



의료 시뮬레이션: 가상 수술†

한국정보통신대학교 박진아

1. 가상현실 기술과 의료분야

가상현실은 “실제로는 존재하지 않는 특정한 환경 또는 상황을 컴퓨터를 이용한 모의실험을 통하여 인간의 오감에 의도된 착오를 가져오게 해서 마치 실제 세계에 놓여있는 것처럼 느끼게 하는 인간-컴퓨터 간의 인터페이스”를 지칭하며 “인공적으로 창조된 세계에 몰입됨으로써 사용자로 하여금 자신이 바로 그곳에 있는 듯한 착각에 빠지게 하는 사이버 스페이스”라고 할 수 있다. 이상은 2002년 국립중앙과학관에서 개최된 가상현실 특별전에서 말하고 있는 가상현실의 정의로 이미 우리에게 친숙해진 용어이다. 1970년 중반에 videoplace 개념을 창안한 마이론 크루거(Myron Krueger) 박사에 의하여 창안되어 미국 VPL Research 사의 사장이었던 자론 래니어(Jaron Lanier)에 의해 1989년에 가상현실(Virtual Reality) 이란 용어로 다시 표현된 이후, 스티브 목스타칼리스의 실리콘 환상(Silicon Mirage) 이란 저서에서 “가상현실은 사람이 그 속에 빠져 들어 갈 수 있는, 컴퓨터가 만들어 낸 상호작용적인 (interactive) 3차원 환경”으로 정의되었다. 개념 속의 가상현실이 실현 가능한 기술로 발전하는데 가장 큰 공헌을 한 것은 1960대 말에 Sketchpad를 고안한 이반 서더랜드(Sutherland)의 HMD (Head mounted display)의 개발이 아닌가 한다. 이렇듯 공상가와 발명가에 의하여 시작된 가상현실의 역사가 30년이 지난 현재 과학연구의 한 분야로서 개념이 정리되고 구체화되고 있다. 서론에서는 가상현실이 기술적으로는 어디에까지 와 있으며 이를 통하여 과연 무엇이 가능한지, 가상현실이 어떻게 활용되고 있는지에 대하여 ‘의료분야’와 연계하여 살펴보고자 한다.

앞서 언급된 정의들에서 강조되고 있는 부분은 ‘몰입감’과 ‘상호작용’이다. 이러한 ‘현실감’을 느끼려면 어떤

조건들을 만족해야 하는지를 알아보자. 가상수술의 예를 들어 보면, 첫 번째로 우리의 오감 중에 가장 지배적인 시각감각을 만족하여야 한다. 이를 위해서는 기본적으로 그래픽의 높은 해상도를 통하여 시각적인 고충 실도를 유지해야 한다. 둘째로는 정지되어 있는 그림을 수동적으로 보고 있는 환경이 아니라, 능동적으로 사용자와 상호작용을 하는 환경으로서 사용자가 가상수술을 하기 위해서는 내장기관의 성질이 실감나게 표현되어야 한다. 특히 운동에 따른 관절 변형이나 외부 힘이 작용했을 때 내장기관의 모형이 사실적으로 변형되려면 이의 물리적인 성질이 잘 반영되어 있어야 한다. 또한 내장기관들의 상호작용 표현도 현실감에 중요한 역할을 한다. 예를 들어 동맥에서의 출혈이라든지 담즙의 유출 등의 표현이 가능해야 한다. 또한 내장기관과 수술도구의 상호작용의 표현이 잘 되어야 괴리감을 줄일 수 있다. 이를 위해서 중요한 부분은 촉감과 반력을 표현해 줄 수 있는 감각적 피드백을 들 수 있다. 마지막으로 주위 환경을 사실적으로 표현해 주고 청각적인 감각도 만족해 주어야 한다. 그런데 과연 이런 조건들이 모두 실현 가능하여 ‘가상’공간에서 실제 ‘수술’을 하는 것과 같은 경험을 할 수 있을까? 기존의 수술 환경 모습을 염두에 둔다면 아직도 좀 먼 미래에 실현 가능할 것으로 생각되지만, 최근 들어 수술 방법이 많은 부분에서 바뀌어지고 있으며 따라서 점차 가상 체험을 하기에 적절한 수준으로 바뀌어 가고 있는 것으로 보인다.

2. 가상현실 기술과 수술분야

수술은 Open Surgery, Minimally Invasive Surgery(MIS), 그리고 Radio-Surgery 등 크게 세가지로 분류할 수 있다. Open Surgery는 개복수술을 일컬으며 우리가 흔히 생각할 수 있는 수술 방법으로서 치료되어야 할 부분을 의료진이 직접 보고 만지며 수술을 한다. 이에 반하여 Minimally Invasive Surgery

† 이 논문은 정부(교육인적자원부)의 지원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(지역대학 우수과학자지원 사업: D00 639).

(MIS)는 Keyhole Surgery 라고도 하는데 복강경 수술이 가장 대표적인 예이다. 복강경 수술은 개복을 하지 않고 필요한 부분에 작은 구멍을 내어 특수 카메라가 부착된 복강경과 수술 도구를 몸 속에 삽입하여 비디오 모니터를 통해서 관측하며 레이저나 특수외과 전 기술 등을 이용한 특수기구를 이용하여 미세 수술을 한다. 더 나아가 Radio-Surgery는 체외에서 방사선이나 레이저 광으로 수술 치료하는 것을 말한다.

수술에 관련되어 현재 가상현실기술이 적용되는 분야로는 가상내시경, 영상가이드수술, 그리고 Preoperative Planning을 들 수 있다. 가상내시경(Virtual Endoscopy)은 MRI나 CT와 같은 촬영을 통하여 볼륨영상으로 받은 인체 내부를 가상 공간에서 가상적으로 탐험(Navigation)하면서 해당 부위를 살펴보는 것을 말한다. 내시경이 가장 많이 적용되는 곳은 위장과 대장인데, 가상내시경은 실제 내시경에 비하여 영상의 질이 낫지 않으며 무엇보다도 환자의 고통이 전혀 없는 가상 공간에서 이루어진다. 더욱이 실제로 Navigation을 할 수 없는 혈관 속이나 뇌수 공동에도 적용 가능하여 앞으로 진단에 많이 활용 될 것으로 기대되는 분야이다. 영상가이드 수술(Image Guided Surgery)은 가상현실이라기보다는 증강현실(Augmented Reality) 기법을 활용한 것이라고 할 수 있는데, 수술하고자 하는 부분 주위의 내부를 실제 부위에 정합하여 보여줌으로써 정확하게 시술할 수 있도록 해 주는 기술이다. Preoperative Planning은 시술을 하기 이전에 가상공간에서 환자의 기관이나 조직들을 구분하여 가시화하고 조작해 봄으로써 어떤 방법으로 시술을 하는 것이 가장 효과적인지 미리 계획을 할 수 있도록 도와주는 기술이다.

원격진료 (Telemedicine) 또한 가상현실의 적용이라고 볼 수 있다. 의사가 원격장소에서 가상현실 시스템을 통하여 실제 수술장소에 있는 것처럼 느끼며 시술을 하는 기술이다. 현장의 상황을 실제로 보고 느끼면서 시술을 하는데, 실제 수술은 원격 로봇을 통한 원격조정에 의하여 이루어지게 되는 것이다.

3. 의료 시뮬레이션

수술에서 빼 놓을 수 없는 부분은 바로 교육과 연습(training)이다. 이는 의료 시뮬레이션을 통하여 이루어질 수 있는데, 앞서 언급한 MIS의 경우에 많이 요구되는 부분이라고 할 수 있다. 종전의 개복수술의 경우에는 의사가 직접 환부를 보고 만질 수 있으나 복강경 수술인 경우에는 카메라를 이용하여 제한된 부분만을 볼 수 있고 또한 도구를 이용하여 시술을 하기 때-

문에 의사의 관점에서는 어려운 시술법이라 할 수 있다. 하지만 이러한 제한 요건이 오히려 컴퓨터의 구현을 가능하게 해 주고 가상현실이 잘 적용될 수 있는 분야라고 생각된다. 의료 시뮬레이션을 하는 이유는 의료진에게 고난도의 경험을 제공해 주고, 환자를 보호하며 의료기술을 습득할 수 있도록 함이다. 기존에는 이런 연습을 위하여 동물이나 사체를 많이 사용했는데 동물은 사람과 다른 해부학적인 구조를 가지고 있고 사체는 생리학(physiology)적인 성질이 다르기 때문에 효과적이라고 볼 수는 없다. 현 교육 시스템에서는 인턴과정을 통하여 직접 환자에게 연습을 하도록 되어 있어서 의사사고 등의 위험을 안고 있다. 미국에서는 최근 들어 의학 교육에 새로운 패러다임이 열리고 있는데 바로 의료 시뮬레이션이 교육과정에 포함되어 좀 더 풍부한 경험을 가진 의사 배출에 기여하고자 하고 있다.

3.1 컴퓨터 그래픽스 기술 응용

의료 시뮬레이션 환경을 구현하기 위하여 우선적으로 필요한 기술은 시각적인 피드백을 주는 컴퓨터 그래픽스 기술이다. 물체를 성질에 맞도록 표현하는 모델링 방법과 특수 효과를 실시간으로 보여주어야 하는 렌더링 기법들을 요구한다. 그동안 엔터테인먼트 시장에 초점을 맞추어 모델링과 렌더링 분야의 연구가 활발히 진행되고 있으나 의료 시뮬레이션에 활용되기에 아직 초보적인 단계에 머물러 있기에 앞으로 많은 연구가 활성화 될 것으로 기대한다.

3.2 모델링

의료영상데이터를 기본으로 하는 물체를 표현하는 방법으로는 1) 복셀(voxels) 기반과 2) 다각형(polygons) 기반을 들 수 있겠다. 복셀은 의료영상의 기본 단위로 볼륨 데이터를 이루는 기본 요소이다. 따라서 이를 이용하여 물체를 표현하게 되면 비균질의 물체도 자연스럽게 정보를 보존한 상태에서 나타낼 수 있으므로 많은 장점을 갖는다. 충돌 감지도 단순한 점거(occupancy)검사를 통해서 할 수도 있으며, 물체를 절단할 경우에도 볼륨 정보를 가지고 있기 때문에 절단 부위에 대하여 특별한 처리를 요구하지 않을 수도 있다. 또한 실시간 볼륨 렌더링 기법의 발전에 의하여 고급 정보를 포함한 시각화도 가능하다. 하지만 복셀의 집합으로 정의된 물체는 뚜렷한 객체화가 되어 있지 않기 때문에 이에 따른 어려움이 따르며 현재 상용되고 있는 그래픽스 카드가 복셀 방식을 지원하지 않기 때문에 최근에 개발되고 있는 GPU 특수 효과 기능을 활용하지 못하고 있다.

반면에 다각형 기반 모델은 최근의 렌더링 하드웨어의 기능을 충분히 활용할 수 있는 가능성을 가지고 있어서 의료 시뮬레이션에 특화된 알고리즘 개발에 주목 할 수 있다. 다각형모델의 경우 대부분 표면만을 타내는 삼각형 메쉬나 볼륨을 위한 3차원 4면체가 활용된다. 이들은 우선적으로 삼각형 메쉬 또는 4면체를 구성하기 위한 전처리 과정이 필요하지만 삼각형을 기본으로 하기 때문에 효율적으로 처리할 수 있는 강점을 가지고 있는 반면 물체의 내부가 빈 공간이라는 단점을 가지고 있어서 예를 들어 수술 시뮬레이션에서 절단하는 과정에서 절단면을 처리해야 하는 어려움을 가지고 있다. 하지만 4면체는 변형을 표현하고 물질 속성을 가지는 유한요소 기법 등과 수월하게 연결 할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

가상 수술 시뮬레이션에 필요한 효과들의 사실적인 구현이 어떤 모델을 이용하여 물체들을 표현하고 있는지와 직결되어 있다. 현재 제안된 모델링 기법들의 장단점을 상호보완 할 수 있는 새로운 모델링 기법의 연구가 필요하다.

3.3 렌더링

수술이 시행될 때 표현되어야 효과는 1) 절개(cutting)와 2) 출혈(bleeding)을 들 수 있다. '수술'에는 기본적으로 절단의 개념이 들어간다. 가상 수술 시뮬레이션에서 활용될 수 있는 기법들로 장기나 피부 등의 부분적인 절단을 사실적으로 표현하는 방법의 연구가 진행되고는 있으나 아직 해결되어야 할 문제가 많은 실정이다. 절단은 어느 특정 방향으로만 일어나는 것이 아니라 임의의 방향으로도 가능해야 하므로, 또한 같은 장소를 절개하더라도 적용되는 힘의 세기와 기울기 방향에 따라 결과가 달라질 수 있기 때문에, 이들을 효과적으로 수용할 수 있는 근본적인 모델링을 정의하는데 어려움이 있으며, 절단 부위의 열림 효과를 사실적으로 표현하기 위해서는 물질의 성질 등이 잘 반영 되어야 하는데 이를 실시간으로 처리하는 문제도 따르고 있다. 현재 사용되고 있는 방법으로 가장 간단한 방법은 잘려져 나간 부분의 구성요소 (예를 들어 복셀, 다각형의 일부)를 제거하는 것으로 빠르게 처리할 수는 있지만, 결과가 사실적이지 않고 자르는 부위가 정확하지 않기 때문에 이를 보완하는 방법들에 대한 연구에 초점이 맞추어지고 있다. 특히 메쉬로 이루어진 물체의 경우에는 잘려나감으로 해서 새롭게 생성된 면을 다각형으로 다시 채우는 알고리즘이 개발되고 있는데 아직까지는 다각형 수의 불필요한 증대와 비균형모양의 다각형 생성 등이 문제시되고 있다. 따라서 새롭게 생성되는 구

성요소의 최소화와 균형적인 구성요소 생성에 대한 연구가 이루어지고 있다.

'출혈' 역시 수술에서 피할 수 없는 부분이라고 볼 수 있다. 출혈의 효과는 뿐어대듯이 나오는 분출, 물이 흐르는 것과 같은 흘러나옴, 천천히 짜내듯이 나오는 누출 등 그 유형이 다양하다. 비압축 유체 역학을 표현하는 Navier-Stoke 수식을 기반으로 한 시뮬레이션 알고리즘들이 개발되고 있으며, Particle System도 활용되고 있고, 또한 Texture Mapping 효과도 이용하여 사실적이며 실시간 구현을 목표로 연구되고 있다. 출혈과 연결하여 빼놓을 수 없는 부분이 '지혈'인데 현재 지혈 효과와 지혈 결과 표현에 대한 연구는 아직 그리 활발하지는 않다. 지혈을 위하여 수술에서 많이 사용되는 것이 전기나 열을 이용하는 방법인데 이때 발생되는 연기나 증기의 효과도 실시간에 표현될 수 있어야 한다. 근래에 많은 발전을 한 컴퓨터 그래픽스 기술 개발로 인하여 사실적인 자연 현상 렌더링이 실시간에 가능해 지면서 특수 효과를 가상 수술 시뮬레이션에도 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

3.4 실시간 가변형 모델

산업 응용 프로그램에서 다루어지는 물체는 대부분 강직 물체인 반면에, 의료 응용 프로그램에서 다루는 인체는 비강직 요소가 강하며, 특히 인체 기관들은 대부분 물렁한 물체로서 힘에 가하게 되면 변형이 이루어진다. 따라서 의료 시뮬레이션에서는 이런 물렁한 물체, 즉 soft tissue의 성질을 가능한 한 사실적으로 표현하고 실시간에 변형을 구현할 수 있는 가변형 모델 구현이 중요하다. 하지만 soft tissue는 매우 복잡하여 현재 알려진 성질만도 모두 제대로 구현하기는 무척 어려운 실정이다. 예를 들어 적용되는 힘에 비례하여 비선형적으로 변형이 일어나며, 점탄성 성질을 가지고 있어 시간에 따른 함수를 가지며, 이방성의 성질도 있어서 자국의 방향에 따라 다른 작용을 하며, 또한 비균질적이다. 이런 성질들을 비교적 정확하게 구현할 수 있는 모델 기법으로 유한요소모델(Finite Element Model, FEM)을 활용한다. 하지만 비선형 모델의 FEM 구현은 계산 부하가 많기 때문에 현재의 컴퓨팅 수준으로는 실시간 변형이 불가능하다고 볼 수 있다.

실시간 변형이라 함은 시각적 피드백을 위한 실시간 변형과 촉각적 피드백을 위한 실시간 변형이 있는데, 시각적 피드백은 보통 0.04초(25 Hz), 촉각적 피드백은 보통 0.002초(500 Hz)로서, 그 시간 안에 변형의 계산이 끝나야 함을 말한다. 따라서 특히 실시간 촉각 피드백까지 고려를 한다면 FEM을 이용한 시뮬레

이션은 현재로는 아직 무리가 있다.

차선으로 많이 사용되는 모델은 Mass-spring 모델이다. Mass-spring 모델은 물체의 표면이나 또는 물체의 내부를 연속물질이 아닌 불연속적인 요소로 점-질량(point mass)으로 구성하고 이 점들을 스프링으로 연결하여 뉴튼(Newton)의 역학 법칙을 적용하는 모델링 기법으로 비교적 쉽게 구현할 수 있으며 계산부하도 적어 빠른 변형을 구할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 앞서 언급되었던 '절단'의 효과도 연결된 스프링을 끊어주는 기법을 이용하여 구현할 수도 있다. 하지만 스프링 계수를 임의적으로 배정해야 하며, 이에 대한 실제 장기의 물리적인 성질과의 연결이 불명확하고, FEM에 비하여 비사실적인 변형이 이루어진다.

실시간 변형을 위해서 최적화 기법을 비롯하여 많은 연구가 이루어지고 있으며, 새로운 대안 모델도 개발되고 있다.

3.5 의료 시뮬레이션 시스템

이상으로 컴퓨터 그래픽스 분야와 관련된 의료 시뮬레이션의 기본적인 연구 진행 방향에 대하여 모델링과 렌더링을 중심으로 살펴보았다. 이 외에도 관련된 연구 내용은 3차원 가상공간에서의 상호작용에 중요한 요소인 충돌감지 알고리즘 개발이 있으며, 또한 장기뿐만 아니라 이와 상호작용하는 수술도구의 모델링도 연구되어야 할 부분으로 볼 수 있다. 또한, 의료 시뮬레이션 시스템은 시각적인 부분뿐만 아니라, 촉각, 청각 등 다중 모드의 피드백이 잘 어우러져야 가상 현실 기술에서 중요한 요소인 몰입감을 제공할 수 있다. 따라서 최근 들어 촉각에 관련된 햅틱 렌더링 분야에도 많은 관심이 모아지고 있다.

4. 맺음말

가상현실이 적용되고 있는 의료분야에는 앞서 설명한 의료 시뮬레이션인 수술(Surgery)과 교육(Education)이 있다. 이외에도 정신건강 재활 프로그램(Mental Health Rehabilitation Program)에 활용되고 있는데, 다양한 공포증을 가지고 있는 환자들에게 해당 상황에 대한 가상현실 체험을 통하여 증상 치료 기회를 제공하며, 이는 현 가상현실 연구의 성공적인 적용 사례라고 할 수 있다. 위와 같이 가상현실의 기술이 의료와 접목되면서 인간 생활에 많은 도움을 주고 있으며 앞으로도 많은 부분에 기여를 할 것으로 기대된다.

박진아



1988 미국 컬럼비아대학교(학사)
1989 미국 IBM Thomas J. Watson
연구센터 연구원
1991 미국 펜실바니아대학교(석사)
1996 미국 펜실바니아대학교(박사)
1996~1998 미국 펜실바니아대학교
박사후과정
1999~2002 한국과학기술원 대우교수
및 초빙교수
2002~현재 한국정보통신대학교 조교수

관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 가변형 모델, 의료영상 데이터
가시화, 햅틱 렌더링, 정보가시화

E-mail : jinah@icu.ac.kr