

인체 장기의 모델화

이 글에서는 의료 영상 데이터로부터 의료 시뮬레이션에 필요한 인체 장기의 3차원 모델을 구성하는 방법과 사실적인 상호작용 및 시뮬레이션을 위해 고려되어야 할 요소들을 컴퓨터 그래픽 관점에서 소개한다.

의료 시뮬레이션에서 시각적인 효과를 주는 컴퓨터 그래픽 기술에는 물체를 성질에 맞도록 표현하는 모델화 방법과 특수 효과를 실시간으로 보여주는 렌더링 기법들이 있다. 컴퓨터 그래픽 기술은 최근 들어 엔터테인먼트(entertainment) 시장에 초점을 맞추어 모델과 렌더링, 애니메이션 분야의 연구가 활발히 진행되고 있는데, 앞으로 의료 시뮬레이션과 관련된 많은 연구가 활성화 될 것으로 기대된다.

시뮬레이션에서 모델과 렌더링의 역할

실세계의 물체들을 우리는 눈을 통하여 본다. 이는 각 물체가 빛에 반사되고 반사된 빛들이 우리의 망막에 상을 이루어 우리의 두뇌에 전달되어 이로부터 우리는 색과 형태를 인지하고 어떤 물체인지 알 수 있게 된다. 우리 눈의 구조를 모방하여 발명된 사진기는 렌즈를 통하여 들어온 빛을 모아 상을 만들어내어 실세계의 모습을 담은 영상을 제공한다. 컴퓨터 그래픽은 컴퓨터를 이용하여 영상을 만들어내는 총체적인 학문으로 가상환경 내의 가상 물체들을 우리 눈 앞에 보여준다. 가상공간에 있는 내용을 그래픽 영상으로 만드는 과정을 그래픽

렌더링(rendering)이라고 말하며, 가상공간에 존재하는 가상 물체들을 만들어내는 과정을 모델화라고 한다. 즉 영상을 그림에 비유한다면 ‘어떻게 그릴까’ 하는 부분이 렌더링이고 ‘어떤 무엇’에 해당되는 부분이 모델화이다.

가상공간에 물체를 어떻게 정의하느냐부터가 모델화의 시작이라고 볼 수 있다. 예를 들어 축구공이 있을 때, 이를 반지름이 r 인 3차원 구(sphere)의 수식으로 표현(represent)할 수도 있고, 세부분할(subdivision) 알고리즘을 통하여 나온 평면 다각형의 집합으로 다각형의 정점의 위치

들을 저장하여 공이라는 물체를 생성할 수도 있다. 더 나아가 공의 표면색을 지정해줄 수 있으며, 또한 공의 무게, 탄력 등 이의 속성을 지정해줄 수 있다. 이와 같이 모델화를 통하여 가상공간에 정의된 공은 렌더링을 통하여 화면의 어느 지점에 어떤 조명을 어디에서 받느냐에 따라 보여지는 모습이 그려지는데, 어떤 렌더링 기법을 적용했느냐에 따라 실제의 축구공처럼 보여질 수도 있고 만화에서 그려지는 축구공 모양으로 보여질 수도 있는 등 다양한 모습으로 나타날 수 있다. 그려진 결과물의 차이는 있지만 그래도 우리는 렌더링을 통하여 축구공이라는 물체가 존재함을 알 수 있게 된다.

이 축구공을 가상의 힘으로 밀었다고 가정해보자. 공이 얼마큼 움직이고 어디에 놓이게 되는지는 적용된 힘과 공의 속성인 무게 그리고 가상공간에 작용하고 있는 정의된 법칙 등에 따라 달라질 것이다. 움직임에 따라 나타나는 모습은 모델화에 의해 정해지고, 움직이는 모습을 보여주는 것은 역시 렌더링의 몫이 된다. 효과적인 시뮬레이션은 물체에 관련된 속성들이 물체 내에 정의될 수 있는 모델화 기술과 변화하는 모습을 실시간에 보여줄 수 있는 렌더링 기술이 함께 적용된 시스템으로 실제계와 유사한 사실적인 영상을 주는 시스템이라고 볼 수 있다. 또한 모델화와 렌

더링 기술뿐만 아니라 가상공간 내에서의 물체들끼리의 상호작용 그리고 사용자와 가상물체의 상호작용 및 인터페이스도 중요한 역할을 한다.

의료영상 데이터로부터 3차원 모델 구성하기

의료시뮬레이션을 위해서는 우선적으로 가상공간에 인체 장기의 모델이 생성되어야 한다. 가상인체 모델을 생성하기 위해서는 CT나 MRI 또는 실제 해부 데이터 등을 사용하는데 이는 이러한

데이터들이 사실적인 인체의 해부학적인 정보를 가지고 있기 때문이다. 예를 들어 미국 NSF에서 시작한 비저블 휴먼(Visible Human) 프로젝트를 본받아 국내에서 제작된 한국형 비저블 휴먼 VKH(Visible Korean Human) 데이터는 한국 남성의 전신에 대한 CT와 MRI 영상뿐만 아니라 2mm 간격으로 절단된 8,500여 영상들로 구성된 해부 영상과 이 해부 영상을 부분별로 구분한 구획화 영상까지 제공하고 있어 그 활용도가 매우 높은 데이터이다. 이러한 영상들

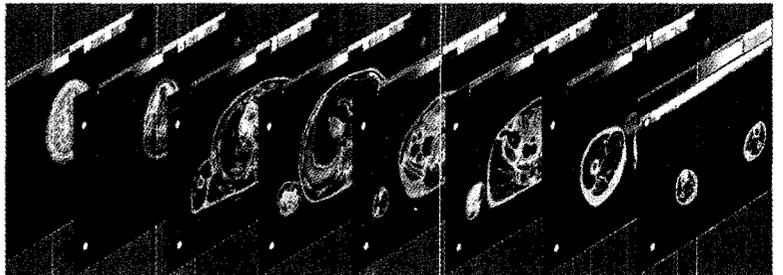


그림 1 VKH 데이터의 해부학 영상. 머리끝부터 발끝까지 2mm 간격으로 절단되어 전체 8,500개의 영상으로 이루어져 있다.(아주대 해부학교실)

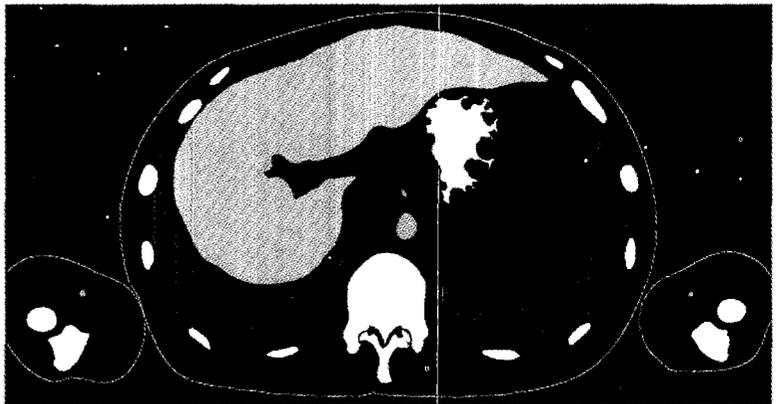


그림 2 VKH 데이터 중 구획된 영상의 예. 인체의 각 부분들이 서로 다른 색으로 구획되어 있다.(아주대 해부학교실)

은 단면 영상(tomography)들로서 각각의 화소를 복셀(voxel), 그리고 복셀들이 이루는 평면인 하나의 영상은 슬라이스(slice)라고 부르고, 모든 슬라이스를 층층이 쌓아 올리면 볼륨 데이터로 인체 내부의 정보를 가지고 있게 된다.

이러한 인체의 단면 영상들로부터 인체의 특정 장기를 가상공간 상으로 모델화하는 것은 목표 장기를 구획화(segmentation)하는 것으로부터 출발한다. 인체 장기의 구획화는 각 장기의 특성

이 영상에 나타나는 색 또는 명암 값과 인체에서의 위치 등을 이용하여 영역증대법(region growing)과 같은 영상처리 기법을 통하여 자동으로 수행할 수 있지만 전문가의 도움 없이 정확한 구획화를 얻기에는 다소 어려움이 따른다. 이런 점에서 VKH 데이터가 제공하는 구획화 영상이 큰 도움이 될 수 있다.

영상처리 기법으로 볼륨 영상 데이터의 외란을 줄이거나 또는 목표 장기를 비교적 뚜렷이 구분이 되도록 하는 구획화에 관련된

전처리 과정이 완료되면, 이로부터 목표 장기의 표면을 추출하는 작업이 수행된다. 표면 추출을 위해서 사용되는 방법으로는 크게 세 가지 방법이 많이 활용되는데, 첫 번째는 마칭큐브(marching cube) 알고리즘을 적용하는 것으로 가장 보편적으로 이용되는 방법이며, 두 번째는 스네이크(snake)라고 불리는 동적 윤곽선(active contour)을 각 슬라이스에 적용하여 1차원 가변형 모델을 활용하여 윤곽선을 추출한 후 3차원 메시(mesh) 모델로

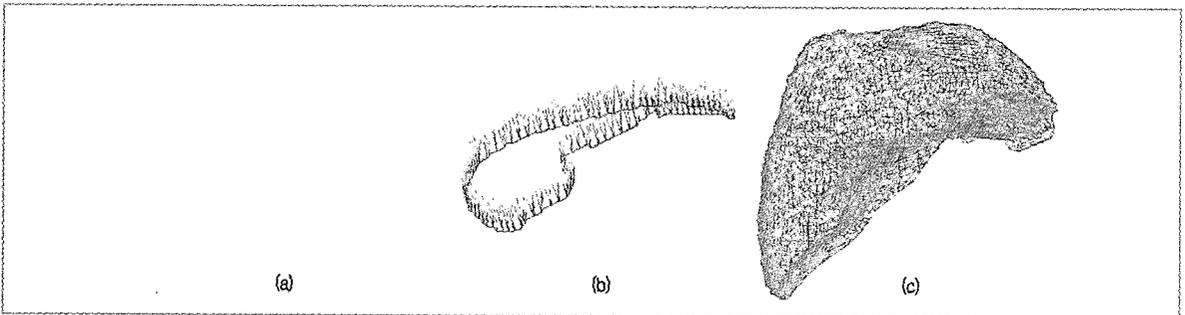


그림 3 (a) VKH 데이터의 구획화 된 영상 중 복부 부분의 약 1,000여 장의 영상으로부터 추출된 간의 표면에 해당하는 점들. (b) 하나의 슬라이스에서 추출된 간의 윤곽선과 다음 슬라이스에서 추출된 윤곽선을 연결한 등가면 스트립. (c) 모든 등가면 스트립들로부터 생성된 간의 표면 모델

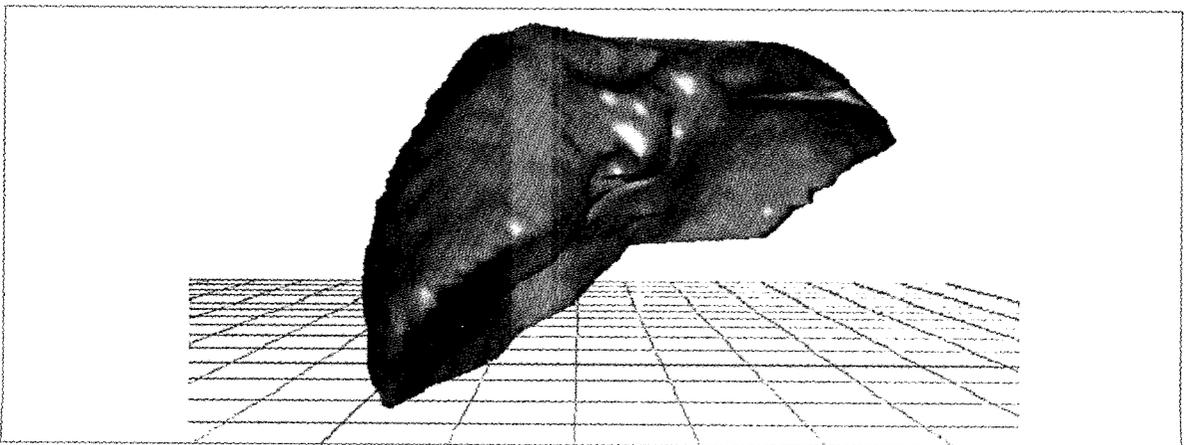


그림 4 모델화된 간의 색에 대한 물성과 조명을 적용하여 렌더링한 결과

조합하는 방법, 그리고 세 번째는 3차원 가변형 모델을 이용하는 방법이다.

1987년 W. Lorenzen과 H. Cline이 제안한 마칭 큐브 알고리즘은 3차원 볼륨 데이터에서 등가면을 추출하기 위한 표준적인 방법을 제시한다. 마칭 큐브 알고리즘은 3차원 볼륨 데이터를 물체와 배경으로 이원화시킨 상황에서 8개의 인접한 복셀을 하나의 작은 큐브(정육면체)로 보고 각 큐브들의 꼭짓점들을 검사하여 큐브 내에 물체와 배경이 함께 존재할 경우 적절한 다각형으로 대체해 감으로써 3차원 표면을 생성해낸다. 마칭 큐브는 표면 모델을 생성하는 데 효율적인 알고리즘이지만 결과 모델의 데이터 크기가 매우 방대해지는 문제점이 있어 메시 간략화(mesh simplification) 등을 수행하여 그 크기를 줄인 후 실제 시뮬레이션에 사용하게 된다. 메시 간략화는 모델의 원래 형상을 최대한 보존하면서 사용된 다각형의 개수를 줄이는 과정을 말하는데 각 에지(edge)에 대한 소실 비용 함수를 작성하고 가장 적은 비용 값을 가진 에지를 소실시켜 가는 방법이 주로 사용된다.

두 번째로 많이 쓰이는 방법은 각 슬라이스에서 목표장기의 윤곽선을 추출한 후 이를 적절한 간격으로 샘플링하여 꼭짓점으로 하고 인접한 위 또는 아래 슬라이스에서 추출된 윤곽선과 연결,

볼륨영상데이터로부터 장기 표면을 추출하는 방법으로 세 가지를 들 수 있는데, 첫 번째는 마칭 큐브 알고리즘을 적용하는 것, 두 번째는 1차원 가변형 모델을 각 슬라이스에 적용하여 윤곽선을 추출하여 조합하는 방법, 그리고 세 번째는 3차원 가변형 모델을 이용하는 방법 등이 있다.

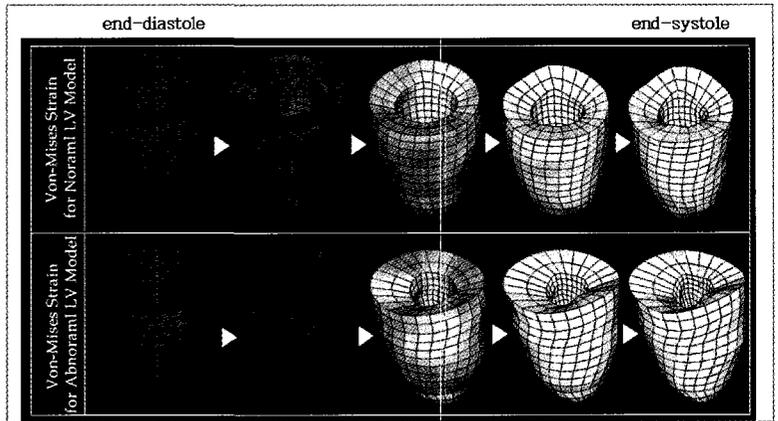


그림 5 심장 좌심실의 가변형 모델. 심장의 수축기 동안 좌심실의 수축 형태를 보여 준다. (위) 정상인의 좌심실 운동 모양 (아래) 비대심근증(hypertrophic cardiomyopathy) 환자의 좌심실 운동 모양.

다각형으로 이루어진 리본 형태의 스트립을 연속으로 쌓아올려 3차원 표면을 만들어가는 방법이다. 윤곽선을 추출하기 위해서 많이 활용되는 기법으로는 스네이크라고 일컬어지는 1차원 가변형 개체를 활용하는데, 이는 각 노드(node)가 스프링으로 연결되어 있으며 내부에너지와 외부에너지를 최소화하는 방향으로 노드의 위치가 바뀔므로 해서 미리 정해진 노드들이 윤곽선에 맞추어 정렬하도록 하는 방법이다. 3차원 윤곽을 추출하기 위해서는 각각의 슬라이스에 적용해야 하는데,

스네이크를 이용할 경우에는 바로 이전 슬라이스에서 추출된 윤곽선을 시작선으로 하여 적용하면 자동으로 원하는 결과물을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있으나 전체적으로 부드러운 모양을 유지하려고 하기에 윤곽선의 굴곡이 심할 경우에는 이를 완화하는 효과로 인하여 정확한 윤곽선을 얻기 힘들 수도 있다. 예를 들어 VKH 데이터에서 간(liver)을 추출하고자 하면, 간 구조가 있는 부분은 약 1,000여 개의 슬라이스 영상으로 구성되어 있다. 이로부터 3차원 간 모델을 생성하려

면 이 영상들로부터 등가면(iso-surface)을 추출해내야 한다. 등가면은 간의 현재 영상과 다음 영상에서 간의 표면을 이루는 점들을 연결함으로써 얻을 수 있지만 간의 굴곡과 요철 등으로 인해 컴퓨터를 이용하여 완전 자동으로 추출해내기가 쉽지 않다.

세 번째 방법으로는 미리 표준으로 만들어진 특정 장기의 3차원 가변형 모델을 3차원 볼륨 데이터에 직접 적용하여 조금씩 변형시켜서 목표 장기를 추출해가는 방법이다. 사람의 특정 장기의 모습은 기본적인 공통점이 있지만 그 크기나 모양에 있어 개인차가 크다. 또한 장기들은 딱딱한 물체가 아니기 때문에 모양이 시간과 환경에 따라 변형될 수 있다. 따라서 이들의 모델을 기본적으로 가변형 모델로 간주하여 모델화하는 것은 자연스러운 방법이라고 볼 수 있다. 더욱이 모델 자체가 3차원이기 때문에 앞서 설명된 방법에서처럼 슬라이스별 2차원 구조에서 3차원 구조로 재구성해야 하는 절차가 필요치 않고 또한 슬라이스에 따른 제약을 받지 않아 인위적인 형태에서 벗어날 수 있다. 또한 모델이 어느 특정 상황에서의 형태만을 표현하기보다는 물체의 속성을 반영할 수 있는 모델이 더욱 바람직하다. 가변형 모델의 경우 형태 변형의 자유도를 제어함으로써 보다 사실적인 변형을 유도하여 시뮬레이션에 활용할 수 있다. 예

를 들어 심장을 모델화할 때 가변형 모델을 활용하되 무한자유도의 변형을 허락하는 것이 아니라 심근 섬유들의 방향에 따라 움직임이 유도할 수 있는 통제수식에 기반한 모델이라면 효율 가치가 높을 것이다.

이와 같이 2차원 영상들로부터 추출된 목표장기의 표면은 3차원 메시 구조로 전체 형태를 잡게 되는데, 시뮬레이션을 위해서는 메시 모델이 물리적인 특성을 지닌 모델로 다시 정의된다. 그리고 표면 모델을 사용할 경우 물체의 내부 정보를 제대로 활용하지 못하기 때문에 물체의 볼륨을 3차원 사면체들의 집합이나 3차원 정육면체의 집합으로 분할하여 적용하기도 한다. 이때 가장 보편적으로 사용되는 것은 각 점(node)들이 스프링으로 연결된 구조로 보고 질량-스프링 모델(Mass-Spring model)로 표현하는 것이다. 질량-스프링 모델은 물체의 표면이나 또는 물체의 내부를 연속물질이 아닌 불연속적인 요소인 점-질량(point mass)으로 구성하고 이 점들을 스프링으로 연결하여 뉴턴(Newton)의 역학법칙을 적용하는 모델화 기법으로 비교적 쉽게 구현할 수 있으며 계산 부하도 적어 빠른 변형을 구할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 스프링 계수를 임의적으로 배정해야 하며, 이에 대한 실제 장기의 물리적인 성질과의 연결이 불

명확하여 비사실적인 변형이 이루어질 가능성이 있다. 이에 반하여 유한요소법(FEM : Finite Element Method)을 이용하여 시뮬레이션을 하는 경우에는 물질의 실제적인 성질을 적용할 수 있어서 정확한 결과를 보여준다. 앞서도 언급되었듯이 인체 기관들은 대부분 물렁한 물체로서 힘이 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 자극의 방향에 따라 다른 작용을 하며, 또한 비균질적이다. FEM은 이런 성질들을 비교적 정확하게 구현할 수 있는 모델 기법이기는 하지만 비선형 모델의 FEM 구현은 계산 부하가 많기 때문에 현재의 컴퓨터 수준으로는 실시간 변형이 불가능할 수도 있다. 여기에서 실시간 변형이라 함은 시각적 피드백을 위한 실시간 변형과 햅틱 피드백을 위한 실시간 변형이 있는데, 시각적 피드백은 보통 0.04초(25Hz), 햅틱 피드백은 보통 0.002초

(500Hz)로서, 그 시간 안에 변형의 계산이 끝나야 함을 말한다. 차선으로 많이 사용되는 모델은 질량-스프링 모델이며, 실시간 변형을 위해서 최적화 기법을 비롯하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 또한 체인메일(Chain Mail) 변형으로부터 착안된 형상 보존-체인모델(S-Chain Model)은 복셀에 기반을 둔 볼륨 가변형 모델로 실시간에 고해상도 햅틱 렌더링이 가능한 모델로 새롭게 제안되기도 하였다.

상호작용과 렌더링

의료 영상 데이터의 시각화 기법은 크게 표면 렌더링(surface rendering)과 볼륨 렌더링(volume rendering)으로 나눌 수 있다. 표면 렌더링은 다각형 메시 형태로 물체의 표면을 추출한 상황에서 전통적인 컴퓨터 그래픽의 렌더링 기법을 적용하는 것이고, 볼륨 렌더링은 볼륨 데이터를 부위에 따라 색과 투명도를 결정하여 빛이 볼륨 데이터를 통과하여 결과 영상을 얻는 렌더링 방법이다. 표면 렌더링은 물체의 명확한 경계를 보여주며 내부의 정보를 잃고 있는 반면 볼륨 렌더링은 주위의 장기를 포함하여 내부 정보에 대하여 다양하게 보여 줄 수 있다. 요즘에는 각각의 장점을 살려 표면 렌더링과 볼륨 렌더링을 혼합하는 기법들이 활용되기도 한다. 최근 들어 회화효

과를 내는 비실사 렌더링(NPR : Non-Photorealistic Rendering) 기법이 의료 영상 데이터 시각화에도 적용이 되어 실루엣효과 등을 겸비한, 보다 효과적인 표현을 창출하고 있다. 하지만 현재까지 활용되고 있는 시각화 기법은 단순히 주어진 데이터의 렌더링 기법들이고, 향후 의료 시뮬레이션에서 필요한 모델과 이의 상호작용을 고려한 렌더링 기술에 초점이 맞추어져야 할 것이다.

의료 영상 데이터를 기본으로 하는 물체를 표현하는 방법으로는 복셀(voxels) 기반과 다각형(polygons) 기반을 들 수 있다. 복셀은 의료 영상의 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 상용화되어 있는 그래픽 카드가 복셀 방

식을 지원하지 않기 때문에 최근에 개발되고 있는 GPU 특수효과 기능을 활용하지 못하고 있다.

반면에 다각형 기반 모델은 최근의 렌더링 하드웨어의 기능을 충분히 활용할 수 있는 가능성을 가지고 있어서 의료 시뮬레이션에 특화된 알고리즘 개발에 주목할 수 있다. 다각형 모델의 경우 대부분 표면만을 나타내는 삼각형 메시나 볼륨을 위한 3차원 4면체가 활용된다. 이들은 우선적으로 삼각형 메시 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 연결할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

가상 수술 시뮬레이션에서 부가적으로 필요한 효과

수술 시뮬레이션을 할 때 필수적으로 표현되어야 하는 효과로 절개(cutting)와 출혈(bleeding)을 들 수 있다. 수술에는 기본적으로 절단의 개념이 들어간다. 현재 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 열림효과를 사실적으로 표현하기 위해서는 물질의 성질 등이 잘 반영 되어야 하는데 이를 실시간으로 처리하는 따르는 문제도 있다. 현재 사용되고 있는 방법으로 가장 간단한 방법은 잘려져 나간 부분의 구성요소, 예를 들어 복셀 또는 다각형의 일부를 제거하는 것으로 빠르게 처리할 수는 있지만, 결과가 사실적이지 않고 자르는 부위가 정확하지 않기 때문에

이를 보완하는 방법들에 대한 연구에 초점이 맞추어지고 있다. 특히 메시로 이루어진 물체의 경우에는 잘려나감으로 해서 새롭게 생성된 면을 다각형으로 다시 채우는 알고리즘이 개발되고 있는데 아직까지는 다각형 수의 불필요한 증대와 비균형 모양의 다각형 생성 등이 문제가 되고 있다. 따라서 새롭게 생성되는 구성요소의 최소화와 균형적인 구성요소 생성에 대한 연구가 이루어지고 있다.

출혈 역시 수술에서 피할 수 없는 부분이라고 볼 수 있다. 출혈의 효과는 뿜어대듯이 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, 입자시스템(Particle System)도 활용되고 있고, 또한 텍스처 매핑(Texture

Mapping) 효과도 이용하여 사실적이면서 실시간으로 구현하는 것을 목표로 연구되고 있다. 출혈과 연결하여 빼놓을 수 없는 부분이 지혈인데 현재 지혈효과와 지혈 결과 표현에 대한 연구는 아직 그리 활발하지는 않다. 지혈을 위하여 수술에서 많이 사용되는 것이 전기나 열을 이용하는 방법인데 이때 발생하는 연기나 증기의 효과도 실시간에 표현될 수 있어야 한다. 근래에 많은 발전을 한 컴퓨터 그래픽 기술로 인하여 사실적인 자연현상 렌더링이 실시간에 가능해지면서 특수효과를 수술 시뮬레이션에도 활용할 수 있을 것으로 기대한다. 수술 시뮬레이션에 필요한 효과들의 사실적인 구현은 어떤 모델을 이용하여 물체들을 표현하고 있는지와 직결되어 있다. 따라서 현재 제안된 모델화 기법들의 장단점을 상호 보완할 수 있는 새로운 모델화 기법의 연구가 필요하다.

기계용어해설

선회실속(Rotating Stall)

압축기 블레이드에서 발생한 박리가 익렬을 따라서 원주방향으로 진행되는 현상이다.

허브코너실속(Hub Corner Stall)

블레이드 흡입면과 허브 사이에서 발생하는 박리 현상으로 압축기 익렬에서 빈번히 관찰된다.

스태틱 믹서(Static Mixer)

유체가 관 내에 고정된 엘리먼트를 통과할 때 연속적으로 분할(splitting), 연신(stretching), 방향전환(directional change), 결합(combining), 재분할(re-splitting) 등의 작용으로 유체를 혼합시키는 장치로 유체의 연속 혼합조작에 사용된다.