

의료 시술 시뮬레이션을 위한 변형 모델링 및 햅틱 인터페이스

임아영* · 박주영** · 이선민* · 최유주* · 남상아* · 김명희**

Deformable Modeling and a Haptic Interface for Medical Image Simulation

Ah-Young Lim · Joo-Young Park · Seon-Min Rhee · Yoo-Joo Choi · Sang-Ah Nam · Myoung-Hee Kim

요약

본 연구는 이산 사건 시스템 형식론(DEVS: Discrete Event System Specification)을 이용한 가상전장 모델링 및 시뮬레이션 방법론을 제안한다. 기존 군체계에 관련된 모델링 기술은 물리적 모델링, 비주얼 모델링, 또는 개념적 모델링 등 개별 기능중심의 단편적 플랫폼 모델링에 그치고 있으며, 무기체계 분석 시뮬레이션도 개별 단위체 중심으로 평가되어져서, 다양하고 종합적인 그리고 상호운영성과 재사용성 등을 고려한 통합 모델링 및 시뮬레이션 환경을 제공하지 못하는 단점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 개별 전투병력에서부터 첨단 무기체계에 이르는 다양한 전장 요소들을 계층 구조적으로 통합함으로써 전장에서 발생할 수 있는 개별 전투병력의 미시적 행동 특성뿐 아니라 분대/중대/대대/사단급 단위의 거시적 전략/전술에 대한 묘사까지도 가능한 가상전장 모델링 및 시뮬레이션 환경을 제안한다. 제안된 방법론은 분대 단위의 가상전장 환경에 대한 사례연구를 통해 검증하였으며, 향후 연구로는 대단위 가상전장에 대한 묘사를 위한 HLA 분산 시뮬레이션 기술의 적용에 대한 연구가 필요할 것이다.

1. 서론

의사들이 숙련된 의료 시술을 제공하기 위해서는 많은 반복적인 훈련이 필요하지만, 실제 환자들을 대상으로 할 수 있는 훈련 기회는 매우 제한적이다. 반면, 컴퓨터 상에서 가상의 인체 모델을 대상으로 하는 시술 시뮬레이션은 의사들이 의료 시술 과정을 경제적인 방법으로 반복 훈련할 수 있게 하는 효과적인 수단을 제공한다. 기존 의료 시술 시뮬레이션 시스템은 대부분

해부학적 구조의 기하학적인 표현을 바탕으로 한 인체 내부 기관의 3차원적 가시화 및 네비게이션을 제공하였다[1,2]. 그러나, 보다 효과적인 시술 시뮬레이션을 위해서는 시술 과정을 시각적으로 현실감 있게 가시화 할 뿐 아니라 시술자와 가상의 인체 모델간에 상호작용(interaction)이 요구된다. 시술 시에 주로 일어나는 상호작용은 시술 도구와 인체 기관간의 접촉과 이에 대한 인체 기관의 즉각적인 반응이다. 인체 대부분의 기관은 비강체(non-rigid object)이기 때문에 시

+ 본 연구는 한국과학재단 가상현실연구센터 지원사업, 정보통신부 대학정보통신연구센터(ITRC) 지원사업, 과학기술부 국가지정연구실(NRL) 사업에 의해 부분적으로 지원 받았습니다

* 이화여자대학교 컴퓨터학과

** 이화여자대학교 컴퓨터그래픽스 및 가상현실 연구센터

술 도구와의 접촉에 의해서 그 형태가 변형될 수 있다. 따라서, 시술 과정의 상호작용을 현실감 있게 표현하기 위해서는 접촉감을 느낄 수 있게 하는 장비의 도입과 변형 가능한 인체 기관의 물리적 모델링이 필요하다.

본 연구에서는 연체 조직과 같이 변형 가능한 인체 기관의 시술 동작에서 사용자에게 물리적인 접촉에 대한 force feedback과 인체 기관의 반응에 대한 visual feedback을 동시에 제공하는 시술 시뮬레이션의 프로토타입 시스템을 구축하였다. 물리적인 force feedback을 위해서는 사용자에게 촉감을 제공하고 그것과 상호 작용하는 시뮬레이트된 객체의 움직임을 느낄 수 있도록 하는 햅틱 인터페이스를 사용하였고, visual feedback을 위해서는 매스-스프링 모델(mass-spring model)을 사용하여 인체 기관의 물리적 변형을 인터랙티브하게 가시화하였다.

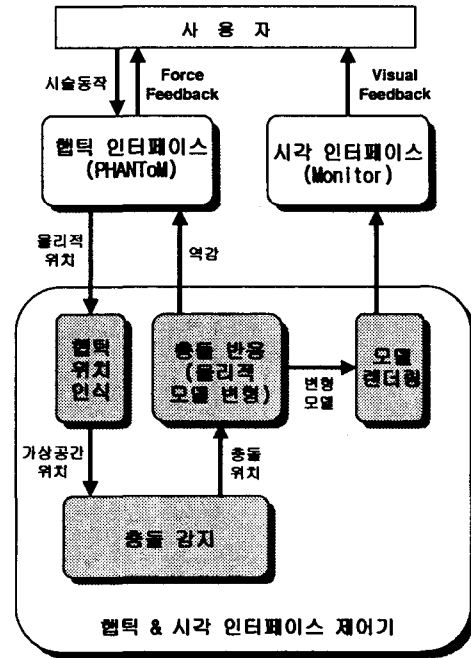


그림 1. force feedback 및 visual feedback을 가진 의료 시술 시뮬레이션 시스템

2. 시스템 개요

본 연구에서 구현한 시스템은 그림 1에서와 같이 햅틱 인터페이스와 시각 인터페이스 및 인터페이스 제어기로 구성된다.

햅틱 인터페이스는 물리적 장비를 사용하여 인간의 촉감을 시뮬레이션하기 위한 도구로, 사용자에게 의한 햅틱 장비의 움직임을 추적하고 사용자에게 그 force feedback을 전달한다[3]. 햅틱 인터페이스는 컴퓨터가 사용자에게 단방향으로 제공하는 visual feedback과 달리 컴퓨터와 사용자간의 양방향으로 에너지를 전달함으로써 가상 환경에 실제감을 개선할 수 있게 한다[4]. 햅틱 & 시각 인터페이스 제어기는 사용자의 동작이 일어날 때 가상 공간상에 있는 햅틱 장비의 위치를 인식하여 햅틱 장비와 가상 인체 모델 간의 충돌 여부를 결정한다. 그리고, 충돌이 일어났을 경우 가상의 인체 모델 상에 충돌된 위치를 판별하여 충돌에 따른 인체 기관의 반응을 물리적 변형 모델로 표현하고 이에 대한 사용자의 역감을 계산한다. 변형된 모델의 기하학

적 구조는 렌더링된 후 시각 인터페이스에 의해서 사용자에게 visual feedback을 제공한다. 충돌 감지 및 물리적 모델 변형에 대해서는 3장과 4장에서 상세히 기술한다.

3. 충돌 감지

시술 시뮬레이션의 상호 작용은 햅틱 장비의 말단점이 가상 인체 모델과 충돌할 때 일어난다. 따라서, 햅틱 장비의 말단점 위치가 변할 때마다 가상 인체 모델과의 충돌 여부를 감지해야 한다. 본 연구에서는 삼각 메쉬로 구성된 표면 모델을 사용하므로, 인체 모델을 형성하는 모든 삼각 메쉬와 현재 햅틱 말단점과의 충돌 여부를 검사해야 한다. 그러나, 실제 햅틱 말단점으로부터 멀리 위치한 삼각 메쉬는 충돌할 가능성이 없으므로 검사 대상에서 제외시킬 수 있다.

본 연구에서는 충돌 감지를 위한 계산 시간 단축을 위해, 인체 모델을 포함하는 경계 박스

(bounding box)를 설정하고 경계 박스 안의 가상 공간을 16개의 영역으로 분할한다. 경계 박스는 x,y,z축 방향으로 인체 모델을 포함하는 최소 공간이다. 그림 2는 가상의 모델을 둘러싼 경계 박스와 이에 대한 공간 분할 예를 보여준다. 실제 햅틱 장비와 가상 모델의 충돌 검사는 현재 햅틱 장비의 말단점이 16개의 분할된 영역 중 어느 위치에 있는지 검사하여, 해당 영역에 포함된 삼각 메쉬에 대해서만 수행한다.

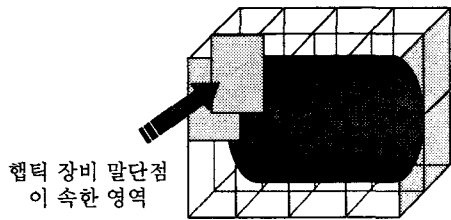


그림 2. 경계 박스의 공간 분할

햅틱 장비의 말단점과 한 삼각 메쉬와의 충돌 감지를 위해서는 먼저 햅틱 장비의 말단점이 삼각 메쉬를 구성하는 세 노드들과 같은 평면상에 존재하는지를 검사하고, 같은 평면상에 존재할 경우 햅틱 장비의 말단점이 해당 평면상에서 삼각 메쉬 안에 포함되는지를 판별해야 한다.

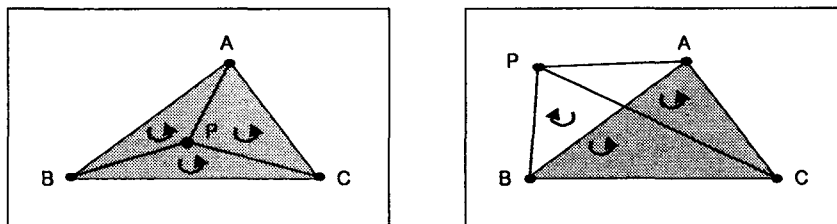
삼각 메쉬의 수직 벡터(normal vector)가 $\vec{n}=(a, b, c)$ 이고, 삼각 메쉬를 이루는 세 점 중 한 점이 (x_1, y_1, z_1) , 햅틱 장비의 말단점이 (x_p, y_p, z_p) 일 때, 다음 수식을 만족하면 햅틱 장비의 말단점이 삼각 메쉬와 같은 평면상에 존재한다.

$$a(x_1 - x_p) + b(y_1 - y_p) + c(z_1 - z_p) = 0 \quad (1)$$

햅틱 장비의 말단점이 삼각 메쉬와 같은 평면상에 존재하더라도 삼각 메쉬를 포함하는 평면은 무한하기 때문에, 삼각 메쉬 내부에 포함되는지 또는 외부에 위치하는지를 검사해야 한다. 햅틱 장비의 말단점이 P 이고 삼각 메쉬 $\triangle ABC$ 의 세 꼭지점이 A, B, C 라 할 때, 점 P 와 각 꼭지점 A, B, C 을 연결한 삼각형 $\triangle PAB, \triangle PBC, \triangle PCA$ 의 수직 벡터를 구한다. 햅틱 장비의 말단점 P 가 삼각 메쉬 $\triangle ABC$ 의 내부에 포함된다면 세 수직 벡터의 방향은 모두 같고, $\triangle ABC$ 의 외부에 위치한다면 세 수직 벡터의 방향은 모두 같지 않다. 그림 3(a)는 점 P 가 삼각 메쉬 $\triangle ABC$ 의 내부에 포함된 경우이고, 그림 3(b)는 P 가 $\triangle ABC$ 의 외부에 위치한 경우이다. 그림 3(b)에서 삼각형 $\triangle PAB$ 의 수직 벡터는 $\triangle PBC$ 와 $\triangle PCA$ 의 수직 벡터와 반대 방향을 갖는다.

4. 변형 모델링

물리적으로 변형 가능한 객체를 모델링 하는 방법은 대개 매스-스프링 모델과 유한 요소 모델(finite element model), 두 범주로 분류될 수 있다. 매스-스프링 모델은 스프링과 같이 신축성 있는 링크로 연결된 노드들의 집합으로, 구현이 용이하고 계산 속도가 비교적 빠르기 때문에 실시간 시뮬레이션을 허용한다. 유한 요소 모델은 초기 객체가 차지하는 영역을 작은 단위 요



(a)

(b)

그림 3. 햅틱 말단점(P)이 삼각 메쉬 내부(a) 및 외부(b)에 위치하는 경우

소로 분해하고 이 영역 내에서 각 점들의 변위를 표현하기 위해 벡터 필드를 계산한다. 유한 요소 모델은 매스-스프링 모델 보다 정교한 시뮬레이션을 가능하게 하지만, 복잡한 계산량 때문에 실시간 시뮬레이션이 불가능한 단점이 있다[5].

의료 시술 훈련을 위해서는 특정 환자 대상의 정교한 시뮬레이션 결과를 제공하기 보다 시술 과정에서 일어나는 가시적이고 촉각적인 상호작용을 직관적으로 제공해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 매스-스프링 모델을 사용하여 물리적 객체의 변형을 모델링한다.

변형 객체의 기하학적 구조는 신축성있는 링크로 연결된 N 개의 노드와 M 개의 삼각 메쉬들로 구성되고, 객체의 변형은 노드들의 위치 변위로 묘사된다. 시술 장비와 같은 강체(rigid object)가 변형 객체의 노드들과 충돌할 경우 충돌한 노드들은 외부의 충격력에 의해 이동하게 되고, 그 노드들의 이동은 다시 연결된 링크를 통해 주변 노드들에 영향을 주어 이차적인 노드들의 이동을 유발한다. 충돌 지점에 작용하는 힘은 충돌 지점의 이동에 대한 역변환으로 구할 수 있다.

충돌된 노드 p_i 에서 작용하는 힘 $\vec{F}(p_i)$ 은 링크 길이 변화에 따른 내력(internal force)과 충돌력(colliding force) 및 감쇠력(damping force)의 합으로 계산된다[6].

$$\vec{F}(p_i) = \vec{f}_{int}(p_i) + \vec{f}_{col}(p_i) + \vec{f}_{damp}(p_i) \quad (2)$$

각 노드에서의 내력은 다음과 같이 계산된다.

$$\vec{f}_{int}(p_i) = - \sum_{(i,j) \in R} k_{ij} \left[\vec{l}_{ij} - \vec{l}_{ij}^0 \frac{\vec{l}_{ij}}{\|\vec{l}_{ij}\|} \right] \quad (3)$$

R 은 노드 p_i 와 연결된 모든 인접 노드들과의 링크를 나타낸다. \vec{l}_{ij} 는 노드 p_i 와 p_j 사이의 현재 링크 길이이고, \vec{l}_{ij}^0 는 \vec{l}_{ij} 의 평형상태 길이,

k_{ij} 는 링크의 stiffness 상수를 의미한다. 감쇠력은 시스템으로부터 에너지를 소모시켜서 노드들의 이동 속도를 감쇠시키는 힘으로, 속도에 비례하며 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{f}_{damp}(p_i) = -c_{damp} \vec{v}_i \quad (4)$$

c_{damp} 는 감쇠 상수이며, v_i 는 노드 p_i 의 이동 속도이다.

따라서, 충돌력은 식 (3)와 식 (4)을 식 (2)에 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{f}_{collide}(p_i) = \sum_{(i,j) \in R} k_{ij} \left[\vec{l}_{ij} - \vec{l}_{ij} \frac{\vec{l}_{ij}}{\|\vec{l}_{ij}\|} \right] + c_{damp} \vec{v}_i \quad (5)$$

계산된 충돌력은 모델 노드의 변형을 일으키고 햅틱 인터페이스에 전달되어 사용자에게 역감을 제공한다.

5. 구현 환경 및 실험 결과

본 시스템은 펜티엄 PC와 Windows NT 상에서 구현하였고, 햅틱 인터페이스는 SensAble Technologies에서 개발한 The PHANTOM 1.5를 사용하였다(그림 4). 이 PHANTOM 시스템은 7.5×10.5×15 인치의 3차원 작업 공간과 x, y, z 방향의 3 degrees of freedom을 갖는 force feedback 환경을 제공한다. PHANTOM 시스템

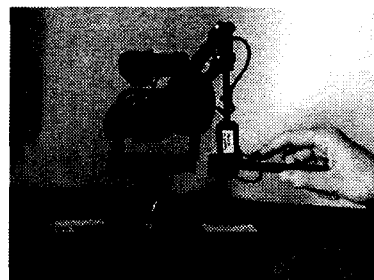
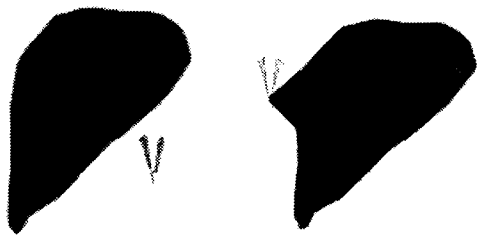


그림 4. 햅틱 인터페이스 (PHANTOM)

은 수동적인 3 degrees of freedom을 갖는 gimbals에 부착된 thimble을 통해서 사용자에게 point-force 인터랙션을 제공하며, thimble은 스타일러스(stylus)로 대체하여 사용할 수 있다[7]. 본 연구에서는 핀셋, 칼 등 시술 도구와 유사한 형태를 가진 스타일러스를 부착하여 사용하였다. 시각 인터페이스는 펜티엄 PC상에 부착된 일반 모니터를 사용하였다.

햅틱 & 시각 인터페이스 제어기는 OpenGL, C++ 및 GHOST 라이브러리를 사용하여 구현하였다. GHOST는 SensAble Technologies에서 PHANTOM 햅틱 인터페이스를 위하여 개발한 라이브러리로[8], 햅틱 점과 가상 환경의 객체 사이에 상호 작용하는 힘을 시뮬레이션하기 위한 툴킷을 제공한다.

구현한 시스템을 사용하여 인체 내 간에 대한 간단한 시술 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 간은 연체 조직으로 이루어져 간단한 시술 동작 시에도 물리적 변형이 일어날 수 있는 기관이다. 그림 5는 간 모델에 대해 햅틱 장비를 사용하여 핀셋을 이용한 당김 동작을 시뮬레이션한 결과이다.



(a) 모델 변형 전 (b) 모델 변형 후

그림 5. 간 모델의 당김 동작 시뮬레이션

6. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 현실감 있는 의료 시술 시뮬레이션을 위해서 사용자에게 촉각적인 상호작용과 시각적인 상호작용을 동시에 제공하는 프로토타입 시스템을 구현하였다. 구현한 시스템에서는

시술 동작에 대한 실제적인 촉각 및 역감을 제공하기 위해서 PHANTOM 햅틱 인터페이스를 사용하였고, 시술 동작에 대한 가상 인체 모델의 물리적 반응을 직관적으로 가시화하기 위해서 매스-스프링 모델을 사용하였다.

본 연구에서는 visual feedback을 위한 인터페이스로 모니터를 사용했기 때문에, 시술자는 햅틱 장비를 조작할 때 햅틱 장비의 위치와 떨어져 있는 정면에 위치한 모니터를 보면서 시술 동작을 수행해야 한다. 이것은 시술 대상과 시술 동작을 수행하는 손의 움직임을 동시에 보면서 작업을 하는 실제 시술 상황과는 차이가 있어서 제한적인 현실감만을 제공한다. 향후 연구에서는 실제 의료 시술 상황과 유사한 환경을 제공하기 위해서 모니터 아래쪽에 놓인 반투명 유리에 화면을 투영시키고 햅틱 장비를 반투명 유리의 아래쪽에 위치시켜서, 수평으로 놓인 유리 상에 투영된 가상 객체를 직접 내려다보면서 시술을 수행할 수 있는 가시적 인터페이스를 적용할 예정이다. 또한, 본 연구에서는 시술 도구 및 동작을 핀셋 하나를 이용한 누름, 당김으로 제한하여 기본적인 시술 시뮬레이션만을 제공하였다. 향후 연구에서는 바늘, 칼 등을 이용한 봉합 및 절개 동작을 위한 시술 시뮬레이션을 추가할 예정이다.

참고문헌

- 1) Herve Delingette, "Toward Realistic Soft-Tissue Modeling in Medical Simulation", *Proceedings of the IEEE*, Vol.86, No.3, March 1998
- 2) R. Satava, "Medical virtual reality: The current status of the future", *4th Conf. Medicine Meets Virtual Reality(MMVR IV)*, San Diego, CA, 1996, pp.100-106
- 3) Farida Vahora, Bharti Temkin, "Development of Real-Time Virtual Reality Haptic Application: Real-Time Issues",

- Proceedings of the 12th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems*, 2000
- 4) Grigore C. Burdea, "Haptics Issues in Virtual Environment", *Proceedings of the Computer Graphics International*, 2000
- 5) J. Brown, S. Sorkin, C. Bruyns, et al., "Real-Time simulation of deformable objects: Tools and application", *Computer Animation*, Seoul Korea, Nov. 2001
- 6) Sang-Ah Nam, Myoung-Hee Kim, "Simulation of volumetric object deformation using mass-damper-spring system", *Technical Report 2001-56, Virtual Reality Research Center*, 한국과학재단
- 7) SensAble Technologies, "PHANTOM Master User's Manual", Cambridge MA, 1994
- 8) SensAble Technologies, "GHOST SDK Programmer's Guidel", Cambridge MA, 1998