

의료용 로봇의 연구 현황과 전망

- 권 동 수 ■ 한국과학기술원 기계공학과, 교수 / e-mail : kwonds@mail.kaist.ac.kr
- 경 기 욱 ■ 한국과학기술원 기계공학과, Telerobotics & Control Lab./ e-mail : mercy@kaist.ac.kr

이 글에서는 의료용 로봇의 연구 분야를 수술보조 로봇, 수술 로봇, 수술 시뮬레이터, 재활 로봇 등으로 분류하여 국내외 연구 현황과 전망에 대해서 소개한다.

로봇은 사람에 비하여 정밀하고 안정되게 제어 될 수 있으며, 피로에 지치지 않으며, 작업에 대한 반복성이 우수하다. 또한 설계 방법과 기구학적 메커니즘에 따라 사람이 하기 어려운 움직임을 할 수 있고, 금지된 명령을 엄격하게 지킬 수 있으며, 손떨림을 제거하거나 힘이나 촉감 같은 외부 정보를 전달할 수도 있다. 인간에 비해 로봇이 갖는 이러한 장점들을 잘 이용하여 의료 현장에서 의사의 어려움을 덜어 주거나 수술과정의 일부에서 의사를 대체하기 위해, 혹은 비숙련 의사가 수술을 연습할 수 있도록 하기 위해, 보조의나 간호사를 대체하기 위해 의료용 로봇(medical robot)에 관한 연구를 활발하게 진행 중이다.

의료용 로봇의 연구 분야는 크게 네 분야로 나뉘어서 진행되고 있다. 수술실에서 집도의의 명령을 따르면서 수술을 보조하거나

영상 가이드(image guide)를 해주는 수술 보조 로봇(surgery assistant robot), 의사를 대신하여 수술과정의 전체 혹은 일부를 의사 대신 혹은 의사와 함께 수술 작업을 하는 수술 로봇(surgical robot), 자기공명 영상(MRI)이나 컴퓨터 단층촬영 영상(CT Image) 등을 이용한 가상의 환자와 햅틱장치(haptic device)를 이용하여 수술 등을 훈련할 수 있게 해주는 수술 시뮬레이터(surgery simulator), 장애자나 노년층의 독립적인 활동을 가능하게 해주는 재활 로봇(rehabilitation robot)의 분야들로 나뉠 수 있다.

의료용 로봇의 개발은 미국, 독일, 영국, 일본 등의 선진국을 중심으로 연구되어 오다가 그 실현 가능성과 상업적 가치가 검증되면서 최근 들어 점차 확대되고 있다. 한국에서도 KAIST를 시작으로 수술 로봇과 재활 로봇에 관

한 연구가 점점 확대되고 있다. 의료용 로봇에 관한 현재의 세계적인 개발 수준은 아직 초기 단계이지만 특정 몇몇 분야에서는 이미 상업화 되었거나 실용화를 위한 임상 평가 단계에 이르고 있다. 이 글을 통하여 현재 의료용 로봇의 국내외 연구 개발 실태와 향후 전망을 소개해 보고자 한다.

수술보조 로봇

일반적으로 수술은 일정 정도 이상의 정밀도를 지키면서 시술해야 하며, 집도의는 수술 중에 현재 진행상황을 지속적으로 확인할 수 있어야 한다. 또 수술 방법에 따라서는 생검(biopsy)과 같이 계획된 경로를 지켜야 하는 시술도 있고, 내시경 수술(endoscopic surgery)과 같이 수술 과정 내내 집도의가 원하는 시야를 보조의가 능동적으로 확보해 주어야 하는 시술도 있다. 이처럼

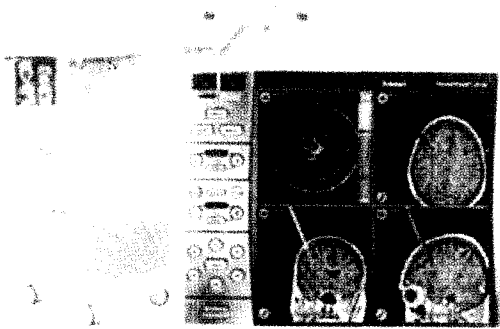


그림 1 VectorVision

수술 종류와 절차에 따라 지켜져야 하는 어려운 점들을 해결할 수 있게 하거나 혹은 보조의를 대신할 수 있는 수술 보조 로봇이 연구되고 있다. 수술 보조 로봇은 그 목적에 따라 네비게이션 보조 로봇(navigation aid robot), 미세 자세조종 로봇(precise positioning robot), 의사도우미 로봇(surgeon helper robot)으로 분류될 수 있다.

네비게이션 보조 로봇은 로봇 위치 제어 기능과 영상처리(image processing) 기술을 중심으로 하여 수술 부위와 수술도구를 영상을 이용하여 보여줌으로써 수술의 진행 상태를 알 수 있게 하는 로봇이다. 대표적인 것으로 미국의 BrainLab 사에서 개발한 VectorVision과 캐나다의 ISS 사에서 개발한 Viewing Wand가 있다. VectorVision은 뇌와 척추의 생검 수술과정에서 수술 도구가 바로 삽입되고 있는지 수술 중에 환자를 옮겨가며, CT나 MRI 촬영을 해야 하는 어려움을 해결하기 위해 개발한 무선 영상보조 수술시스템(wireless image-

guided surgery system)이다. MRI나 CT영상을 촬영한 후에 수술 전 계획(preoperative planning)을 세우고, 마이크로스코프(microscope), 형광투시경(fluoroscope)과 E-

xactTract라는 위치가이드(position guidance) 시스템을 사용하여 무선으로 수술 중 영상을 통해 수술 보조를 받을 수 있게 하는데 세계적으로 100개 이상이 설치되어 있다. 캐나다 ISS사의 ViewingWand 역시 종양수술이나 생검을 위하여 개발된 영상보조 수술시스템으로 VectorVision과 유사한 기능을 가지며, 의료계보다는 연구용으로 많이 쓰이고 있는 형편이다. 그림 1은 VectorVision의 전체적인 외형과 디스플레이 화면을 보여준다.

미세자세조종 로봇은 생검 수술법이나 최소침습수술(minimally invasive surgery)법을 사용할 경우 의사의 손떨림, 환부 내부가 보이지 않는 점 등의 어려움으로 인하여 의도하지 않은 방향으로 수술 도구를 삽

입하는 경우에 올바른 방향으로 정확하게 보정해주는 등의 일을 하는 로봇이다. 영국의 Armstrong Healthcare 사의 PathFinder나 미국의 Integrated Surgical System 사의 NeuroMate가 대표적인 시스템이다. PathFINDER는 뇌수술을 위하여 수술 전 CT, MRI의 영상처리를 통하여 정확한 수술 경로를 결정한 후에, 로봇 암(arm)이 사전에 계획된 경로대로 수술 도구가 삽입될 수 있도록 정확하게 보정해주는 시스템이다.

NeuroMate는 뇌정위수술(stereotactic brain surgery)을 목적으로 고정도의 위치제어가 가능하게 개발되었으며, 미국의 FDA와 유럽의 CE 승인을 받았고, 세계적으로 10여 대 이상이 설치되어 있다. 그림 2는 PathFINDER를 보여준다.



그림 2 PathFINDER

의사도우미 로봇은 수술을 원활하게 하기 위하여 집도의를 도와주는 보조의 역할을 대신할 수 있는 로봇이다. 현재까지의 의사도우미 로봇은 최소침습수술(MIS)에서 내시경을 제어하여 집도의에게 편안한 시야를 확보해줌으로써 수술실의 보조의를 대체하면서도 집도의의 명령에 정확하고 안정되게 따를 수 있는 로봇을 중심으로 대부분의 연구가 진행되어 왔다. 대표적으로 미국의 Computer Motion 사의 AESOP과 영국 Armstrong Healthcare 사의 EndoAssist가 개발되어 왔고, 영국 Imperial College에서 개발한 ROBO SCOPE가 현재 연구 중에 있다. 이외에도 캐나다와 스페인을 비롯한 일부 국가에서 기존에 연구된 시스템과 유사한 개념으로 의사도우미 로봇을 연구 중에 있다. 1994년에 개발된 AESOP은 7자유도에 4개의 능동관절(active joint)을 갖는 복강경수술(laparoscopic surgery)에서 카메라 보조 로봇(camera assistant robot)이다. 수술 침대에 로봇이 부착될 수 있으며, 음성카드(voice card)를 이용하여 사전에 입력된 의사의 명령을 따라 하는 화자 종속형의 음성인식 로봇이며, 손과 발관으로도 조종이 가능하다. AESOP은 이미 7만 회 이상의 수술에서 사용되었으며, 후에 개발되는 ZEUS 수술 로봇 시스템의 기초가 되었다.

EndoAssist는 AESOP과 같은 복강경 수술에서 카메라 보조 로봇이지만 집도의의 머리 움직임

(Head Movement)과 발관으로 복강경을 조종한다. ROBO SCOPE는 뇌 수술에 사용되는 로봇으로 신경내시경(Neuroendoscope)의 움직임을 제어해주며, 영상보조 수술 기능을 갖는다. 6각류(hexapod) 모양의 병렬로봇이며, 현재도 연구 진행 중에 있다. 그림 3은 EndoAssist와 ROBOSCOPE를 보여준다.

수술 로봇

수술 로봇(surgical robot)이란 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 수술 로봇은 미세 수술용 원격수술 로봇 시스템, 최소 침습 수술 로봇 시스템, 고관절 혹은 무릎관절 전치환 수술 로봇 시스템 등으로

분류될 수 있으며, 개복 수술 혹은 소프트티슈(softtissue) 수술 로봇 등이 일부 연구되고 있다.

미세 수술용 원격 수술 로봇 시스템은 수술을 필요로 하는 위급한 환자가 원거리에 있어서 의사나 환자가 이동할 수 없는 경우를 대상으로 하거나, 원격제어(teleoperation) 기술을 이용하여 슬레이브 로봇의 움직임을 마스터 로봇에서의 의사의 손의 움직임보다 작게 함으로써 미세수술을 하는데 목적을 두고 있다. 원격 수술 로봇에서는 촉감과 위치를 정확하게 전달할 수 있는 제어 기법을 이용함으로써 의사가 원거리에서도 실재감을 느낄 수 있도록 하는 것이 중요한 연구 과제이다. 대표적인 원격 수술 로봇 시스템의 연구 사례는 일본 동경대의 원격 수술 로봇 시스템, 미국 NASA JPL의 RAMS, SRI International의 원격 수술 로봇 시스템, KAIST 텔레로보틱스 및 제어 연구실의 미세수술용 원격수술 로봇 시스템을 들 수 있

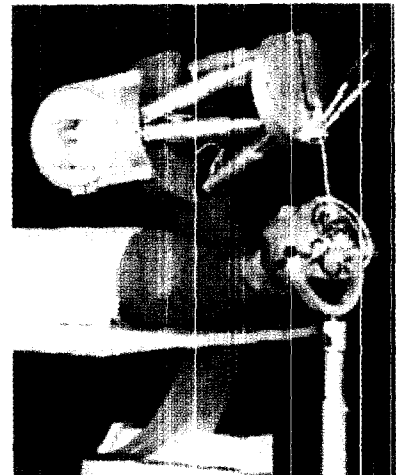


그림 3 EndoAssist(좌)와 ROBOSCOPE(우)

다. 동경대 원격 수술 로봇은 7자유도를 갖는 햅틱 마스터와 병렬 구조의 슬레이브 로봇으로 이루어졌으며, 햅틱장치는 어느 위치에서나 평형을 유지하도록 설계되어 작업자의 피로를 줄였고, 수술 로봇에는 현미경과 3축의 힘 센서를 부착하였다. 또 측정된 힘을 작업자에게 전달할 때 소리를 이용한다. RAMS(robot assisted micro-surgery)는 안면과 뇌 등 초정밀 위치제어가 필요한 수술을 위해 개발된 6자유도 로봇이다. RAMS는 힘반향(force feedback)이 가능하고, 손 떨림 및 저크를 필터링하여 위치와 궤적제어를 정확하게 수행할 수 있도록 하였다. SRI International

사의 원격 수술 로봇은 군사용으로 연구되었으며, 좌우 각각 5자유도를 갖는 이동형 로봇으로 현재도 연구 진행 중이다. KAIST 텔레로보틱스 및 제어 연구실에서는 1999년 병렬형 6자유도 힘반향 마스터, 6자유도 슬레이브 로봇을 개발하였다. 슬레이브 수술용 로봇은 산업용

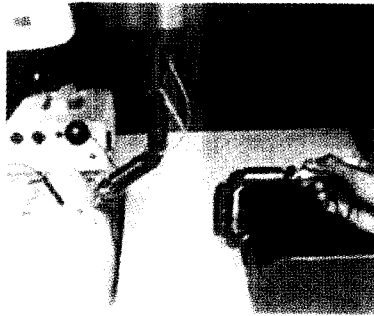


그림 4 RAMS

로봇(macro robot) 위에 수술용 로봇(micro robot)을 장착하여 광역운동과 미세운동이 가능한 MacroMicro 슬레이브 로봇 시스템을 구축하였다. 그림 4는 RAMS, 그림 5는 KAIST의 원격 수술 로봇 시스템을 보여준다.

최소침습수술(MIS : minimally invasive surgery)은 환부

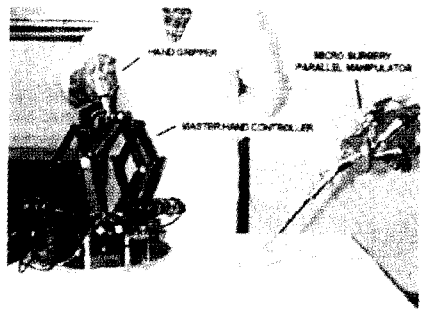


그림 5 KAIST 원격 수술 로봇 시스템

회복이 빨라서 최근 적용 범위가 확대되고 있는 수술기법으로 2005년에 이르면 복부에 시행하는 모든 수술의 80% 이상이 MIS로 이루어질 것으로 기대되고 있다. 이 수술의 어려움인 의사의 피로감과 촉감을 느끼지 못하는 점을 극복하기 위해 연구된 수술 로봇 시스템의 대표적인 것으로는 미국의 U.C. 버클리 대의 수술 로봇 시스템, Computer Motion 사의 ZEUS 시스템, Intuitive Surgical의 da Vinci 시스템, 일본 나고야 대학 원격 수술 로봇 시스템 등이 있다. 버클리 대의 수술 로봇 시스템은 Endorobotics 사와 공동으로 7자유도의 햅틱장치와 유압 액추에이터로 구동되는 3자유도의 병렬기구 형태로 개발되었다. 촉감을 전달하기 위하여 1mm x 1mm 크기의 콘텐서 셀(cell)로 구성된 촉감감지용 센서(tactile array sensor)를 햅틱장치에 부착하였다. ZEUS는 카메라 보조 로봇인 AESOP을 개발한 후 이 연구를 토대로 만들어진 원격 수술 로봇으로 AESOP을 포함한 세 개의 7자유도(4개의 능동자유도) 로봇 암과 HERMES라는 제

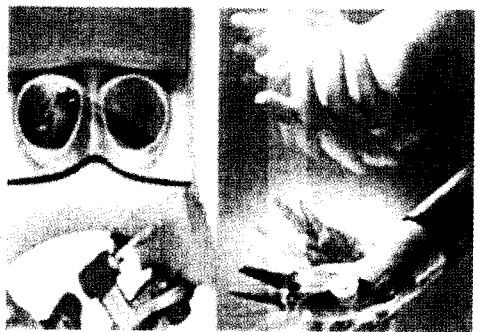


그림 7 da Vinci 시스템

를 극복하지 않고 환부에 2~4개 정도의 구멍을 뚫고, 이곳에 수술도구와 카메라를 삽입하여 집도 의가 모니터를 보면서 수술하는 방법이다. 이 수술은 시술 시간이 짧고 환자의

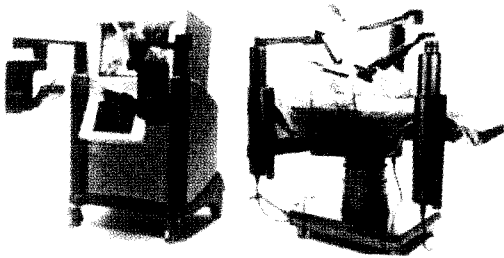


그림 6 ZEUS 시스템

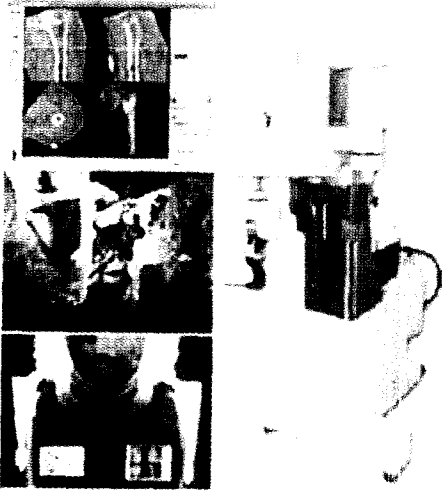


그림 8 ROBODOC

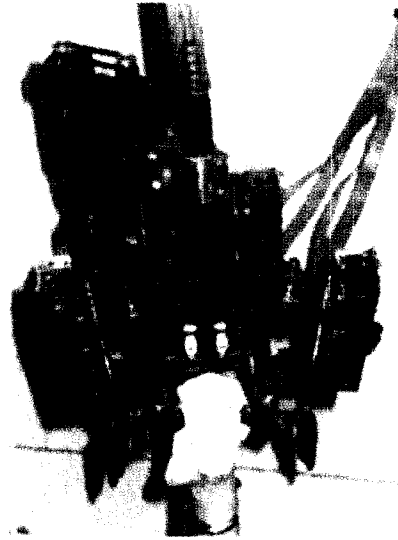


그림 9 KAIST ARTHROBOT

하게 하여서 3차원적 몰입감(immersion)을 높였다. 그림 6은 ZEUS 시스템을, 그림 7은 da Vinci 시스템을 보여준다.

고관절 혹은 무릎관절 전치환 수술은 외상이나 염증 등으로 인하여 손상된 관절을 인공 관절로 대처하는 수술인데, 인공 관절을 삽입할 부위를 로봇으로 가공함으로써 수작업에 비하여 시간을 단축하고 정확성을 높이고자 하는 연구가



그림 10 Karlsruhe 수술 시뮬레이터

어 센터, 막대형 조종기 및 디스플레이 장치로 구성되어 있다. 수술도구는 탈착형으로 한번에 교체가 가능하며 2001년 복강경 수술과 심장 수술의 일부 절차에서 FDA승인을 받았다. da Vinci TM는 힘반향 기능을 가지고 있으며, 수술도구가 손목형의 자유로운 동작을 할 수 있게 개발되었다. 독일과 이탈리아 등에서 da Vinci 시스템을 이용하여 수술을 성공한 사례가 보고되고 있으며, 2001년 FDA승인을 받았다. 또 콘솔(console)을 들여다보며, 수술을

진행되고 있다. 미국 Integrated Surgical System 사의 ROBODOC, 독일의 Orto Maquet 사의 CASPAR, 영국의 Imperial College의 ACROBOT, KAIST의 ARTHROBOT이 대표적이다.

ROBODOC은 미국의 정형외과 의사인 Bargar가 IBM의 재정적인 도움을 받아 캘리포니아 대학과 팀을 이루어 고관절 전치환 수술용 로봇으로 개발되었으며, 5자유도의 로봇 암을 갖는 일종의 CAD/CAM 시스템이다. 세계적으로 8,000회 이상의 수술이 ROBODOC을 이용하여 성공적으로 수행되었으며, 보조물과 뼈 사이의 접촉률이 수작업일 때의 20%와 비교할 수 없을 정도의 높은 평균 97%의 접촉률을 갖는 결과를 얻게 되었으며, 미국 FDA의 승인을 받았다. CASPAR도 ROBODOC과 같은

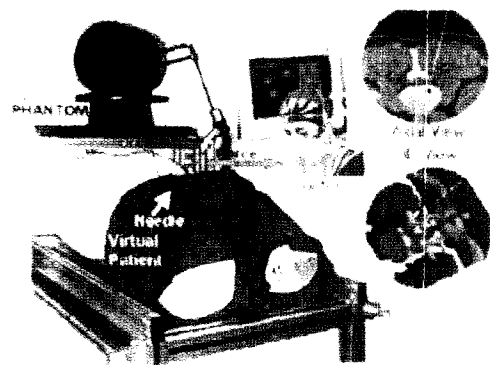


그림 11 척추침생검 시뮬레이터



그림 12 MANUS 시스템

CAD/CAM 시스템으로 독일에서 60여 개 이상의 병원에서 사용되었다. ACROBOT은 무릎관절 전치환 수술 로봇으로 힘센서와 능동 경계(active constraint)를 두어 의사가 실수로 의도보다 더 뼈를 가공하는 경우를 방지해 준다. KAIST의 ARTHROBOT은 4자유도의 뼈에 부착될 수 있는 고관절 전치환 수술 로봇으로 자동가공모드와 수동 모드가 있으며, 수동모드는 힘센서와 뼈에 어드미턴스(admittance) 모델을 씌우므로써 정확한 경계면을 깎으면서도 작업시 힘이 적게 들게 하였다. ARTHROBOT은 현재 개발이 완료되어 임상실험 단계에 있다. 그림 8은 ROBODOC을 그림 9는 ARTHROBOT을 보여준다.

수술 시뮬레이터

수술 로봇 이외에 의사의 수술에 관한 숙련도를 높이기 위하여 가상의 그래픽 환자 모델과 햅틱장치 등을 이용하여 수술을 연습할 수 있게 하는 의료용 시뮬레이터가 활발하게 연구되고 있다. 특히 근래에 들어 프로세서의 성능이 좋아지면서 MRI나 CT 영상 등을 활용한 실시간 3차원 볼륨이 가능해지면서 의료용 시뮬레이

터 개발은 가속화되었다. 의료용 시뮬레이터의 주요 과제로는 장치의 변형이나 절개, 봉합 등을 실시간으로 표현할 수 있는 3차원 렌더링 방법과 여기에 물리적인 모델을 적용하는 햅틱 렌더링(haptic rendering), 또 개발된 시뮬레이터의 효용성을 검증하는 방법에 관한 연구 등이 있다. 컴퓨터 그래픽 기술과 햅틱 장치의 개발단계에 따라 수술 시뮬레이터는 순수 그래픽, 힘반향이 시뮬레이터, 네트워크 기반 수술 시뮬레이터의 단계로 발전되어 오고 있다. 대표적인 수술 시뮬레이터로는 독일 Forschungs zentrum Karlsruhe의 내시경 수술 시뮬레이터, 미국 Georgia Tech.의 안구수술 시뮬레이터, 미국 보스턴 다이내믹스 사의 개복수술 시뮬레이터, 의 무릎관절 내시경 시

뮬레이터, KAIST의 척추침생검 시뮬레이터(spine needle biopsy simulator), 영국 맨체스터 대학의 웹기반 시뮬레이터가 있다.

Karlsruhe의 내시경 수술 시뮬레이터는 KISMET이라는 3D모델링 소프트웨어를 자체 개발하여 사용하였으며, 힘반향이 되는 담낭 절제술을 시뮬레이션하여 1996년에 University Hospital Tuebingenin에 설치되었다. Georgia Tech의 안구 수술 시뮬레이터는 자기분말클러치(magnetic particle clutch)를 이용하여 6자유도의 힘반향을 구현하고 있으며, 실제 비숙련의 훈련용으로 사용되고 있다. Mitsubishi Electric Research Lab.의 무릎관절 내시경 시뮬레이터는 MRI를 볼륨 렌더링하였으며, SensAble 사의 PHANTOM을 사용하여 힘반향을 구현하였다. KAIST의 척추침생검 시뮬레이터는 2000년 영상처리 연구실과 텔레로보틱스 및 제어 연구실에서 공동으로 개발하였으며, CT영상을 볼륨 렌더링 하였으며, 속이 빈 마네킨에 바늘을 삽입하는 동안 가상으로 모델링된 피부와 생체조직 및 장기를 PHANTOM을 통하여 느낄 수 있게 하였다. 그림 10, 그림 11은 각각 Karlsruhe Endoscopic Surgery Trainer와 KAIST 척추침생검 시뮬레이터를 보여준다.

재활 로봇

노령인구와 장애인구의 증가로 로봇 기술의 필요성은 재활분야

에도 확대되어 왔다. 장애인의 독립적인 활동을 보장하고 삶의 질을 높여주는 노력은 유럽 등의 선진국을 중심으로 재활 로봇이 연구되어 왔으며, 스웨덴에서 개발된 MANUS와 이탈리아에서 개발된 MOVAID가 대표적인 재활 로봇 시스템이다. 또 미국에서는 MIT를 중심으로 HAL, 로봇 신경 재활(robotaided neurorehabilitation) 등의 시스템이 연구되어 왔다. 국내에서는 KAIST에서 휠체어

로봇 시스템과 보행 보조 로봇 등이 연구되고 있다. MANUS는 상체를 사용할 수 없는 장애인을 개발된 휠체어에 로봇이 부착된 시스템이다. 손으로 조이스틱을 조종하여 동작하며, 손이 불편한 경우 턱으로 조이스틱 형태의 조종기를 사용한다. MOVAID는 헬멧 형태로 머리에 고정시켜 힘반향이 가능한 마스터를 제작하여 미국 IMI사의 Zebra ZERO 로봇을 조종할 수 있도록 개발되었다. HAL 시스템은 MIT AI 연구실에서 주변에서 발생하는 현상을 카메라, 마이크 등을 통해 관찰하고 개입하는 고기능의 상호 작용 시스템이다. KAIST 휠체어 로봇 시스템은 1999년부터 개발되기 시작한 로봇으로 전동 휠체어와 이동형 로봇(mobile based robot arm)으로 구성된다. 장애인과 보



그림 13 KAIST 휠체어 로봇 시스템

조장치가 눈동자의 움직임, 음성, 손동작, 머리의 움직임, 어깨의 움직임과 진동, 근전도 신호, 조이스틱, 카메라 등 다양한 채널을 통하여 정보를 교환할 수 있도록 개발되었다. 로봇암은 컴플라이언스(compliance) 제어를 통해 충돌시 장애인을 보호하고, 문 여닫기, 물건집기, 면도, 식사 등 장애인의 일상 생활을 도와준다. 그림 12, 그림 13은 각각 MANUS 시스템과 KAIST 휠체어 로봇 시스템을 보여준다.

맺음말

의료용 로봇 시스템을 구축하기 위해서는 다음과 같은 다양한 기술들이 필요하므로 여러 분야의 전문가들의 상호 협력이 매우 중요하다.

- 수술 방법의 분석 및 계획
- 인간-로봇-컴퓨터 상호작용

- 로봇 원격 제어 기술
- 촉감 센싱 및 디스플레이 기술
- 실시간 영상처리 및 햅틱 렌더링
- 사용과 이해가 쉬운 로봇 설계
- 안정성을 고려한 로봇 설계

국내의 의료용 로봇 시스템에 관한 연구는 아직 초보 단계에 있는 실정이지만 세계적으로 로봇을 이용한 의료 서비스의 효용성이 증경되어 가고 있는 만큼 점차 확대되어

갈 것은 분명하다. 기존의 의료 환경을 개선하고 국민 의료 복지 증진에도 기여하면서도 의료 로봇 시장을 확보할 수 있는 우수한 의료용 로봇 시스템의 개발을 위해서 의료 전문가와 로봇관련 전문가의 적극적인 상호 협력이 가장 먼저 요구된다. 또한 더 앞서는 로봇의 개발을 위해 장기적이고 규모 있는 투자가 병행되어야 할 필요가 있다.