

# 형태유지 스프링을 이용한 cavity 객체의 안정적 형태 변형\*

최유주<sup>o</sup> 김명희  
이화여자대학교 공과대학 컴퓨터학과  
{choirina<sup>o</sup>, mhkim}@ewha.ac.kr

## Robust Deformation of Cavity Objects using Shape-Preserving Spring

Yoo-Joo Choi<sup>o</sup> Myoung-Hee Kim  
Dept. of Computer Science & Engineering, Ewha Womans University

### 요 약

본 논문에서는 외부의 힘에 의한 cavity 변형 객체의 안정적 형태 변형을 표현하기 위하여 형태유지 스프링을 이용한 변형 모델링 기법을 제안한다. 일반적으로 위나 풍선과 같은 cavity 변형객체는 전체 구성 노드의 수를 줄이기 위하여 표면 메쉬 구조로 모델링된다. 이 경우, 표면의 인접 노드만이 감쇠(damping) 스프링으로 연결되고, 모델의 체적정보의 부재로 인하여, 외부 힘이 일정시간 동안 지속적으로 주어지는 경우, 객체의 형태변형이 왜곡되고, 외부 힘이 제거된 후에도 초기 형태로의 복원이 불가능해진다. 본 논문에서는 전형적인 표면 메쉬 기반 변형 모델링 기법을 개선하기 위하여 형태 유지 스프링을 이용하여 체적 정보를 추가함으로써, 변형의 불안정성을 제거하고, 안정적인 초기형태로의 복원이 이루어지도록 하였다.

### 1. 서 론

시술 시뮬레이션이나 인터랙티브 게임과 같은 가상현실 기반 응용 어플리케이션 분야에서, 변형 객체에 대한 실시간 인터랙션 및 이에 따른 정확한 객체의 변형 표현은 필수적으로 수행되어야 한다. 이와 관련하여, 실시간 인터랙티브 변형 모델링은 컴퓨터 그래픽스 및 모델링 분야에서 중요 세부 연구분야로 부각되고 있다.

객체의 정확한 변형 형태를 효율적으로 표현하기 위하여 다양한 물리기반 모델링 기법들이 연구되어 왔다 [1]-[4]. 이 중, 매스-스프링 변형 모델링 기법은 실행 효율성이 높고, 객체의 기하학적 변화(Topological change)를 쉽게 수용할 수 있는 장점 때문에 시술 시뮬레이션과 같은 실시간 인터랙티브 가상현실 응용 분야에서 활발히 적용되고 있다.

매스-스프링 모델링 기법을 기반으로 하는 시술 시뮬레이션 분야에서, 다양한 인체기관이 매스 노드와 스프링의 집합으로 표현된다. 내부가 연조직으로 채워진 뇌나 간과 같은 기관들은 일반적으로 객체의 내부와 표면 영역을 표현하기 위하여 사면체 혹은 셀(Cell) 메쉬 구조가 사용된다. 반면, 위나 대장기관등과 같이 대상객체의 내부가 비어있는 형태의 cavity 객체들은 일반적으로 전체 구성 노드 수를 줄이기 위하여 내부의 구성 노드 없

이 표면 메쉬 구조로 표현되어 진다. 이 경우, 표면의 인접 노드만이 감쇠(damping) 스프링으로 연결되고, 모델의 변형이 진행되는 동안 모델의 체적정보를 유지하지 않기 때문에, 외부의 힘이 일정시간 동안 지속적으로 주어지는 경우, 객체의 형태 변형이 왜곡되고, 외부의 힘이 제거된 후에도 초기형태로의 복원이 불가능해진다. 이에 본 연구에서는 전형적인 표면 메쉬 기반 매스-스프링 변형 모델링 기법의 이와 같은 불안정적 변형 문제점을 해결하기 위하여, 형태 유지 스프링을 이용한 안정적 변형 모델링 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 물체의 변형을 표현하기 위하여 연구된 대표적인 기존 물리적 모델의 특성을 분석하고, 3장에서는 매스-스프링 변형 모델링 기법을 소개한다, 4장에서는 형태-유지 스프링을 적용한 변형 모델링 기법을 설명하고, 5장에서는 제안 기법의 개발 및 실험 환경과 실험 결과를 제시한다. 5장에서는 본 연구의 결론 및 향후 연구에 관하여 알아본다.

### 2. 기존 물리적 모델의 특성 분석

객체 변형에 대한 물리적 모델에서는 대상 객체의 특성에 따라 기하학적 기술만을 사용하지 않고 물리적 과정의 실제적인 시뮬레이션을 통해 객체를 변형시킨다.

\* 본 연구는 부분적으로 과학기술부 국가지정연구실사업(NRL)과 정보통신부 대학정보통신연구센터(ITRC) 육성지원 사업의 지원에 의해 수행되었음.

대표적인 물리기반 모델링 기법으로는 유한 요소 방법과 매스-스프링 모델링 기법을 들 수 있다. 유한요소모델은 연속체(continuum)에 기반을 둔 연속적 모델(continuous model)로서, 물체를 질량과 전체적으로 분포된 에너지로써 표현한다. 매스-스프링 모델링 기법은 물체의 변형을 표현하는 간단한 물리적 모델로서 객체의 연속적인 실제 상황을 근사시킨 이산모델이다. 유한요소모델은 매스-스프링 모델과 비교하여 적은 수의 노드점들을 가지고 보다 현실적인 시뮬레이션을 제공할 수 있는 장점이 있지만, 유한요소모델에 적용하는 힘은 볼륨 전체에 분산된 힘의 벡터로 변환되어야 하고, 이때 필요한 수치적분은 상당한 계산시간을 요구한다. 또한, 질량 및 강성 행렬 역시 유한 요소들에 대한 수치 적분에 의해 유도되어야 함으로 이 또한 오랜 처리 시간을 필요로 하여 실시간 인터랙션 처리가 어렵다. 이에 반해 매스-스프링 모델은 연속적인 물리적 모델들에 비해 물리적 변형 정확성은 떨어지지만, 처리속도가 빨라서 최신 컴퓨터 상에서는 거의 실시간 처리가 가능하다. 또한, 대상객체에 대한 절단 및 봉합 인터랙션에 의한 기하학적 변형을 스프링의 제거 및 추가에 의해 쉽게 표현할 수 있다는 장점이 있다.

3. 매스-스프링 변형 모델링

매스-스프링 모델에서 대상 객체는 다수의 매스 노드와 에너지 전파를 위한 스프링으로 구성되며, 각 매스 노드는 스프링에 의해 연결된다. 대상 객체의 질량은 각 매스 노드에 분포되어 있고, 스프링에는 질량이 없는 것으로 가정한다. 매스-스프링 모델에 적용되는 움직임은 물체를 표현하기 위한 동적 평형방정식은 식(1)과 같다.

$$m_i \ddot{x}_i + \gamma_i \dot{x}_i + k_i x_i = f_i + g_i \tag{1}$$

여기서,  $x, \dot{x}, \ddot{x}$  은 각각 매스 노드의 위치, 속도, 가속도를 의미한다. 또한,  $m, \gamma, k$  는 각각 노드  $i$  의 질량, 감쇠(damping) 계수, 강성(stiffness)계수를 의미한다.  $g_i$ 는 노드  $i$  에 연결된 스프링에 의해 노드  $i$  에 전달되는 힘의 합을 의미하고,  $f_i$  는 노드  $i$  에 전달되는 외부힘을 의미한다. 스프링 힘  $g_i$ 를 계산하기 위하여, 평형상태에서의 스프링의 길이가 미리 계산되어 진다. 각각 속도  $v_1$ 와  $v_2$  를 가지고, 현재 위치가  $x_1$ 와  $x_2$ 에 위치한 매스 노드 1과 매스 노드 2 에 주어지는 스프링 힘  $g_1$ 과  $g_2$ 는 식 (2)와 같다. 여기서  $k_s$ 와  $k_d$ 는 스프링을 위해 정의된 스프링 상수와 감쇠상수를 의미한다. 또한  $\Delta x$  는 두 노드간의 현재 거리, 즉,  $x_1 - x_2$  를 의미하고,  $\Delta v$  는 두 노드간 속도의 차, 즉,  $v_1 - v_2$  를 의미한다.

식(1)의 평형방정식의 해를 구하기 위하여 다양한 상미분 방정식의 해를 구하는 기법들이 적용 가능하다.

$$g_1 = - \left[ k_s (|\Delta x| - r) + k_d \left( \frac{\Delta v \cdot \Delta x}{|\Delta x|} \right) \right] \frac{\Delta x}{|\Delta x|}$$

$$g_2 = -g_1 \tag{2}$$

가장 간단한 상미분 방정식 해를 구하는 기법으로는 Euler법을 들 수 있다. Euler 법은 Taylor의 급수해법에서 전개 시점에서 극히 가깝도록 시간간격  $h$ 를 충분히 작게 취하면 그 해는 오차가 극히 작다는 것을 이용하여 1계 미분 방정식의 해로써 Taylor 급수의 제 1차 항까지만 취하고 제2차 항 이상을 절단하여 근사해를 구하는 방법이다. 구현이 간편하고, 수행효율성이 높은 반면, 큰 시간간격 및 큰 강성의 조건에 큰 오차를 포함한 근사해가 구해 짐으로써 객체 변형이 왜곡되는 현상을 발생할 위험이 높다. 본 연구에서는 큰 시간 간격 및 큰 강성의 조건에서도 안정적으로 해를 구할 수 있는 것으로 분석되어진 4계 Runge-Kutta 기법을 이용하였다. 4계 Runge-Kutta 기법은 Taylor 급수의 4계 미분 계수항까지 포함한 것으로 안정적인 근사해를 제공한다.

4. 형태유지 스프링

위나 대장기관 등과 같이 대상객체의 내부가 비어있는 형태의 cavity 객체들은 일반적으로 전체 구성 노드 수를 줄이기 위하여 내부의 구성 노드 없이 표면 메쉬 구조로 표현되어 진다. 이 경우, 표면의 인접 노드만이 감쇠(damping) 스프링으로 연결되고, 모델의 변형이 진행되는 동안 모델의 체적정보를 유지하지 않기 때문에, 외부의 힘이 일정시간 동안 지속적으로 주어지는 경우, 객체의 형태 변형이 왜곡되고, 외부의 힘이 제거된 후에도 초기형태로의 복원이 불가능해진다. 이에 본 연구에서는 전형적인 표면 메쉬 기반 매스-스프링 변형 모델링 기법의 이와 같은 불안정적 변형 문제점을 해결하기 위하여, 형태 유지 스프링을 제안한다.

제안 형태유지 스프링은 평형상태에 길이가 0 인 스프링으로서, 각 표면 노드 별로 하나씩 존재한다. 각 표면 구성 노드는 대응되는 가상 노드를 갖는다. 가상노드는 질량을 지니지 않고, 가상 노드의 위치는 대응되는 표면 노드의 초기 위치와 일치한다. 즉 가상노드는 대상 객체의 변형이 진행되는 동안 초기 형태 정보를 유지하고, 형태유지 스프링을 통하여 초기 형태로 당기는 힘을 발생시킨다. 그림 1은 제안 형태유지 스프링의 개념을 설명하고 있다. 그림 1에서 검은색 원은 표면 메쉬 노드를 의미하며, 흰색 원은 각 표면 메쉬 노드에 대응되는 가상 노드를 표현하고 있다. 그리고 표면 메쉬 노드를 연결하고 있는 직선은 객체 표면 상에 위치하는 스프링을 표현하고 있고, 표면 메쉬 노드와 가상 노드를 연결하고 있는 Z형 실선은 0 길이의 형태유지 스프링을 나타내고 있다. 가상노드는 형태유지 스프링에 의해 전달되는 힘에 의해 위치나 속도, 가속도가 변화되지 않는다.

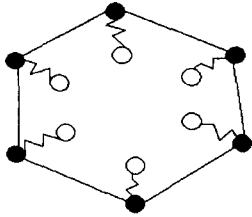


그림 1. 형태유지 스프링을 포함한 매스-스프링 모델의 개념도

형태유지 스프링을 통하여 객체 표면에 위치하는 매스 노드에 전달되는 힘은 식 (3)에 의해 결정된다.

$$g_i = - \left[ k'_s \times |\Delta x| + k'_d \left( \frac{v_i \cdot \Delta x}{|\Delta x|} \right) \right] \frac{\Delta x}{|\Delta x|} \quad (3)$$

여기서,  $k'_s$ 와  $k'_d$ 는 형태유지 스프링을 위한 스프링 상수와 감쇠상수를 의미한다. 또한  $\Delta x$ 는 매스 노드와 가상 노드간의 현재 거리, 즉,  $x_1 - x_2$ 를 의미하고,  $v_i$ 는 매스 노드의 현재 속도를 의미한다. 식(3)에 의하여 매스 노드는 초기 위치와의 간격이 생긴 시점부터 초기 위치로의 복원력이 작용하게 된다.

#### 4. 구현 및 실험 결과

본 논문에서 제안하는 형태유지 스프링을 포함한 표면 메쉬 기반 변형 모델은 Pentium III (1GHz CPU, 1GB RAM) 플랫폼에서 C++, OpenGL 을 기반으로 구현하였다. 제안 형태유지 스프링의 유용성을 입증하기 위하여, 형태유지 스프링을 포함하지 않은 일반적인 표면 변형 모델과 형태유지 스프링을 포함한 표면 변형 모델에 2초간 객체를 누르는 외부힘을 가하고, 2초 후에 힘을 제거하는 실험을 수행하였다. 형상유지 스프링이 포함되지 않은 일반적인 표면 변형 모델의 경우, 외부 힘이 지속되는 동안, 형상변형이 지속적으로 수행되어 형상왜곡 현상이 발생하였고, 형상유지 스프링을 포함한 모델의 경우, 일정수준의 변형 후 형상의 일그러짐 없이 누름 동작이 지속되었다. 그림 2는 힘이 제거된 후 대상모델의 형태 변형을 시간별로 추적한 실험 결과를 보여주고 있다. 그림 2에서 보여주듯이 일반적인 표면 변형모델은 힘이 제거된 후에도 형태 변형이 지속적으로 이루어져 초기형태로의 복원에 실패하였다. 반면, 형태유지 스프링

을 포함한 표면 변형 모델은 외부힘이 제거된 후 실시간으로 초기 형태로의 복원이 이루어 졌다.

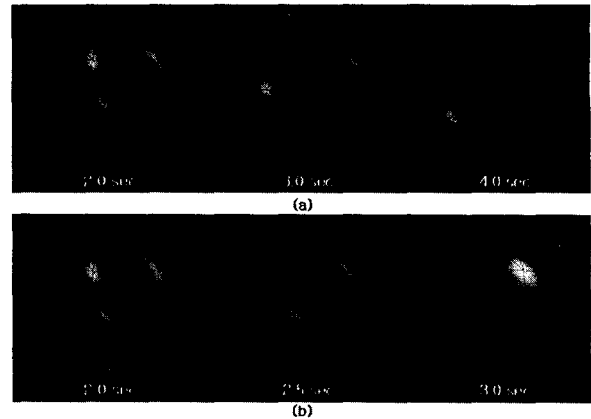


그림 2. 외부의 지속적인 힘에 의한 형태 변형 결과

(a) 일반적인 표면 변형 모델

(b) 형태유지 스프링을 포함한 표면 변형 모델

#### 5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 워나 대장기관 등과 같이 대상객체의 내부가 비어있는 형태의 cavity 객체들의 표현에 적합한 형태유지 스프링을 포함한 표면 메쉬 기반 변형 모델링 기법을 제안하였다. 제안 기법에 대한 실험 결과, 지속적으로 가해지는 외부의 힘에 대해서도 안정적인 형태 변형이 수행되었다.

향후 연구로서 보다 적은 수의 추가 스프링을 이용하여 초기 체적정보를 유지할 수 있는 보다 효과적이고 발전적인 형태의 변형 모델링 기법에 관한 연구를 수행하고자 한다.

#### 참고문헌

- [1] Bro-Nielsen M., "Finite element modeling in surgery simulation", Proceedings of the IEEE, special issue on surgery simulation, 1998, 86, pp490-503.
- [2] D. Hutchison, M. Preston, T. Hewitt, "Adaptive Refinement for Mass/Spring Simulations", In Proceedings of the Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation", 1996, pp31-45.
- [3] P. Mescure, C. Chaillou, "Deformable Body Simulation with adaptive subdivision and cutting", In Proceedings of International Conference in Central Europe on Computer Graphics", Visualization and Computer Vision(WSCG 97), 1997:361-370.
- [4] Gilles Debunne, M. Desbrun, M. -P. Cani, A. Barr, "Adaptive simulation of soft bodies in real-time", In proceedings of computer animation 2000, Philadelphia, PA, May, 2000, pp15-20.