

이미지를 이용한 맨손 환경에서의 햅틱 질감 렌더링 시스템

신성환⁰¹ 최승문¹

¹포항공과대학교 컴퓨터공학과

scout11@postech.ac.kr, choism@postech.ac.kr

Bare-hand haptic rendering system using image-based method

Sunghwan Shin⁰¹ Seungmoon Choi¹

¹Department of Computer Science and Engineering, POSTECH

요약

햅틱 질감(Haptic texture)은 물체 표면에서 느낄 수 있는 촉각 정보로서 햅틱 렌더링에서 매우 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 도구를 사용하지 않는 맨손 환경에서 햅틱 질감을 제공하기 위한 시스템을 개발하였다. 이러한 시스템의 개발을 위해서 진동 또는 힘 센서를 사용하지 않는 이미지 기반 햅틱 질감 모델링 방법을 도입하였고, 3x3 진동 배열을 이용한 햅틱 렌더링 알고리즘을 고안하였다. 제안된 시스템은 햅틱 질감을 효과적으로 전달할 수 있었다.

1. 서론

햅틱 질감(Haptic texture)은 사람이 물체 표면을 만질 때 느낄 수 있는 햅틱 특성(Haptic property)을 총칭하는 것이다. 이는 해당 물체의 재질감, 마찰감, 온도감, 거칠기 등의 여러 정보를 포함하며, 인간이 물체와 상호작용을 할 때 촉각 인지와 직결된다. 따라서 햅틱 가상 환경을 제공하고자 할 때 햅틱 질감은 실제와 유사한 햅틱 감각을 제공하기 위해서 매우 중요한 부분을 담당한다[1].

하지만 이러한 중요성에 비해서 햅틱 질감을 제공하기 위한 널리 통용되는 방식은 현재까지 제시되지 않았다. 그 이유는, 햅틱 질감에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 부분으로 알려진 접촉이 일어나는 표면의 미세구조(micro-geometry)사이의 물리적 상호작용을 물리적으로 정확히 모델링할 수 없기 때문이다 [1]. 따라서 최근의 연구는 실제 물리적 상호작용을 이해하고 모델링하는 방법 대신 접촉이 일어날 때 생성되는 진동을 최대한 많은 조건에서 수집해서 이 데이터를 이용하는 자료 기반 방법(data-driven method)를 이용하여 햅틱 질감을 모델링하는 방법을 주로 이용하고 있다. 이러한 자료 기반 방법의 햅틱 질감 모델링 및 렌더링 방법은 사용자가 스타일러스 펜 같은 도구를 사용하는 환경(tool-mediated situation)에 적용되어 좋은 성과를 거두었다[2][3].

그런데 실제 사람이 햅틱 질감을 느끼는 경우를 생각해 보면, 대부분의 상황에서 사람은 도구를 사용하는 환경이 아닌 맨손으로 햅틱 질감을 느끼는 것을 알 수 있다. 따라서 제한적인 용도가 아닌 일반적인 햅틱 질감을 제공하기 위해서는 맨손의 사용자에게 햅틱 질감을 제공해야 할 필요가 있는데, 이러한 경우에 자료 기반 방법은 좋은 결과를 제공해 주지 못한다. 도구를 사용하는 환경의 경우, 실제 스타일러스 펜과 같은 도구가 다른 물체와 접촉하여 표면을 긁을 때 발생하는 진동 정보를 스타일러스 펜에 부착된 가속도 센서를 이용해서 정확히 측정할 수 있고, 이 데이터를 이용해서 햅틱 질감을 제공할 수 있었다. 하지만 맨손 환경의 경우 손가락 끝에서 느껴지는 진동을 직접적으로 측정하는 것이 불가능하다. 손가락 끝에서 느껴지는 진동은 센서 부착이 가능한 손가락의 다른 부분까지 온전하게 전달되지 않으며, 손가락 끝 부분에 직접적으로 부착할 수 있는 가속도 센서는 가속도 센서의 부착으로 손가락과 물체 표면 사이의 상호작용을 방해할 수 있기 때문이다. 따라서 맨손 환경에서 햅틱 질감을 제공하기 위해서는 자료 기반 방식이

아닌 다른 방식을 이용할 필요가 있다.

이 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 이미지 기반 햅틱 질감 모델링을 수행한다. 햅틱 질감을 모델링하기 위한 물체의 표면 사진을 촬영하고, 이를 이용해서 물체 표면의 미세구조의 높이 맵(height map)을 생성하여 이용한다. 이렇게 이용된 높이 맵 정보를 이용해서 사용자에게 전달할 진동 파형을 만들어내고, 만들어낸 진동 파형을 초박형 진동 액추에이터를 이용해서 전달하는 방식으로 햅틱 질감을 제공한다.

이러한 이미지 기반 햅틱 질감 제공 시스템은 기존에도 연구되었던 바 있으나[4] 당시 모델링의 부정확성 및 렌더링 시스템의 큰 크기로 인해서 좋은 평가를 받지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 질감 모델링의 정확성을 높이기 위한 측정 시스템 및 새로운 알고리즘을 도입하였고, 시스템의 간편하고 광범위한 이용을 위해서 렌더링 시스템을 소형화 및 간편화하였다.

2. 햅틱 질감 모델링

이 연구에서는 햅틱 질감을 표현하기 위한 방법으로 물체 표면을 긁을 때 일어나는 진동을 이용하고, 이를 위해서 물체 표면의 미세구조를 사진 이미지를 통해서 모델링하는 방법을 이용하였다. 앞에서 설명하였듯 이미지를 기반으로 햅틱 질감을 렌더링하는 시스템은 기존에도 선보인 바 있으나, 물체 표면의 단일 이미지를 이용해서 이미지 내의 밝기 차이로 높이 맵을 만들어 이용했기 때문에 광원의 위치 및 사진 촬영 위치에 따라서 높이의 왜곡이 일어나고 사진으로 잘 표현되지 않는 높이 차이가 높이 맵에 전달되지 않는 등의 문제점이 있어서 햅틱 질감을 표현하기에 부족함이 있었다.

따라서 본 연구에서는 단일 이미지 방식보다 발전된 방식인 photometric stereo 방식을 채용하였다. 이 방식은 컴퓨터 비전 분야에서 3차원 표면 생성(3D surface reconstruction)을 위해서 널리 쓰이는 방식으로, 하나의 표면에 대해서 사진을 촬영할 때 광원 위치 또는 카메라 위치를 변경시킴으로써 여러 장의 사진 이미지를 획득하고, 각 사진 이미지 간의 correspondence를 이용해서 하나의 3차원 높이 맵을 추정하는 방식이다. 이러한 방식은 컴퓨터 그래픽스에 적용되어 그래픽스 질감 표현에는 사용된 바 있으나[5], 햅틱 질감 표현을 위해서 사용된 전례는 없다.

세부적인 알고리즘은 [6]에 소개된 방식을 차용하였다. 해당 연구는 컴퓨터 비전에 특화된 시스템이 아닌 일반적인 디지털



[그림 1] 이미지 획득을 위한 구조물 제작

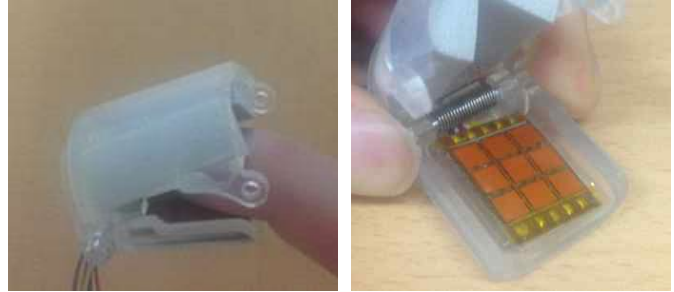
카메라를 이용하여 불균일(inhomogeneous)한 표면을 생성한 연구로, 간단한 모델링 장비가 주는 확장성을 가지면서 동시에 손 표면의 주름 또는 나무판자의 미세한 용기까지 모델링하는 높은 정확성을 보여주었다.

실제 모델링 과정은 다음과 같이 진행되었다. 먼저 햅틱 질감 모델링을 수행하고자 하는 물체의 샘플의 사진을, 카메라 위치를 고정시킨 상태에서 광원의 위치를 변경시켜가며 촬영하였다. 여기서 [6]의 방식은 카메라 위치 및 광원의 위치 또한 추정(estimation)을 통해서 결정하였으나 이 과정에서 좀 더 정확한 결과를 얻기 위해서 본 연구에서는 데이터 획득용 구조물을 제작하였다. 돔 형태의 외골격에 미리 정해진 위치에 LED를 부착하여 각각 광원으로 이용함으로써, 카메라 위치 및 광원의 위치를 정확히 고정시켜 이후의 추정에서 높은 정확도를 보장하였다. 이 구조물은 지름 0.5m의 돔 형태로 되어 있어 카메라는 물체 표면에 수직인 방향으로 0.5m에서 사진을 촬영하고, 각각의 광원은 물체의 표면을 둘러싸고 36도씩 경도 차이를 가지는 10개의 위치, 물체의 표면에 대해서 40도, 55도, 70도의 3가지 위도의 총 30개의 위치에 부착되었다. 촬영된 사진에서 배경을 나타내는 픽셀은 제외한 물체를 나타내는 픽셀만 따로 masking하여 3차원 표면 생성 알고리즘으로 전달되었으며, 그 결과 생성된 높이 맵 정보는 실제 축척과 유사하도록 높이 값이 축소된 상태로 저장되었다.

3. 햅틱 질감 렌더링

2장에서 생성된 높이 맵 정보는 진동 또는 힘 등의 특정한 햅틱 신호를 염두에 두고 만든 형태가 아니기 때문에 다양한 렌더링 방법에 응용될 수 있다는 장점이 있지만 한편으로는 각각의 햅틱 신호로 변형해 주는 알고리즘이 필요하다. 이 연구에서는 맨손의 사용 환경에서 햅틱 질감을 제공한다는 사용 시나리오에 적합하도록 최소한의 장비를 이용해서 사용자에게 햅틱 질감을 제공할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

먼저 사용자의 정보를 알 수 있는 입력장치가 필요하다. 사용자에게 햅틱 질감을 렌더링하기 위해서는 일반적으로 사용자가 가상 환경에서 어떤 부분을 만지고 있는지 나타내는 위치정보, 사용자가 물체 표면을 긁고 있을 때의 이동 속도가 필수적인 입력 요소가 된다. 추가적으로 사용자가 물체 표면에 가하는 힘 또한 중요한 요소가 될 수 있지만, 가상 물체를 만질 때 반발력을 생성하고, 사용자가 가하는 힘을 측정하기 위해서는 추가적으로 많은 하드웨어가 필요하기 때문에 본 연구에서는 해당 정보를 제외하였다. 또한 일반적으로 사용자들이 물체의 표면을 긁을 때, 사용자가 물체 표면에 가하는 힘은 비교적 일정하다는(force-consistency) 사실이 알려져 있다[7]. 따라서 우리는 입력 시스템의 간편화를 위해서 단일 센서로 사용자의 손에



[그림 2] 전기활성물질 3x3 진동 배열 및 실제 작동 부분

추가적인 부착물이 없이도 사용자의 손의 위치 및 이동 속도를 측정할 수 있는 Leap motion을 햅틱 질감 전달 시스템의 입력 장치로 이용하였다.

다음으로 사용자에게 햅틱 질감을 제공하기 위한 햅틱 장치(Haptic display)로는 전기활성물질(EAPap)을 이용한 3x3 진동 배열(tactile array)를 이용하였다[8]. 전달되는 전압의 변화를 진동으로 변환하여 진동을 출력하는 이 장치는, 다양한 종류의 햅틱 장치들 중에서도 매우 작은 크기(15 x 15 x 1 mm)를 가질 뿐만 아니라, 진동의 대역폭 및 진동의 크기에서도 햅틱 질감을 표현하기에 필요하다고 알려진 조건(진동 대역폭 10~250 Hz 이상, 진동 크기 0.5 G 이상)을 만족하는 햅틱 질감 렌더링에 매우 적합한 장치이다. 또한 단일 액추에이터가 아닌 3x3의 총 9개의 진동 액추에이터가 독립적으로 작동하기 때문에 사용자가 물체 표면을 긁을 때 나타나는 진동의 시간적(temporal) 변화뿐만 아니라 위치적(spatial) 변화 또한 효과적으로 표현할 수 있으며, 이를 통해서 햅틱 질감 렌더링의 현실감을 더욱 증진시킬 수 있다는 장점이 있다.

마지막으로 모델링 된 높이 맵 정보 및 Leap motion으로 전달된 사용자의 정보를 이용해서 3x3 진동 배열로 출력하기 위한 진동 파형을 만들어주는 햅틱 렌더링 알고리즘이 고안되었다. 이 알고리즘에서는 높이 맵에 따라서 발생할 수 있는 진동을 사실적이고 효과적으로 표현하기 위해서 기울기 방법(gradient method)를 이용하였다. 사용자의 손가락 끝을 일정한 크기를 가지는 가상의 구형 커서라고 가정하고, 높이 맵과 손가락 간의 충돌이 일어날 때 높이 변화에 따라서 그에 맞는 sinusoidal wave를 출력하는 방식이다. 이는 손가락이 물체 표면의 미세구조와 충돌할 때 일어나는 물리적 상호작용을 간단하게 적용한 것으로, 햅틱 질감을 힘 출력 장치로 표현한 Minsky의 연구[9]와 유사한 방식을 진동 출력에 적용한 것이다. 해당 연구에서는 높이 변화가 그대로 힘의 크기로 적용되어 힘 피드백 햅틱 장치를 통해서 사용자에게 전달되었다면, 본 연구에서는 높이 변화에 따라서 사용자에게 전달되는 sinusoidal wave의 크기가 변경되고, sinusoidal wave의 주파수는 해당 높이 맵에서 현재 사용자가 이동하고 있는 경로의 거칠기(roughness)를 기준으로 결정된다. 일반적으로 진동을 이용한 질감 렌더링에서, 고주파수의 진동 렌더링(>150 Hz)는 사용자에게 부드러운 느낌을, 저주파수의 진동 렌더링(<50 Hz)는 거친 느낌을 준다는 것이 알려져 있다. 이러한 정보를 이용해서, 높이 맵의 높이 변화에서 계산한 거칠기를 sinusoidal wave의 주파수에 대응시켜서 진동 신호를 생성한다. 높이 맵의 현재 거칠기를 계산하는 공식은 다음과 같다.

$$Roughness = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} f(n)H(n)}{\sum_{n=0}^{N-1} H(n)}$$

여기서 $H(n)$ 은 현재부터 5초 전까지 높이 맵의 높이 변화가 기록된 $h(t)$ 의 푸리에 변환이며 $f(n)$ 은 $H(n)$ 에 해당하는 주파수 값이다. 즉 높이 맵의 현재 거칠기 값은 최근 5초 동안 높이 맵의 높이 값 변화의 spectral centroid값으로 결정된다. 이렇게 결정된 거칠기 값이 클수록 높이 맵이 거칠다는 것을 의미하며, 이에 따라서 출력할 sinusoidal wave의 주파수를 결정한다. $\nabla h(t)$ 와 거칠기 값에 따른 sinusoidal wave의 크기와 거칠기 값의 결정은 다음과 같은 식으로 결정된다. 이 식의 수치는 값의 변화에 따른 질감 렌더링을 인지적으로 비교한 뒤 휴리스틱하게 결정되었다. $\nabla h(t)$ 의 단위는 mm이며, Amplitude의 최고값은 1이다.

$$Amplitude = \begin{cases} \frac{|\nabla h(t)|}{5} & |\nabla h(t)| < 5 \\ 1 & else \end{cases}$$

$$Frequency = \begin{cases} \frac{2500}{Roughness} & 10 < Roughness < 250 \\ 10 & Roughness > 250 \\ 250 & Roughness < 10 \end{cases}$$

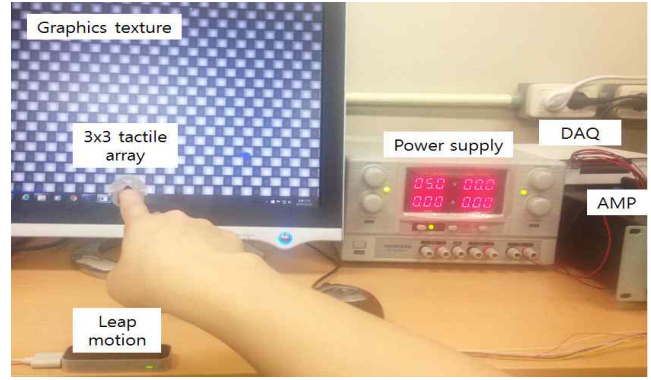
위의 알고리즘을 통해서 생성된 진동 파형은 Leap motion의 위치 정보가 업데이트되는 주기인 100 Hz의 주기로 재생성되어 3x3 진동 배열에 전달된다. 진동 배열 중 가운데(충돌의 기준이 되는 가상 커서의 위치)의 액추에이터는 진동 파형 그대로 재생되며, 나머지 액추에이터 중 사용자의 손가락의 이동 방향에 따라서 가운데 액추에이터를 기준으로 이동 방향의 반대편의 액추에이터는 가운데 액추에이터에서 재생된 파형이 약화 및 지연되어 전달되어 사용자에게 위치적 변화를 느낄 수 있도록 진동을 전달한다. 이외의 액추에이터는 약한 white noise 신호를 재생한다.

[그림 3]는 이 렌더링 시스템을 이용한 사용 시나리오를 테스트하기 위한 환경이다. 컴퓨터의 모니터를 통해서 모델링된 물체의 사진을 시각 이미지로 표현하며, 3x3 진동 배열을 장착한 손가락의 위치는 Leap motion으로 실시간으로 인식된다. 인식된 위치에 따라서 햅틱 질감 렌더링 알고리즘이 진동 파형을 생성하여 DAQ 및 앰프를 통해서 진동 배열로 전달하여 사용자에게 질감이 전달된다. 실제 해당 환경을 통해서 종이, 나무판자, 코르크가 포함된 햅틱 질감 렌더링을 수행한 결과 각각의 물체에 따른 차이를 확인할 수 있었으며 질감 렌더링이 잘 수행되었다.

4. 결론 및 향후연구

이 논문에서는 맨손을 이용한 가상 환경에서 햅틱 질감을 전달하기 위한 시스템을 구현하였다. 2장에서는 맨손 환경에 맞는 햅틱 질감 모델링을 위해서 photometric stereo 알고리즘을 이용한 모델링을 수행하였으며, 3장에서는 2장에서 모델링된 높이 맵을 바탕으로 실제로 햅틱 렌더링을 수행하는 알고리즘을 제시하고, 이 알고리즘을 바탕으로 실제 시스템을 구성하여 햅틱 질감 렌더링 시스템의 사용 가능성을 보였다.

현재 시스템에서는 햅틱 질감 렌더링 알고리즘으로 간단한 gradient based method를 이용하였으며, 이 과정에서 일부 수치들을 휴리스틱하게 결정해야 되는 단점이 존재한다. 이러한 점을 극복하여 일반적으로 햅틱 질감 렌더링을 수행할 수 있는 물리적인 알고리즘을 구현하고 실제 사용자 평가를 통해서 햅틱 질감 렌더링의 성능을 평가하는 것이 앞으로의 목표이다.



[그림 3] 햅틱 질감 렌더링 하드웨어 및 사용 시나리오

사사의 글

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2013R1A2A2A01016907) 및 미래융합기술 파이오니어사업(과제번호: 2011-0027994), 산업통상자원부 및 방위사업청의 민군겸용기술사업(과제번호: 12-DU-EE-03)으로부터 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] J. M. Romano and K. J. Kuchenbecker, "Creating Realistic Virtual Textures from Contact Acceleration Data". IEEE Transactions on Haptics, 2012, 5(2), 109-119.
- [2] H. Culbertson et al., "Refined methods for creating realistic haptic virtual textures from tool-mediated contact acceleration data", In Proceedings of IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), 2012, 385-391.
- [3] J. Lang and S. Andrews, "Measurement-based modeling of contact forces and textures for haptic rendering.", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(3), 380-391.
- [4] Y. Ikei and S. Masashi, "TextureExplorer: A tactile and force display for virtual textures.", In Proceedings of 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems(HAPTICS), 2002.
- [5] A. D. Spence and M. J. Chantler. "Optimal illumination for three-image photometric stereo using sensitivity analysis." IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing 153.2 (2006): 149-159.
- [6] J. A. Paterson et al., "BRDF and geometry capture from extended inhomogeneous samples using flash photography." Computer Graphics Forum. Vol. 24. No. 3. Blackwell Publishing, Inc, 2005.
- [7] S. Choi and Hong Z. Tan, "Toward realistic haptic rendering of surface textures." ACM SIGGRAPH 2005 Courses. ACM, 2005.
- [8] G. Yun et al., "Fabrication and testing of cellulose EAPap actuators for haptic application." Sensors and Actuators A: Physical 164.1 (2010): 68-73.
- [9] M. Minsky et al, "Feeling and seeing: Issues in force display", ACM SIGGRAPH Computer Graphics 24.2 (1990): 235-241.