 속도							
	4. 적경							
	기타 비전피의 유사성							
Rotation	기타 비전피의 유사성	13600	0.188	3.07	75%	0.3	67	154.26
	기타 비전피의 유사성							
	기타 비전피의 유사성							
	기타 비전피의 유사성							
Pitch	기타 비전피의 유사성	9500	0.536	12.3	48%	2.7	370	223.99
	기타 비전피의 유사성							
	기타 비전피의 유사성							
	기타 비전피의 유사성							
Yaw	1. 최종단토크	11000	1.21	26.1	70%	7.5	86	1571.22
	2. 표적이코 정확							
	3. 무게							
	기타 비전피의 유사성							

표 1. 각 축에 사용된 모터 파라미터

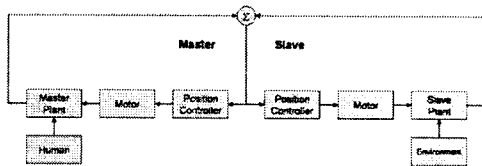


그림 5. 위치-위치 제어

모터 제어는 그림 5와 같이 지령위치 추종을 위한 위치 제어 루프와 그 출력인 속도 명령 추종을 위한 속도 제어 루프의 두 단계로 구성되며, 제어 기법은 각각 비례-적분-미분 제어와 비례-적분 제어를 사용하였다. 계수 조정은 그림 6과 같이 전용 자동-튜닝 계수 산출 방법을 사용하여 각 모터에 적합한 계수를 산출해 낸다.

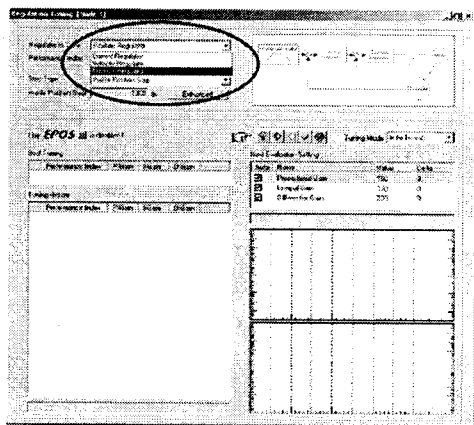


그림 6. 자동-튜닝 계수 산출기

2.1.5 제안된 복강경 수술 로봇의 로봇 제어 기법

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 구조가 기구학적으로 각 축의 운동이 1:1로 대응되는 형태로 설계되어 있으므로, 고도의 역기구학 해석을 할 필요가 없다. 따라서, 본 시스템에서는 슬레이브 로봇의 각 단위 축이 대응되는 마스터 로봇의 축의 위치변화를 그 목표 위치 지령으로 받아 그대로 추종하도록 하는 단순한 방법으로도 충분히 슬레이브 로봇 구동의 구현이 가

능하였다.

비정상적인 상황에서의 안정성 유지를 위해, 각 축의 구동에 대한 절대 한계 값을 설정하여 과도한 위치 이동에 대한 동작 방지 기능을 구현하였고, 1초 간격으로 각 모터의 상태정보를 주 제어기에서 감시하여 지속적으로 모니터링 하도록 구현하였다.

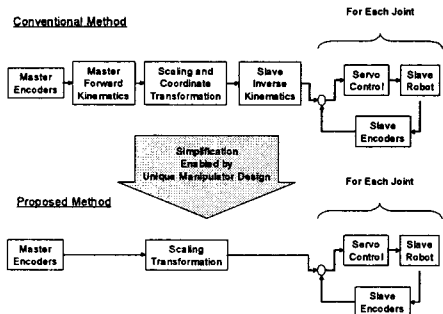


그림 7. 로봇 제어 기법의 비교

2.2 실험 결과

제안된 시스템의 신뢰도 및 안정성을 검증하기 위해 실제 수술 시와 유사한 수준의 동작 부하 및 속도로 동작시키면서, 로봇의 동작을 시험하였다.

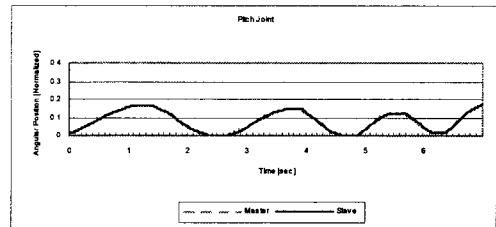


그림 8. Pitch 축 위치 추종 파형

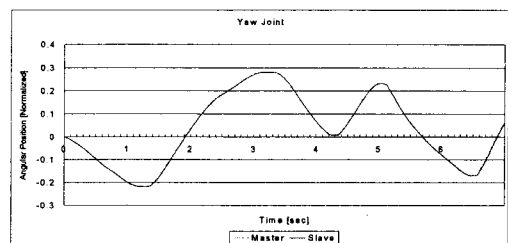


그림 9. Yaw 축 위치 추종 파형

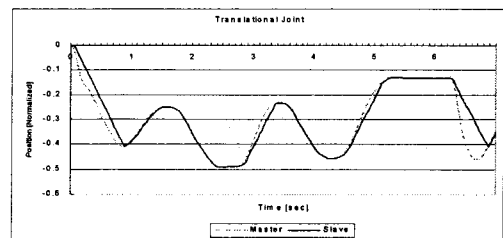


그림 10. Translation 축 위치 추종 파형

[참 고 문 헌]

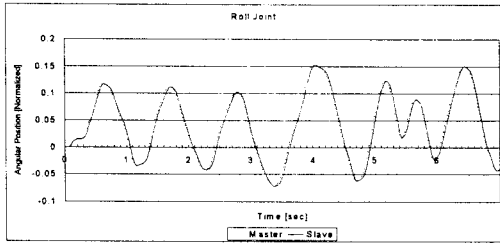


그림 11. Rotation 축 위치 추종 파형

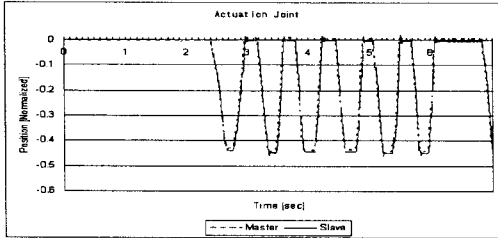


그림 12. Actuation 축 위치 추종 파형

그림 8 - 12는 실제 시스템의 동작 시의 5개의 조작관절 축의 위치 추종 파형이다. 본 실험에서는 각 조작관절의 동작범위(-1~1)를 설정하여 마스터 로봇의 위치 변화에 따른 슬레이브 로봇의 위치 추종을 측정하였다. 사용자의 마스터 로봇의 조작에 의한 슬레이브 로봇의 추종이 원활하게 이루어짐을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 실시간 운영체제 기반의 복강경 수술 로봇의 모터제어 시스템에 대하여 논하였다. 본 시스템은 다른 로봇 시스템과는 달리 마스터 로봇과 슬레이브 로봇의 조작관절의 동작이 1:1로 대응되어 복잡한 제어 알고리즘이 필요하지 않고 대응 성능이 빠르고 안정하며 제어가 쉬운 장점을 가진다. 또한, 수술 시와 유사한 수준의 동작 부하 및 속도 시험을 통하여 시스템의 추종 성능이 우수한 시스템임을 확인하였다.

현재 시스템의 안정성과 정확성을 향상시키는 연구와 시뮬레이터 프레임워크 개발 및 환자영상기반 모델 통합에 관한 연구가 진행 중이다.

[1] 이정찬, 박준우, 홍소영, 이철한, 신정욱, 박상재, 조영호, "A new compact slave manipulator for telerobotic abdominal surgery" 17th International Conference of Society for Medical Innovation and Technology, 2005

[2] V. Sangveraphunsiri, T. Karmwilaikom, "Development of a Six Degree-of-Freedom Master-Slave Manipulator System", Proceeding of the 15th Thailand Mechanical Engineering Network, Nov, 2001.

[3] Cleary K, Nguyen C. "State of the Art in Surgical Robotics: Clinical Applications and Technology Challenges." Comp Aid Surg 6:312-328, 2001

[4] Surgery Robotics: The Early Chronicles. Surgical Laparoscopy, Endoscopy & Percutaneous Techniques, 12(1):6-12, 2002

[5] Garcia-Ruiz A, Ganger M, Miller JH, Steiner CP, Hanh JF, "Manual vs Robotically Assisted Laparoscopic Surgery in the Performance of Basic Manipulation and Suturing Tasks." Arch Surg, 133(9):957-961, 1998

[6] Clement-Claude A. "Laparoscopic Radical Prostatectomy with a Remote Controlled Robot." J Urol, 165:1964-1966, 2001

[7] Anthony R. Lanfranco et al., "Robotic Surgery: A Current Perspective", Ann Surg 239:14-21, 2004 2. <http://www.intuitivesurgical.com>

[8] 이정찬, 박찬영, 이정주, 남경원, 정진한, 민병구, 조영호, "복강경 수술을 위한 로봇 팔 개발", 대한의용생체공학회 춘계학술대회, pp.399~400, 2002.

[9] 최재순, 박준우, 신정욱, 홍소영, 이철한, 조영호, "복강경 로봇 수술 시뮬레이션을 위한 프레임워크 개발". 대한의용생체공학회 춘계학술대회, 2005.

[10] 최재순, 박준우, 신정욱, 홍소영, 이철한, 조영호, "복강경 수술 로봇을 위한 실시간 운영체제 기반 분산 제어 시스템". 대한의용생체공학회 추계학술대회, 2005.