

# 인터랙티브 햅틱 변형 및 재질감 모델링 알고리즘

## Interactive Haptic Deformation and Material Property Modeling Algorithm

이범찬, Beom-Chan Lee\*, 김종필, Jong-Phil Kim\*, 박혜신 Hyeshin Park\*, 류제하, Jeha Ryu\*

\*광주과학기술원 정보기전공학부 인간-기계-컴퓨터 인터페이스 연구실,

**요약** 본 논문은 3차원 스캐너로 획득된 실제 얼굴 데이터를 햅틱 상호작용을 통해 직접 변형하고 재질감을 모델링 하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 그래픽 하드웨어 기반의 햅틱 렌더링 알고리즘을 기반으로 획득된 2.5D 얼굴 데이터를 mass-spring 모델을 적용하여 변형하고 얼굴의 재질감(탄성, 마찰, 거칠기) 정보를 모델링 하는 것이다. 햅틱 장치를 이용한 변형알고리즘은 변형 시 효율적인 변형 영역 탐색을 위하여 공간 분할방법인 k-d 트리 구조를 이용하여 최근방 탐색 알고리즘을 구현하였으며, 사실적인 힘 계산을 위하여 각 포인트 마다 mass-spring 모델을 적용하여 반력 연산 및 물체의 변형을 수행하였다. 아울러 재질감을 모델링 하기 위해 깊이 이미지 기반 표현(Depth Image Based Representation, DIBR)을 이용하여 가상 물체의 거칠기, 탄성, 및 마찰을 편집할 수 있는 방법론을 제시하고, 편집된 재질감을 직접 물체의 표면에 적용하여 렌더링 하는 알고리즘을 제안한다.

**핵심어:** Haptic rendering, Haptic Deformation, Haptic Material Property Modeling

### 1. 서론

햅틱(Haptic) 감각은 손을 사용하여 느끼는 모든 지각을 의미하는 용어로 정의되어 사용되었으나, 최근 인체의 모든 촉감 기관을 사용하여 느끼는 지각으로 의미가 넓혀지고 있다. 햅틱 렌더링은 사용자에게 가상 혹은 증강된 환경의 다양한 객체의 정보를 역/촉감을 통해 제공해주는 일련의 계산 과정을 의미한다. 햅틱 상호작용의 가장 큰 장점은 양방향 에너지 흐름이 발생하는 것으로 사용자가 햅틱 장비를 통해 위치를 입력으로 제공하는 동시에 출력을 힘으로 제시 받을 수 있다는 것이다[1]. 따라서 햅틱 인터페이스를 통해 제시 되는 역/촉감 정보는 다양한 환경을 실감 있게 인지하도록 도와주며, 사용자의 몰입감을 증가시켜 환경내의 객체들을 효과적으로 느끼고 조작할 수 있도록 도와준다[1]. 햅틱스에 관한 연구는 역감 또는 촉감 정보를 효율적으로 표현하는 연구를 중심으로 발전해왔으며, 그래픽 렌더링과 함께 의료, 군사, 산업, 교육 및 게임 등에 접목되어 발전해왔다.

햅틱 장치를 이용한 가상 환경과의 상호작용은 간단한 물체뿐 아니라 사용자가 능동적으로 물체를 조작하고 생성해낼 수 있는 변형 모델링에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이런 연구 결과는 주로 3차원 카툰 모델링, 가상 조립 및 가상 의료 수술 등에 접목되어 활발하게 발전이 되어왔다. 또한 가상 물체의 형상 정보를 표현하는 것을 넘어 재질감 즉, 거칠기, 탄성, 마찰 등을 모델링 함으로써 보다 사실적으로 가상 물체를 표현해내기 위한 연구들이 진행되어 왔다.

최근 3차원 스캐너, Z-cam(깊이 정보획득), 스테레오카메

라 등을 통하여 물체의 형상, 색상 데이터를 정확하고 양질로 획득할 수 있게 됨에 따라 가상으로 모델링 된 물체 또는 환경을 시각/촉감으로 재현하는 기술의 한계를 극복하여 보다 사실적으로 표현할 수 있게 되었다. 일반적으로 3차원 데이터를 획득하게 되면 많은 양의 정보(형상, 색상)를 포함하고 있다. 따라서 획득된 많은 양의 정보를 효율적으로 햅틱 상호작용을 할 수 있는 방법론이 제시되어야 할 것이다.

본 논문에서는 3차원 스캐너로 획득된 얼굴 데이터를 햅틱 장치를 이용하여 변형하고 얼굴의 재질감을 모델링 하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 방대한 양의 데이터를 햅틱 상호작용에 이용할 때 가장 큰 문제점은 빠르고 효율적으로 햅틱 상호작용이 가능해야 한다는 것이다. 전통적인 햅틱 렌더링 알고리즘의 경우 빠른 충돌검출과 반력 계산을 위해 미리 계산된 계층적 데이터구조를 사용하기 때문에 햅틱 렌더링(충돌 검출 및 반력 계산)을 위한 데이터구조 탐색 시간이 물체의 복잡도에 따라 증가하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 미리 계산된 계층적 데이터구조를 사용하지 않고 실시간으로 햅틱 장치를 통하여 물체의 형상을 느끼는 렌더링 알고리즘을 및 mass-spring 모델을 이용한 변형하는 알고리즘을 제시한다. 또한 기존에 제시되었던 데이터 구조에 직접 재질감을 모델링 하는 방법론과 달리 깊이 이미지 기반의 표현(Depth Image Based Representation, DIBR)의 방법론을 제시함으로써 빠르고 효율적으로 재질감을 모델링 할 수 있는 알고리즘을 제안하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2 장에서는 햅틱 변형 및 재질감 모델링에 대한 관련 연구 동향을 설명하고, 본

논문에서 제시하는 알고리즘 및 시스템 개요를 3장에 언급하고, 4장에서는 햅틱 변형 및 재질감 모델링 알고리즘에 대해 자세히 기술한다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 효용성을 5장에서 검증하고, 마지막으로 본 논문의 결론 및 향후 연구 계획을 6장에 기술하였다.

## 2. 관련 연구 동향

### 2.1 변형 물체에 대한 햅틱 렌더링

다양한 햅틱 렌더링 알고리즘 가운데 형태기반 햅틱 렌더링 알고리즘(geometry dependent haptic rendering algorithm [1])은 객체의 기하학적 정보를 사용자에게 역감을 통해 제공하는 알고리즘으로 충돌검출과 반력계산 등의 과정을 포함하며, 객체의 형태를 기술하는 방법에 따라 크게 surface 기반 방법[2-9]과 volume 기반 방법[10, 11]으로 분류될 수 있다. 전자는 triangular mesh, polygon, implicit surface 등으로 표현된 surface data를 사용하며, 후자는 voxel 등으로 표현된 volume data를 사용한다.

최근 컴퓨터 그래픽스의 비약적인 발전에 따라 대용량 데이터를 시각화(graphic rendering)할 수 있게 됨에 따라 보다 사실적으로 가상 환경을 사용자에게 제시할 수 있게 되었다. 그러나 이러한 대용량 데이터를 기존의 햅틱 렌더링에 바로 적용하는 것이 불가능 하였다. 기존의 햅틱 렌더링 알고리즘의 경우 충돌 검출 및 반력 연산을 위해 미리 계산된 계층적 데이터 구조를 사용해야 한다. 예를 들어 surface기반 햅틱 렌더링의 경우 AABB(axis aligned bounding boxes) 또는 OBB(oriented bounding boxes) 등의 계층적 데이터 구조가 충돌 검출 및 반력 연산에 사용되며 이때 데이터 구조의 탐색 시간(searching time)이 비 효율적이므로 실시간으로 햅틱 상호작용을 제시할 수 없다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해 Proxy graph algorithm이 제안되었다 [12]. 이 알고리즘은 대용량 지형도(topology map)에 대한 햅틱 상호작용 알고리즘으로써 탐색 시간을 최적화 하였다. 또한 bi-linear patches를 사용함으로써 대용량 지형도 탐색을 최적화 하는 알고리즘이 제안되었으며 [13], 최근 Z-cam으로 획득된 대용량 데이터에 대해 효율적으로 햅틱 상호작용을 가능케 하는 알고리즘이 본 연구 팀에 의해 제안되었다 [14].

햅틱 장치를 이용하여 가상 물체의 형상을 느끼는 기존의 연구 외에 사용자가 물체를 생성하고 조작할 수 있는 햅틱 변형에 대한 연구가 진행되었다. 이러한 햅틱 변형 알고리즘은 변형되는 점들의 위치를 정확하게 계산하여 변형시켜줘야 하며 또한 각 점들의 상호 연결정보를 이용하여 사실적인 힘을 제시해줘야만 한다. 이러한 햅틱 변형은 크게 형상 기반(geometry-based) 및 물리학 기반(physics-based)의 알고리즘으로 나눌 수 있다. 형상 기반 변형 알고리즘의 경우 주로 햅틱 장치를 이용한 조각[20] 및 CAD[21, 22] 시스템 등에 적용이 되어 개발되어 왔으며, 물리 기반의 변형 알고리즘은 물체의 물리적 특성에 기반을 둔 mass-spring[23] 모델 또는 유한요소법(Finite Element Method)[24, 25]등을 이용한 변형 알고리즘 등이 제안 되었으며 햅틱 장치를 이용한 가상 환경과의 상호작용을 보다 사실화 할 수 있는데 기여하였다.

### 2.1 재질감 모델링

가상 물체의 형상 정보를 만지고 조작하는 것과 더불어 물체의 재질감을 편집할 수 있는 모델링은 햅틱 상호작용을 보다 사실적으로 가능하게 한다. 따라서 물체의 재질감(거칠기, 탄성, 마찰)을 물체의 형상 정보와 함께 적용할 수 있는 방법론이 제안되었다 [4, 7]. 또한 햅틱 장치를 이용하여 가상 물체의 색상 정보를 편집할 수 있는 3D painting 시스템이 제안되었다 [26, 27]. 그러나 기존의 재질감 모델링의 경우 물체의 형상 정보에 바로 편집하는 데 중점을 두었으며 물체를 표현하고 있는 표현 방식에 따라서 재질감 모델링 방법이 달라진다는 단점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 새로운 방법론인 깊이 이미지 기반의 표현(Depth Image Based Representation, DIBR)을 이용하여 가상 물체의 거칠기, 탄성, 마찰 등의 재질감을 실시간으로 모델링 하고자 한다.

## 3. 알고리즘 개요

제안된 알고리즘은 크게 두 부분으로 구성되었다. 3D 스캐너로 획득된 물체를 시각화 하는 그래픽 렌더링 알고리즘 부분과 촉각 상호작용을 위한 햅틱 렌더링 알고리즘으로 구성되어 있으며 각 루프는 독립적인 갱신 시간을 가지며 구동된다. 그림 1은 본 논문에서 제안하는 알고리즘 및 시스템 개념도를 나타낸다.

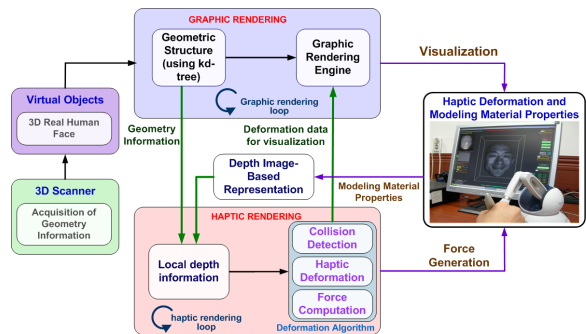


그림 1. 알고리즘 및 시스템 개념도

그래픽 렌더링 부분은 획득된 얼굴 데이터를 효율적으로 가시화 하기 위해 OpenGL의 확장 명령어인 Vertex Buffer Object(VBO)를 이용하여 물체의 기하 정보를 그래픽스 하드웨어 메모리에 탑재하고 그래픽스 하드웨어 자체에서 렌더링하는 기법을 채택하였다. 또한 햅틱 변형 시 변형되는 점들을 가시화를 위해 k-d 트리를 이용하여 각 포인트의 인접 포인트 정보를 저장하였다.

햅틱 렌더링 부분은 얼굴 데이터의 형상을 만지고 변형하는 것을 담당하고 있으며 충돌 검지는 그래픽스 하드웨어 기반의 국부 깊이 정보를 이용하며 반력 연산은 본 연구팀에서 제안하는 LOMI기반으로 한다. 또한 변형 시 발생하는 힘의 계산 및 변형되는 점들의 이동을 위해 mass-spring모델 기반의 변형 알고리즘이 존재 한다.

햅틱 변형과 더불어 가상 얼굴의 재질감(거칠기, 탄성, 마찰)을 햅틱 장치를 이용하여 DIBR 기반으로 모델링 하기 위해 재질감 정보를 저장하는 DIBR 버퍼를 지정하여 햅틱 상호작용 시 참조될 수 있도록 설계되었다.

#### 4. 햅틱 변형 및 재질감 모델링

본 장에서는 햅틱 변형 알고리즘에 중요 요소인 충돌 검출, 물체의 변형 및 변형에 상응하는 힘 계산 및 획득된 얼굴에 재질감을 모델링 하는 알고리즘에 대해 상세히 기술한다.

##### 4.1 충돌 검출 및 변형 알고리즘

충돌 검지는 사용자의 의해 움직이는 햅틱 인터랙션 포인트(Haptic Interaction Point)와 물체와의 충돌을 검출하는 과정이다. 햅틱 상호작용에서의 빠른 충돌 검지 및 반력 계산은 사용자에게 물체와의 상호작용 시 안정한 힘을 제공하기 위해 필수적이다. 따라서 빠른 충돌 검지를 하기 위해 최근 본 연구팀에서 제안한 그래픽 하드웨어를 이용한 충돌 검지 방법을 이용하였다 [15].

일반적으로 3자유도 햅틱 상호작용의 충돌 검출의 경우 물체의 일부분과 한 점과의 충돌을 검출 하게 되기 때문에 물체의 일부분의 형상이 필요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 한 점과 물체와의 충돌을 검출하기 위해 당한 그래픽스 하드웨어의 깊이 버퍼(depth buffer) 값을 참조하여 물체의 국부 형상을 획득한다. 가상 물체의 깊이 정보를 얻기 위하여 가상 카메라를 위치시키고 6면의 깊이 정보를 획득하는 것으로 시작된다. 이때 형상 정보와 관련 없는 color, texture, light 효과는 제거된다. 획득된 깊이 정보는 가상 카메라의 상대 위치 파라미터를 통해 객체의 6면에 대한 기하학적 정보로 변환이 되며 변환된 정보를 이용하여 HIP가 가상 물체의 내부에 위치하는 지를 판단하여 쉽게 충돌을 검사할 수 있다.

햅틱 장치를 이용한 변형과 같은 동적인 모델에 대해서 렌더링 시 가장 시간을 많이 차지 하는 부분은 변형되는 영역을 탐색하는 것이다. 이러한 탐색시간을 효율적으로 줄이기 위해 k-d 트리 알고리즘을 사용하였다. k-d 트리는 n 차원 공간상에 존재하는 유한개의 요소(점)들을 저장하는 자료 구조이다[29]. 이러한 k-d 트리는 이진 트리로 구성되어 있다. 그림 2는 2차원 평면에서의 k-d 트리 구조를 보여주고 있다.

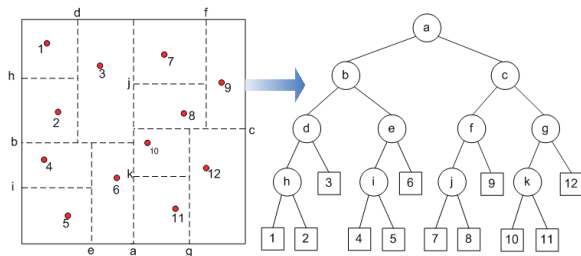


그림 2. 2차원 평면에서의 k-d 트리 구조

트리 구성 후, 자신으로부터 가장 가까운 점을 찾는 알고리즘인 최근방 탐색 알고리즘을 이용하여 충돌 검지로부터 얻어진 점으로부터 변형이 될 이동 점들을 찾아내는데 사용된다[29]. k-d 트리는 최근방 탐색 알고리즘을 적용하는데 효율적인 방법이다. 최근방 탐색 알고리즘을 간략히 설명하면, 그림 2에서 node 5에 대한 가장 가까운 node를 찾게 되

면, node 5의 부모 node는  $i$  node가 된다. 어떤 node이든지 자기 자신의 부모 node에서 파생되는 자식 node 즉 자신의 형제(sibling) node는 자신과 가까운 위치에 있는 node 중 하나가 된다. 그래서 node 4에 대한 고려가 필요하다. 또한, 각 node의 영역을 셀(cell)이라고 하면 node 5번에 인접한 셀인 node 6이 들어있는 셀에 대한 고려도 요구된다. node 4, 6을 제외한 나머지 node는 node 5와 인접하지 않고 다른 node는 node 4, 6을 지나야 다음 node가 나오기 때문에 node 4, 6보다 거리가 짧은 node는 존재하지 않게 된다. 따라서 더 이상 탐색이 필요치 않다. 위의 과정을 통해 최근방 탐색 알고리즘으로부터 각 점들에 대한 가장 가까운 점을 얻을 수 있다. 아울러 같은 형식으로 각 점들에 대한 그 점의 가장 가까운 점들의 집합을 얻을 수 있다. 이러한 배열은 충돌이 이루어졌을 시 변형이 될 영역 안의 점들의 일부가 된다. 이러한 배열을 입력으로 충돌이 되는 점을 탐색하고 그 점을 중심으로 힘 벡터를 계산을 통해 변형이 될 영역을 결정 짓는 변형 알고리즘이 적용이 된다.

충돌 검지를 통해서 얻어지는 점은 변형이 발생하는 영역의 중심점이 된다. 이러한 중심점은 그림 3에서 보여지는 시간  $t$ 에서의 충돌 점  $CP_t$ 이다. 변형이 될 영역은 충돌이 검출된 위치와 실제의 HIP 사이의 길이( $L_t$ )에 의해서 결정된다. 즉, 충돌이 검출된 점 주위의 점들 중에서  $L_t$ 보다 작은 영역의 점들이 변형이 될 영역에 속하게 되는 것이다. 그래서 길이( $L_t$ )가 커지면 변형이 크게 된다. 길이( $L_t$ )는 힘의 반력에 의해서 결정된다. 힘의 대한 계산은 다음 절에서 하도록 하겠다.

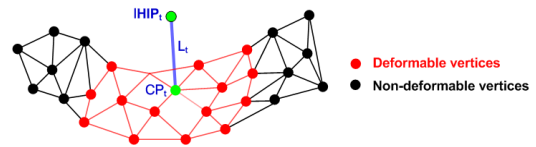


그림 3. 변형 영역 결정 및 변형 발생 점

##### 4.2 변형에 의한 힘 계산

햅틱 상호작용을 위한 중요한 과정 중 하나는 충돌에 상응하는 반력 계산 수행이다. 따라서 충돌이 검지되는 순간 반력 계산을 위한 과정이 매 햅틱 루프에서 이뤄지게 된다. 오브젝트(Object)와 점(Point)사이의 반력 계산을 위해 3차원 벡터 HIP와 IHIP가 정의가 되어야 한다. HIP는 충돌이 발생된 후에도 물체의 안으로 들어갈 수 있는 반면, IHIP는 물체의 표면 위에 항상 존재하는 것이다. 따라서 충돌 검지가 수행 되기 전 HIP와 IHIP는 같은 점으로 존재하지만, 충돌이 검출되는 순간 HIP와 IHIP는 분리가 되어 두 3차원 벡터 사이의 거리에 비례한 힘을 계산하게 된다. 충돌이 검출되는 순간 HIP와 IHIP의 분리 과정을 수행하기 위해 본 논문에서는 LOM(Local Occupancy Map Instance) 개념을 이용하였다[14, 15]. LOM은 충돌 검지에 이용되는 깊이 정보에 의해 실시간으로 생성되는 3차원 격자모양의 셀의 집합으로써, 각 셀은 가상 카메라로부터 획득되는 물체와의 깊이 값을 이용하여 물체의 내부, 표면, 외부 정보를 표현하고 있다. 이렇게 실시간으로 생성되는 LOM은 물체의 표면 위에 있는 IHIP를 중심으로 매 햅틱 루프에서 계산되어 움직이게 된다.

그림 4는 각 햅틱 렌더링에 따라 LOM이 생성 되고, IHIP를 찾아가 HIP와 IHIP사이의 거리에 비례하는 힘을 계산하

는 과정을 나타낸다. 충돌이 감지 되지 않는 순간 즉, 시간  $t$  이전의 HIP와 IHIP는 같은 점을 나타내며, 충돌이 감지되는 순간  $t$ 에서 물체의 표면 위에 위치하는 IHIP를 결정하기 위해 LOMI가 생성이 되며 LOMI의 표면을 나타내는 셀들 중 HIP와의 최소 거리를 갖는 점이 IHIP로 결정이 된다. 시간  $t+1$ 에서 앞의 과정을 반복하며, 결정된 HIP와 IHIP 사이의 3차원 벡터에 의해 힘의 방향과 크기가 결정이 된다. 위 과정은 햅틱 변형이 일어나지 않는 햅틱 상호작용 시 사용자에게 힘을 이용하여 물체의 형상 느낄 수 있도록 제공한다.

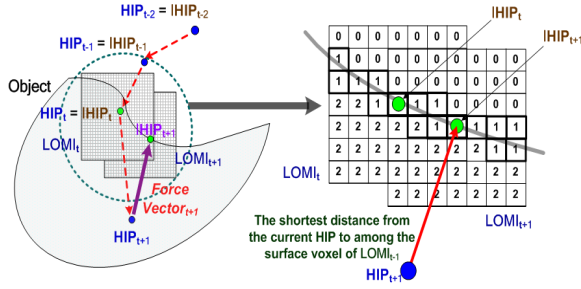


그림 4. LOMI를 이용한 반력 계산

햅틱 변형이 일어나는 상호작용 시에는, 가상 물체내의 변형이 발생하는 점을 찾는 과정을 수행하기 위해 변형 영역이 결정이 된다. 시간  $t+1$ 에서의 변형 영역은 이전에 계산된 힘의 크기를 반지름으로 갖는 반구에 의해 영역이 결정되며, 이때 영역 내 위치한 점들은 k-d 트리의 탐색 방법을 통해 변형 점으로 결정된다. 각 점은 mass 및 인근 점과 연결된 spring 계수를 갖고 있으며 변형은 mass-spring 모델에 의해 결정된다. mass-spring 모델은 수식 (1)의 2차원 차분 방정식에 의해 표현된다.

$$m_i \ddot{p}_i + d_i \dot{p}_i + \sum_j g_{ij} = F_i \quad (1)$$

여기서  $p_i$ 는 변형이 일어나는 3차원 공간상의 한 점을 나타내고  $d_i$ 는 댐핑 요소이며,  $F_i$ 는 외부에서 작용하는 힘을 나타낸다.  $g_{ij}$ 는 스프링의 탄성 계수  $k_{ij}$ 에 의해 정의되는 힘 벡터이며 수식(2)와 같이 표현된다. 여기서 각 점 사이의 인장 길이는  $l_{ij}$ 로 표현된다.

$$g_{ij} = \frac{1}{2} k_{ij} (l_{ij} - \|p_i - p_j\|) \frac{p_i - p_j}{\|p_i - p_j\|} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 기반으로 햅틱 변형 상호작용 시 사용자에게 제시되는 힘이 계산되며, 계산된 힘에 의해 각 점들의 이동 위치가 결정이 된다. 변형 힘의 계산 및 변형 점의 이동은 아래의 식 (3)에 의해 표현된다.

$$M\ddot{P} + D\dot{P} + KP = F \quad (3)$$

여기서  $M, D, K$ 는 3X3 mass, damping 및 stiffness 매트릭스를 나타내며,  $M$ 과  $D$ 는 대각행렬(diagonal matrices)이고  $K$ 는 각 3차원 점과 점 사이의 spring 힘을 담고 있는 매트릭스이다. 그림 5는 햅틱 변형 상호작용 시 mass-spring 모델에 의해 계산되는 힘을 나타낸다.

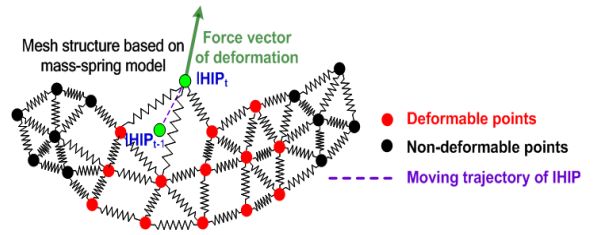


그림 5. mass-spring 모델 기반의 변형 힘 계산

## 4.2 재질감 모델링

실제 환경에서 손으로 물체를 만지는 상황에서 거칠기, 탄성, 마찰 등을 느끼지 못하는 경우는 거의 찾아볼 수 없다. 따라서 가상의 물체를 햅틱 장치로 느낄 때 이러한 재질감 정보의 추가는 보다 가상 물체를 사실적으로 느낄 수 있도록 도와준다. 본 논문에서는 가상 물체의 재질감을 모델링 하기 위해 앞서 언급 하였던 깊이 이미지 기반의 표현(Depth Image Based Representation, DIBR)을 이용하여 재질감을 편집할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

먼저 거칠기의 경우 정육면체, 구, 피라미드, 가우시안 함수 등의 기본적인 모양을 갖는 형상으로 구성될 수 있다. 물체의 일부분의 거칠기를 표현하기 위하여 물체의 크기만큼의 사이즈를 갖는 깊이 이미지를 생성하게 되고 기본적인 형상의 조합을 이용하여 물체의 거칠기를 모델링 하게 된다. 그림 6는 깊이 이미지 기반의 기본적인 형상 및 이를 이용하여 깊이 이미지를 편집한 것을 나타낸다.

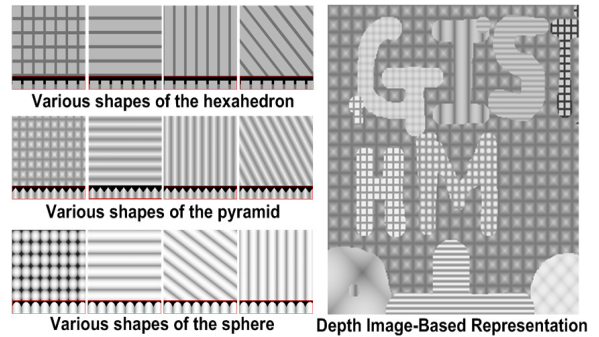


그림 6. 기본 형상 및 편집된 깊이 이미지

편집된 깊이 이미지는 충돌을 검출하는 과정에서 사용되는 국부 깊이 정보와 함께 충돌 검출에 이용되며, 반력 계산에 이용되는 LOMI의 갱신에 적용되어 사용자가 햅틱 상호작용 시 거칠기가 모델링 된 물체의 형상을 느낄 수 있도록 해준다.

가상물체의 탄성 계수의 모델링에 의한 힘의 계산은 수식 (4)에 의해 결정이 된다.

$$F = K(IHIP_t - HIP_t) \quad (4)$$

여기서  $K$ 는 모델링 된 탄성 계수를 나타내며 사용자가 UI(User Interface)를 이용하여 모델링 할 수 있다. 또한 힘  $F$ 는 햅틱 상호작용 시 사용자에게 전달되는 힘을 나타낸다.

탄성 계수와 더불어 마찰은 크게 정지마찰(static friction)과 운동마찰(dynamic friction)으로 나뉘어질 수 있다. 정지마찰은 정지한 상태에 있는 물체를 움직이려고 할 때 생기는 저항 즉, HIP가 물체에 닿은 후 초기 움직임에 대한 저항이다. 반면 운동마찰력은 움직이고 있는 물체에 작용하는 저항 즉, HIP가 물체의 표면을 움직이고 있을 때 발생하는 저항을 나타낸다.

정지 마찰력을 모델링 하기 위해 본 논문에서는 물체와 처음 충돌이 검출 되는 점(Sticky)을 정의하여 HIP와 Sticky 점 사이의 3차원 벡터 및 정지마찰 계수  $K_s$  의해 결정되는 힘( $F_s$ )을 정의 하였다. 정지마찰에 의한 힘 ( $F_s$ )는 수식 (5)와 같다.

$$F_s = K_s(IHIP_t - STICEY_t) \quad (5)$$

이때 Sticky점은 정지마찰계수의 한계를 넘으면 현재의 IHIP로 갱신되기 때문에 사용자는 더 이상의 정지마찰력에 의한 힘을 느낄 수 없게 된다. 운동마찰력은 viscous 마찰 모델을 근거하여 수식 (6)로 표현된다.

$$F_d = K_d(IHIP_t - IHIP_{t-1})/T \quad (6)$$

여기서  $K_d$ 는 운동 마찰계수를 나타내며 운동 마찰의 힘 ( $F_d$ )은 운동 마찰계수와 현재 IHIP 위치와 바로 전 햅틱 루프에서 계산된 IHIP의 3차원 벡터에 및 햅틱 루프의 갱신 시간  $T$ 에 의해 결정이 된다. 또한 탄성과 같이 정지 및 운동 마찰계수는 사용자에게 의해 모델링 되어 DIBR 버퍼에 저장되어 사용자가 햅틱 상호작용 시 탄성 및 마찰에 대한 힘을 느낄 수 있도록 한다.

## 5. 구현 및 실험 결과

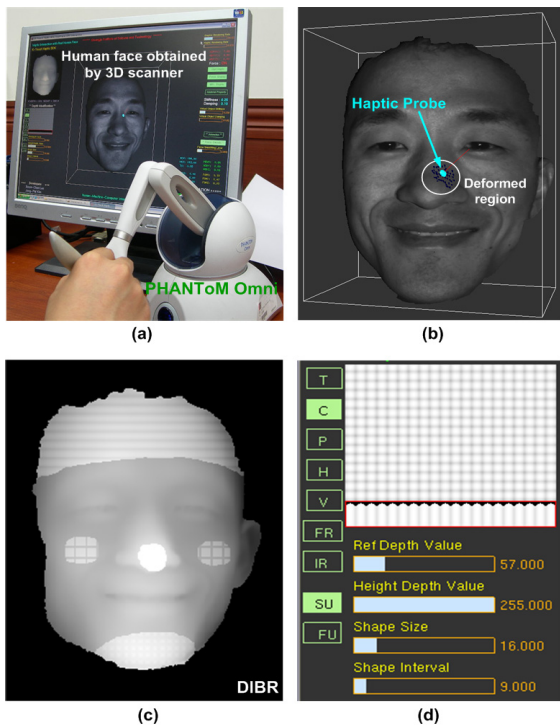


그림 7. 제안된 알고리즘의 구현 및 결과

본 햅틱 시스템은 PHANTOM Omni haptic interface [31] 사용하였고, 펜티엄 3.2GHz CPU, 1G RAM, GeForce 6600그래픽 카드 사양의 컴퓨터에서 구동되었다. 본 시스템은 다중 스레드 방식을 통하여 구현되었으며 햅틱 렌더링 루프가 그래픽 렌더링 루프보다 높은 우선순위를 갖는다.

그림 7은 제안된 알고리즘의 구현 결과를 나타낸다. 그림 7(a)는 3차원 스캐너로 획득된 얼굴을 PHANTOM Omni 햅틱 장치를 이용하여 햅틱 변형 및 재질감을 모델링 하는 것으로 획득된 얼굴은 Geometricinformatics사에서 제공된 것이다[32]. 그림 7(b)는 햅틱 변형 알고리즘에 의해 변형되는 모습을 나타낸 것으로 하늘색 점은 IHIP위치를 나타내며 변형 영역은 흰색 원으로 표현 되었으며 변형 영역 내의 검은 점들은 변형이 진행되는 각 점의 위치를 나타낸다. 그림 7(c)는 DIBR에 근거한 얼굴의 재질감을 모델링 한 결과를 나타내며, 7(d)는 사용자가 여러 가지 기본 형상의 조합으로 얼굴 표면에 거칠기를 모델링 할 수 있는 UI(user interface)를 나타내고 있다. 또한 사용자는 7(a)의 우측에 있는 UI를 통하여 획득된 얼굴 표면의 탄성, 정지 마찰력, 운동 마찰력 등을 국부적으로 모델링 할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 햅틱 변형 알고리즘의 효율성을 검증하기 위해 햅틱 및 그래픽 렌더링 시간을 측정하였다. 일반적으로 햅틱은 1KHz 이상, 그래픽은 30Hz 이상의 update rate 가져야 사용자에게 시각/촉각적으로 안정한 제시를 할 수 있다. 측정을 위하여 획득된 모델의 삼각메쉬(triangle mesh)의 수를 변경 하며 측정하였으며 각 측정 값은 500개의 시간 측정 샘플을 20번을 수행한 후 평균을 낸 값이다. 표 1은 그래픽 및 햅틱 루프의 update rate의 측정 결과를 나타낸다.

표 1. 그래픽 및 햅틱 렌더링 루프 update rate 측정 결과

가상물체의 메쉬 수	그래픽 렌더링 시간	햅틱 렌더링 시간
12,246	61.25 Hz	4.01 KHz
102,180	60.89 Hz	3.85 KHz
262,870	31.23 Hz	3.92 KHz

표 1에 나타난 결과에서 알 수 있듯 제안된 알고리즘의 햅틱 렌더링 시간은 물체의 복잡도(삼각메쉬의 수)에 독립적으로 update rate가 일정한 반면 그래픽 렌더링 시간은 물체의 복잡도가 증가함에 따라 렌더링 효율이 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 그래픽 렌더링의 경우 삼각메쉬 기반의 렌더링 기법을 이용하였기 때문에 OpenGL 확장의 vertex buffer object(VOB) 기반으로 그래픽 렌더링을 하였음에도 불구하고 물체의 복잡도에 비례하여 렌더링 효율이 떨어진다.

## 6. 결론 및 향후 연구 계획

본 논문에서는 3차원 스캐너로 획득된 대용량 데이터에 대해 실시간으로 햅틱 변형 및 재질감을 모델링 할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 햅틱 렌더링의 경우 충돌 검출 및

반력 연산에 그래픽스 하드웨어 기반의 알고리즘을 제시함으로써 빠르고 효율적으로 햅틱 상호작용을 가능하게 하였을 뿐 아니라 변형 시 발생하는 물리적 현상을 mass-spring 모델에 근거한 힘 계산 방법론을 제시하였다. 또한 햅틱 장치를 통해 가상 얼굴의 형상을 느끼거나 형상을 변형하는 것과 더불어 얼굴의 재질감(거칠기, 탄성, 마찰)을 편집할 수 있는 DIBR 기반의 모델링 방법론을 제시하였다. 실험 결과에서 제시하였듯 제안된 알고리즘은 효율적으로 햅틱 상호작용을 가능하게 할 뿐 아니라 사용자가 햅틱 상호작용 시 가상의 물체를 실제 물체를 느끼는 것과 같은 느낌을 제공할 수 있다. 또한 본 제안된 알고리즘은 가상 성형 수술 시스템에 효과적으로 사용되어 성형 후 변하게 될 얼굴 형태의 결과를 제시하는 역할을 기대할 수 있을 것이다.

향후 진행 될 연구 과제로는 보다 몰입감 있는 햅틱 상호작용을 가능하게 하기 위하여 그래픽/햅틱 co-location 시스템을 개발할 것이며 사실적인 물체의 재질감을 제시하기 위하여 물리적인 센서를 이용하여 실제 물체의 재질감을 획득하고 정량적 및 정성적 분석 및 평가를 통하여 데이터베이스를 구축하여 가상 물체와의 상호작용에서도 실제 물체를 느끼는 것 같은 정교한 재질감을 표현을 위한 연구가 진행될 것이다. 마지막으로 햅틱 유저 인터페이스(Haptic User Interface, HUD)를 개발하여 사용자가 보다 쉽게 물체의 형상 및 재질감을 편집하여 저장할 수 있도록 제공될 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 정보통신부 선도기반기술개발사업(차세대 PC 기술개발), 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(IITA-2006-C1090-0603-0017) 및 한국과학재단 사업의 실감콘텐츠연구센터의 연구결과로 수행되었음.

## 참고문헌

[1] K. Salisbury, F. Barbagli, and F. Conti, "Haptic Rendering: Introductory Concepts", IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 24, no. 2, pp. 24-32, 2004.

[2] T. Massie and K. Salisbury, "The PHANTom Haptic Interface :A Device for Probing Virtual Objects", Conf. Proc. ASME Haptic Interfaces Virtual Environment and Teleoperator Systems, vol. 55, no.1, pp. 295-300, 1994.

[3] C. Zilles, K. Salisbury, "A constraint-based god-object method for haptic display", Conf. Proc. Intelligent Robotics and System, vol. 3, pp. 146-151, 1995.

[4] K. Salisbury, D. Brock, T. Massie, N. Swarup, and C. Zilles, "Haptic Rendering: Programming Touch Interaction with Virtual Objects", Proc. Symp. Interactive 3D Graphics, pp. 123-130, 1995.

[5] D. C. Ruspini, K. Kolarov, and O. Khatib "Robust Haptic Display of Graphical Environments", Proc. ACM SIGGRAPH, pp.345-352, 1997.

[6] A. Gregory, M. Lin, S. Gottschalk, R. Taylor. "A Framework for Fast and Accurate Collision Detection for Haptic Interaction", Conf. Proc. IEEE Virtual Reality, pp. 38-45, 1999.

[7] C.H. Ho, C. Basdogan, and M. A. Srinivasan. "Efficient point-based rendering techniques for haptic display of virtual objects", Presence vol. 8, no. 5, pp.477-491, 1999.

[8] A. Gregory, M.C. Lin, S. Gottschalk, R. Taylor, "Fast and Accurate Collision Detection for Haptic Interaction Using Three Degree-of-Freedom Force-Feedback Device", Computational Geometry, Theory and Application, vol. 15, pp.69-89, 2000.

[9] L. Kim, A. Kyrikou, G.S. Sukhatme, and M. Desbrun, "An Implicit-based Haptic Rendering Technique", Conf. Proc. Intelligent Robots and Systems, vol. 3, pp. 2943-2948, 2002.

[10] R. S. Avila and L. M. Sobierajski, "A Haptic Interaction Method for Volume Visualization", Conf. Proc. IEEE Visualization, pp. 197-204, 1996.

[11] William A. McNeely, Kevin D. Puterbaugh, and James J. Troy, "Six Degree-of-Freedom Haptic Rendering Using Voxel Sampling", Conf. Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 410-408, 1999.

[12] S. Walker and K. Salisbury "Large Haptic Topographic maps: Marsview and the Proxy Graph Algorithm", Conf. Proc. ACM Symp. Interactive 3D graphics, pp. 83-92, 2003.

[13] K. Potter, D. E. Johnson, and E. Cohen, "Height Field Haptics", Conf. Proc. Haptics Symposium, pp. 229-235, 2004.

[14] J.P. Kim and J. Ryu, "Hardware Based 2.5D Haptic Rendering Algorithm using Localized Occupancy Map Instance", Conf. Proc. Artificial Reality and Telexistence (ICAT), 2004.

[15] J.P. Kim, B.C. Lee, and J. Ryu, "Haptic Rendering with Six Virtual Cameras", Conf. Proc. Human Computer Interaction, pp. 467-472, 2005.

[16] A. Luciani, S. Jimenez, J. L. Florens, C. Cadoz, and O. Raoult., "Computational physics: A modelersimulator for animated physical objects", Conf. Proc. Eurographics, pp. 425-436, 1991.

[17] X. Provot. "Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior", Conf. Proc. Graphics Interface, pp. 147-154, 1995.

[18] L. Nedel and D. Thalmann, "Real time muscle deformation using mass-spring system", Conf. Proc. Computer Graphics, pp. 156-165, 1998.

- [19] P. Howlett and W.T. Hewitt, "Mass-spring simulation using adaptive non-active points", Conf. Proc. Eurographics, pp. 345-354, 1998.
- [20] F. Dachille, H. Qin, A. Kaufman, and J. El-sana, "Haptic Sculpting of Dynamic Surfaces", Proc. ACM Symp. Interactive 3D Graphics, pp. 103-110, 1999.
- [21] J. Edwards and G. Luecke, "Physically Based Models for use in a Force-Feedback Virtual Environment", Proc. Symp. Flexible Automation, pp.221-228, 1996.
- [22] M. Higashi, N. Aoki, and T. Kaneko, "Application of haptic navigation to modify free-form surfaces through specified points and curves", Proc. Symp. Solid Modeling and Applications, pp. 377-388, 2002.
- [23] F. Dachille H. Qin and A.E. Kaufman, "A Novel Haptics-Based Interface and Sculpting System for Physics-Based Geometric Design", Computer-Aided Design, vol. 33, no. 5, pp. 403-420, 2001.
- [24] D. James and D. Pai, "ARTDEFO: Accurate Real Time Deformable Objects", Conf. Proc. ACM SIGGRAPH, pp.65-72, 1999.
- [25] C. Basdogan, "Real-time Simulation of Dynamically Deformable Finite Element Models Using Modal Analysis and Spectral Lanczos Decomposition Methods" Conf. Proc. Medicine Meets Virtual Reality (MMVR), pp46-52, 2001.
- [26] A.D. Gregory, S.A. Ehmann, and M.C. Lin, "In Touch: Interactive Multiresolution Modeling and 3D Painting with a Haptic Interface", Conf. Proc. IEEE Virtual Reality, pp7-14, 2000.
- [27] W. Baxter, V. Scheib, and M.C. Lin, "DAB: Interactive Haptic Painting with 3D Virtual Brushes", Conf. Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 461-468, 2001.
- [28] L. Kim, G. Sukhatme, and M. Desbrun, "A haptic-rendering technique based on hybrid surface representation", IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 24, no. 2, pp.66-75, 2004.
- [29] A. Moore, "An introductory tutorial on kd-trees", PhD. Thesis, Technical Report no. 209, Computer Laboratory, University of Cambridge, 1991.
- [30] S.E. Salcudean and T.D. Vlaar, "On the emulation of stiff walls and static friction with a magnetically levitated input/output device", Conf. Proc. ASME DSC, pp. 303-309, 1994.
- [31] PHANTOM Omni, Sensable Technologies, Inc., <http://www.sensable.com>.
- [32] Real Human Face Data, Geometricinformatics, Inc., <http://www.geometricinformatics.com>.