

◆특집◆ Intelligent HCI 를 위한 TSI 기술

햅틱 렌더링 기술과 응용 연구

김래현*, 박세형*, 하성도*

Haptic Rendering Techniques and Applications

Laehyun Kim*, Se Hyung Park* and Sungdo Ha*

Key Words : Haptic interface (햅틱 인터페이스), Haptic rendering (햅틱 렌더링), Haptic editing (햅틱 저작), Haptic sculpting (햅틱 조각), Human Computer Interface(휴먼 컴퓨터 인터페이스)

1. 서론

햅틱 인터페이스는 햅틱 장치를 통해 사용자가 직접 가상의 3 차원 모델을 만지고, 색깔을 하고, 모양을 바꿀 수 있게 함으로써 실제 세계에서와 같은 자연스런 인터페이스를 제공한다. 햅틱 인터페이스는 이렇게 촉감을 통해 가상 환경과 상호 작용을 할 수 있도록 지원한다. 촉감은 다른 감각, 즉 시각과 청각과는 달리 가상 환경과 정보와 에너지를 동시에, 양방향으로 주고 받기 때문에 시스템의 안정화가 중요하고 빠른 속도로 물리적인 감각을 그대로 재현해야 하는 어려움이 있다.

가상의 물체와 접촉 시 반력을 위한 힘 벡터를 계산하는 과정을 햅틱 렌더링이라 한다. 햅틱 렌더링 과정에서 시스템의 안정성과 물체의 딱딱한 표면을 적당한 수준으로 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 지오메트릭 모델과 볼륨 모델을 혼합하여 이 두 모델의 장점만을 이용한 하이브리드 형태의 가상 모델을 사용하였다. 햅틱 렌더링의 핵심 과정인 빠른 충돌검사와 반력 계산을 위해서 볼륨 모델을 사용하였고, 효과적인 비주얼 디스플레이를 위해서는 지오메트릭 모델을 사용하였다.

또한 개발된 하이브리드 기반의 햅틱 렌더링을 이용한 다양한 응용도 소개하고자 한다. 먼저, 햅틱 장치를 통해 직접 가상의 물체 표면에 페인팅을 하거나 촉감을 느낄 수 있도록 재질을 부여하는 등의 다양한 비주얼/햅틱 효과를 구현할 수 있는 햅틱 에디팅 기술, 가상 모델을 조각하여 원하는 모양으로 만들 수 있는 햅틱 조각 기술과 다양한 비주얼 효과, 이 기술을 응용한 치과 치료 시스템 등을 보여주고자 한다. 마지막으로 시각, 청각, 그리고 촉각이 같은 공간에서 디스플레이 될 수 있도록 하는 햅틱 워크벤치를 소개하도록 한다.

본 연구에 사용된 시스템은 듀얼 제온 CPUs, 1 GB 메모리, ATI FireGL X1 256 비디오 카드를 장착한 PC 를 사용하였고 햅틱 디바이스는 SensAble사의 3DOF PHANToM Premium 1.5⁹ 사용하였다.

2. 햅틱 렌더링을 위한 반력 모델

본 연구에서는 빠르고 정확한 햅틱렌더링을

* 한국과학기술연구원 시스템 연구부
Tel. 02-958-(6726, 5643, 5647), Fax. 02-958-5609
Email {laehyunk, sehyung, s.ha} @kist.re.kr
휴먼 컴퓨터 인터페이스, 햅틱 인터랙션, 컴퓨터 그래픽스, 형상 설계 및 지능화 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

구현하기 위해 볼륨 간접 표면을 사용하였다. 햅틱 렌더링은 크게 충돌검사, 반력 벡터 계산, 그리고 힘 제어 단계로 나눌 수 있다.

2.1 데이터 모델

볼륨 간접 표면은 기존의 지오메트리 모델로부터 3 차원 그리드 상의 각 포인트에서 모델 표면까지의 최단 거리를 샘플링함으로써 얻을 수 있다. 본 연구에서는 Mauch 가 제안한 빠르고 정확한 최 근접점 변환 (Closest Point Transform) 알고리즘¹⁰을 사용하였다 (fig. 1).

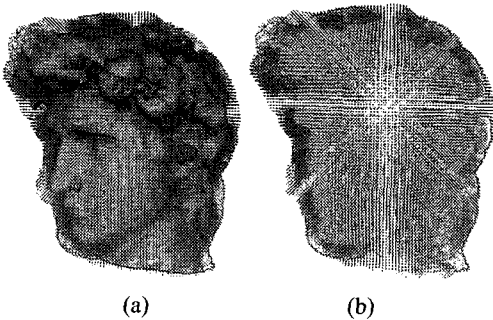


Fig. 1 Model conversion from geometric model (david) into volumetric implicit surface using Mauch's closest point transform algorithm. (a) geometric model and its volumetric model. (b) volumetric implicit surface only

볼륨 간접 표면에서 실제 햅틱 렌더링에 필요한 정보는 fig. 2 에서처럼 단지 표면을 둘러싼 부분의 포텐셜 필드이다. 포텐셜 필드는 각 점에서 간접 표면까지의 상대적인 거리에 비례하여 -1 에서 1 사이의 스칼라 값을 갖는다. 만약 햅틱 툴팁이 이 범위 바깥에 있으면 반력 없이 자유롭게 툴을 움직일 수 있다.

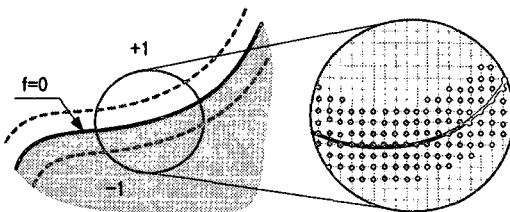


Fig. 2 Data model based on a volumetric implicit surface for haptic rendering

볼륨 데이터의 3 차원 그리드의 한 방향의 크기가 n 일 때 메모리 복잡도는 $O(n^3)$ 이다. 하지만 실제 햅틱 조각 과정에 필요한 정보는 단지 물체의 표면의 안과 바깥의 인접한 포텐셜 필드이다. 따라서 본 시스템에서는 과도한 메모리 사용을 피하기 위하여 볼륨 데이터를 효율적을 저장하고 관리하기 위해 옥트리 기반의 데이터 구조를 도입하였다.

2.2 충돌 검사

햅틱 장치의 툴 팁이 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 받는다². 하지만, 간접 표면에서는 포텐셜 값의 변화만으로 쉽고 빠르게 충돌을 검출할 수 있다.

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

2.3 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 8 개의 그리드 점들의 기울기(gradient)를 각각 계산하고 3 차원 선형 보간법을 통해 툴 팁 위치에서의 기울기 값을 구한다. 최종적으로 구한 값이 힘 벡터의 방향이 된다 (fig. 2). 이런 방법은 Avila¹ 이 볼륨데이터를 햅틱 렌더링 시 사용한 방법과 유사하다.

반면에 기존의 대부분의 알고리즘¹⁴에서 힘 벡터의 크기는 포텐셜 값에 비례하게 대략적으로 계산함으로써 복잡한 표면을 정확하게 렌더링 할 수 없다. 결과적으로 사용자에게 보여지는 표면보다 더 부드럽게 느껴지는 단점이 있다 (fig. 3(a)).

본 시스템에서는 Avila 의 방식과 달리 툴 팁의 위치로부터 계산된 벡터의 방향으로 가상의 광선(ray)을 쏘아서 표면과 만나는 점을 계산하였다. 이때 가상의 광선을 따라 새로운 점이 표면을 지

나게 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 (fig. 3(b)). 따라서 좀더 정확하게 표면을 시뮬레이션 할 수 있다.

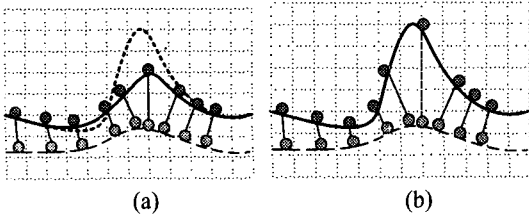


Fig. 3 Computation of haptic vector. (a) Avila's approach using potential value. (b) our approach using ray tracing method

힘 벡터의 방향과 크기를 결정한 후, 안정된 힘 제어를 위한 스프링-댐퍼 모델¹³을 사용하여 최종적인 반력을 계산한다. 이때 가상의 댐퍼는 불 연속적 시간의 샘플링에서 오는 여분의 에너지를 소모 시킴으로 햅틱 장치를 안정하게 제어하는 역할을 한다. 시스템은 결과되는 힘 벡터를 이용하여 VCP와 툴 팁이 같은 위치에 있도록 노력한다.

$$\vec{F} = (P_c - P_t) * k - (\dot{P}_c - \dot{P}_t) * b \quad (1)$$

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 툴 팁의 위치와 속도, k 은 강도, 마지막으로 b 은 점성을 나타낸다. 스프링 강도는 표면의 딱딱한 정도를 나타내고 점성은 시스템의 진동을 막아준다.

3. 햅틱 에디팅 기법

이 장에서는 햅틱 장치를 통해 직접 가상의 물체 표면에 페인팅을 하거나 다양한 촉감을 느낄 수 있도록 재질을 부여하는 등의 다양한 비주얼/햅틱 효과를 구현할 수 있는 햅틱 에디팅 기술을 소개하고자 한다⁶.

3.1 햅틱 페인팅

기존의 3차원 모델링 기법에서 사용하는 텍스처 매핑방법은 2차원 이미지를 3차원 모델위에 매핑하는 과정에서 텍스처 변형(texture distortion)이 발생하고 사용자가 복잡한 매핑 함수를 고려해야만 한다. 반면에 햅틱 페인팅 기법에서는 직접 가상 모델의 원하는 위치에 색을 칠함으로써 텍스처 변형을 줄이고 직관적인 인터페이스를 제공한다.

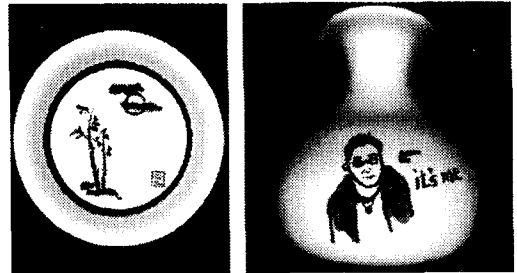


Fig. 4 Examples created by haptic painting system

사용자가 그림 붓에 해당하는 햅틱 장치의 스타일러스를 통해 원하는 부위에 색을 칠하면, 붓의 볼륨안에 있는 3차원 폴리곤들을 찾아서 이에 대응되는 2차원 텍스처 폴리곤을 하나씩 래스터라이제이션 한다. 이때 텍스처 폴리곤의 각 픽셀의 색상 값은 바탕색과 가상 붓의 색을 알파 블렌딩하여 계산한다. 붓의 크기는 직관적으로 사용자가 3차원 모델 위에 가한 물리적인 힘에 비례하여 일정 크기까지 커지게 된다. fig. 4에서 햅틱 페인팅 시스템을 이용해 에디팅한 예들을 보여준다.

3.2 재질 에디팅

사용자가 의도에 따라 모델의 부분적 재질(마찰력, 거칠기 등)을 다르게 만들 수도 있다. 햅틱 페인팅과 비슷하게 원하는 부위에 스타일러스를 이동하여 미리 지정한 재질을 부여하고 이를 느껴 볼 수 있다. 이때 3차원 가상 모델의 부분 재질 정보는 볼륨 데이터에 저장된다. 햅틱 렌더링시 스타일러스가 포함된 셀의 재질 정보를 보간하여 부분적인 재질의 느낌을 재생한다.

fig. 5에서 적색으로 표시된 부분은 마찰력이 높은 부분이고 청색 부분은 마찰이 거의 없는 표면을 보여준다.

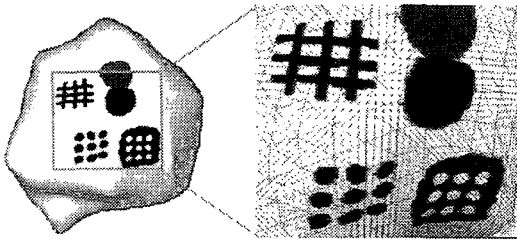


Fig. 5 Material editing through haptic interface

4. 햅틱 조각 기법

이 장에서는 볼륨 기반의 햅틱 조각 시스템의 기술들을 소개하고자 한다⁷.

4.1 가상 모델의 변형

가상 조각 툴이 볼륨 간접 표면의 가상 모델에 적용되었을 때 결과되는 새로운 표면을 나타내기 위해 조각 툴 주변의 포텐셜 값들이 수정이 된다. 이때 사용되는 모델 수정의 룰은 깎아내기(carving)와 덧 붙이기(adding) 동작에 따라 결정되는 CSG(Constructive Solid Geometry) 불리언 조작이 된다.

햅틱 조각 시스템에서 한가지 문제는 햅틱 시뮬레이션은 매우 빠르게 (1KHz) 이루어 지고 반면, 비주얼 시뮬레이션은 상대적으로 느리게 (약 30Hz) 갱신 되므로 이런 성능의 차이가 변형되는 가상 모델의 표면을 직접 햅틱 시뮬레이션 하기가 어렵다.

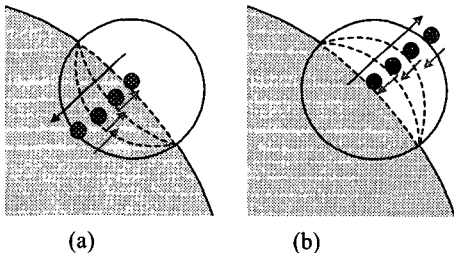


Fig. 6 Model modification using an intermediate implicit surface (blue arrow: tool movement, red arrow: responsive force vector). (a) carving operation, (b) adding operation.

본 논문에서는 변형되는 표면을 부드럽게 느

낄 수 있도록 중간 간접 표면 (intermediate implicit surface)을 만들어 햅틱 프로세스에서 현재 표면과 변형 후 예상되는 목표 표면 사이에 애니메이션 하였다 (fig. 6). 시스템은 이 중간 간접 표면을 기반으로 햅틱 렌더링 함으로써 자연스런 느낌을 사용자에게 전달 할 수 있다.

이때 변형된 모델의 메쉬 정보를 효과적으로 생성하기 위해 표면의 복잡도에 따라 생성되는 폴리곤의 수가 결정되는 Velho¹의 비균일 메쉬 생성 (adaptive polygonization) 방법을 도입하였다. 새로운 메쉬의 생성은 매 비주얼 프레임이 시작될 때 그 순간의 중간 간접 표면을 기반으로 이루어 진다. fig. 7에서는 햅틱 조각 시스템의 예를 보여준다.

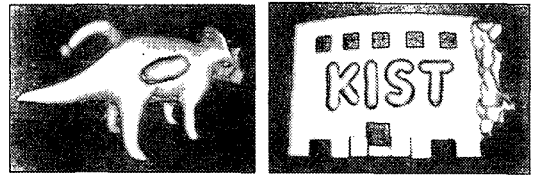


Fig. 7 Examples created by haptic sculpting system

4.2 비주얼 효과

실시간 볼륨 조각시스템에서 비주얼 효과를 위해 앞서 설명한 비 균등 메쉬 생성 기법을 이용한 솔리드 텍스처링과 페인팅 기법을 소개한다.

4.2.1 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 Perlin¹¹이 제시한 솔리드 텍스처를 도입하였다. 솔리드 텍스처는 모델과 텍스처 정보가 독립되었기 때문에 텍스처 변형은 발생하지 않는다.

본 연구에서는 각 그리드 점에서 Perlin의 노이즈 함수를 통해 샘플링한 노이즈 값을 이용해 메쉬 생성시 꼭지점의 컬러를 결정할 때 사용함으로써 간략화 된 솔리드 텍스처를 구현 하였다. 생성되는 텍스처의 질을 높이기 위해 텍스처의 복잡도에 반영하여 메쉬를 생성함으로써 좋은 질의 솔리드 텍스처를 얻었다. 즉, 폴리곤의 에지를 따라 색깔의 차이가 원하는 정확도에 이르기 까지 반복적으로 작게 나뉘어 진다 (fig. 8).

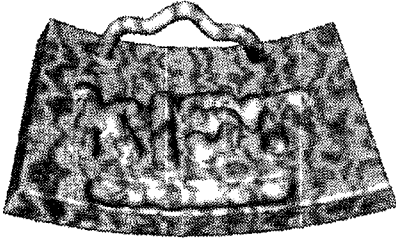


Fig. 8 A marble-like solid texturing. Mesh is adapted to the texture complexity

4.2.2 메쉬 기반의 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 변질을 방지하기 위해 메쉬가 생성될 때 색깔의 복잡도를 반영하게 된다. fig. 9 에서 컬러 경계 부분에서는 작은 크기의 폴리곤들로 이루어져 있어 화면에서 경계가 뚜렷이 볼 수 있다.

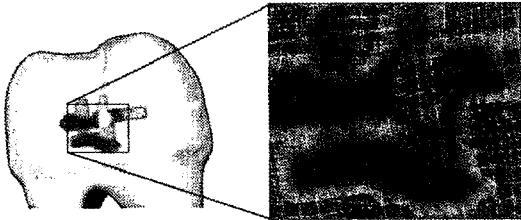


Fig. 9 Mesh-based painting in which mesh is adapted to the color complexity

5. 햅틱 치과 훈련 시스템

이 장에서는 햅틱 인터페이스를 이용하여 치과생들이 임상에 필수적인 물리적인 경험을 제공하여 효과적으로 치과 치료 과정을 배울 수 있는 시스템을 소개하고자 한다.⁸

5.1 볼륨 재질 렌더링

볼륨 조각 과정에서 볼륨 데이터는 내부적용 다양한 재질(경도, 마찰력, 색깔 등)을 가지고 있고 이를 반영하여 반력이 계산되어야 한다. 예를 들면, 치아모델의 경우 가장 단단한 법랑질, 단단하지만 기공이 많은 상아질, 혈관과 신경조직이

있는 치수, 아말감, 충치부위 등의 여러 재질의 구조를 가지고 있다. 이처럼 볼륨 재질을 효과적으로 저장하고 빠르게 햅틱 렌더링 하기 위해 별 별도의 볼륨 구조에 이런 재질들을 저장하여 햅틱 렌더링 시 사용된다. 본 시스템에서 볼륨의 재질은 변형되는 속도로 시뮬레이션 되었다. 예를 들면, 단단한 법랑질 부분을 깎아내는 속도는 상아질의 경우보다 많은 저항을 받으므로 느리게 된다. 또한 가지는 썩은 충치 부위를 정확하게 진단하기 위해 가상의 치과 익스프로러 (dental explorer) 를 사용하게 되는 이때 썩은 부위의 촉감은 마치 부드러운 치즈를 찌르는 것 같은 느낌을 준다 (fig. 10).

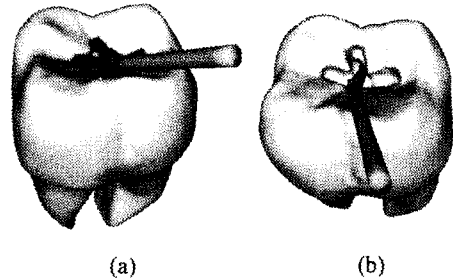


Fig. 10 Dental probing to diagnose carious lesions. (a) initial probing before a preparation (b) detecting if all caries has been removed

5.2 드릴링 시뮬레이션

치과 치료를 위해서 충치 부분을 치과 드릴을 이용하여 제거하는 과정이 있다. 본 시스템에서는 앞서 설명한 햅틱 조각 기술을 적용하여 가상의 치아를 깎아내는 시뮬레이션을 구현하였다. Fig.11 에서 예를 보여준다.

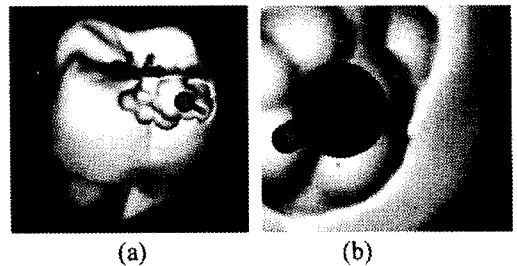


Fig. 11 Dental drilling and debris simulation. (a) drilling operation. (b) debris simulation

5.3 파편 시뮬레이션

치과 드릴을 이용해 가상의 치아의 썩은충치 부위를 제거하는 과정에서 가상 툴 주변에서 치아의 부스러기가 나오게 된다. 이 파편들을 파티클 시스템 (particle system) 을 이용하여 시물레이션 하였다. 각 파티클은 무게, 크기, 속도 그리고 간단한 동적 움직임을 가지고 있다. 무게는 시간에 따라 줄어 들어 일정량 이상으로 적어지면 소멸하게 된다. 각 파티클들의 정보는 이중 연결 자료구조로 관리된다. fig. 11(b)에서 파편 시물레이션의 한 장면을 보여준다.

6. 햅틱 워크 벤치

기존의 햅틱 시스템에서는 비주얼 공간과 햅틱 공간이 별도로 존재하여 사용자가 두 공간을 상호 매칭시켜서 작업을 수행하였다. 하지만 보다 직관적인 인터페이스를 위해서는 비주얼, 사운드, 그리고 햅틱 공간이 일치하여야 한다. 이를 위해 이 세가지 감각을 위한 공간을 하나로 통합하여 제공하는 햅틱 워크 벤치를 개발하였다. fig. 12 에서 처럼 워크 벤치 상단에 설치된 모니터의 화면이 거울에 비춰져 사용자가 햅틱 공간에 방해물이 없이 가상 환경과 상호 작용 할 수 있다.

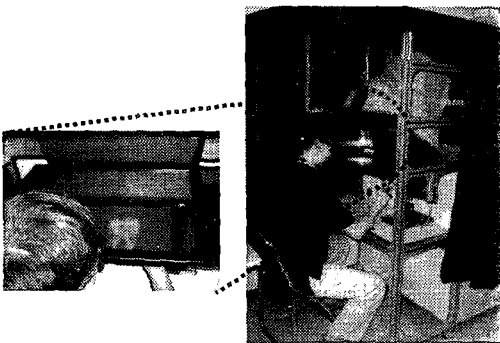


Fig. 12 Haptic work bench to register visual, auditory and haptic space.

7. 결론

본 논문에서는 KIST 에서 수행중인 햅틱 렌더링 기술과 이 기술을 바탕으로 한 응용을 소개하였다. 햅틱 렌더링 기술은 지오메트리와 볼륨 모델의 장점들을 이용한 하이브리드 표면을 사용하

여 기존의 알고리즘들의 단점들을 개선하였다. 또한 가상의 3 차원 모델에 직접 페인팅을 하거나 다양한 재질을 직관적으로 부여함으로써 효과적인 햅틱 에디팅 기술을 구현하였다. 이와 더불어 직접 3 차원 모델을 깎거나 덧붙이는 햅틱 조각 기술을 개발하여 치과 치료 시스템에 적용하여 햅틱 기술의 상용화의 가능성을 열었다고 할 수 있다. 마지막으로 좀더 몰입감과 직관력을 줄 수 있는 햅틱 워크벤치를 개발하였다. 햅틱 렌더링 분야가 세계적으로 아직 시작 단계이지만 가까운 미래에는 산업 전 분야에 많은 응용이 기대되고 있다. KIST 에서 연구되고 있는 햅틱 렌더링 기술들은 세계적 수준으로써 앞으로의 이 분야의 연구를 주도해 나가고자 한다.

후 기

본 논문은 한국과학기술연구원의 기관고유연구사업인 “Tangible Space Initiative 기술 개발” 연구과제의 연구결과임을 밝힌다

참고문헌

1. Avila, R. S., Sobierajski, L. M., “A Haptic Interaction Method for Volume Visualization” IEEE Visualization proceedings, pp.197-204, 1996.
2. Gregory, D. Arthur, Lin, C. Ming, Gottscha, S, Taylor, R, “H-Collide: A Framework for Fast and Accurate Collision Detection for Haptic Interaction,” IEEE Virtual Reality proceedings, pp.119-125, 199.9
3. Hayward, V., Armstrong, B., “A New Computational Model of Friction Applied to Haptic Rendering,” Experimental Robotics, LNCS 250, pp. 404-412, 2000.
4. Iwata, H., Noma, H., “Volume haptization” IEEE Virtual Reality Symposium on Research Frontiers, pp.16-23, 1993.
5. Kim, Laehyun, Kyrikou, Anna, Sukhatme, S. Gaurav, Desbrun, Mathieu, “An Implicit-based Haptic Rendering Technique,” IEEE IROS proceedings, pp.2943-2948 2002.
6. Kim, Laehyun, Sukhatme, S. Gaurav, Desbrun, Mathieu, “Haptic Editing for Decoration and Material Properties,” 11th Symposium on Haptic

Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.213-221, 2003.

7. Kim, Laehyun, Sukhatm,e S. Gaurav, Desbrun, Mathieu, "A Haptic Rendering Technique Based on Hybrid Surface Representation," IEEE computer graphics and applications, Vol. 24(2), pp.66-75, 2004.
8. Kim, Laehyun, Park, Se Hyung, "Haptic Interaction and Volume Modeling Techniques for Realistic Dental Simulation," the 5th Korea-Israel Bi-National Conference on Geometric Modeling and Computer Graphics, pp.25-29, 2004.
9. Massie, H. Thomas, Salisbury, J. K., "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.
10. Mauch ,Sean, "A Fast Algorithm for Computing the Closest Point and Distance Transform," Technical Report at Caltech.
11. Perlin, Ken, "An Image Synthesizer," ACM SIGGRAPH proceedings, vol 19, No 3, pp.287- 296 1985.
12. 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.
13. Yoshitaka, A., Kumano, T., Ogino K., "Intermediate Representation for Stiff Virtual Objects", IEEE Virtual Reality Annual Symposium, pp.203-210 1995.
14. Zilles, C. Salisbury J. K., "A Constraint-based God-object Method For Haptic Display," Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.146-150, 1994.