

변형체의 햅틱 시뮬레이션

조맹호 · 서울대학교 가계항공공학부, 교수 _e-mail : mhcho@snu.ac.kr

이 글에서는 변형체를 이용한 햅틱(haptic) 시뮬레이션의 대표적인 기법들에 대해서 간략하게 소개하고자 한다.

지금까지 가상현실 구현을 위하여 주로 시각과 청각 정보의 전달로써 몰입감을 증대하는 것에 초점이 맞추어져 있으나, 최근에는 컴퓨터 기술의 급속한 발달과 다양한 형태의 햅틱(haptic)장치의 개발로 말미암아

촉각 정보를 사실적으로 전달할 수 있는 방법이 모색되고 있으며, 현재 햅틱장치는 가상현실 구현에 중요한 역할을 하고 있다. 햅틱장치를 이용한 시뮬레이션은 가상현실 내에 존재하는 물체와의 상호작용에서 발생하는 촉각

정보를 사용자에게 전달함으로써 사용자가 마치 실제 주변 상황과 상호작용하고 있는 것처럼 만들어 주는 것을 목적으로 하고 있다. 햅틱장치는 전달하고자 하는 촉각 정보에 따라 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 즉, 물체의 형

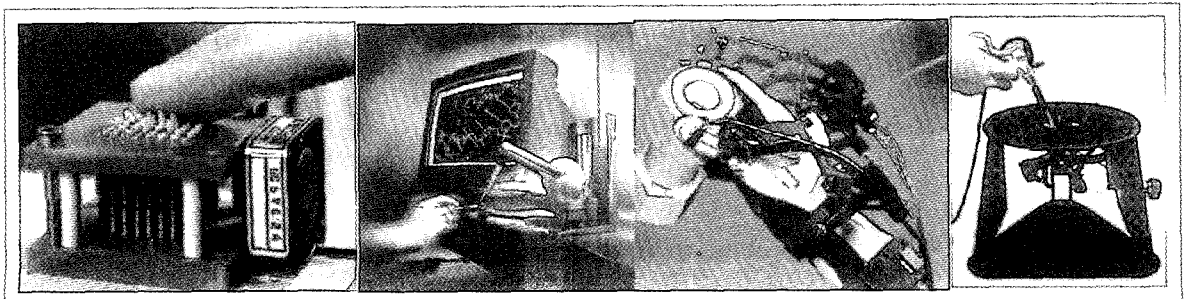


그림 1 다양한 목적에 따라 개발된 햅틱장치

상감, 재질감, 온도감 등을 전달할 수 있는 촉각(tactile feedback) 기반의 햅틱장치와 물체와 햅틱장치 간의 작용 반작용에 의해 발생하는 힘(force feedback) 기반의 햅틱장치로 나눌 수 있다. 힘 기반의 햅틱장치는 사용 목적에 따라 다양한 형태의 장치가 개발되어 상용화된 제품이 있지만 촉각 기반의 햅틱장치는 아직 상용화된 제품이 많지 않다.(그림 1)

변형체 햅틱 시뮬레이션의 어려움

햅틱 시뮬레이션은 햅틱장치 사용자의 움직임 정보가 가상현실로 전달되면 그 움직임에 의해 발생하는 촉각 정보가 다시 사용자에게 전달되는 양방향 정보 전달을 기반으로 하고 있다. 사용자에게 물입감을 주기 위해서는 촉각 정보와 함께 시각과 청각 정보도 함께 전달되어야 한다. 그러나 각각의 정보는 인간의 감지

변형체를 이용한 햅틱 시뮬레이션은 정확한 변형과 반력을 실시간으로 계산하여 사용자에게 전달해야 하므로 강체의 경우보다 계산 과정이 훨씬 복잡하다.

능력에 따라 일정한 갱신 주기로 사용자에게 전달되어야만 한다. 예를 들어, 인간이 시각적으로 부자연스러움을 느끼지 않게 하기 위해서는 30Hz 이상의 갱신 주기로 시각 정보가 전달되어야 한다. 그러나 촉각 정보는 시각 정보보다 더 민감하기 때문에 시각 정보의 갱신 주기보다 약 30배 빠른 1kHz 이상의 갱신 주기로 전달되어야 사용자가 자연스러운 촉각을 느낄 수 있다. 이것은 가상현실 내의 물체와 햅틱장치의 상호작용에서 발생하는 촉각의 계산이 약 1ms 이내로 계산되어야 함을 의미한다.

만약 가상현실 내의 물체를 강체(rigid body)로 가정하면 햅틱장치와의 상호작용에서 발생하는 반력(촉각 정보)의 계산은 강체

표면과 햅틱장치의 접촉점에서부터 실제 햅틱장치의 위치까지의 거리를 이용하여 비교적 쉽게 해결된다(그림 2). 일반적으로 두 점 사이의 거리와 스프링 상수, 댐핑 상수를 조합한 함수를 이용하여 반력을 계산하게 된다. 또한 강체의 움직임(시각 정보)의 계산은 간단한 운동방정식에 의하여 계산된다. 그러나 변형체(deformable body)의 경우는 강체의 경우보다 고려해야 할 사항들이 많아지며 계산이 복잡하게 된다. 변형체와 햅틱장치 사이에 접촉이 발생할 때 반력뿐만 아니라 변형(deformation)이 동시에 계산되어야 하며 반력과 변형량을 계산하기 위해서는 변형체의 물리적 특성을 고려해야 하기 때문에 강체의 경우보다 계산량이 증가한다.

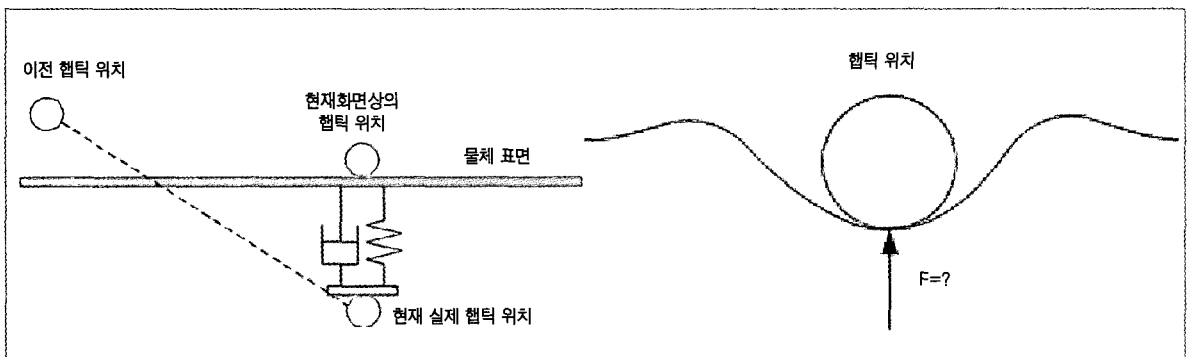


그림 2 강체와 변형체의 반력 계산

변형체 모델링 기법

변형체를 이용한 햅틱 시뮬레이션은 강체의 경우보다 계산량이 급격하게 증가하기 때문에 적절한 변형체 모델링 기법을 선택하는 것이 매우 중요하다. 그 중에서 가장 널리 사용되는 모델링 기법으로 질량-스프링 시스템(mass-spring systems)과 연속체(continuum) 개념을 기반으로 하는 모델이 있다.

질량-스프링 시스템은 변형체 모델의 절점을 질량으로 표현하고 절점과 절점 사이에 스프링과 댐퍼로 연결한 격자 형태의 모델이다(그림 3). 질량-스프링 시스템은 원래 컴퓨터 그래픽 분야에서 물체의 변형 모델링에 사용되고 있는 기법으로서 1995년 Swarup에 의해 처음 변형체 햅틱 시뮬레이션에 적용하였다. 질량-스프링 시스템은 모델링이 비교적 간단하고 변형과 반력의 계산이 빠르며 동적 거동 표현이 용이하기 때문에 현재까지 변형체 햅틱 시뮬레이션에 많이 사용되고 있는 모델이다. 그러나 질량, 스프링, 댐퍼만으로 변형체의 물리적 특성을 표현하는 데 한계가 있어 정확한 변형과 반력의 계산이 어렵다는 단점이 있다. 또한 얇은 변형체의 경우에는 질량-스프링 시스템을 적용하기가 쉽지 않으며 굽힘현상을 표현하기 어렵다는 단점이 있다.

질량-스프링 시스템의 단점을 보완하기 위해 연속체 개념을 도

입한 모델링 방법이 제시되었다. 연속체 개념을 기반으로 하는 모델은 미분방정식을 통하여 변형체의 물리적 특성을 나타낼 수 있기 때문에 질량-스프링 시스템보다 적은 수의 절점으로 보다 정확한 변형과 반력을 계산할 수 있는 장점이 있어 최근에 널리 사용되고 있다. 그러나 미분방정식의 해를 통하여 변형과 반력이 계산되기 때문에 계산량이 많고 대형행렬을 저장해야 하는 단점이 있다. 이러한 단점은 반력의 갱신주기(1kHz)를 만족시키기 어렵기 때문에 반력과 변형의 계산을 단순화하거나 선행해석 과정을 통하여 계산된 결과를 시뮬레이션 과정에 재사용하는 방법으로 단점을 극복하고 있다.

지금까지 제안된 변형체 햅틱 시뮬레이션을 위한 연속체 개념 모델링 방법으로는 기계공학의 구조해석에서 사용하는 유한요소법(finite element method), 경

계요소법(boundary element method), 무요소법(meshfree method) 등이 있다. 각각의 대표적인 변형체 햅틱 시뮬레이션의 예는 다음과 같다.

1) 유한요소 모델

유한요소 변형체 모델은 그래픽 분야에서 물체의 변형을 모델링하기 위한 방법으로 1980년대 중반부터 사용되어 왔다. 유한요소 변형체 모델을 이용한 햅틱 시뮬레이션은 변형과 반력의 계산시간을 줄이기 위하여 강성행렬의 역행렬을 선행해석 과정에서 계산한 후 시뮬레이션에서 사용하는 방법을 주로 사용한다. 따라서 역행렬을 저장할 수 있는 충분한 메모리 공간이 필요하기 때문에 역행렬의 크기를 줄이고자 하는 노력이 시도되었다. 그러나 유한요소 변형체 모델은 비주얼 렌더링에 사용되는 표면 절점 뿐만 아니라 내부 절점도 포함한

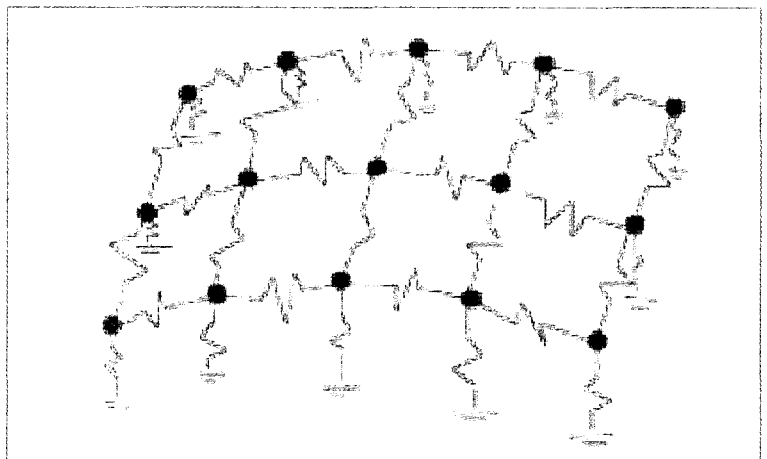


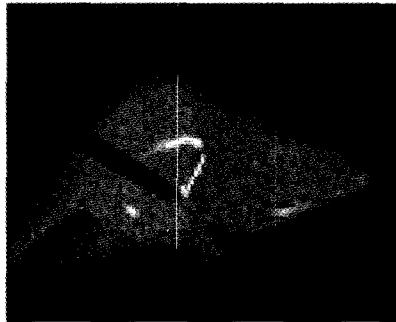
그림 3 질량-스프링 시스템

다는 단점이 있다.

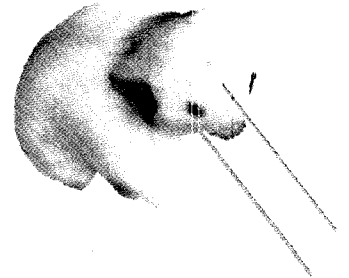
유한요소 변형체 모델을 햅틱 시뮬레이션에 처음 사용한 것은 1996년에 프랑스 INRIA 그룹에 의해서였다. INRIA 그룹 (<http://www.medicalsim.org/People/Stephane/>)은 변형체의 격자 생성과정에서 표면 절점과 내부 절점을 구분한 후 선형 해석 과정에서 질량행렬, 댐핑행렬, 강성행렬을 구성하고 강성행렬의 역행렬을 계산하였다. 변형체의 내부 절점은 시뮬레이션 과정에서 비주얼 렌더링에 사용되지 않으므로 정적 응축(static condensation)법을 이용하여 표면 절점에 해당하는 강성행렬의 역행렬만을 저장함으로써 저장행렬의 크기를 줄이고자 하였다. 햅틱 시뮬레이션 과정에서는 라그랑지안 운동방정식을 이용한 유한차분법에 의하여 반력을 계산한 후 강성행렬의 역행렬과의 곱셈을 통하여 변형을 계산하는 방법을 사용하였다. 반력과 역행렬의 곱셈과정에서 계산 시간을 줄이고자 반력 벡터의 접촉 절점 이외의 부분은 반력이 존재하지 않는다는 사실을 이용하여 접촉 절점에 해당하는 역행렬의 블록 역행렬만 계산에 사용하였다.

2001년에 Koichi(<http://www.media.k.u-tokyo.ac.jp/hirota/>) 등에 의하여 강성행렬의 역행렬만을 이용하여 변형과 반력을 계산하는 방법이 제시되었다. 사면체 격자로 생성

현재 변형체의 햅틱 시뮬레이션에서는 정확한 변형과 반력의 계산을 위하여 연속체 기반의 변형체 모델이 각광을 받고 있으며 유한요소법, 경계요소법, 무요소법 등 구조해석 기법이 적용되고 있다.



(a) Cotin et al, INRIA, 1996



(b) Hirota et al, The University of Tokyo, 2001

그림 4 유한요소 모델을 이용한 변형체 햅틱 시뮬레이션의 예

된 변형체의 표면 삼각형에 햅틱 장치가 접촉하게 되면 삼각형을 구성하는 3개 절점의 변위(displacement)를 면적좌표(aerial coordinate)에 의해 계산한다. 반력을 계산하기 위하여 3개의 절점에 해당하는 역행렬의 블록 대각 행렬과 계산된 변위와 역행렬 곱을 수행한다. 계산된 반력은 다시 전체 강성행렬의 역행렬과 행렬곱에 의하여 변형체의 변형이 계산된다. Pentium Pro 200 MHz×2를 사용하여 1,713개의 절점을 갖는 변형체의 반력 계산 시간이 약 8.80 μ s, 변형 계산 시간이 약 4.55ms가 소요되었다.

2) 경계요소 모델

유한요소 모델의 변형체를 이용한 햅틱 시뮬레이션에서 비주얼 렌더링에 사용되지 않는 내부 절점이 선형해석 과정에서 강성행렬의 역행렬 계산 시간을 증가시킬 뿐만 아니라 시뮬레이션 과정에서 내부 절점의 변형도 계산되므로 불필요한 계산 시간을 유발한다. 경계요소 변형체 모델링은 이러한 단점을 해결할 수 있을 뿐만 아니라 컴퓨터 그래픽 분야에서 물체를 표현하는 삼각형 격자를 격자 생성 과정 없이 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.

James 등 (<http://www.cs.rutgers.edu/~dpai/>)이 2001년에 제안한 경계요소 모델 변형체 햅틱 시뮬레이션은 유한

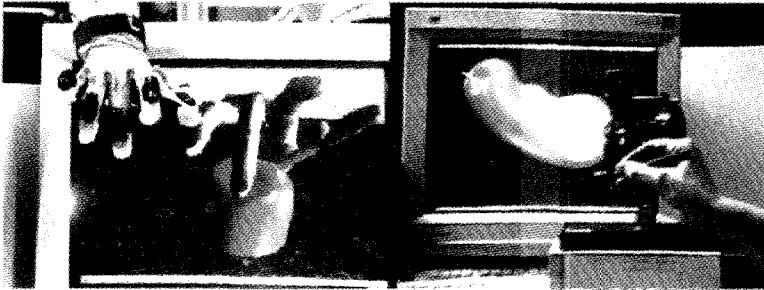


그림 5 경계요소 모델을 이용한 변형체 해석의 예(James et al., University of British Columbia, 2001)

요소 모델과 유사하게 선형해석 과정에서 역행렬을 계산하여 저장한 후 선형해석 방법인 캐패시턴스 행렬 (capacitance matrix) 알고리즘을 이용하여 시뮬레이션 과정에서 사용하는 방법을 제안하였다. 546개의 표면 절점을 갖는 변형체 모델에 대하여 0.15ms에 변형과 반력을 계산할 수 있는 변형체 햅틱 시뮬레이션(dual Pentium II 컴퓨터 시스템 사용)을 구현하였다. 그러나 경계요소 기반의 변형체 햅틱 시뮬레이션은 변형체의 동적 거동 및 비선형 거동 시뮬레이션으로 확장하기에 번거로운 어려운 단점이 있다.

3) 무요소 모델

유한요소 혹은 경계요소 등의 연속체 기반의 변형체 모델은 햅틱장치와의 접촉이 절점에서 이루어지기 때문에 절점의 수를 증가시킬수록 자연스런 햅틱 시뮬레이션이 가능하다. 그러나 절점 수의 증가는 메모리 공간의 급격한 확대가 요구되며 선형해석 과

정과 시뮬레이션 과정에서 계산 시간이 증가하는 단점이 있다. 가상 수술 시스템에서 흔히 사용되는 절단(cutting), 삽입(insertion) 시뮬레이션에서 유한요소 혹은 경계요소 모델은 위상의 변화에 따라 격자를 재생성해야 하는 단점이 있다. 이러한 단점들을 보완하기 위해서 무요소법을 기반으로 하는 변형체 모델 방법이 2001년에 MIT Human and Machine Haptics 연구실 (<http://touchlab.mit.edu/>)에서 처음 제시되었으며 2004년에는 Rensselaer Polytechnic Institute의 Advanced Computational Research 연구실 (<http://www.rpi.edu/%7edes/>)에서 무요소 모델을 이용한 절단 햅틱 시뮬레이션 방법이 제시되었다.

비선형 변형체 모델링 기법

실제 모든 물체의 탄성 변형의 크기는 변형체의 크기에 비하여

매우 작기 때문에 사실적인 시뮬레이션을 구현하기 위해서는 변형체의 비선형적 특성을 고려해야 한다. 특히 햅틱장치를 이용한 가상 수술 시뮬레이션에서는 피부나 인체 장기를 다루기 때문에 궁극적으로 변형체의 비선형 특성을 고려해야만 정확한 변형과 반력을 사용자에게 전달하여 몰입감을 증대시킬 수 있다. 그러나 비선형 해석은 선형 해석에 비하여 계산 과정이 복잡할 뿐만 아니라 계산 시간의 급격한 증가로 햅틱 시뮬레이션에 적용하는 데 어려움이 많다.

따라서 초기의 비선형 변형체 모델링 기법에 대한 연구는 주로 비선형 스프링을 적용한 질량-스프링 시스템을 이용하여 비선형 거동을 표현하였으나 계산 결과의 정확성은 보장할 수 없는 단점이 있다. 이후 컴퓨터 계산 능력의 발달로 인하여 점차 연속체 개념을 기반으로 하는 변형체 모델 기법(특히 유한요소 모델 사용)을 적용하는 연구가 수행되었다. 그러나 실시간으로 완전한 비선형성을 고려한 계산이 불가능하기 때문에 주로 근사화(approximation)를 통하여 변형과 반력을 계산하는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

적응적 변형체 햅틱 시뮬레이션

변형체의 햅틱 시뮬레이션은 햅틱장치와 다각형 격자로 이산

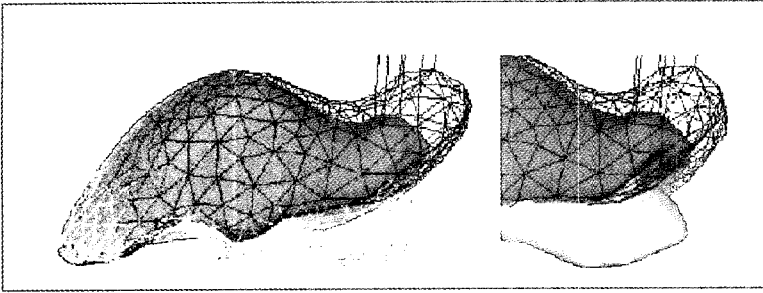


그림 6 탄성/비선형 변형체 햅틱 시뮬레이션의 비교(Ayache et al., INRIA, 2000)

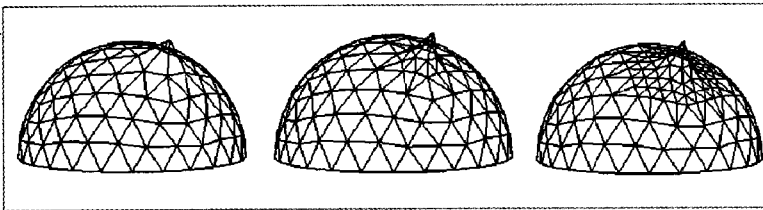


그림 7 질량-스프링 시스템을 이용한 적응적 변형체 햅틱 시뮬레이션의 예(Zhang et al, Simon Fraser University, 2002)

화된 변형체의 절점 혹은 격자에 햅틱장치가 접촉함으로써 이루어진다. 변형체 모델을 구성하는 다각형 격자의 크기는 변형체의 기하학적 형상에 의하여 좌우되기 때문에 일정한 크기의 다각형 격자로 변형체 모델을 구성하기는 매우 어렵다. 이러한 이유로 햅틱 장치의 끝점이 상대적으로 크기가 큰 다각형 격자의 절점에 접촉된다면 자연스럽게 지 못한 변형 형상을 유발한다. 이 문제를 해결하기 위한 방법으로 격자를 세분화하는 방법이 있으나 변형과 반력의 계산 시간과 소요되는 메모

리의 양이 증가하는 단점이 있다. 또 다른 방법으로는 햅틱장치의 접촉이 발생하는 변형체의 국부 영역에 격자를 분할하여 변형을 자연스럽게 표현하는 방법들이 있다. 그러나 국부적인 격자 분할에 의한 변형체 시뮬레이션은 국부 영역에 분할된 격자와 전역 격자의 물리적 특성을 일치시키기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 지금까지의 적응적 변형체 햅틱 시뮬레이션에 대한 연구는 단순한 기하학적 서브디비전(subdivision)방법을 질량-스프링 시스템에 적용하여 변형의 자연스러

움을 증가시키도록 하는 데 국한되어 왔다.

향후 연구 방향

변형체의 햅틱 시뮬레이션에 관한 연구의 초점은 적은 계산 비용으로 정확한 시뮬레이션을 사용자에게 전달하는 것이다. 현재의 연구 추세는 탄성 변형체의 햅틱 시뮬레이션에서 벗어나 비선형성을 고려한 시뮬레이션에 초점이 맞춰져 있다. 비록 변형체의 비선형성을 온전히 구현하는데 어려움이 있으나 다양한 근사화법을 통하여 사실적인 변형과 반력을 계산할 수 있는 방법이 개발되고 있다.

또 다른 연구로서는 가상 수술 시스템으로의 적용을 위하여 침 삽입(needle insertion), 절단(cutting), 봉합(sewing) 등의 과정을 기존의 변형체 모델링 기법을 활용하여 수행하고 있다. 이러한 시뮬레이션은 주로 질량-스프링 시스템을 이용한 기법이 주를 이루고 있었으나 현재는 연속체 기반의 변형체 모델을 이용한 시뮬레이션 개발이 활발히 진행되고 있다.