

# 가상현실 햅틱 디스플레이를 위한 소프트웨어 기술

전석희(경희대학교 컴퓨터공학과)

## 1. 서 론

90년대 중반에 시작된 첫 번째 가상현실 붐이 빠르게 사그라져 간 원인중의 하나는 가상현실의 기술적인 성숙도 및 완성도가 사람들의 기대치에 못 미쳤기 때문이었다. 최근에 몰입형 가상현실 디스플레이 기술의 Break-Thru를 동력으로 하여 2차 가상현실 붐이 일어나고 있고, 가상현실이 차세대 4차 산업을 이끌어 갈 주요 기술 중의 하나라고 언급되고 있다. 2차 가상현실 붐에서 좀 더 사실적인 몰입감을 위하여 시각 피드백 뿐만 아니라 촉각 피드백에 관심을 가지는 것은 당연한 순서라고 보여 진다. 시각 피드백은 어느 정도 일반 사용자의 기대치를 충족했다고 한다면, 이 2차 가상현실 붐의 성패를 좌우하는 기술적인 요인 중의 하나는 아마도 촉각 기술이 될 것이다.

가상 환경의 Scene을 시각적으로 시뮬레이션하여 실시간 사용자의 눈에 Display 해 주는 시각 디스플레이 및 컴퓨터 그래픽스 기술은 많은 부분 성숙 단계에 이르렀다고 보여 진다. 이미, 컴퓨터 그래픽스 기술은 사람이 인지적으로 구분해 내기 어려운 수준으로 Photo-realistic한 이미지를 실시간에 만들어 내고 있으며, 몰입형 Stereoscopic 디스플레이들은 많은 투자가 이루어지고 있으며 인간의 시각 인지적인 한계를 넘어서는 성능의 시각 디스플레이 하드웨어가 나오는 것은 시간문제라고 생각된다.

이에 반해 촉각을 담당하는 햅틱 디스플레이 및 햅틱

시뮬레이션/렌더링 기술은 시각 디스플레이로 상향 조정된 일반 사용자의 기대치를 충족시키기 위해서는 하드웨어 및 소프트웨어 측면에서 여러 번의 Break-Thru가 일어나야 한다고 보여 진다. 하드웨어적 측면에서는 촉각 디스플레이는 시각 디스플레이와 아주 다른 요구조건을 가진다. 첫째, 인간의 촉각센서들(Mechanoreceptor, Nociceptor, Thermoreceptor)은 안구 내에만 모여 있는 시각 센서들과는 달리 인간의 몸 전체의 피부에 골고루 분포되어 있다. 이를 모두 커버하여 몰입감 있는 촉감을 제공하는 햅틱 디스플레이를 만드는 일은 쉽지 않다. 또한, 한 종류의 물리신호(빛 파장)만을 제공해 주어도 사실적인 사진을 만들어 내는데 지장이 없는 시각과는 달리 햅틱 장치는 힘, 진동, 온도, 압력 등 아주 다른 종류의 물리신호를 한꺼번에 제공해 주어야 사실적인 햅틱 피드백을 만들어 낼 수 있다.

소프트웨어적 측면에서도 촉각 피드백은 넘어야 할 기술적인 난제들이 많이 남아있다. 가상현실은 기본적으로 실시간 시스템으로, 시각 장치들이 빛에 대한 실시간 물리 시뮬레이션을 컴퓨터그래픽스에서 다루듯이, 힘, 진동, 압력, 온도에 대한 실시간 물리 시뮬레이션인 햅틱 렌더링을 수행해야 한다. 어플리케이션에 따라서 아주 간단한 선형 물리 시뮬레이션을 공간상의 한 점에 대해서만 수행할 수도 있지만, 의료 시뮬레이터같이 큰 햅틱 사실성을 요구하는 어플리케이션에서는 대규모 FEM 시뮬레이션을 실시간에 수행해야 할 수도 있다.

또 다른 소프트웨어적 이슈는 위의 물리 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 가상 물체의 햅틱 속성에 대한 모델링이 필요하다. 예를 들어, 수술 시뮬레이터에서 사람의 인체 피부 및 내부 장기의 경도, 점성, 마찰, 질감 등이 정확하고 적절하게 모델링이 되어 있어야 사실적이고 효율적인 실시간 햅틱 렌더링이 가능하다. 햅틱 속성 모델링은 시각 모델링에 비해 상대적으로 더 많은 노력이 든다. 시각 모델링은 3D 스캐너 및 RGB 카메라 등 비 접촉식으로 사람의 인지적인 능력과 비교해 비교적 완벽에 가까운 데이터를 얻을 수 있고 이를 모델링에 활용하기가 쉽다. 하지만 물리 시뮬레이션을 위한 햅틱 속성들(예를 들어, 물체의 경도, 표면의 까칠한 정도, 마찰력 등)은 각 속성마다 전혀 다른 센서 및 데이터 형태를 요구하고, 속성의 특징을 알기 위해서는 실제 직접 접촉해서 반응으로 나오는 물리 신호를 봐야 알 수 있는 것들이 대부분이다. 따라서 이 햅틱 속성을 획득, 가공, 활용하는 방법론 또한 많은 연구가 필요하다.

본 글에서는 이러한 가상현실을 위한 햅틱스 소프트웨어 기술에 대해 좀 더 면밀히 살펴본다.

## 2. 햅틱 시스템의 SW 구조

일반적인 가상현실을 위한 햅틱 시스템이 Computational 알고리즘의 구조는 그림 1과 같다. 먼저, “햅틱 장치”는 주로 사용자의 손에 부착된 형태이고, 사용자의 행위를 햅틱 장치가 추적하게 된다. 주로 사용자 손의 위치 추적이 될 것이고, 이는 햅틱 장치에 부착된 여러 가지 센서

들을 사용하게 된다. 대표적인 것이 힘 기반 햅틱 장치의 각 조인트에 부착된 Optical Encoder가 될 것이다. 햅틱 장치는 이러한 센서 데이터를 가공하여(예, Encoder에서 나오는 조인트 각도 데이터를 Forward Kinematics를 사용하여 유클리드 공간의 좌표로 가공)이를 햅틱 렌더링 장치에 실시간에 보내게 된다.

햅틱 렌더링 모듈이 가장 처음 하게 될 일은 사용자가 가상의 물체를 만지는지 아닌지에 대한 검사이다. 이를 “충돌검사”라고 하는데, 이 충돌검사를 하기 위해서는 가상 환경의 Geometry 모델과 현재 사용자의 손의 위치를 비교하는 알고리즘이 필요하게 된다. 보통은 컴퓨터 그래픽스 및 애니메이션에서 개발된 가상물체 실시간 충돌검사 알고리즘들을 사용하는데, 그래픽스와는 달리 햅틱 렌더링은 인간의 고주파 물리 신호의 높은 민감도로 인해 1 kHz의 업데이트 속도가 필요하다. 따라서 모든 충돌검사가 1 ms 내에 일어나야 하기 때문에 아주 효율적인 충돌검사 알고리즘이 필요하다. 이에 대한 연구도 햅틱스 연구 분야에서 많이 진행되고 있다.

충돌검사알고리즘의 결과 값은 보통 어떤 면과 어떤 위치에서 어떤 방향으로 충돌이 일어났느냐 하는 것으로, 충돌된 면과의 물리 반응을 계산하려면 충돌된 면의 햅틱 속성을 알아야 할 필요가 있다. 따라서 충돌검사가 끝나면 햅틱 속성모델에 저장된 해당 면의 햅틱 속성을 쿼리하여 “햅틱 반응 계산 모듈”에 전달한다.

“햅틱 반응 계산 모듈”은 저장된 햅틱 속성 및 충돌 속성을 이용하여 해당 가상 면과 사용자의 손과 실시간 물리 반응을 시뮬레이션 하게 된다. 예를 들어, 햅틱 속성

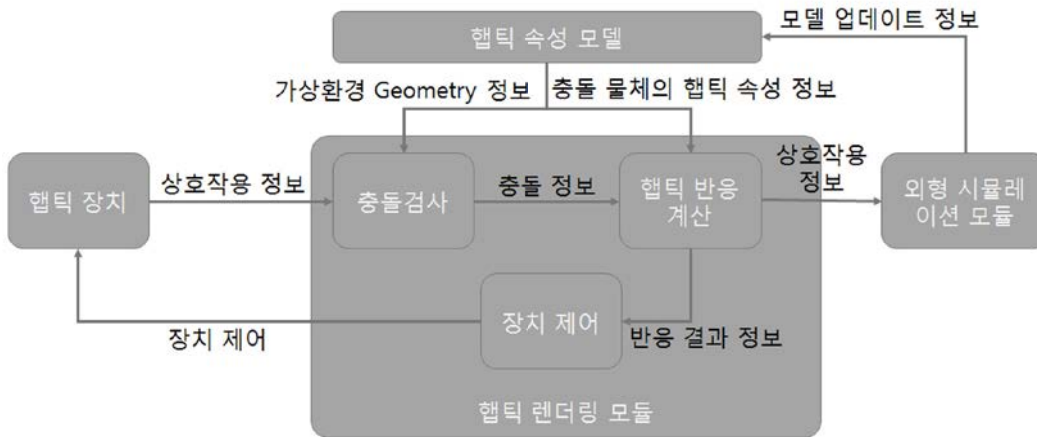


그림 1. 햅틱 시스템의 Computational Procedure



모델이 제공한 충돌한 면의 경도가 0.5N/mm이고, 사용자의 손이 가상 면을 3mm 정도 통과해 있다면 이 경도로 인한 햅틱 반응은 충돌 면의 Normal 방향으로 1.5N이 될 것이다. 다른 예로, 사용자가 지금 면의 Tangential 방향으로 면을 긁고 있다면 이 Sliding 상호작용으로 인한 마찰력이 발생하는데, 햅틱 속성으로부터 온 마찰계수가 0.2이고, 사용자가 누르는 힘의 4N 이라면 마찰력은 사용자 움직임의 반대방향으로 0.8N이 될 것이다. 위의 예들은 모두 아주 간단한 선형 물리기반 모델로 시뮬레이션을 수행한 예로, 보통은 이보다 더 복잡한 물리기반 모델을 사용하거나, 센서로 수집한 데이터를 그대로 저장하고 이를 Replay하는 형태로 사실성을 높이는 데이터 기반 모델을 사용하기도 한다.

위의 방법으로 햅틱 반응이 계산이 되면 그 다음스텝은 “장치제어” 부분이다. 일반적인 햅틱 장치는 자기만의 신호로 컴퓨터와 통신하고 명령을 받는다. 예를 들어, 힘 기반 햅틱 장치를 사용하여 특정 방향으로 4 N의 힘을 내기 위해서는 우선, 이 힘 벡터를 햅틱 장치의 각 조인트의 조인트 토크 값들로 변환을 해 주어야 하고 (Jacobian Matrix 사용) 이를 다시 모터 구동을 위한 전압이나 전류의 형태로 변환시켜주어야 한다. 최종적으로 원하는 물리 신호를 기계장치가 내 주게 하는 것이 목적인데, 기계장치의 한계로 인해서 공간적, 시간적 정확도에 문제가 있을 수 있다. 또한, 정확도만을 위한다면 기계장치가 불안정하게 변할 수도 있다. 햅틱 장치의 제어는 이렇게 정확도와 안정성 사이에 적절한 위치를 찾는 것이 중요하고, 둘을 모두 높일 수 있는 SW 및 HW 기반의 여러 방법들도 또한 많은 연구가 진행되고 있다. 이렇게 만들어진 제어 신호는 최종적으로 햅틱 장치에 전달이 되고 햅틱 장치가 구동이 되게 되면 이를 사용자가 다시 인지하고, 반응하게 되는 것이다.

전술한 것과 같이 보통은 사람의 인지적인 특성으로 인하여 촉감 렌더링은 아주 빠른 업데이트속도를 요구한다. 이 요구조건에 가장 반하는 부분이 “외형 시뮬레이션” 모듈이다. 만약 가상의 물체가 변형 가능하다던지, 움직일 수 있는 물체라면 사용자와 충돌 수 외부 힘으로 인해 표면이 변형되거나 물체가 움직여야 한다. 이는 아주 복잡한 Contact Dynamics 및 Dynamics 시뮬레이션을 필요하다는 것이고, 전통적인 방법은 절대 1ms 내에

이를 해 낼 수 없다. 따라서 여러 가지 방법이 제시되었는데, 예를 들어 1kHz의 햅틱 룩 바깥에 이 시뮬레이션을 두고, 좀 더 천천히 룩을 돌린다던지, 미리 오프라인에 계산을 다 한 후 실시간에 약간의 추가적인 계산만 수행하여 실시간성을 충족한다던지 하는 방법이다.

위의 방법으로 시뮬레이션 된 변형치를 햅틱 모델에 적용하는 과정 또한 필요한 과정이다. 주로, 외형모델의 변형을 다루게 되는데, 이 햅틱 시뮬레이션을 위한 외형 모형 크게 시각 시뮬레이션 용 외형 모형과 공유하는 방법과 따로 가지는 방법을 나뉜다. 공유하게 되면 모델 자체를 햅틱과 시각 시뮬레이션에 모두 적합하게 구성해야 한다는 단점이 있고, 따로 가지게 되면 두 모델의 실시간 일치에 대한 문제를 고려해야 하는 단점이 있다.

### 3. 햅틱 속성 모델링

전술한 것처럼 햅틱 시뮬레이션을 위해서는 가상 물체에 대한 햅틱 속성 모델링이 필요하다. 주요 햅틱 어플리케이션에서 첫 번째로 요구되는 속성은 물체의 외형 속성의 모델링이다. 가상물체의 외형은 시각 렌더링에 사용되지만 햅틱 렌더링 시에도 전술한 것처럼 사용자가 가상물체를 만지고 있는지에 대한 유무를 판단하는 충돌검사에 사용되고 또한, 물체의 모양을 판단하기 위해 표면을 쓰디듬는 상호작용을 위한 Contour 렌더링에도 사용된다. 외형 모델링은 주로 그래픽스 모델링에 사용되는 방법, 예를 들어, 3D 스캐닝, 3D 저작 툴 등을 사용하여 외형 데이터가 만들어 지고 다음과 같은 데이터 저장 방법을 사용하여 최종 모델링 된다. 우선 가장 많이 사용되는 외형 모델로는 평면의 3차원 패치를 모아 형태를 구성하는 Triangular Mesh를 사용한 외형 모델이다. 이는 그래픽스 렌더링과 같이 사용할 수 있다는 장점이 있고 아주 유연하게 표면을 표현할 수 있지만 Mesh의 개수가 커지면 충돌처리가 느려지는 단점이 있다. 햅틱 렌더링에서는 수식으로 곡면을 표현하는 Implicit Surface 모델도 많이 사용되는데, 충돌검사가 아주 간단한 반면 임의의 모양을 자유자재로 만들어 내는 데는 한계가 있다. 인체 내부 장기 등의 내부 데이터가 중요한 경우에는 복셀 데이터도 많이 사용된다. 충



돌검사가 빠르고 내부를 표현할 수 있지만 시각 렌더링과 결합이 어렵고 데이터의 저장 공간이 많이 필요하다는 단점이 있다.

외형 외에 상호작용 시 물체의 물리적 반응을 만들어 내는 물리 속성들(경도, 마찰, 질감)에 대한 모델링 방법은 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째, 물리법칙을 표현하는 물리 모델을 정하고 이에 대한 파라미터들을 숙련된 디자이너가 수동으로 조절해 가면서 햅틱 모델링을 수행하는 방법이다. 예를 들어, 경도를 간단한 경도 모델( $f = kx$ )로 표현하고, 좀 더 딱딱한 물체를 만들어 내기 위해 특정 지점의 경도 파라미터  $k$ 를 주위보다 크게 지정한다던지 하는 것이다. 아직은 이러한 속성 수동 할당을 편리

하게 해 주는 툴은 존재하지 않으므로 주로 햅틱 렌더링 알고리즘 혹은 속성 모델에 직접 파라미터를 입력하는 형태로 구현이 되어, 아주 번거롭다.

두 번째 방법은, 유사한 실제 물체와 상호작용 하면서 데이터를 얻고, 이 데이터를 이용해 물리 기반 모델의 파라미터를 유추하거나 데이터 자체를 보간하여 실제 물리반응을 시뮬레이션 하는 방법이다. 이 방법은 아주 사실적인 햅틱 속성 모델을 만들 수 있다는 장점이 있고, 데이터 자체를 보간하는 방법론일 경우 간단한 물리모델로 표현할 수 없는 물리 현상도 손쉽게 모델링 할 수 있다는 장점이 있다. 그림 2는 데이터 기반 경도 모델링 및 마찰 모델링의 예다.

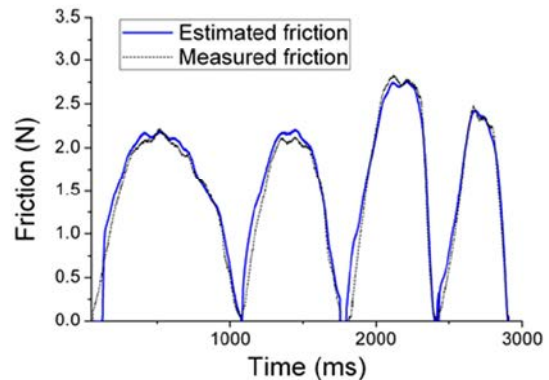
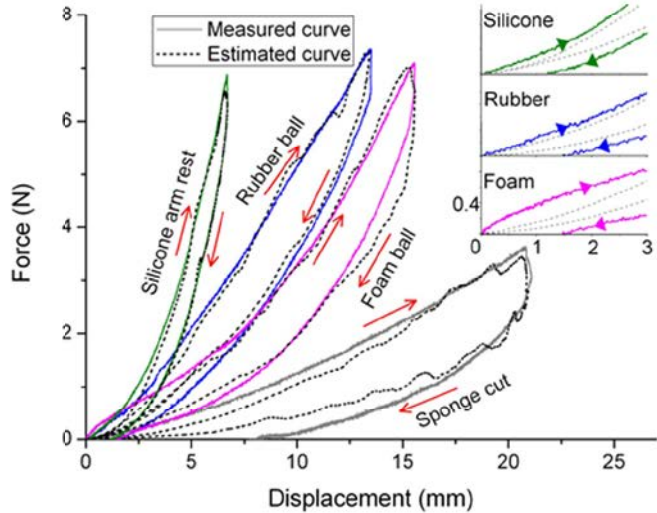


그림 2. 위는 경도 모델링의 예. Force Sensor가 달려있는 햅틱 장치로 고무공을 누르면서 Force와 Displacement 데이터를 얻고, 이를 비선형 경도 모델인 Hunt-Crossley 모델에 적용하여 파라미터를 구한 결과. 아래는 마찰력 모델링의 예. 같은 장치로 고무 표면을 긁으면서 Normal Force, Velocity, Lateral Force 데이터를 얻고, 이를 마찰 모델인 Dahl+Viscous 모델에 적용하여 파라미터를 구한 결과

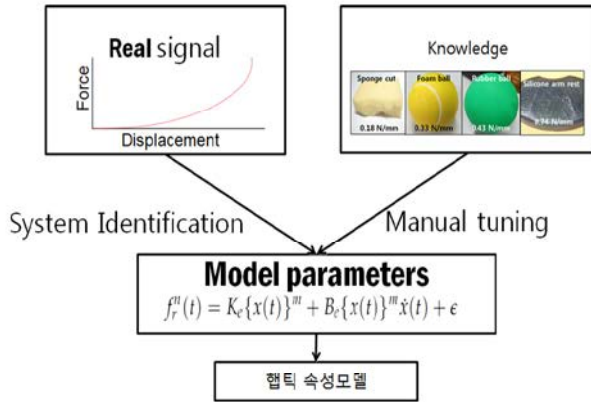


그림 3. 햅틱 모델을 생성하는 방법 2가지(경도 모델링의 예를 들어). 데이터 기반 물리모델 Identification과 햅틱 디자이너가 수작업으로 물리 모델을 튜닝하는 방법

그림 3은 이 두 가지의 모델링 방법을 그림으로 표현한 것이다.

## 4. 결 론

햅틱 렌더링은 가상현실에 햅틱을 가미시키기 위해 필요한 핵심 기술이고, 효율적이고 사실적인 햅틱 렌더링을 위한 필요조건이 정확한 햅틱 속성 모델링이다. 본 글에서는 햅틱 렌더링의 소프트웨어적인 측면에 대한 전반적인 요소 기술 및 이슈들과, 햅틱 모델링 방법론의 전반적인 소개를 하였다. 연구이슈들이 아직까지 산재한 햅틱스 분야에 많은 연구자들이 관심을 가지고 도전해 보기를 바란다.

## 저 자 약 력

전 석 희



- 2010년~2012년 : 스위스 연방공대 박사후 과정
- 2013~현재 : 경희대학교 컴퓨터공학과 조교수
- 관심분야 : 햅틱스, 가상현실, 증강현실