

고주파 절제술을 위한 심장전극도자 원격 제어 로봇 플랫폼의 개발

논 문
60-7-19

Development of a Cardiac Catheter Remote Control Robot Platform for Radiofrequency Ablation Intervention

박 준 우* · 송 승 준** · 이 정 찬*** · 최 혁§ · 이 정 주§§ · 최 재 순†

(Jun-Woo Park · Seung-Joon Song · Jung-Chan Lee · Hyuk Choi · Jung-Joo Lee · Jaesoon Choi)

Abstract - Radiofrequency ablation through cardiac catheterization is one of minimally invasive intervention procedures used in drug resistant arrhythmia treatment. To facilitate more accurate and precise catheter navigation, systems for robotic cardiac catheter navigation have been developed and commercialized. The authors have been developing a novel robotic catheter navigation system. The system is a network-based master-slave configuration 3-DOF (Degree-Of-Freedom) robotic manipulator for operation with conventional cardiac ablation catheter. The catheter manipulation motion is composed of the translation (forward/backward) and the roll movements of the catheter and knob rotation for the catheter tip articulation. The master manipulator comprises an operator handle compartment for the knob and the roll movement input, and a base platform for the translation movement input. The slave manipulator implements a robotic catheter platform in which conventional cardiac catheter is mounted and the 3-DOF motions of the catheter are controlled. The system software that runs on a realtime OS based PC, implements the master-slave motion synchronization control in the robot system. The master-slave motion synchronization performance tested with step, sinusoidal and arbitrarily varying motion commands showed satisfactory results with acceptable level of steady state error. The developed system will be further improved through evaluation of safety and performance in in vitro and in vivo tests.

Key Words : Cardiac catheter, Navigation, Arrhythmia, Master-slave robot, Teleoperation

1. 서 론

부정맥 질환의 발병률은 심장질환의 발병률 증가와 함께 지속적으로 증가하고 있으며, 현재 부정맥 질환을 앓고 있는 사람은 전인구의 2-4 %에 해당하고, 특히 심방세동과 같은 퇴행성 부정맥 질환은 60세 이상 인구의 5 %, 80세 이상의 15 %에서 발견되고 있다[1]. 최근 빠르게 발전하고 있는 최소 침습적인 부정맥 고주파 전극도자 절제술은 질환에 따라 75-98 %의 완치율을 보이며, 특히 심방세동과 같은 약물 치료가 어려운 부정맥의 경우, 90 % 이상의 수술 성공률을 보이고 있다. 그러나 수기에 의존하는 기존의 고주파 전극도자 절제술(cardiac catheter radio-frequency ablation)은 수술자의 경험과 능력 등에 따라 그 수술 결과가 상이해질 수

있으며, 수술 결과가 좋지 않을 경우 불필요한 심장 손상이 발생할 수 있고, 수술자에게 합병증 및 장시간의 방사선 피폭과 같은 후유증을 남길 수 있다는 문제점이 존재한다. 특히, 심방세동과 같이 장시간 다량의 고주파 에너지로 치료를 요하는 수술의 경우, 수술자는 다량의 방사선에 피폭되며, 수술자의 피로누적, 불필요한 절제로 인한 폐정맥 협착, 식도손상과 같은 합병증의 위험이 따른다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 많은 연구가 진행 중에 있으며, 특히 고주파 절제술을 요하는 표적에 정확하고 정밀하게 심장전극도자(cardiac catheter)를 접근 및 유지시킬 수 있는 전극도자 유도용 로봇 시스템의 개발 및 응용이 주요한 주제의 하나가 되고 있다. 로봇을 이용한 수술 혹은 중재시술(intervention)은 사람에 비하여 좁고 협소한 공간 내에서 정밀하고 안정되게 동작이 제어 될 수 있으며, 수행명령에 대한 반복성이 우수하다는 장점을 가지고 있어 많은 의료 분야에서 다양하게 사용 및 연구되고 있다[2].

로봇의 세밀한 제어 및 정확성과 사람의 경험과 숙련된 기술을 결합한 시스템 중 대표적인 것은 원격제어 시스템(teleoperation system)이다. 이러한 원격제어 시스템은 마스터-슬레이브 구조의 복합시스템으로서 사람의 힘을 증감시키거나 위치제어 정밀도를 향상시켜주는 장점으로 의료용 로봇 특히 수술 및 중재시술 시스템에서도 그 사용 예를 많이 찾아볼 수 있다[3]. 대표적인 원격 수술로봇은 Intuitive Surgical, Inc.의 da Vinci 수술 로봇을 들 수 있으며, 이 수

* 비 회 원 : 고려대 의대 의공학교실 연구장사, 고려대 의대 한국인공장기센터

** 정 회 원 : 고려대 의대 협동과정의생체공학전공 박사과정

*** 비 회 원 : 서울대 의학연구원 의용생체공학연구소 선임연구원

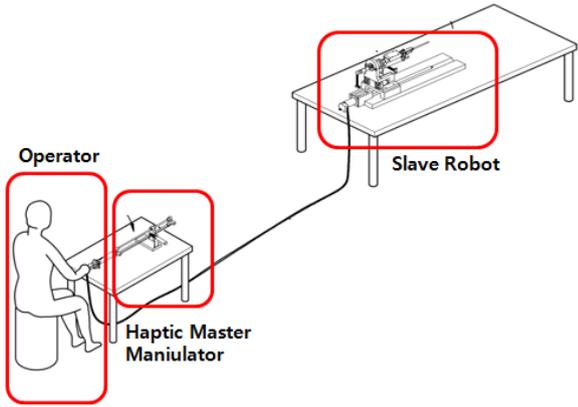
§ 비 회 원 : 고려대 구로병원 의료기기임상시험센터 연구교수

§§ 비 회 원 : 고려대 의대 한국인공장기센터 연구교수

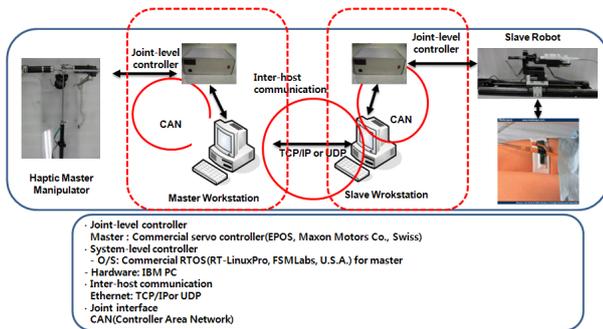
† 교신저자, 정회원 : 고려대 의대 한국인공장기센터 연구교수
E-mail : aequitas@korea.ac.kr

접수일자 : 2010년 11월 24일

최종완료 : 2011년 5월 11일



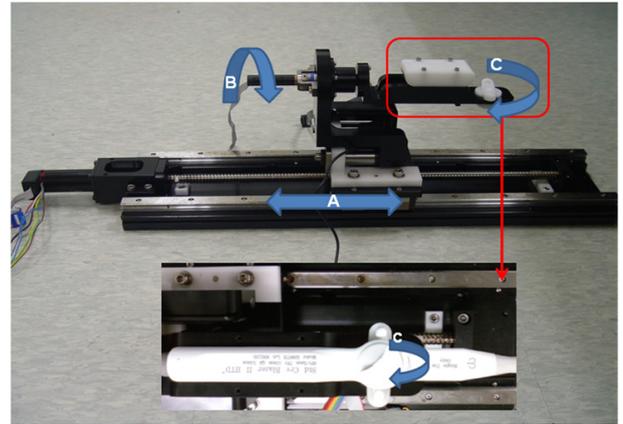
(a)



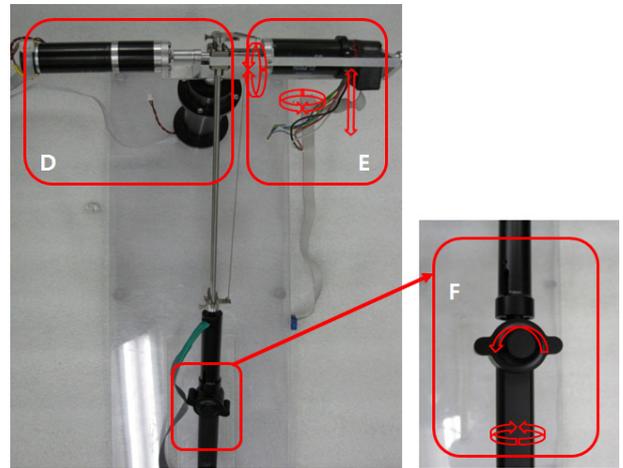
(b)

그림 1 시스템의 구성도: a) 전체 개념도 및 b) 상세 구성도
 Fig. 1 System configuration diagram: a) overall concept diagram, b) detail configuration

술 로봇은 최소침습수술(Minimally Invasive Surgery, MIS) 분야에서 전 세계적으로 많이 사용되고 있으며, 국내에서도 현재 유일하게 임상 적용이 가능한 로봇 수술 시스템이다. 원격제어 로봇 시스템 응용은 MIS 분야 뿐만 아니라, 고주파 전극도자 절제술 및 혈관 성형술 등에서도 기존 수술 혹은 중재시술의 정밀도를 유지하면서 합병증과 방사선 피폭량을 줄이는 등 부가적 효과를 도모할 수 있어 많은 관련 연구가 진행되고 있다[4-12]. 특히 Negoro 등은 3 자유도(Degrees of Freedom, DOF)의 전극도자 슬레이브 시스템을 혈관접근 신경수술을 위해 개발한 바 있으며[8,9], Cercenelli 등은 3 자유도 전극도자 슬레이브 시스템을 개발하고 동물 실험을 통한 유용성 평가를 통해 원격제어 구조의 활용이 일반 수작업 시술 보다 시술 시간을 단축시키는 효과가 있음을 보고한 바 있다[10]. Patel 등은 형상기억합금을 이용한 굴절 전극도자를 이용한 시스템에 관한 연구를 다수 보고하고 있으며, 특히 혈관 영상의 자동패턴인식에 기반 한 전극도자 자동제어 개념도 제안한 바 있다[11]. Ganji 등도 전극도자 움직임의 자동제어와 관련하여 사용자의 삽입 유도 과정을 기억한 다음 이를 명령 경로로 삼아 전극도자의 퇴거 과정을 자동화하는 시도를 보고한 바 있다[12]. 상용화된 시스템으로는 미국을 중심으로 대표적인 2개 회사, Stereotaxis, Inc. 와 Hansen Medical, Inc.의 상용화된 전극도자 유도 로봇시스템이 있다[13, 14, 17, 18]. Stereotaxis의 시스템은 3



(a)



(b)

그림 2 로봇 시스템 외형: a) 마스터 로봇 및 b) 슬레이브 로봇 (A: 이송운동, B: 회전운동, C: 노브회전운동, D: 마스터핸들 침부의 자세(좌/우, 상/하) 계측, E: 마스터 핸들 이송운동, F: 마스터 핸들 - 노브회전 및 자세회전 구동부 포함)

Fig. 2 External views of the developed manipulators: a) the master robot, b) the slave robot (A: the translation motion, B: the roll motion, C: the knob roll motion, D: the yaw and pitch motion of the master handle, E: the translation motion of the master handle, F: the master handle and the knob roll and the handle roll motion)

차원 자기장 내 자유 부유 도자 극체 제어 방식으로 독창성을 가지고 있으나, 정밀한 대형 전자기장 차폐 시설이 필요하고, 장비 역시 대형 영구자석에 기반 한 시스템으로 고가여서 활발한 보급은 이루어지지 않고 있으며, 이에 반해 전기기계식 고자유도 로봇 형태로 장점을 가지는 Hansen Medical의 시스템은 현재 상용화 초기 단계인데, 2.7 mm 크기의 전용 전극도자를 사용해야 한다는 제약으로 인해 기존의 성능이 우수하고 크기가 다양한 상용 전극도자를 활용하지 못하는 단점을 가지고 있다. 상용의 전극도자의 연결이

가능하고, 합리적인 가격의 정밀하고 독창성 있는 전극도자 로봇 시스템의 개발은 여전히 해결되어야 할 과제라고 할 수 있다. 본 논문에서는 상용 심장전극도자(이하 카테터) 장착형의 3 자유도 마스터-슬레이브 구조 전극도자 원격제어 로봇시스템의 시작품 개발과 체의 실험을 통한 시스템의 위치제어 성능 평가 결과를 다루고자 한다.

2. 시스템 구성 및 성능 시험

2.1 전체 시스템 구성

고주파 절제술을 위한 원격 제어 카테터 로봇 시스템은 수술자가 카테터를 원격에서 용이하고 정밀하게 제어할 수 있도록 하고 수술자의 방사선 피폭량을 감소시키며 시술의 정밀성을 높여 환자의 치료 효과를 높이기 위한 시스템이다. 이러한 원격제어 카테터 로봇 시스템은 수술자가 직접 수술을 할 수 있는 조종로봇(마스터 로봇)과 피수술자에게 수술을 수행하는 수술로봇(슬레이브 로봇), 마스터/슬레이브 로봇을 제어 할 수 있는 제어 시스템으로 크게 구성된다(그림 1). 슬레이브 로봇은 좌우측 서혜부의 대퇴동맥이나 대퇴정맥 등을 통하여 삽입된 카테터의 몸체가 로봇 플랫폼의 상단부에 장착되는 형태로 연결되며, 카테터의 길이 방향의 이송운동, 길이 축을 회전축으로 회전하는 회전 운동 및 길이 축과 수직인 회전축으로 카테터 첨부의 굴곡 운동을 수행하도록 구조를 설계하였다. 마스터 로봇은 이에 동일하게 대응되는 3개의 자유도를 구현하였다. 제어시스템은 마스터/슬레이브 모션 동기화 제어와 필요에 따라 추가적으로 구현되는 햅틱 반향 기능 등 하드웨어 수준의 제어 기능을 수행하며, 마스터/슬레이브 로봇의 각 관절운동을 위해 각 축의 모터는 허용 전류량 및 토크를 고려하여 직류 전동기(DC motor) 및 브러시리스 직류 전동기(BLDC motor)(RE25 외 5종, Maxon Motor AG, Switzerland)로 구성하였으며, 이들의 위치제어 및 제한된 힘을 제어하기 위한 전류제어를 위한 각 단위 축 제어기(joint-level controller)로는 상용 서보 제어기(EPOS 24/5, Maxon Motor AG, Switzerland)를 적용하였다. 또한 마스터/슬레이브 로봇 간의 통신 및 힘 제한 제어 등 상위 수준의 계산을 수행하기 위한 PC 기반의 호스트 제어기를 마스터, 슬레이브 각각에 사용하였다. 호스트 제어기들은 Linux 기반의 상용 실시간 운영체제(RTLinux-Pro™, FSMLabs, Inc., U.S.A)를 운영 체제로 사용하였다. 각종 제어 신호 및 시스템간의 데이터 통신 및 공유를 위해기가비트 이더넷 망에 각 호스트 제어기 및 사용자 인터페이스 시스템들이 버스 구조로 연결되는 형태로 구성하였다.

2.2 마스터 및 슬레이브 로봇의 기계 구조

수술자의 카테터 조작 동작은, 카테터의 이동방향을 따라 이동하는 이송운동(translation), 이 방향을 회전축으로 하는 회전운동(roll) 및 카테터 첨부의 굴절을 조정하기 위한 카테터 핸들에 부착된 노브(knob)를 회전하는 노브회전운동의 3개 자유도로 구성된다. 마스터 및 슬레이브 로봇의 기계 구

조는 이와 같은 동작 자유도를 구현하도록 설계하였다(그림 2). 마스터 로봇은 카테터를 실제 다루는 것과 유사한 느낌을 재현할 수 있도록 외형을 구성한 핸들 부분과 이 핸들의 공간 상의 움직임에 포착하는 플랫폼 부분으로 크게 구성된다. 마스터 핸들은 노브회전 운동 명령을 받기 위한 노브 부분과 축 회전 명령을 받기 위한 축 회전 부분이 결합되어 구성되어 있으며, 플랫폼 부분은 일반적인 구형 좌표계 로봇의 구조와 유사하게 구성하여 마스터 핸들 첨부의 공간상의 위치로부터 이송운동 명령을 받아들일 수 있도록 설계하였다. 노브회전을 제외한 나머지 모든 조인트에는 햅틱 힘 반향이 가능하도록 모터 및 동력전달 구조를 포함하였다. 주된 운동축인 이송축은 와이어 구동 방식을 사용하여 기구의 후진성(backdrivability)을 높이도록 하였다. 슬레이브 로봇은 마스터 로봇과 대응하여 카테터의 이송운동, 자세회전 및 혈관 내에서의 굴곡 제어의 3 자유도로 구성하였고, 카테터 첨부에 작용하는 반력을 측정하여 마스터 로봇에 전달할 수 있도록 이송운동 축 구조 내에 힘 센서(UMM-5kgf, DaCell, Inc., Korea)를 포함하여 설계하였다. 이를 통해 슬레이브 로봇과 연결된 카테터 첨부의 휘어짐으로 인한 반력 혹은 외부 조직과의 상호 작용에 의한 반력의 검출을 구현하고자 하였다.

2.3 제어 시스템

마스터/슬레이브 로봇의 각 관절운동을 위해 각 축의 모터는 허용 전류 및 토크를 고려하여 직류 전동기 및 브러시리스 직류전동기(RE25 외 5종, Maxon Motor AG, Switzerland)로 구성하였으며, 이들의 위치 및 전류를 제어하기 위한 각 단위 축 제어기로는 상용 서보제어기(EPOS 24/5, Maxon Motor AG, Switzerland)를 사용하였다. 마스터/슬레이브 로봇의 제어에는 고용량의 연산이 필요하며 다양한 하드웨어 인터페이스의 적용이 필요하므로, 전체 시스템을 운영하기 위해 각 로봇에 개별 워크스테이션을 사용하였다. 각 단위 축 제어기에 대한 서보 제어기의 제어 기능을 실시간으로 처리하고, 고용량의 연산을 위한 병렬처리 시스템 형태로의 확장이 용이하게 하는 등의 전체 시스템의 운용을 위하여 리눅스 기반의 상용 실시간 운영체제(RTLinux-Pro, FSMLab Inc., U.S.A)를 채택한 워크스테이션들의 클러스터 형태를 적용하였다.

또한, 각종 제어 신호 및 시스템간의 데이터 통신 및 공유를 위해기가비트 이더넷 망에 각 단위 워크스테이션들이 버스 구조로 연결되는 형태로 제어 시스템을 구성하였다. 이 연결은 범용 이더넷 프로토콜인 TCP/IP 또는 UDP/IP 프로토콜을 선택적으로 사용 가능하도록 하여 타 장비와의 인터페이스 및 확장이 용이한 구조로 구현되었다. 또한 개별 서보 제어기와 워크스테이션 간의 인터페이스는 직렬버스 방식의 일종으로 널리 입증되고 적용되고있는 CAN(controller area network) 프로토콜을 적용하였다. 또한, 본 시스템에서는 로봇의 각 축마다 고유한 CAN주소를 부여하고, 모터/엔코더 제어 신호가 상호 교환되도록 각 축 당 1000 패킷/초의 데이터를 발생시킬 수 있도록 구성하였다. 이는 모션 샘플링 주기로 1 kHz에 해당하며, 한 개의 CAN 채널에서 3개의 로봇 축을 담당하도록 하였다.

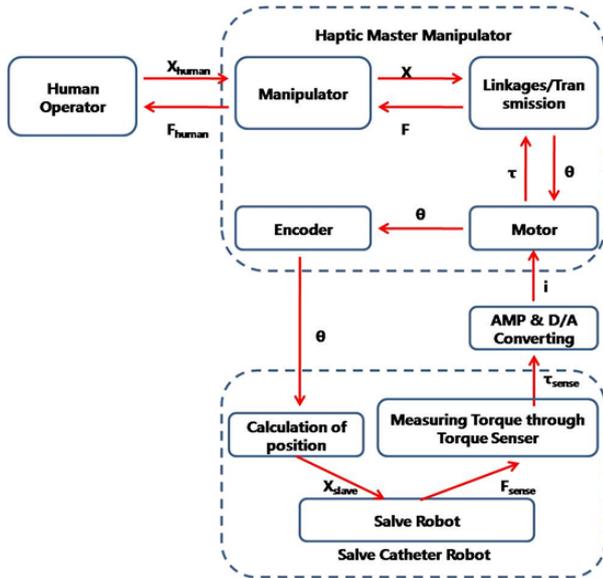


그림 3 제어 시스템 신호 흐름도
Fig. 3 Control signal flow diagram

이더넷 통신을 통해 전송되는 마스터의 현재 위치로부터 슬레이브에 해당 각 축의 위치 명령 값을 생성하고, 이를 해당 CAN 버스를 통해 각 서보 제어기에 전달하면, 각 축의 모터의 위치 및 전류의 제어는 각 서보 제어기가 수행하는 형태로 전체 시스템의 동작이 이루어진다. 이를 위한 전체 시스템의 데이터 흐름 통제 프로세스는 마스터 로봇 제어 워크스테이션에 두어, 모든 시스템 요소에서 발생하는 데이터 및 제어 신호가 이 프로세스에 집중된 후, 다시 필요한 각 세부 대응 요소로 중계되도록 구성하였다. 슬레이브 각 축의 위치 제어는 1 kHz의 PID 제어를 통해 구현되었으며, 마스터의 모터들은 10 kHz의 PD 전류제어를 통해 구동된다. 이를 위한 제어 계수들은 실험적으로 획득하였다. 또한, 실시간 운영체제 하의 상위 제어기의 제어 루프 수행 속도는 1 kHz이다. 제어 시스템의 전체 흐름도를 그림 3에 나타내었다.

3. 성능 평가

3.1 평가 방법

개발된 시스템의 성능을 확인하기 위하여, 실제 수술 시와 유사한 수준의 동작 부하 및 속도로 동작시키면서 시험하였다. 이송, 회전, 노브 세 동작축에 대하여 위치 명령을 계단파, 정현파, 임의 동작의 세 가지 형태로 각각 인가하고 응답을 관찰하였다. 마스터와 슬레이브 시스템 사이는 일반적인 수술실의 환경을 고려하여 단일 기가비트 이더넷 허브에 유선 연결된 로컬 네트워크로 연결하고, 원격제어 환경에서 동작 성능 시험이 이루어지도록 하였다. 각 동작축에 대해 계단파의 경우 15세트 이상, 정현파의 경우 30 사이클 이상, 임의 동작은 5초 간 이상, 반복되는 명령 혹은 임의의 조작 동작 명령이 마스터 시스템으로부터 슬레이브로 전송

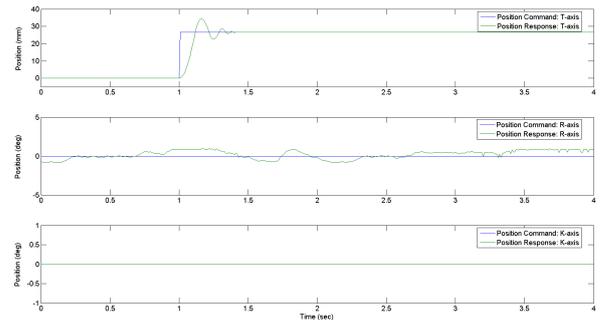


그림 4 이송축 추종성능 실험결과(계단파 명령): 26.5 mm의 계단 파형 입력을 인가하였을 때, 이송축의 응답 오버슈트는 평균 8.03 mm(30.3%), 표준편차 0.163 mm, 최대 8.25 mm, 최소 7.84 mm로 나타났다. 세틀링 시간(응답이 명령치의 2% 이내의 오차를 보이는 시간)은, 평균 0.361 초, 표준편차 0.0196 초, 최대 0.37 초, 최소 0.29 초로 나타났다. 이송축에만 위치 명령을 주었을 때, 상대적으로 기계 구조상의 마찰 저항이 작은 회전(R) 축에서는 이송에 따른 진동의 영향으로 1도 이내의 움직임이 감지되었으며, 내부 마찰력이 큰 노브(K) 축에서는 유의한 움직임이 발생하지 않음이 관찰되었다. (전체 16 회 측정된 데이터 중 1 회분만 도시)

Fig. 4 The results of the translation joint position control performance test (step input): At the step input of 26.5 mm, the response overshoot in the translation joint was avg. 8.03 mm(30.3%) with std. 0.163 mm, max. 8.25 mm, and min. 7.84 mm. The settling time(the time until the response error decreases under 2%) was avg. 0.361 sec with std. 0.0196 sec, max. 0.37 sec, and min. 0.29 sec. When only the translation joint command was input, the roll joint that has relatively low frictional resistance showed spontaneous vibrative movement less than 1 deg due to the overall vibration caused by the translation joint movement, while no significant movement was observed in the knob joint that has high mechanical resistance in the mechanism. (The graph displays one data set out of total 16 data sets.)

되도록 하고, 슬레이브의 응답을 관찰하였으며, 반복횟수 등은 유사한 타 연구사례에 준하여 정하였다[15].

3.2 이송축 실험 결과

그림 4는 이송축을 대상으로 계단파 명령을 인가한 결과 응답 곡선이다. 마스터 로봇의 급격한 계단파 명령에 대하여 슬레이브 로봇의 위치 추종은 원활히 이루어짐을 보이나, 최대 오버슈트가 20% 정도로 크고 지연시간이 긴 문제점을 확인하였다. 이는 슬레이브 로봇의 이송축이 기저부에 많은 하중이 분포하는 구조에 기인하는 것으로 판단된다.

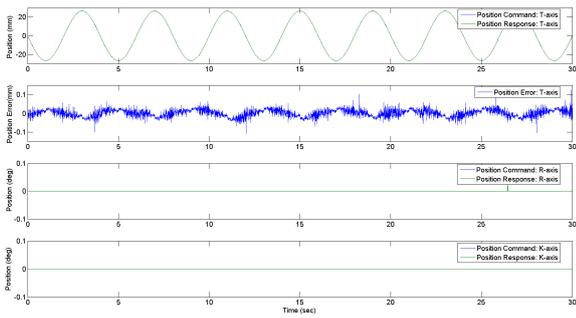
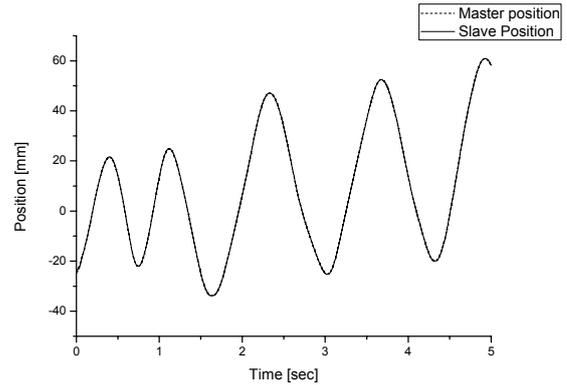


그림 5 이송축 추종성능 실험결과(정현파 명령): 이송축의 위치 오차는 평균 0.0141 mm, 표준편차 0.0179 mm, 양의 최대오차 0.124 mm, 음의 최대오차 -1.60 mm 수준이었다. 이송축에만 위치 명령을 주었을 때, 회전(R) 축에서만 간헐적으로 드물게 엔코더 펄스 1개 정도의 움직임이 감지되었으며, 노브(K) 축에서는 유의한 움직임이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. (141 사이클, 563 초간 측정 한 데이터에서 처음 30 초 구간만 도시)

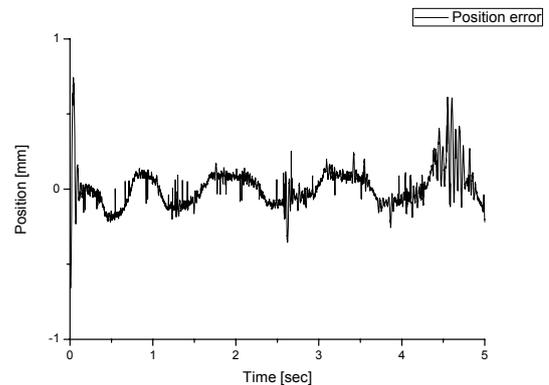
Fig. 5 The results of the translation joint position control performance test (sinusoidal input): The translation joint position error was avg. 0.0141 mm with std. 0.0179 mm, positive max. 0.124 mm, and negative max. -1.60 mm. When only the translation joint command was input, the roll joint only showed intermittent very minute jerk motion of 1 encoder pulse order, while no significant movement was observed in the knob joint. (The graph displays the first 30 sec interval out of total 141 cycles, 563 sec.)

구체적으로는 26.5 mm의 계단 파형 입력을 인가하였을 때, 이송축의 응답 오버슈트는 평균 8.03 mm(30.3 %), 표준편차 0.163 mm, 최대 8.25 mm, 최소 7.84 mm로 나타났다. 세틀링 시간(응답이 명령치의 2 % 이내의 오차를 보이는 시간)은, 평균 0.361 초, 표준편차 0.0196 초, 최대 0.37 초, 최소 0.29 초로 나타났다. 이송축에만 위치 명령을 주었을 때, 상대적으로 기계 구조상의 반발 마찰력이 작은 회전축에서는 이송에 따른 진동의 영향으로 1도 이내의 움직임이 감지되었으며, 내부 마찰력이 큰 노브축에서는 유의한 움직임이 발생하지 않음이 관찰되었다.

그림 5는 이송축을 대상으로 정현파 형태의 위치 명령을 인가하였을 때의 위치 응답 결과이다. 0.25 Hz, ±53.06 mm의 정현파 위치 명령에 대해, 슬레이브 로봇은 원활히 위치를 추종함을 확인하였다. 몇몇 지점에서 외란에 의한 것으로 보이는 추종 파형의 일그러짐이 발생하였으나, 제어기에 의한 빠른 보상이 발생하여 위치 오차는 0 으로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 구체적으로는 위치 오차는 평균 0.0141 mm, 표준편차 0.0179 mm, 양의 최대오차 0.124 mm, 음의 최대오차 -1.60 mm 수준이었고, 이송축에만 위치 명령을 주었을 때, 회전축에서만 간헐적으로 드물게 엔코더 펄스 1개 정도의 움직임이 감지되었으며, 노브축에서는 유의한 움직임이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

그림 6 이송축 추종성능 실험결과(임의 조작 명령): a) 명령 및 응답 곡선 및 b) 위치 오차

Fig. 6 The results of the translation joint position control performance test (arbitrary motion input): a) the motion command and the response, b) the position error

그림 6은 이송축을 대상으로 조작자의 임의 조작에 따른 변화를 실험한 결과이다. 마스터 로봇의 위치 변화에 대하여 슬레이브 로봇의 위치 추종이 원활히 이루어짐을 확인하였다. 다만, 위치 오차가 음양으로 진동하는 양상을 띠었는데, 이는 정현파 인가시보다 위치 명령의 주파수가 1 Hz 내외로 상대적으로 높은 상황에서, 계단과 응답에서 보였던 것과 같은 이유에 의해 응답 지연이 발생하여, 위치 오차가 위치 명령과 상관성 있는 음양의 값을 가지게 된 것으로 판단된다.

3.3 회전축 실험 결과

그림 7은 회전축을 대상으로 계단과 명령을 인가한 결과 응답 곡선이다. 마스터 로봇의 급격한 계단과 명령에 대하여 슬레이브 로봇의 최종 위치 추종은 원활히 이루어짐을 보이나, 추종의 전반부에서 최대 오버슈트가 10 % 정도로 발생하는 것을 확인하였으며, 지연시간이 긴 문제점이 있었다. 회전축 역시 이송축의 기저부 보다는 가볍지만 카테터

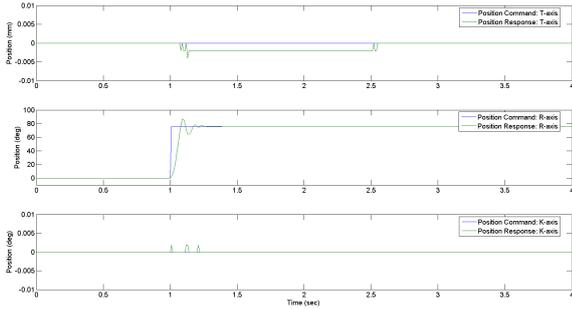


그림 7 회전축 추종성능 실험결과(계단파 명령): 75.7 deg의 계단 파형 입력을 인가하였을 때, 회전축의 응답 오버슈트는 평균 20.1 deg(26.5 %), 표준편차 7.31 deg, 최대 29.4 deg, 최소 10.9 deg로 나타났다. 세틀링 시간은, 평균 0.231 초, 표준편차 0.0206 초, 최대 0.28 초, 최소 0.2 초로 나타났다. 회전축에만 위치 명령을 주었을 때, 이송(T) 축에서는 엔코더 펄스 1 ~ 2개 정도(0.002 ~ 0.004 mm)의 움직임이 감지되었으며, 노브(K) 축에서는 간헐적으로 엔코더 펄스 1 ~ 2개 정도(0.00185 ~ 0.0037 deg)의 움직임만 있음을 확인할 수 있었다. (전체 16 회 측정된 데이터 중 1 회분만 도시)

Fig. 7 The results of the roll joint position control performance test (step input): At the step input of 75.7 deg, the response overshoot in the roll joint was avg. 20.1 deg(26.5 %) with std. 7.31 deg, max. 29.4 deg, and min. 10.9 deg. The settling time was avg. 0.231 sec with std. 0.0206 sec, max. 0.28 sec, and min. 0.2 sec. When only the roll joint command was input, the translation joint showed spontaneous vibrative movement with width of 1 ~ 2 encoder pulse(0.002 ~ 0.004 mm), while the knob joint showed intermittent jerk motion of 1 ~ 2 encoder pulse(0.00185 ~ 0.0037 deg). (The graph displays one data set out of total 16 data sets.)

를 장착하기 위한 장착부 전체를 회전시켜야 하는 구조로 인해 동작 부하가 발생하는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 구체적으로는 75.7 deg의 계단 파형 입력을 인가하였을 때, 회전축의 응답 오버슈트는 평균 20.1 deg (26.5%), 표준편차 7.31 deg, 최대 29.4 deg, 최소 10.9 deg로 나타났다. 세틀링 시간은, 평균 0.231 초, 표준편차 0.0206 초, 최대 0.28 초, 최소 0.2 초로 나타났다. 회전축에만 위치 명령을 주었을 때, 이송축에서는 엔코더 펄스 1 ~ 2개 정도(0.002 ~ 0.004 mm)의 움직임이 감지되었으며, 노브축에서는 간헐적으로 엔코더 펄스 1 ~ 2개 정도(0.00185 ~ 0.0037 deg)의 움직임만 있음을 확인할 수 있었다.

그림 8은 회전축을 대상으로 정현파 형태의 위치 명령을 인가하였을 때의 위치 응답 결과이다. ±37.45 °의 각도로 회전축을 0.25 Hz 정현파 위치 명령에 대해, 슬레이브 로봇이 원활하게 위치를 추종함을 확인하였다. 이송축과 마찬가지로 몇몇 구간에 있어 추종 파형의 순간적 일그러짐이 발생하였으나, PID 제어기에 의한 빠른 보상을 통하여 전반적으

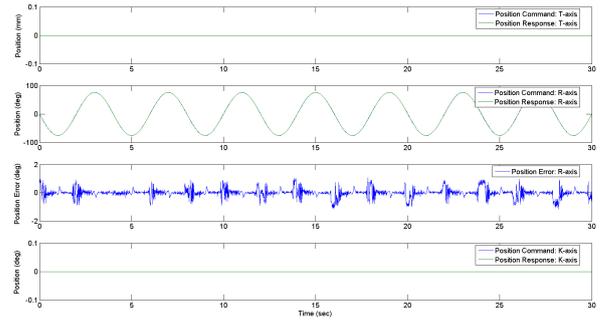


그림 8 회전축 추종성능 실험결과(정현파 명령): 회전축의 위치 오차는 평균 0.208 deg, 표준편차 0.326 deg, 양의 최대오차 1.37 deg, 음의 최대오차 -1.26 deg 수준이었다. 회전축에만 위치 명령을 주었을 때, 이송(T) 축과 노브(K) 축에서는 모두 간헐적으로 드물게 엔코더 펄스 1개 정도의 움직임만이 감지되었다. (35 사이클, 140 초간 측정된 데이터에서 처음 30 초 구간만 도시)

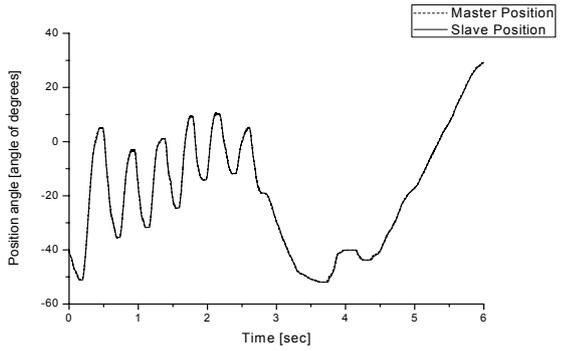
Fig. 8 The results of the roll joint position control performance test (sinusoidal input): The roll joint position error was avg. 0.208 deg with std. 0.326 deg, positive max. 1.37 deg, and negative max. -1.26 deg. When only the roll joint command was input, the translation and the knob joints showed intermittent very minute jerk motion of about 1 encoder pulse. (The graph displays the first 30 sec interval out of total 35 cycles, 140 sec.)

로 만족스러운 추종 성능을 보여주었다. 회전축의 위치 오차는 평균 0.208 deg, 표준편차 0.326 deg, 양의 최대오차 1.37 deg, 음의 최대오차 -1.26 deg 수준이었다. 회전축에만 위치 명령을 주었을 때, 이송축과 노브축에서는 모두 간헐적으로 드물게 엔코더 펄스 1개 정도의 움직임만이 감지되었다.

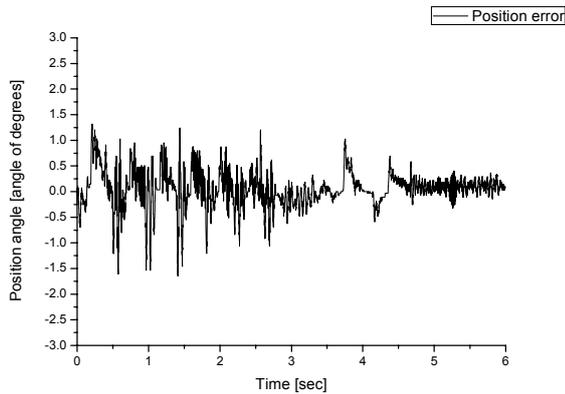
그림 9는 회전축을 대상으로 조작자의 임의 조작에 따른 변화를 실험한 결과이다. 그림 9(a)에서, 마스터 로봇의 변화 명령에 대하여 슬레이브 로봇의 위치 추종은 원활히 이루어짐을 보였다. 다만, 이 경우에서도 이송축과 동일한 양상의 위치 오차 패턴을 확인할 수 있었다(그림 9(b)). 이는 임의 조작 시의 위치 명령의 주파수가 2~3 Hz 정도로 정현파 실험의 10 배에 달하는 동작 속도였다는 점과, 회전축에서도 나타난 응답 지연 현상이 함께 작용한 결과로 추정된다.

3.4 노브축 실험 결과

그림 10은 노브축을 대상으로 계단파 명령을 인가한 결과 응답 곡선이다. 마스터 로봇의 급격한 계단파 명령에 대하여 위치 추종의 전반부에서 최대 오버슈트가 10 % 정도 발생함을 확인하였고, 미소의 지연시간이 발생하는 것이 관찰되었으나, 슬레이브 로봇의 최종 위치 추종은 원활히 이루어짐을 확인하였다. 구체적으로는 18.9 deg의 계단 파형 입력을 인가하였을 때, 노브 축의 응답 오버슈트는 평균 1.51



(a)



(b)

그림 9 회전축 추종성능 실험결과(임의의 조작 명령): a)명령 및 응답 곡선 및 b)위치 오차

Fig. 9 The results of the roll joint position control performance test (arbitrary motion input): a) the motion command and the response, b) the position error

deg (7.97 %), 표준편차 0.124 deg, 최대 1.78 deg, 최소 1.32 deg로 나타났다. 세틀링 시간은, 평균 0.084초, 표준편차 0.0155 초, 최대 0.100 초, 최소 0.070 초로 나타났다. 노브 축에만 위치 명령을 주었을 때, 이송축에서는 움직임이 감지되지 않았으며, 회전축에서는 1 deg 정도의 움직임이 있음을 확인하였다.

그림 11은 노브축을 대상으로 정현파 형태의 위치 명령을 인가하였을 때의 위치 응답 결과이다. $\pm 4.86^\circ$, 0.25 Hz의 정현파 형태의 명령에 따른 슬레이브 로봇의 위치 추종은 원활히 이루어짐을 확인하였다. 몇몇 지점에서 외란의 발생으로 인한 추종 파형의 일그러짐이 발생하였으나, 제어기에 의한 보상이 작동하여 오차가 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 노브 축의 위치 오차는 평균 0.0332 deg, 표준편차 0.0466 deg, 양의 최대오차 0.231 deg, 음의 최대오차 -0.187 deg 수준이었다. 노브 축에만 위치 명령을 주었을 때, 이송축과 회전축에서는 모두 유의한 움직임이 관찰되지 않았다.

그림 12는 노브축을 대상으로 조작자의 임의의 조작에 따른 변화를 실험한 결과이다. 그림 12(a)에서, 마스터 로봇의 변

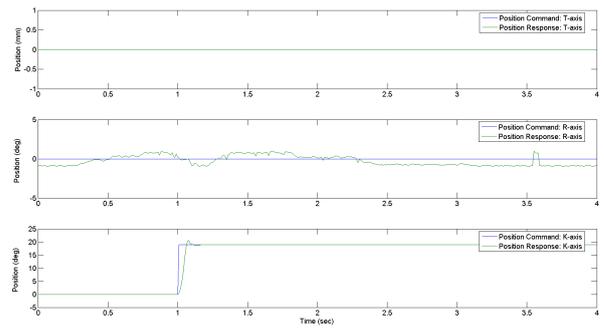


그림 10 노브축 추종성능 실험결과(계단파 명령): 18.9 deg의 계단 파형 입력을 인가하였을 때, 노브 축의 응답 오버슈트는 평균 1.51 deg (7.97 %), 표준편차 0.124 deg, 최대 1.78 deg, 최소 1.32 deg로 나타났다. 세틀링 시간은, 평균 0.084초, 표준편차 0.0155 초, 최대 0.100 초, 최소 0.070 초로 나타났다. 노브 축에만 위치 명령을 주었을 때, 이송(T) 축에서는 움직임이 감지되지 않았으며, 회전(R) 축에서는 1 deg 정도의 움직임이 있음을 확인하였다. (총 15 회 측정된 데이터 중 1 회분만 도시)

Fig. 10 The results of the knob joint position control performance test (step input): At the step input of 18.9 deg, the response overshoot in the knob joint was avg. 1.51 deg(7.97 %) with std. 0.124 deg, max. 1.78 deg, and min. 1.32 deg. The settling time was avg. 0.084 sec with std. 0.0155 sec, max. 0.1 sec, and min. 0.07 sec. When only the knob joint command was input, the roll joint showed spontaneous vibrative movement of about 1 deg, while no significant movement was observed in the translation joint. (The graph displays one data set out of total 15 data sets.)

화 명령에 대하여 슬레이브 로봇의 위치 추종은 대체로 원활히 이루어짐을 보였다. 위치 오차는 앞의 두 이송축 및 회전축에서와 같이 위치 명령의 주기와 동일하게 패턴을 가지며 발생하고 있는 것을 확인하였는데(그림 12(b)), 2 Hz에 달하는 동작 주파수와 슬레이브의 응답 지연이 그 원인으로 보인다.

3.5 타 시스템과의 비교

부정맥 고주파 절제술에서 요구되는 카테터의 동작 속도에 관련하여서는, Tahkur 등은 카테터 이송축 동작 속도와 가속도로서 각각 300 ~ 700 mm/s과 16,000 ~ 30,000 mm/s²이 요구된다고 보았으며, 회전축에 대해서는 11 ~ 43 rad/s, 500 ~ 1000 rad/s²으로 상정하였고[15], Kesner 등은 심장의 승모판(mitral valve)의 동작에 대해 보상 동작이 가능한 것을 조건으로 하여 210 mm/s과 3,800 mm/s²을 이송축 동작 속도와 가속도의 요구조건으로 보았다[16]. 본 연구에서 개발된 시스템은 이송축과 회전축의 속도 및 가속도가 각각 1000 mm/s, 83,000 mm/s² 138 rad/s, 7610 rad/s²으로

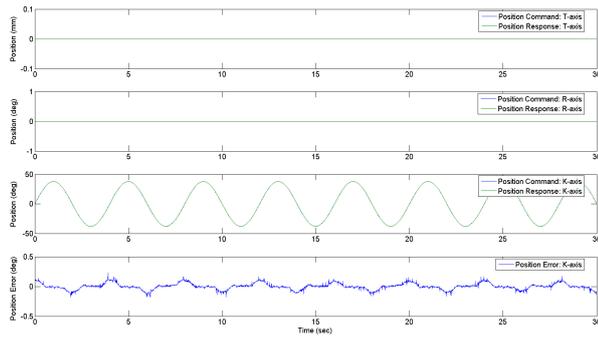


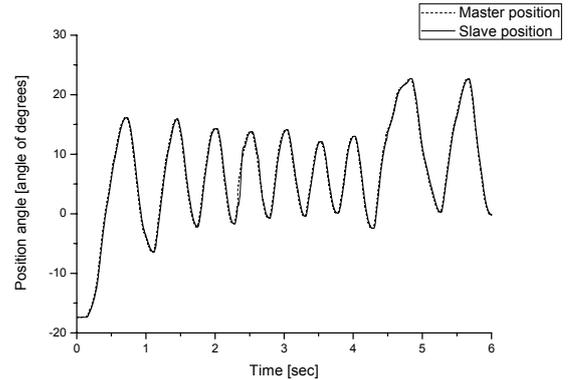
그림 11 노브축 추종성능 실험결과(정현파 명령): 노브 축의 위치 오차는 평균 0.0332 deg, 표준편차 0.0466 deg, 양의 최대오차 0.231 deg, 음의 최대오차 -0.187 deg 수준이었다. 노브 축에만 위치 명령을 주었을 때, 이송(T) 축과 회전(R) 축에서는 모두 유의한 움직임이 관찰되지 않았다. (40 사이클, 160 초간 측정된 데이터에서 처음 30 초 구간만 도시)

Fig. 11 The results of the knob joint position control performance test (sinusoidal input): The knob joint position error was avg. 0.0332 deg with std. 0.0466 deg, positive max. 0.231 deg, and negative max. -0.187 deg. When only the knob joint command was input, the translation and the knob joints did not show significant movement. (The graph displays the first 30 sec interval out of total 40 cycles, 160 sec.)

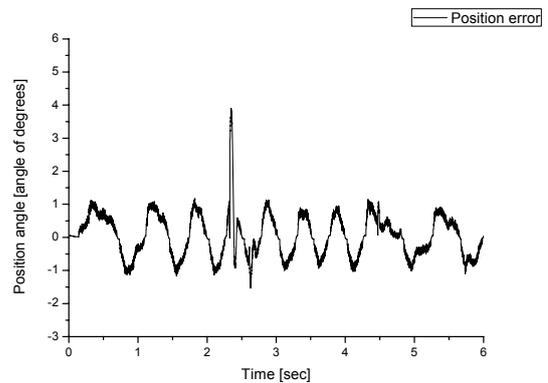
이러한 요구조건을 충분히 상회하는 성능을 나타내었다.

위치제어의 정확성 측면에서는 Thakur 등은 위치와 회전에 대해 각각 1 mm, 1 deg 이내로 보고하고 있으며[15], Faddis 등과 Ernst 등이 보고한 Stereotaxis 시스템의 경우 역시 목표점으로부터 1 mm 및 1 deg 이내의 성능으로 알려져 있다[17-18]. 이에 비교하여 본 시스템은 정현파 시험에서 이송축 평균 오차 0.0141 mm, 회전축 평균오차 0.208 deg (그림 5, 8), 임의 동작 시험에서 이송축 약 0.5 mm 이내, 회전축 약 1 deg 이내로(그림 6, 9) 나타나 만족할만한 수준으로 평가되었다. 다만, 회전축 임의 동작 성능의 경우에는 정역회전이 반전되는 구간에서 간헐적으로 1 deg를 넘는 경우가 발견되어 추후 모터의 개선 등 추가 검토가 필요한 것으로 분석되었다.

응답지연의 측면에서는 Thakur 등이 보고한 시스템의 경우, 회전축 위치 목표점 0 ~ 350 deg에 대해, 계단과 명령 시에 0.2 초 ~ 0.67 초, 삼각파 명령 시에 0.2 초 ~ 0.3 초, 사람이 임의의 동작 명령을 준 경우 평균 0.28 초, 직선축 위치 목표점 0 ~ 350mm에 대해, 계단 명령 시 0.2 ~ 1 초, 삼각파 명령 시 0.2 ~ 0.55 초, 임의 동작 시 0.23 초로, 전체 최소 0.18 초의 응답지연이 보고된 것에 비교하여[15], 본 시스템의 경우 이송축 26.5 mm 계단과 명령에 대해 0.361 초, 회전축 75.7 deg 계단과 명령에 대해 0.231 초로 유사한 수준의 지연 성능을 보이고 있는 것으로 판단되었다.



(a)



(b)

그림 12 노브축 추종성능 실험결과(임의 조작 명령): a) 명령 및 응답 곡선 및 b)위치 오차

Fig. 12 The results of the knob joint position control performance test (arbitrary motion input): a) the motion command and the response, b) the position error

4. 결 론

본 논문에서는 고주파 전극도자 절제술을 위한 카테터 원격 제어 로봇 시스템 및 이의 제어 시스템 개발에 관하여 서술하였다. 상용의 시술용 카테터를 장착 가능한 3자유도의 슬레이브 로봇과, 이의 조작을 위한 마스터 로봇을 고안하고 시작품을 개발하였다. 또한, 시술자의 방사선 피폭을 감소시키기 위해, 네트워크 기반의 원격 제어가 가능한 실시간 제어 시스템을 구현하였다. 여러 상황에서의 동작 성능 평가 후 타 연구그룹의 시스템 및 상용화되어 임상에서 사용 중인 시스템 등과의 비교 고찰을 통해, 개발된 시스템이 카테터 시술에 필요한 기본적인 동작 및 원격제어 성능을 가졌음을 확인하였다. 앞으로, 추가적인 체외 실험 및 동물 실험을 통해 개발된 프로토타입의 안전성 및 임상적용성보다 구체적으로 검증하려는 계획을 가지고 있으며, 힘반향 제어 또는 증강현실 기반의 사용자 인터페이스 등의 적용으로 시술의 편의성 및 정확도를 높이는 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2010년도 문화콘텐츠산업기술지원사업의 연구결과로 수행된 것으로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] W. B. Kannel, R. D. Abbott, D. D. Savage, and P. M. McNamara, "Epidemiologic Features of Chronic Atrial Fibrillation: The Framingham Study," *N Engl J Med*, vol. 306, No. 17, pp.1018-1022, April 1982.
- [2] P. Dario, E. Guglielmelli, B. Allotta, and M. C. Carrozza, "Robotics for Medical Applications," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 3, No. 3, pp.44-56, September 1996.
- [3] S. Y. Ko and D. S. Kwon, "The Force Feedback Method for Master/Slave-Combined System," *Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, 2001.
- [4] E Marcelli, L Cerenelli, and G Plicchi, "A Novel Telerobotic System to Remotely Navigate Standard Electrophysiology Catheters," *Comput. Cardiol.*, vol. 35, No. 1, pp.137-140, January 2008.
- [5] N. Simaan, K. Xu, W. Wei, A. Kapoor, P. Kazanzides, R. Taylor, and P. Flint, "Design and Integration of a Telerobotic System for Minimally Invasive Surgery of the Throat," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 28, No. 9, pp.1134-1153, September 2009.
- [6] C. R. Tercero, Seiichi Ikeda et al., "Catheter Insertion Mechanism and Feedback Control using Magnetic Motion Capture Sensor," *SICE-ICASE Int. Joint Conf.*, pp.1856-1859, 2006.
- [7] C. R. Tercero, S. Ikeda, T. Fukuda, K. Sekiyama, Y. Okada, T. Uchiyama, M. Negoro, and I. Takahashi, "Catheter Insertion Path Reconstruction with Autonomous System for Endovascular Surgery," *IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp.398-403, 2007.
- [8] F. Araf, R. Fuji, T. Fukuda, and M. Negoro, "New Catheter Driving Method Using Linear Stepping Mechanism for Intravascular Neurosurgery," *IEEE Int. Conf. Robot.*, pp.2944-2949, 2002.
- [9] F. Araf, M. Tanimoto, T. Fukuda, I. shimojma, H. Matsuurq, and M. Negoro, "Multimedia Tele-surgery Using Hight Speed Option Fiber Network and Its Application to Intravascular Neurosurgery," *IEEE Int. Conf. Robot.*, pp.878-883, 1996.
- [10] L. Cerenelli, E. Marcelli E, and G. Plicchi, "Initial Experience With a Telerobotic System to Remotely Navigate and Automatically Reposition Standard Steerable EP Catheters," *ASAIO J*, vol. 53, No. 5, pp.523-529, May 2007.
- [11] J. Jayender and R. V. Patel, "Master-Slave Control of an Active Catheter Instrumented with Shape Memory Alloy Actuators," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.759-764, 2007.
- [12] Y. Ganji and F. Janabi-Sharifi, "Kinematic Characterization of a Cardiac Ablation Catheter," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1876-1881, 2007.
- [13] A. Al-Ahmad, J. D. Grossman, and P. J. Wang, "Early Experience with Computerized Robotically Controlled Catheter System," *J. Interv. Card. Electr.*, vol. 12, No. 3, pp.199-202, March 2005.
- [14] N. Marrouche and J. Brachmann, "Preliminary Human Experience Using a Novel Robotic Catheter Remote Control," *Heart Rhythm*, vol. 2, No. 5, p.s63, May 2005.
- [15] Y. Thakur, J. S. Bax, D. W. Holdsworth, and M. Drangova, "Design and Performance Evaluation of a Remote Catheter Navigation System," *IEEE T. Bio-Med. Eng.*, vol. 56, No. 7, pp.1901-1908, July 2009.
- [16] S. B. Kesner and R. D. Howe, "Design and Control of Motion Compensation Cardiac Catheters," *IEEE Int. Conf. Robot.*, pp.1059-1065, 2010.
- [17] M. N. Faddis, W. Blume, J. Finney, A. Hall, J. Rauch, J. Sell, K. T. Bae, M. Talcott, and B. Lindsay, "Novel, Magnetically Guided Catheter for Endocardial Mapping and Radiofrequency Catheter Ablation," *Circulation*, vol. 106, pp.2980-2985, December 2002.
- [18] S. Ernst, F. Ouyang, C. Linder, K. Hertting, F. Stahl, J. Chun, H. Hachiya, D. Bansch, M. Antz, and K-H. Kuck, "Initial Experience With Remote Catheter Ablation Using a Novel Magnetic Navigation System: Magnetic Remote Catheter Ablation," *Circulation*, vol. 109, pp.1472-1475, March 2004.

저 자 소 개



박준우 (朴 竣 佑)

1974년 9월 25일생. 1998년 서울대학교 공과대학 전기공학부 졸업. 2004년 동 대학원 협동과정 의용생체공학전공 졸업. 2009년~현재 고려대 의과대학 의공학교실 연구강사.

Tel : (02) 920-6458

Fax : (02) 922-4204

E-mail : junwoo.park@gmail.com



송 승 준 (宋 承 駿)

1978년 3월 22일생. 2000년 동국대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업. 2007년~현재 고려대 의학과 의용생체공학전공 박사과정.

Tel : 02) 920-6454

Fax : 02) 922-4204

E-mail : semosong@korea.ac.kr



이 정 찬 (李 晶 燦)

1978년 10월 2일생. 2001년 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 졸업. 2008년 동 대학원 협동과정 의용생체 공학전공 졸업. 2008년~현재 서울대학교 의학연구원 의용생체공학연구소 선임연구원.

Tel : 02) 741-8596

E-mail : ljch@snu.ac.kr



최 혁 (崔 熾)

1976년 2월 29일생. 2000년 University of Manchester 전기전자공학부 졸업. 2007년 서울대학교 대학원 협동과정 의용생체 공학전공 졸업. 2009년~현재 고려대학교 구로병원 의료기기임상시험센터 연구교수.

Tel : 02) 2626-1863

Fax : 02) 2626-1857

E-mail : hyuk76@korea.ac.kr



이 정 주 (李 政 周)

1975년 6월 27일생. 1998년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업. 2004년 서울대대학원 의용생체공학협동과정 졸업. 2004년~현재 고려대 한국인공장기센터 연구교수.

Tel : 02) 920-6459

Fax : 02) 922-4204

E-mail : jungjoo.lee@gmail.com



최 재 순 (崔 載 舜)

1971년 4월 15일생. 1995년 서울대 제어계측공학과 졸업. 2003년 동 대학원 의용생체공학협동과정 졸업. 2007년~현재 고려대 한국인공장기센터 연구교수.

Tel : 02) 920-6456

Fax : 02) 922-4204

E-mail : aequitas@korea.ac.kr