

질량-스프링 모델에서의 과다 신장 문제 해결 방법

배희정*, 백낙훈*, 유관우**, 장병태*
*한국전자통신연구원 VR센터
*동국대학교 컴퓨터멀티미디어공학과
**경북대학교 컴퓨터공학과
hjbae@dreamwiz.com

Super-Elongation Avoidance in Mass-Spring Model

HeeJung Bae*, NakHoon Baek*, Kwyon Woo Ryu**, ByungTae Jang*
VR Center, Electronics & Telecommunications Research Institute
*Department of Computer & Multimedia Engineering, Dongguk University
**Department of Computer Engineering, Kyungpook National University

요약

가상 현실이나 게임 제작 분야에서는 움직임에 따른 변형을 실시간으로 처리하는 것이 요구되고 있다. 변형 처리를 위한 일반적인 모델은 질량-스프링(mass-spring) 방법을 이용한 것으로, 그 구현이 쉽고 처리 속도가 빨라 대화형 시스템(interactive system)에서 실시간 처리를 위한 모델로 주목되고 있다. 반면에, 이 모델은 외부의 제어에 대하여 super-elastic한 문제를 내포하여 그 적용이 제한되어 있다. 본 논문에서는 스프링 모델의 근본적인 문제인 super-elastic 문제를 극복하기 위한 근사 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 하이브리드 접근 방식으로, 이산 점 사이의 내부 힘들을 선처리(pre-processing)하여 elastic한 성분을 나누어 처리한다. 선처리 과정에서는 변형 물체의 물리적 속성에 따라 늘어나는(elongation) 성분과 굽어지는(bending) 성분을 따로 처리함으로써, 극심히 늘어나는(super-elongation) 문제를 극소화할 수 있다. 본 논문의 결과로는 빈번한 제어에 대응되는 움직임을 빠르게 생성할 수 있음을 보이며, 안정적이면서 그럴 듯한 움직임을 생성할 수 있음을 보인다.

1. 서론

질량-스프링(mass-spring) 시스템은 컴퓨터 그래픽스 분야에서 변형이 가능한 물체(deformable object)의 표현을 위하여 오랫동안 사용되고 있는 대표적인 모델들 중의 하나이다. 이 모델은 물체 표현을 위한 전통적인 방법인 유한 요소 법(finite element method)에 비하여, 구현이 용이하고 처리 속도가 빠르다는 장점과 함께 외부 작용에 대한 동역학적(dynamics) 움직임을 쉽게 제어할 수 있다는 장점을 가진다. 즉, 물리 법칙에 기초하여 모델링 되는 이 방법은 천(cloth)이나 부드러운 물체(soft object)[1][2]의 외부 환경에 대응되는 변형을 가능하게 하고, 캐릭터의 근육과 같은 자율적인 움직임에 의한 변형까지도 가능하다.

물체의 일반적인 변형은 그 탄성력(elasticity) 정도와 성질에 따라 독특한 형태로 나타나는데, 이들 대부분은 질량-스프링 모델을 이용하여 실제와 유사한 형태로 표현이 가능하다. 이 모델에서는 물체의 표면은

질점(mass)으로 이산화하여 구성하고, 질점 사이에 작용하는 탄성에 의한 변형은 스프링의 작용으로 근사함으로써 변화되는 표면의 모양을 얻는다. 이러한 근사 방법은, 이산점의 갯수와 아올러 스프링의 근사 방법에 따라 변형된 모양의 질과 처리 속도가 결정되는데, 이를 위한 연구들이 꾸준히 진행되고 있다[1][3][4].

최근에는, 가상 현실의 각 응용 분야에서 변형 물체에 대한 대화형 처리가 요구됨에 따라, 실시간 처리를 위한 스프링의 근사 방법이 요구되고 있다. Baraff의 암시적 적분법에 의한 연구[4] 이래, 스프링 모델의 실시간 처리에 대한 가능성을 보였으나 사용자의 제어가 빈번한 게임 환경 등에서는 아직까지 그 수행 속도가 충분하지 못하다.

본 논문에서는 대화형 처리가 요구되는 게임 환경에서 스프링 모델의 실시간 근사 방법에 대하여 다룬다. 제안하는 방법은 신속한 처리가 가능한 명시적 적분법을 기본으로, 이에 근본적으로 늘어나는 문제(super-elongation)[5]를 하이브리드 방식으로 해결할

으로써, 빠르면서 안정적인 처리가 가능하다. 여기서, 하이브리드 방식은 변형 과정에서 길이 제약에 기초한 스프링의 작용을 기하학적인 측면으로 접근하는 것으로, 이산 점 사이에 작용하는 힘을 선처리(pre-processing)할 수 있다. 이 결과로 늘어나는 성분을 굽어지는 성분과 구분하여 처리할 수 있어, 극심히 늘어나는 문제를 극소화할 수 있다. 또한, 이 선처리 과정은 물체의 변형 특성을 적절히 반영할 수 있다.

2. 관련 연구

상호 작용이 가능한 게임 환경에서는 캐릭터의 얼굴이나 옷, 그리고 물고기나 공 등과 같은 변형 물체를 실제와 유사하게 근사 처리함으로써 사실감을 부여한다. 이들 대부분은 표면의 변화로써 현실감을 부여할 수 있는데, 비교적 구현이 용이한 질량-스프링 모델이 사용될 수 있다. 반면에, 이 모델은 상반 관계에 있는 처리 속도와 안정성 문제로 인하여 사용자의 제어에 따른 변형 처리에 대하여 많은 연구들이 진행되고 있다.

그동안 암시적 적분법(implicit integration method)에 의한 근사 방법[1][6]으로 안정적인 처리가 가능하였으나, 이산 점의 수가 많은 경우에는 처리 속도가 느려 대화형 시스템에 직접 사용하기는 곤란하다. 또한, 다소 빠른 처리가 가능한 방법으로는 명시적 적분법에 의한 방법이 알려져 있으나[7], 급격한 제어에 대해서는 불안정해지는 문제를 포함하여 그 적용이 한계를 가진다.

신속한 처리에 대한 근본적인 장애 요소인 불안정성 문제는 이산 점 사이에 작용하는 내부 힘의 부정확한 근사로 인하여 발생되는데, 이로 인하여 극심히 늘어나는 비현실적인 현상이 일어날 수 있다. 이 문제의 근본적인 해결책은 아직까지 나오지 않았지만, 대부분의 스프링 모델에서 Provot 이 제안한 후처리 수정(post modification)[7]을 추가하여 사용하고 있다. 이 방법은 각 방법으로 구한 질점의 길이 변화에 대하여, 지나치게 늘어난 길이를 보정함으로써 안정된 질점의 위치를 근사시키는 것이다. 이로 인하여, 급격한 제어에 대하여 비현실적인 변형은 줄일 수 있으나, 추가되는 처리 시간으로 인하여 전체적인 수행 속도가 느려지는 문제점과 국지적인(local) 변형의 특수성을 상실할 수 있다는 문제점을 가진다.

최근에는 기하학적 제약에 의한 하이브리드 방식으로 변형을 해석하는 방법이 제시되었는데[8], 안정성이 뛰어나고 신속한 처리도 가능한 장점이 있다. 또한, 이 방법은 지역적인 길이 제약으로 인한 변형 요소를 유연성 있게 다루어 정확한 변형 처리가 가능할 것으로

기대된다.

3. 질량-스프링 모델 (Mass-Spring Model)

3.1 형상 (topology)

이산 점으로 샘플링하여 구성된 질량-스프링 모델은 표면의 형상을 실제와 비슷하게 나타내기 위하여, 질점의 연결 형태에 따라 스프링을 구분하여 적용한다. 스프링의 역할은 각 물체의 물리적 특성에 맞도록 모델 되는데, 천의 경우 Provot 이 제안한 연결 종류에 따라 아래와 같은 적용이 가능하다.

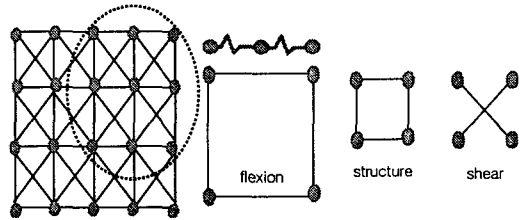


그림 1. 질량-스프링 모델

- structure springs : 인접된 이산 점 $P_{i,j}$ 와 $P_{i+1,j}$ 또는 이산 점 $P_{i,j}$ 와 $P_{i,j+1}$ 사이에 연결된 스프링으로, 이산 점 사이의 늘어나는 변형을 제어한다.
- shear springs : 이산 점 $P_{i,j}$ 와 $P_{i+1,j+1}$ 또는 $P_{i+1,j}$ 와 $P_{i,j+1}$ 사이에 연결된 스프링으로, 표면이 뒤틀어지는 변형을 제어한다.
- flexion springs: 이산 점 $P_{i,j}$ 와 $P_{i+2,j}$ 또는 $P_{i,j}$ 와 $P_{i,j+2}$ 사이에 연결되어 이산점 사이의 굽어지는 변형을 제어한다.

연결된 형상에 따라 이들 스프링은 늘어지고(stretching) 휘어지고(shear) 굽어지는(bending) 등의 변형을 별도로 처리함으로써, 내부적인 작용이 실제 천의 특성을 최대한 반영하도록 제어된다.

3.2 상호 작용 (interaction)

물체의 변형은 이산 점 사이에 작용하는 내부 작용에 의해 결정되는데, 이것은 외부의 제어에 대응되는 질점의 상태 변화에서 비롯된다. 상태 변화는 초기에 주어진 휴지 길이 유지를 위한 시스템의 내부 처리를 거침으로써 이루어지는데, 이웃하는 점들 사이의 내부 힘을 적분함으로써 변하는 위치를 계산할 수 있다.

전체 시스템의 내부 처리는 뉴턴의 동역학 법칙에 의하여 이루어지며, 작용하는 외부 힘과 내부 힘과의 관계에 의하여 상미분 방정식에 의한 시스템을 구성할 수 있다.

$$f_{i,j}^{ext} + f_{i,j}^{int} = m \cdot a_{i,j}$$

즉, 질점 i 와 j 에 작용하는 외부 힘 $\mathbf{f}_{i,j}^{\text{ext}}$ 에 의하여 발생되는 내부 작용 힘 $\mathbf{f}_{i,j}^{\text{int}}$ 는 변화되는 질점의 가속도에 해당되는 상호 작용을 일으키게 한다. 내부 힘은 연결된 질점의 형상에 따라 아래와 같이 작용하여 물체의 팽창력 (tension) 을 반영한다.

$$\mathbf{f}_{ij}^{\text{int}} = -k_{ij} (\| \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \| - l_{ij}^0) \frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)}{\| \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \|}$$

여기서, \mathbf{x}_i 는 질점 i 에서의 위치이고, k 는 상수값으로 스프링의 경직도(stiffness)를 나타내며, l^0 은 두 질점 i 와 j 사이의 초기 휴지 길이(rest length)를 나타낸다.

이렇게 적용된 힘은 수치 적분에 의하여 새로운 질점의 위치를 구하게 되는데, 적분법의 종류에 따라 그 정확성과 신속성이 결정된다. 대표적인 오일러 방법(Euler method)에 의한 속도와 위치는 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{ij}(t+\Delta t) &= \frac{1}{m} \cdot \mathbf{f}_{ij}(t) \\ \mathbf{v}_{ij}(t+\Delta t) &= \mathbf{v}_{ij}(t) + \Delta t \cdot \mathbf{a}_{ij}(t+\Delta t) \\ \mathbf{x}_{ij}(t+\Delta t) &= \mathbf{x}_{ij}(t) + \Delta t \cdot \mathbf{v}_{ij}(t+\Delta t) \end{aligned}$$

여기서, 적용되는 \mathbf{f}_{ij} 의 종류에 따라 서로 다른 수치 적분 방법을 사용할 수 있으며, 각 경우에 대하여 빠른 처리를 위한 근사 방법이 다양하게 알려져 있다. 이 결과로 매 프레임마다 변하는 위치 값은, 늘어지거나(stretching) 휘어지거나(shear) 굽어지는(bending) 등의 변형된 모양을 나타내게 된다.

4. 스프링 모델의 개선 방법

4.1 과다 신장(Super-Elongation) 문제

스프링은 고유 특성상 매우 탄력적(elastic)이기 때문에, 외부의 다양한 제어에 대하여 근본적으로 불안정성을 포함한다. 특히, 적분에 의한 스프링의 근사 방법에서는, 늘어지는 속성으로 인하여 위치의 변화율이 매우 커지므로, 실제와 흡사하게 근사 시키는 것은 더욱 어렵다.

이를 해결하기 위하여, 스프링의 경직도(stiffness) k 를 증가시키거나 적분되는 시간의 간격 Δt 를 조정하여 처리할 수 있으나, 비현실적인 탄력 현상이 발생하거나 안정된 상태를 위한 처리 시간이 증가하는 단점을 가진다.

후처리 수정(post modification)에 의한 위치 보정 방법이 널리 사용되고 있는데, 이 방법은 각 근사 방법에서 구한 질점의 위치에 대하여, 늘어난 스프링 길

이의 변화율을 제한하여 연결된 각 질점의 위치를 보정하는 방법이다. 설정된 임계치(threshold)를 기준으로 선택된 질점은 그 위치를 보정하게 되고, 이웃하는 전체 시스템과의 안정 상태를 유지하도록 추가 처리를 거치게 된다. 이 처리로 인하여 국지적으로 발생된 비현실적인 변형은 해결되지만, 전체 시스템의 상태는 새로운 변형이 일어나 안정적인 상태를 위한 소요 시간이 상당히 추가될 수도 있다.

4.2 신장 회피 (Elongation Avoidance)

위치 보정에 의한 방법은 이미 늘어난 스프링의 길이에 대하여 처리하기 때문에, 수정되는 질점의 위치 변화로 인하여 전체 시스템이 안정되는 상태를 위하여 추가 처리를 필요로 한다.

제한하는 방법은 스프링의 길이 변형에 대한 제약을 선처리(pre-processing)함으로써, 지나치게 늘어지는 장에 요소를 미리 제거하는 것이다. 즉, 매 프레임마다 질점의 속도를 체크하여, 스프링의 휴지 길이(rest length)에 대한 변화율에 따라 두 질점에서의 속도를 조정하는 것이다.

질점 i 에서의 속도 \mathbf{v}_i 는 그림 2에서와 같이 스프링 s_{ij} 에 대한 tangential 성분 \mathbf{v}_i^t 와 normal 성분 \mathbf{v}_i^n 으로 나눌 수 있으며 아래와 같이 계산된다.

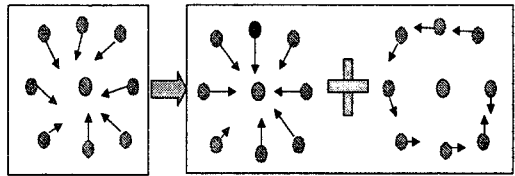


그림 2. 스프링의 길이 신장과 속도

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i^t &= (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{s}_{ij}) \frac{\mathbf{s}_{ij}}{\|\mathbf{s}_{ij}\|} \\ \mathbf{v}_i^n &= \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_i^t \end{aligned}$$

이때, 그림 2(b) 에서와 같은 tangential 성분은 늘어나는 성분을 제공하고, 그림 2(c)와 같은 normal 성분은 굽어지거나 휘어지는 성분을 제공한다. 본 논문에서는 이를 이용하여, 굽어지거나 휘어지는 성분을 늘어지는 성분과 구분하여 제어하고, 또한 지나치게 늘어나는 성분을 억제할 수 있다. 따라서, 후처리 수정에 의한 위치 보정 방법과는 달리, 전체적인 변형 특성과 아울러 국지적인 변형 특성을 다소 신속하게 반영할 수 있다.

반면에, 매 프레임마다 생성된 질점의 위치는 표면

의 전체 실루엣에 대한 대략적인 정보를 나타낼 수 있다. 아래와 같이 계산된 라플라시안 값[9]에서 각 질점의 인접 형상 정보와의 관계를 알 수 있는데, 이를 속도 제어에 적용할 수 있다.

$$L_i = \frac{1}{m} \sum_{j \in I_i} (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)$$

전체 시스템의 변형 방향을 나타내는 라플라시안 값을 반영하여 적용될 경우, 인접된 질점과의 내부 작용이 보다 빠른 속도로 안정될 수 있다.

$$\mathbf{v}_i^{new} = \mu \cdot \mathbf{v}_i + \lambda \cdot \mathbf{L}_i$$

전체 시스템의 변형 속성으로 가중치를 가지는 항(term)을 추가하여, \mathbf{v}_i^{new} 와 같이 속도의 속성을 조절할 수 있다. 이 항은 질점의 속도 성분과 전체 변형 특성 성분에 각각 추가할 수 있는데, 전체적인 시뮬레이션 처리 속도에 영향을 미친다.

4.3 실험 결과

본 실험에서는 스프링 모델의 늘어나는 성분을 제어할 수 있음을 보였다. 매 프레임마다 계산되는 늘어나는 성분을 초기 임계치와 기하학적 제약에 따라 선처리함으로써 안정된 상태를 신속하게 결정할 수 있다.

이 처리 과정은 기존의 스프링 근사 방법에 쉽게 적용될 수 있으며, 그림 3은 하이브리드 방식의 근사 방법에 적용된 예를 보인 것이다. 그 구현 결과로서, 펜티엄 II 600MHz급 PC에서 초당 60~75 프레임으로 생성된 화면들이다. 이것은 한 프레임 당 안정 상태 획득을 위한 처리 시간의 20%를 단축시키는 결과를 가져왔다. 처리 결과 생성된 화면은 캐릭터의 급격한 움직임에 대해서도 안정적임을 알 수 있고, 덧붙이는 움직임에서도 늘어나는 현상이 방지되어 그럴듯한 움직임과 함께 안정적인 모양이 형성됨을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 안정적이면서 신속한 변형 처리를 위한 방법을 다루었다. 스프링의 불안정적인 문제를 기하학적 특성으로 해석하여 하이브리드 방식으로 해결함으로써 안정적이면서 신속한 처리가 되도록 하였다.

제안하는 방법은 스프링의 늘어나는 성분을 선처리함으로써, 지나치게 늘어지는 장애 요소를 미리 제거하는 것이다. 이 처리 과정은 스프링의 다양한 근사 방식에 직접적으로 적용될 수 있어, 천의 움직임을 비교적 빠르게 표현할 수 있도록 한다.

향후에는 제안된 방법의 처리 시간을 정량적으로 분석하여, 기존 방법들과 비교하고, 이를 바탕으로 전반적인 개선을 수행할 필요가 있다.

[참고문헌]

- [1] M.Desbrun, P.Schroder, and A. Barr, "Interactive animation of structured deformable objects," *Graphics Interface'99*, 1999.
- [2] D.E.Breen, et al., "Predicting the drape of woven cloth using interacting particles," *SIGGRAPH'94*, pp.365-372, 1994.
- [3] D.Baraff and A.Witkin. "Large steps in cloth simulation," *SIGGRAPH'98*, Vol.32, pp.43-52, 1998.
- [4] S.P.Timoshenko and J.N.Goodier, *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, 1970.
- [5] Y.M. Kang, et al, "Real-Time Animation Technique for flexible fabricparts," *WSCG processing*, pp 322-329, 2000.
- [6] X. Provot "Deformation Constraints in mass-spring model to describe rigid cloth behavior", *Proceedings of graphics interface*, pp. 147-154, 1995.
- [7] H.J. Bae, et al., "Procedural Approach to generate Real Time Motions of Cloth," *Proceeding of KISS*, Vol.28(2), pp616-618, 2001.
- [8] G.Taubin, "A signal processing approach to fair surface design," *Computer Graphics*, pp351-358, 1995.

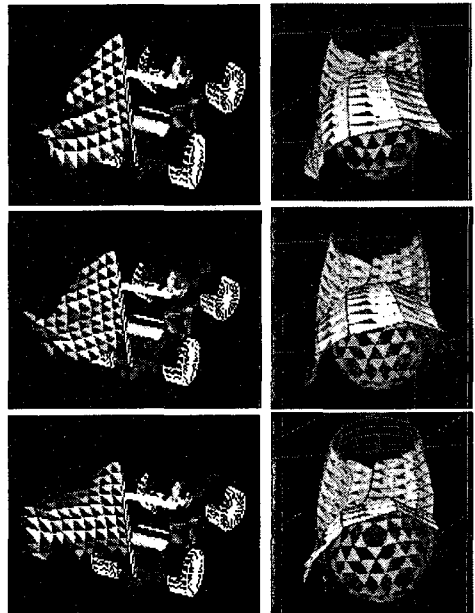


그림 3. 모델에 적용된 예