

의료용 로봇의 현재와 미래

BT 및 IT 산업은 21세기 벽두부터 국가적 차원에서 우리나라의 미래 산업으로 다양한 연구개발이 시도되고 있으며 진행 중이다. 특히 로봇 산업은 각 국가의 IT 기술 및 다양한 기계 기술의 총체로 선진국의 다양한 로봇 개발에 이어 우리나라도 최근 몇몇 휴머노이드를 잇달아 발표하면서 국민적 관심이 높아지고 있다. 또한 정부차원에서도 가정용 로봇의 보급에 지원을 확대하고 있다.

BT 분야의 대표적인 의료분야에서도 로봇의 이용은 위와 같이 증가하고 있는 실정이다. 의료분야에서의 로봇은 정밀성, 다양한 정보의 분석과 응용, 진단기계, 치료기계, 수술, 재활 등 다양하게 이용되고 있다. 이번 글에서는 다양하게 이용되고 있는 의료 분야의 로봇 중에서도 수술과 관련된 로봇에 대해 설명하고자 한다.

로봇의 정의와 의료용 로봇의 출현

로봇이란 재 프로그램이 가능하며, 다양한 기능을 갖는 자동시스템을 정의한다. 이러한 공학적 개념의 로봇은 다양한 기술이 융합된 현대의 발명품이며 여러 산업 및 문화에 적용되고 있다. 현재 이용되고 있는 로봇은 단순하고 반복적인 수공작업을 수행하고, 지능적이며 정밀한 성능을 요하는 자동화 작업을 대체하며, 인간이 작업할 수 없는 극한지역 혹은 군사용 및 연구용 등에 이용되고 있다. 또한 최



■ 글·김영수
한양대 의과대학 신경외과 교수
차세대 지능형 수술시스템
개발 센터 소장

근에는 서비스용으로 가정용, 오락용 로봇이 개발되어 상용화 되고 있다. 이와 함께 의료분야에서의 로봇은 이용에 대한 요구가 날로 증가하고 있는 실정이다.

1980년대를 기점으로 의료분야에서는 커다란 변화가 왔다. 컴퓨터의 발달과 같이 이루어진 의학영상의 발달은 이전의 단순한 방사선 촬영에 의존하는 영상을 뛰어 넘어 디지털 영상의 출현을 가능하게 하였다.

가장 먼저 발명된 것은 신체의 단면 촬영이 가능한 ‘전산화 단층촬영(CT)’ 이었다. 가공된 데이터를 가시화하는 CT는 실제로 체내 장기를 들여다보고 진단하며, 나아가서는 수술에 이용하는 단계로 빠른 속도로 발달하였다. 방사선 촬영을 근간으로 하는 CT 영상의 제한은 연조직 관찰이 어려우며, 장기 혹은 조직 내 생리학적인 변화를 볼 수 없었다. 그러나 연조직 촬영에 뛰어난 ‘자기공명단층촬영(MRD)’의 출현으로 제한적이던 CT 진단 및 이용이 더 향상되었으며 특히 ‘기능적 자기공명영상(fMRD)’의 발달로 뇌내의 특정 활동 영역을 추적할 수 있게 되었다. 최근에는 ‘확산텐서자기공명영상(DTI)’라는 특별한 영상 추출로 뇌내의 신경회로의 추적까지도 가능해졌다. 또 장기 내 생화학적 변화를 관찰할 수 있는 ‘양전자 단층촬영(PET, positron emission tomography)’ 과 뇌의 전기 생리적 반응을 가시화하는 ‘자기뇌파검사(MEG, magnetoencephalography)’ 등의 개발은 임상적으로 환자의 진단을 보다 정밀하게 할 수 있도록 할 뿐만 아니라, 그전에 알 수 없었던 생리변화 현상을 관찰할 수 있는 뛰어난 영상을 제공하여 학문적인 의학 발전에도 커다란 공헌을 하게 되었다. 이와 함께 컴퓨터의 발달은 위에서 언급한 기기를 통해 얻은 영상을 다시 재구성하여 삼차원 영상으로 편집을 가능하게 해 이차적 영상에서 입체감을 주는 새로운 진단법으로의 발전을 가속화시켰다. 수술로 환자를 치료하는 외과 분야에서는 경험이 많은 의사가 직관적으로 수술 전 계획을 세우는 과거의 방법에서 다양한 영상데이터와 영상 처리 기법을 이용하여 수술 전 계획 및 수술 시뮬레이션이 가능하게 되었다. ‘영상유도수술 시스템’이라는 수술 시 의사의 시술 부위에 대한 추적 검사 장치도 개발되었다. 실제로 이 시스템은 신경외과 및 이비인후과 영역에서 상당히 많이 이용되고 있다.

최상의 수술위한 로봇 도입의 필요

수술을 받아본 경험이 있는 환자들은 수술 전에 여러 가지 걱정으로 많은 시간을 보낸 적이 있을 것이다. 그것은 수술의 결과뿐만 아니라 수술 후 고통과 합병증

에 대한 두려움 때문인데 만일 수술 후에 이러한 두려움이 없으면 환자들은 망설임 없이 수술을 받게 될 것이다.

집도하는 의사의 입장에서도 수술 전에는 최대한의 수술 결과를 위해 여러 가지 생각을 한다. 몸 속에 있는 장기를 수술하려면 피부부터 절개한 후 차근차근 진행하여 수술해야 할 장기에 접근한 다음 육안으로 질병 부위를 확인한 뒤 수술을 시행한다. 이러한 과정에서 의사는 수술 전에 자세한 진단 및 수술 계획을 세울 필요가 있고 또한 다양한 접근법을 시도하여 환자에게 수술로 인한 손상을 최소화하면서 수술하여 수술 후에도 환자의 고통을 줄이고 합병증이 없도록 하고자 노력한다.

이와 같은 노력으로 1990년대 들어서는 전 외과 분야에서 ‘미세침습수술’, ‘미세접근수술법’ 내지는 ‘비침습수술법’ 등이 경쟁적으로 도입되기 시작한다. 이들 수술법들은 수술 시 환자에게 가능한 적은 손상을 가하며 빠른 시간 내에 최대한의 치료 효과를 얻을 수 있으며 수술 후에도 합병증이 적어 전 세계적으로 외과 분야에서 다루게 되었다. 그러나 최소한의 절개 내에서 완벽한 수술을 하기 위해서는 다양한 영상정보와 정교한 수술 기계 등이 더욱 필요하게 되었다. 즉 인간의 한계를 넘을 수 있는 기술적 수술 분야에 대한 로봇의 도입이 더욱 절실히 요구되었다.

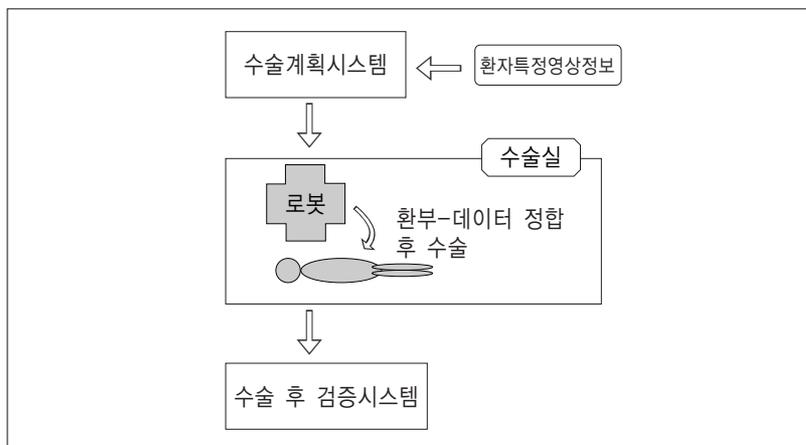
의료용 로봇의 개념

의료용 로봇은 일반적인 지능형 로봇과는 분명 차이가 있다. 지능형 로봇은 주위의 상황을 인식하여 스스로 어떠한 행동을 할 것인지 판단하여 행동하는데 반해 의료용 로봇은 자체적인 판단의 범위가 아주 제한적이며 의사에게 적절한 정보 제공 및 수술을 보조하는 기능을 맡는다.

로봇이 수술에 이용되는 목적으로는 앞서 언급한 바와 같이 수술로 인한 신체 손상을 최소화하고, 수술시간을 단축해 마취에 대한 환자의 노출을 줄이며, 수술 중 출혈 및 수혈을 최소화하고, 수술 후 환자의 통증이나 불편함을 해소하고, 상처 감염의 기회를 줄여 퇴원을 앞당김으로써, 최대한 빠른 시간 내에 사회 활동으로 복귀시키고자 하는 데 있다. 따라서 현재 외과 의사가 시행하는 큰 수술이 로봇을 이용하면 소 수술로 변화할 수 있으므로, 환자가 수술에 대한 두려움을 줄일 수 있으며, 적극적으로 치료에 협조할 수 있다는 측면에서는 상당히 효과적이라 할 수 있

다. 집도의의 측면에서는 로봇이 수술 시 정확한 부위를 정확하게 제거할 수 있도록 도우며, 미세하고 정교한 수술을 대신하며, 눈으로 볼 수 없는 부위의 수술도 가능하게 하여, 의사의 피로도 줄이고 환자에게 덜 피해를 주면서 최대한의 수술 효과를 얻을 수 있도록 하는 데 있다. 또한 경험이 없는 의사도 로봇을 이용하면 경험 많은 의사의 수술 방법을 쉽게 터득할 수 있고, 원거리에서 경험 많은 의사의 도움을 받아 수술을 무사히 마칠 수 있도록 로봇이 도울 수도 있다. 이러한 수술 로봇의 발달은 현재의 외과의들의 수술의 패러다임을 바꾸는 효과를 가져 올 것이다.

의료용 로봇의 개념은 시스템이다. 즉 로봇 단독으로 수술을 하는 것이 아니라 의사에게 다양한 정보를 제공하고 의사의 지시에 따라 작동한다. 이를 위해서는 시스템의 구성이 필요하다. 이러한 개념은 미국 존스홉킨스 대학의 Taylor 교수의 제안이 현재 전반적으로 받아들여지는 추세이다. 그는 ‘로보닥(Robodoc)’ 개발에 참여하였던 교수이다. 그의 제안은 다음과 같다. 수술 전 환자의 영상 및 다양한 정보를 입력하여 기존의 데이터 베이스 자료를 중심으로 환자에 적합한 수술계획을 세운다. 이렇게 가공된 데이터는 수술실의 로봇으로 옮겨지며 수술실에서는 환자의 환부를 로봇 내 내장된 데이터와 일치화 작업을 거친다. 이후 의사의 확인에 따라 의사의 지시대로 로봇을 이용하여 수술을 한다. 수술 중 환부의 변화에 따른 정보는 실시간으로 로봇에 입력되어 재가공하여 의사의 판단에 따라 수술을 진행한다. 수술시 일련의 다양한 정보는 보관한 후 수술 후 검증 작업을 통하여 전반적인 검토를 시행하여 이를 다시 다음 수술에 이용하는 데이터로 이용하게 된다. <그림 1>



<그림 1> 수술 로봇의 컴퓨터 융합 시스템의 개념도

이와 같은 개념에 따른 로봇시스템을 ‘영상유도 로봇시스템’이라고 분류한다. 이 글의 뒷부분에서 소개되는 ‘다빈치 시스템’은 이와 다르다. ‘다빈치 시스템’은 내시경 수술이 발달된 형태로 기본적으로 내시경 영상을 보고 의사가 주장치를 움직여 종로봇이 수술을 하는 형태로 이를 ‘내시경 유도 로봇시스템’이라고 분류할 수 있다. 현재 세계적으로 크게 위의 두 가지 분류로 로봇시스템이 이용되고 있다.

현재 개발된 다양한 로봇시스템

역사적으로 최초의 의료 로봇은 1985년 산업 로봇인 ‘PUMA 560’을 이용한 생검 로봇시스템이다. 이어서 신경외과 분야에서 ‘Minerva’라는 로봇시스템이 개발되었다. 이 로봇은 환자의 두부에 두부 고정틀을 쓰고 뇌전산화 단층촬영을 하여 뇌암 조직검사부위를 의사가 결정한다. 이후 뇌전산화 단층 촬영 기계 내에서 로봇이 실시간으로 조직 생검을 시도한다. 또한 프랑스의 Benabid팀은 뇌정위 수술 시 뇌내에 전극 삽입술을 도와주는 ‘Neuromate’를 개발하였다. 일본에서는 다빈치 시스템과 유사하게 작동하는 ‘Neubot’를 개발하였다. 이를 개발한 Hongo 교수는 2003년도에 세계 최초로 뇌 수술을 하는 로봇을 개발하였다. 이 시스템은 종로봇(slave robot)과 주로봇(master robot)으로 구성되어 있으며, 종로봇의 직접 수술 기구는 내시경시스템과 3개의 수술 손으로 구성됐으며 전체 크기가 1cm 이내이다. 종로봇을 뇌실 내 삽입한 후 의사는 주로봇에 앉아 모니터에 내시경 카메라에서 보내준 영상을 보고 양손으로 기계를 조작하여 종양제거술을 하는 시스템이다.

한편 캐나다의 Surtherland 교수는 우주 공간에서 뇌수술을 가능하도록 하는 원격 신경외과 수술 로봇을 개발 중이다. 이는 우주 공간 내에 종로봇이 환자를 수술하고 이 종로봇은 지구에서 의사가 주로봇을 조작하여 움직이는 시스템이다.

정형외과 분야의 대표적인 로봇은 ‘로보닥(Robodoc)’과 ‘아크로보트(Acorbot)’ 등이 있다. 특히 독일에서 개발된 로보닥은 고관절 수술을 보조하는 로봇으로 세계적으로 많이 사용되고 있는 로봇이다. 이는 인공 고관절 수술에 이용되는 로봇으로 대퇴골에 인공관절을 심기 위하여 뼈를 정확하게 깎아내는 로봇이다. 수술 전에 촬영한 영상 정보를 이용하여 미리 깎아낼 뼈부위를 계획하고, 수술 시에 로봇이 정확하게 대퇴골을 절삭하게 된다. 이 로봇의 장점은 인공관절의 모양에 따라 정확하게 대퇴골을 깎음으로 해서 뼈와 인공관절이 완벽하게 밀착하게 되어 수술의 성공률을 높이는 것이다.

내시경 수술 로봇의 발달

내시경 수술은 흉부외과, 일반외과, 산부인과, 비뇨기과 등에서 미세침습수술을 할 때 대표적으로 이용되는 방법이다. 내시경 수술은 환자에게 수술로 인한 피해를 최소화한다는 장점은 있으나 의사에게는 상당히 힘든 작업이다. 처음에는 내시경 카메라를 잡고 의사의 명령에 따라 움직이는 내시경 보조 로봇인 '이숍(ASEOP)'이 개발되었다. 이를 개발한 미국의 Computer Motion 사에서는 내시경 보조 로봇뿐 아니라 의사가 시술하는 내시경 장비를 로봇 팔로 대체하는 개념의 종로봇을 개발하였다. 의사는 주로봇에 앉아서 내시경 카메라에서 전송된 복강 내의 영상을 보면서 손으로 주로봇의 손잡이를 움직이면 종로봇의 로봇 팔이 의사의 손을 대신하여 수술을 한다. 이 로봇이 Zeus라는 로봇이다. 한편 미국의 Intuitive Surgical 사에서는 Zeus보다 진보된 '다빈치(da Vinci)' 로봇을 개발하였다. 이 로봇의 장점은 내시경 카메라가 3차원 입체 영상을 제공하여 실제감을 증가시켰으며 로봇 팔의 움직임 손목과 같은 6자유도의 유연함을 제공하여 현재는 전세계적으로 다빈치 로봇이 많이 사용된다. 현재 국내에도 도입돼 연세대 세브란스병원에서 이 로봇을 사용하고 있다.

비뇨기과 영역에서는 전립선 비대증에 대한 수술 로봇이 개발되었다. 영국의 임페리얼 대학에서 개발한 '프로보트(Probot)'은 요도 내로 로봇의 칼을 삽입하고 로봇이 전립선 부위를 절제하는 수술에 시도되었다. 전립선암에 대한 수술에는 다빈치를 이용한 수술이 증가하고 있다. 최근 대한비뇨기과학회 춘계학술대회에서 연세대 세브란스병원 비뇨기과에서 발표한 자료에 의하면 전립선암 환자 22명을 대상으로 로봇을 이용해 수술한 결과 수술환자의 72%가 수술 1개월만에 소변이 조절되었으며, 발기력은 수술 3개월만에 45%에서 회복되었다고 보고한 바 있다. 이와 같은 수술결과는 개복술을 한 경우에 비하여 현저하게 향상된 결과이다. 국내에서는 아직 다빈치의 보급이 한정되어 있으나, 미국의 경우 전체 전립선암 수술의 30%를 담당하고 있을 정도로 보편화되어 있다.

임상교육을 위한 로봇

최근에 미국의 Gaumad Scientific 가우머드 사이언티픽 사에서는 하이테크 맞춤형 임신 로봇 '노엘(Noelle)'을 개발하였다. 이 로봇은 출산을 교육하는 임상 실습용으로 이용하는 것으로 출산 시 자궁 확장 등의 여러 가지 복잡한 출산과정 및

증상 등을 프로그램하여 학생들의 실습을 돕는다. 이외에도 가상 수술 실습용 다양한 소프트웨어와 합틱 기구가 결합된 로봇시스템이 개발되었다. 예를 들면 내시경 교육용 로봇, 측두골 절삭 실습용 로봇 등이 개발되어 있다.

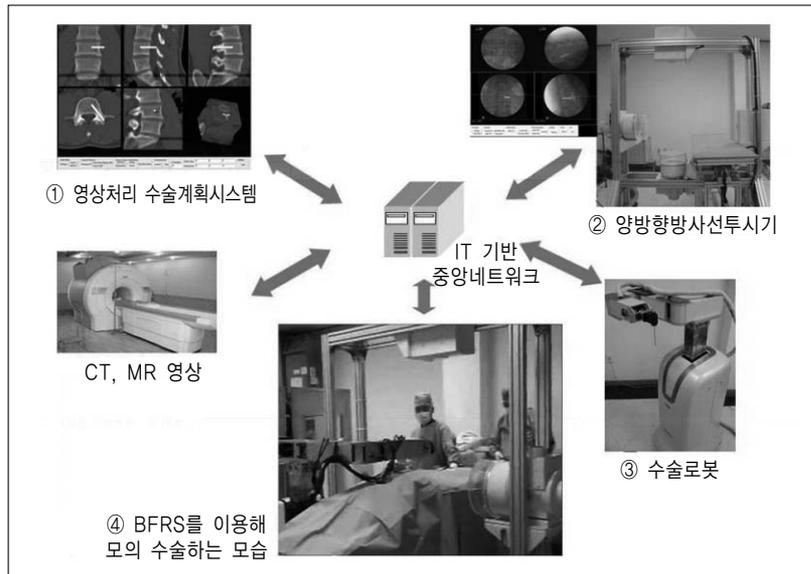
국내 연구개발 중인 로봇시스템

몸 속 심부의 환부를 수술할 때 경피적 미세침습수술을 보조하는 로봇시스템 ‘양방향 방사선 투시기 로봇시스템(Biplane fluoroscopy robot system)’이 지난 2005년 개발되었다. 세계 최초로 개발된 이 시스템은 저자가 보건복지부의 지원 아래 2002년 12월부터 개발을 시작하여 3년의 개발 과정을 거쳐 모의실험 등을 거쳐 임상 적용에 적합한 시스템으로 인정되었다. 본 시스템의 장점은 수술을 정확하고 안전하게 복잡한 수술을 간단히 할 수 있어서 수술 시간을 크게 줄이고 수술 후 발생할 수 있는 합병증과 후유증을 최소화하며 환자의 수술 후 통증을 적게 할 수 있는 첨단 시스템이다.

‘양방향 방사선 투시기 로봇시스템’은 인공지능을 가지고 혼자서 수술을 하는 로봇이 아니라 다음 <그림2>와 같이 CT와 MR과 같은 수술 전 촬영한 영상을 처리하여 3차원 영상을 이용하여 환부에 대한 수술 계획을 세우는 수술 계획 시스템 ①, 양방향의 실시간 방사선 투시기를 이용하여 수술 시 환자의 양방향 영상을 찍어서 3차원의 위치 정보를 인식하여 수술자에게 수술 계획 및 로봇의 움직임을 조정하는 기능을 담당하는 시스템②, 결정된 수술 계획에 따라 정보를 로봇에 전달하면 로봇이 수술부위로 정확하게 이동하여 의사의 수술을 보조하는 수술로봇③으로 구성되어 있다. 이 시스템의 장점은 양방향 방사선 투시기로 수술 중간에 수시로 촬영을 하여 환자의 심부에 삽입된 수술 기구의 위치를 파악하여 로봇을 재조정할 수 있으므로 만일에 발생할 수 있는 시스템의 오차를 조정하는 모니터링 기능이 포함되어 있는 네트워크 기반의 첨단 시스템이다.

또한 이 시스템은 수술 로봇 팔의 끝단에 어떠한 수술 도구를 장착하느냐에 따라 적용할 수 있는 수술분야를 달리할 수 있게 개발된 범용의 수술 로봇시스템으로, 척추수술이나 신경외과 뇌수술, 혹은 정형외과, 이비인후과, 비뇨기과 등의 수술에 폭넓게 사용할 수 있다. 현재는 처음 적용 분야로 경피적 척추경 나사못 삽입술을 목표로 개발을 진행하고 있다. 척추경 나사못이 삽입될 방향에 대해 정확히 계획을 세우고, 이 정보를 바탕으로 로봇 팔이 의사를 보조함으로써, 기존 수술에

비해 절개 부위가 획기적으로 줄어들고, 수술 시간 또한 1/3 이상 단축할 수 있다. 이는 모의 수술 실험의 결과로 얻어졌다. 이같은 결과는 전신마취 대신 부분 마취로도 수술을 할 수 있도록 도우며, 수술로 인해 환자가 겪게 될 고통을 경감시켜줄 수가 있다. 또 환자의 수술 후 회복 시간도 줄어들기 때문에 그로 인한 정신적, 육체적, 그리고 물질적인 고통도 줄여줄 수 있다. 뿐만 아니라 수술 후의 합병증 및 후유증등도 크게 줄일 수 있다.



〈그림 2〉 양방향 방사선 투시기 로봇 시스템의 구성도

이 시스템은 실시간의 방사선 영상을 이용한 세계 최초의 수술 로봇시스템이라는데 그 의미가 있으며, 실시간으로 수술의 정확성과 안정성에 대해 의사가 직접 방사선 영상을 통해 시술하는 환부를 모니터링하고 각 상황에 따라 시술의가 적절히 대처할 수 있게 구성되고 동작한다는 점에서 수술 로봇에 대한 안정성과 신뢰도 면에서도 상당한 이점이 있다. 이 시스템의 정확도를 측정하여 본 결과 1.2mm 내외의 오차 범위를 확인할 수 있었다. 이 정도의 오차 범위는 실제 임상에 적용 가능한 오차 범위로 안정성과 신뢰도에 대한 검증이 이루어지고, 임상 실험을 위한 환경 조성이 이루어진다면 척추경 나사못 시술에 '양방향 방사선 투시기 로봇 시스템' 이 지금 당장이라도 적용될 수 있을 것이다.

이 시스템과 이를 구성하기 위한 모든 요소 기술들은 최근 국내특허출원을 마친 데 이어 국제특허출원이 진행중이며, 식품의약품안전청의 허가를 받는 대로 임상 실험을 시작해 의료 현장에 투입하기 위한 본격적인 활동을 시작할 계획이다.

저자가 속해 있는 차세대 지능형 수술 시스템 개발센터는 이 시스템 외에도 수술조명 자동화, 능동형 증강 현실장치, 내시경내 마이크로 로봇의 연구를 진행 중이며 향후 수술실 자동화 시스템의 연구개발에 노력할 것이다. 이 센터는 크게 지능형 수술 네비게이션 시스템 개발(한양대학교 신경외과 김영수 교수), 지능형 수술 시스템을 위한 AR 시스템 개발(한양대학교 전자공학 박종일 교수), 인간 보조 수술 로봇의 요소 기술 및 시스템 개발(한양대학교 전자컴퓨터공학 이병주 교수) 그리고 휴먼 가이드 로봇 수술 햅틱 장치 및 시스템 기술 개발(포항공대 기계공학 정완균 교수)의 4개의 연구팀으로 구성되어 있으며 각 팀들이 유기적으로 연관된 연구를 진행함으로써 이번 ‘양방향 방사선 투시기 로봇시스템’의 개발이라는 업적을 이루었다.

이외에도 현재 국내에서는 KAIST 기계공학과 권동수 교수팀이 내시경 홀더 로봇을 개발하여 임상 연구 중에 있다. 또 이 연구팀은 기존의 로보닥과는 다른 개념의 간편한 형태의 고관절수술을 위한 로봇도 개발하였다.

미래 의료용 로봇의 향방

현재 다빈치 로봇의 단점은 의사가 주로봇에서 손잡이를 움직일 때 실제로 종로봇의 팔에서는 이 움직임을 느끼지 못한다. 종로봇의 말단 수술 팔의 작동시 발생하는 힘을 주로봇의 손잡이에 반영하여 실제감을 느끼게 해주는 햅틱 시스템이 다양한 각도에서 개발 중에 이어 향후 의사가 수술시 직접 환부를 만지는 기분을 느끼면서 수술을 할 수 있을 것이다.

로봇과 의사 그리고 수술실 내의 다른 장비와의 공간내 배치 및 편의성과 안정성을 고려하여 로봇의 소형화 및 정밀화가 진행 중이다. 또한 최근 수술실 내에 MRI 이용이 증가되어 자기장 내에서도 작동하는 로봇의 개발도 진행 중이다.

소형 로봇으로 내시경을 대신하는 캡슐형 로봇, 더 소형화하여 혈관내에 주사한 후 스스로 이동하여 병변에서 활동할 수 있는 마이크로 로봇의 개발에도 많은 노력을 하고 있다.

이러한 로봇의 개발 사업은 대체적으로 하드웨어 분야에서는 일본이 경쟁력이 높으며, 소프트웨어 분야에서는 미국이 앞서나가고 있다. 독일은 하드웨어 및 소

소프트웨어 분야에서 동시에 상당한 연구 개발 능력을 보유하고 있다. 앞으로는 이 세 나라가 의료용 로봇 시장의 핵심 주자로 나설 것으로 예상된다.

그에 비해 국내에서는 활발한 연구가 진행되기 어려운 실정이다. 의료용 로봇의 개발비가 많이 드는데 비해 국내 시장은 극히 제한적이어서 일반 기업의 참여가 아주 저조하다. 따라서 국제 의료 시장을 겨냥한 적극적인 개발의지를 보이는 기업의 출현과 국가적 차원에서 연구 지원이 국내 의료용 로봇의 연구개발에 도움을 줄 수 있을 것으로 보인다. **KHA**