

로봇수술의 현재와 미래

나근호

연세대학교 의과대학 비뇨기과학교실, 비뇨의과학연구소

The Present and Future of Robotic Surgery

Koon Ho Rha

Department of Urology, Urological Science Institute, Yonsei University College of Medicine

Abstract - Since the beginning of the 21st century, the emergence of innovative technologies made further advances in minimal access surgery possible. Robotic surgery and telepresence surgery effectively addressed the limitations of laparoscopic procedures, thus revolutionizing minimal access surgery. Surgical robots provide surgeons with technologically advanced vision and hand skills. As a result, such systems are expected to revolutionize the field of surgery. In that time, much progress has been made in integrating robotic technologies with surgical instrumentation. However, robotic surgery will not only require special training, but it will also change the existing surgical training pattern and reshape the learning curve by offering new solutions, such as robotic surgical simulators and robotic telementoring. This article provides an introduction to medical robotic technologies, develops a possible classification, reviews the evolution of a surgical robot, and discusses future prospects for innovation. In the future, surgical robots should be smaller, less expensive, easier to operate, and should seamlessly integrate emerging technologies from a number of different fields. We believe that, in the near future as robotic technology continues to develop, almost all kinds of endoscopic surgery will be performed by this technology.

Key Words: Robotics, Tele-presence surgery, da Vinci surgical system

핵심용어: 로봇수술, 원격수술, 다빈치 시스템

1. 정 의

Robot Institute of America는 로봇을 “물자, 부속, 공구들을 이동시키기 위해 디자인 된, 재프로그래밍 가능한 다기능 조작자 또는 다양하게 프로그래밍된 동작을 통하여 각종 업무를 수행하기 위한 전문화된 장치”로 정의하였고, Webster 사전에서는 로봇을 “인간과 흡사하게 보이는 장치 또는 자동 기구로 인간이 지시한 기능을 실행하거나 작동하는 장치”로 정의한다. 따라서 로봇은 정의한 방식대로 행하는 기능, 미리 프로그래밍한 순서에 따라 업무를 실행하는 기능 및 이전의 습득한 내용과 경험에 근거하여 주어진 명령을 실행하는 기능의 3가지 기능을 포함한다.

2. 로봇의 역사

가. 초기 역사

기원전 400년대에 철학자이며 수학자인 Tarentum의 Archytas는 “Pigeon”이라는 최초의 자가 프로펠러 기계를 가진 목재 새를 만들었다. 이 장치는 증기를 이용하여 날갯짓을 하도록 설계되어 자가로 50미터를 비행할 수 있었다. 기원전 250년에, Alexandria의 Ctesibius는 시간을 지정할 수 있는 자동화된 물시계 고안하였다.

1495년에 Leonardo da Vinci는 알람을 울리는 기사를 만들어 기계화된 인형을 만들어 냈다. 이 “Leonardo’s Robot”은 르네상스 시대 여러 공예 등에 사용되었던 기계 인형들을 만들어 내는 모태가 되었다. 1801년 Joseph Jacquard는 산업 공장에서 최초로 프로그래밍된 자동 직조기를 개발하였다. 1960년대와 1970년대에 컴퓨터 프로그램을 위한 칩 카드 시스템이 도입되었고, 이것은 명령어를 컴퓨터 프로그램에 입력하기 위하여 도입되었다. 1898년, Nikola Tesla는 뉴욕의 매디슨 스퀘어 가든에서 전차를 통해 조정되는 보트를 전시하면서 원격에서 명령하는 기능을 가진 장치를 선보였다. 그러나 로봇이란 개념 자체는 20세기와 현재 21세기에서 나온 것이다.

나. 현대 로봇

Robot이라는 용어의 시작은 1923년 Karel Capek이 자신의 저서 “Rossum’s Universal Robots”에 노예를 뜻하는 체코어 robota를 사용하면서부터이다. 1942년 Issac Asimov는 자신의 과학 소설 Runaround에서 robot의 기술에 대하여 언급하면서 robotics라는 단어를 창조하였다. 그는 소설 “I, Robot”에서 연속적으로 로봇 공학의 규칙을 공식화 해왔고 이후 나온 많은 소설들에서도 로봇 공학이 중심이 되었다. 초기의 실제적인 로봇공학의 사용은 군대에서부터였다. 세계 2차 대전 중, 미국 전차 전방에 붙은 지뢰 탐지기

는 지뢰를 탐지했을 경우 전차의 진행 속도를 낮추었다. 독일 군대는 레이더 탐지를 통해 발사되어 날아가는 동안에도 자신의 위치를 측정할 수 있는 폭탄을 개발하였다.

최초의 산업용 로봇은 1950년대 초기에 George Devol과 Joe Engleberger에 의해 제조되었다. Unimation이란 회사에서, Unimate라는 다관절의 산업 로봇 팔을 창조하였다. Unimate는 General Motors사의 작업 중 금속 거푸집을 조절하는데 처음 사용되었다. 1978년, Victor Scheinman은 최초의 유동적인 로봇 팔이라 할 수 있는 Programmable Universal Manipulation Arm (PUMA)을 발명하였고, 이것은 빠르게 현대 산업의 표준이 되었다.

처음의 비싼 가격에도 불구하고 인간이 꺼리는 작업과 위험한 작업들에서 성공적인 업무이행능력은 산업에서 로봇의 사용을 더욱 확장시켰다. 산업 로봇의 또 다른 매력은 급속한 기동 및 반복적인 업무 요구하는 일들이나 많은 힘을 요구하는 작업들에서 피로 없이 그 효력을 발휘할 수 있을 뿐만 아니라 마이크로미터 단위의 정밀도를 요하는 경우에도 성공적으로 업무를 수행할 수 있다는 점이다.

3. 수술용 로봇

로봇 공학에 있어 가장 최근의 발전은 최신의 이용 가능한 시스템으로부터 점진적인 변화를 통하여 이루어진다. 수술적인 접근을 바꾸고, 기계의 전체적 디자인을 최소화 시켜옴과 함께 수술적인 영역에서는 기존의 방법과 새로운 방법을 병행해왔다. 기구 로봇 도구의 디자인에 있어서 그 동안 상당한 진보가 있어왔지만 더욱 향상된 기구들에 대한 발전 잠재력은 컸다. 현재 사용하고 있는 다양한 복강경 기구로부터 로봇에 적합한 기구들이 만들어졌다. 다수의 팔을 가진 로봇을 만드는 것이 가능해짐에 따라 외과의들은 어떤 시점이라도 여러 가지 기구를 사용하는 것이 가능하며 나아가 수술실 보조도 덜 필요하게 되었다.

로봇이 외과적 기계로서 임상적으로 처음으로 적용된 것은 1992년 인공 고관절 수술 (artificial hip replacement)에서의 이용이었다. 미국에서 개발한 ‘로보닥 (RoboDoc system)’이라는 기구로, 컴퓨터에 입력된 환자의 뼈와 인공관절의 해부학적 상태에 대한 자료를 분석하여 인공관절이 삽입할 부위를 로봇으로 가공함으로써 수작업에 비하여 시간을 단축하고 정확성을 높일 수 있는 장비다. RoboDoc은 미국의 정형외과 의사인 Bargar가 IBM의 재정적인 도움을 받아 캘리포니아 대학교 팀을 이루어 고관절 전치환 수술용 로봇으로 개발하였으며, 세계적으로 10,000회 이상의 수술이 RoboDoc을 이용하여 성공적으로 시행되었다. Robodac은 보조물과 뼈 사이의 접촉률이 수작업 일 때의 20%와는 비교할 수 없을 정도로 높은 평균 97%의 접촉률을 갖게 되었으며, 미국 FDA의 승인을 받았다. 하지만, 이러한 기구는 수술의 과정 중 일부만 자동화 한 것이지 실제로 로봇을 이용해서 수술을 하는 것은 아니어서 진정한 로봇 수술이라고 하기는 어렵다는 견해도 있다. 그러므로 수술에 직접 사용되는 기구를 사용하는 데 로봇이라는 개념이 사용된 것은 복강경 수술에서의 응용이라고 생각된다. 1990년대 들어서 커다란 발전을 하고 있는 복강경 수술에 로봇에 가까운 기구들이 개발되어 사용되었다. 특히 컴퓨터모션사 (Computer Motion, Inc., Santa Barbara, CA, USA)에서 개발한 이솜 (AESOP), 제우스 (ZEUS), 헤르메스 (HERMES) 등이 있다. 1994년에 개발된 이솜 (AESOP)은 복강경수술에 있어 복강경 카메라를 고정해 주고 상, 하, 좌, 우 및 원, 근을 자유로 발판이나 손잡이를 눌러 조절할 수 있으며 최근에는 수술자의 목소리를 인식하여 동작이 되는 장치로까지 개발되었다.

다빈치 시스템은 다음의 세 개의 부분 즉 로봇 카트 (the robotic cart), 수술 콘솔 (the operating console), 그리고 복강경 부분 (endoscopic stack)으로 나누어진다. 로봇 카트는 약 2m의 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 전달되어 작동되는 것이다. 수술용 기구가 작동되는 팔은 7자유도를 구현하므로 수술자의 손동작을 거의 그대로 전달할 수 있다. 수술 콘솔은 입체영상을 볼 수 있는 양안 화면이 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 콘솔에서 로봇 카트로 전달되어 수술용 기구가 작동하게 되는 것이다. 수술 콘솔에는 몇 개의 발판이 있는데 이는 경우에

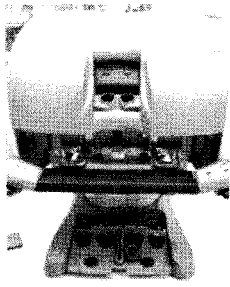


Fig. 1. The console of the da Vinci[®] robotic system

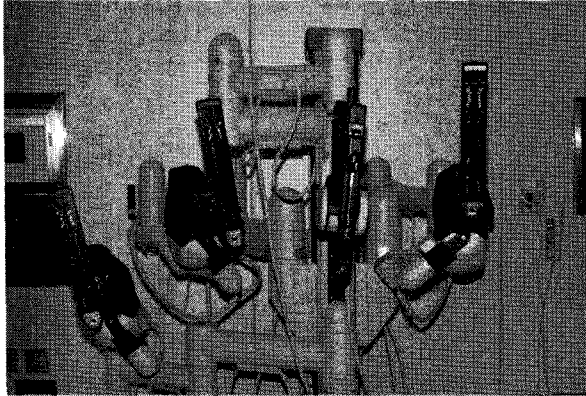


Fig. 2. The surgical cart of the da Vinci[®] robotic system

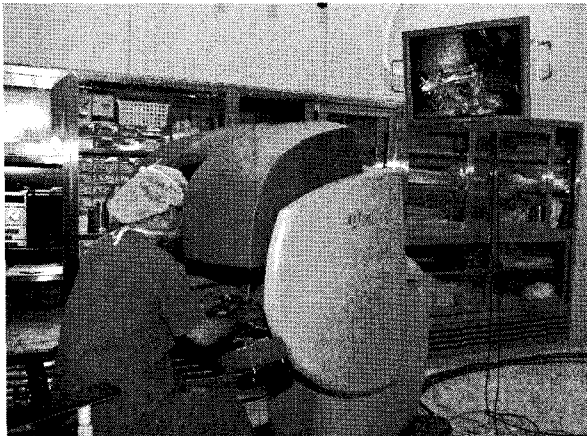


Fig. 3. Surgeon at the console and the robotic operating room.

따라 전기 소작을 하거나 또는 기구 조정장치나 복강경카메라 등의 움직임을 교대하는 각각의 팔관으로 기능이 설정되어 있다.(Fig. 1, 2, 3) 다빈치의 장점중의 하나는 복강경 수술뿐 아니라 일반 수술에서도 사용이 가능한 시스템이라는 것이다. 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.

4. 발전중인 로봇 제반 기술

가. 장거리 통신

향상된 통신 시스템과 정보전달은 먼 곳에 떨어져 있는 환자가 전 방면에 있어 쉽게 수술 받을 수 있도록 하였다. 이런 발전은 생생한 동시시간 음향과 영상을 제공하며, 더욱 복잡한 수술 중에 기관들 간에 서로 상호 작용할 수 있도록 도와준다. 무선 기술의 병합은 여러 시스템을 상호 연결하고, 정보 전달 및 수술적 조건과 감독을 용이하게 한다.

나. 촉각의 피드백

로봇에 의한 수술과 개방적 수술간에 존재하는 분명한 차이는 수술자가 촉각의 피드백을 느낄 수 없다는 점이다. 기구에 촉각을 결합시키는 것이 전반적인 수술적 경험을 향상시킬 수 있기 때문에 이러한 기술을 다듬기

위해 더 많은 노력이 기울여 지고 있다. 정점 촉각 기능을 기구에 포함시켜 봉합이나 조직 장력에 정보를 제공하고, 수술 중 현미경 사용은 종양의 경계를 구분하거나 신경이나 다른 기관들과의 인접성을 판별하도록 도와주며, 수술 중 방사선 영상은 수술이 진행되는 동안 종양의 위치와 변화를 수술자에게 실시간으로 제공한다.

다. 접근

최소 침습 복부 수술에 있어 전통적인 접근 방법은 복벽을 통한 것이었다. 최근엔 보다 침습이 적은 방법을 찾고 있는 중이다. 몇몇 방법들이 이미 위를 통한 접근이나, (1) 여성에 있어 질을 통한 접근, 성별에 관계없이 장을 통한 접근 등을 보고 하고 있으며 이러한 방법들은 복벽을 통한 접근과 비교할 때 상처부위의 불편감이 덜하고 회복기간을 줄인다는 장점을 보이고 있다.

라. 최소화

로봇의 체내 사용을 위한 발전을 위한 도전은 끊임없이 이어지고 있다. 안전성뿐만 아니라 기계 자체가 동력을 가질 수 있고 외부의 조정에 따라 작동할 수 있는 이동성을 갖추어야 하며 이것이 크기에 있어 최소화되어야 함을 고려해야 한다. 이러한 기계들은 임상 진료에서 이미 찾아 볼 수 있다. 그 예로 외부 조정기에 의해 위장관 내부의 영상을 전송하는 이동 마이크로 로봇 카메라를 들 수 있다.

마. 자율성

최근의 로봇 시스템이 개방기술을 로봇 팔의 동작으로 바꾸는데 집중되어 있지만, 수술기술을 자율적으로 행할 수 있는 능력을 가진 시스템이 있어 팔목할만한 발전을 보여주고 있다. 산업에서처럼 빠른 속도라는 잠재력이 중요하기도 하지만 정확히 기술을 복제할 수 있다는 것이 고정된 생산라인과는 다른 수술 환경에 있어서 매우 유리한 요소로 작용한다. 끝날 림프절 박리 시 장골동맥이나 폐색신경 등 위험한 부위에 대한 수술 전 이미지를 얻을 수 있게 되고 미리 계획하게 됨으로써 수술하는 동안 시각적인 단서에 의거하여 수술 상황을 조절할 수 있게 해주어 이러한 부분의 수술에 안전성을 보장한다. 신체 내 인공 지능 (intracorporeal artificial intelligence)이란 로봇에게 계획하고 수행하며, 또 이전의 수술을 기반으로 전체 또는 일부의 행위를 기반으로 경험으로부터 배울 수 있게 하도록 해준다. 그러나 이러한 기술이 안정성을 확보할 때까지, 수술의 기술과 정교함이 수술에 있어 필요할 것이다.

5. 미래의 로봇 수술

가. 원격 조연 (Telementoring)

1997년에 Rosser와 그 동료들이 최초로 술자에 대한 원격 조연 및 원격 감독을 보여 주었다. 숙련된 술자는 복강경 장 절제술과 복강경 Nissen fundoplication을 처음으로 시행한 초심 의사의 수술을 원격지에서 감독하였다. (2) 1998년에는 Kavoussi 그룹은 약 3.5 마일 떨어진 두 병원 사이에서 27개의 수술을 원격 조연하였다. (3) 이 경험에 기초하여 같은 그룹에서 국제적인 원격 조연을 미국의 병원과 오스트리아, 방콕, 태국의 병원 사이에서도 성공적으로 시행하였다. 독일에서 Local Area Network (LAN), 상방 비디오 카메라 그리고 237개의 수술에서 원격 감독자가 조정할 수 있는 robot 시스템을 포함한 새로운 시스템을 사용하였다. (4) 감독자 (proctor)는 비디오 모니터에서 주석을 달수 있는 원격 방송 장비 (telestator)를 사용하였다. 그들은 비디오 정보와 오디오 정보를 LAN을 통하여 전달하는데 충분하다는 것을 발견하였다. 이 연구들은 외과의가 원격지에서도 다른 외과의의 수술을 감독할 수 있다는 것을 보여주었다.

나. 원격 참석 수술 (Telepresence surgery)

원격 참석 수술 동안, 외과의는 한곳에 마련된 조정장치에서 가상 수술 영상과 robot 기구를 사용하여 원격지에서 수술을 진행하였다. 1991년에는 Green과 그의 동료들이 원격 수술의 가능성을 처음 보여주었다. Robot 시스템은 원격지인 전장에서 상처 입은 병사의 수술을 원격지에서 시행할 수 있도록 계획되었다. 1998년에 Bowersox와 그의 동료들은 동물에서 초기 원격 수술 시스템을 가지고 외상 수술을 시행하였다. (5) 외과의는 간열상을 입은 돼지에서 장 문합술, 위 장 문합술, 담낭 절제술, 출혈 부위 지혈수술을 진행하였다. 이 연구를 바탕으로 하여 외과의는 환자에 원격지 수술을 진행하였다.

Zeus[®](Computer Motion, Santa Barbara, CA, USA)와 da Vinci[®] telerobotic surgical system (Intuitive Surgical Inc., Sunnyvale, CA, USA)은 처음부터 원격 수술이 가능하도록 설계되었다. 2001년에는 Marescaux와 동료들이 첫 대륙간 원격 참석 수술을 진행하였는데, 수술자는 뉴욕에서 환자는 스트라스버그에서 Zeus[®]를 이용하였다. 술자는 특별한 어려움 없이 수술을 완료하였다. (6, 7) 원격 참석 수술은 의료 격오지에 발달된 수술적 처치를 제공하였다.

다. 디지털 정보가 연결된 통합 수술실 체계

디지털 정보가 통합된 수술방은 다양한 종류의 디지털 정보의 흐름이 수술방으로 들어간다. 슈퍼컴퓨터는 원격 로봇 (telerobot) 시스템을 작동하는데, 이 시스템들은 디지털정보를 환자 특이 가상 모델로 변환할 수 있는

처리 능력을 포함하고 있다. Satava는 수술 원격 로봇(telerobot)을 “이것은 기계라기 보다 ‘팔’을 가진 정보 시스템이라고 볼 수 있다.”라고 표현하였다.(8) 병원 원내진단망을 통하여 통합된 수술방에 연결하였을 때 robot의 컴퓨터는 환자의 의무기록에 접속한다. 이것은 각종 진단 영상과 연결할 수 있고, 이것들을 환자 특이 3차원 가상 모델로 변환시켜 정보 공간에서 수술을 진행 할 수 있도록 한다.

라. 수술 시뮬레이션 (Surgical simulation)

외과의들은 수술 부위의 3차원 가상 비디오 영상을 da Vinci®의 술자의 조종 공간에서 보면서, 환자의 3차원 진단 영상들이 가상 현실 영상에 겹쳐 보여 (superimposition) 좀더 향상된 사실적 환경을 접할 수 있다.(9) 각각의 환자에 대한 가장 좋은 술기에 대하여 접근방향, 수술창의 길이 혹은 절제 정도를 미리 판단하여 평가 될 수 있다. 환자의 모든 준비가 만족스러울 때, 외과의는 증강된 현실적 수술(augmented reality operation)을 수행할 수 있다.

마. 증강된 현실적 수술 (Augmented reality surgery)

기복강 상태를 만들고 trocar를 넣고 robot팔을 넣었을 때 술자가 처음 보게 되는 영상은 3차원 영상일 뿐만 아니라 컴퓨터에 의하여 코딩된 모습을 보게 된다. 담당 절제술을 예를 들면, 술자는 총담관은 녹색으로 간동맥은 빨간색으로 코딩된 모습을 보게 된다. 컴퓨터는 술자가 총담관과 같은 중요 구조물을 자르거나, 주변의 열 화상 범위 안에서 전기 소작을 하는 것을 차단할 것이다. 2004년에 Marescaux와 동료가 이런 증강된 현실적인 수술에 대하여 처음 보고 하였다.(10) 그들은 부신 종양을 Zeus®를 이용하여 절제하였다. 술자는 색깔이 입혀진 해부학 구조물을 술 전 영상 진단을 통해서 얻어낸 3차원 영상으로 겹쳐 보이게 하였다. 증강된 현실적 수술은 robot 수술의 정확성과 육안 영상을 넘어서는 해부학적인 구조와, 술자의 경험을 혼합할 수 있게 하였다.

6. 결 론

이전에는 과학소설이나 존재했던 수술 로봇이란 개념이 이제 현실이 되었다. 로봇이 담당하는 대부분의 범위는 수술의 술기를 로봇팔의 작동으로 그대로 옮기는 것이었다. 안전한 방법으로 수술의 복잡성까지 안전하게 복제할 수 있는 체계를 설립하는 것은 크나큰 성과였다. 여전히, 현재의 체계로서는 향상시킬 수 없는 많은 부분들이 있긴 하지만 사람으로서 불가능한 일들을 수행한다는 점에 있어서는 크나큰 이득이 아닐 수 없다. 세포적 수준까지 임무를 수행할 수 있는 생각하고 배우는 수술 로봇이란 목표는 아직 요원하다. 그 때까지, 외과의들은 로봇이 외과의를 위한 기구로 남아 있을 것이며, 로봇의 특유의 장점을 이용하여 환자의 치료와 경과를 향상시키려는 목적으로 사용되어야 한다는 점을 유념해야 한다.

[참고문헌]

1. Swanstrom LL, Kozarek R, Pasricha PJ, Gross S, Birkett D, Park PO, Saadat V, Ewers R, Swain P. Development of a new access device for transgastric surgery. J Gastrointest Surg 2005;9:1129-36.
2. Rosser JC, Wood M, Payne JH, Fullum TM, Lisehora GB, Rosser LE, Barcia PJ, Savalgi RS. Telementoring. A practical option in surgical training. Surg Endosc 1997;11:852-5.
3. Lee BR, Bishoff JT, Janetschek G, Bunyaratevej P, Kamolpronwitt W, Cadeddu JA, Ratchanon S, O'Kelley S, Kavoussi LR. A novel method of surgical instruction: international telementoring. World J Urol 1998;16:367-70.
4. Schneider A, Wilhelm D, Bohn U, Wichert A, Feussner H. An evaluation of a surgical telepresence system for an intrahospital local area network. J Telemed Telecare 2005;11:408-13.
5. Bowersox JC, Cordts PR, LaPorta AJ. Use of an intuitive telemanipulator system for remote trauma surgery: an experimental study. J Am Coll Surg 1998;186:615-21.
6. Marescaux J, Leroy J, Gagner M, Rubino F, Mutter D, Vix M, Butner SE, Smith MK. Transatlantic robot assisted telesurgery. Nature 2001;413:379-80.
7. Marescaux J, Leroy J, Rubino F, Smith M, Vix M, Simone M, Mutter D. Transcontinental robot assisted remote telesurgery: feasibility and potential applications. Ann Surg 2002;235:487-92.
8. Satava RM. The operating room of the future: observations and commentary. Semin Laparosc Surg 2003;10:99-105.
9. Marescaux J, Solerc L. Image guided robotic surgery. Semin Laparosc Surg 2004;11:113-22.
10. Marescaux J, Rubino F, Arenas M, Mutter D, Soler L. Augmented reality assisted laparoscopic adrenalectomy. JAMA 2004;292:2214-5.