

햅틱 증강현실을 위한 형태 모델 기반의 비균일 물체의 경도 변형

임성훈¹, 전석희², 최승문¹
포항공과대학교¹, ETH Zurich²

Stiffness Modulation of Inhomogeneous Real Objects for Haptic Augmented Reality

Sunghoon Yim¹, Seokhee Jeon², and Seungmoon Choi¹

Pohang University of Science and Technology (POSTECH)¹, ETH Zurich²

e-mail : algorab@postech.ac.kr, jeon@vision.ee.ethz.ch, choism@postech.ac.kr

요 약

햅틱 증강현실 (Haptic Augmented Reality)은 실제 물체와 환경에 가상의 햅틱 자극을 더하여 상호작용할 수 있게 하는 기술이다. 이는 실제의 물체의 형태나 물성들을 증강현실 시스템을 통하여 변경할 수 있도록 한다. 이러한 기술은 의료 훈련과 같은 응용 분야에서 실제 물체로 이루어진 마네킹 내부의 가상의 장기를 만지는 등의 응용이 가능하다. 본 논문은 이와 같은 햅틱 증강현실 중에서도 균일하지 않은 물성을 가진 물체의 경도를 변경하는 햅틱 증강현실 시스템을 소개한다. 본 논문에서 사용하는 시스템은 물체의 형태를 전 처리를 통해 미리 생성하며 이 생성한 모델을 바탕으로 물체의 촉감을 변경시킨다. 이를 위해서 충돌 검출, 접촉 위치 추정, 물체 형태 추정 및, 힘 계산 및 제어 알고리즘 등을 필요로 한다. 이와 같은 알고리즘들을 이용하여 비균일 물체의 형태 변형을 성공적으로 수행하였다.

1. 서론

증강 현실은 사용자에게 가상과 실제가 혼합된 형태의 감각을 제공하여 실제 환경을 반 가상 환경으로 변화시키는 기술이다. 현재 시각 증강 현실은 많은 연구가 진행되어 다양한 산업, 의료, 오락 분야에서 이용되고 있다. 이에 더하여 촉감을 증강 하는 햅틱 증강 현실의 연구도 이루어 지고 있다. 그러나 많은 햅틱 증강 현실은 실제 물체의 촉각적인 특성을 변화시키기 보다는 그저 가상의 촉감을 제시하는 것에 그쳤다.

본 연구팀은 햅틱 증강 현실 중에서도 가상의 촉각과 실제 촉각이 혼합되거나 실제 촉각이 가상의 촉각으로 인해 변형된 범주의 햅틱 증강 현실을 연

구해 왔다 [1]. 본 연구팀의 기존의 연구는 햅틱 증강 현실의 시스템 중 균일한 물성을 갖는 물체의 경도 및 물성 변화를 위한 시스템을 개발하고 이의 물리적, 지각적 성능을 평가하는 것이었다. 이들 시스템은 선행 정보와 전처리 과정의 필요성을 최소화하는 것을 목표로 개발되었다 [1-2].

본 연구에서는 최소한의 하드웨어를 이용하여 비균질 물체의 모델링 및 경도 변형을 수행하고자 한다. 이를 위해서 햅틱 인터페이스와 힘 센서 만으로 구성된 증강현실 시스템을 이용한다. 이 시스템은 햅틱 증강 현실을 수행하기 전에 물체의 형태를 모델화 한 뒤 이 모델을 바탕으로 실제 물체의 특성을 변형하는 과정을 수행한다. 이를 위해서는 물체는 탄

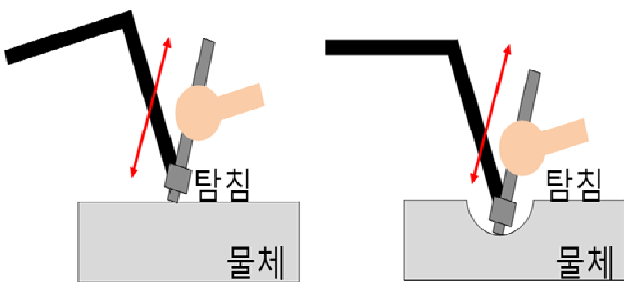
성체여야 한다. 소성체는 모델링 이후 변형이 일어날 수 있기 때문이다.

2. 물체 형태의 모델링

실제 물체를 가상의 물체로 모델링 하는 과정을 위해 다양한 방법이 적용 가능하다 [3]. 이를 위해 일반적으로는 비전 기술을 이용한 3D 스캐너가 사용된다.

본 논문에서는 추가적인 비전 기술을 활용하지 않고 3 차원 위치 추적과 물체의 접촉 확인이 가능한 햅틱 인터페이스의 탐침과 힘 센서를 이용하여 물체의 형태를 모델링 한다. 즉 탐침으로 물체를 만질 때의 접촉 점을 수집한 뒤 이 점들을 이용하여 메쉬 모델을 형성하는 것이다.

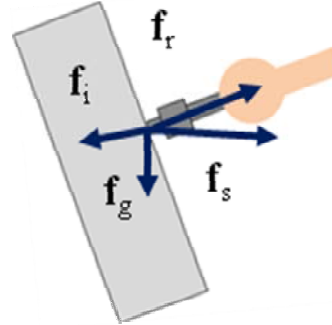
모델링 과정에서 가장 먼저 고려해야 할 것은 점을 수집하기 위한 접촉 방법이다. 대상이 되는 물체는 낮은 경도를 가진 변형 물체 (Deformable objects)이므로 햅틱 인터페이스의 탐침을 이용하여 접촉 점을 수집하는 순간에 물체의 변형이 이루어지게 된다. 따라서 실제 물체 표면의 점을 얻기 위해서는 물체의 표면을 누르거나 툭툭 쳐야 한다. 물체의 표면을 따라 그을 경우 긁는 힘이 이미 변형 요인이 되기 때문이다. 그러나, 누르거나 툭툭 칠 경우에는 접촉한 순간은 변형이 이루어지지 않은 상태이므로 물체 표면의 점을 알 수 있다.



[그림 1] 표면 접촉 점의 수집. 왼쪽) 접촉 하는 순간의 물체와 탐침, 오른쪽) 탐침과의 접촉으로 인한 물체의 변형.

정확히 표면과 탐침이 접촉한 시점 및 위치를 확인하기 위해서는 실제 물체와 탐침 사이의 충돌 검출 및 접촉 위치 검출 방법이 필요하다. 기본적인 충

돌 처리 알고리즘은 [1]에서 사용한 것과 같이 힘 센서에 입력된 물체로부터 반응한 힘이 미리 결정된 역치 값 ϵ_f 보다 클 경우에 충돌이 발생한 것으로 한다. 이를 위한 반응 힘은 다음과 같이 구한다.



[그림 2] 충돌 검사 시의 힘의 성분.

현재의 시간이 t 일 때 힘 센서에 입력된 힘을 $\mathbf{f}_s(t)$ 라고 한다. 이 입력 힘은 물체 표면의 반응 힘 $\mathbf{f}_r(t)$ 과 탐침의 무게 때문에 발생하는 중력 $\mathbf{f}_g(t)$, 탐침의 질량과 가속도로부터 발생하는 관성 $\mathbf{f}_i(t)$ 의 합이다. 충돌 처리를 위해 필요한 힘은 반응 힘이므로 입력된 힘으로부터 중력 성분의 힘과 관성을 제거하여야 한다.

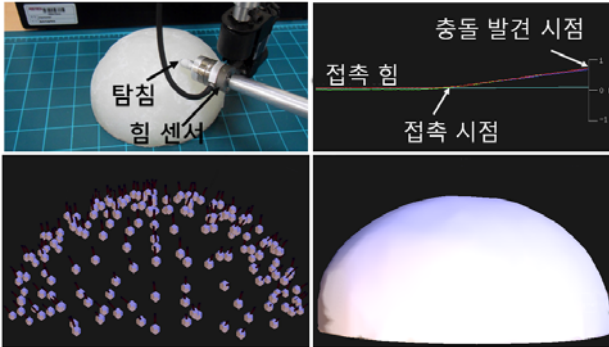
$$\mathbf{f}_r(t) = \mathbf{f}_s(t) - \mathbf{f}_g(t) - \mathbf{f}_i(t) \tag{1}$$

탐침의 질량과 방향, 가속도를 알면 각각 $\mathbf{f}_g(t)$ 와 $\mathbf{f}_i(t)$ 의 값을 얻어 순수한 반응 힘 $\mathbf{f}_r(t)$ 을 얻을 수 있다. 한편 충돌하지 않은 동안에도 힘 센서에 잡음으로 인한 다양한 오류가 발생 할 수 있다. 이 오류의 이동 평균 힘 $\mathbf{f}_e(t)$ 를 구한다. 이는 잡음의 영향을 줄이고 주어진 역치 값 ϵ_f 를 최대한 작은 값으로 유지하기 위해서 사용한다.

$$|\mathbf{f}_r(t)| > \epsilon_f + |\mathbf{f}_e(t)| \tag{2}$$

위의 수식의 관계가 성립할 경우 충돌이 일어난 상태이다. 그러나 이를 통해 충돌이 발견된 시점은 실제로 접촉이 일어난 시점, 즉 $|\mathbf{f}_r(t)|$ 의 값이 배경 잡음 $|\mathbf{f}_e(t)|$ 보다 커지기 시작한 시점보다 늦을 수 밖에 없다. 이 오류를 해결하기 위해 충돌 이전의 힘,

위치, 속력 값의 궤적을 검토하여, 힘 센서의 값이 $|\mathbf{f}_r(t-i)| - |\mathbf{f}_e(t-i)| < \varepsilon_f$ 인 시점 i 를 찾아낸다. 이 시점의 위치 점이 표면의 접촉 점이다.



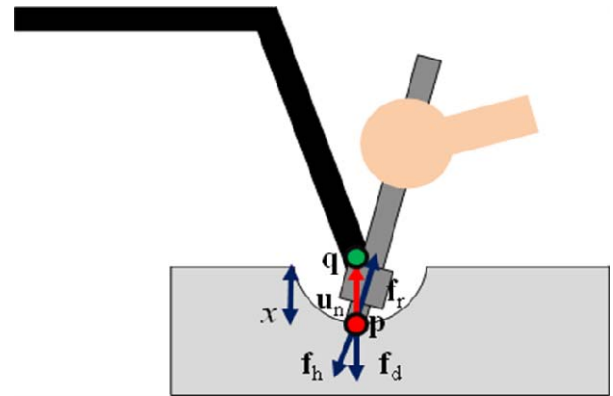
[그림 3] 모델링 과정. 왼쪽 위) 모델링 시스템, 오른쪽 위) 충돌 확인, 왼쪽 아래) 접촉 샘플, 오른쪽 아래) 최종 메쉬 모델.

모델을 생성하기에 충분한 수의 접촉 점을 얻어 내면 이들 점들을 이용하여 모델을 형성한다. 본 논문의 시스템에서는 샘플링의 방법의 특성상 적은 양의 샘플을 사용하므로 Delaunay complex[3]에 기반한 알고리즘인 Alpha shape[4]를 이용하여 모델을 형성한다. 이 알고리즘은 주어진 점들을 연결하여 하나의 메쉬 모델로 만들어 내는 알고리즘이다. 이를 수행하기 앞서 얻어진 접촉 지점을 가공한다. 주위의 점들과의 거리가 큰 이상 점(outlier)을 제거되고, 각각의 점이 이웃한 점들의 평균 값을 갖게 하는 평활화(smoothing)를 수행한다. 만들어진 메쉬 모델은 다시 메쉬분할법(Mesh subdivision)을 이용하여 해상도를 높이고 추가적인 평활화를 수행한다. 이를 통해 만들어진 메쉬를 바로 햅틱 증강현실에 이용한다.

3. 햅틱 증강 현실의 3 차원 상호작용 모델링

본 햅틱 증강 현실에서 고려하는 실제 물체는 다음과 같다. 1. 매우 큰 경도를 가진 물체는 제외한다. 이는 햅틱 장비의 성능적인 한계로 인해 결정된다. 이에 따라 대상 물체는 탄성 변형 물체로 제한한다. 2. 소성체는 제외한다. 탄성을 가지지 않고 영구히

변형되는 물체는 미리 얻어진 모델을 이용할 수 없다.



[그림 4] 햅틱 증강 현실의 변수 정의.

3 차원 상호 작용의 모델링을 위해 다음의 변수들을 지정한다. 현재의 시간이 t 일 때 현재의 탐침의 위치는 $\mathbf{p}(t)$ 이다. 만약 이 시간에 탐침이 실제 물체의 내부에 존재한다면 사용자에게 반응 힘이 작용할 것이다. 이 반응 힘은 $\mathbf{f}_r(t)$ 로 표현하며, 실제 물체의 경도는 $k(t)$ 로 표현이 가능하다. 사용자가 햅틱 장치를 이용하여 실제 물체를 누르므로 사용자가 내는 힘 $\mathbf{f}_h(t)$ 와 햅틱 장치가 내는 힘 $\mathbf{f}_d(t)$ 가 더해져서 반응 힘 $\mathbf{f}_r(t)$ 와 균형을 이루게 된다.

$$\mathbf{f}_r(t) + \mathbf{f}_h(t) + \mathbf{f}_d(t) = \mathbf{0} \quad (3)$$

현 시스템의 목표는 이 경도 $k(t)$ 를 $\tilde{k}(t)$ 로 변경하는 것이다. 이를 위해서 현재 알아야 할 내용은 물체의 변위, 즉 물체 표면으로부터 탐침인 $\mathbf{p}(t)$ 까지의 거리와 그 방향이 된다. 이 변위를 바탕으로 원하는 경도에 해당하는 힘을 사용자가 느끼도록 해야 한다. 앞 장에서 설명한 물체 모델을 이 변위를 구하기 위해 사용할 수 있다.

일반적인 메쉬 모델을 위한 햅틱 렌더링 알고리즘[5]을 이용하면 물체 표면 위에 잔류하는 표면 접촉 점 $\mathbf{q}(t)$ 를 얻을 수 있다. 이 표면 접촉 점 $\mathbf{q}(t)$ 와 현재의 $\mathbf{p}(t)$ 사이의 벡터가 물체의 변위가 된다. 이는 다시 표현하여 $\mathbf{q}(t) - \mathbf{p}(t)$ 와 같은 방향을 갖는 단위

벡터 $\mathbf{u}_n(t)$ 와 같은 크기를 갖는 $x(t)$ 로 표현할 수 있다.

이 환경에서 사용자가 $\tilde{k}(t)$ 의 경도를 느끼게 하기 위해서는,

$$\mathbf{f}_h(t) = \tilde{k}(t)x(t)\mathbf{u}_n(t) \quad (4)$$

가 성립해야 한다. 이를 위해서 최종적으로 햅틱 장치가 내야 하는 힘은 다음과 같다.

$$\mathbf{f}_d(t) = -\mathbf{f}_r(t) \cdot \mathbf{u}_n(t) - \tilde{k}(t)x(t)\mathbf{u}_n(t) \quad (5)$$

즉 사용자가 $\tilde{k}(t)$ 의 경도를 느끼게 하기 위해서는 실제 물체의 모델로부터 $x(t)$ 와 $\mathbf{u}_n(t)$ 를 구한다. 그 다음 실제 물체의 반력 $\mathbf{f}_r(t)$ 를 측정하고 이 중에서 경도 인식에 관여하는 요소 $\mathbf{f}_r(t) \cdot \mathbf{u}_n(t)$ 를 구한다. 이 모든 요소들을 얻게 되면 햅틱 장치를 제어하여 $\mathbf{f}_d(t)$ 의 힘을 내게 한다.

4. 알고리즘 및 성능 평가

전체적인 시스템의 알고리즘은 다음과 같다. 1. 물체 모델을 이용하여 충돌 검사를 수행한다. 2. 충돌하였을 경우 현재의 탐침 위치와 물체 모델을 바탕으로 표면 접촉 점을 찾아 낸 뒤, 이를 이용하여 변위의 크기와 방향을 추정한다. 3. 식 (5) 를 이용하여 장치가 내어야 하는 힘을 계산한 뒤 PD 제어를 이용하여 힘을 발생시킨다.

시스템은 평균 0.15 N/mm 의 경도를 가진 실리콘 반구 모델을 이용하여 성능을 확인하였다. 충돌 역치 값 ϵ_f 은 0.08N 을 이용하였다. 모델링 과정에서 실제 충돌 시점과 충돌 확인 시점 사이의 지연은 58 ms, 오차는 5.5 mm 로 추정되었다. 이 오차는 충돌 시점 추정을 통해 제거할 수 있었다.

햅틱 증강 현실 시스템을 이용하여 렌더링 하는 과정에서 실제 충돌 시점과 충돌 확인 시점 차이의 지연은 평균 6 ms 이며 평균 0.6 mm 의 오차를 보였다. 경도 변경은 약 0.1 N/mm 이하의 표준편차를 보여 충분한 성능을 보여 주었다.

5. 결론

본 논문에서는 비균질 저 경도 물체의 3 차원 상호 작용을 지원하는 실제 물체의 경도 변경 햅틱 증강현실 시스템을 제안하고 이를 위한 요소들을 구현 평가하였다. 추후에 본 시스템의 인지적인 성능을 평가할 계획이다.

사사의 글

본 논문은 2010, 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 도약연구지원사업(No. 2011-001-8641)와 기초연구실육성사업(No.2010-0019523) 및 지식경제부 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업(NIPA-2011-C1090 - 1131-0006)의 연구결과로 수행되었음

참고문헌

- [1] Seokhee Jeon and Seungmoon Choi, "Haptic augmented reality: Taxonomy and an example of stiffness modulation," Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 18(5), 2009.
- [2] Seokhee Jeon and Seungmoon Choi, "Stiffness Modulation for Haptic Augmented Reality: Extension to 3D Interaction," In Proceedings of the Haptics Symposium (HS), pp. 273-280, 2010
- [3] F. Bernardini and H. Rushmeier, "The 3D Model Acquisition Pipeline," Computer Graphics Forum, vol. 21, no. 2, pp. 149-172, 2002.
- [4] H. Edelsbrunner and E. P. Mücke, "Three-dimensional alpha shapes". ACM Transactions on Graphics vol. 13, no 1, pp. 43-72, 1994.
- [5] C.B. Zilles and J.K. Salisbury, "A constraint-based god-object method for haptic display." In Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 146-151, 1995.