

햅틱 인터페이스를 이용한 가상 조각 시스템

(A Virtual Sculpting System using Haptic Interface)

김 래 현^{*} 박 세 형^{**}
(Laehyun Kim) (Sehyung Park)

요약 본 논문에서는 햅틱 인터페이스를 통해 실제 촉감을 만드는 것처럼 자연스럽게 가상 모델의 일부를 덧붙이거나 제거하여 원하는 모양을 만드는 햅틱 가상 조각 시스템을 소개하고자 한다. 햅틱 렌더링과 햅틱 툴에 의한 가상 모델의 변형은 볼륨 간접 표면 법을 기반으로 이루어진다. 본 시스템에서는 기존의 볼륨 데이터 기반의 햅틱 조각 시스템이 갖는 문제점들을 개선하고 빠르고 안정된 알고리즘을 제안하였다. 먼저 가상의 물체를 조각하는 동안 빠른 햅틱 응답 속도(1 KHz)에 비해 훨씬 느린 비주얼 프로세싱(~30 Hz)의 속도 차이로 인해 발생하는 문제를 극복하기 위해 조각과정의 연속적인 두 모델의 중간 표면 들을 생성하여 부드러운 햅틱 렌더링을 구현하였다. 조각 툴에 의해 변형되는 볼륨 간접 표면은 비주얼 디스플레이를 위해 메쉬 모델로 컨버전 되는데 이때 메쉬 모델은 표면의 복잡도를 반영하여 적은 폴리곤으로 복잡한 모양을 보여줄 수 있는 비 균일 메쉬 생성 기법을 사용하였다. 실시간 조각과정에서 가상 물체의 다양한 비주얼 효과를 위해 메쉬 기반의 솔리드 텍스처링, 페인팅, 그리고 모델의 양각/음각 기법도 구현하였다.

키워드 : 햅틱스, 햅틱 조각기법, 볼륨 간접 표면, 가상 촉감

Abstract We present a novel haptic sculpting system where the user intuitively adds to and carves out material from a volumetric model using new sculpting tools in the similar way to handling real clay. Haptic rendering and model deformation are implemented based on volumetric implicit surface. We enhance previous volume-based haptic sculpting systems by presenting fast and stable force computation on 3D models to be deformed. In order to bridge the gap between fast haptic process (1 KHz) and much slower visual update frequency (~30Hz), the system generates intermediate implicit surfaces between two consecutive physical models being deformed. It performs collision detection and force computation on the intermediate surface in haptic process. The volumetric model being sculpted is visualized as a geometric model which is adaptively polygonized according to the surface complexity. We also introduce various visual effects for the real-time sculpting system including mesh-based solid texturing, painting, and embossing/engraving techniques.

Key words : Haptics, Haptic sculpting, Volumetric implicit surface, Digital clay

1. 서론

햅틱 인터페이스는 햅틱 장치를 통해 사용자가 직접 가상의 3차원 모델을 만지고, 색칠을 하고, 모양을 바꿀 수 있게 함으로써 실제 세계에서와 같은 자연스런 인터페이스를 제공한다. 가상의 물체와 접촉 시 반력을 위한 힘 벡터를 계산하는 과정을 햅틱 렌더링이라 한다. 햅틱 렌더링 과정에서 시스템의 안정성과 물체의 딱딱한 표

면을 느낄 수 있도록 힘 벡터는 1KHz 이상으로 계산 되어야 하고 물체의 다양한 재질을 효과적으로 렌더링해야 한다. 또한 렌더링 과정에서 생길 수 있는 불연속적인 힘 벡터의 생성은 피해야 한다.

본 논문에서는 볼륨 간접 표면 (Volumetric implicit surface)으로 부터 햅틱 렌더링과 조각 시뮬레이션을 수행하고 자연스런 햅틱 인터페이스를 통해 3차원 모델을 원하는 모양으로 만들 수 있는 볼륨 조각 시스템을 구현하였다. 기존의 볼륨 기반의 조각 시스템들은 몇 가지 큰 제한 점들을 가지고 있고 대부분의 시스템은 부분적인 해결책만을 제시하였다. 이 제한 점들은 다음과 같다.

- 조각툴에 의해 변형되는 볼륨 모델로부터 메쉬 모델을 생성할 때 정교한 모델 정보를 잃지 않으면서 비

^{*} 정 회 원 : 한국과학기술연구원(KIST) 연구원
laehyunk@kist.re.kr

^{**} 비 회 원 : 한국과학기술연구원(KIST) 연구원
sehyung@kist.re.kr

논문접수 : 2004년 2월 10일

심사완료 : 2004년 8월 9일

주열 렌더링의 속도를 고려해 가능한 적은 폴리곤의 수로 표현되어야 한다.

- 조작과정에서 빠른 햅틱 응답속도(1KHz)와 느린 변형 표면의 시뮬레이션 속도(~30Hz) 간의 차이로 인해 불연속적으로 변형되는 가상 모델의 표면을 부드럽게 햅틱 렌더링 하기 어렵다.
- 기존의 많은 볼륨 조작 시스템은 모델의 표면위에 가상 툴의 한 점(주로 중심점) 만을 이용하여 충돌검사와 힘 벡터 계산을 함으로써 가상 툴의 표면과의 적절한 충돌이 고려되지 않았다. 또한 툴의 표면을 따라 샘플링된 여러 점을 사용한 경우 변형되는 표면과 충돌되는 점들의 수와 위치의 변화는 불 연속적 반력을 사용자에게 전달한다.
- 3차원 가상 모델에 전통적인 2차원 텍스처 매핑법이 적용되면 조작과정에서 형상이 변형됨에 따라 텍스처의 변형이 심해지게 된다.

본 시스템에서는 이러한 제한 점들을 극복하기 위 한 다음과 같은 대안들을 제시하였다.

먼저 메쉬 모델로 생성할 때 적은 수의 폴리곤으로 복잡한 형태의 모델을 보여주기 위한 빠르고 여러 복잡도의 메쉬간의 균열이 발생하지 않는 Velho[1]의 비 균일 메쉬 생성 기법(adaptive polygonization method)을 사용하였다. 이 기법을 확장하여 메쉬 기반의 솔리드 텍스처링과 페인팅 기법 등 볼륨 조작시스템을 위한 다양한 비주얼 효과들을 구현하였다. 햅틱과 비주얼 프로세스간의 속도 차이에 의한 불 연속적인 물리적인 표면을 부드럽게 햅틱 렌더링하기 위해 적절하게 애니메이션되는 중간 표면(intermediate implicit surface)을 생성하여 이를 기반으로 힘 벡터를 계산하였다. 또한 볼륨이 있는 가상 툴과 모델간의 빠른 충돌 검사와 적절한 반력을 계산하기 위해 기존의 다 충돌 점 기법 대신에 오프셋 표면(offset surface)을 사용한 기법을 제시 하였다. 그림 1은 개발된 햅틱 조작 시스템을 이용하여 만든 열쇠고리를 보여준다.

본 시스템은 비주얼 렌더링, 시뮬레이션, 그리고 햅틱 렌더링 스레드로 나누어져 있고(그림 2) 듀얼 인텔 제온 2.4Ghz CPU, 1GB 메모리, 그리고 FireGL X1 비디오

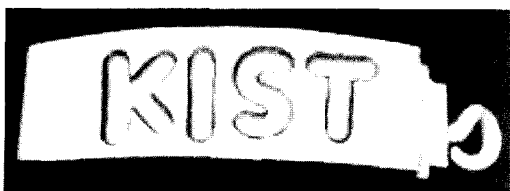


그림 1 본 햅틱 조작시스템을 이용해 만든 KIST로고와 있는 키 홀더

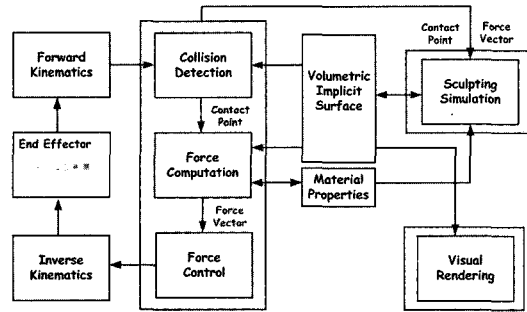


그림 2 햅틱 조작시스템의 구성도

카드를 장착한 PC에서 구동된다. 비주얼 렌더링은 OpenGL기반으로 구현되었고 햅틱 장치로는 SensAble사의 3DOF PHANTOM PREMIUM 1.5가 사용되었다.

관련연구는 2절에서 다루고 간접 표면에 관한 기술은 3절에서 설명하고자 한다. 4절에서는 본 시스템에서 사용된 햅틱 렌더링 모델을 설명하고 5절에서 햅틱 조작 기법을 다루기로 한다. 6절에서 다양한 비주얼 효과를 위한 기법들을 소개하고 마지막으로 7절에서 결론을 내리고자 한다.

2. 관련연구

2.1 강제 기반의 햅틱 렌더링 기법

일반적으로 햅틱 렌더링 기법은 가상 물체가 무한히 단단하다는 가정 하에서 구현되었다. 이러한 햅틱 렌더링 기법은 가상 모델의 표면 표현 법에 따라 크게 메쉬 모델과 볼륨 모델 기반의 렌더링 기법으로 구분된다.

먼저 메쉬 모델을 대상으로 하는 방법으로 페널티 기반(penalty-based) 기법[2]이 있다. 이 기법은 단순히 가상 툴 팁의 가상 모델내의 침투 깊이에 비례하여 힘 벡터를 계산 함으로써 모델 내부의 보루노이 경계선에서 힘 벡터의 심한 불연속성과 날카로운 모양을 가진 부분을 충분한 힘의 저항 없이 통과해 버리는 문제들을 가지고 있다. 이런 제한들을 극복하기 위해 Zilles 와 Salisbury[3]는 갓-오브젝트(god-object)라고 하는 물체의 표면에 위치하는 가상 접촉점(Virtual Contact Point, 이하 VCP)의 이전 위치와 현재 실제 툴팁의 위치(Tooltip Point, 이하 TP)를 고려하여 새로운 VCP의 위치를 계산하는 기법을 제안하였다. Ruspini et al.[4]는 이를 좀더 개선하여 빠른 충돌 검사와 다양한 표면 재질을 렌더링 할 수 있는 일반적인 기법을 제안하였다.

다음으로 볼륨 모델(간접 표면을 포함)을 기반으로 하는 햅틱 렌더링 알고리즘은 메쉬 모델로 컨버전하지 않고 볼륨 데이터로부터 직접 힘 벡터를 계산함으로써 볼륨 데이터 고유의 장점들을 이용하여 빠른 충돌검사와 표

면을 따라 부드러운 힘 벡터를 생성한다. 이 기법은 Iwata 와 Noma[5]에 의해 처음 소개되었고 이후 많은 알고리즘들이 제안되었다[6]. 기본적으로 힘 벡터의 방향은 3차원 그리드의 각 교차 점에서 샘플링 된 포텐셜 값의 기울기(gradient)로부터 계산되고 벡터의 크기는 포텐셜 값에 선형 비례한다. Salisbury 와 Tarr[7]는 해석적 함수에 의해서 정의되는 제한적인 모양의 간접 표면만을 위한 알고리즘을 제시하였다.

Kim et al.[8,9]은 비주얼 렌더링을 위한 메쉬 모델과 햅틱 렌더링에는 볼륨 모델을 사용함으로써 두 모델 표현법의 장점을 조합한 햅틱 렌더링 알고리즘을 소개하였다.

2.2 가상 조작 시스템을 위한 햅틱 기법

햅틱 조작 시스템에서는 물체의 표면이 가해지는 조작 툴에 의해 변형이 이루어지므로 변형되는 표면을 적절히 시뮬레이션 할 수 있는 햅틱 렌더링 기법들이 요구된다.

일반적으로 햅틱 조작 과정에서 햅틱 프로세스에서 반력은 매우 빠르게(1KHz이상) 재 계산 되지만 비주얼 프로세스(시뮬레이션 속도 포함)에서 3차원 모델은 훨씬 느린 속도(~30Hz)로 갱신된다. 이런 큰 차이로 인해 변형되는 모델을 직접 햅틱 렌더링 할 경우 불 연속적인 반력을 생성한다.

이를 해결하기 위해서 기존의 햅틱 조작 시스템에서는 가상 툴이 물체 표면의 접촉하는 점에 고정된 가상의 스프링[10,11]을 만들어 사용자에게 현재 툴 팁의 위치와 고정된 점 사이의 거리에 비례한 스프링 힘을 느끼도록 해준다. 하지만, 이런 접근은 변형되고 있는 표면과 상관없이 힘을 생성함으로써 표면을 직접 느낄 수 없고 스프링이 고정되어 있음으로 가상 모델의 표면을 따라 이동하면서 자연스럽게 조작 과정을 수행할 수 없는 제약이 따른다.

또 다른 방식은 이전 모델과 변형될 모델에서의 가상 접촉점들 간의 보간을 통해 연속적인 힘 벡터를 생성하는 프록시 블렌딩(proxy blending) 방식이 있다[12]. 이 방법에서는 가상 접촉점 만을 이용함으로써 툴팁이 보간 중에 예상되지 않은 다른 방향으로 움직일 경우 시스템이 불안정해 질 수 있고 변형되어질 표면에서의 접촉 점이 정확하고 빠르게 계산 되어야 하는 제한 점이 있다.

따라서 이러한 방법들은 가상 표면을 조작하는 과정에서 툴 팁의 움직임과 반력을 통한 정확한 경험이 중요한 분야(예를 들면, 수술 훈련)에 적용하기에는 충분치 않다.

또 한가지 고려해야 할 점은 기존의 많은 볼륨 조작 시스템은 모델의 표면 위에 가상 툴의 한 점만을 이용

하여 충돌검사와 힘 벡터 계산을 함으로써 실제 가상 툴의 표면과의 충돌이 무시됨으로써 복잡하고 정확한 조각이 수행되지 못하는 문제가 발생한다. 이를 개선하여 가상 툴의 표면을 따라 여러 점을 사용한 충돌 검사와 각 점들의 반력을 조합한 햅틱 렌더링 기법[13]이 소개되었지만 변형되는 표면과 충돌되는 점들의 수와 위치가 사용자가 가하는 툴에 가하는 힘에 따라 갑작스럽게 변하게 되어 불 연속적인 반력이 생성되고 사용되는 점의 수가 늘어나면 계산속도가 비례해서 늘어나는 단점이 있다.

2.3 볼륨 기반의 조작 기법

Galyean와 Hughes[11]은 처음 복셀 기반의 볼륨 조작 기법을 제시하였고 3차원 메쉬 모델을 보여주기 위해 마칭 큐브 알고리즘[14]을 사용하였고 Barentzen[15]는 메모리 요구를 줄이기 위해Octree 기반의 시스템을 제안되었다. 그러나 이 시스템들은 볼륨의 크기 제한에 따른 낮은 해상도 또는 변환 후 너무 많은 수의 폴리곤의 생성등의 문제점이 있다. 이를 극복하기 위해, Kobbelt et al.[16]은 허미트(Hermit) 데이터(교차점과 노말벡터)을 기반으로 샘플링 하여 날카로운 모양을 효과적으로 유지하기 하는 EMC(Extended Marching Cube) 알고리즘을 제안하였고 모델의 복잡도에 따라 해상도를 선택하여 다 해상도를 갖는 메쉬[17]나 표면의 복잡도에 따라 비 균일하게 메쉬를 생성[18]하는 기법들이 발표되었다.

조각 과정에서 변형되는 모델을 시뮬레이션 하는 방법으로는 주로CSG(Constructive Solid Geometry)방법이 사용되는데 조작 툴과 모델이 겹치는 부분의 샘플링 된 스칼라 값에 직접 적용이 된다. 또 다른 방법은 컴퓨터 그래픽스에서 사용되는 물리 기반의 모델링 기법으로 간단한 매스-스프링 기법[19]으로부터 정확한 FEM(Finite Element Method)[20]등이 사용된다. 하지만, 모델의 복잡도가 증가하면 시뮬레이션의 속도가 매우 느려지는 단점이 있다.

2차원 마우스 기반의 조작 시스템에서는 자연스럽게 효과적인 조작 과정을 제공하지 못한다. 이를 대신하여 햅틱 장치를 이용한 많은 볼륨 햅틱 조작 시스템들이 개발되었다[6,17,19].

3. 간접 표면(implicit surface)

본 시스템에서 햅틱과 비주얼 렌더링위해 사용되는 간접 표면의 정의와 특징을 알아보려고 한다. 물체의 간접 표면 S는 다음의 수식 (1)에 의해 기술된다[21].

$$S = \{(x, y, z) \in \mathcal{R}^3 \mid f(x, y, z) = 0\} \quad (1)$$

$$n = \nabla f / \|\nabla f\|, \quad \nabla f = \left[\frac{df}{dx}, \frac{df}{dy}, \frac{df}{dz} \right] \quad (2)$$

여기서 f 는 간접 함수(implicit function, 또는 포텐셜 값)이고, (x,y,z) 는 3차원 공간에서 한 점의 좌표이다. 포텐셜 값은 한 점에서 표면의 가장 가까운 점까지의 상대적인 거리를 나타낸다. 만약 포텐셜 값이 0 이면 점 (x,y,z) 는 표면에 위치한다. 이처럼 포텐셜 값이 0인 점들의 집합이 간접 표면을 정의한다. 만약 포텐셜 값이 양수의 값을 가지면 점 (x,y,z) 는 표면 바깥에 위치하고(그림 3(a)에서 붉은색 점) 반대로 음수의 값을 가지면 표면 안쪽에 있게 된다(그림 3(a)에서 하늘색 점). 간접 표면의 노말 벡터는 수식 2에서와 같이 간접 함수의 기울기(gradient)로써 얻어진다.

본 연구에서는 임의의 메쉬 모델로부터 직접 간접 표면을 구하기 위해 Mauch의 최근접 점 변환(Closest point transform) 알고리즘[22]을 사용하였다(그림 3).

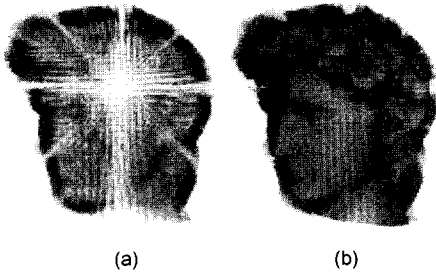


그림 3 최근접 점 변환 알고리즘을 이용해서 메쉬 모델을 볼륨 간접 표면으로 컨버전. (a) “데이보드” 메쉬 모델로부터 볼륨 간접 표면을 생성. (b) 메쉬 모델과 볼륨 간접 표면

4. 햅틱 렌더링 모델

이 장에서는 볼륨 간접 표면을 기반으로 한 기본적인 햅틱 렌더링 모델을 기술하였다. 이 과정은 충돌검사, 반력 벡터 계산, 그리고 힘 제어 등으로 나눌 수 있다(그림 2 참조).

4.1 데이터 모델

볼륨 간접 표면에서 실제 햅틱 렌더링에 필요한 정보는 그림 4에서처럼 단지 표면을 둘러싼 부분의 포텐셜 필드이다. 포텐셜 필드는 각 점에서 간접 표면까지의 상대적인 거리에 비례하여 -1에서 1 사이의 스칼라 값을 갖는다. 만약 햅틱 툴팁이 이 범위 바깥에 있으면 반력 없이 자유롭게 툴을 움직일 수 있다.

볼륨 데이터의 3차원 그리드의 한 방향의 크기가 n 일 때 메모리 복잡도는 $O(n^3)$ 이다. 하지만 실제 햅틱 조각 과정에 필요한 정보는 단지 물체의 표면의 안과

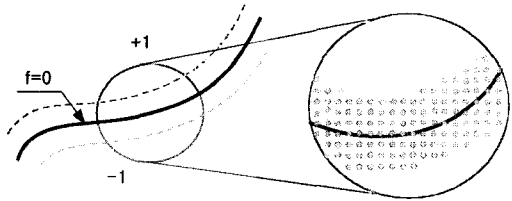


그림 4 햅틱 렌더링을 위한 데이터 모델

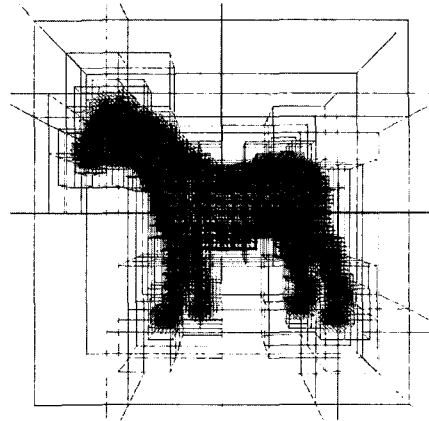


그림 5 옥트리 기반의 자료구조의 시각화 예

바깥의 인접한 포텐셜 필드이다. 따라서 본 시스템에서는 과도한 메모리 사용을 피하기 위해 볼륨 데이터를 효율적을 저장하고 관리하기 위해 옥트리 기반의 데이터 구조를 도입하였다(그림 5).

4.2 충돌 검사

햅틱 장치의 툴팁이 물체의 표면을 지날 때 빠르게 적절한 반력을 계산하기 위한 첫 단계로 빠른 충돌 검사가 수행된다. 메쉬 모델 기반의 햅틱 렌더링 방법들에서 충돌 검사의 구현은 매우 중요하고 어려운 부분 중에 하나이고 또한 충돌 검사를 위한 계산은 모델의 복잡도에 크게 영향을 받는다([4], H Collide[23]). 하지만, 간접 표면에서는 포텐셜 값의 변화만으로 쉽고 빠르게 충돌을 검출할 수 있다.

예를 들면, 현재 툴팁의 포텐셜 값이 0이거나 음수를 갖고 이전 위치의 값이 양수라면 충돌이 일어났다고 할 수 있다. 이때 툴팁의 포텐셜 값은 툴팁이 위치하고 있는 셀 안의 8개의 포텐셜 값을 3차원 선형 보간법을 이용하여 얻는다. 따라서 모델의 복잡도나 볼륨의 해상도와 상관없이 빠른 충돌검사가 수행된다.

4.3 반력 벡터 계산 및 힘 제어 기법

일단 충돌이 일어나면, 적절한 반력을 주기 위해 힘 벡터를 계산하게 된다. 먼저 벡터의 방향을 결정하기 위해 툴팁 주변의 8개의 그리드 점들의 기울기(gradient)

를 각각 계산하고 3차원 선형 보간법을 통해 툴 팁 위치에서의 기울기 값을 구한다. 최종적으로 구한 값이 힘 벡터의 방향이 된다(그림 6). 이런 방법은 Avila[6]가 볼륨데이터를 햅틱 렌더링 시 사용한 방법과 유사하다.

반면에 기존의 대부분의 알고리즘[5,6]에서 힘 벡터의 크기는 포텐셜 값에 비례하게 대략적으로 계산함으로써 표면을 정확하게 렌더링 할 수 없다. 결과적으로 사용자에게 보여지는 표면보다 더 부드럽게 느껴지는 단점이 있다(그림 6(a)).

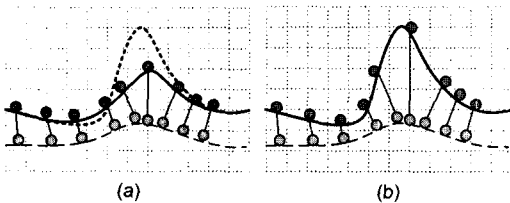


그림 6 힘 벡터의 크기 계산. (a) Avila의 포텐셜 값을 기반으로 한 계산. (b) 광선 추적법을 이용한 보다 정확한 계산

본 시스템에서는 Avila의 방식과 달리 툴 팁의 위치로부터 계산된 벡터의 방향으로 가상의 광선(ray)을 쏘아서 표면과 만나는 점을 계산하였다. 이때 가상의 광선을 따라 새로운 점이 표면을 지나게 되면 이진 검색을 이용해 정해진 정확도에 이를 때까지 표면위에 점을 찾는다. 이 만나는 점이 VCP(Virtual Contact Point)가 된다. 이 VCP와 물체내의 툴 팁 사이의 거리에 비례하여 벡터의 크기가 결정된다(그림 6(b)). 따라서 좀더 정확하게 표면을 시뮬레이션 할 수 있다.

힘 벡터의 방향과 크기를 결정한 후, 안정된 힘 제어를 위한 스프링-댐퍼 모델[24]을 사용하여 최종적인 반력을 계산한다. 이때 가상의 댐퍼는 불 연속적 시간의 샘플링에서 오는 여분의 에너지를 소모 시킴으로 햅틱 장치를 안정하게 제어하는 역할을 한다. 시스템은 결과 되는 힘 벡터를 이용하여 VCP와 툴 팁이 같은 위치에 있도록 노력한다.

$$\vec{F} = (P_c - P_t) * k - (\dot{P}_c - \dot{P}_t) * b \quad (3)$$

이 식에서 \vec{F} 은 힘 벡터이고 P_c 와 \dot{P}_c 은 3차원 공간에서 VCP의 위치와 속도, P_t 와 \dot{P}_t 는 툴팁의 위치와 속도, k 은 강도, 마지막으로 b 은 점성을 나타낸다. 스프링 강도는 표면의 딱딱한 정도를 나타내고 점성은 시스템의 진동을 막아준다.

4.4 표면 마찰 모델

사용자가 가상 물체를 만질 때 적절한 마찰력을 느낄

수 있어야 한다. 마찰력이 없는 표면은 기름을 바른 유리 표면처럼 미끈거리는 느낌을 주게 된다. 적절한 마찰력을 시뮬레이션 하기 위해 표면의 VCP의 이동을 제한하는 반력을 추가적으로 제공해야 한다. 본 시스템에서는 Hayward와 Armstrong이 제안한 마찰 모델[25]을 사용하였다. 이 모델에서는 정지 마찰력(stick)과 운동 마찰력(slide), 그리고 두 마찰력 사이의 부드러운 전환(slip)을 시뮬레이션 하였다. 식 (4)에서 X_k 는 마찰력이 없는 VCP의 위치이고 W_k 는 마찰력을 고려한 VCP의 위치를 나타낸다. 마찰력은 이 두 위치간의 거리에 비례하여 생성된다. 만약 $|X_k - W_{k-1}| < Z_{max}$ 다면 정지 마찰력에 의해 움직이고자 하는 방향의 반대로 힘을 느끼게 되고 W_k 는 변하지 않는다. 만약 $|X_k - W_{k-1}| \geq Z_{max}$ 라면 운동 마찰력으로 전환하게 된다. 아래의 식은 이러한 기본 개념을 일반화하여 특정 조건에서의 진동을 막을 수 있는 마찰 모델의 식을 보여준다.

$$\text{If } \alpha(X_k - W_{k-1}) * |X_k - W_{k-1}| > 1.0$$

$$W_k = X_k - \frac{X_k - W_{k-1}}{|X_k - W_{k-1}|} Z_{max}$$

otherwise,

$$W_k = W_{k-1} + Y_k * \alpha(X_k - W_{k-1}) * (X_k - W_{k-1}) \quad (4)$$

여기에서, $Y_k = |X_k - X_{k-1}|$, $Z_{max} < Z_{stick}$ 이고 $\alpha(X_k - W_{k-1})$ 는 $|X_k - W_{k-1}| / Z_{stick} < 0.5$ 조건에서 0값을 가지고 다른 경우는 $1/Z_{max}$ 값을 가진다.

4.5 자석 표면 (magnetic surface)

대부분의 햅틱 렌더링에서는 툴 팁이 모델의 표면을 통과할 때 툴 팁을 강제로 표면으로 이동시키기 위한 적절한 반력을 생성하는 알고리즘에 중점을 두었다. 반면, 툴 팁이 표면과 떨어지려고 할 때 반대로 인력을 생성하여 표면에 붙어 있도록 할 수 있다. 기존의 연구에서는 인력을 시뮬레이션하기 위해 표면 위의 특정 점에 부착된 가상의 스프링을 이용해 구현하였지만, 표면을 따라 이동하면서 표면의 모양을 반영한 인력을 생성하지는 못한다.

Kim et al.[26]이 제안한 자석 표면은 원래 표면과 오프셋 표면 사이에 가상의 자장(그림 7에서 빗금 친 부분)을 형성하여 툴 팁이 이 자장 안에 위치하면 가장 가까운 표면의 점으로 툴 팁을 끌어들이는 인력을 생성한다. 인력을 계산하는 방법은 표면 안에 침투한 툴 팁을 바깥으로 밀어내는 것과 같은 알고리즘을 사용하였다(4.3절 참조). 즉 표면 바깥의 툴 팁의 위치와 이 툴 팁과 가장 가까운 표면의 점(VCP)을 구해 이 두 점간의 거리에 비례한 인력을 생성한다. 이를 이용하면 사용

자가 복잡한 모델의 표면을 이동할 때 표면으로부터 툴팁이 떨어지지 않고 접촉을 유지할 수 있다.

본 햅틱 조각 시스템에서는 자석 표면 기법을 조각 과정에서 가상 물체의 일부를 덧붙이는 조각에서 자연스럽게 표면을 잡아 당기는 느낌을 주기 위해 사용하였다. 물체에 툴팁을 대고 잡아 당기면 사용자는 적절한 인력을 느끼게 되고 덧붙이기 틀이 가하진 표면은 부풀어 오르게 된다. 이때 사용자는 적절한 인력을 느끼면서 툴팁을 원하는 방향으로 자유롭게 움직일 수 있고 이 움직임에 따라 원하는 모양이 만들어진다. 인력의 크기는 툴팁과 가장 가까운 표면의 점과의 거리에 비례한다. 따라서 툴팁이 표면과 떨어지려고 할 수록 그만큼 큰 인력을 느끼게 된다.

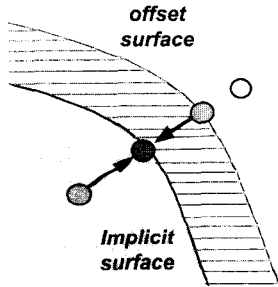


그림 7 자석 표면에서 인력 생성

5. 볼륨 기반 햅틱 조각 기법

이상에서는 기존의 볼륨 조각 시스템의 문제점을 해결한 새로운 햅틱 조각 기법을 제시하고자 한다.

5.1 볼륨 모델의 변형

조각 틀이 볼륨 간접 표면에 적용되었을 때 변형된 모델을 표현할 수 있도록 툴 주변의 포텐셜 필드의 값이 수정되어야 한다. 이 과정은 비주얼과 햅틱 프로세스에서 단계적으로 이루어진다. 먼저 새로운 비주얼 프레임 i 에서 조각 툴을 적용된 후 예상되는 변형된 물리적 모델을 보여주는 포텐셜 필드를 생성한다. 이를 툴 포텐셜 필드(Tool Potential Field, $T(p_i)$)라고 부르기로 한다. 이 과정에서 가상 툴의 보다 큰 일정한 볼륨 안에 포함되는 모든 포인트들의 집합인 p_i 를 대상으로 툴이 적용된 후의 포텐셜 값이 계산된다. 가상 툴 VP과 현재 모델의 포텐셜 필드(Model Potential Field, $M(p, t_j)$)를 인자로 CSG(Constructive Solid Geometry) 포인트 조각을 수행한 후 그 결과값을 $T(p_i)$ 에 저장한다(식 (5)). 이 과정은 매번 새로운 비주얼 프레임에서 반복된다.

$$T(p_i) = \text{CSG}(VP, M(p, t_j)) \tag{5}$$

$$D(p_i, t_j) = (M(p_i, t_j) - T(p_i)) \times \delta \tag{6}$$

$$M(p_i, t_{j+1}) = M(p_i, t_j) - D(p_i, t_j) \tag{7}$$

다음 단계는 빠른 햅틱 프로세스에서 이루어 지는데 비주얼과 햅틱 렌더링의 수행 속도의 갭을 메우고 부드러운 햅틱 렌더링을 구현하기 위해 변형된 물리적인 표면사이의 중간 표면(intermediate implicit surface)을 생성하게 된다. 새로운 중간 표면을 나타내는 포텐셜 값 $M(p, t_{j+1})$ 은 $T(p_i)$ 와 현재의 $M(p, t_j)$ 의 차이가 일정 비율 δ 만큼씩 줄어든 값을 갖음으로써 점점 $T(p_i)$ 값에 가깝게 된다. 결과적으로 중간 표면은 점차 툴에 의해 새로운 생성되는 표면을 향해 점차 이동하게 된다(식 (6), (7)). 표면이 변형되는 속도를 나타내는 δ 은 사용자에게 의해 가해진 힘에 비례하고 물체의 강도에 반비례하게 된다. 이 과정은 다음 비주얼 프레임 $i+1$ 을 만날 때 까지 반복된다.

5.2 메쉬 모델 생성법

조각 과정에서 변형된 간접 표면을 빠르게 보여주기 위해 렌더링 시간이 오래 걸리는 광선 추적법 보다는 전통적인 폴리곤 기반의 렌더링 방법을 사용하였다. 이를 위해 볼륨 간접 표면으로부터 폴리곤 메쉬를 생성하여야 한다. 마칭 큐브[14]같은 균일한 메쉬 생성 방법이 기존의 많은 볼륨 조각 시스템[11,15]에서 사용 되었지만, 고정된 샘플링 방식에 기인해서 해상도 제한과 과도하게 생성된 많은 폴리곤 등의 문제점들을 가지고 있다.

본 연구에서는 이런 문제점을 피하기 위해 표면의 복잡도에 따라 생성되는 폴리곤의 수가 결정되는 Veilho [1]의 비균일 메쉬 생성(adaptive polygonization) 방법을 도입하였다. 이 방법은 두 가지 과정을 나뉘어져 있다. 첫번째 단계에서는 초기 메쉬 데이터를 만들기 위해 낮은 해상도에서 균일 메쉬 생성 기법을 사용하였다. 다음 단계에서는 표면 곡률에 따라 초기 메쉬 데이터를 원하는 정확도에 이를 때까지 생성된 에지의 중간점을 기준으로 반복적을 나눈다. 이 과정에서 새로 생성되는 폴리곤의 꼭지점들은 간접 표면으로 투사되어 표면에 위치하는 정확한 좌표 값을 갖도록 한다. 여러 해상도를 갖는 메쉬에서 종종 발생하는 균열 문제는 폴리곤의 면들이 같은 에지를 공유함으로써 이를 피할 수 있다. 결과적으로 적은 수의 폴리곤으로 복잡한 모델을 생성할 수 있게 된다.

생성된 메쉬데이터는 별도의 옥트리 기반의 데이터 구조에 저장되어 조각 과정에서 지역적으로 변형되는 부분만을 빠르게 수정할 수 있도록 하였다.

5.3 힘 기반(Force-based)의 조각

힘 기반의 조각에서는 마치 실제 찰흙을 만지듯이 사용자가 변형되는 모델의 표면을 반력을 통해 느끼면서 자연스럽게 모델의 일부를 깎아내거나(carving opera

tion) 덧붙일 수(adding operation) 있는 조각을 수행할 수 있다.

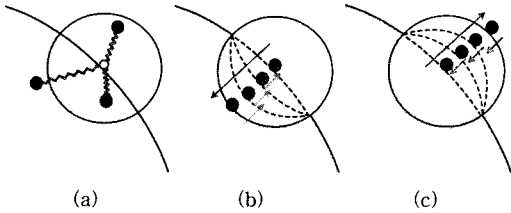
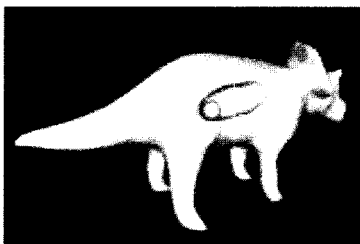
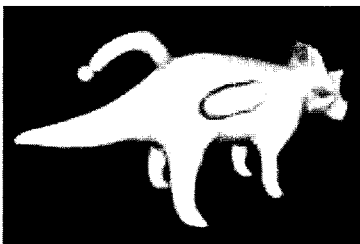


그림 8 스프링 기반과 힘 기반 조각 기법의 비교. (a) 스프링 기반의 조각 기법 (b) 힘 기반의 조각 기법을 이용한 깎아내기 조각 (청색 화살표: 툴의 진행방향, 적색 화살표:반력) (c) 힘 기반의 조각 기법을 이용한 덧붙이기 조각

본 연구에서는 기존의 햅틱 조각 시스템에서 사용하는 가상 스프링(그림 8(a)) 대신에, 비주얼 프로세스에서 불 연속적으로 표현되는 물리적인 모델의 차이를 햅틱 프로세스에서 적절하게 보간하여 생성된 중간 간접 표면을 기반으로 햅틱 렌더링 함으로써 부드러운 변형을 느낄 수 있다. 또 한가지 장점은 프록시 블렌딩 방식과 달리 실제의 조각 과정과 같이 변형되는 동안 표면을 따라 툴 팁을 이동하면서 자연스럽게 원하는 부위를 조각할 수 있다(그림 8(b), 8(c)). 이때 간접 표면의 움직이는 속도는 사용자에 의해 가해진 힘에 비례하고 제질의 강도에 반비례한다.



(a) 깎아내기 조각



(b) 덧붙이기 조각

그림 9 힘 기반의 조각 기법의 예

가상 물체의 일부를 깎아 내는 조각과 달리, 덧붙이기 위한 조각을 수행하면 즉시 가상 툴 팁이 접촉면과 떨어지게 되므로 반력을 계산할 수 없게 된다. 적절한 잡아당기는 느낌을 주기 위해서 앞서 설명한 자석 표면을 이용하였다.

자석 표면은 간접 표면과 오프셋 표면 사이에 가상의 자장을 생성하여 자장 안에 툴 팁이 위치하면 툴 팁으로부터 표면의 가장 가까운 점으로 툴 팁을 끌어준다. 이때 끌어 당기는 힘의 크기는 툴 팁과 표면과의 거리에 비례하게 되어 세계 당길수록 더 큰 인력을 느끼는 자연스러운 느낌을 준다. 그림 9에서 힘 기반의 조각 기법을 사용한 깎기와 덧붙이기 조각의 예를 보여준다.

햅틱 조각 시스템에서 추가적으로 고려되어야 할 것은 조각 툴이 물체와 접촉할 때 충돌 검사와 반력의 계산이 한 점이 아닌 툴의 전체 표면을 따라 이루어져야 한다. 예를 들어 툴의 중심점을 이용하여 충돌 검사를 하면 툴의 표면이 물체에 통과하더라도 중심점이 표면 밖에 있으면 아무런 반력을 주지 못한다. 또한 경우에 따라 툴의 크기 보다 작은 구멍을 지날 때도 아무런 저항 없이 통과하게 된다.

햅틱 조각 시스템에서 추가적으로 고려되어야 할 것은 조각 툴이 물체와 접촉할 때 충돌 검사와 반력의 계산이 한 점이 아닌 툴의 전체 표면을 따라 이루어져야 한다. 예를 들어 툴의 중심점을 이용하여 충돌 검사를 하면 툴의 표면이 물체에 통과하더라도 중심점이 표면 밖에 있으면 아무런 반력을 주지 못한다. 또한 경우에 따라 툴의 크기 보다 작은 구멍을 지날 때도 아무런 저항 없이 통과하게 된다.

Petersik[13]은 툴의 표면을 따라 샘플링된 여러 개의 점을 이용하였다. 하지만 충돌검사와 반력 계산에 사용되는 점의 숫자와 위치가 불 연속적으로 변함에 따라 시스템이 불안정하게 된다. 만약 접촉하는 점의 수를 늘리면 그만큼 계산속도의 저하를 가져온다.

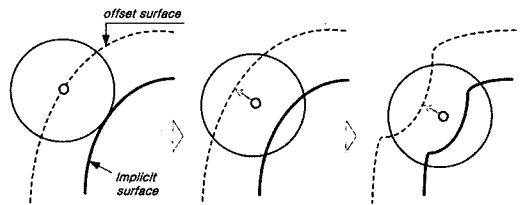


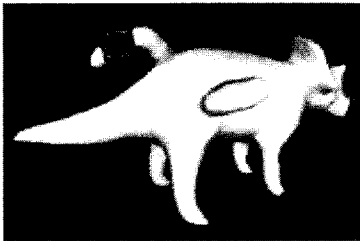
그림 10 오프셋 표면 기반의 충돌검사와 반력 생성 기법

이런 문제점들을 해결하기 위해 본 시스템에서는 툴의 중심점만을 이용하지만 물체의 표면으로부터 툴의 반지름 만큼 떨어진 오프셋 표면에서 충돌검사와 반력을 수행하였다. 따라서 조각 툴의 표면이 물체와 접촉

시 적절한 반력을 생성할 수 있어서 사용자가 좀더 정확하고 자연스럽게 조각 할 수 있다(그림 10).

5.4 메쉬 기반(Geometry-based)의 조각 기법

정교한 조각을 수행할 때 종종 햅틱 인터페이스의 반력이 방해가 되기도 한다. 예를 들어, 미리 정해진 모양대로 한꺼번에 큰 부분을 깎아내거나 붙이고자 할 때 반력을 느끼면서 조금씩 조각을 수행하면 시간이 오래 걸리고 또한 조각된 표면이 매끄럽지 못하게 된다. 메쉬 기반의 조각 기법에서는 사용자가 반력을 느끼지 않고 툴 팁을 자유롭게 3차원 공간에서 이동시킬 수 있다. 이 모드에서는 조각물의 위치, 모양, 그리고 크기를 와이어 프레임으로 보여줌으로써 조각이 이루어진 후의 변형된 모양을 사용자가 예측할 수 있다. 조각을 수행하기 위해 먼저 조각 툴을 원하는 부위로 이동시킨 후 툴 팁의 버튼을 누르면 조각이 수행된다(그림 11).



(a) 깎아내기 조각



(b) 덧붙이기 조각

그림 11 메쉬 기반의 조각 기법의 예

5.5 볼륨 재질 렌더링

볼륨 조각 과정에서 볼륨 데이터는 내부적으로 다양한 재질(경도, 마찰력, 색깔 등)을 가지고 있고 이를 반영하여 반력이 계산되어야 한다. 예를 들면, 치아모델의 경우 가장 단단한 법랑질, 부드러운 상아질, 신경조직이 있는 치수, 아말감, 충치부위 등의 여러 재질의 구조를 가지고 있다(그림 13(d)). 이처럼 볼륨 재질을 효과적을 저장하고 빠르게 햅틱 렌더링 하기 위해 별 별도의 볼륨 구조에 이런 재질들을 저장하여 햅틱 렌더링 시 사용한다. 본 조각 시스템에서 물체의 재질은 변형되는 속도로 시뮬레이션 되었다. 예를 들면, 단단한 법랑질 부

분을 깎아내는 속도는 상아질의 경우보다 많은 저항을 받으므로 느리게 된다.

6. 비주얼 효과

실시간 볼륨 조각시스템에서 비주얼 효과를 위해 5.2절에서 설명한 비 균등 메쉬 생성 기법을 이용한 솔리드 텍스처링과 페인팅 기법을 소개한다. 또한 볼륨 간접 표면을 이용하여 모델의 양각과 음각을 효과적을 생성한다.

6.1 솔리드 텍스처(Solid texture)

기존의 2D 텍스처 매핑을 하게 되면 텍스처 변형(texture distortion)이 생기게 되는데 조각 과정에서 변형된 모델일 경우 더욱 심하게 된다. 본 시스템에서는 이를 피하기 위해 Perlin[27]이 제시한 솔리드 텍스처를 도입하였다. 솔리드 텍스처는 모델과 텍스처 정보가 독립되었기 때문에 텍스처 변형은 발생하지 않는다. 아래의 식 (8)과 (9)는 대리석 텍스처를 생성하는 과정을 보여준다.

$$turb(X, b) = \frac{1}{2} * \sum_{i=0}^b \left[\left(\frac{1}{2^i} \right) * noise(2^i, X) \right] \tag{8}$$

$$Marble(X) = mColor(D(X) + a * turb(X, b)) \tag{9}$$

여기서 D 는 터블런스 방향을 조절하는 $X(x,y,z)$ 의 함수이고, a 는 진폭을, b 는 진동수를 조절하는 상수이다.

하지만 일반적으로 레이 마칭이나 솔리드 맵 방식으로 비주얼 렌더링을 수행함으로 과도한 계산 시간과 많은 텍스처 메모리를 요구한다. 더욱이 표면이 변형되는 조각 시스템에는 적합하지 않다.

본 연구에서는 각 그리드 점에서 순차적(procedural) 노이즈 함수를 통해 샘플링한 노이즈 값을 이용해 메쉬 생성시 꼭지점의 컬러를 결정할 때 사용함으로써 간략화 된 솔리드 텍스처를 구현 하였다. 폴리곤의 한 꼭지점의 색깔은 이웃 하는 꼭지점들의 색깔과 혼합되기 때문에 폴리곤의 크기와 모양에 따라 색이 번지는 현상이 발생되어 텍스처의 질이 떨어지게 된다. 이를 해결하기 위해 텍스처의 복잡도에 반영하여 메쉬를 생성함으로 좋은 질의 솔리드 텍스처를 얻었다. 즉, 폴리곤의 에지를 따라 색깔의 차이가 원하는 정확도에 이르기 까지 반복적을 작게 나누어 진다(그림 12).



그림 12 대리석 솔리드 텍스처를 가진 모델

6.2 페인팅

사용자는 또한 조각 과정에서 직접 모델 표면에 페인팅을 할 수 있다. 솔리드 텍스처 과정과 비슷하게 페인팅 툴이 적용될 때 툴 주변의 그리드 점에 색깔이 저장되고 색의 번짐을 방지하기 위해 메쉬가 생성될 때 색깔의 복잡도를 반영하게 된다(그림 13(a), 13(b)). 브러쉬 볼륨의 크기는 사용자에 의해 가해지는 힘에 비례하여 커지게 되고 칠해지는 색깔은 브러쉬의 색깔과 배경색을 알파 블렌딩하여 결정된다.

6.3 요철(Embossing and engraving)

솔리드 텍스처나 페인팅 툴을 적용한 표면 주변의 그리드 점들에 저장된 컬러값을 이용해 포텐셜 값을 적절하게 조절하여 쉽게 양각이나 음각 된 모델을 만들 수 있다(그림 13(c)).

7. 결론

본 논문에서는 기존의 볼륨기반의 햅틱 조각 시스템의 단점들을 개선한 새로운 기법들을 제안하였다. 먼저, 가상 툴과 표면과의 충돌 검사와 반력 계산을 위해 간접 표면의 오프셋 표면을 이용하여 기존의 여러 점을 이용한 방식보다 빠르고 안정된 계산을 하였다. 또한 표면의 VCP의 위치를 찾기 위해 광선 추적법을 사용하여 보다 정확하게 표면의 반력을 렌더링하였다.

다음으로, 조각되는 모델의 비주얼 렌더링을 위해 비균일 메쉬 생성기법을 사용함으로써 적은 폴리곤으로

보다 정교한 모양의 폴리곤 모델을 생성하였다. 이 기법은 다양한 비주얼 효과를 위한 페인팅과 메쉬 기반의 솔리드 텍스처링에도 사용하여 폴리곤 생성시 색깔의 복잡도를 고려하여 색의 경계가 분명한 메쉬 모델을 얻을 수 있다.

마지막으로, 조각되는 모델의 시뮬레이션 속도와 햅틱 렌더링 속도의 차이로 인해 직접 물리적인 모델로부터 반력을 계산하게 되면 불 연속적인 반력이 생성되어 사용자가 불편함을 느끼고 정확한 모델링이 어렵다. 대신에 햅틱 렌더링 과정에서 사용자가 가하는 힘과 가상 물체의 재질 등을 고려해 적절한 중간 간접 표면을 생성하여 이를 바탕으로 반력을 계산함으로써 조각에 따른 부드러운 반력을 사용자가 느끼게 된다.

햅틱 조각 시스템에 이러한 기법들이 적용됨으로써 실제 조각과정과 같이 사용자가 좀더 자연스럽게 정교한 조각을 수행할 수 있다.

앞으로 연구에서는 빠른 모델링위한 다양한 조각 기법들 (예를 들면, 스므딩, 스템핑, 그리고 컷앤페이스트)을 제공하고자 한다. 마지막으로 이 조각 기법을 이용하여 가상 치과 치료 훈련이나 뼈 수술의 리허설 같은 분야에 적용하고자 한다. 또한 네트워크 기반의 햅틱 시스템을 개발하여 물리적으로 떨어진 두 명 이상의 사람이 동시에 참여하여 원하는 작업을 수행할 수 있는 시스템을 개발하고자 한다.

참고 문헌

- [1] Luiz Velho, Luiz Henrique D. Figureiredo, Jonas Gomes, "A Unified Approach for Hierarchical Adaptive Tessellation of Surfaces," ACM Transactions on Graphics, Vol. 18, No. 4, pp. 329-360, 1999.
- [2] Thomas H. Massie, J. K. Salisbury, "The Phantom Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects," Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol.55-1, Chicago, IL, pp.295-301, 1994.
- [3] C. Zilles, J.K. Salisbury, "A Constraint-based God-object Method For Haptic Display," Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.146-150, 1994.
- [4] Diego C. Ruspini, Krasimir Kolarov, and Oussama Khatib, "The haptic display of complex graphical environment," ACM SIGGRAPH proceedings, vol. 1, pp.295-301, 1997.
- [5] H. Iwata, H. Noma, "Volume haptization," IEEE Virtual Reality Symposium on Research Frontiers, pp.16-23, 1993.
- [6] R. S. Avila, L. M. Sobierajski, "A Haptic Interaction Method for Volume Visualization," IEEE Visualization proceedings, pp.197-204, 1996.

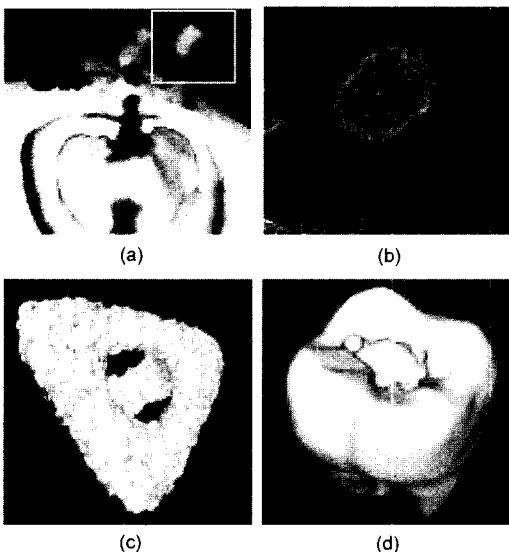


그림 13 비주얼 효과. (a)햅틱 페인팅 툴을 적용한 모델. (b)그림 (a)의 박스 안의 메쉬. (c) Embo-ssing툴이 적용된 모델. (d)재질 시뮬레이션

- [7] K. Salisbury, C. Tarr, "Haptic Rendering of Surfaces Defined by Implicit Functions," Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator System pp.61-68, 1997.
- [8] Laehyun Kim, Anna. Kyrikou, Gaurav S. Sukhatme and Mathieu Desbrun, "An Implicit-based Haptic Rendering Technique," IEEE IROS proceedings, pp.2943-2948, 2002.
- [9] Laehyun Kim, Gaurav S. Sukhatme, Mathieu Desbrun, "A Haptic Rendering Technique Based on Hybrid Surface Representation," IEEE computer graphics and applications, Vol. 24(2), pp.66-75, 2004.
- [10] Mark Foskey, Miguel A. Otaduy, and Ming C. Lin, "ArtNova: Touch-Enabled 3D Model Design," IEEE Virtual Reality proceedings, pp.119-126, 2002.
- [11] Tinsley A. Galyean, John F. Hughes, "Sculpting: An interactive volumetric modeling technique," ACM SIGGRAPH proceedings, pp.267-274, 1991.
- [12] Diego C. Ruspini, Oussama Khatib, "Dynamic Models For Haptic Rendering Systems," Advances in Robot Kinematics, pp. 523-532, 1998.
- [13] A. Petersik, B. Pflesser, U. Tiede, K. Hohne, R. Leuwer, "Realistic Haptic Interaction in Volume Sculpting for Surgery Simulation," IS4TM 2003. Lecture Notes in Computer Science 2673, Springer-Verlag, Berlin, 2003, 194-202.
- [14] W. E. Lorensen and H. E. Cline, "Marching Cubes: a high resolution 3D surface reconstruction algorithm," Computer Graphics, Vol. 21, No. 4, pp 163-169, 1987.
- [15] J. Andreas Barentzen, "Octree-based Volume Sculpting," IEEE Visualization proceedings, pp.9-12, 1998.
- [16] L. P. Kobbelt, M. Botsch, U. Schwanecke, and H. P. Seidel, "Feature sensitive surface extracting from volumetric data," ACM SIGGRAPH proceedings, pp.57-66, 2001.
- [17] Jing Hua, Hong Qin, "Haptic Sculpting of Volumetric Implicit Functions," The ninth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2001.
- [18] R. N. Perry, S. F. Frisken, "Kizamu: A system for sculpting digital charaters," ACM SIGGRAPH proceedings, pp.47-56, 2001.
- [19] Kevein T. McDonnell, Hong Qin and Robert A. Wlodarczyk, "Virtual Clay: A Real-time Sculpting System with Haptic Toolkits," ACM Symposium on Interactive 3D Techniques, pp.179-190, 2001.
- [20] G. Celniker, D. Gossard, "Deformable curve and surface finite elements for free-form shape design," ACM SIGGRAPH proceedings, pp.257-266, 1991.
- [21] J. Bloomenthal, et al., "Introduction to Implicit surface," Morgan Kaufmann Publishers, Inc. 1997.
- [22] Sean Mauch, "A Fast Algorithm for Computing the Closest Point and Distance Transform," Technical Report at Caltech. <http://www.its.caltech.edu/~sean/>
- [23] Arthur D. Gregory, Ming C. Lin, et al. "H-Collide: A Framework for Fast and Accurate Collision Detection for Haptic Interaction," IEEE Virtual Reality proceedings, pp.119-125, 1999.
- [24] A. Yoshitaka, T. Kumano, K. Ogino, "Intermediate Representation for Stiff Virtual Objects," IEEE Virtual Reality Annual Symposium, pp.203-210, 1995.
- [25] V. Hayward, B. Armstrong, "A New Computational Model of Friction Applied to Haptic Rendering," Experimental Robotics, LNCS 250, pp. 404-412, 2000.
- [26] Laehyun Kim, Gaurav S. Sukhatme, Mathieu Desbrun, "Haptic Editing for Decoration and Material Properties," 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.213-221, 2003.
- [27] Ken Perlin, "An Image Synthesizer," ACM SIGGRAPH proceedings, vol 19, No 3, pp.287-296, 1985.

김 래 현



1994년 한양대학교 금속공학과 학사. 1996년 연세대학교 전산학과 석사. 2003년 University of Southern California, 전산학과 박사. 1996년~1999년 한국과학기술연구원(KIST) 위촉 연구원. 2003년~현재 한국과학기술연구원(KIST) 연구원. 관심분야는 햅틱스(Haptics), 컴퓨터 그래픽스(computer graphics), 인간-컴퓨터 인터랙션(HCI-Human computer interaction), 가상 현실(Virtual Reality)

박 세 형



1977년 서울대학교 기계설계학과 학사. 1984년 Cornell 대학교 기계공학과 석사. 1992년 KIAST 정밀기계과 박사. 1980년~현재 한국과학기술연구원(KIST) 연구원, 선임연구원, 책임연구원. 관심분야는 형상설계(Geometric modeling), 인간-컴퓨터 인터랙션(HCI-Human computer interaction), 역설계(Reverse Engineering), NC 프로그래밍(NC Programming)