의료용 햅틱 마스터-슬레이브 로봇 시스템 : 실험적 성능 평가

A Haptic Master-slave Robot System : Experimental Performance Evaluation for Medical Application

오 종 석*, 신 원 기*, 프엉박*, 엄 창 호*, 최 승 복†
Jong-Seok Oh, Won-Ki Shin, Phuong-Bac Nguyen,
Chang-Ho Uhm and Seung-Bok Choi

(Received September 13, 2012 ; Revised September 26, 2012 ; Accepted September 26, 2012)

Key Words : Haptic Master(햅틱 마스터), Slave Robot(슬레이브 로봇), Minimally Invasive Surgery(최소침습수술), Teleoperation(원격 수술), Wireless Communication(무선 통신), Gimbal Joint(짐벌 조인트)

ABSTRACT

In this work, 4-DOF ER haptic master is proposed and integrated with a slave robot for minimally invasive surgery(MIS). Using a controllable ER fluid, the haptic master can generate a repulsive force/torque with the 4-DOF motion. For realization of master-slave robot system, the motion command of the haptic master is realized by slave surgery robot. In order to follow the 4-DOF motion of the haptic master, novel mechanism of slave surgery robot with gimbal joint is devised. Accordingly, the haptic master-slave robot system is established by incorporating the slave robot with the haptic master device in which the desired repulsive force/torque and position are transferred to each other via wireless communications. In order to obtain the desired force/torque and position trajectories, tracking controllers for haptic master and slave robot are designed and implemented, respectively. It has been demonstrated that the desired effective torque tracking control performance is well achieved using the proposed haptic master-slave robot system.

1. 서 론

최근 의료 기술이 나날이 발전하면서 로봇을 이용한 수술방법이 점차 의료산업에 도입되고 있다. 그 중 가장 널리 알려진 수술법들 중 하나가 최소침습수술법이다.

이 수술법은 환자의 작은 절개부위를 통해 수술 도구와 카메라를 삽입하여 집도이가 모니터를 보

면서 수술하는 것으로, 기존의 개복수술에 비해 출혈의 감소와 함께 고통 및 외상을 감소뿐만 아니라 환자의 회복기간이 줄어드는 장점이 있다. 이러한 최소침습수술 시스템은 집도이가 마스터장치를 이용해서 수술용 로봇에 명령을 주어 로봇이 환자의 내부에서 명령을 수행하는 것이다. 하지만 최소침습수술의 장점인 작은 부위의 개복은 반대로 외과의에게는 직접적인 촉각정보를 제공해 줄 수 없으며, 수술도구는 환자의 작은 구멍을 통하

† Corresponding Author ; Member, Mechanical Engineering, Inha University
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : +82-32-860-7319, Fax : +82-32-868-1716
* Member, Mechanical Engineering, Inha University

A part of this paper was presented at the KSNVE 2012 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Editor Moon Kyu Kwak
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

여 움직이기 때문에 조작의 불편함과 좁은 공간 확보로 인한 활동범위의 제약을 발생시켰다⁽¹⁾. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다.

촉각정보의 부재에 관련된 문제를 해결하기 위한 연구들은 주로 마스터 장치에서 햅틱 장치를 이용한 실제 장기의 반력을 구현하는데 초점이 맞춰져 있으며, 초기에는 이를 위해 모터를 많이 사용하였다^(2,3). 하지만 이러한 시스템들은 구조가 복잡하고 기구학적 해석이 어려운 단점이 있다. 따라서 최근에는 지능 재료를 이용한 연구가 활발히 수행되고 있다⁽⁴⁻⁷⁾. 이러한 연구로는 전기장이나 자기장의 입력에 의해 유체의 특성이 달라지는 특성을 갖는 ER(electrorheological) 유체와 MR(magnetorheological) 유체를 이용한 연구가 대표적이다. 그 중 ER 유체는 빠른 응답속도와 연속적인 제어가 가능한 장점을 갖고 있어 최근 활발한 연구가 진행되고 있다.

또한, 최소침습수술에 사용되는 슬레이브 로봇도 다양한 연구가 진행되고 있다. 그 중에서 가장 상업적인 성공을 거둔 대표적인 수술용 로봇이 Intuitive Surgical사의 다빈치(DaVinci) 로봇이다. 기존 수술용 로봇에 비해 빠르고 정확한 반복적인 작업 성능과 다양한 작업공간의 활용 등의 장점을 가질 뿐만 아니라 로봇 관절의 자유로운 360° 회전을 통한 미세한 수술 및 봉합을 가능하게 한다⁽⁸⁾. 하지만 이러한 다빈치 수술용 로봇도 매우 복잡하고 거대한 구조를 가지는 단점이 있다. 이에 단순하며 소형의 구조를 가지는 수술용 로봇에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^(9,10).

따라서 이 연구에서는 ER 유체를 이용한 햅틱 마스터장치를 제안하며, 이와 연계하여 의사의 명령에 따라 수술을 수행할 수 있는 수술용 로봇을 설계 및 제작하여 마스터-슬레이브 로봇시스템의 성능을 평가하고자 한다. ER 햅틱 마스터는 3자유도 회전운동과 1자유도 병진운동구현이 가능하며 모든 운동방향으로 반력구현이 가능하다. 이러한 수술도구의 4자유도 운동을 구현하기 위해 슬레이브 로봇이 설계 되었으며, 짐벌 조인트를 사용하여 구조를 매우 단순화시킨 것이 특징이다. 이러한 특징을 가지는 햅틱 마스터와 제작된 슬레이브 로봇을 이용하여 최소 침습수술용 시스템의 제어성능을 효과적으로 입증하였다.

2. ER 햅틱 마스터

제안된 ER 햅틱 마스터 장치는 Fig. 1과 같이 3축 회전운동이 가능한 원구형 조인트와 1축 병진운동이 가능한 병진장치로 이루어진다. 원구형 조인트는 Fig. 2와 같이 자유로이 운동할 수 있는 내측구가 있고, 내외측구 사이에는 ER 유체가 채워져 있다. 도입된 원구형 내측 회전자는 3자유도 회전운동이 가능하므로 전기장 인가 시 3자유도의 반력을 생성시킬 수 있다. 내외측구 간의 간극은 마찰계수가 매우 낮은 tac-tape를 이용하여 유지할 수 있었다. 병진장치는 Fig. 3과 같이 피스톤의 움직임에 따라 유체의 거동이 발생하는 장치이다. 이때 유체는 환형덕트를 따라 상하부 챔버로 이동하게 되므로, 환형덕트에 전기장을 인가하여 1자유도 반력을 생성시킬 수 있었다.

Fig. 1 Schematic configuration of 4 DOF haptic master

Fig. 2 Schematic configuration of ER spherical joint

원구형 ER 햅틱 마스터 장치는 간극사이의 마찰력(T_f)을 무시하면 전기장에 따라 변화하는 ER 유체의 항복응력에 기인한 성분(T_c)과 유체의 점성에 기인하는 점성 마찰력(T_η)으로 구성되며, 이를 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T_t = T_c + T_\eta = \iint_S \tau_y r_c dA + \iint_S \eta \dot{r}_c dA \quad (1)$$

여기서, τ_y 는 항복전단응력이며 전압에 비례하는 전기장 E 의 함수이다. 그리고 r_c 는 토크를 발생시키는 축의 회전반경이다. η 는 유체의 기본점성상수이며, $\dot{r}_c$ 는 전단비를 나타낸다.

ER 병진장치는 크게 내외측 실린더와 피스톤으로 이루어진다. 피스톤에 의해 상하부챔버로 나누어지며 각 챔버는 ER 유체로 가득 채워진다. 내측 실린더는 양극(+)과 외측 실린더는 음극(-)과 연결되어 있다. 한편, 병진운동하는 피스톤의 부피보상을 위하여 하부 챔버의 외부에 하나의 관과 그 입구에는 다이어프램을 부착하였다. 유체의 압축성을 무시한다면 ER 병진장치의 마찰력과 준정적 거동에 의한 댐핑력은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽¹¹⁾.

$$\begin{aligned} F &= P_2(A_p - A_f) - P_1(A_p - A_s - A_f) \\ &= P_{atm}A_s + c_{vis}\dot{x}_p + F_{ER} \operatorname{sgn}(\dot{x}_p) \end{aligned} \quad (2)$$

where $F_{ER} = (A_p - A_s - A_f) \frac{cL}{t_i} \tau_y$

Fig. 3 Schematic configuration of ER translation device

여기서 A_p, A_s, A_f 는 각각 피스톤 로드, 피스톤, 두 개 기둥의 단면적을 나타낸다. P_1, P_2 는 각각 상하부 챔버의 압력을 뜻한다. 또한, L, R 과 t_i 는 각각 환형 덕트의 길이, 평균 반경과 간극이고, c 는 2.07~3.07 사이의 값을 갖는 유체의 속도 계수이다.

촉감구현을 위한 ER 원구형 조인트와 ER 병진 장치의 반력추적제어기를 다음과 같이 설계할 수 있었다.

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{1}{\omega_n^2 I_i} (c\dot{e}_i + \ddot{T}_{di} + 2\zeta\omega_n\dot{T}_i + \omega_n^2 T_i + k\operatorname{sat}(S)), \\ k &> |d| \\ u_2 &= \frac{1}{\omega_n^2} (c\dot{e}_i + \ddot{F}_{di} + 2\zeta\omega_n\dot{F}_i + \omega_n^2 F + k\operatorname{sat}(S)), \\ |k| &> |d| \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 u_1 는 원구형 조인트에 인가되는 제어입력이며, u_2 는 병진장치에 인가되는 제어입력값이다. 제어기 설계와 관한 자세한 사항은 참고문헌⁽¹²⁾에 나와 있다.

3. 슬레이브 로봇

최소침습수술은 수술도구의 3자유도 피봇 회전운동과 1자유도 병진운동을 요구한다. 하지만 실제로 3개의 회전운동을 한 지점에 대해 구현하는 것은 쉽지가 않다. 따라서 이 연구에서는 Fig. 4와 같이 고정바를 이용하여 피봇점을 고정시키고 로봇팔의 끝점에는 짐벌조인트를 설치하였다. 짐벌조인트는 피봇점에 대해서 수술도구의 2자유도 회전운동을 구현해낼 수 있다. 피봇점은 볼조인트를 이용하여 수술도구의 움직임을 제한하였으며, 실제 수술에서 사용되는 침투관(trocar)과 같은 역할을 한다. 침투관은 환자의 절개된 부위에 다른 장기의 손상 방지를 위해 삽입된다.

Fig. 4에 나타난 것과 같이 슬레이브 로봇은 3개의 로봇팔과 5개의 서보모터로 구성된다. 1번부터 3번까지의 모터는 로봇팔의 끝점 위치를 결정할 수 있으며, 4번모터는 짐벌조인트의 회전공간확보를 위해 짐벌조인트를 지평면에 대해 수평하게 유지시킨다. 5번모터는 수술도구의 회전운동(spin motion)을 구현한다. 슬레이브 로봇과 관련된 설계변수들은

Fig. 4 Configuration of slave robot

Table 1 Mechanical properties of the slave robot

Link No.	Length(mm)	Mass(g)
1	125	124.3
2	125	124.3
3	90	214.8
4	150	45.2

Table 1에 열거하였다.

슬레이브 로봇을 동작시키기 위해서는 각 링크가 움직여질 역기구학이 행해져야만 한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\theta_{s1} &= a \tan 2 \left(\frac{y}{x} \right), \\ \theta_{s2} &= a \tan 2 \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2} - c^2} \right) - a \tan 2 \left(\frac{a}{b} \right), \\ \theta_{s3} &= a \tan 2 \left(\frac{x \cos \theta_{s1} + y \sin \theta_{s1} - l_2 \cos \theta_{s2}}{l_1 + l_2 \cos \theta_2 - d_z} \right) - \theta_2, \\ \theta_{s4} &= \left(\frac{\pi}{2} \right) - \theta_{s2} - \theta_{s3},\end{aligned}$$

Table 2 DRS-0201 servo motor specification

Items	Specification
Dimension	45 mm(W) × 24 mm(D) × 31 mm(H)/
Weight	60 g
Reduction ratio / gear material	1:266 / Super engineering plastic, heavy duty metal
Input voltage read current motor	7~12VDC(optimized 7.4 V) 450 mA @ 7.4 V : 1.7 kgf.cm 670 mA @ 7.4 V : 2.2 kgf.cm. carbon brush cored DC, metal brush coreless DC
Stall torque / maximum speed	24 kgf.cm 0.147s/60°
Resolution	0.325°
Operating angle	320°, continuous rotation
Communication link ID, maximum baud rate	Full duplex asynchronous serial(TTL level), binary packet, multi drop 0~253, 254(broadcast only) 0.67 Mbps
Feedback	Position, speed, temperature, load etc.
Control algorithm	PID, feedforward, trapezoidal velocity profile, velocity override, torque saturator & offset, overload protection, neutral calibration, dead zone 54 selectable setting paramaters

Fig. 5 Coordinate of the slave robot

$$\begin{aligned}\text{where } a &= -2l_2(x \cos \theta_{s1} + y \sin \theta_{s1}), \\ b &= 2l_2(l_1 - z), \\ c &= l_3^2 - ((x \cos \theta_{s1} + y \sin \theta_{s1})^2 + l_1^2 - 2l_1d_z + l_2^2 - z^2)\end{aligned}\quad (4)$$

Fig. 6 Slave robot control program

여기서 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 l_1, l_2, l_3, l_4 는 각각 로봇팔의 길이를 뜻하며, $\theta_{s1}, \theta_{s2}, \theta_{s3}, \theta_{s4}, \theta_{s5}$ 는 각각의 회전 각도값이다.

슬레이브 로봇에 사용된 모터는 각각의 내장된 마이크로프로세서에 의해 PID제어로 구동되며, Fig. 6과 같이 별도의 프로그램을 설계하여 전체 모터의 구동을 컨트롤하도록 설계하였다. 사용된 모터의 최대 토크는 24 kgf·cm이다. 모터와 관련된 자세한 정보는 Table 2에 나타내었다.

4. 햅틱 마스터-슬레이브 로봇 시스템

ER 햅틱 마스터를 이용한 최소침습수술시스템의 전체 block diagram은 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 의사가 햅틱 마스터를 이용하여 슬레이브 로봇에 위치이동 명령을 내리게 된다. 이때 위치이동 명령은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1 &= r(t)(\sin \theta_2) \\ y_1 &= r(t)(\sin \theta_1) \\ z_1 &= r(t)\sqrt{1 - (\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2)} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 θ_1 와 θ_2 는 X축과 Y축의 회전량이며, $r(t)$ 는 손잡이의 길이이다. 슬레이브 로봇은 환자의 몸속에서 지시된 명령을 이행하게 되며, 이때 수술도구와 장기간의 접촉에 의한 반력이 측정되게 된다. 이렇게 측정된 반력정보는 햅틱 마스터를 통해 의사로 전달된다.

Fig. 7 MIS system using haptic master and slave robot

Fig. 8 Tele-operation experiment using haptic master and slave robot

이 연구에서는 마스터와 로봇의 연결을 Fig. 8과 같이 wireless TCP/IP통신을 통해 슬레이브 로봇과 마스터를 연동할 수 있도록 C#프로그램을 사용하여

구성하였다. 시스템의 작동은 시술자가 마스터를 조정하여 얻어진 위치정보가 슬레이브 로봇에게 전달되고, 로봇은 이 위치정보를 받아 해당 위치로 움직이게 된다. 로봇은 마스터의 위치값을 받아 해당 각축의 서보모터로 데이터 패킷형태로 가공된 명령으로

시리얼 통신을 통해 움직이게 된다. 그리고 마스터는 슬레이브 로봇에서 측정된 실제 장치의 반력을 구현하여나 하나 현실적인 어려움으로 인해 사인과 형태의 반력을 구현하도록 제어실험을 수행하였다.

Fig. 8에 나타난 것과 같이 마스터에서 측정된 위치정보를 슬레이브 로봇에 보내게 되고 슬레이브 로봇은 이 위치명령을 수행하게 된다. 그리고 햅틱 마스터에서는 임의의 반력 곡선을 구현하기 위하여 슬라이딩 모드 제어가 제어입력 신호를 만들고 이 제어입력신호는 ER 햅틱 마스터 장치에 고전압 증폭기를 통해서 인가된다. 그리고 햅틱 마스터 손잡이에 설치된 6축 포스/토크센서(ATI Corp., Nano 17)를 통해 발생된 반력값이 제어기로 되먹임 되어진다.

Fig. 9와 Fig. 10에 각각 슬레이브 로봇과 마스터에서의 위치/반력 추적 제어 실험결과를 나타내었다.

(a) X axis

(b) Y axis

(c) Z axis

Fig. 9 Position tracking control results of slave robot

(a) Tracking result

(b) Control input

Fig. 10 Force tracking control results of ER haptic master

Fig. 10에 나타난 것과 같이 반력추적 제어결과는 요구궤적을 비교적 잘 추적하고 있음을 알 수 있었다. 하지만 Fig. 9에 나타난 위치추적 제어결과는 약간의 time delay가 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 TCP/IP 방식을 이용한 무선통신 중 발생하는 Delay로서 향후 연구에서 추가적인 무선통신용 제어알고리즘의 개발하여 해결하고자 한다.

5. 결 론

이 연구에서는 의료용 로봇 시스템을 위한 새로운 햅틱 인터페이스로서 ER 햅틱 마스터 장치를 제안하고, 슬레이브 로봇을 제작하여 햅틱 마스터-슬레이브 로봇 시스템의 성능을 고찰하였다. 먼저, 새로운 메커니즘의 ER 햅틱 장치를 고안함으로써 매우 단순한 구조로 4자유도 운동을 실현하였다. 또한, 실제 최소침습수술을 위해 집벌조인트를 활용한 새로운 형태의 슬레이브 로봇을 설계 및 제작하였다. 이렇게 실제 제작된 마스터와 슬레이브 로봇의 연동제어를 위하여 위치/반력 추적 제어기를 설계하고, 두 개의 제어기를 무선통신을 통하여 연동하였다. 이러한 햅틱 마스터-슬레이브 로봇시스템과 추적 제어기를 통해 우수한 추적제어성능을 입증할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012-0005613)

참 고 문 헌

(1) Guthart, G. S. and Jr. Salisbury, J. K., 2000, The Intuitive Telesurgery System: Overview and Application, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 618~621.
 (2) Pierrot, F., Dombre, E., D'egoulange, E., Urbain, L., Caron, P., Sylvie, B., Gari'epy, J. and M'egnien, J., 1999, A Safe Robot Arm for Medical Applications with Force Feedback, Medical Image Analysis, Vol. 3, No. 3,

pp. 285~300.

(3) Yamaguchi, Y., Furusho, J., Kimura, S. and Koyanagi, K., 2004, High-performance 2D Force Display System Using MR Actuators, Proc. 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, pp. 2911~2917.

(4) Kang, P. S., Han, Y. M. and Choi, S. B., 2006, Force-feedback Control of an Electrorheological Haptic Device in MIS Virtual Environment, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 1286~1293.

(5) Han, Y. M. and Choi, S. B., 2008, Control of an ER Haptic Master in a Virtual Slave Environment for Minimally Invasive Surgery Applications, Smart Materials & Structures, Vol. 17, No. 6, pp. 065012.

(6) Senkal, D. and Gorocak, H., 2009, Spherical Brake with MR Fluid as Multi Degree of Freedom Actuators for Haptics, Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol. 20, No. 18, pp. 2149~2160.

(7) Boku, K. and Nakamura, T., 2009, Development of 3-DOF Soft Manipulator with ER Fluid Clutches, Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol. 21, No. 15, pp. 1563~1567.

(8) Intuitive surgical, www.intuitivesurgical.com.

(9) Jianmin, L., Shuxin, W., Xiaofei, W. and Chao, H., 2010, Optimization of a Novel Mechanism for a Minimally Invasive Surgery Robot, International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, Vol. 6, No. 1, pp. 83~90.

(10) Jose, N. S., Nocolas, G., Carlos, P., Eduardo, F., Roque, S. and Miguel, A., 2010, Kinematics of a Robotic 3UPSis Spherical Wrist Designed for Laparoscopic Applications, International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, Vol. 6, No. 3, pp. 291~300.

(11) Seong, M. S., Ha, S. H., Nguyen, Q. H. and Choi, S. B., 2009, Dynamic Modeling of ER Damper Considering Fluid Compressibility, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 659~666.

(12) Oh, J. S., Shin, W. K., Uhm, C. H., Lee, S. R., Han, Y. M. and Choi, S. B., 2012, Control of Haptic Master - Slave Robot System for Minimally Invasive Surgery(MIS), Proceedings of the 12th International

Conference of ER Fluids and MR Suspensions, Ankara, Turkey, pp. 96~102.

Seung-Bok Choi received a B.S. degree in Mechanical Engineering from Inha University in 1979, M.S. and Ph.D. degree from the Michigan State University in 1986 and 1990 respectively. He is currently dean of the school of Mechanical Engineering and fellow professor in Inha University, Incheon. He is a fellow of NAEK (National Academy Engineering of Korea), KAST

(The Korean Academy of Science and Technology). His research interests are robust controller design for linear and nonlinear system, design and control of various control system using smart actuators.

Jong Seok Oh received the B.S. degrees in Mechanical Engineering from Inha University in 2009, MS degree from the Inha University in 2011. His research interests are robust controller design for linear and nonlinear system, design and control of various control system using smart materials.