

영상유도 항법수술의 동향과 미래

허 원 창

(주)사이버메드 연구소장

1. 개 요

2. 동 향

컴퓨터 보조수술(Computer-aided surgery)는 최근 수년 사이 급속히 발전한 컴퓨팅 기술이 임상수술에 적극적으로 활용되기 시작하면서 주목을 받고 있는 분야이다.

이와 관련하여 환자의 의료영상을 활용한 가상수술 및 시뮬레이션에서, 수술장 내 항법장치(Navigator)를 이용한 실시간 영상유도수술(Image-Guided Surgery), 더 나아가 수술로봇을 이용한 수술에 이르기까지 다양한 접근방법들이 제시되고 있다.

특히 항법장치를 이용한 영상유도수술은 신경외과, 정형외과 등에서는 이미 보험수가가 인정되고 있을 정도로 정형화된 수술 프로토콜로 자리잡고 있다. 영상유도수술이란 이러한 항법장치를 사용하여,

- 수술 전 획득한 CT/MRI 등의 영상 혹은 수술 중 획득한 X-ray 영상을 이용하고,
- 환자의 수술 부위 및 수술 도구의 3차원 위치를 실시간으로 추적하여
- 컴퓨터상의 인체 내부 영상에 수술 도구 및 인공 관절의 위치를 정합, 재구성함으로써
- 보이지 않는 인체 내부의 병소의 위치와 수술 도구의 상대적 위치를 실시간으로 확인하면서 수술할 수 있도록 하는 컴퓨터 기반의 첨단수술기법을 일컫는다(그림 1).

그림 1에서 보는 바와 같이, 수술장에서 의사는 수술도구의 위치를 환자의 의료영상상에 실시간으로 fccd-back 받게 됨으로써, 보다 정확하고 정밀한 수술을 가능하게 한다.

컴퓨터 지원 수술의 개념은 20세기 후반에 이르러 구체화되기 시작했는데, 그 동안 여러 가지 용어(Interactive image guided surgery; Medical robotics; Frameless stereotaxy)로 표현되어 왔다. 1987년 동경대학의 Watanabe 교수에 의하여 개발된 일명 '수술용 Navigator'가 최초로 실제 임상에서 환자에 적용되었다. 이 장치는 6개의 관절구조를 갖는 Mechanical arm(3차원 Digitizer)을 이용하여 2차원 뇌 전산화 단층촬영장치(Brain CT scan)에 수술할 위치를 표시하였다.

캐나다의 ISG Technology사는 1989년 3차원 컴퓨터 그래픽 영상을 재구성하는 'Allegro'라는 소프트웨어를 개발하고 이를 환자에 적용하여 그 효용성을 입증하였다. 또한 3차원 영상과 Mechanical arm을 결합하여 보다 진보된 형태의 뇌수술용 Navigator (제품명: ISG Viewing Wand)를 개발하고 1994년 공식적으로 미 식품의약국(FDA)의 승인을 얻었다.

그 후로 미국의 몇몇 회사에서 이와 유사한 제1세대 뇌수술용 Navigator가 개발되었다. 최근에는 Mechanical arm의 상용상의 불편함을 개선하고자

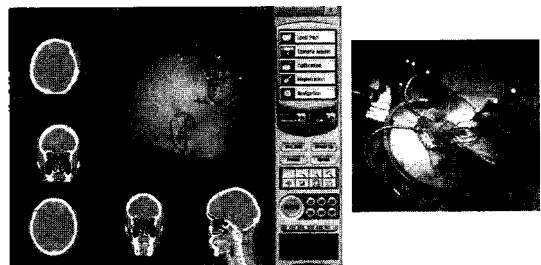


그림 1. 영상유도수술

*hwc@cybermed.co.kr

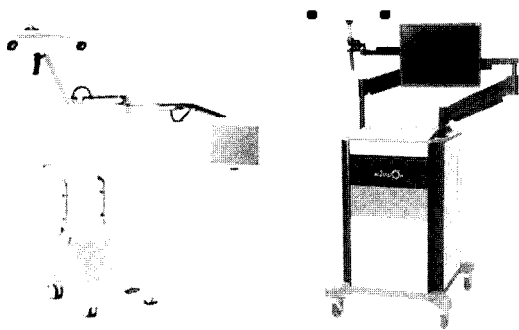


그림 2. 상용 수술장 항법장치(BrainLab의 VectorVision과 CyberMed의 In2Vision)

LED(발광다이오드)와 두 개 이상의 CCD 카메라를 이용하여 입체 영상을 얻는 수술용 Navigator가 연구 개발되어 차세대의 수술용 Navigator로 활용 중에 있다.

현재는 독일의 BrainLab, 미국의 Medtronic, Stryker 등의 회사들이 영상유도수술 관련 시장을 이끌고 있으며, 국내에서도 CyberMed가 식약청 인증을 획득하여 시판을 앞두고 있다(그림 2).

3. 주요 기술

이러한 항법시스템은 다음과 같은 복합적인 기반 기술들로 구성된다.

- 의료용 3차원 영상의 가시화(rendering) 기술 및 병소 분할(segmentation) 기술,
- 스테레오 영상을 이용한 실시간 3차원 위치 추적(stereotaxy) 기술,
- 의료영상과 환자, 수술 공간, 수술 도구와의 정밀한 공간좌표계 정합(registration) 기술

이 글에서는 이와 같은 항법시스템의 주요 기술들의 개념 및 동향을 간략하게 살펴보고자 한다.

3.1 영상가시화 및 처리기술

수술용 항법시스템은 수술이 행해지는 동안에 작동하는 특성상 대용량 의료용 데이터의 빠른 가시화를 필요로 한다. 대용량 영상데이터의 실시간 입체가시화 기술은 최근 들어 그래픽 하드웨어기술의 급속한 발전에 힘입어 데스크톱 컴퓨터상에서도 가능하게 되었다(그림 3).



그림 3. 영상가시화 기술

20세기 후반만 해도, 실시간 입체가시화를 위해서 Shear-Warp 분할 등과 같은 알고리즘 수준에서의 최적화 기술이 많이 연구되었다. 하지만, 현재 실시간 의료용 데이터(512x512x512 데이터 기준)를 30 frame 이상의 속도로 가시화하는 그래픽 하드웨어가 등장하여 널리 사용되고 있으며, 최근에는 범용 그래픽 프로세서를 이용한 입체가시화 기술이 주목 받고 있는 실정이다.

항법시스템에서는 가시화된 영상을 이용하여 특정한 이미지 영역에 대한 자동화된 분리 기술을 요구하기도 한다. 이는 특히 수술용 Navigator system을 많이 사용하는 신경외과 Brain Tumor Localization 시술이나, 척추 시술과 같은 특별한 시술에서 중요한 혈관의 위치나, 뇌의 형태와 모양, 뇌 종양의 위치 등을 정확하게 파악하는데 있어서 중요한 기술이다(그림 3).

또한, 최근에는 다양한 영상장비가 등장하면서, 복합영상을 활용한 항법수술이 각광 받고 있다. 예를 들어 CT의 경우 뼈와 같은 경조직은 아주 잘 표현하지만, 연조직을 잘 표현하지 못하는 단점이 있다. 한편, MR은 반대로 연조직은 잘 표현하지만, 경조직을 잘 표현하지 못한다. 이런 영상들간의 장단점을 이용하여 각 영상들간의 장점만을 이용하여 Image Fusion을 하여 이 데이터를 이용하여 의사에게 보다 많은 정보를 제공할 수 있다.

특히, 뇌수술의 경우에는 MRI나 PET(Positron Emission Tomography) 등을 이용한 뇌 기능영상의 분석결과를 CT등의 해부학 영상과 중첩하여 뇌수술에 사용하고자 하는 연구가 주목을 받고 있다.

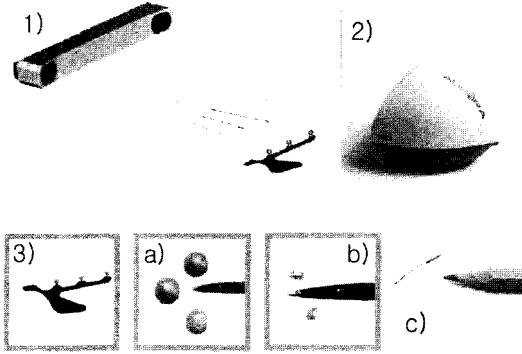


그림 4. NDI 사의 위치추적장치

3.2 3차원 위치추적 기술

3차원 위치추적기술은 수술장에서 환자의 인체 내부로 삽입되는 수술도구들의 3차원 공간상의 위치를 인식하기 위해 사용되는 기술로, 항법시스템의 정확도를 가늠하는 가장 중요한 핵심기술이다. 현재 항법시스템을 판매하고 있는 거의 모든 업체들은 광학검출방식과 마그네틱 센서방식을 사용하고 있다. 그림 4는 NDI사에서 생산하고 있는 3차원 위치추적시스템 제품을 나타낸다.

그림 4-1)은 광학검출방식을 이용하여 수술도구의 위치를 인식하는 방식을 도식화한다. 그림에서 보는 바와 같이 광학검출카메라는 2개, 혹은 3개의 CCD 렌즈를 이용하여 수술도구(그림 4-3)에 부착된 조그만 적외선 반사구들(그림 4-a, 4-b)의 위치를 인식한다. 이 반사구들의 배열은 수술도구에 고유하며, 항법시스템에는 수술도구에 따른 반사구들의 상대적인 위치정보를 저장하고 있다. 이를 이용하면 수술도구의 끝점이나 두께, 방향 등과 같은 수술에 중요한 정보들을 인식할 수 있다.

광학검출방식은 수술도구와 카메라 사이의 시야를 확보해야 하는 단점이 있으나, 1 mm 이하의 높은 해상도와 정확도를 가지고 있기 때문에 현재 많은 상용 항법장치에서 사용되고 있다.

표 1은 이 이외에 현재 활용 가능한 3차원 위치추적기술의 종류 및 그 특징을 나열하고 있다.

광학검출방식 다음으로 널리 사용되는 마그네틱 센서 방식은 그림 4-2와 같은 마그네틱 필드 생성기를 이용한다. 그림 4-2는 마그네틱 필드에 간섭을 일으키는 자그마한 코일센서로 이러한 자기장의 변화를 감지하여 코일센서의 위치를 계산하게 된다.

표 1. 3차원 위치추적방식

	방식	특징
기계식 다관절 방식	<ul style="list-style-type: none"> 6개의 관절 각 관절에 센서 부착 위치 검출 	<ul style="list-style-type: none"> 구성이 단순, 제작 비용 적음 6개 관절 반경내에서만 위치검출이 가능하므로 수술시 공간적 제한을 받음 기계적 노후에 의한 오차 발생 가능
마그네틱 센서 방식	<ul style="list-style-type: none"> Probe 끝에 마그네틱 센서 부착 후 발생하는 자기장을 주위 3개의 마그네틱 센서로 검출하여 위치 측정 	<ul style="list-style-type: none"> 무선이므로 수술시 사용상 용이 수술실내 전자기로 부터 발생하는 전자기파와 간섭, 금속성 수술기구로 인해 전자장 왜곡에 의한 검출된 위치의 부정확성 우려
광학검출 방식	<ul style="list-style-type: none"> 수술용 probe에 2개 이상 LED를 부착하고 주위에 카메라를 설치하여 3차원적 위치 검출 	<ul style="list-style-type: none"> LED가 소형이므로 각종 수술기구에 부착 가능 수술시 행동반경 확보 용이 LED와 카메라간의 시야 확보 필요
초음파 센서 방식	<ul style="list-style-type: none"> Probe 끝에 초음파 발생장치 부착 후 주위에 초음파 검출 마이크를 3개 설치하여 3차원적 위치 검출 	<ul style="list-style-type: none"> 무선이므로 수술시 사용상 용이 수술실의 온도, 향습 유지 필요(검출 위치 오차발생요인) 초음파의 파장을 일정하게 유지 필요
관성이용 방식	<ul style="list-style-type: none"> 반도체 Gyroscope 소자를 이용하여 3차원적 위치 검출 	<ul style="list-style-type: none"> 타 방식과 비교하여 오차 발생요인이 적음 소자 자체의 가속도 값에 의한 누적오차 발생 우려

이러한 방식은 센서와 자기장 생성기사이의 시야 확보가 필요 없는 장점이 있으나, 광학검출방식에 비해 검출영역이나 정확도(약 2 mm)가 떨어지고, 금속성의 물질에 의한 간섭에 취약한 단점이 있다. 따라서, 응급상황이나 임플란트의 삽입과 같이 비교적 정밀도를 요구하지 않는 시술에 사용될 수 있다.

3.3 직표정합기술

영상유도수술에서 정합이란, 수술 전 획득한 환

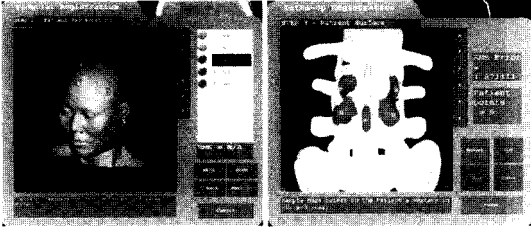


그림 5. 점정합방식과 표면정합방식

자의료영상의 영상좌표계와, 적외선 카메라 등 3차원 위치 추적 시스템에 의해 인식되는 수술장 내 실제 환자의 수술부위의 공간좌표계를, 일정한 수학적 알고리즘을 통해 일치시키는 과정을 일컫는다. 이 과정을 거쳐야만, 실제 수술부위와 그 3차원 영상이 동일한 좌표계에 존재하게 됨으로써, 수술 중에 수술도구의 위치나 인공관절의 위치를 3차원 영상에 중첩하여 가시화할 수 있다. 따라서 영상 유도 수술에서 정합과정은 수술의 정확성을 결정짓는 가장 중요한 요인이라고 할 수 있다.

영상유도수술을 위한 좌표계 정합방법으로는 여러 개의 정합기준점(fiducial)을 사용하여 좌표계를 일치시키는 점정합 방식과 환자 영상에서 표면모형(surface model)을 추출하여 정합하는 표면정합이 널리 사용된다.

점정합 방식은 그림 5의 좌측에서 보는 바와 같이 수술부위에 기준점 역할을 하는 마커(marker)를 부착하고, 그 상태에서 영상을 촬영, 획득함으로써, 영상에 나타난 마커의 좌표와 수술 부위에 부착된 실제 마커의 위치들 간의 대응관계를 사용하여 정합을 수행한다.

이와 같이 점정합 방식은 점들의 대응관계가 정해져 있기 때문에 비교적 간단한 알고리즘을 사용하여 수행할 수 있다. 또한, 정합 결과가 우수하기 때문에 뇌수술과 같이 수술부위에 직접 마커가 부착 가능한 경우에 널리 활용되는 방식이다.

하지만, 척추, 고관절, 슬관절 등과 같이 인체 내부에 있는 환부에 대해서는 수술 전에 마커를 부착할 수 없기 때문에, 점정합을 사용할 수 없다. 이러한 경우에는 표면정합을 사용한다.

표면정합은 점정합과 달리 지표점을 결정하지 않고 정합을 수행한다. 표면정합에서는 그림 5의 우측에서 보는 바와 같이 컴퓨터 3차원 볼륨영상으로

부터 수술 부위에 대한 표면모형을 획득한다. 표면모형은 수술부위의 표면상에 존재하는 많은 점들로 표현된다. 컴퓨터상에서 표면모형이 정의되면, 수술 중에 실제 수술부위의 표면으로부터 여러 개의 점들을 획득한다. 이렇게 획득된 점들은 표면모형상의 점들과 대응관계가 정해져 있지 않기 때문에, 점정합에 비해 복잡한 알고리즘을 사용하여 정합을 수행한다.

이미지 처리 분야에서 서로 다른 두 표면모형의 좌표를 일치시키기는 최적변환을 찾기 위해서 널리 사용되는 방식으로는 ICP(Iterative Closest Point) 알고리즘이 있다. ICP에서는 각 표면모형상의 점들의 대응관계를 정하기 위하여, 한 표면에서 몇 개의 대표점을 정하고, 이 대표점들로부터 최단거리에 있는 다른 표면상의 점들을 찾는다. 이렇게 점들 간의 대응관계가 정해지면, 현재의 변환에 대한 오차를 계산할 수 있으며, 이를 바탕으로 오차를 감소시키도록 변환 행렬을 갱신하고, 갱신된 변환행렬을 적용하여 한 표면모형의 좌표를 변환한다. 변환된 좌표들을 기준으로 다시 최단거리에 있는 대응점들을 찾고, 오차를 계산하여, 변환행렬을 갱신하는 과정을 반복적으로 수행한다.

수술장에서 정합을 위해 수술부위의 지표점이나 표면상의 대표점을 획득하는 과정은 영상유도수술을 성공적으로 수행하는 데 있어서 가장 중요한 부분이다. 따라서 정확하고 빠른 정합을 위한 여러 가지 새로운 방법들이 제안되고 있는데, BrainLab은 Z-touch와 같이 레이저포인터를 사용하여 수술부위의 표면데이터를 자동으로 스캔하거나, 수술장에서 fluoroscopy와 같은 x-ray 영상을 획득하여 이를 이용하여 정합을 수행하기도 한다.

4. 주요 임상 분야

이러한 수술용 항법장치는 신경외과의 뇌수술 및 척추수술, 정형외과의 고관절, 슬관절 등 인공관절 교체술에 있어서 필수적인 장비로 활용될 것으로 전망된다. 이 밖에 구강외과, 성형외과 등, 뼈를 다루는 모든 수술이나 이비인후과 등 정밀한 인체 내부의 항법이 필요한 수술 분야에 있어서도 사용될 수 있는 기술로 그 파급효과는 상당히리라고 예상된다.

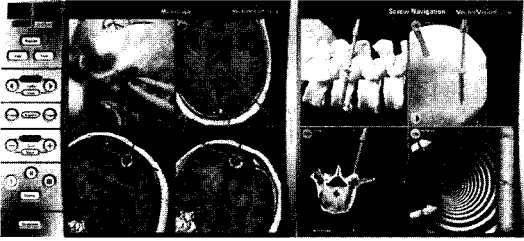


그림 6. BrainLab의 VectorVision

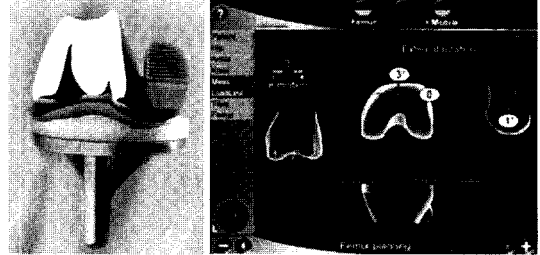


그림 7. Aesculap의 Orthopilot

4.1 신경외과

신경외과에서는 뇌 수술에 있어서 정확한 병변의 위치를 파악하는데 항법장치를 사용함으로써 수술의 정확도를 향상시키고 정상 뇌조직의 손상을 최소화할 수 있다.

향후 뇌 및 척추수술의 약 20%에서 수술용 항법장치를 이용하여 보다 정확한 수술을 할 수 있게 되고, 환자의 수술 부작용도 최소화하여 국민건강증진과 전체 의료보험의 재정에도 기여하는 바가 크다고 할 수 있다.

그림 6의 좌측은 항법장치를 이용하여 뇌종양의 절개수술을 시행하는 모습을 보여준다. 환자의 영상상에서 종양의 정확한 위치를 파악한 후, 뇌의 정상조직의 손상을 최소화할 수 있는 절개 부위 및 진입경로를 결정하고, 실시간으로 수술도구의 위치를 파악할 수 있다.

그림 6의 우측은 척추에 나사못을 삽입하는 데 항법장치를 사용하는 것을 보여준다. 척추수술에서는 삽입되는 나사못의 방향, 깊이, 굵기 등을 실시간으로 정확하게 유도할 수 있다. 척추관련 수술에서는 3차원 영상 뿐만 아니라, C-arm과 같은 x-ray 장비를 통해 획득된 다중평면영상을 활용하여 나사못의 위치를 실시간으로 확인할 수 있도록 하고 있다.

4.2 정형외과

항법 장치는 뼈를 다루는 거의 모든 수술에서 사용될 수 있으며, 특히 정형외과의 경우, 척추 나사못 삽입술, 조직 생검술, 각종 인공관절 치환 수술, 무릎의 인대 재건수술, 골절 수술 등 이루 헤아릴 수 없을 정도로 많은 수술에 항법장치가 사용될 수 있다.

그림 7은 슬관절교체술(Total Knee Arthroplasty)에 사용되는 항법장치의 모습이다. 슬관절교체술은 피퇴골(femur)과 경골(tibia)의 손상 부위를 정확한 단면으로 절단하고, 해당 절단면에 그림 좌측에 보는 것과 같은 인공관절을 삽입하는 시술로, 항법장치를 이용하여 절단면의 위치, 방향, 관절의 각도 등의 정보를 실시간으로 확인하면서 시술할 수 있다. 이 이외에도 고관절교체술(Total Hip Arthroplasty)이나 외상(trauma)의 수술에도 유사한 방식으로 항법장치가 사용되고 있다.

한 가지 특징적인 것은, 뇌수술이나 척추수술과는 달리 관절교체술을 위한 항법장치들은 관절의 회전이나 운동역학적(kinematics)인 특성을 활용하여 좌표계 정합을 수행한다.

5. 연구 동향과 미래

항법장치를 이용한 영상유도수술은 최소침습수술(Minimally Invasive Surgery)이라는 미래지향적 수술개념을 제시하는 기술로써, 의료사고를 줄이고, 수술의 후유증을 최소화하며 보다 완벽한 수술을 가능하게 하는데 있어서 효용도가 높으며 잠재성이 뛰어나다고 할 수 있다.

해외에서는 이미 10여년 전부터 본 기기의 개발이 시작되어 현재 선진국에서는 보편적인 뇌수술 장비로 자리 잡고 있으며, 국내에서는 분당서울대학교병원 및 연건동 서울대학교병원 등 10여 곳의 대형병원에서 외국 기기를 도입하여 사용하고 있다.

관련 연구 또한 활발하여, 이미 CARS(Computer Aided Radiology and Surgery), SPIE, CAOS(Computer Aided Orthopedic Surgery) 등의 국제적인 관련 학회가 이미 활성화되어 있어 기술에

대한 활발한 연구가 이루어지고 있으며, 국내에서도 전자공학, 기계공학, 의공학, 컴퓨터공학 등 학제간의 활발한 연구교류가 이루어지고 있다.

뿐만 아니라, 영상유도수술과 관련된 이러한 연구흐름은 미래의 의료기술의 주된 흐름이 될 로봇

을 이용한 수술(surgical robot)이나 원격 수술 시스템(tele-surgery system)을 개발하는 데에도 필수적인 한 요소(부품)로 자리를 확고히 할 것으로 예상된다.