

첨단의술과 로봇수술

이우정

연세대학교 의과대학 외과학교실, 연세의료원 로봇/내시경수술 센터

Advanced Medicine and Robotic Surgery

Woo-Jung Lee

Department of Surgery, Yonsei University College of Medicine, Robot and MIS Center, Yonsei University Health System, Seoul, Korea

With the help of wireless transmission and internet, doctors can diagnose and treat the patient without seeing the patient in front of the doctor. Even though the history of robotic surgery is short and have many limitation, as the laparoscopic surgery have overcome the limitation, we can do the robotic surgery as freely as the open surgery in the near future. And virtual reality has a great potential to revolutionize several aspects of medicine and surgery, such as medical education and surgical training, telemedicine and telesurgery. With the development of nanotechnology and microelectromechanical system, the surgical instrument and robotic system can be made as small as 1 or 2 mm for they can be inserted through small vessel and can be navigated through vessels for diagnosis and treatment of disease. [J Korean Med Libr Assoc 2015;42(1,2):48-58]

Keywords: Robotic surgery, Laparoscopic surgery, Tele surgery

서 론

1987년 프랑스의 의사가 최초로 복강경적 담낭절제술을 성공한 이후 폭발적인 복강경수술의 증가가 이루어졌으며, 저자는 이것이 수술혁명의 시초가 되었다고 생각된다. 이어 최근에는 원격진료, 로봇수술, 가상현실 등의 새로운 분야가 우리 의학에 새로이 도입되고 있다. 이것이 가능하게 된 것은 컴퓨터과학의 발전에 첨단의료기술의 접합으로 그 동안 인간의 한계를 넘어 할 수 없었던 의학

분야에서 조금씩 가능해지고 있다. 특히 컴퓨터로 재구성된 입체화면의 도움으로 진단에서뿐 아니라 치료에도 마치 자동차에서 내비게이션 시스템을 이용하듯이 도움을 받아 수술이 가능하게 되고 있다. 이러한 첨단의학은 진단과 치료뿐 아니라 의학교육과 의사들의 수술의 훈련과정에도 도입이 되어 마치 비행기조정을 실제 비행기가 아닌 연습실에서 훈련하듯이 실제 수술을 가상현실에서 연습하게 되는 날이 머지 않았다.

이에 본문에서는 1. 원격의료, 2. 로봇수술에 대한 설명

Received October 15, 2015, Revised November 15, 2015, Accepted December 16, 2015

Corresponding author: Woo-Jung Lee

Department of Surgery, Yonsei University College of Medicine, Robot and MIS Center, Yonsei University Health System, 50-1, Yeonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea

Tel: 82-2-2228-2913, Fax: 82-2-365-3095, E-mail: wjlee@yuhs.ac

Copyright © 2015 The Korean Medical Library Association. All rights reserved

을 하도록 하겠다.

1. 원격의료

1) 원격의료의 개념과 문제점

원격의료란 멀티미디어 즉 음성, 동화상, 데이터 통신 기술을 이용하여 진단, 자문, 치료, 의료정보의 전달, 교육, 상담 등의 의료서비스를 행하는 것으로 정의할 수 있다. 즉, 환자를 직접 대면하지 않고 매체를 이용하여 듣거나 보고 판단 또는 치료까지 하는 것이다. 가장 간단한 예로 의사와 전화통화를 통해 간단한 상담, 문진을 하는 것으로부터, 좀더 복잡한 예로는 멀리 떨어진 곳에서 원격로봇을 이용해 원격수술을 하는 것까지를 들 수 있겠다.

원격의료의 유형에는 여러 가지가 있으나, 여기서는 원격의료의 행해지는 형태에 따라 아래 5가지의 경우로 나누어 보겠다

(1) 원격자문과 원격진단: 의사와 의사간의 의료지식 및 기술의 지원으로 이루어지며 요즘 많이 사용되는 팩스(PACS: picture archiving communication system)이 대표적인 예이다.

(2) 원격진료: 원격진료는 의학의 거의 모든 영역에 걸쳐 실시되고 있다. 현재에도 원격피부과, 원격종양과, 원격수술, 원격심장과, 원격정신과, 원격병리, 원격응급의학 등의 분야에서 실용화의 단계에 이르고 있다.

국내에서도 거동이 불편한 치매환자들을 대상으로 원격치매센터가 시범적으로 운영되고 있으며 응급 및 외상환자관리에서 원격진료는 즉각적인 진료를 가능케 하는 새로운 대안이 되고 있다. 기존의 무선전화기, 무선통신에 더하여 최근에는 무선전화를 이용한 화상 및 데이터전송, 응급환자관리를 위한 치료지침제공 등이 도입되고 있다. 특히 심장질환자에게 이동형 원격모니터링을 휴대하게 하여 심장에 통증을 느끼거나 생체신호가 변화하는 응급상황 시 곧장 응급의료센터와 연계하고 있다.

(3) 재택진료: 일반 지역 뿐 아니라 산간 도서지방의 환자들이 먼 곳의 병원을 가지 않고도 진료를 받는 시스템을 말한다.

(4) 원격교육: 의학교육과 의료기술을 인터넷을 이용하여 멀리 떨어진 곳에서 교육이 가능하다.

(5) 인터넷 의료정보: 기초의학지식 뿐 아니라 전문적 내용과 새로운 내용을 바로 바로 검색하고 같이 공유할 수

있는 시스템의 분야로 나눌 수 있다. 일반적으로 ‘원격의료’라고 함은 위의 5가지의 경우를 모두 지칭하는 것으로 널리 사용되어 왔다.

그런데 2002년에 개정된 현행 의료법은 제30조의 2에서 원격医료를 규정하면서 원격의료의 범위를 ‘의료기관간 또는 의료인간의 원격진료’에 한정시킴으로써, 의료인과 가정에 있는 환자간의 원격의료인 재택진료는 현행법상 원격의료에서 제외시키고 있다. 또한 진료의 형식을 갖춘 인터넷 의료상담 등 의료인과 환자와의 사이버진료도 포함하지 않고 있어 원격의료의 범위를 매우 좁게 한정하고 있음을 알 수가 있다. 이는 아직까지 원격의료에 대한 기준과 가이드라인 및 원격医료를 둘러싼 제반 시설의 기술적 표준이 정립되지 않은 상태에서 선불리 시행될 경우 그로 인한 진료비의 급증이나, 보험문제, 의료분쟁의 발생, 환자의 개인정보유출 등의 폐해가 발생할 것을 우려했기 때문으로 보인다. 사실 가상공간에 병원을 차려 놓고 진찰을 받아 처방전을 받는다는 ‘사이버진료’는 관념적인 의미에 불과할 뿐이다. 이것은 원격자문에 해당하는 것으로 오히려 진료관리라 부르는 것이 타당하다는 지적도 있다.

고령화 진전, 건강 및 의료에 대한 수요 증가, 의료수가에 대한 국가의 통제 강화 등 사회경제적인 환경 변화는 지역간 및 국가간 원격의료수요를 더욱 촉진할 것으로 예상된다. 이러한 추세에 발맞추어 원격의료에 대한 법적·제도적 정비가 선행되어야 할 것이다.

앞으로 원격医료를 실시할 수 있는 기관 및 의료인의 자격, 원격의료 결과에 대한 법적 책임, 원격의료 이용에 대한 비용지불, 원격의료의 영역 및 범위, 국경간 원격의료에 대한 정보통신기술의 표준 제정, 원격医료를 위한 의학 용어 및 진료기록표준 등에 대한 적절한 제도 및 기술 환경을 조성하여 줄 필요가 있다.

그리고 앞으로 개정의료법에서는 ‘원격의료행위’에 대한 규정이 새로이 마련되어야 하고 인터넷을 통한 의료정보의 제공은 새로운 의료소비자들의 만족도를 높이며 또한 한 걸음 더 나아가 인터넷을 통한 원격진료 특히 재택진료의 길을 밝힐 수 있도록 해야 할 것이다. 이에 따라 의료정보화로 인한 프라이버시보호의 문제와 원격지에서의 의료수가의 보장문제 등의 해결이 뒤따라야 할 것이다. 따라서 정보화 사회에 걸 맞는 새로운 의료서비스의 창출과 이들의 활성화를 위한 규정의 신설과 이에 대한 보다

많은 연구가 필요하다 하겠다.

앞으로 장비 및 병원기관의 표준화, 막대한 통신비용, 정보 보안, 전자 문서의 법적 효력 등 구체적으로 들어가면 더욱 더 많은 문제점들이 제기될 것이다. 경쟁적으로 첨단 장비를 들여놓는 것만으로 해결되는 것이 아니라 이에 따른 법적 장치가 따라야 하는 것이다. 인류의 건강증진이라는 큰 목표를 두고 공동의 작업을 꾸준히 수행해 나가기 위하여 조화로운 지혜가 절실히 요구되는 시점이다.

2) 원격수술

1927년 미국의 찰스 린드버그가 대서양 단독횡단비행을 뉴욕에서 파리로 33시간만에 성공시킨 일은 엄청난 사건이었다. 이러한 내용에 버금가는 것이 2001년 9월 7일 컴퓨터모션회사의 로봇수술장비인 제우스시스템을 사용하여 뉴욕과 프랑스간의 원격지에서 복강경담낭절제술을 성공시켰다. 수술은 뉴욕의 맨하탄의 병원이 아닌 건물에 설치된 장비를 이용하여 프랑스의 “마레스코”박사가 뉴욕에서 집도하였으며(Operation Lindbergh), 환자는 프랑스의 스트라스부르그의 병원에 있는 수술실에서 원격으로 수술이 진행되었다. 수술은 복강경을 이용한 담낭절제술이었으며 약 45분간의 시간이 소요되었다. 이 수술은 거리로는 약 15000 킬로미터가 되었으며 시술자(미국)와 환자측(프랑스)간의 동작전달의 시간차는 약 150밀리초(milliseconds)이었다.

위와 같은 원격수술은 미국과 유럽을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 특히 미국은 전쟁에서 다친 병사를 치료하기 위해 의사가 직접 전쟁터에 가지 않고 원격지에서 치료하는 장치를 개발하고자 오래 전부터 원격수술 시스템을 발전시켜왔다. 머지 않아 우주공간에 떠있는 우주선에 있는 환자도 이러한 시스템으로 치료가 가능하게 하고자 연구하고 있다.

2. 로봇수술

수술(手術)이란 한문으로 손을 뜻하는 수(手)와 재주를 뜻하는 술(術)로 된 단어이며 우리말사전에는 “『의』 피부, 기타의 조직을 외과 기구로 찢거나 자르거나 하여 병을 고치는 일”이라고 설명되어 있다. 단어에서도 알 수 있듯이 수술을 할 때 가장 중요한 것이 사람의 손인 것이다. 우리가 보통 손이라고 하는 구조는 실제로 어깨(shoulder), 상

완(forearm), 손목(wrist), 손(hand), 그리고 손가락(fingers)으로 이루어져 있으며 기존의 개복수술(open surgery)은 이들의 통합된 움직임(약 25자유도)으로 수술을 하며 환자 옆에 서서 수술하는데, 일단 환자 옆에 적절한 위치를 한 경우 주로 상완이하의 동작으로 수술을 하게 되는데 이런 수술인 경우에는 약 8자유도로 수술이 이루어진다고 할 수 있다. 그 에 비해 복강경수술(laparoscopic surgery)은 투관에 가늘고 긴 수술장비를 삽입하여 수술을 진행하는 것으로 주로 어깨, 상완, 그리고 손목으로 수술을 하는 것과 비슷한 움직임을 수행한다. 로봇수술에서 사용되는 장비에서 많이 사용되는 ‘자유도’란 용어가 있다. 자유도(degree of freedom)란 로봇공학에서 많이 사용되는 용어로 사전적 의미는 “로보틱스나 가상 현실 시스템에서 사용되는 모든 동작의 요소”이다. 이 자유도를 이해하기 쉽게 설명하기 위해 복강경수술에 사용되는 기구를 예를 들면 복강경수술기구를 투관(trocar)에 삽입하고 수술을 하려면 움직임에 제한이 생긴다. 투관에 삽입된 상태에서 복강경수술기구의 자유로운 움직임은 상하운동, 좌우운동, 전진후진운동, 회전운동 및 기구의 말단부의 겹차운동을 합쳐 5방향의 운동이 가능하다, 즉 복강경수술기구의 자유도는 5인 것이다. 그러므로 개복수술에서는 적어도 8자유도로 수술을 할 수 있는데 비해 복강경수술은 5자유도로만 수술을 할 수 있으므로 수술동작에 커다란 제한이 생기는 것이다. 복강경수술은 이렇게 수술동작의 제한, 수술촉감의 저하, 그리고 입체가 아닌 평면화면을 보면서 수술을 해야 하는 단점이 있음에도 불구하고, 개복수술에 비해 적은 수술절개상처, 회복의 빠름 등으로 인해 1980년 후반부부터 활발히 시작되어 최근까지 폭발적이 증가가 있어왔다. 그러면서 한편 복강경수술의 단점을 극복하고자 자동화기능, 컴퓨터기능, 입체화면, 수술기구의 자유도 증가 등이 도입이 되면서 현재의 로봇수술로 발전하게 되었다.

그러나 현재 시행 되고 있는 로봇수술은 수술의 과정 중 일부를 자동화 하거나 수술의 동작을 원격으로 수술자의 동작을 재현(remote control with interactive robotic arms)하여 시행하는 수술장비일 뿐이지 실제로 인공지능을 가진 로봇이 수술하는 것은 아니므로, 진정한 로봇수술이라고 하기는 어렵다는 견해도 있다. 하지만 현재의 로봇수술은 발전의 한 과정이라고 할 수 있다. 특히 최근 반세기 동안 로봇공학이 엄청난 발전이 되면서 청소로봇 같이

우리 생활에 깊숙이 자리잡게 되었으며 더불어 수술로봇도 많은 발전을 하여왔다.

이에 저자는 1) 그 동안의 로봇수술의 발전에 대해 간략히 기술하고, 2) 현재의 로봇수술을 대표하는 다빈치 시스템에 대하여 비교적 자세히 설명하고 그리고 3) 로봇수술의 전망과 새로이 개발되고 있는 미세로봇수술 및 NOTES (natural orifice transluminal endoscopic surgery)에 대한 설명을 하도록 하겠다.

1) 로봇수술의 역사

로봇이란 용어가 처음 세상에 알려진 것은 1917년 조셉 카펙(Joseph Capek)이 쓴 단편(Opelec)에 자동장치(automats)에 대해 기술하였고 1921년 그의 형인 체코의 극작가 카렐 카펙(Karel Capek)이 쓴 희곡 'Rossum's Universal Robots' 에서 로봇이란 개념의 단어를 처음 사용하였다[1,2]. 로봇(robot)이란 단어는 당시 체코어인 하인 또는 노동자라는 뜻의 단어인 robota 에서 가져온 용어였으며, 당시는 반복적인 일을 하는 단순한 기계를 의미하였다. 이것이 1942년 Isaac Asimov가 쓴 공상과학 소설에 지능을 가진 로봇이 등장하였으며, 현재 많이 인용되는 로봇의 3대원칙이 바로 이 소설에 기술되었다[3]. 이어 1970년대에 아주 유명한 영화 '스타워즈(Star Wars)'에 R2D2와 C3PO라는 로봇이 우리에게 친구로 다가왔으며, 최근에 영화 '터미네이터(The Terminator)' 시리즈에서는 인류의 적 또는 친구로 묘사되는 등 많이 다뤄지고 있어 지금은 생소한 용어가 아닐 것이다. 그러나 소설이나 영화에도 의료에 사용되는 로봇(스타워즈에 몇 장면 나옴)은 그리 많지 않았다. 최근의 영화로는 '인공 지능(Artificial Intelligence: 2001년 영화)'에서는 로봇이 인간의 감정을 가지는 것으로 되어있고 '아이 로봇(I Robot: 2004년 영화)'이라는 영화에서는 지능을 가진 로봇이 인간을 공격하는 내용도 묘사되고 있다.

공상과학에서뿐 아니라 실제로 로봇이 현실에서 사용된 것은 1958년 제네랄 모터스회사가 자동차 생산에 사용한 유니메이트(Unimate)라고 할 수 있다. 실제로 유니메이트가 자동차 조립생산 라인에 사용된 1961년부터 다양한 산업분야와 우주항공분야 등 많은 분야에서 사용되기 시작했다[4].

로봇을 분류하기란 쉽지 않다. 로봇은 크게 자동 손

(automated arms), 이동 장비(mobile devices), 분쇄기(mills), 원격조정장비(telerobotic devices) 등으로 분류할 수 있으며, 동작을 프로그램할 수 있으며 독자적으로 업무를 수행할 수 있는가에 따른 분류로 능동형로봇(active), 반능동형(semiactive), 그리고 수동형로봇(passive robotic devices) 등이 있다. 현재 사용되고 있는 수술용 로봇들을 보면 능동형의 분쇄기(Robodoc)도 있고 반능동형의 원격조정장치(da Vinci teleoperative manipulator)도 있다.

복강경수술에 사용되는 수술용 로봇은 반능동형의 원격조정장치를 기본으로 하고 있으므로 여기서는 주로 원격조정장치에 대해 설명하도록 하겠다.

원격조정장치의 개념은 여러 분야에서 도입되어 사용되었다. 의료분야에서는 1980년대에 스콧 피셔박사(Scott Fisher, PhD)에 의해 가상현실의 개념이 도입이 되어 미항공우주센터(NASA)에서 연구를 시작하고[4], 이 가상현실의 개념과 필 그린박사(Phil Green, PhD)의 스탠포드연구소(SRI: Stanford Research Institute)와 같이 원격수술시스템을 개발하였다. 이 둘 연구가 기초가 되어 1990년대 들어서 커다란 발전을 하고 있는 복강경 수술에 로봇에 가까운 기구들이 개발되어 사용되었다. 한편 미국의 국방성(Pentagon's Advanced Research Projects Agency)은 전쟁에서 다친 병사를 의사가 원격에서 치료하는 장치를 개발하고자 막대한 연구비를 지원하였다[5,6]. 이렇게 미국의 국방성의 연구비로 시작된 다르파(DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency)를 모태로 유룬 왕 박사(Yulun Wang PhD)에 의해 시작된 컴퓨터모션회사(Computer Motion, Inc., Santa Barbara, CA, U.S.A. : 2003년에 인투이티브 회사에 합병됨)는 이숍(AESOP), 제우스(ZEUS), 헤르메스(HERMES) 등을 개발하였다. 1994년에 개발된 이숍(AESOP)은 복강경수술에 있어 복강경카메라를 고정해 주고 상. 하. 좌. 우 및 원. 근을 자유로 발판이나 손잡이를 눌러 조절할 수 있으며 최근에는 수술자의 목소리를 인식하여 동작이 되는 장치로까지 개발되었다[5]. 의료비 중 인건비의 비중이 큰 구미에서는 의료비의 절감과 내구성 및 안정성이 좋아 많이 사용하고 있으며 이미 10만회 이상의 수술에서 사용되고 있으며 후에 개발된 ZEUS로봇 수술시스템의 기초가 되었다.

이숍(AESOP)도 복강경 수술에서 복강경 카메라를 고정 및 이동하는 카메라 보조로봇이기 때문에 진정한 의미

에서의 로봇 수술이라고 하기에는 부족한 감이 없지 않다. 물론 아직은 자기가 알아서 수술을 해주는 그런 로봇 수술은 아직 없는 상태이며 앞으로 개발되어야 할 것이다. 이런 의미에서 로봇수술이라는 용어보다는 수술용로봇(Surgical Robot)이란 용어가 적당하다고 생각한다. 즉 수술로봇이란 수술도구가 환자와 직접 접촉하는 수술과정의 전체 혹은 일부분을 로봇이 담당하게 함으로써 기존에 불가능하던 수술을 가능하게 하거나 시술의 정확성과 성공률을 높이거나 시술 시간 및 비용 단축, 혹은 원격수술 등을 목적으로 하는 로봇이다. 현재까지 연구된 수술로봇은 미세 수술용 원격수술 로봇시스템, 최소침습수술 로봇시스템, 개복 수술 로봇 등이 연구, 개발, 상용되고 있다. 최근에는 원격수술까지 성공하여 이 분야의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 미국을 비롯한 선진국에서는 복강경 수술뿐 아니라 다른 분야의 수술에서도 로봇 수술이 이미 보편화 되어가고 있다[7].

1993년 개니어 박사(Gagner MD)등이 최초로 로봇 팔(robotic arm to hold the camera)을 이용하여 복강경을 조정하면서 담낭절제술을 시행하였다. 그리고 1997년 힌펜스 박사(Himpens MD)등이 벨기에에서 진정한 의미의 로봇의 도움을 받아 담낭절제술을 성공하였다[8].

그 동안 여러 시스템이 개발되었지만 그 중 현재 수술로봇이라고 할 수 있는 시스템이 몇 가지 있으며, 미국에서 FDA 인증을 받고 실제로 상용화 되어 판매된 시스템(commercially available telerobotic surgical system)은 제우스 시스템(Zeus:Computer Motion, Goleta, Calif.)과 다빈치(da Vinci: Intuitive Surgical, Inc., Menlo Park, Calif)의 두 종류가 있으며, 개발이 완료되었지만 상용화는 하지 못한 라프로텍(LaproTec: Endvia, Inc., Cambridge, Mass.) 등이 있다[8].

Yulun Wang이 컴퓨터 모션회사를 만들고 이숍(AESOP)을 상품화해서 판매하고 있는 동안, 1995년 스탠포드 연구소(Stanford Research Institute)의 원격수술 시스템을 흡수한 Fredrick Moll MD은 인투이티브 회사(Intuitive Surgical, Inc.)를 시작하면서 1997년부터 다빈치(da Vinci) 시스템을 개발하여 발표하였다. 이 기계를 이용하여 1997년 벨기에에서 처음으로 환자에서 수술이 이루어졌다[9,10]. 일 년 후 컴퓨터모션 회사가 역시 원격수술시스템인 제우스(Zeus) 시스템을 만들기 시작하였다.

이 두 시스템은 비슷한 기구이지만 크게 세 가지가 차이가 있다[8,10]. 첫째, 제우스는 복강경 수술과 같이 모니터를 보면서(2D) 수술하는데 비해 다빈치는 입체영상(stereoscopic image:3D)하에 수술이 이루어진다는 사실이다. 둘째, 제우스는 복강경 수술에 사용되는 기구와 같은 기구를 사용하여 수술하는 (5자유도 구현)데 비해 다빈치는 기구가 손목처럼(endowrist system) 마음대로 구부러지는 동작을 구현함(7자유도 구현)함으로써 마치 환자의 바로 앞에서 바로 보면서 자유로운 동작을 구현하는 수술이 가능하였다. 그리고 셋째, 제우스는 복강경수술에서만 사용이 가능하지만 다빈치는 가상의 공간에서 축을 사용하기 때문에(no fulcrum point) 복강경 수술뿐 아니라 일반 수술에서도 이용이 가능하다. 최근에는 다빈치 시스템은 좀 더 기구를 발전시켜, 현재의 다빈치 시스템은 4개의 로봇 팔을 가진 시스템으로 정착되었으며, 2001년 미국 FDA승인을 받았다.

이와 같이 한동안 로봇 수술은 ‘제우스’와 ‘다빈치’의 두 시스템이 대표적으로 사용되었으며, 기타 몇 시스템이 개발되고 있었으나 상용화 되지 못하였다. 다빈치 시스템이 가격은 고가였으나 위에 기술한 장점으로 인해 우위를 차지하였고 드디어 2003년 제우스를 생산하는 컴퓨터 모션회사가 인투이티브 회사에 합병이 되어 더 이상 생산을 하지 않게 되었으며 결국 현재의 로봇수술장비는 인투이티브 회사의 원격로봇 수술시스템인 다빈치가 독점을 하고 있다고 해도 과언이 아니다. 이에 저자는 위의 여러 시스템 중 ‘다빈치 원격로봇 수술 시스템(the da Vinci Telerobotic Surgical System)’에 대하여 좀 더 자세히 설명하겠다.

2) da Vinci Robotic Telepresence Surgery System (Intuitive Surgical, Inc., Menlo Park, CA, U.S.A.)

다빈치 시스템은 다음의 세 개의 부분 즉 로봇수술카트(4 arm surgical cart), 수술자 콘솔(surgeon console), 그리고 복강경 부분(vision cart)으로 나누어진다[10]. 로봇수술카트는 175 cm의 높이에 544 kg의 무게를 가진 실제 수술이 이루어지는 로봇 팔 부분으로 환자의 위나 옆에 위치한다. 복강경 카메라를 고정 및 조정하는 팔이 가운데 있으며, 수술용 기구가 작동되는 팔이 3개가 더 있다. 이 기구로 수술 콘솔에서 의사에 의해 시행되는 동작이 전달

되어 작동되는 것이다. 수술용 기구가 작동되는 팔은 7자유도를 구현함으로써 수술자의 손동작을 거의 그대로 전달할 수 있다. 비록 개복 수술의 자유도인 25보다 훨씬 적지만 기존 복강경수술의 5자유도에 비해 2개의 추가의 자유도가 있다는 것은 상당한 동작의 자유로움(same flexibility of the human wrist)을 더해준다. 수술 콘솔은 입체영상을 볼 수 있는 양안 화면(three-dimensional vision capability)이 있으며, 기구를 작동하는 컴퓨터장치가 있다. 수술용 기구를 조정하는 마스터 기구조정장치(master instrument controllers)가 있으며, 의사는 조정장치 앞에 앉아서 편안히 손을 얹어 놓고 기구를 작동하면, 그 동작이 수술자콘솔에서 로봇수술카트로 전달되어 수술용 기구가 작동하게 되는 것이다. 약간의 수술자의 손떨림이 있더라도 로봇이 알아서 떨림을 제거해주고(tremor

filtering & motion reversal correction), 수술자의 동작을 일정한 비율로 축소할 동작을 재현(motion scaling)하므로 손으로 직접 하는 수술보다 훨씬 섬세한 조작(augment surgical dexterity and visual feedback)을 할 수 있다 [8,10]. 게다가 거의 10~16배로 확대된 입체화면(stereoscopic vision)을 이용하여 아주 자세한 해부학적 구조를 보면서 수술할 수 있어 수술 합병증을 줄일 수 있다고 생각한다. 수술 콘솔의 하부에는 몇 개의 발판이 있는데 이는 경우에 따라 전기 소작을 하거나 또는 기구 조정장치나 복강경카메라 등의 움직임을 교대하는 각각의 발판으로 기능이 설정되어 있다(그림 1~5).

다빈치의 장점중의 하나는 복강경수술에 존재하는 지레대받침점(fulcrum point)이 없고 가상의 지점(virtual



그림 1. 다빈치 시스템의 수술 콘솔 사진.



그림 3. 수술자가 수술 콘솔에 앉아서 수술을 진행하고 있는 모습.



그림 2. 다빈치 시스템의 로봇 카트 사진(4개의 로봇 팔을 가지고 있음).



그림 4. 다빈치 시스템의 로봇 카트가 연습용 돼지에게 적용되어 실제 수술이 이루어지고 있는 모습.



그림 5. 수술 콘솔에 앉아서 수술을 진행하는 수술자의 손모습(아래)과 복강내의 실제 수술장면(위)사진.

point)을 사용하므로 기존의 복강경 수술뿐 아니라 일반 수술에서도 사용이 가능한 시스템이라는 것이다[8]. 그러므로 다빈치의 이용의 확대가 가능하다. 즉 복강경수술 뿐 아니라 일반수술에도 사용이 가능하다는 것이다. 실제로 최근 들어 이비인후과와 같은 분야에 그 이용을 확대하고 있다. 그러나 이 시스템의 진가는 복강경수술에서 나타난다. 즉 입체시야 하에서 마치 시술자의 손목동작과 같이 구현할 수 있으므로 기존의 복강경 수술에서는 할 수 없었던 동작이 가능하고 하기 힘든 동작도 아주 쉽게 할 수 있다[11]. 그래서 전립선 암에서 전립선을 제거하는 경우 기존의 복강경 수술보다 월등한 면이 있어 근래에 미국의 경우 폭발적인 수요의 증가가 있으며, 최근 미국의 경우 다빈치 중 반 이상이 비뇨기과 수술용으로 판매되고 있으며 수술 건수도 폭발적으로 증가하고 있다.

이러한 다빈치 시스템은 아직 완전한 시스템이 아니고 발전하는 과정 중에 있다고 생각된다. 이러한 다빈치 시스템의 단점은 환자의 체외에 설치하므로 삽입부위의 절개창에 제한이 있고, 로봇팔이 크고 길어서 동작반경의 제한이 있으며 특히 내부동작에 비해 바깥 장치의 동작반경이 커서 서로 부딪히기가 쉽다[6]. 그래서 각각의 로봇팔이 부딪히는 일이 생기는 것을 줄이기 위해 각각의 투관과의

간격이 적어도 8센티정도는 되어야 한다. 게다가 아직 실제로 만지는 촉감의 기능은 거의 없는 관계로 이는 개복수술에 비해 아주 큰 단점이기도 하다. 그래서 눈으로 보는 감각(visual input)을 사용하여 촉감을 유추하여야 한다. 간단한 수술은 정말 혼자서 할 수 있겠지만, 아직은 간호사가 수술기구의 교환 등의 일을 도와주어야 하며, 보조수술자가 환자의 옆에서 장거나 조직을 당겨주는 일, 지혈클립을 사용하는 일 등의 일정부분의 수술을 도와주어야 한다. 그러나 무엇보다도 가장 큰 단점은 장비나 기구가 고가라는 점이다. 그러나 몇 년 내로 로봇팔이나 수술기구 등의 크기가 작아지고, 복강내 수술기구의 체내의 관절을 증가시키고, 촉감의 기능이 추가되면 지금보다 훨씬 편하게 수술 할 수 있을 것이라고 생각된다. 비용문제도 점차 해결될 것으로 예측한다.

다빈치 시스템은 2007년까지 전 세계적으로 약 1,200대 이상 판매되었다고 하며, 동양에도 이미 80여대가 보급되었다. 문제는 고가의 장비(약 25억) 및 기구를 사용하여야 하므로 수술비용이 고가인데 비해 의료보험의 혜택을 받을 수 없어 환자부담이 크다는 것이다. 로봇수술은 어느 한 영역에서 사용되는 것이 아니라, 거의 모든 영역에서 다 사용 가능하다. 그 중 외과, 심장외과, 비뇨기과 등이 활발히 사용하고 있으며, 특히 미국의 경우 비뇨기과영역에서 최근 로봇수술의 엄청난 증가가 있었다[12-15]. 외과의 영역에서도 거의 모든 분야에서 사용이 가능하다. 다시 말하면 복강경 수술로 되는 수술은 다 가능하다고 할 수 있을 뿐 아니라 일반 수술에도 사용이 가능하다. 로봇수술의 진가는 역시 봉합술(suturing)에서 탁월한 기능을 발휘한다고 할 수 있다.

우리나라의 경우 1996년 연세의대 신촌 세브란스병원에서 복강경 카메라자동조정장치인 이숍(AESOP)을 이용하여 첫 수술(laparoscopic solo cholecystectomy) 시행하였으며, 진정한 수술용 로봇이라 할 수 있는 다빈치 시스템은 2005년 4월 말에 연세의대 신촌 세브란스병원에 도입이 되었으며, 2005년 7월 13일 한국 FDA승인을 받아 2005년 7월 15일 첫 수술(담낭절제술, 전립선암 수술)을 시행하였고, 이어 위암수술, 담도낭종수술(choledochal cyst), 대장암 절제술, 간절제술, 췌장절제술, 췌십이지장 절제술(pancreato-duodenectomy) 등이 시행되었다. 흉부외과에서도 흉강내 종양제거 및 식도암수술을 시행하였

으며, 산부인과에서는 자궁적출술을 시행하였다. 심장수술도 이 다빈치 수술로봇을 이용하여 성공하였다. 최근에는 이비인후과에서 인후부에 있는 종양을 제거하는 로봇수술도 성공하였다. 신촌 세브란스병원에 이어 영동 세브란스병원에도 2007년 5월부터 새로운 다빈치 시스템을 도입하여 사용하고 있으며, 2007년 7월에는 신촌 세브란스병원에 초기의 구형 다빈치시스템을 신형(da Vinci-S)으로 교체하였으며, 증가하는 로봇수술의 수요에 부응하여 추가로 2대를 더 구입하여 연세의료원에 총 9대(신촌 세브란스병원 5대, 강남 세브란스병원 1대, 연세다빈치트레이닝센터 3대)의 다빈치 로봇을 가동하고 있으며, 최근 2013년 12월초까지 신촌 세브란스병원에서 10,000례의 수술을 달성하였으며, 영동 세브란스병원에서도 3년만에 1,000례의 수술을 달성하였다. 연세의료원은 단순 진료기관에서 한걸음 더 나아가 국내 및 아시아지역의 로봇수술의 메카로서 다빈치 운용법을 보급하고, 새로운 수술기법을 연구하고 수련할 수 있는 연세 로봇 연수 센터를 개소하려고 준비하였으며, 2008년 2월 5일 연세의료원내에 “연세 다빈치트레이닝센터”를 설립, 개소하였다. 과거에는 로봇장비를 구입 후 미국에 있는 인튜이티브 회사에 가서 기본적인 다빈치 운용법에 대해서 교육을 받아야 했으며, 이로 인해 시간 및 비용의 낭비가 심했으며, 심도 있는 교육을 받기가 어려웠다. 그러나 앞으로는 우리나라에서 연수를 하므로 시간 및 비용의 낭비를 줄이고 더 효율적인 연수를 할 수 있으리라고 기대한다. 또한 미국의 인튜이티브사가 전립선암 중심으로 교육을 실시하는 것과 달리 한국에 많은 위암, 대장암, 갑상샘암 등 다양한 교육을 받을 수 있을 뿐 아니라 우리나라 환자에 맞게 고안된 로봇수술의 경험과 방법을 체계적으로 배울 수 있는 장점을 지니고 있다. 게다가 다른 연수센터에서 시행하지 않는 실제적 임상경험을 공유하고 견학할 수 있는 발전된 교육을 준비하고 있다. 이에 앞으로 더욱 발전하는 한국의 로봇 수술이 되리라 기대된다. 나아가 우리나라뿐 아니라 아세아지역의 요구도 흡수할 수 있으며, 오히려 더욱 발전시켜 전 세계를 상대로 하는 연수센터로 발전시키는 것을 고려하고 있다. 2008년 후반기부터는 노르웨이의 병원(노르웨이를 통하여 구미지역과 유럽지역도 포함)과 복강경 및 로봇수술장면을 원격으로 전송하는 시스템을 구축하여 서로 배우고 상의하는 협조체제를 구축하기로 하였다.

2007년 7월부터는 연세의료원뿐 아니라 고대안암병원, 서울아산병원, 한림대 강남성심병원, 서울대 분당병원, 부산 동아대학병원, 경북대학병원, 서울삼성병원, 보라매 시립병원, 서울대학병원, 원광대병원, 아주대병원, 한양대병원, 국립암센터, 경희대병원, 서울성모병원, 대전을지병원, 전북대병원, 이대목동병원, 전남대병원, 노원을지병원, 원주기독병원, 해운대백병원 등에서도 신형다빈치를 도입하여 수술을 시작하였다. 그리고 몇몇 대학에서도 추가로 장비도입을 준비하고 있다. 우리나라가 이렇게 성공을 거둔 이유는 비교적 복강경 수술의 기초가 잘 구축되어 있었으며, 첨단수술에 대한 지속적인 관심과 연구에 힘입어 쉽고 빠르게 발전시킬 수 있었던 것으로 판단된다.

의료서비스 입장에서는 어서 우리나라도 다른 선진국과 마찬가지로 로봇수술을 의료보험의 제도권으로 받아들여 수술 받는 환자의 부담을 줄여주는 일일 것이다. 물론 우리나라가 아직 선진국처럼 많은 의료비를 쓸 수 없는 상태이지만, 국가의 재정이 좋아지고, 국민이 더욱 노력하여 빨리 선진국으로 진입하게 되면 당연히 되어야 할 일이라고 생각된다. 물론 여기서 한 가지 꼭 언급할 것은 현재는 고가의 장비 및 소모품을 외국 특히 미국에서 수입하여 사용하고 있는데, 한시 빨리 로봇장비 및 소모품을 국산화를 하면 비용을 훨씬 줄일 수 있으며, 더욱 빨리 의료보험의 혜택을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

국내 수술용 로봇시장은 아직 초기 시장이다. 이제 막 외국인 수술로봇을 들여와 국내 의료진들이 활용하기 시작해, 수술용 로봇의 수요가 점차 확대되고 있는 상황이다. 이에 국산 수술용 로봇의 필요성이 제기되고 있는 가운데 최근 국내업체들이 미국의 수술로봇을 대체할 제품개발에 나서 주목 받고 있다. 그 중 가장 활발히 참여하고 있는 업체는 래보(ReeBo)라는 국내업체로 미국의 다빈치와 버금가는 수술용 로봇 개발을 지난해부터 본격 착수하였으며 앞으로 2년 내 개발을 완료할 예정으로 있다. 그 외에 암센터의 조용호 박사팀이 원격수술로봇을 개발하고 있으며, 2008년 5월 4일 비록 동물실험이긴 하지만 원격수술 시연을 시연한 바 있다. 한편 정부에서 주도하여 지식경제부(과거 산자부) 산하에 의료로봇 육성팀이 업계와 학계를 망라하여 구성되었으며, 우리나라의 의료로봇의 발전의 방향을 잡고 또 실제로봇수술의개발을 촉진하기 위한 역할을 하고 있다.

3) 미세로봇수술(MicroDexterity Surgical System)의 전망
과 NOTES (natural orifice transluminal endoscopic surgery)

로봇수술시스템의 발전이 점점 더 정교해지면서 현재 사람의 동작의 한계를 넘어선 장비로 발전하고 있다. 특히 기구의 크기가 점점 작아지면서 아주 정교한 수술에 사용되도록 발전되고 있다. 예를 들면 이미 복강경수술에서 기존의 5밀리미터정도의 굵기의 수술장비가 최근엔 3밀리미터 또는 2밀리미터의 가느다란 기구가 개발되어 사용되고 있어 이를 Mini-laparoscopic surgery라고도 한다. 한편 더욱 정교한 기구가 개발되고 있는데 예를 들면 안과의 망막수술을 위한 장비로 이 장비의 겨우 환자의 눈동자의 움

직임을 추적하면서 가상의 정적인 망막화면을 보면서 섬세한 기구를 이용한 수술을 하는데 수술자의 미세한 손떨림을 없애면서 수술자의 동작을 100 대 1 정도 즉 수술자의 1밀리미터의 움직임이 수술장비의 경우 10미크론정도의 미세한 동작으로 재현되는 기구이다. 이러한 기구를 이용하게 되면 인간의 한계를 넘어선 정교한 수술을 할 수 있게 되는 것이다. 앞으로 점차 더 많은 수술에서 이러한 미세로봇 수술이 사용될 것이라고 예상된다.

한편 최근에 많은 관심을 갖는 또 다른 분야는 NOTES (natural orifice transluminal endoscopic surgery)인데 이는 영상장비와 수술기구의 크기를 아주 작게(수 mm 정도) 만들 수 있는 기술을 기반으로 수술로봇이 아주 복강 내로 들어가는 정도로 작은 수술로봇이 만들어지고 있다 [16]. 이러한 기술을 기반으로 최근(2004년부터)들어 기존의 복강경수술에서 사용하던 여러 개의 투관을 사용하던 것을 투관의 수자를 줄이거나 아니면 투관을 사용하지 않고 대신 위장(transgastric), 자궁경부(transcervical), 또는 대장(transcolonic) 등을 통하여 내시경 또는 수술기구를 삽입을 하여 흉터가 거의 없거나 아예 보이지 않는 수술이 가능해졌다. 이러한 수술이 도입이 되기 전까지 한동안 복강경수술에서 작은기구(mini-instrument)를 이용한 수술이 시행되었으며, 아직 제한점이 있기는 하지만 NOTES를 통한 흉터 없는 수술까지 할 수 있게 되었다. 아직까지는 이러한 NOTES의 수술에 주로 내과에서 사용되던 내시경을 이용하여(내과 의사의 도움이 필요) 수술을



그림 6. 가상현실을 이용한 복강경수술 모의 연습과정.

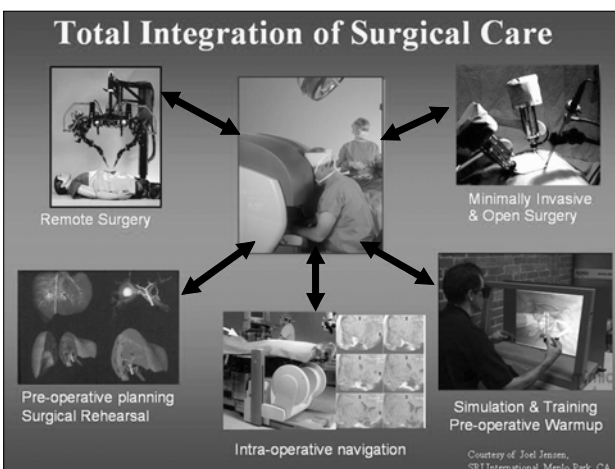


그림 7. 최첨단 장비를 이용한 수술의 예.

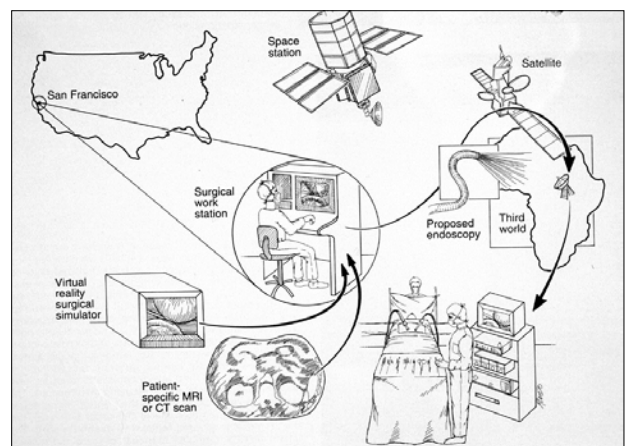


그림 8. 인공위성 및 인터넷을 이용한 원격진료 및 원격수술의 모식도.



그림 9. 최근 많이 사용되고 있는 다빈치 수술시스템에 관한 자료 사진.

하고 있지만 곧 이러한 장비에 로봇시스템이 추가되면 훨씬 쉽고 편하게, 그리고 더욱 정확하게 NOTES 수술을 할 수 있으리라고 기대하고 있으며, 실제로 여러 나라에서 이러한 시스템을 개발하고 있으며 곧 상용화 되리라고 기대한다(그림 6~10).

결 론

인터넷의 발전에 힘입어 의사들의 재택근무 및 환자들도 병원에 직접 가지 않고도 집에서 진단 및 치료를 받는 날이 곧 올 것으로 여겨진다. 비록 로봇수술의 역사와 경험은 짧고, 아직 로봇수술의 제한이 있는 것은 사실이지만, 복강경수술이 처음 도입되었을 때, 한동안 불편하고 문제가 많았지만 지금은 아주 자유롭게 사용이 되듯이 로봇수술 특히 복강경을 사용한 로봇수술에서도 쉽고 자유롭게 이용될 날이 머지 않았다고 생각한다. 또한 과거에는 수술을 하기 위해 커다란 상처를 내고 하던 수술을 점차 연필 정도의 굵기의 구멍 몇 개 또는 곁에서는 보이지 않는 조

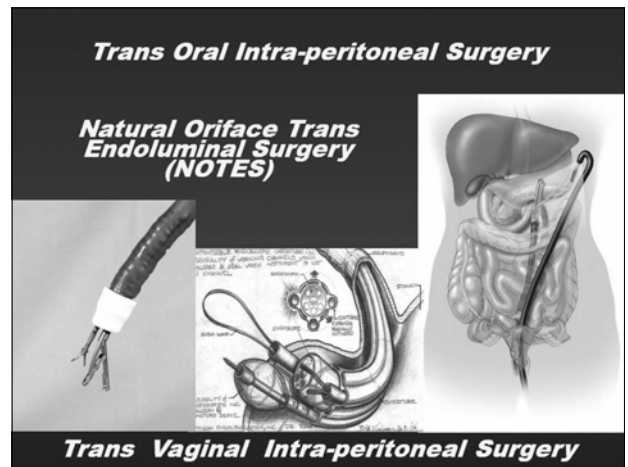


그림 10. 내시경을 통한 수술이 가능한 기구의 모습(좌측사진)과 경위적 복강경수술의 모식도(가운데 사진) 및 질을 통한 췌장미부 수술하는 모식도사진(우측사진)으로 NOTES의 수술의 모습들에 관한 자료사진들.

그만 상처를 통해 수술이 이루어지리라고 예상된다. 그리고 이러한 모든 자료가 가상현실의 환경 속에서 의학교육과 의술의 훈련과정에 도입되어 사용될 날이 머지 않았다고 생각한다.

현재 많이 시행되고 있는 복강경 수술은 수술 정보세대 혁명의 시작을 알리는 과도기 기술이고 로봇의학, 원격수술, 가상현실 등이 다음 혁명 단계이다. 이러한 기술들이 인터넷을 통하여 세계 어디서나 원격교육(tele-education)이나 모의수술연습(surgical simulation)같은 새로운 교육 기회에 접할 수 있게 할 것이고 교육적인 과정의 보다 많은 확대를 직접 가져다 줄 것이다. 그리고 우리가 사용하고 있는 수술 로봇들은 아직은 로봇 혁명의 시작일 뿐이다. 현재의 로봇 수술은 수술자 콘솔 또는 워크스테이션에서 이루어지는 공통점을 가지고 있다. 최근 개발하고 있는 시스템으로 환자의 수술 전 검사 영상이 워크스테이션에 같이 보이거나 중첩되게 보이게 하여 수술 전이나 또는 수술 중이라도 영상을 보면서 수술에 적용할 수 있게 하는 것이 있다. 지금까지의 기계는 촉감을 느끼는 데 아주 부족한 시스템인데 비해 이러한 촉감을 느낄 수 있는 시스템이 개발되고 있고 동작도 훨씬 자유로운 시스템이 개발 될 것이다[17]. 그리고 아직은 시스템이 크고 무거운데 점차 작고 가벼운 시스템으로 발전 될 것이며 가격도 점차 낮아질 것으로 생각한다. 발전을 거듭하면, 결국 시스템이 점점 지능

적이 되어 수술을 스스로 하는 시스템이 될 수 있으리라고 생각된다. 즉 의사가 미리 계획 세운 동작을 수행할 수 있는 시스템이 될 것이라는 것이다[8]. 더욱 발전하면 스스로 치료를 하는 시스템까지도 생각해 볼 수 있다. 원격수술의 경우 아직은 수술자와 로봇팔과의 실제 동작의 시간차가 있어서 동작의 한계가 있다. 그러나 이것도 점차 개발이 되면 멀리 떨어진 곳에서(예를 들면 전쟁터의 환자나 우주에 있는 환자 등) 수술을 할 수 있는 시스템이 개발 될 수 있으리라고 생각된다. 한편 나노기술(nanotechnology & microelectromechanical systems)의 발전으로 기구나 로봇이 점차 작아져서 작은 로봇을 혈관 내로 주입하여 항로를 결정하고 치료를 할 수 있는 단계도 가능하리라고 생각한다[18].

REFERENCES

1. Capek J. Opilec. In: Lelio A Pro Delfina. Praha: Aventinum; 1925.
2. Capek K, Selver P. R.U.R. (Rossum's Universal Robots): a fantastic melodrama. Garden City, N.Y.: Doubleday, Page; 1923.
3. Asimov I. Runaround. Astounding Science Fiction 1942 (March).
4. Hockstein N, Gourin C, Faust R, Terris D. A history of robots: from science fiction to surgical robotics. *Journal of Robotic Surgery* 2007;1(2):113-118.
5. Gourin CG, Terris DJ. Surgical robotics in otolaryngology: expanding the technology envelope. *Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery* 2004;12(3):204-208.
6. Ballantyne GH. Robotic surgery, telerobotic surgery, telepresence, and telementoring. *Surgical Endoscopy* 2002;16(10):1389-1402.
7. Sung GT, Gill IS. Robotic renal and adrenal surgery. *The Surgical Clinics of North America* 2003; 83(6):1469-1482. doi:10.1016/s0039-6109(03)00172-5.
8. Satava RM. Introduction to robotic surgery. In: Ballantyne GH, Marescaux J, Giulianotti PC, editors. *Primer of robotic & telerobotic surgery*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2004. pp. 1-4.
9. Himpens J, Leman G, Cadiere GB. Telesurgical laparoscopic cholecystectomy (letter). *Surgical Endoscopy* 1998;12(8):1091.
10. Rockall TA. The da Vinci telerobotic surgical system. In: Ballantyne GH, Marescaux J, Giulianotti PC, editors. *Primer of robotic & telerobotic surgery*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2004. pp. 57-60.
11. Rockall TA, Darzi AW. Tele-manipulator robots in surgery. *The British Journal of Surgery* 2003;90(6): 641-643. doi:10.1002/bjs.4166.
12. Abbou CC, Hoznek A, Salomon L, Olsson LE, Lobontiu A, Saint F, et al. Laparoscopic radical prostatectomy with a remote controlled robot. *The Journal of Urology* 2001;165(6 Pt 1):1964-1966.
13. Mohr FW, Falk V, Diegeler A, Walther T, Gummert JF, Bucerius J, et al. Computer-enhanced "robotic" cardiac surgery: experience in 148 patients. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* 2001;121(5):842-853. doi:10.1067/mtc.2001.112625.
14. Kappert U, Schneider J, Cichon R, Guliemos V, Schade I, Nicolai J, et al. Closed chest totally endoscopic coronary artery bypass surgery: fantasy or reality? *Current Cardiology Reports* 2000;2(6): 558-563.
15. Chitwood WR, Jr., Nifong LW, Elbeery JE, Chapman WH, Albrecht R, Kim V, et al. Robotic mitral valve repair: trapezoidal resection and prosthetic annuloplasty with the da vinci surgical system. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* 2000;120(6): 1171-1172. doi:10.1067/mtc.2000.110177.
16. Rentschler ME, Dumpert J, Platt SR, Farritor SM, Oleynikov D. Natural orifice surgery with an endoluminal mobile robot. *Surgical Endoscopy* 2007;21(7): 1212-1215. doi:10.1007/s00464-007-9400-z.
17. Madhani AJ, Niemeyer G, Salisbury Jr JK. The black falcon: a teleoperated surgical instrument for minimally invasive surgery. *Proceedings of IEEE/Robotics Society of Japan international Conference of Intelligent Robotic Systems*; 1998 Oct; 936-944; Victoria, B.C., Canada.
18. Karagozler E, Cheung E, Kwon J, Sitti M. Miniature endoscopic capsule robot using biomimetic micropatterned adhesives. *Proceedings of The first IEEE/RAS-EMBS international conference on biomedical robotics and biomechatronics*; 2006 Feb; 105-111; Pisa.