

실시간 인터랙션을 위한 다해상도 변형 모델링^o

최유주*, 김명희**

*이화여자대학교 컴퓨터학과

**이화여자대학교 컴퓨터그래픽스 및 가상현실 연구센터
choirina@ewha.ac.kr, mhkim@mm.ewha.ac.kr

Multi-resolutional Deformable Modeling for Real-time Interaction

Yoo-Joo Choi*, Myoung-Hee Kim**

*Dept. of Computer Science, Ewha Womans University

**Center for Computer Graphics and Virtual reality, Ewha Womans University

요 약

본 논문에서는 cavity 변형 물체의 전역적 변형 형태는 유지하면서 계산 복잡도를 줄이기 위하여 모델의 다중해상도적 표현 기법 및 서로 다른 상세 레벨간 물리적 특성변수에 대한 적응기법을 제안한다. 또한, 객체의 안정적 변형을 지원하기 위한 형태유지 스프링을 제안한다. 일반적으로 워나 풍선과 같은 cavity 변형객체는 전체 구성노드의 수를 줄이기 위하여 표면 메시 구조로 모델링 된다. 이 경우, 표면의 인접 노드만이 감쇠(damping) 스프링으로 연결되고, 모델의 체적정보의 부재로 인하여 외부 힘이 일정시간 동안 지속적으로 주어지는 경우, 객체의 형태변형이 왜곡되고, 초기형태로의 복원이 불가능해진다. 본 논문에서 제안하는 형태유지 스프링은 외부힘에 의한 변형 후 초기형태로의 복원을 보장함으로써, 복잡한 계산과정 없이 간접적으로 객체의 볼륨유지 효과를 제공하고 변형의 불안전성을 제거한다.

1. 서론

시술 시뮬레이션이나 인터랙티브 게임과 같은 가상현실 기반 응용 어플리케이션 분야에서, 사용자 인터랙션에 의한 변형 객체의 현실감 있는 실시간 움직임 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[1-11]. 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 응용분야에서 활발히 적용되고 있다. 매스-스프링 모델링 기법이 실행 효율성이 높다고 하나, 구성매스

및 노드의 수가 많은 모델의 경우, 실제감 있는 현실적 변형 시뮬레이션을 위해서는 수행 효율성을 높이기 위한 다양한 기법들이 적용되어야 한다.

매스-스프링 모델의 경우, 외부로부터 입력되는 힘에 의하여 위치 및 속도의 변화에 영향을 받는 노드는 전체 노드 중 일부 지역적 노드에 해당하고, 나머지 노드는 시각적으로 감지할 수 없는 작은 진동이나 정지특성을 보여주는 경우가 다수 발생한다. 이에 모델 표현의 상세 수준은 유지하면서 계산 효율성을 높이기 위한 시도로 LOD(Level Of Detail)기술을 도입한 물리기반 모델링 기법들이 연구되어 왔다[2-9]. 이와 관련한 대부분의 기존 연구의 관심은 변형의 가시적 실제감(visual realism)에 집중되어 있고, 다중해상도적 상세레벨간 형태변형의 특성 유지는 간과하는 경우가 많다. LOD 기술의 적용에 따른 모델 변형의 부자연스런 움직임을 줄이기 위해서는 상세레벨간 물리적

***: 회신저자

^o:본 연구는 부분적으로 과학기술부 국가지정연구실사업(NRL)과 정보통신부 대학정보통신연구센터(ITRC) 육성지원사업의 지원에 의해 수행됨

특성변수에 대한 적용 기법이 함께 연구되어야 한다.

매스-스프링 기법을 기반으로 하는 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 노드수를 줄이기 위하여 내부의 구성 노드 없이 표면 메쉬 구조로 표현된다. 이 경우, 표면의 인접 노드만이 감쇠(damping)스프링으로 연결되고, 모델의 변형이 진행되는 동안 모델의 체적 정보를 유지하지 않기 때문에, 외부의 힘이 일정시간동안 지속적으로 주어지는 경우, 객체의 형태 변형이 왜곡되고, 외부의 힘이 제거된 후에도 초기 형태로의 복원이 불가능해진다. 이에 표면 매스-스프링 모델의 경우 초기형태로의 복원을 돕는 보조장치가 요구된다.

본 연구에서는 cavity 객체의 변형모델링에 있어서, 모델변형 표현의 상세도 수준은 높게 유지하면서 변형계산에 따른 계산비용은 줄이기 위하여, 노드에 주어지는 힘, 속도 및 표면 곡률변화율에 따른 지역적 표면분할 상세도를 적용하는 공간 적응적 기법(Spatial Adaptation Scheme)을 제안한다. 본 제안기법의 주요 특성은 다음과 같이 요약된다.

- 표면 상세 레벨간 물리적 특성변수에 대한 적용 기법을 적용함으로써, 다중해상도적 상세레벨간 전역적 및 지역적 형태변형의 특성을 유지하고 LOD 기술 접목에 따른 부자연스러운 움직임을 배제한다.
- 형태 유지 스프링을 적용함으로써 지속적인 외부의 강한 힘에 의한 cavity 객체 모델의 변형 왜곡 현상을 방지하고, 외부의 힘이 제거된 후 초기 형태로의 형태 복원을 보장한다.

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 본 연구에서

제안하는 보간 표면분할 기반 다중해상도적 모델 표현기법을 설명하고, 5장에서는 상세레벨간 물리적 특성변수 적용기법에 관하여 설명한다. 6장에서는 안정적 변형을 보장하기 위한 형태유지 스프링 적용 기법에 관하여 기술하고, 7장에서는 제안기법의 개발 및 실험환경과 실험결과를 제시한다. 8장에서는 본 연구의 결론 및 향후 연구에 관하여 설명한다.

2. 관련연구

객체 변형에 대한 물리적 모델에서는 대상 객체의 특성에 따라 기하학적 기술만을 사용하지 않고 물리적 과정의 실제적인 시뮬레이션을 통해 객체를 변형시킨다. 대표적인 물리기반 모델링 기법으로는 유한 요소 방법[10]과 매스-스프링 모델링 기법[11]을 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 작용하는 힘은 볼륨 전체에 분산된 힘의 벡터로 변환되어야 하고, 이때 필요한 수치적분은 상당한 계산시간을 요구한다. 또한, 질량 및 강성행렬 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.

모델 표현의 상세 수준은 유지하면서 계산 효율성을 높이기 위한 시도로 LOD(Level Of Detail)기술과 물리 기 반 모델링 기법의 결합이 시도되어 왔다[2-9,12]. 이러한 시도들에서는 전체 모델에서 관심영역만을 원하는 상세 수준으로 상세화(refinement)시키기 위하여 LOD 기법을

지역적으로 적용한다. Thingvold[12]는 테이블보를 B-spline 표면으로 표현하고, 표면을 표현하는 제어점을 particle로 대응시켰다. 이 모델에서 강한 스트레스를 받는 영역은 지역적으로 상세화 되었다. Thingvold 방법의 제약점은 B-spline 표면에 의한 표현 자체가 극히 제한적인 위상학적 구조만을 표현할 수 있다는 점이다. Hutchinson[2]은 직사각형 구조의 매스-스프링 네트워크를 위한 적응적 매쉬 상세화 기법을 제안하였다. Hutchinson의 방법에서는 표면 곡률이 큰 지역에 대한 지역적 상세화를 제안하였는데, 지역적으로 상세화된 표면영역의 곡률이 변화되어 상세화의 조건을 벗어날 때, 표면영역이 상세화된 수준을 지속적으로 유지하고 매쉬의 단순화가 고려되지 않았다. 이 밖에도 Debunne[4-5], O'Brien[6], Wu[7]등이 물리기반 모델링 기법에 지역적 상세화 기술을 적용하였다. 그러나 이들 대부분의 연구는 극히 제한된 위상학적 구조 모델에 적용하고 있거나, 대상 객체의 변형에 있어서 서로 다른 상세레벨간 전역적 그리고 지역적 객체 변형의 특성 유지에 대한 문제를 간과하고 있다. 이는 서로 다른 상세레벨간 부자연스러운 움직임을 초래하게 된다.

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.

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

여기서, x , \dot{x} , \ddot{x} 은 각각 매스 노드의 위치, 속도, 가속도를 의미한다. 또한, m_i , γ_i , k_i 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 위치

한 노드-1과 노드-2 에 주어지는 스프링 힘 g_1 과 g_2 는 식 (2)와 같다.

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

$$g_2 = -g_1 \quad (2)$$

여기서 k_s 와 k_d 는 스프링을 위해 정의된 강성계수와 감쇠계수를 의미한다. 또한 Δx 는 두 노드간의 현재 거리, 즉, $x_1 - x_2$ 를 의미하고, Δv 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. 가장 간단한 상미분 방정식 해를 구하는 기법으로는 Euler 법을 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 기법[13]을 이용하였다.

4. 보간 표면분할 기반 다중해상도 모델표현

본 연구에서 제안하는 공간 적응적 기법의 기본 개념은 노드에 주어지는 힘의 크기와 노드의 순간 속도 및 표면곡률의 변화량에 따라 서로 다른 표면분할 상세레벨을 적용하는 것이다. 다양한 표면 분할 기법들 중에서 표면 상세화(refinement)를 수행한 후 초기 형태로부터 부피감소의 역효과를 배제할 수 있는 방법으로 보간 표면분할 기법(interpolation subdivision method)을 들 수 있다. 본 연구에서는 보간 표면분할 기법의 하나인 modified-butterfly 기법[14]을 사용하여 다해상도 표면 메쉬를 생성한다. 제안 기법은 오프라인 전처리 단계와 온라인 실행단계로 구분된다. 오프라인 전처리 단계

에서, 초기 상세레벨의 다각형 메쉬에 대하여 modified-butterfly 기법을 적용하여 다해상도 다각형 메쉬 계층구조를 생성한다. 모델의 구성요소인 노드와 스프링, 삼각형 요소들은 각각 LOD 특성값을 가지게 되는데, 초기 상세레벨에 속하는 노드와 에지, 삼각형들의 경우는 0 값, 1단계 상세레벨에서 정의된 노드 및 스프링, 삼각형들은 1의 값을 가지게 된다. 또한, 각 노드들은 자신의 노드를 정의하기 위해 modified-butterfly 분할기법에서 적용하는 natural support set을 가지게 된다. Natural support set은 modified-butterfly 분할기법의 기저 함수에서 사용하는 최소 구성요소 집합을 의미한다. 각 삼각형들은 상위 및 하위 레벨 관련 삼각형 집합을 유지하고 같은 LOD 값을 가지는 노드의 질량과 스프링의 특성변수는 같은 값을 가진다. 각 레벨에서 새롭게 생성되는 노드의 질량 및 스프링의 특성 변수에 대한 정의는 서로 다른 상세레벨의 모델간 변형특성을 유지하는데 중요한 문제이다. 노드와 스프링의 특성 변수 정의에 대한 상세한 내용은 5절에서 설명한다.

오프라인 전처리 단계를 통하여, 모든 상세레벨의 구성 요소들-노드,스프링, 삼각형-의 위치 및 길이, 초기 물리적 특성변수 값들이 미리 계산되고, 계층적 구조로 저장되어, 온라인 수행단계에서 선택적으로 사용될 수 있도록 준비된다. 각 구성 요소들은 온라인 수행단계에서 활성화 혹은 비활성화 상태를 가지게 되고, 활성화 상태에 속하는 요소들만이 각 수행 사이클에서 힘과 속도, 새로운 노드 위치 계산을 위한 계산절차에 사용된다. 온라인 수행단계에서는 각 노드의 힘과, 속도, 해당 노드를 중심으로 한 표면 곡률값등을 기반으로 일정 기준값보다 큰 값으로 인식되었을 때, 표면 상세화가 수행되고, 표면 상세화가 필요하지 않은 수준으로 노드의 특성값들이 변화되었을 때, 다시 표면 간략화가 수행된다. 표면 상세화는 오프라인 전단계에서 계산된 Natural support set의 정보를 기반으로 modified-butterfly 표면분할 기법을 지역적으로 적용하여 수행한다.

지역적 상세화 및 간략화가 적용되면, hanging 노드의 생성이 불가피하다. 이러한 hanging 노드는 서로 인접하는 삼각형 표면의 상세 레벨이 서로 다른 경우 발생한다. Hanging 노드를 중심으로 표면의 렌더링 과정에

서 갈라짐(crack) 현상이 발생할 수 있는데 이를 방지하기 위하여 각 활성화 삼각형의 스프링 상태에 따라 활성화 삼각형을 그림 1과 같이 4가지 타입으로 구분하고, hanging node를 연결하는 보정에지들을 추가하여 하위 구성 삼각형으로 분할한 후 렌더링을 수행한다.

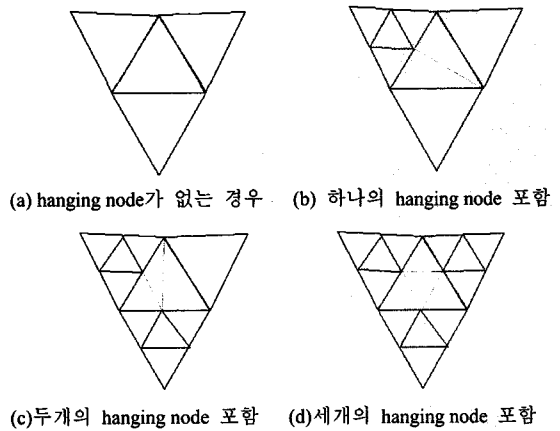


그림 1. 렌더링을 위한 active face의 삼각형 분할

5. 상세레벨간 물리적 특성변수 적용기법

5절에서는 다중해상도 다각형 메쉬간에서 노드의 질량과 스프링의 물리적 특성변수들이 어떻게 조정되는지를 설명한다.

지역적 및 전역적 메쉬의 상세레벨에 상관없이 객체의 전체 질량을 유지하기 위하여, 오프라인 전처리 단계에서 각 LOD 레벨별로 노드별 질량을 미리 계산하고, 온라인 시뮬레이션 단계에서 상세화 및 간략화 되는 지역에 속하는 노드들의 질량값을 주변 스프링의 LOD 값을 기준으로 재계산된다.

그림 2의 예에서 삼각형 모양의 노드는 0 레벨 스프링 2개와 1레벨 스프링 3개를 인접 스프링으로 가지고 있기 때문에 온라인 수행단계에서 삼각형 노드의 새로운 질량은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$M = (2M_{zero} + 3M_{one}) / 5 \quad (3)$$

여기서, M_{zero} 는 LOD 0 레벨의 노드별 질량, M_{one} 은 LOD 1레벨의 노드별 질량을 의미한다.

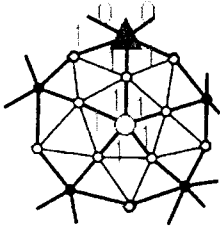


그림 2. 온라인 수행 단계에서의 노드 질량 조정

메쉬 상세레벨간 노드의 가속도 값의 일치를 위해서는 온라인 실행중 변화되는 인접 노드의 질량과 레벨간 스프링 길이의 변화율들이 스프링 물리적 특성변수값의 조정에 반영되어야 한다. 초기 0 레벨의 각 스프링에 대해서는 Young's modulus에 정의되는 값으로 강성계수와 감쇠계수가 정의된다. 그리고 높은 상세레벨의 스프링에 대해서는 식(4)와 같이 정의된다.

$$KS_{refine} = 2^l \times KS_{zero-level} \times \frac{\left(\sum_{v \in P_{refine}} Mass(v) \right) / N_{refine}}{\left(\sum_{v \in P_{zero-level}} Mass(v) \right) / N_{zero-level}} \quad (4)$$

$$KD_{refine} = KD_{zero-level} \times \frac{KS_{refine}}{KS_{zero-level}}$$

여기서, KS_{refine} 와 KD_{refine} 는 각각 현 상세레벨 스프링의 강성계수와 감쇠계수를 의미하며, N 은 각 상세레벨의 총 노드수를 의미한다. l 은 현 수행단계의 상세레벨을 의미한다. $\sum_{v \in P_{refine}} Mass(v)$ 는 현 상세레벨에 속하는 노드의 질량 합을 의미하고, $\sum_{v \in P_{zero-level}} Mass(v)$ 는 초기단계 노드의 질량 총합을 의미한다.

온라인 수행단계에서 시뮬레이션 시간 간격(time step)은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$TS = \frac{TS_{zero-level}}{2^l} \quad (5)$$

여기서, l 은 현재 수행단계에서 가장 상세화된 노드의 LOD 값을 의미한다.

6. 형태유지 스프링

위나 대장기관 등과 같이 대상객체의 내부가 비어있는 형태의 cavity 객체들은 일반적으로 전체 구성 노드수를 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 대상객체의 변형이 진행되는 동안 초기 형태 정보를 유지하고, 형태유지 스프링을 통하여 초기 형태로 당기는 힘을 발생시킨다. 가상노드는 형태유지 스프링에 의해 전달되는 힘에 의해 위치나 속도, 가속도가 변화되지 않는다. 형태유지 스프링을 통하여 객체 표면에 위치하는 매스 노드에 전달되는 힘은 식 (3)에 의해 결정된다.

$$g_1 = - \left[k'_s \times |\Delta x| + k'_d \left(\frac{v_1 \cdot \Delta x}{|\Delta x|} \right) \right] \frac{\Delta x}{|\Delta x|} \quad (3)$$

여기서, k'_s 와 k'_d 는 형상유지 스프링을 위한 강성계수와 감쇠계수를 의미한다. 또한 Δx 는 매스 노드와 가상 노드간의 현재 거리, 즉, $x_1 - x_2$ 를 의미하고, v_1 는 매스 노드의 현재 속도를 의미한다. 식(3)에 의하여 매스 노드는 초기 위치와의 간격이 생긴 시점부터 초기 위치로의 복원력이 작용하게 된다.

7. 구현 및 실험 결과

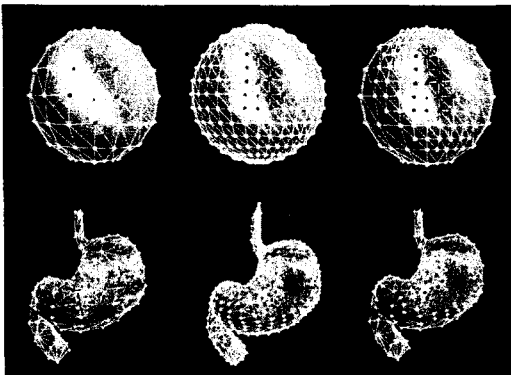
본 논문에서 제안하는 다중해상도 표면 메쉬 기반 변

형모델은 Pentium IV (3.4GHz CPU, 2GB RAM) 플랫폼에서 C++, OpenGL 을 기반으로 구현되었다. 제안 기법의 수행 효율성을 검증하기 위하여 기존 Mass-Spring 모델링 기법과 제안 기법의 수행시간을 Table 1과 같이 구 모델과 위 모델에 적용하여 비교하였다. 또한, 모델간 변형형태 유지 특성을 검증하기 위하여 각 실험모델에 같은 위치에 같은 외부 힘을 2초간 가한 후의 변형형태를 비교하였다. 그림 3은 실험결과를 보여주고 있다. 힘을 받은 영역을 중심으로 빨간색 노드로 표현된 노드는 일정수준 이상의 위치 변이를 보여주는 노드를 표현하고 있다. 빨간색 노드의 분포영역 및 위치가 각 상세레벨간 모델에서 동일하게 분포되어 있음을 확인할 수 있었다. 실험결과 제안 모델링 기법은 상세화된 모델을 적용한 것과 같은 변형 특성을 유지하면서 52~62% 수행 효율성 향상을 얻을 수 있었다.

Table 1. 기존 Mass-spring과 제안기법의 수행시간 비교.

MODEL	Conventional mass-spring			Proposed adaptive method			
		No. of nodes	No. of spring	Exe. Time (sec)	No. of nodes	No. of spring	Exe. Time (sec)
A	Coarse	114	336	2.313	114 ~ 133	336 ~ 385	3.125
	Wholly Refined	450	1344	6.656			
B	Coarse	188	558	3.312	188 ~ 253	558 ~ 737	4.735
	Wholly Refined	746	2232	9.250			

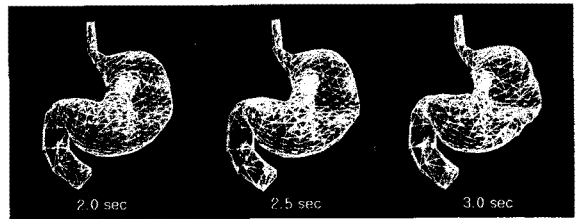
A : Sphere Model B: Stomach Model



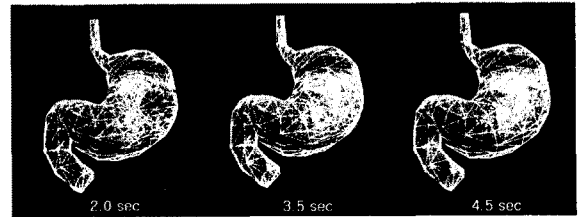
(a) Coarse model (b) Refined model (c) Proposed model
그림 3. 세 가지 모델에 대한 변형 형태 비교

제안 형태유지 스프링의 유용성을 입증하기 위하여, 형태유지 스프링을 포함하지 않은 일반적인 표면

모델과 형태유지 스프링을 포함한 표면 모델에 2초간 객체를 누르는 외부힘을 가하고, 2초 후에 힘을 제거하는 실험을 수행하였다. 형상유지 스프링이 포함되지 않은 일반적인 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 4는 힘이 제거된 후 대상 모델의 형태 변형을 시간대별로 추적한 실험 결과를 보여주고 있다. 그림 4에서 보여주듯이 일반적인 표면 변형모델은 힘이 제거된 후에도 형태 변형이 지속적으로 이루어져 초기형태로의 복원에 실패하였다. 반면, 형태유지 스프링을 포함한 표면 변형 모델은 외부힘이 제거된 후 안정적으로 초기형태로의 복원이 이루어졌다.



(a) 형태유지 스프링을 적용하지 않은 경우



(b) 형태유지 스프링을 적용한 경우

그림 4. 형태유지 스프링의 유용성 검증

8. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 위나 대장기관 등과 같이 대상객체의 내부가 비어있는 형태의 cavity 객체들을 대상으로 형태변형이 효과적이고 안정적으로 수행될 수 있도록 하기 위한 공간적응적 기법과 형태유지 스프링을 제안하였다. 또한, 서로 다른 표면 상세레벨간 형태변형의 특성을 유지하기 위하여 상세레벨간 물리적 특성변수 적응기법을 제안하였다. 제안 모델은 실험결과 강한 외부힘에도 안정적 형태변형 및 초기

형태로의 복원이 수행되었고, 모델간 변형특성이 유지되었다.

향후연구로는 물체 표면 및 내부 영역까지 표현된 불륨적 모델에 적합한 공간 및 물리적 특성변수 적용기법에 관한 연구를 수행하고자 한다.

참고문헌

- [1] Bro-Nielsen M., "Finite element modeling in surgery simulation", Proceedings of the IEEE, special issue on surgery simulation , 86 , pp 490 – 503, 1998.
- [2] D. Hutchison, M. Preston, T. Hewitt, "Adaptive Refinement for Mass-Spring Simulations", In proceedings of the Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation",pp 31-45, 1996.
- [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) ,pp 361-370, 1997.
- [4] Gilles Debunne, M. Desbrun, M. -P. Cani A. Barr, "Adaptive simulation of soft bodies in real-time", Proceedings of computer animation 2000, Philadelphia, PA, May , pp 15 – 20, 2000.
- [5] Gilles Debunne, Mathieu Desbrun, Marie-Paule Cani, Alan H. Barr, "Dynamic Real-Time Deformations using Space & Time Adaptive Sampling", Proceedings of ACM SIGGRAPH , 2001.
- [6] J. O'Brien and J. Hodgins. "Graphical model and animation of brittle fracture", Proceedings of ACM SIGGRAPH , pp 137-146, 1999.
- [7] X. Wu, M. S. Downes, T. Goktekin, F. Tendick, "Adaptive Nonlinear Finite Elements for Deformable Body Simulation using Dynamic Progressive Meshes", Proceedings of EUROGRAPHICS 20(3), 2001.
- [8] Eitan Grinspun, Petr Krysl, Peter Schroeder, "CHARMS: A Simple Framework for Adaptive Simulation", Proceedings of ACM SIGGRAPH 21(3), 2002.
- [9] Julien Villard, Houman Borouchaki, "Adaptive Meshing for Cloth Animation", Proceedings of 11th International Meshing Roundtable Ithaca, 2002.
- [10] Klaus-Juergen Bathe, "Finite Element Procedures", pp 979-1009, Prentice Hall.
- [11] Andrew Witkin, "Particle System Dynamics", SIGGRAPH 2001 Course Notes, 2001.
- [12] Jeffery A. Thingvold, Elaine Cohen, "Physical Modeling with B-Spline Surfaces for Interactive Design and Animations", In Symposium on Interactive Computer Graphics, pp 129 – 137, 1990.
- [13] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery, "Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing", 2nd edition, pp 715- 727,

Cambridge University Press, 2002

- [14] Denis Zorin, Peter Schroeder, Wim Sweldens, "Interpolating Subdivision for Meshes with Arbitrary Topology", Proceedings of SIGGRAPH 1996: 189-192, 1996.