

햅틱 렌더링 기술

김 래 현 · 한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구센터, 선임연구원

e-mail : laehyunk@kist.re.kr

이 글에서는 햅틱스 기술 중에서 하드웨어인 햅틱장치를 통해 실감나는 촉감을 생성하도록 하는 소프트웨어적 과정인 햅틱 렌더링의 개념과 관련 기술들을 소개하고자 한다.

햅틱스(Haptics) 기술은 사람의 오감 중에서 촉감이라는 채널을 통해 컴퓨터/기계와 대화할 수 있는 기술들에 관한 연구 분야를 말한다. 기존의 HCI(Human Computer Interface/Interaction)에서는 주로 시각과 청각을 중심으로 연구되어 왔고 상대적으로 촉각을 통한 인터페이스는 최근 들어 많은 주목을 받고 있다. 2005년 가트너 그룹의 HCI에 관한 보고서(Hyper Cycle for HCI)에서 햅틱기술은 태동기를 지나서 발전 단계에 있는 유망한 기술로 분류하였다. 또한 경제전문지 포브스(Fobes)는 2006년 초에 발표한

“앞으로 인류의 미래의 삶을 바꿀 10가지(10 things that will change the way we live)” 중에 햅틱 기술을 포함하였다.

촉각은 일반적인 생각과는 달리 시각이나 청각보다 오히려 더 섬세한 감각이다. 예를 들면, 디지털 장치에서 비디오나 오디오를 압축해서 재현할 때에 원음에 비해 어느 정도 정보의 손실을 가지고 있다. 하지만, 우리의 눈이나 귀로써는 그 차이를 감지하기 어렵고 재현해 주는 속도도 비디오일 경우 30Hz 이상만 되면 연속적인 영상으로 인식하게 된다. 반면, 촉각은 조금의 변화나 불편함도 민감하게 감지할 수

있다. 특히, 우리 몸에서 가장 민감한 촉각을 가진 손가락 끝 부분에서는 500Hz까지의 빠른 자극을 구별할 수 있다고 한다. HCI적인 측면에서 보면, 시각과 청각을 통한 컴퓨터와 상호작용 시 컴퓨터로부터 사용자에게 가는 단방향의 정보의 흐름을 갖지만, 촉각을 통한 상호작용은 정보와 더불어 에너지를 양방향으로 주고받기 때문에 복잡하고 민감한 작업들을 감각적으로 수행할 수 있는 커다란 장점을 가지고 있다.

이런 촉감을 실감나게 그리고 안정하게 재현하기 위해서는 인지 심리학적 연구, 하드웨어 기술

(햅틱장치 기술), 그리고 소프트웨어 기술(햅틱 렌더링 기술) 등 많은 학문적인 뒷받침이 요구된다. 이 글에서는 이러한 햅틱스 기술 중에서 햅틱 렌더링의 개념과 관련 기술에 대해 소개하고자 한다.

햅틱 렌더링이란

햅틱 인터페이스는 햅틱장치를 통해 사용자가 직접 가상의 정보를 만지고, 물리적인 반응을 촉각을 통해 느낄 수 있도록 함으로써 실제 세계에서와 같은 자연스런 인터페이스를 제공한다. 햅틱 렌더링은 가상 환경과 상호 작용을 할 때 발생하는 물리적인 접촉을 실감나게 재현하기 위한 과정을 말한다. 이 글에서는 일반적인 능동적(active) 햅틱 시스템에 대해 논하고자 한다.

햅틱 렌더링은 크게 세 가지 단계로 나눌 수 있다(그림 1의 박스 안). 먼저, 가상 공간의 햅틱

커서가 가상의 물체와 닿았을 때 그 순간과 닿은 부위를 감지하기 위한 충돌 검사(collision detection)가 필요하다. 이때 가상공간의 햅틱 커서의 위치는 햅틱 장치의 단말장치(end effector)의 물리적인 위치로부터 매핑된다.

만약 충돌이 일어난 경우에는 햅틱 커서가 가상의 오브젝트 내부로 침투하는 것을 막기 위해 물리적인 반력을 생성하여 오브젝트 내부의 햅틱 커서를 오브젝트 표면으로 밀어내야 한다. 이때 물리적인 반력을 계산하는 것이 두 번째 단계가 된다. 이외에 고려해야 하는 것은 가상의 오브젝트가 표면의 질감을 재현해야 한다. 예를 들면, 표면의 마찰력, 경도, 거칠기 정도 등의 물리적인 재질감을 고려해서 반력이 생성되어야 한다.

계산된 반력을 그대로 햅틱 장치에 적용하면 몇 가지 이유로 시스템을 불안정하게 만든다. 이를 해결하기 위해 시스템의 안정

화를 고려한 제어 알고리즘의 적용이 마지막 단계이다.

그림 1에서처럼 햅틱 시스템은 사용자, 햅틱장치, 그리고 햅틱 렌더링 간에 폐쇄회로(closed loop)가 생성되어 햅틱 커서의 위치와 반력을 주고 받는다. 이외에 가상환경을 위한 모델 정보, 외부 입력에 반응하는 가상세계의 물리 시뮬레이션, 화면을 만들기 위한 비주얼 렌더링, 그리고 접촉 시 발생하는 소리를 위한 사운드 렌더링 등의 복합적인 모듈이 필요하다. 그림 2는 햅틱 기술의 응용 예로서 KIST에서 개발한 실감치과훈련시스템을 보여준다.

앞으로 햅틱 렌더링에 관한 기본적인 기술들을 구체적으로 알아보려고 한다.

충돌검사 과정 (collision detection)

햅틱 시스템의 안정화와 가상

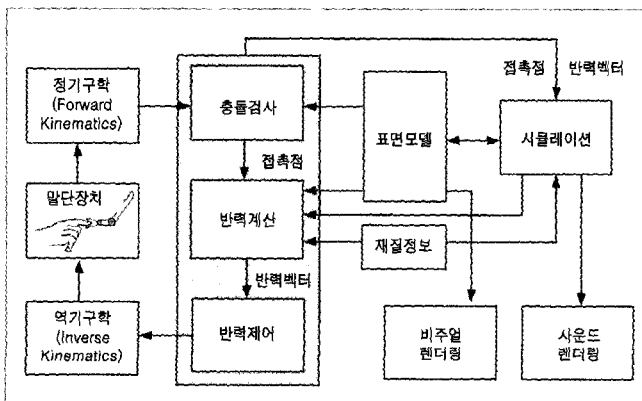


그림 1 햅틱 시스템의 구조



그림 2 햅틱 치과훈련 시스템(KIST)

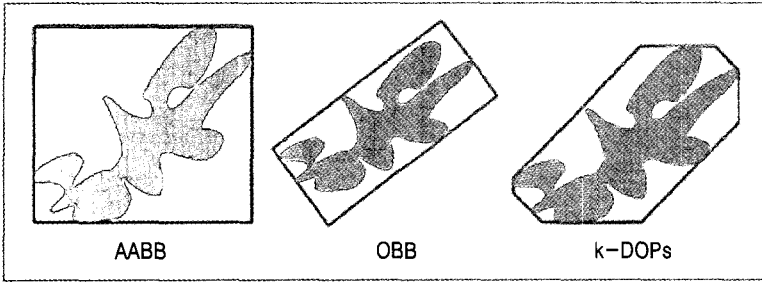


그림 3 다양한 바운딩 박스를 이용한 충돌검사 방법

오브젝트 표면의 딱딱한 질감을 실감있게 재현하기 위해서 햅틱 렌더링 과정은 1kHz 정도의 빠른 업데이트를 요구하고 있다. 따라서 햅틱 커서와 가상 오브젝트 간의 충돌검사가 신속히 이루어져야 하고 동시에 물리적인 접촉감을 재현하기 위해서는 가능한 한 정확한 충돌검사가 이루어져야 하는 어려움이 있다.

충돌검사를 수행하는 방법들은 가상 오브젝트의 표현 방식에 따라 달라지는데, 크게는 메시 모델과 볼륨 모델 기반으로 나눌 수 있다. 상대적으로 메시 모델 기반의 충돌 검사는 모델의 각 부분

의 경계를 감싸고 있는 가상의 바운딩 박스(bounding box) 간의 충돌을 검사하는 것이 일반적이다. 바운딩 박스를 정의하는 방식에 따라 AABB(Axis-Aligned bounding Box), OBB (Oriented Bounding Box), 그리고 K-Dops(K-Discrete Orientation Polytopes) 등이 있다. 모델의 경계에 가깝게 바운딩 박스를 정의할수록 계산의 복잡도는 높아지지만, 보다 정확한 충돌검사가 이루어진다(그림 3). 또 다른 기술로는 공간을 일정한 간격으로 분할하여(special decomposition) 충돌한 부위를

빠르게 검사하기도 한다. UNC에서 개발한 H-Collide는 제시된 여러 가지 기술들을 복합적으로 사용하여 햅틱 렌더링을 위한 빠른 충돌검사를 수행할 수 있다.

반면, 볼륨 모델의 경우 상대적으로 충돌검사가 간단하게 이루어진다. 모델 표면과의 근접도를 나타내는 밀도값을 햅틱 커서의 위치와 비교하면 쉽게 충돌 여부를 검사할 수 있다.

반력 계산 과정(force computation)

실세계에서 손으로 딱딱한 물체를 만질 경우 물체의 표면에 손에 의해 가해진 힘과 동일한 힘으로 손을 밀어내므로 표면 위에서 손이 머무르게 된다. 햅틱 기술은 가상 세계에서 실세계에서와 비슷한 경험을 제공해준다. 하지만, 컴퓨터가 만들어 낸 디지털 세계의 내부에서는 실세계와는 다른 법칙이 적용된다. 햅틱

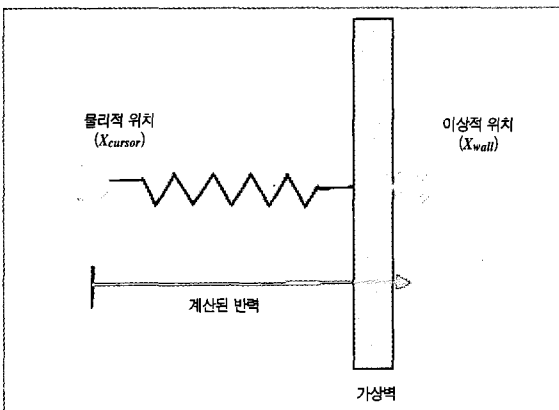


그림 4 1D 가상벽 모델

$$F = \begin{cases} 0 & x_{cursor} > x_w \\ K(x_{wall} - x_{cursor}) & x_{cursor} \leq x_w \end{cases}$$

K : 가상벽의 경도

그림 5 스프링 반력 모델

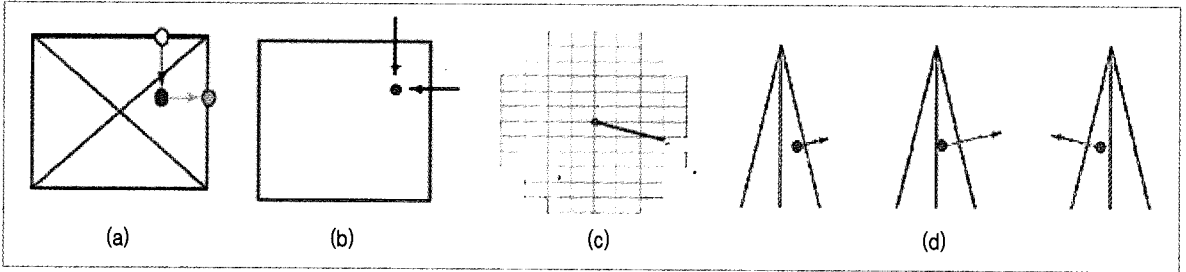


그림 6 패널티 기반 모델의 제한점(Zilles et al., IROS95)

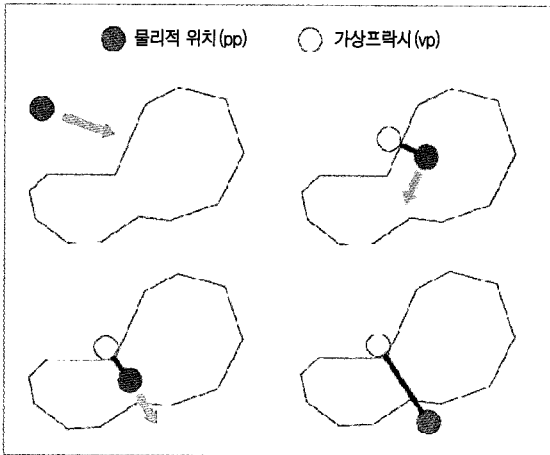


그림 7 가상 햅틱 커서 기법(constraint-based et al., IROS97)

렌더링 과정은 컴퓨터에서 일정 시간 간격으로 불연속적으로 반복되지만(discrete-time nature of haptic interaction), 물리적인 햅틱장치의 단말장치는 연속적인 시간상에 움직임으로써 햅틱 커서가 가상 물체의 표면을 통과한 순간에 적절한 반력(responsive force)을 계산할 수 없다. 즉, 햅틱 커서가 가상 모델의 딱딱한 표면을 통과하는 것을 허용할 수밖에 없다. 이후에 모델 내부에 있는 햅틱 커서를 표면으로 밀어내도록 하는 반력을 계산한다(active haptic system). 이와 같은 가상 모델의 표면의

가상벽(virtual wall)이라 한 다(그림 4). 그림 5에서 내부의 햅틱 커서가 가상벽의 표면으로 이동하도록 하는 반력은 기본적으로 스프링 모델을 사용하여 계산된다. 이때 스프링

계수는 가상벽의 경도(stiffness)를 의미한다.

메시 모델에서 반력을 계산하는 알고리즘 중에서 두 가지를 소개하고자 한다. 먼저 패널티 기반(penalty-based) 모델은 단순히 가상 모델 내에 침투한 정도(penetration depth)에 비례해서 반력벡터의 양과 방향을 계산한다. 하지만, 이 방식은 모델 내부의 볼륨 경계면에서 반력 벡터의 방향이 갑자기 바뀌거나(force discontinuity)(그림 6(a)), 햅틱 커서의 움직임의 히스토리가 없어서 여러 개의 Path가 생기거나(그림 6(b)), 표면의

가장 가까운 점을 찾기가 어렵다(그림 6(c)). 또한 내부 볼륨이 적은 뾰족한 부분에서는 적절한 반력을 주지 못하고 통과해 버리는 문제(그림 6(d)) 등이 있다.

이를 해결하기 위해서 constraint-based 모델이 소개되었다. 이 방식에서는 햅틱 커서를 물리적인 위치를 갖는 PP(Physical Position, 그림 7에서 진한 색 점)와 이상적인 위치를 나타내는 VP(Virtual Proxy, 그림 7에서 옅은 색 점)로 나누었다. 자유 공간을 움직일 때는 PP와 VP가 같은 위치에 있지만, 물체에 충돌한 이후에는 PP는 물체 내부로 침투하고 VP는 물체 표면에 머무르게 된다. Constraint-based 모델에서는 충돌 이후에 VP는 물체 표면에서만 움직이도록 하는 제한을 두고 PP와 VP의 거리를 최소화하는 벡터를 계산하여 이를 반력으로 사용하였다. 이를 통해 갑작스런 반력의 변화를 줄여 부드러운 접촉감을 주고, 내부 볼륨이 적은 모델을 만질 때도 적절한 반력을 사용자에게 느끼게 할 수 있다.

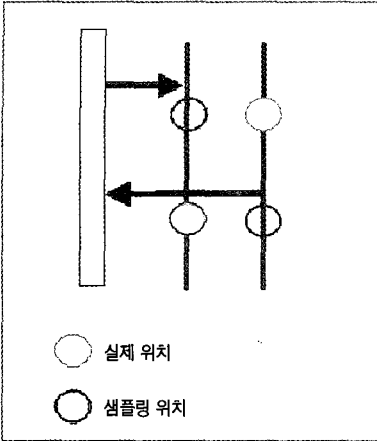


그림 8 디지털 샘플링의 예

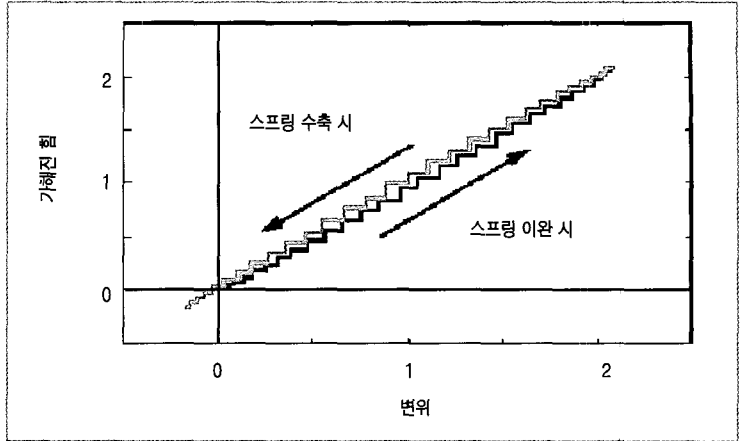


그림 9 가상벽 모델에서 스프링 포스의 변화

반력의 안정화를 위한 제어(force control)

앞서 과정에서 계산된 반력을 그대로 햅틱장치에 적용을 하게 되면, 몇 가지 이유로 햅틱 시스템이 불안정하게 된다. 햅틱장치의 자체의 제약점들에 의한 원인도 있지만, 이 글에서는 햅틱 렌더링 과정의 디지털 샘플링 특성에서 기인한 원인을 논하고자 한다. 사용자는 햅틱장치를 연속적인 시간에 조작을 하지만, 컴퓨터에서는 일정 시간 간격마다 불연속적으로 햅틱 커서의 위치를 샘플링함으로써 실제의 위치보다 항상 약간 뒤에 있게 된다.(그림 8)

이런 현상은 반력을 계산하는 스프링모델의 수축과 이완 시에 계산되는 반력이 실제 사용자가 가한 힘보다 적거나 커지게 된다(그림 9). 사용자가 가상 모델을 햅틱 커서로 누를 때 즉 스프링이 수축할 때 실제보다 적은 힘

이 들고 반대로 스프링이 이완할 때 실제보다 더 큰 반력을 생성한다. 결과적으로 사용자가 가한 힘보다 더 큰 반력이 생성됨으로써 여분의 에너지에 의한 진동(oscillation)이 일어나 시스템이 불안정하게 된다. 이를 해결하기 위해서 가상의 댄퍼를 시스템에 추가하여 여분의 에너지를 소비하도록 하여 시스템을 안정하게 제어할 수 있다. 이러한 모델을 스프링-댄퍼 모델이라고 하고 가상커플링(virtual coupling)(그림 10)이라고도 한다.

시스템의 안정화를 위한 또 하나의 고려해야 할 것은 수동성이론(passivity theory)에 기초한 햅틱장치가 갖는 기계적 댄핑, 가상의 댄핑, 가상의 경도, 그리고 샘플링 주기에 관한 관계이다.

Colgate가 그림 11과 같이 이들 간의 관계식을 제시하였다. 이 관계식이 만족해야 시스템의 안정을 유지할 수 있다는 것이다.

햅틱장치의 기계적인 댄핑과 가상의 디지털 댄핑이 주어졌을 때, 가상의 모델이 충분한 경도를 갖도록 하기 위해서는 가능한 짧은 샘플링 주기를 가져야 한다. 즉 빠른 주기의 반력 계산이 필요하다. 일반적으로 강체모델에 대한 햅틱시스템은 1kHz 이상의 샘플링 주기를 가져야 한다.

햅틱 텍스처링(Haptic texturing)

컴퓨터 그래픽스에서 복잡한 표면의 모델을 표현하기 위해 실제 메시는 단순하게 만들고 복잡한 표면의 이미지를 메시에 매핑하여 시각적인 실감도를 높이는 기술이 그래픽 텍스처링이라고 한다. 이와 비슷하게 가상 모델의 복잡한 표면을 단순한 모델에서도 촉각적으로 실감있게 느낄 수 있도록 하는 기술이 햅틱 텍스처링이라고 한다.

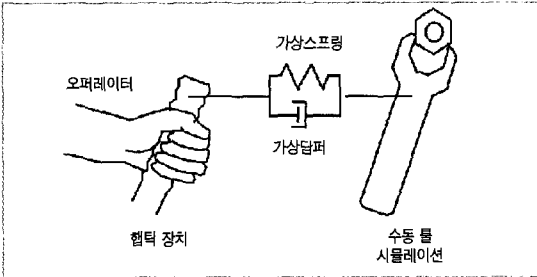


그림 10 가상 커플링(Colgate., IROS 1995)

$$b > \frac{KT}{2} + B$$

b:기계적 댐핑, B:디지털 댐핑
K:디지털 경도, T:샘플링 주기

그림 11 Colgate 모델(Colgate., ICRA 1994)

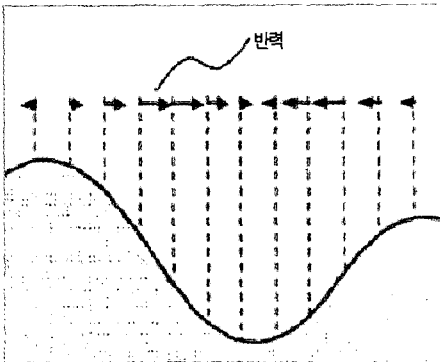


그림 12 용기와 계곡(Minsky)

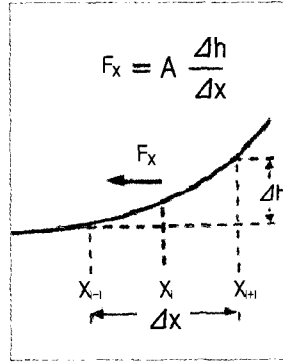
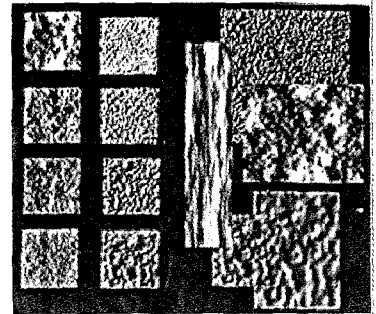


그림 13 이미지 기반 햅틱 텍스처링



햅틱 텍스처링은 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 먼저 deterministic texture는 미리 지정된 룰에 의해서 표면의 질감을 느낄 수 있도록 하는 방식으로 민스키가 Bumps and Valleys라는 방법으로 2차원 공간에서 이를 구현하였다(그림 12). 사용자가 가상의 언덕을 오를 때 움직이는 반대방향으로 힘을 주거나 내리막길에서는 골짜기로 흐르는 듯한 느낌을 주도록 하였다. 힘의 크기는 언덕의 높이에 비례하도록 하였다. Deterministic texture의 또 다른 예는 이미지 기반 텍스처(image-based texture)이다. 그래픽 텍스처가 보

여주는 시각적인 질감을 촉각을 통해 느낄 수 있도록 하는 방법으로 그래픽 텍스처의 그레이 스케일 값의 로컬 변화량(local gradient)으로 최종 반력을 계산하는 데 사용하였다(그림 13)

두 번째 방식은 랜덤한 입력값을 갖는 함수를 통해 재질의 거칠기를 표현하는 확률기반 텍스처링(stochastic texture)가 있다. 이를 통해 흙이나 모래 같은 일정하지 않는 재질을 모델링하는 데 사용된다. 이때 사용되는 모델은 Gaussian distribution 이나 Markov random field 등을 이용하여 반력 계산 시 표면의 노말벡터(normal vector)를

흔란하게 만들어(perturbing) 거칠기를 표현한다.(그림 14)

마지막으로 햅틱 레코딩(Haptic recoding)은 실제 재질을 미리 샘플링(리코딩)하여 시뮬레이션 시 다시 플레이백하는 방식이다(그림 15). 이를 통해 복잡한 계산에 따른 부담을 줄일 수 있고 실제 모델의 재질을 시뮬레이션할 수 있다. 예를 들어, 우리의 피부는 만지거나 절개할 때 비선형적인 움직임을 갖는데 이를 미리 적절하게 리코딩하여 가상 수술 시 재생하여 실감도를 높일 수 있다. 어려운 점은 리코딩한 반력들을 어떻게 매개변수화(parameterize)하는가 하는 문제이다.

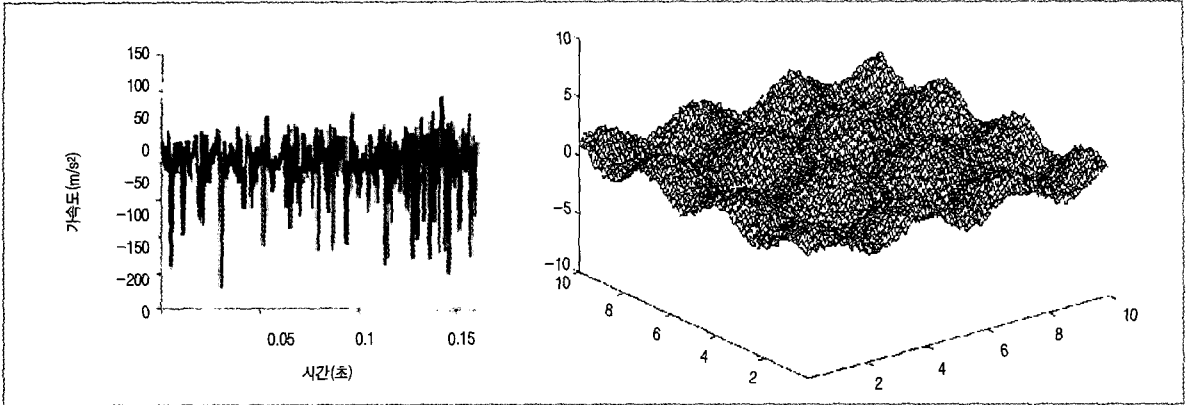


그림 14 가우시안에 의한 확률기반 텍스처링

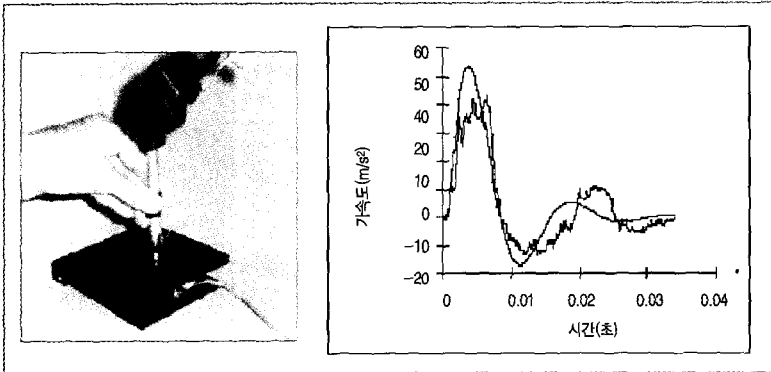


그림 15 실제 모델의 재질을 측정하여 시뮬레이션 하는 햅틱 레코딩 기술

3DOF vs 6DOF haptic

일반적으로 햅틱 렌더링하면 햅틱 커서를 한 점으로 모델링하여 가상의 오브젝트와 상호작용하는 포인트 기반 인터랙션(point-based interaction)을 말한다(그림 16(a)). 가상 오브젝트와 인터랙션은 햅틱 커서를 XYZ 축 상에서 이동시키는 3DOF(Degree Of Freedom) 반력을 갖는다. 3DOF 햅틱스는

다양한 햅틱 시스템에 사용된다. 예를 들면, 가상 프로토타이핑, 의료 시뮬레이션, 과학적 정보를 시각과 촉각을 통해 인지하는 Haptic visualization 등에 사용된다.

반면에 햅틱 커서를 단순히 점이 아닌 선(ray-based interaction)(그림 16(b))이나 모양과 볼륨이 있는 오브젝트(object-interaction)(그림 16(c))로 모델링할 경우 상황은 훨씬 복잡해진다. 왜냐하면, 햅틱 커서가 오브젝트에 동시에 접촉하는 부분이

여러 개인 경우를 고려해야 하고 다점 접촉에 따른 회전력을 발생시키는 3DOF의 토크를 생성하여 전체적으로는 6DOF(3DOF Force + 6DOF Torque)의 반력을 갖게 된다. 예를 들면, CAD 어셈블리를 시뮬레이션 할 때 3차원 가상의 구멍에 다른 3차원 모델을 집어 넣고자 할 때 복잡한 충돌과 반력이 발생되게 된다. (Peg-in-the-hole problem)

앞서도 설명한 것처럼, 햅틱 렌더링은 1kHz 이상으로 이루어져야 하는데 여러 점들의 충돌 검사와 반력계산, 그리고 이러한 반력들의 조합으로 안정되고 빠른 6DOF 반력의 계산은 대단히 어려운 일이다. 또한 오브젝트 기반의 햅틱 커서의 무게중심과 회전 방향이 물리적인 햅틱장치와 다르기 때문에 이를 직접 표현하기 어렵다. 하지만, 다양한 응용에 보다 실감나는 경험을 주기 위해서는 앞으로 많은 연구가 되어야 할 분야임에는 틀림없을 것이다.

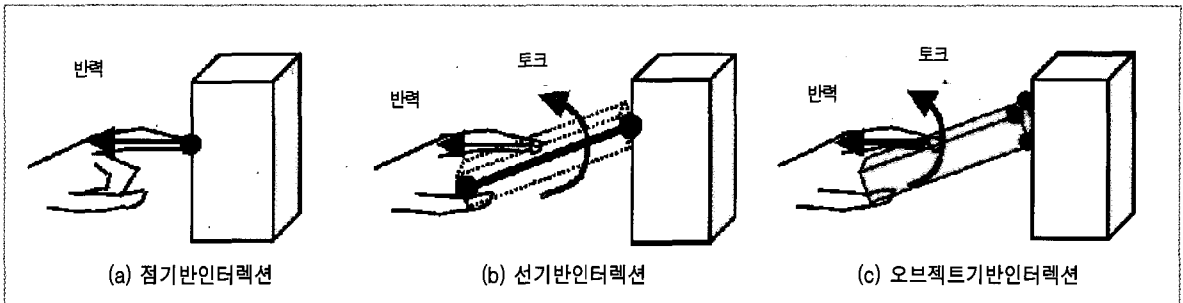


그림 16 햅틱 인터랙션의 종류

네트워크 환경에서의 햅틱 기술

원격지의 두 사람이 네트워크 상에서 햅틱장치를 통해 줄 다리기를 한다고 가정해 보자. 이상적으로는 상대방의 당기는 힘을 서로 동시에 느끼면서 자신의 힘을 조절해야 한다. 그러나 만약 상대방의 힘의 전달이 늦게 도달하고 내가 가한 힘 또한 상대방에게 늦게 전달된다면 어떻게 될까? 두 사람은 갑작스런 상대방의 당기고 미는 힘에 의해 넘어지고 말 것이다.

이처럼 실제 네트워크 환경에서는 물리적으로 정보의 전달이 늦어지는 현상인 Network delay를 피할 수 없다. 가상 현실에서는 그래픽 화면이 초당 30 프레임 정도만 업데이트가 되면 사람이 느끼기에 연속적인 화면으로 인식한다. 따라서 네트워크 상에서 가상의 공간을 공유할 경

우에는 30Hz 주기 이상으로 정보를 전달하면 마치 같은 공간에 존재하는 느낌을 주게 된다. 하지만, 원격지의 사용자들이 서로의 힘을 공유하고자 할 때는 앞서 설명한 것처럼 이상적으로는 1kHz 이상의 정보전달 주기, 다시 말하면 1ms 이하의 정보전달 시간을 요구한다. 하지만, 일반적인 네트워크 환경에서는 이와 같은 조건을 만족하기는 어렵다.

이런 문제를 해결하기 위해서 몇 가지 방안들이 제시되고 있다. 먼저 원격지의 상대방이 가하는 힘을 미리 예측하여 로컬 시스템에 반영하는 것이다(dead reckoning method). 하지만, 예측이 잘 못되어지면 순간적으로 시스템의 불안정을 가져오게 된다. 다른 방법으로는 가상의 댐퍼를 시스템에 추가하여 시스템을 안정화시킬 수도 있지만, 실감나는 느낌을 줄 수 없다는 단점이 있다.

여러 가지 현실적인 한계에도

불구하고 현재 많은 연구가 이루어지고 있다. 네트워크 햅틱 기술을 이용한 응용으로는 원격제어, 게임, 협업, 원격 수술 등 다양한 분야가 예상된다.

맺음말

이상과 같이 햅틱 렌더링의 기본적인 기술들을 대략적으로 살펴해보았다. 이외에도 응용에 따라 필요한 햅틱 렌더링 기술들이 많이 있다. 예를 들면, 수술 시뮬레이션을 위한 변형체 모델(deformable object)과 과학적 데이터의 가시화를 위한 벡터필드 모델링 등을 들 수 있다. 앞으로 다양한 햅틱 분야의 응용과 발전을 위해서는 고성능의 햅틱 장치 개발기술과 더불어 햅틱 렌더링 기술의 많은 발전이 이루어져야 한다.