

실감성 향상을 위한 변형 물체 모델

전성원*(경상대 대학원 산업시스템공학과), 김영일(경상대 대학원 산업시스템공학과), 허진헌(경상대 대학원 산업시스템공학과), 전차수(경상대학교 산업시스템공학부), 박세형(KIST)

Deformable Object Model for Improving Reality

S.W.Chun(ISE Dept. GSNU), Y.Y.Kim(ISE Dept. GSNU) J.H.Huh(ISE Dept. GSNU),
C.S.Jun(ISE Dept., GSNU), S.H.Park(KIST)

ABSTRACT

Developed in this paper a mass-spring engine to represent and manipulate deformable objects. The deformable object model is a basic technology in the 'Tangible Space Initiative'. The mass-spring model consists of structural, shear and bending springs. Various forces like external, friction, gravity, spring, and damping forces are considered and collision with planes and spheres are treated. When a sphere collide mass-spring model, mass-spring engine calculates external force to interface mass-spring model. A prototype system is implemented in C on an MS windows machine.

Key Words : Deformable model(변형모델), Virtual reality(가상현실), Haptic Device(햅틱 디바이스),
Mass-spring model(질량-스프링 모델)

1. 서론

가상의 현실 세계를 보다 실감나게 구현하기 위해서는 시각 및 청각뿐 아니라 촉각도 사용자에게 정확하게 전달하는 것이 필요하다. 본연구에서는 햅틱 장치를 이용하여 가상의 물체를 취급하는 상황에서 물체의 변형을 모델링하고 사실적으로 렌더링하며 변형에 적용된 힘과 변위를 햅틱 장치에 전달하고자 한다.

변형 물체 모델은 곡선/곡면/솔리드를 생성하고 조작하는 기하학적 모델링과 생성된 모델을 해석하는 연구로부터 시작되었다. 하드웨어가 잘 발달되지 못했을 당시에는 정확성과 더불어 신속한 변형 연산 역시 중요한 요소로 간주 되었다. 이후 변형모델은 컴퓨터 애니메이션에서 급속한 진전을 보았으며 점차 인간 얼굴 표현 및 외과 모의실험 등으로 그 적용 영역을 넓혀 가고 있다.

물론 각 영역에서 추구하는 관점은 조금씩 다르다. CAD 분야에서는 정확성에 중점을 두기 때문에 방법론 역시 정확한 수학적 방법이나 연산에 의해 나온 결과를 선택하는데 이는 실제 물리적 기반의 모델에 대한 적용이라기 보다는 기하학적 모델에 대한 분야에 응용될 수 있다. 반면 애니메이션에서는 정확성 보다는 신속성에 중점을 둔다. 최근

에 연구되고 있는 가상현실 분야에서는 두 가지 요소 즉, 정확성과 신속성에서 최선은 아니지만 가장 적당한 부분에서 취할 수 있는 중간적 방법을 택하고 있다. 이는 물리적 모델과 무관하지 않는 이 분야의 특성에도 연관 지을 수 있는데 빠른 모델 변형과 실제와 같은 변형은 가상현실 속을 여행하는 모든 이들이 바라는 특성이기 때문이다.

이번 연구에서는 변형모델의 여러 방법론 중에 움직이는 실시간 물체에 적합한 질량-스프링 모델(Mass-Spring Model)의 개념에 대해서 연구하고 이 방법을 이용한 변형모델의 구현을 통해 실감성 향상을 위한 실시간 모델링 기법에 대한 연구를하고자 한다.

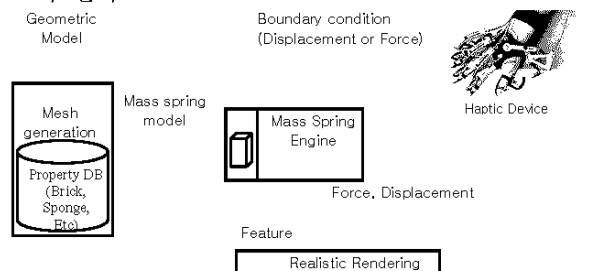


Fig. 1 Mass-spring engine

본 연구의 목표는 Fig.1 에서 보여진 바와 같다. 기하학적 모델에 따른 질량-스프링 모델을 생성하며 물질의 특성에 맞도록 질량과 스프링 등 속성을 부여할 수 있도록 여러가지 물질에 따른 속성 데이터베이스가 있다. 질점-스프링 엔진은 외부에서 주어진 변위나 힘에 따라 변형된 형상을 실시간으로 렌더링하고 햅틱 디바이스와 연결을 위해 물체의 반발력을 출력한다.

2. 질량-스프링 모델

모델을 변형하는 방법론이나 해석하는 방법은 많이 있다. 콘트롤 포인트를 이용해 Spline 을 변형하는 방법, 회전 벡터를 이용한 3 차원 자유형상 변형, 복잡한 구조물의 응력해석을 위한 유한요소법, 모델의 표면 경계부분을 메쉬로 구성된 경계요소법 등이 연구되었다. 본 연구에서는 많은 방법론 중에서 움직이는 물체의 실시간 변형에 장점을 가지는 질량-스프링 모델을 이용한다.

질량-스프링 모델은 물체를 질량가진 점(질점)들과 이를 연결하는 스프링들로 단순화된 이산(discrete) 모델이다. 각 질점은 공간 상에서 뉴턴의 제 2 법칙 $F=ma$ 에 따른다. 각 입자의 질량과 가속도를 곱하여 모두 더하면 전체 힘의 합과 같다. 이 식으로부터 입자의 위치와 가속도를 계산한다.

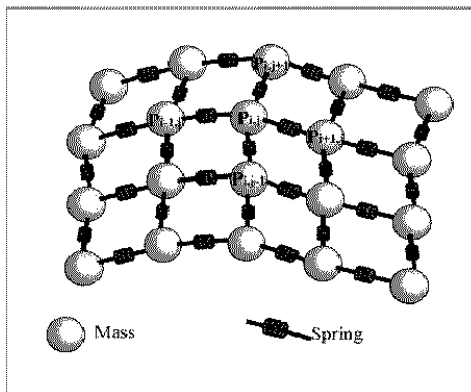


Fig. 2 Mass-spring model

Fig.2 에서 보는 바와 같이 i 행, j 열에 있는 입자 P_{ij} 는 주변의 4 개의 입자와 스프링으로 연결되어 있으며 상호작용 한다. 통상 n 개의 입자가 있다고 했을 때 계산량은 $O(n)$ 이지만 입자간의 상호작용으로 인해 $O(n^2)$ 의 계산이 필요하다. 그러나 실제로는 영향을 받는 입자만 계산을 하고 영향을 받지 않는 나머지 입자는 계산하지 않는 방법으로 계산량을 줄일 수 있다.

질량-스프링 모델은 그 동작이 쉽게 이해될 수 있는 간단한 방법이다. 구현하기가 쉬우며 변형물체의 특성에 따라 변수의 변화만으로도 동작의 변화를 쉽게 관찰할 수 있다. 외부의 힘을 받아 위치의 이동이 생기는 질점과 힘의 영향을 받지 않는 질점의 차이를 두어 각 질점의 이동량을 계산함으

로써 속도 개선을 볼 수 있다. 물론 스프링 모델의 특성상 변형된 물체가 다시 복원되는 형상의 실시간 구현 역시 가능하다.

질량-스프링 모델도 질량-스프링 상수에 의해 기본적인 물체의 성질이 결정된다. 그러나 현실적인 물체의 특성과 유사한 구현을 위해 스프링 상수를 결정짓는 것은 쉬운 일이 아니다. 또한 어떤 물질은 그 값을 유추하기가 불가능한 경우도 있다. 예를 들어 잘 구부러지지 않는 아주 얇은 물체의 경우 질량-스프링 모델로는 구현하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 기본이 되는 몇 가지 물질에 대해 적당한 스프링 상수 값을 부여하여 가장 현실성 있는 값을 정의하였다.

3. 질량-스프링 엔진

3.1 프로그램 개요

시스템이 시작되면 질점-스프링 모델의 전체 질점 수와 위치, 질점의 질량, 스프링의 속성등을 포함한 모델을 구성하는 전체적인 변수들의 값이 설정된다. 이어 힘이 모델에 작용하는 지를 검사해

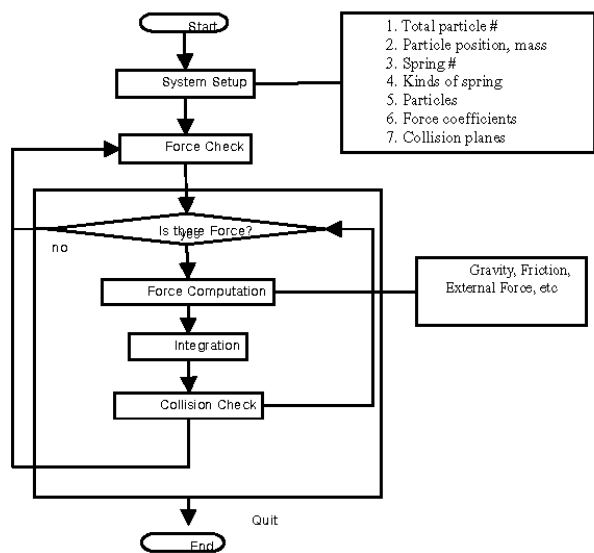


Fig. 3 Mass-spring engine algorithm

서 힘이 작용되면 (일반적으로 햅틱 디바이스에 의한 힘이 주어지겠지만 프로그램에서는 마우스에 의해 힘을 가 할 수도 있다) 질점에 가해지는 각종 힘(중력, 마찰력, 외부 힘 등)을 구한다. 각종 힘을 구한 후에는 질점의 변위량을 구한다. 질점이 장애물과 충돌하면 이에 반발해야 하므로 충돌검사를 통해서 이를 계산한다. 이와 같은 방법으로 질점에 작용하는 힘이 없을 때까지 계속해서 질점의 변위량을 구해 변형물체 모델에 반영한다.

3.2 스프링 구성

기하학적 모델을 질량-스프링 모델로 구현하여 스프링 구조를 구성하는 방법에도 여러 가지 방법이 있다.

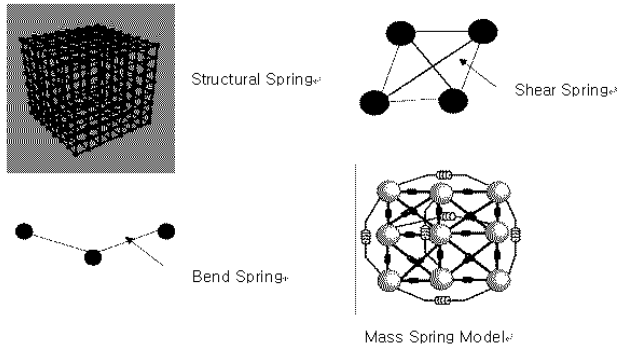


Fig. 4 Spring structure

Fig.4 와 같이 스프링의 종류는 구조는 세가지로 구분해 볼 수 있다. 하나는 ‘구조스프링’으로서 인접한 질점 간에 스프링 구조체를 유지하기 위한 것이다. 이는 질량-스프링 모델의 기본적인 형태를 이룬다. 그런데 이 스프링으로 압축과 인장에 따른 변형을 반영할 수는 있지만 전단과 굽힘 변형을 반영할 수가 없다. 따라서 질점을 대각선으로 연결하는 ‘전단스프링’과 질점들을 건너뛰어 연결하는 ‘굽힘스프링’을 둔다.

3.3 힘 계산

질점에 가해지는 힘에는 여러 가지 종류가 있다. 중력, 스프링 Damping Force, 마찰력, 외부 힘 등이 그것이다. 따라서 변형모델을 이루고 있는 각각의 질점에 대해서 아래와 같은 모든 힘들을 계산해야 한다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F} &= \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_e && \text{(Total force)} \\
 \mathbf{F}_g &= mg && \text{(Gravity force)} \\
 \mathbf{F}_d &= v + (-k_d) && \text{(Basic damping force)} \\
 \mathbf{F}_f &&& \text{(Friction force)} \\
 \mathbf{F}_s &&& \text{(Spring force)} \\
 \mathbf{F}_e &&& \text{(External force)}
 \end{aligned}$$

m : mass, v : velocity, g : gravity constant

K_d : basic damping factor

3.3.1 마찰력(F_f)

마찰력은 변형물체 모델이 저항체와 마찰에 의해 생기는 힘이다. 본 연구에서는 정지마찰력과 운동마찰력 사이의 임계치(ϵ)를 두어 이 값보다 큰 값의 힘이 작용할 경우와 작은 힘이 작용할 경우에 따라 힘의 크기를 구한다.

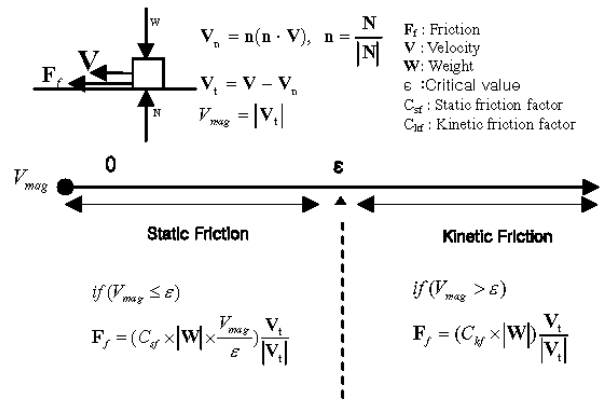


Fig. 5 Friction

3.3.2 스프링 힘(F_s)

스프링 모델에는 Hook 힘과 스프링 감쇠율을 고려해야만 한다. 이는 스프링 모델에서는 외부의 힘을 받으면 어느 정도 형상이 변형되면서 진동하며 그 폭이 점차 감소하는 현상이 발생기 때문이다. Damping 힘은 모델의 유동성과 실제적인 모델의 운동 표현에 필요한 요소다.

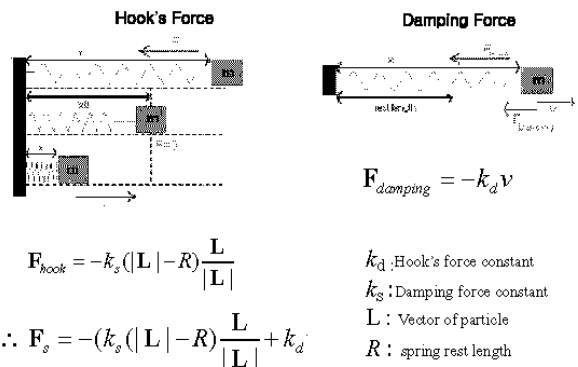


Fig. 6 Spring force

3.3.3 적분

질량-스프링 모델에서 우리가 알고 있는 변수는 질점에 대한 특성과 외부 힘의 합 그리고 질점의 위치정보이다. 이제 구하고자 하는 값은 질점들이 외부의 힘을 받았을 때 변하는 변위량이다. 적분을 통해서 변위량을 구할 수 있는데 Fig.7 에서 보는 바와 같이 뉴턴의 제 2 공식에 대한 미분 형식으로 표현할 수 있다. 따라서 Euler 나 Runge-Kutta 방법을 통해서 질점의 변위량을 구할 수 있다.

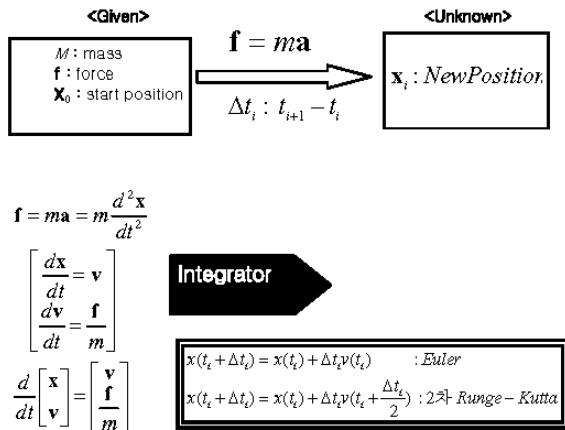


Fig. 7 Integrator

3.3.3.1 Euler's 방법

질량-스프링 모델에서는 각 질점이 외부로부터 어떤 힘을 받았을 경우에 움직이는지 변위량을 계산하기 위한 방법으로 가장 간단한 수치적 계산 방법인 Euler의 방식 혹은 2차 또는 4차 Runge-Kutta 방식을 이용한다.

일반적인 상미분 방정식의 형태는

$$x' = f(x, t) \dots\dots\dots (1)$$

으로 여기서 x 는 t 에 대한 함수이고 x' 은 시간 미분을 의미한다. 먼저 구간 $[a, b]$ 를 식(1)을 만족하며 $y(a) = y_0$ 에 대하여 해가 존재하는 구간이라고 가정하자. 우리가 구하고자 하는 값은 $[a, b]$ 에서 정확한 해 $y_k (a \leq k \leq b)$ 를 구하는 것이 목적이겠지만 일반적인 상미분 식에서 이를 구하는 것은 쉽지 않다. 따라서 추정 값을 구하게 되는데, 먼저 구간 $[a, b]$ 를 등간격 M 으로 나누어

$$t_k = a + kh, k = 0, 1, \dots, M, h = \frac{b-a}{M}$$

와 같이 점을 선택한다. 여기에서 h 를 간격의 크기라고 한다. 여기에서 식(1)의 근사 해를 구하면 Taylor 정리를 사용하여 아래와 같이 전개할 수 있다.

$$y(t) = y(t_0) + y'(t_0)(t-t_0) + \frac{y''(t_0)(t-t_0)^2}{2} \dots\dots\dots (2)$$

이때 충분히 작은 h 에 대하여 2차항 이후를 무시하면

$$y_1 = y_0 + hf(t_0, y_0) \dots\dots\dots (3)$$

로 정리할 수 있고, 이를 일반화 시키면

$$y_{k+1} = y_k + hf(t_k, y_k)$$

를 구할 수 있다.

이를 기하학적으로 보면 결국 정확한 y 값을 알 수 없으므로 추정치 $y(t_k)$ 를 구하여 y' (곡선의 접선벡터)이 같고 h 만큼 이동한 값을 추정해 낼 수 있다.

질량-스프링 모델에서는 상미분 방정식으로 표현된 함수의 추정치 y 값을 구하는 것과 같은 요령으로 각 질점의 이동량을 뉴턴의 제 2 법칙에 따라 용수철의 이동량을 계산함으로써 모델의 변형값을 구현한다. 즉

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ f/m \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

를 구하는 것과 같다. 물론 여기서 f 에는 스프링의 Damping 값을 포함하는 최종적인 힘이다. 식(4)를 이용하여 외부에서 주어진 힘에 의해 각 질점의 변위량을 구함으로써 물체의 전체적인 변형된 형상을 구할 수 있다.

아래 Fig.8를 보면 Euler 방법의 기하학적 의미를 살펴볼 수 있다. 특정 초기점에서 1차 미분값을 알고 있을 때 식(3)에 의하여 그 초기점에서 탄젠트 방향으로 $hf(t_0, y_0)$ 만큼 이동한 지점을 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 x 방향의 스텝 h 씩 증가하면서 각 위치에서의 탄젠트 방향의 추정점들을 구할 수 있다. 이러한 추정점이 정확한 값을 의미하지는 않지만 (이는 Euler Method의 단점이기도 하다) 빠른 계산시간과 비교적 근사한 값을 계산해 내는 데에는 적당한 Method로서 사용되고 있다.

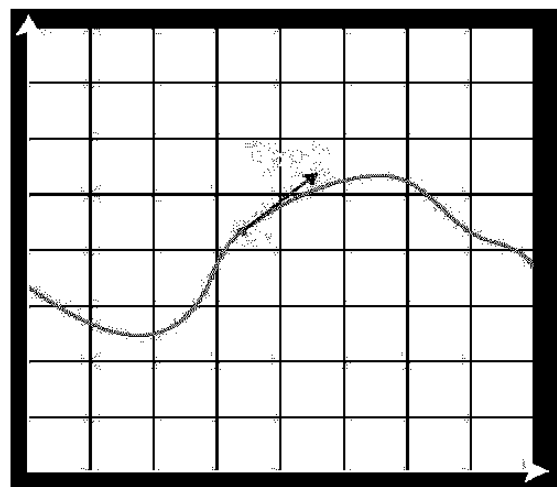


Fig. 8 Estimate next point using Euler's method

3.4 충돌검사

충돌검사는 질량-스프링 모델이 외부로부터 힘

혹은 변위량을 받았을 경우 이동하면서 주위의 다른 물체와의 충돌 시 형상 변경 및 새로운 방향으로의 이동을 위해서 필요하다.

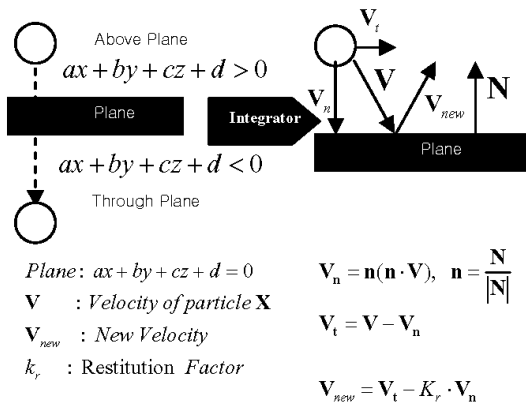


Fig. 9 Collision Check

위의 Fig.9 은 평면과의 충돌문제를 보여주고 있다. 질점의 변화된 위치가 평면을 지나는 경우는 질점의 이동속도를 평면과의 법선속도와 접선속도로 나누고 여기에 물체의 반발계수 고려하여 반발속도를 계산한다.

그런데 질량-스프링 모델은 모든 힘을 질점에 대해서만 계산한다. 질점 간에 연결된 스프링은 압축력과 인장력을 받고 있지만 충돌의 대상이 되지 않는다. 결국 질점 간의 거리보다 작은 지름의 구가 질량-스프링 모델이 충돌이 되더라도 구가 질점 사이로 통과하게 되어 구와 스프링 모델과는 충돌이 발생하지 않을 수도 있다. (Fig. 10a)

이 문제를 해결하기 위하여 구가 접근했을 때 가장 가까운 질점 3 개를 구해서(Fig. 10b) 3 개의 질점이 이루는 평면과 구의 중심 간의 거리를 구해서 구의 반지름보다 그 거리가 작을 경우 구와 충돌이 발생한 것으로 간주한다. 그러나 여전히 구에 의해서 질점이 받는 힘을 구할 수 없으므로 변위량을 구할 수 없다. 우선 접촉점 주변의 세 질점에서의 변위량을 Bezier 곡선에 의해 모델링하고 이런 변위량이 발생되는 힘을 반복적 계산법에 의해 찾는다. (Fig.10c)

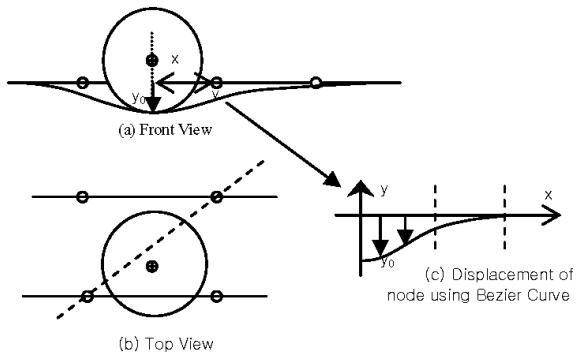


Fig. 10 Collision problem with sphere

4. 질량-스프링 엔진

다음 Fig.11 은 사전에 정의되어 있는 옷감으로 모델링 된 형태를 보여준다

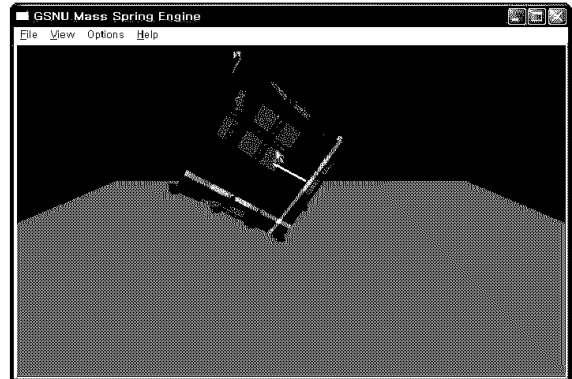


Fig. 11 Fabric model

옷감의 질감을 나타내는 질량-스프링 모델은 Damping 힘이 비교적 큰 값으로 이루어진다.

다음 Fig.12 의 스펀지로 모델링 된 질량-스프링 모델과 비교했을 때 움직임이 가볍고, 중력의 영향을 덜 받도록 모델링 한다. 이러한 모델링은 처음 단계부터 질량-스프링 모델로 시작할 때 고려되어져 각 질점들과 스프링의 특성 등을 정의해야 한다.

총 64 개의 질점으로 이루어져 있는 스펀지 모델이다. 질량-스프링 모델 중에서는 가장 간단한 형태라 할 수 있는데, 각 질점은 구조 스프링, 굽힘 스프링, 전단스프링으로 연결되어 있다. 각 질점의 질량과 각 스프링의 속성은 물질의 질감에 많은 영향을 미친다.

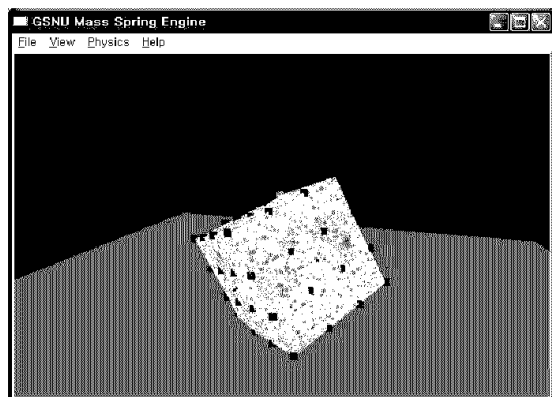


Fig. 12 Sponge model

다음 Fig.13 는 구와 스펀지 모델과의 충돌검사를 시뮬레이션 한 것이다. 구의 크기가 질점 간의 거리보다 좁을 경우에는 구와 질점 간의 충돌검사가 용이하지만 구와 지름이 질점 간의 거리보다 작을 경우에는 본 논문에서 소개한 방법으로 시뮬

레이션을 수행한다.

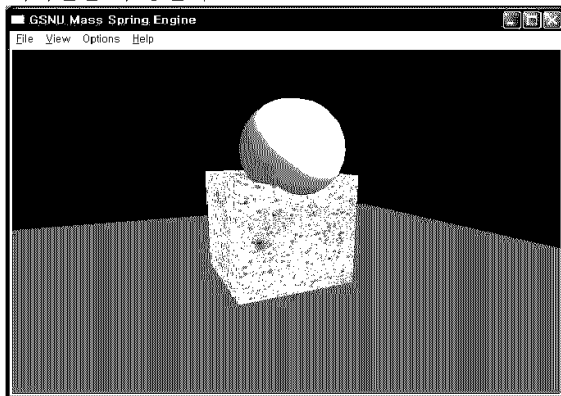


Fig. 13 Collision simulation with sphere

마지막으로 햅틱 디바이스와 인터페이스를 위해서 구가 스펀지 모델과 충돌했을 때 구가 받는 힘의 방향과 크기를 알아야 한다. 이 힘의 크기와 방향은 그대로 햅틱 디바이스에 전달이 되어 실감적인 시뮬레이션으로 전달될 것이다. 즉 햅틱 디바이스로 구를 쥐고 스펀지로 모델링 된 질량-스프링 모델과 접촉했을 때 구가 느끼는 반발력은 그대로 햅틱 디바이스가 전달 받는 힘이 되는 것이다.

Fig.14 에서 구가 스펀지 모델의 위쪽에서 아래쪽 방향으로 내려갈 때 스펀지 모델은 움푹 파이는 시뮬레이션과 동시에 위쪽 방향으로 힘을 전달하는 모습을 보여준다. 위로 향한 하얀색 라인은 구가 질량-스프링 모델로부터 받는 힘의 크기와 방향을 나타낸다. 구가 움직일 때마다 질점으로부터 받는 힘의 크기와 방향은 계속 변하게 된다.

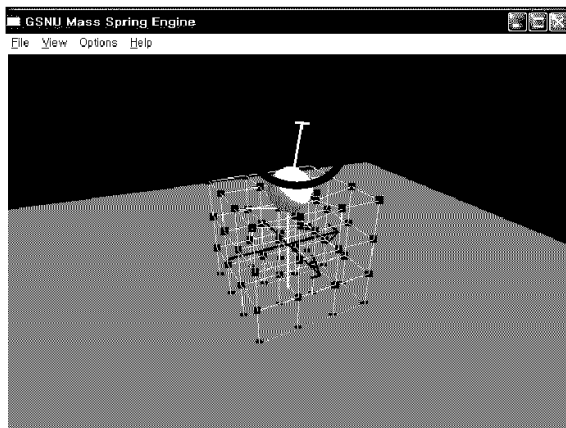


Fig. 14 Force of reaction to interface haptic device

4. 결론

본연구에서는 보다 실감나는 가상의 현실 세계

를 구현하기 위해서 햅틱 장치를 이용하여 가상의 물체를 취급하는 상황에서 물체의 변형을 모델링하고 사실적으로 렌더링하며 변형에 적용된 힘을 햅틱 장치에 전달하고자 한다.

이를 위해 효율적이고 안정적인 질량-스프링 모델링 엔진을 개발하고 여러가지 물체에 따른 속성 데이터베이스를 구축하며, 햅틱 장치와의 interface를 위하여 외부에서 가해진 힘과 변위에 따른 물체의 변형과 힘을 효율적으로 계산한다.

참고문헌

1. [Gibson 1997] Sarah F.F. Gibson, Brian Mirtich, TR-97-19 November 1997 : A Survey of Deformable Modeling in Computer Graphics
2. [James 1999] Doug L. James, Dinesh K. Pai , University of British Columbia : Accurate Real Time Deformable Objects
3. [Sundaraj 2001] K. Sundaraj & C.Laugier & I.F.Costa , Inria Rhone-Alpes & Gravr SHARP Project : An approach to LEM modeling : construction, Collision Detection and Dynamic Simulation
4. [Mahal 2001] B.S.Mahal, D.E.R.Clark, J.E.L.simmons : Mass-Spring Simulation of Deformation in Elastic Sheet Structures
5. [James 2002] Doug L. James, Dinesh K. Pai , University of British Columbia : A Unified Treatment of Elastostatic Contact Simulation for Real Time Haptics
6. [Witkin 1997] Andrew Witkin and David Baraff Robotics Institute Carnegie Mellon University, An Introduction to Physically Based Modeling : Differential Equation Basics
7. 경기욱, 2002 KAIST : State-of-the-Art and R&D Perspective on Haptic Rendering