

실감형 모델링을 위한 볼륨 햅틱 렌더링 알고리즘

정지찬*, 박준영**

Volume Haptic Rendering Algorithm for Realistic Modeling

Ji Chan Jung* and Joon Young Park**

ABSTRACT

Realistic Modeling is to maximize the reality of the environment in which perception is made by virtual environment or remote control using two or more senses of human. Especially, the field of haptic rendering, which provides reality through interaction of visual and tactual sense in realistic model, has brought attention. Haptic rendering calculates the force caused by model deformation during interaction with a virtual model and returns it to the user. Deformable model in the haptic rendering has more complexity than a rigid body because the deformation is calculated inside as well as the outside the model. For this model, Gibson suggested the 3D ChainMail algorithm using volumetric data. However, in case of the deformable model with non-homogeneous materials, there were some discordances between visual and tactual sense information when calculating the force-feedback in real time. Therefore, we propose an algorithm for the Volume Haptic Rendering of non-homogeneous deformable object that reflects the force-feedback consistently in real time, depending on visual information (the amount of deformation), without any post-processing.

Key words : Volume Haptic Rendering, Non-Homogeneous Deformable Object, 3D ChainMail algorithm

1. 서 론

컴퓨터 그래픽스에서는 3차원 물체의 물체를 이용하여 사용자가 눈으로 볼 수 있는 이미지를 만들어내는 과정을 렌더링이라 부른다. 마찬가지로, 여러 가지 다양한 물체의 물체를 기반으로, 사용자가 촉감을 통해 느낄 수 있는 자극을 생성해내는 일련의 과정을 햅틱 렌더링(haptic rendering)이라고 한다^[1]. 일반적인 햅틱 렌더링의 과정을 좀 더 자세히 설명하면 다음과 같다. Fig. 1에 있는 순서도가 햅틱 렌더링의 5단계 과정을 요약하고 있다.

1단계에서는 햅틱 인터페이스를 사용하고 있는 사용자의 움직임을 측정한다. 예를 들면, 햅틱 인터페이스에서 사용되는 펜 모양의 입력장치 위치를 햅틱 인터페이스에 장치되어 있는 위치 센서 등을 통해서 추

정한다. 2단계에서는 이 도구의 위치를 가상 물체의 정보와 비교하여, 사용자가 쥐고 있는 도구가 가상물체와 접촉을 하고 있는지의 여부를 판단한다. 3단계에서는 사용자가 접촉하고 있는 가상 물체의 모양, 경도, 마찰, 질감 등과 같은 여러 가지 속성을 고려하여 햅틱 인터페이스를 이용하여 사용자에게 전달해 주어야 하는 적절한 햅틱 자극인 햅틱 인터페이스가 가하

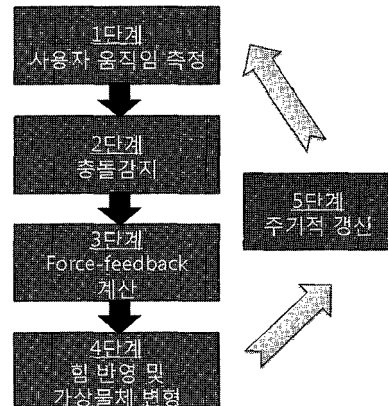


Fig. 1. Process of Haptic Rendering.

*학생회원, 동국대학교 산업시스템공학과
**교신저자, 중신회원, 동국대학교 산업시스템공학과
- 논문투고일: 2009. 03. 24
- 논문수정일: 2010. 01. 08
- 심사완료일: 2010. 02. 17

는 힘 혹은 움직이는 위치 등을 계산한다. 4단계에서는 3단계에서 계산된 햅틱 자극을 햅틱 인터페이스를 통해서 생성시킨다. 마지막으로, 사용자와 가상 물체와의 접촉으로 인해서 가상 물체의 상태가 갱신되어야 하는 경우 이를 적절하게 계산해서 가상 물체의 상태를 변화시킨다. 이러한 5단계의 과정은 매우 빠른 갱신 주기로 반복되는데 이는 사람에게 실제와 같은 안정적인 힘을 전달해 주기 위하여, 물체의 힘을 1 kHz 이상으로 계산하여 사용자에게 전달해 주어야 하기 때문이다^[2]. 이와 같이, 햅틱 렌더링은 매우 복잡한 계산을 거치는 일련의 과정이며, 햅틱스(haptics) 연구에서 가장 중요한 위치를 차지하고 있는 연구 분야 중 하나이다.

인간이 촉감을 통하여 인지하는 물리적 성질은 매우 다양하다. 이 중 햅틱 렌더링에서 필요한 가장 기본적인 속성은 물체의 모양과 경도이다. 특히 가상 수술 시뮬레이터와 같은 가상훈련 시스템에서는 사용자에게 실제 인체 장기를 다루고 있는 것과 같은 사실감을 부여해야만 하므로 그 물체의 물리적 특성을 고려한 햅틱 시뮬레이션이 실시간으로 제공될 수 있도록 이를 고려한 햅틱 렌더링 알고리즘이 필요하다.

2. 볼륨 햅틱 렌더링 알고리즘

일반적으로 물리적 특성을 고려한 시뮬레이션은 질

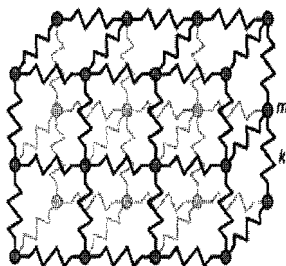


Fig. 2. Mass-spring model.

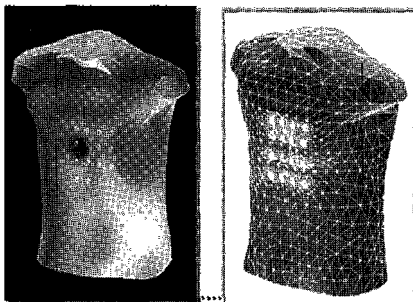


Fig. 3. FEM(Finite Element Method) model.

량-스프링계(mass-spring)를 이용한 모델(Fig. 2)과 유한요소해석(FEM; finite element method)을 이용한 방법(Fig. 3) 등이 있다.

질량-스프링계를 이용한 모델은 원형 데이터의 전처리 과정을 통해 근사화나 간략화를 통한 모델링이 필요하다. 따라서 실제 물체에 비해 물리적 사실감이 떨어지고 물체의 표면데이터만을 주로 사용하므로 물체의 내부정보 반영에 따른 사실감 있는 힘 되돌림(force-feedback) 적용이 어려운 단점이 있다^[3]. 또한 유한요소 해석의 경우에는 보다 현실적인 모델화는 가능하나 실시간 계산이 어렵다는 단점이 있다^[4]. 이를 해결하고자 여러 가지 알고리즘들이 제안되어 왔는데 그 중 볼륨 데이터를 이용한 볼륨 햅틱 렌더링(volume haptic rendering) 방법이 대표적이다.

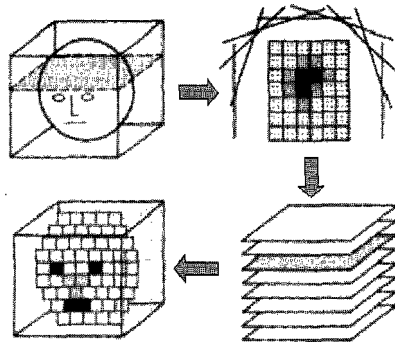


Fig. 4. Volume rendering.

볼륨 햅틱 렌더링이란 물체의 햅틱 렌더링 과정을 처리하기 위해 Fig. 4와 같이 지오메트리 모델을 복셀(Voxel)로 표현하는 방법이다. 이 방법은 지오메트리 모델로 표면(surface) 정보만을 사용하는 방법과 달리 정보의 손실이 없고, 물체의 내부 정보들까지 표현이 가능하여 사용자에게 좀더 사실적인 시각정보를 전달해 줄 수 있다. 하지만 아직도 햅틱 분야에서는 햅틱 처리시간 조건을 만족시키는 것이 상당히 어렵기 때문에, 표면데이터를 주로 사용하고 있다.

그러나 이런 표면데이터를 이용한 표면 햅틱 렌더링을 사용할 때 적용분야에 따라 실제감을 전달해 주는 것이 어려울 수 있다. 예를 들어 촉진법(palpaton: 손으로 환부를 촉진하여 물체의 다른 성질을 구별함으로써, 이상유무를 판별하는 방법)처럼 표면뿐 아니라 물체의 내부정보에도 관심이 있는 경우, 표면 햅틱 렌더링을 사용한다면 사용자는 실제의 물체를 만지는 것과 같은 현실적인 힘을 얻을 수 없다. 따라서 볼륨 데이터를 이용한 볼륨 햅틱 렌더링 방법이 필요하다.

3. 3D ChainMail 알고리즘

볼륨데이터를 가진 가상의 물체를 실시간으로 처리하기 위하여 Gibson은 3D ChainMail 알고리즘^[6]을 제안하였다.

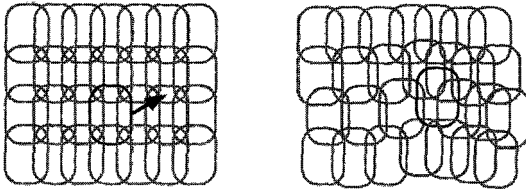


Fig. 5. Deformation of 2D ChainMail when the selected link is moved [Gibson '97].

볼륨 물체(Volumetric object)들의 햅틱 렌더링 적용을 위해 제안된 3D ChainMail의 모델 구조는 Fig. 5의 2차원 ChainMail 형태가 3차원 볼륨요소들(Volume elements)로 연결되어 있는 물체라고 생각할 수 있다.

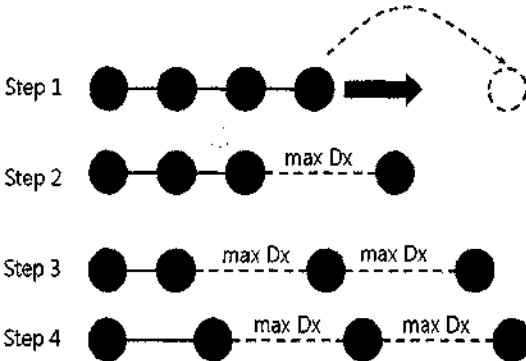


Fig. 6. Deformation of a 1D chain when the selected link is moved to the right by dx .

실행 방법은 ChainMail을 1차원으로 표시한 Fig. 6에서 알 수 있는데, 만일 외부 힘에 의해 1개의 볼륨 요소가 움직이게 되면 이는 이웃의 볼륨요소에만 영향을 주어 움직이게 되고 이웃 볼륨요소가 이동 영역 한계에 다다르게 되면 남은 힘은 그 다음 이웃하는 볼륨요소에 영향을 준다. 이는 한 개의 볼륨요소에서 변형이 일어나면 2D에서는 4방향(좌, 우, 앞, 뒤)으로, 3D에서는 6방향(좌, 우, 앞, 뒤, 위, 아래)에 존재하는 6개의 이웃 볼륨요소들에 영향을 주어 변형이 일어난다.

따라서 Fig. 7과 같이 이웃하는 두 개의 볼륨요소들의 Dist 값이 $minDx$ 와 $maxDx$ 사이라면 그 이

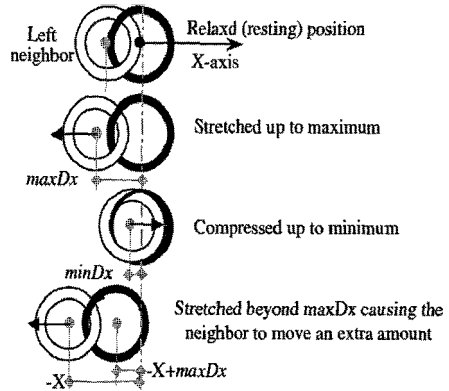


Fig. 7. 1D chain model having two chain elements.

웃 요소는 움직이지 않고 만약 $maxDx$ 보다 크거나 $minDx$ 보다 작으면 이웃하는 요소는 영향을 받아 움직이므로 변형이 일어나는 요소는 변형 방향에 따라 $maxDx$ 이하로 신장(stretched)되고 $minDx$ 이상으로 압축(compressed)된다. 따라서 같은 크기의 복셀 데이터를 통해 볼륨 햅틱 렌더링을 구현하는 ChainMail 알고리즘은 물체의 물리적 속성 값이 $maxDx$ 와 $minDx$ 의 거리 함수에 의해 정해진다. 즉, 물체의 경도는 이러한 거리 함수에 의해 제어된다. 예를 들어 $minDx$ 와 $maxDx$ 의 차이가 거의 없다면, 물체는 매우 단단한 성질을 갖게 된다. 결과적으로 3D ChainMail 알고리즘은 물체에서 변형이 전체적으로 발생하지 않고 국부적으로 발생하게 되므로 매우 많은 볼륨 요소로 이루어진 물체의 빠른 햅틱 렌더링 계산에 적합하다^[7].

그러나 Gibson의 3D ChainMail 알고리즘은 볼륨 요소들의 크기가 모두 일정하다는 가정 하에서 물체들의 변형이 일어난다. 따라서, 사람 인체와 같이 뼈, 살, 혈관 등 다른 밀도를 가진 객체들로 구성된 비균질한 물체(non-homogeneous object)에 관한 고려가 없다^[6]. 이는 햅틱 렌더링에서의 가장 중요한 요소인 사실감을 극대화하기 위한 조건으로서 매우 커다란 단점이 될 수 있다.

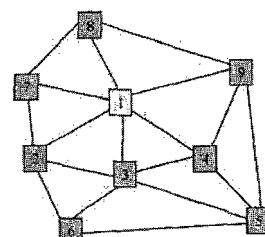


Fig. 8. Linked elements.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 Li and Brodlie^[9]와 Schill^[10]은 비균질한 물체의 햅틱 렌더링을 위해 기본 복셀 데이터 셋(Voxel Data set)을 재료의 밀도에 따라 개별 요소 크기를 다르게 하여 해결하고자 했다. 그러나 이는 개별 요소 크기의 차이에 의해 한 방향으로 영향을 받는 이웃 요소의 수가 2개 이상이 될 경우가 존재하므로 힘 되돌림 계산과정에서의 복잡도 증가로 햅틱 처리 시간내의 계산이 어렵다. 따라서, 그들은 물체의 변형에 따른 힘 되돌림 계산 순서를 정한 Linked elements(Fig. 8)를 제안하였고, 이를 통해 힘 되돌림 계산과정에서의 복잡도를 줄였다. 그러나 이는 볼륨요소의 시각적 변형 정보와 그에 따른 정확한 촉각정보(force-feedback)와의 불일치를 발생시킨다.

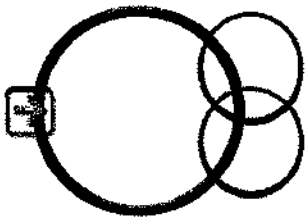


Fig. 9. Two neighboring elements influenced toward one direction.

왜냐하면 실시간 햅틱 계산조건(1 kHz 이상)을 만족시키기 위해 Linked element 순서에 따라 계산되는 힘 되돌림은 Fig. 9와 같이 크기가 다른 볼륨요소들이 한 방향으로 동시에 변형이 일어나는 경우 두 개의 거리함수 계산을 순차적으로 계산한다. 따라서 사용자는 Fig. 9와 같이 동시에 변형이 일어나고 있는 한 가지 시각 정보에 순차적으로 계산된 두 가지 다른 촉각 정보인 힘 되돌림을 제공한다. 이는 햅틱 렌더링상의 디스플레이 프로세스와 햅틱 프로세스 상의 계산 시간상의 차이에 의해 생기는 결과로 시각 정보와 촉각정보와의 불일치를 발생시켜 현실감을 떨어뜨리게 된다. 따라서 사용자에게 때에 따라 힘을 불연속적으로 혹은 큰 진동과 같은 촉각정보를 느끼게 한다. 그러므로 본 연구에서는 밀도가 다른 볼륨 요소들로 구성된 비균질 변형체(non-homogeneous deformable object)에서 실시간으로 시각적 정보에 따라 힘 되돌림을 일관되게 반영해주는 볼륨 햅틱 렌더링을 구현하고자 한다.

4. 제안된 알고리즘

볼륨 요소들의 크기를 같게 한 비균질 변형체에서

도 사용자에게 시각정보와 일치되는 촉각정보를 햅틱 렌더링 처리 시간 안에 제공하기 위한 기본 아이디어는 다음과 같다. 기존의 3D ChanMail 알고리즘에서 물체의 변형 시 힘 되돌림을 계산하는 거리함수에 물체를 구성하는 각 볼륨요소들의 밀도에 따라 다른 가중치를 부여하는 것이다. 이를 통해 물체의 변형 시 같은 힘에도 재료의 밀도에 따라 다른 변형이 일어나고 변형된 볼륨요소들의 거리만을 계산하면 쉽게 힘 되돌림을 계산할 수 있게 된다.

볼륨데이터는 복셀값의 형태에 따라 구분할 수 있는데 본 논문에서 다루는 복셀값은 다중량(multi-valued) 볼륨 데이터로 밀도, 밝기, 온도와 같이 측정 가능한 값으로 표현되는 데이터라 할 수 있다. 그러나 이러한 데이터의 크기는 매우 고용량으로 일부 고정밀 영상의 경우 크기가 1~2 GB에 이르는 경우도 있다^[11]. 따라서 이를 그대로 햅틱 모델로 사용하는 데에는 무리가 있다. 그러나 대부분의 비균질 햅틱 모델이 같은 밀도로 이루어진 여러 영역들로 구성되어 있는 점에 착안하여 영역들간의 경계를 찾아내, 각 영역별로 밀도에 따라 다른 가중치를 부여하고자 한다.

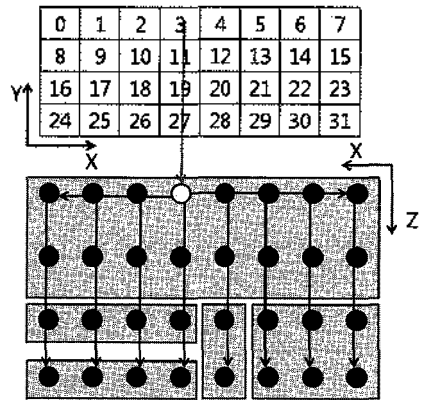


Fig. 10. Chain surface map.

경계부분을 찾는 방법은 먼저 표면 볼륨요소(Surface element)를 2차원 타일로 나누어 연속적 메모리 공간에 배치하여 Chain Surface Map(Fig. 10)을 만든다. 다음으로 변형이 시작되는 각 볼륨요소를 구성하는 복셀들의 밀도를 통해 변형 방향으로 볼륨요소의 밀도 값들을 구한다. 이를 통해 각 볼륨요소의 밀도를 사용자가 정의한 기준 값(threshold)과 비교하여 밀도 값의 크기가 급격히 변화하면 물질의 경계부분으로, 그 변화가 작으면 균질(homogeneous)영역으로 인식하여 같은 영역 내에서만 같은 가중치를 적용한다.

결과적으로 대상 물체를 사용자 조건에 따라 밀도 값이 일정한 여러 개의 레이어(layer)들로 구성할 수 있게 된다.

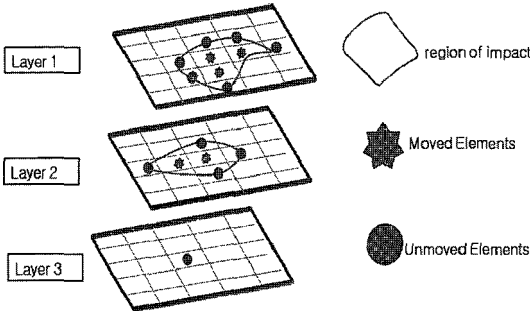


Fig. 11. Region of impact.

이렇게 구성된 각 레이어의 밀도 값은 0~1사이의 값으로 치환되어 레이어 별 가중치로 할당되고 모델이 단단해 질수록 0에 가까워지도록 한다. 이는 같은 힘에 의해서도 가중치에 따라 볼륨 요소들의 변형을 위한 이동거리가 달라지게 하기 위해서이다. 이를 통하여 우리는 밀도 값에 따라 다른 시각 정보와 촉각정보를 얻을 수 있게 된다.

따라서 변형은 볼륨요소의 거리함수와 각 레이어 요소들의 밀도에 의한 가중치에 의해 이루어진다. 이 때 각 레이어의 변형은 해당하는 요소의 좌표값 $[x = X(u, v), y = Y(u, v), z = Z(u, v)]$ 들이 최신 값으로 갱신되면서 진행된다. 갱신되는 $[Z(u, v) - Z(u', v)]$ 값이 $minDx$ 와 $maxDx$ 사이에 있으면 그 이웃 요소는 움직이지 않고 만약 $maxDx$ 보다 크거나(stretched) $minDx$ 보다 작으면(compressed) 이웃하는 요소가 영향을 받아 움직인다. 동시에 촉각정보 즉 힘 되돌림 계산은 Fig. 11과 같이 각 레이어의 변형 요소 개수로 정의되는, 'region of impact'를 통해 구한다.

즉, 각 레이어마다 최신으로 갱신된 Moved Elements를 통해 각 레이어의 Unmoved Elements를 알 수 있고 결과적으로 'region of impact'를 계산할 수 있다. 이 값이 해당 레이어의 새롭게 갱신되는 힘 되돌림 값으로 결정된다. 따라서 변형에 의해 새롭게 갱신되는 'region of impact' 값만을 계산하여 그 합계를 지속적으로 업데이트하면 힘 되돌림 계산을 햅틱 렌더링 처리 시간 조건 안에 할 수 있다.

결과적으로 변형은 각 레이어의 밀도 값에 의한 가중치와 볼륨요소들의 거리함수에 의한 이동에 의해 이루어진다. 이 때 각 볼륨요소들의 변형은 시각정보

에 의해 사용자에게 보여지고, 변형된 레이어들의 'region of impact' 값의 합에 의해 힘 되돌림으로 돌려준다. 즉, 밀도에 따라 시각적 변형과 그에 따른 일치된 촉각 정보로 사용자에게 현실감을 주게 된다.

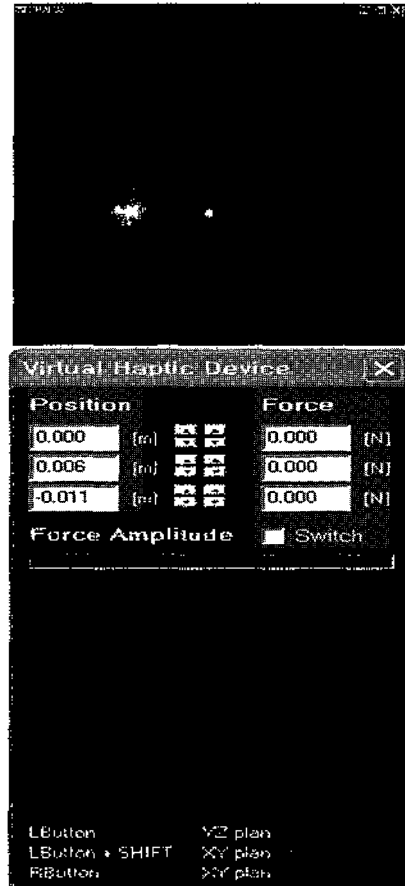


Fig. 12. CHAI 3D.

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

실험 시스템은 인텔 펜티엄 4 3.0Mhz, RAM 1024M, 그래픽 가속기 GeForce 6600GT에서 스탠포드 대학의 햅틱 렌더링 전용 시뮬레이션의 CHAI 3D 2.0^[2]을 활용하였고, 실험에 사용한 볼륨 데이터는 75×75의 원형 Chainmail 모델이다. 우리는 밀도 값에 따라 시각적 정보와 촉각적 정보가 달라지는지 알기 위해 밀도 값을 임의로 조정해 가며 실험하였다. Fig. 12는 구현된 프로그램의 초기 실행모습으로 위에 창은 햅틱 모델의 구현창이며, 아래쪽은 사용자의 가상 햅틱 디바이스(Virtual Haptic Device)로 햅틱모델을 사용자가 다루면서 힘 되돌림을 계산할 수 있다.

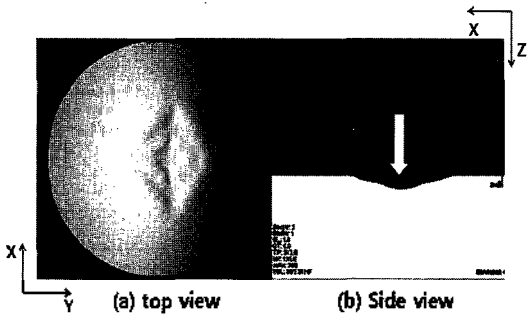


Fig. 13. Result of deformation of non-homogeneous model (1).

Fig. 13은 원형 비균질 변형체로 변형이 시작되는 중앙의 1개의 볼륨 요소와 그 이웃하는 볼륨요소의 밀도가 다른 물체이다. 그림에서 보듯이 Fig. 13(a)은 Z 축으로 변형이 일어난 모습으로 변형이 균질하게 이루어 지지 않음을 알 수 있다. 또한 Fig. 13(b)는 그 단면의 모습으로 밀도에 따라 다른 레이어로 정의되어 같은 힘에도 다른 가중치 적용을 받아 사용자에게 다른 시각적 정보를 전달해 줌을 알 수 있다.

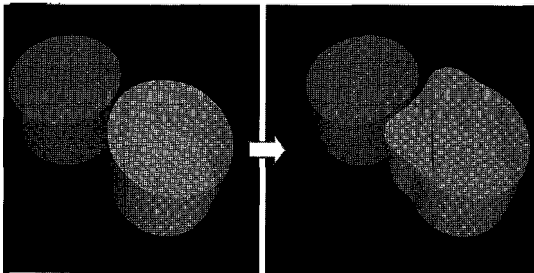


Fig. 14. Result of deformation of non-homogeneous model (2).

Fig. 14는 밀도가 다른 두 물체의 충돌 모습이다. 왼쪽 물체의 경우 밀도에 따른 가중치 값이 0에 가까운 매우 단단한 물체이고, 오른쪽은 밀도 값이 1인 물체로 사람의 뼈와 연결처럼 매우 단단한 물체와 부드러운 물체의 충돌 모습이다. 충돌 전과 충돌 후의 차이점을 통해 밀도에 따른 가중치 값에 따라 변형 후의 모습이 확연히 달라짐을 알 수 있다. 따라서 Fig. 13, 14의 실험결과를 통해 다른 밀도를 가진 비균질 변형체의 볼륨 햅틱 렌더링에서 밀도에 따라 다른 형태의 변형이 일어나고 사용자에게 시각적으로 다른 정보를 전달함을 알 수 있었다.

Table 1은 제안된 알고리즘을 이용하여 햅틱 렌더링시뮬레이션을 수행하였을 때 계산시간을 정리한 결

과이다. 햅틱 렌더링의 경우 sampling rate을 1 kHz (계산시간 1 msec) 이상을 보장해 주어야 사용자에게 안정적인 힘을 전달해 줄 수 있다.

Table 1. Time taken for deformation depending on deformation amount and number of materials (msec)

| Deformation Amount | Number of Materials | | |
|------------------------|---------------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| 10×10(volume elements) | 0.007 | 0.008 | 0.007 |
| 35×35(volume elements) | 0.119 | 0.171 | 0.191 |
| 55×55(volume elements) | 0.311 | 0.333 | 0.402 |

Table 1에서 보듯이 재료 개수와 변형량에 관계없이 사용자에게 현실감을 줄 수 있는 안정적인 계산시간(1msec 이하)을 보장함을 알 수 있다. 특히 햅틱 렌더링 시 물체가 전체적으로 모든 볼륨요소에 대하여 변형이 발생하는 경우는 극히 적으므로 제안된 알고리즘은 햅틱 처리 시간 조건을 충분히 만족시킬 수 있었다.

또 다른 실험 결과로 3개의 밀도를 가진 물체에서 변형량이 증가함에 따른 힘 되돌림을 계산해 보았다.

분석결과 Fig. 15와 같이 기존 알고리즘에서는 2곳에서 사용자는 시각적 정보와 다른 불연속적인 힘을 느꼈다. 따라서 Li and Brodrie는 Linked element를 통한 시간 지연(time delay)을 주어 실시간 힘 되돌림을 구현하였다. 그러나 이 방법은 시간지연의 크기가 커지는 경우 힘 되돌림의 불연속적인 부분이 발생하여 시각 정보와 일치하지 않는 힘 되돌림을 발생시킬 우려가 있다. 이는 사용자가 현실감(reality)을 느끼는

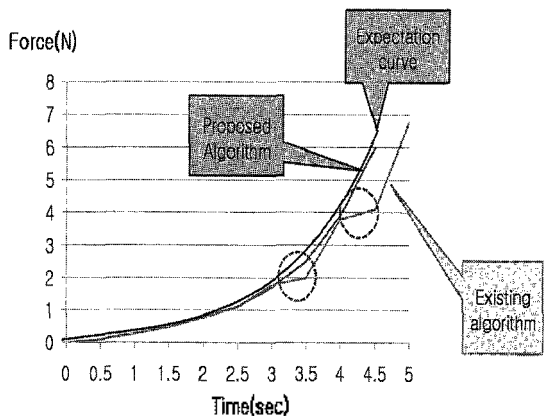


Fig. 15. Force-feedback according to the deformation amount (The model with three different materials).

데 큰 제약이 된다. 그러나 제안된 알고리즘에서는 인간의 인지적 한계(시각과 촉각의 차이가 30% 이내^[3]) 내에서 시각적 정보에 따른 일관된 force-feedback를 줌으로써 기존 알고리즘보다 실시간 볼륨 햅틱 렌더링에 보다 적합함을 알 수 있다.

6. 결론 및 향후 연구과제

햅틱 렌더링에서 변형체의 실시간 3차원 렌더링은 햅틱 장치들과의 연동을 통한 햅틱 시뮬레이션을 가능하게 해준다. 가상 수술 시뮬레이터와 같은 가상훈련 시스템에서는 사실감이 중요하므로 물리적 특성 즉, 균질하지 않은 물체의 재료 속성을 고려한 변형 시뮬레이션이 실시간으로 제공되어야 한다.

기존 ChainMail 알고리즘은 물체의 밀도가 균질하다는 가정하에서 사용되었고, 비균질한 재료를 가진 물체에서의 사용을 위해 다양한 후처리 과정이 이루어졌다. 이는 사실감과 실시간이라는 햅틱 렌더링의 목표에 적합하지 않았다. 따라서 이러한 한계를 극복하고자 본 연구에서는 볼륨 밀도를 통한 가중치의 계산으로 후처리 과정 없이 같은 크기의 볼륨요소에서도 비균질 변형체의 햅틱 렌더링이 가능하도록 구현하였다. 즉 햅틱 처리 시간 조건 하에 시각적 정보에 따른 일관된 힘 되돌림을 사용자에게 전달함으로써 기존 알고리즘보다 좀 더 사용자에게 사실감을 주었고, 힘 되돌림 계산 시 변형된 볼륨 요소 수에 비례하여 간단하게 계산할 수 있었다.

그러나 힘 되돌림을 계산하기 위해 본 논문에서 사용된 변형된 볼륨 요소 수에 의한 방법은 볼륨요소의 크기에 따라 인간의 인지적 한계 내에서이긴 하지만 일정부분 오차가 발생한다. 따라서 추후 연구과제에서는 변형된 볼륨의 거리기반 계산방법을 통해 보다 정확한 힘 되돌림을 계산하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2008학년도 동국대학교-서울 연구년 지원에 의하여 이루어졌습니다.

참고문헌

1. 경기욱, 박준석, "햅틱스 기술개발 동향 및 연구 전망", 전자통신동향분석, 제21권, 제5호, 2006.
2. Colgate, J. E., Stanley, M. C. and Brown, J. M., "Issues in the Haptic Display of Tool Use", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, Pittsburgh, pp. 140-145, 1995.
3. Kimura, A., Camp, J., Robb, R. and Davis, B., "A Prostate Brachytherapy Training Rehearsal System-simulation of Deformable Needle Insertion", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2488, 2002.
4. Ra, J. B., Kwon, S. M., Kim, J. K. and et al., "Spine Needle Biopsy Simulator Using Visual and Force Feedback", *Computer Aided Surgery*, Vol. 6, pp. 353-363, 2002.
5. Meier, U., Lopez, O., Monserrat, C., Juan, M. C. and Alcaniz, M., "Real-time Deformable Models for Surgery Simulation: A Survey", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 77, pp. 183-197, 2005. 5.
6. Gibson, S. F. F., "3D ChainMail: A Fast Algorithm for Deforming Volumetric Objects", in *Proc. of Symp. Interactive 3D Graphics*, pp. 149-154, 1997.
7. Gibson, S. F. F., "Using Linked Volumes to Model Object Collisions, Deformation, Cutting, Carving, and Jointing", *IEEE Trans. on Visual. & Comp. Graph.*, Vol. 5, pp. 333-348, 1999.
8. Kühnapfel, U., Çakmak, H. K. and Maass, H., "Endoscopic Surgery Training Using Virtual Reality and deformable Tissue Simulation" *Computers & Graphics*, Elsevier, Vol. 24, 671-682.
9. Li, Y., Brodlie, K. and Phillips, N., "Web-based VR Training Simulator for Percutaneous Rhizotomy", in *Medicine Meets Virtual Reality 2000*, edited by J. D. Westwood, H. M. Hoffman, G. T. Mogel, R. A. Robb and D. Stredney, IOS Press, pp. 175-181, 2000.
10. Schill, M. A., Gibson, S. F. F., Bender, H.-J. and Manner, R., "Biomechanical Simulation of the Vitreous Humor in the System Using an Enhanced Chain Mail Algorithm", *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI'1998)*, pp. 679-687, 1998
11. Engel, K., Kraus, M. and Ertl, T., "High-Quality Pre-Integrated Volume Rendering Using Hardware-Accelerated Pixel Shading", *Eurographics/SIGGRAPH Workshop on Graphics Hardware '01*, 2001.
12. Conti, F., Barbagli, F., Morris, D. and Sewell, C., "CHAI: An Open-Source Library for the Rapid Development of Haptic Scenes", in *Demo paper presented at IEEE World Haptics*, 2005.
13. Alterovitz, R., Pouliot, J., Taschereau, R., Hsu, I. C. and Goldberg, K., "Needle Insertion and Radioactive Seed Implantation in Human Tissues: Simulation and Sensitivity Analysis", in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Auto*, 2003.

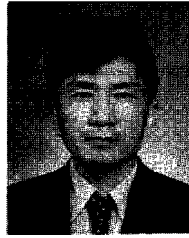


정 지 찬

2002년 동국대학교-서울 산업공학과 학사
2005년 동국대학교-서울 산업시스템
공학과 석사

2005년~ 동국대학교-서울 산업시스템
공학과 박사과정

관심분야: Virtual Reality, Mass
Customization, Haptic Rendering,
CrowdSourcing



박 준 영

1982년 한양대학교 기계공학과 학사
1984년 University of Minnesota 산업
공학 석사

1991년 University of Michigan 산업
공학 박사

1995년~ 동국대학교-서울 산업시스템
공학과 교수

관심분야: Geometric Modeling, Rapid
Prototyping, Mass Customization,
Haptic Rendering