대한외과학회지 : 제 63 권 제 3 호
Vol. 63, No. 3, September, 2002

□ 원 저 □

da Vinci™ Surgical Robot을 이용한 돼지실험 모델에서의 각종 로봇 수술－Pilot Study－

동아대학교 의과대학 외과학교실, [1]Minimally Invasive Surgical Center Cleveland Clinic Foundation

김 형 호·성 경 탁[1]

Various Laparoscopic Surgery Using da Vinci™ Robotic System in Pig Mode－Pilot Study－

Hyung Ho Kim, M.D. and **Kyung Tak Sung,** M.D.[1]

Purpose: To evaluate the feasibility of a currently available robotic surgical system in performing various general surgical laparoscopic procedures in an acute porcine model.
Methods: Telepresence robotic laparoscopic surgeries, comprising cholecystectomy, Nissen-fundoplication, choledochocholedochostomy and gastrojejunostomy were performed in 5 swine models for 3 consecutive days by the same surgeon who is experienced in advanced conventional laparoscopic surgery. Data were collected from the da Vinci™ Robotic System.
Results: Mean operative times were 24.4 ± 10.6 minutes for cholecystectomy (N=5) 41.2 ± 5.5 for Nissen fundoplication (N=5) 51 ± 5.6 for choledochocholedochostomy (N=5), and 53.3 ± 7.6 for gastrojejunostomy (N=3) but there were 2 cases of failure in the latter. In the case of choledochocholedochostomy, operative time was reduced from 76 minutes in the first case to 42 minutes in the last. Intraoperative blood loss was minimal and there was no intraoperative complication related with malfunction of robotic system.
Conclusion: Robotic laparoscopic procedures can be performed effectively using the da Vinci™ System. In this limited study, the learning curve and operative times were shorter with the da Vinci™ System, and the intraoperative technical movements appeared inherently more intuitive. Additional chronic study comparing conventional laparoscopic with robotic surgery is mandatory. **(J Korean Surg Soc 2002;63: 175-178)**

Key Words: Robotic laparoscopic surgeries, da Vinci™ robotic system, Telepresence surgery
중심 단어: 로봇 복강경 수술, 다빈치™ 로봇 시스템, 원격수술

Department of Surgery, College of Medicine, Dong-A University, [1]Minimally Invasive Surgical Center Cleveland Clinic Foundation

책임저자 : 김형호, 부산시 서구 동대신동 3가 1
㊐ 602-715, 동아대학교병원 외과
Tel: 051-240-5144, Fax: 051-247-9316
E-mail: hhkim@mail.donga.ac.kr
접수일 : 2002년 7월 18일, 게재승인일 : 2002년 7월 26일
본 연구는 2001년 동아대학교 교비지원 교수 국외단기 연구파견 연구비로 지원되었음.
본 연구는 2001년 추계 대한내시경복강경학회에서 구연되었음.

서 론

외과 분야의 복강경 도입은 수술에 대한 우리의 기본적 이해와 그 수술행위의 수행에 있어 커다란 변화를 가져왔다. 몇몇 최소침습수술의 눈부신 발전으로 환자의 회복은 놀랍도록 빨라졌지만 그러나 복강경외과의의 입장에서 보면 모든 외과영역의 수술에 이 최소침습수술기법을 적용하기엔 아직 여전히 기술적으로 극복하지 못한 분야가 있는 것 또한 사실이다. 따라서 복잡한 수술 기술이 필요한 분야로 복강경 술식을 확대하기 위해서는 좀더 효율적으로 복강경 술식의 기술을 최적화하는 노력이 중요하고 절실하다 하겠다.

이에 부응하는 노력의 일환으로 최근 로봇 및 컴퓨터 기술의 발전으로 만들어진 주-종속제어조작기(master-slave manipulators)를 외과의들이 수술에 사용함으로써 복강경 수술의 기술수준을 한 단계 높일 수 있게 되었다. 본 연구는 Pilot study로서 이들 원격 제어조작기(telemanipulators)들 중 가장 광범위하게 임상, 특히 심장수술분야에 사용 중인 da Vinci™ System (Intuitive Surgical, Inc., California)을 이용하여 문합술기가 필요한 복잡한 복강경 외과수술에서의 이 로봇 system 사용의 그 기술적 가능성과 효능을 알아보고자 시행되었다.(*1*)

방 법

몸무게 30 40 kg의 5마리의 암돼지를 실험모델로 사용하였다. 3일 연속으로 기존의 복강경 술식엔 익숙하지만 로

봇수술은 처음인 한 명의 술자에 의해 실험을 진행하였다. 먼저 로봇 시스템에 적응하기 위하여 첫 실험모델에서는 부신절제술을 부가적으로 시행하였고 그 후 각각의 돼지에서 담낭 절제술(cholecystectomy) 5예, Nissen씨 위저부추벽형성술(Nissen-fundoplication) 5예, 총담관단단문합술(choledochocholedochostomy) 5예, 위공장문합술(gastrojejunostomy) 5예를 시행하였다. 실험은 da Vinci™ System을 이용한 원격로봇수술(telerobotic surgery)로 진행되었으며 실험동물 옆에 한 명의 보조원을 두어 각종의 기구-needle diver, graspers, forceps, electrosurgical L-hook, dissector-가 부착된 로봇팔의 교환 및 수술시야확보를 위한 장기 견인을 돕도록 하였다. 모든 수술은 기존의 복강경 수술의 부가적 도움 없이 전적으로 로봇시스템에 의하여 진행되었는데, 담낭 절제술 시 담낭관의 결찰은 로봇 팔에 장착한 클립을 사용하였고 장관 및 도관의 문합에는 각각의 직경에 따라 vicry3-0에서 cardionyl 7-0의 실을 사용하여 로봇을 이용한 수기문합을 시행하였다. 총담관단단문합술의 경우 인위적으로 총담관을 절단하고-이도 로봇시스템을 이용하였다.- 문합을 시도하였다. 실험동물은 실험이 마친 후 즉시 폐사시켰고 술식의 성공유무, 수술시간, 술 중 실혈량, 로봇과 관련된 합병증, 술자의 인체공학적 편의성(ergonomics and surgeon fatigue), 학습곡선(learning curve) 등을 조사하였다.

결　　과

위공장문합술 2예를 제외한 모든 술식을 성공적으로 시행할 수 있었다. 위공장문합술 2예의 실패 원인은 문합을 위해 공장을 위 주위로 유도할 때 조직의 긴장도를 알 수 있는 촉각되먹임(tactile feedback)이 되지 않는 로봇 팔에 장착된 겸자를 너무 꽉 쥠으로써 생긴 공장천공 때문이었다.

평균 수술시간은 담낭 절제술 24.4±10.6분, Nissen씨 위추벽형성술 41.2±5.5분, 총담관단단문합술 51±5.6분, 위공장문합술 53.3±7.6분이었다(Table 1). 모든 수술의 술 중 실혈량은 미미하여 측정할 수 없었고 로봇의 오작동으로 생긴 합병증은 없었다. 비교적 장시간을 수술함에도 불구하고 크게 피로함을 느낄 수 없었고 빠른 시간 내에 기계에 익숙해질 수 있어서, 수술소요시간을 담낭절제술은 첫 수술 35분을 마지막에 8분으로 줄일 수 있었고 위추벽형성술은 50분에서 35분으로, 총담관단단문합술은 55분을 44분으로 위공장문합술은 60분을 45분으로 줄일 수 있을 만큼 빠른 학습곡선을 얻었다(Fig. 1).

Table 1. Mean operative time

Procedure	Mean operation time (min)	Remark
Cholecystectomy	16.6±26.5	
Fundoplication	59.8±12.3	
Choledochocholechostomy	56.2±5.9	76→42 No 7 proline
Gastrojejunostomy	74.7±5.5	2예 실패

고　　찰

복부 장기수술 시 수술절개창을 기존의 하나의 큰 절개창에서 여러 개의 작은 열쇠구멍 크기의 절개창으로 줄인 복

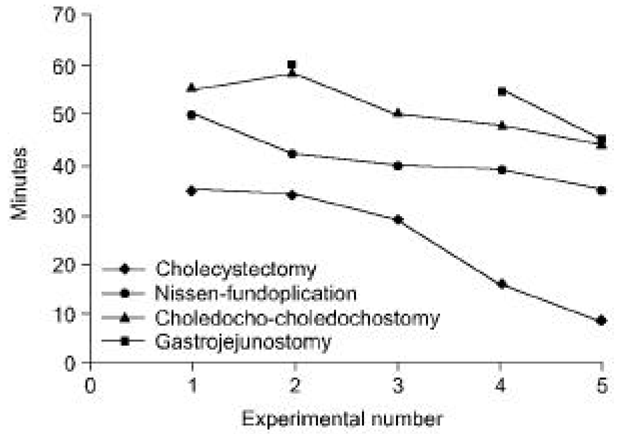

Fig. 1. Learning curve.

Fig. 2. a = surgeon console; b = robotic arm; c = surgical apparatus cart.

강경 술식의 개발은 수술에 대한 우리의 개념에 과히 혁명적 변화를 가져다주었다. 그러나 전통적인 개복술은 술자가 3차원 시야에서 조직을 촉각 되먹임(tactile feedback)으로 확인하면서 수술을 매우 효율적이고 편안하게 수행하는 반면, 기존의 복강경 수술은 수술시야가 3차원 입체가 아니고 어느 정도 제한적인 데다 촉각 되먹임도 개복술에 비해 떨어지며 사용기구 또한 길고 관절이 없다. 또한 수술부위로의 유일한 접근 통로인 투관(port)이 한 점에 국한되어 있어 손 운동이 제한적인 데다 시야에 대한 손놀림의 거울 효과(minor image), 인간의 자연스러운 손떨림(natural tremor)과 어색한 안수협조(eye-hand coordination) 및 열등한 인체공학적 편의성 때문에 섬세한 술기가 필요한 재건술 및 문합술에는 어느 정도 잠재적 한계가 있다.(*2-5*) 이런 장애요소는 수술기구의 손잡이와 그 끝이 물리적으로는 연결되어 있지 않은 주-종속 제어조작기(master-slave manipulator)의 사용과 3차원 입체시야를 제공하면 어느 정도 해소될 것이다. 술자의 모든 손놀림은 기구의 손잡이(master unit)에서 전기적 신호로 변환되어 미세한 떨림이 제거되고 운동의 크기도 조절되어 실시간(real time)에 기구 끝을 자동적으로 조절하게 되는 종속된 로봇팔(slave unit)로 전달된다.(*6-8*)

da Vinci™ System은 첫째, 통합된 3-D입체영상모니터를 탑재한 주조절장치(surgeon console), 둘째, 카트에 장착된 3개의 로봇 팔(하나는 camera를 잡고 둘은 8 mm 기구를 장착한다)을 가진 로봇 조작기(robotic manipulator), 셋째, 입체영상을 만들기 위한 장치 및 다른 부속 장비를 위한 카트와 같은 세 가지의 중요 구성요소로 이루어져 있다(Fig. 2). 두 개의 3-칩 카메라가 장착된 한 개의 통합된 3-D 입체내시경은 마치 사람의 오른쪽, 왼쪽 눈처럼 각각 카메라에서 나오는 영상을 각각 분리된 광학통로로 받아들여 통합함으로써 입체영상을 만든다. 이 내시경은 발 스위치로 조정되는 로봇 팔에 장착되어 조정되며 만들어진 영상은 주조정기의 고해상 양안 모니터에 나타나게 된다. 이 양안 모니터는 액상 크리스탈 shutter-glasses가 필터 역할을 하여 수술시야의 내시경 화상을 다른 잔상의 방해 없이 모니터로 전달하여 마치 술자가 수술시야로 완전히 녹아들어 일체가 된 느낌을 들게 해준다. 이런 느낌은 수술 중 조직을 다루거나 장관의 재건을 위한 봉합 시 즉각적인 안-수협조(hand-eye coordination)를 가능하게 해주며 최상의 원근감을 제공하여 수술시야까지의 깊이 인지(depth perception)를 용이하게 해준다. 수술에 사용되는 기구는 그 끝에 "Endowrists"라고 하는 관절이 있어 마치 사람의 손목움직임과 흡사하게 상하(pitch), 좌우(yaw)로 부드럽게 구부리는 것이 가능하여 복강 내에서 7개의 자유도로 움직일 수 있다. 이 관절은 케이블로 로봇 팔에 장착된 기구와 연결되어 있으며 이 케이블은 주조절장치에서 발생된 전기적 신호를 기계적 신호로 변환시켜줌으로써 어느 방향에서든지 술자의 손과 손목움직임을 그대로 민첩하게 전달하여 수술을 매우 편리하게 할 수 있게 해준다. 본 연구에서의 저자의 경험으로도 이 Endowrist는 수술기구 끝의 움직임을 거의 완벽한 범위로 움직여 주어 개복수술에 비견할 수 있을 정도로 조직의 박리를 용이하게 해주었고 복강경 수술의 가장 어려운 술기인 문합을 쉽게 할 수 있도록 해주어 매우 인상적인 장치였다. 즉 이 시스템은 처음 사용하는 사람에게도 직관적으로 바로 이해가 되도록 개복술의 술기를 바탕으로 복강경 기술을 접목시켰다. 저자는 인체공학적으로 설계된 주조절장치(surgeon console)에 앉아서 팔꿈치를 지지대에 올려놓고 컴퓨터가 제어하는 운동크기조절(motion scaling) 제어 시스템의 도움을 받아 자연적으로 발생하는 미세한 크기의 손떨림(natural tremor)을 제거한 상태에서 입체영상과 7개의 자유도로 움직이는 각종기구를 사용하여 원격에서 수술함으로써 장시간의 수술에도 피로함을 모르고 집중할 수 있었다.

그러나 현재 사용되고 있는 로봇시스템은 극복해야 할 몇 가지 문제점이 있다. 그 문제점으로는 첫째, 대부분의 로봇 시스템은 촉각되먹임(tactile feedback)이 되지 않아 수술 중 조직의 긴장도(tissue tension)를 알 수 없을 뿐만 아니라 봉합 시 봉합사의 긴장도도 알 수 없기 때문에 실을 너무 팽팽하게 당겨서 때때로 봉합사가 끊어지거나 조직이 찢어지는 매우 위험한 상황을 만들 수 있다. 이런 문제를 보안하기 위한 노력의 일환으로 최근, 개발된 촉각인지기술(haptic sensing technology)은 0.6 N 크기의 힘을 인지하여 feedback 할 수 있는데 이는 연부조직이 4 mm 정도, 눌렀다 펼 수 있을 정도의 힘이다.(*9*) 그러나 이 크기 정도의 tactile-feedback으로는 임상에서 미세혈관수술을 하기에는 충분치 않으므로, 더 정밀하고 섬세한 feedback을 제공할 software가 절실히 필요하다 하겠다. 둘째, 현재 사용 중인 surgical Robot system의 가격은 $750,000에서 $1,000,000 정도로 공이 고가라는 사실이다. 게다가 da Vinci system의 경우 로봇팔에 장착되는 기구 또한 그 사용횟수가 10회로 제한되어 있어 내구성이 떨어지며 로봇의 software가 그 사용횟수를 계산하여 그 이상을 사용할 수 없게 제어할 수 있도록 설계되어 있다. 이런 고가 장비를 임상에 사용하면 의료비는 더욱 상승할 것이다. 셋째, 원격수술(telepresence surgery)을 안전하고 효과적으로 시행하기 위하여서는 주조절장치를 사용하여 수술하는 술자와 그 명령을 수행하는 로봇 사이의 시간 차이(latency, time delay)가 거의 없어야 한다. 보고에 의하면 이 시간차이가 700 msec 이상이면 임상에 적용하기가 어렵다고 한다.(*10,11*) 그러나 급속한 정보통신 분야의 기술발전으로 이 부분은 가까운 미래에 즉각적인 data의 전송을 가능하게 하는 고성능의 bandwidth communication channel을 사용하여 극복할 수 있을 것이다.

결　　론

Surgical Robot, da Vinci™ System을 이용하여 외과영역에

서 흔하게 이루어지는 담낭 절제술 및 봉합술기가 필요한 Nissen씨 위저부추벽형성술, 총담관단단문합술, 위공장문합술 등을 위공장문합술 2예를 제외하고는 각각 5예를 성공적으로 수행할 수 있었다. 비록 한정된 예의 사전연구(pilot study)임에도 불구하고 빠른 학습곡선을 얻을 수 있었고, 복잡한 문합 술기를 보다 효율적으로 수행할 수 있었다. 그러나 실제 임상에 더 많이 적용하려면 향후 촉각되먹임(force-feedback) 기술의 발전과 로봇 팔에 장착되는 더 다양한 기구들의 개발이 선행되어야 할 것이다.

REFERENCES

1) Shennib H, Bastawisy A, Mack MJ, Moll FH. Computer-assisted telemanipulation: an enabling technology for endoscopic coronary bypass. Ann Thorac Surg 1998;66:1060-3.
2) Breedveld P, Stasen HG, Meijer DW, Jakimowicz JJ. Manipulation in laparoscopic surgery: overview of impeding effects and supporting aids. J Laparoendosc Adv Surg Tech 1999; 9(6):469-80.
3) Breedveld P, Stassen HG, Meijer DW, Jakimowicz JJ. Observation in laparoscopic surgery: overwiew of impeding effects and supporting aids. J Laparoendosc Adv Surg Tech 2000; 10(5):231-41.
4) Cuschieri A. Whither minimal access surgery: tribulation and expectations. Am J Surg 1995;169:9-19.
5) Berguer R, Fork DL, Smith WD. Ergomonic problems associated with laparoscopic surgery. Surg Endosc 1999;13:466-8.
6) Hunter IW, Doukoglou TD, Lafontaine SR, et al. A Teleoperated micosurgical robot and associated virtual environment for eye surgery. Presence 1993;2(4):265-80.
7) Fischer H, Neisius B, Trapp R. Tactile feedback for endoscopic surgery. In: Morgan K, Satava RM, Sieburg HB, Mattheus R, Christen JP (eds): Interactive technology and the New Paradigm for Healthcare. IOS Press and Ohmsha, 1995, pp 114-117.
8) Schurr MO, Bretwieser H, Melzer A, Kunert W, Schmitt M, Voges U, et al. Experimental telemanipulation in endoscopic surgery. Surg Laparosc Endosc 1996;6:167-175.
9) Boyd WD, Desai ND, Kiaii B, Rayman R, Menkis AH, McKenzie FN, et al. A comparision of robot-assisted versus manually constructed endoscopic coronary anastomosis. Ann Thorac Surg 2000;70:839-43.
10) Satava RM. Transition to the future. JACS 1998;186:691-2.
11) Fabrizio MD, Lee BR, Chan DY, Stoianovici D, Jarrett TW, Yang C, et al. Effect of time delay on surgical performance during telesurgical manipulation. J Endourol 2000;14(2):133-8.