

실시간 처리를 위한 천의 다단계 표현 방법

A multi-level representation of cloth for real-time processing

배희정^{*}, 백낙훈^{*,}, 이종원^{***}, 유관우^{*}, 장병태^{*}
^{*}한국전자통신연구원 VR센터
^{**}동국대학교 컴퓨터멀티미디어공학과
^{***}KOG
^{*}경북대학교 컴퓨터공학과

Heejung Bae^{*}, Nakhoon Baek^{*,}, Won Lee^{***}, Kwanwoo Ryu^{*}, ByungTae Jang^{*},
^{*}VR Center, Electronics & Telecommunications Research Institute
^{**}Computer Engineering Dept., Dongguk University
^{***}KOG
^{*}Computer Engineering Dept., Kyungpook National University

요 약

움직임에 따른 변형을 실시간으로 처리하는 것은 가상 현실이나 게임 제작 분야에서 절실히 요구되고 있다. 반면에, 캐릭터 등이 착용한 스커트나 바지 등과 같이, 복잡한 변형 특성을 가지는 옷감의 변형은, 캐릭터의 움직임에 따른 변형을 원하는 시간 내에 자연스럽게 생성하기가 쉽지 않다. 본 논문에서는 많은 수의 이산점을 필요로 하는 복잡한 변형을, 실시간 처리를 고려하여 다단계로 시뮬레이션하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 방향을 가진 표면 요소로 기본 frame을 구성하여 이들의 시뮬레이션 결과로 비교적 사실적인 표면 전체의 실루엣을 얻고, 이를 세분화시킴으로써 움직임에 따른 세부적인 변형을 생성한다. 기존의 시뮬레이션 중심의 계층적 방법과는 달리, 변형된 기본 프레임의 유한 요소간에 작용하는 움직임과 위상 관계를 기하학적으로 해석함으로써, 움직임에 따른 표면의 세부적인 모양을 얻어 낼 수 있다. 본 논문의 결과로 캐릭터의 돌발적인 움직임에도 안정적이면서 그럴 듯한 움직임을 생성하며, 움직임에 따른 자연스러운 모양을 실시간에 생성할 수 있다.

1. 서 론

변형 처리(deformation simulation)는 컴퓨터 그래픽스 및 가상 현실 분야에서 중요한 기술들 중의 하나이다. 현재 가상 현실 기술의 발달에 따라, 변형 물체(deformable object)에 대한 움직임을 대화형으로 처리하기 위한 요구가 증가하고 있으며, 스카프 등 간단한 변형 물체의 움직임은 실제와 흡사하게 생성할 수 있다 [1][2]. 이러한 대화형 변형 처리(interactive deformation)는 가상 현실의 각 응용 분야에서 활발히 사용되고 있으나, 새로운 요구에 따른 움직임을 실시간에 생성하기는 아직 충분하지 못한 상황이다. 특히, 캐릭터가 착용한 옷이나 의료 실험 대상이 되는 신장 등의 물체는, 사실적인 모델을 설계하는 것이 어려우며, 외부의 제어에 따라 변형되는 움직임을 실시간에 생성하는 것은 더 어려운 일이다.

대화형 변형 처리에서는 질량-스프링(mass-spring) 모델을 이용하여 물체의 표면을 질점과 스프링으로 구성하고, 물리 법칙을 적용하여 그 질점이 움직이는 위치를 얻는 방법이 사용되고 있는데, 이 방법은 현실감 있는 움직임을 쉽게 얻을 수 있다는 장점이 있다. Mesh 구조에 기반한 스프링 모델은 깃발이나 스카프 등의 간단한 모양에서와는 달리, 그림 1에서와 같이 스커트나 바지 등 모양이 복잡한 경우에는, 이산 지점 사이에



그림 1. 캐릭터의 움직임에 따른 스커트의 변화

발생되는 상호 작용을 사실적으로 계산해 내는 것이 상당히 까다롭고 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다[3][4][5].

본 논문에서는 복잡한 형상과 변형을 가지는 옷감에 대한 변형을 실시간으로 구현하기 위한 다단계 시뮬레이션 방법을 제안한다. 제안하는 다단계 시뮬레이션 방법은 렌더링 기법에서 많이 적용되는 다단계 모델링 기법을 응용한 것으로, 전체 표면을 기준이 되는 프레임(frame)으로 구성하여 시뮬레이션하고, 이를 세분화시킴으로써 움직임에 따른 표면의 변형을 생성하는 방식으로 작동한다. 여기서, 기본 프레임은 방향이 주어지지 않은 표면 요소들로 이루어져 있으며, 동작을 제어하는데 이용하고, 세분화는 변형된 기본 프레임의 형상 정보를 기준으로 구체적인 표면의 모양을 얻기 위한 과정이다. 기존의 시뮬레이션 중심의 계층적 방법과는 달리, 유한 요소로 구성된 기본 프레임만을 동작 제어에 이용하고, 변형된 유한 요소들 간에 작용하는 움직임과 위상 관계를 기하학적으로 해석함으로써, 움직임에 따른 표면의 세부적인 모양을 얻어낸다.

2. 관련 연구

옷감 변형을 위한 실시간 모델은 Baraff가 제안한 암시적 적분법(implicit integration)을 이용한 질량-스프링(mass-spring) 모델에서 그 가능성을 보였다[6]. 이를 향상시킨 근사화된 암시적 적분법을 이용한 방법들[1][2]이 연구되어, 스카프나 깃발 등의 경우에는 실제와 거의 유사하게 변형되는 움직임을 실시간에 생성할 수 있다. 반면, 스커트나 바지 등의 변형은 구성되는 모양이 복잡하고 이에 따른 주름 등을 포함하는 변형이 다양하여 그 변형을 실제와 유사하게 모델링하기가 매우 까다롭다.

일반적인 옷감의 모델링 방법인 질량-스프링 모델은 이산 데이

터에 기초하여 표면의 모양을 근사하는 것으로, 인접한 이산 점들이 복잡한 형상을 만들어 낼 경우에 이들 사이에 작용하는 상호작용을 계산해 내기가 힘들 뿐 아니라, 구체적인 형상 정보를 위한 더 많은 이산점을 필요로 한다. 이렇듯, 메시의 크기가 급증하거나 이를 해결하기 위한 refine 등의 부가적인 처리[5][7]로 인하여, 시뮬레이션 시간이 증가하여 빈번한 사용자의 제어에 대응되는 움직임은 실시간에 처리하기에는 한계가 있다. 더욱이, 상세한 표면의 모양을 위하여 이산점을 추가하여 시뮬레이션 하더라도, 이산점 사이의 길이 제한에 기초한 스프링 모델의 한계로 인하여, 주름 등이 포함된 구체적인 변형 모양을 시뮬레이션 방법만으로 만들어 내기는 어렵다.

Cubic B-스프라인에 기반하여 주름이 포함된 표면의 생성 기법이 제안된 바 있다[2]. 이 방법은 깃발 등이 움직일 때 형성되는 주름을 sigmoid 함수를 적용하여 생성하였는데, 일률적인 주름 모양에 한계가 따른다. 주름 모양을 포함하는 영상 맵(image map)에 기반하여 주름의 생성 기법을 연구하였는데[8], 이 방법은 다소 복잡한 스킨트의 움직임에 따라 생성되는 주름 모양을 실제와 유사하게 만들어 내었다. 이 방법은 이미지 맵으로 표현된 초기 데이터를 이용하여 연속된 시간상에 형성되는 스킨트의 움직임에 주어진 영상 맵들을 합성하여 생성되는 변형 모양을 생성하였다. 이는, 스킨트의 움직임에 따라 형성되는 주름의 초기 데이터를 필요로 하여, 주름이 형성될 위치와 구체적인 모양을 현실적으로 만들어 내지는 못한다.

최근에 천의 실시간 대화형 시스템에 적용될 수 있는 절차적 방법이 제안된 바 있다[9]. 이 방법은 표면을 방향 정보가 포함된 유한 요소로 구성하여, 물체의 모양을 결정짓는 형상 정보를 변형에 직접 이용하고 있다. 이것은 변형에 작용될 비선형적인 상호작용의 기하학적인 해석이 가능하게 하여, 주름 생성 등의 추가적인 처리 없이 표면의 세부 모양을 제공하도록 그 가능성을 보였다. 아울러, 이 처리 방법은 천의 사실적인 변형에 있어서 필수 요소인 비선형성을 고려하면서도, 빈번하게 돌발적으로 작용하는 외부 힘에 대하여 안정적인 근사 방법을 제시하여, 실시간 대화형 시스템에 적용될 수 있음을 보이고 있다.

3. 모델링

본 논문에서는 이산 모델로 구성된 표면을 옷감의 구체적인 변형 모양과 유사하게 모델링하기 위하여, 하이브리드 형태로 구성된 시뮬레이션 방법을 제안한다. 제안하는 시뮬레이션은 두 단계의 절차들로 이루어진다. 표면의 전체적인 움직임을 제어하기 위하여 모델된 base-mesh의 시뮬레이션 과정과, base-mesh의 움직임에 따라 형성되는 구체적인 표면을 생성하기 위한 세분화 과정으로 구성된다.

본 논문에서 base-mesh는 메시의 형상(topology) 정보를 포함하도록 구성된 질량-스프링 모델을 변형하여 이용하고, 각 질점의 움직임은 절차적 방법[10]으로 해석하여 한정된 이산 점으로도 표면의 전체적인 모양을 구체적으로 생성하도록 한다. 생성된 이산점들 사이의 거리와 방향의 기하학적 관계에 의하여, 옷감 변형의 고유 특성을 반영하여 Hook's 법칙으로 근사하여, 상호 작용하는 내부 팽창력을 해석한다. 구하는 세부 표면은 전통적인 계층 시뮬레이션 방법과는 달리, 세분화 과정을 통하여 구하는 각 단계에 형성되는 메시와 이에 따른 각 질점에서의 변위 값들(displacement map)로 표현된다. displacement map은 각 단계에서 질점들이 가지

는 법선 벡터 방향으로의 크기로 스칼라 값들의 집합으로 구성된다. 이 값은 지극히 극대화되어 세분되는 B-스프라인이나 웨이브릿 등의 다단계 모델 기법과는 달리, 옷감과 같은 특정한 변형으로 인한 표면 변형에 적당한 값들로 사용된다.

3.1 기본 메시와 변위(Base-Mesh and Displacement)

표면의 계층적 시뮬레이션을 위하여, 적은 크기의 base-mesh를 구성한다. base-mesh는 전체 표면을 표면 요소(surface element)로 이산화하여 방향을 가진 질량-스프링으로 모델한다. 방향(orientation)을 가진 각 요소는 표면의 형상(topology) 정보를 직접 제어하기 위한 것으로, 질량과 위치와 inertia tensor의 정보를 가진다. 사용되는 방향은 법선(normal) 벡터로 초기 표면 요소의 방향값을 지니며, 시뮬레이션을 통하여 질량, inertia tensor 등의 물리 속성을 적용하여 변경하게 된다.

그림 2는 구성된 base-mesh의 tangential 성분들의 표시와 요소의 normal 성분을 고려하여 생성될 표면의 세부 모양을 표현한 것이다.



그림 2. 기본 메시와 세분화된 표면의 상세도(2D)

base-mesh를 m 이라 한다면, 표면 전체는 세분화 과정을 거쳐 구성된 요소들의 집합 B 로 나타낼 수 있다.

$$B = S^k \cdot m$$

이때, S^k 는 base-mesh의 세분화 단계 k 단계에서 거처게 되는 세분화를 나타내며, 각 과정을 거쳐 생성된 메시 M' 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$M' = S^k \cdot m + D$$

이때, D 는 displacement map을 의미한다.

3.2 변형 규칙과 시뮬레이션(Deformation Law and Simulation)

변형되는 옷감의 모양은 외부에서 작용되는 힘에 대한 위치의 변화를 구함으로써 생성된다. 힘이 표면에 미치는 영향을 여러 가지로 생각해 볼 수 있는데, 실제 옷감의 변형은 늘어지거나 수축되는 길이(length) 변이(displacement)보다 굽어지거나 휘는 회전(rotation) 변이가 많이 일어나는 특징을 가진다. 또한, 옷감이 일정 길이 이상 늘어나면, 더 이상 늘이는 데는 아주 큰 힘이 작용하여야 하고, 옷감이 굽어지는 변형이 많이 일어나더라도 길이 변형은 거의 일어나지 않는 복잡한 성질들을 포함한다.

이러한 기본 성질을 고려하여, 본 논문에서는 이웃하는 요소 i 와 j 간에 작용하는 비선형적인 내부 힘(internal force)을 절차적인 방법[9]으로 해석하여, 옷감의 회전 변이로 인한 변형을 빠르게 안정적으로 처리한다. 그림 3은 이러한 비선형적인 변형을 외부 작용에 따라 나타낸 것이다.

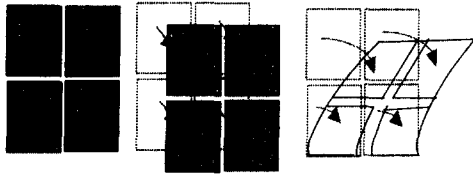


그림 3. 비선형 변형의 한 예 (a)초기상태 (b) 외부작용에 의한 이동 (c) 변형

즉, 그림 3.(b) 에서와 같이 외부의 작용만으로 제각기 이동된 상태에서, 그림 3.(c) 에서와 같은 상태가 되도록, 그림 3.(b) 에서의 상태 값을 이용하여 내부 작용될 힘을 근사할 수 있다. 처리 방법은 이동된 각 요소간에 선형적인 작용과 비선형적인 작용을 나누어 해석함으로써, 힘의 크기 성분과 휘어지거나 굽어지게 하는 방향 성분을 각각 다룰 수 있다[9].

연결되는 요소는 인접한 요소들간에 작용하는 힘을 고려한다. 본 논문에서는 인접된 두 요소가 이루는 tangent plane과 각 요소들의 법선 벡터와의 관계를 계산하여, 이루는 평면의 실제적인 모양을 근사한다. 즉, 두 요소의 법선 벡터가 각각 n_a, n_b 이고, 연결 벡터가 s_{ab} 라 하면, 실제적으로 표면의 수직 방향으로 작용한 힘(stress)[11]은 아래와 같이 해석할 수 있다.

$$\delta x_a = \gamma \cdot n_a, \quad \delta x_b = -\gamma \cdot n_b, \quad \gamma = n_a \cdot s_{ab}$$

그리고, 연결될 요소간에 작용하는 내부적인 팽창력(strain)에 의하여, 그 곡률이 달라지므로 각 요소의 방향 벡터를 아래에서와 같이 갱신한다.

$$\delta \omega = \lambda \cdot (n_a \times n_b), \quad \delta x = \gamma \cdot (n_a + n_b)$$

여기서, $\delta \omega$ 는 법선 벡터의 회전량을 조정할 수 있으며, λ 는 두 벡터의 외적 벡터의 크기이며, $s_{ab} \cdot \delta x \cdot \sin \alpha$ 에 비례하는 상수이다. δx 는 부드러운 곡면을 생성할 수 있으며, γ 는 그 크기로, 두 벡터의 외적 벡터에 비례하는 값이다.

3.3 메시 세분화 및 재구성(Mesh Subdivision and Reconstruction)

시물레이션된 base-mesh는 전체적인 표면의 실루엣을 비교적 사실적으로 생성한다. 움직임에 따른 세부적인 변형은 각 질점을 포함한 삼각형을 기본으로, 다음과 같이 구한 라플라시안 값[12]을 기준으로 처리된다.

$$L(x_i) = \frac{1}{m} \sum_{j \in N(i)} (x_j - x_i)$$

라플라시안 값 $L(x_i)$ 은 x_i 지점에서의 tangential 성분 $L_t(x_i)$ 와 normal 성분 $L_n(x_i)$ 으로 나눌 수 있는데, 이때 tangential 성분은 세분될 이분점의 위치 정보를 제공하고, normal 성분은 세분화되어 형성될 모양의 정보를 제공한다. 따라서, 본 논문에서는 이를 이용하여, 각 질점의 표면에서의 곡률 법선 벡터 C [12]를 아래에서와 같이 계산한 뒤, 세분화 될 영역은 이들의 기본 집합 단위인 삼각 영역에서의 평균 곡률 값의 임계치를 설정하여 세분화될 영역을 선택한다.

$$C(x_i) = \frac{1}{2A} \sum_{j \in N(i)} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij})(x_j - x_i)$$

설정된 영역은 그림 4 에서와 같이 처리되며, 삼각형의 각 변에서의 이분점은 아래와 같이 각 질점에서의 tangential 성분으로 보정되어 삽입 위치를 구한다.

$$L_n(x_i) = (L(x_i) \cdot n) n, \quad L_t(x_i) = L(x_i) - L_n(x_i)$$

이때, 법선 벡터 n 은 곡률의 단위 벡터이다. 위치가 조정된 삽입점은 인접된 질점들의 법선 벡터와 거리 벡터를 이용함으로써, 크기인 변위(displacement)를 구한다. 변위는 삽입점의 법선 벡터 방향으로의 스칼라 값으로, 각 세분화를 반복하면서 삽입되는 해당 변위를 나타내며, 아래와 같이 인접 요소간의 거리차 x 와 후지길이의 차에 비례하는 a 와의 관계식으로 계산된다.

$$d_i = a \cdot \cosh\left(\frac{x}{a}\right), \quad d_i' = d_i n_i + \lambda \cdot r_i$$

삽입점의 변위에 약간의 term을 추가하여, d_i' 과 같이 주름의 크기와 생성 모양을 랜덤(random)하게 조절할 수도 있다. 이 term은 삽입점의 normal 성분과 tangential 성분에 각각 추가할 수 있는데, 전체적인 시물레이션 결과에는 영향을 미치지 않는다.

4. 실험 결과 및 결론

본 논문에서는 사용자의 제어에 따라 변형되는 옷감의 움직임을 실시간으로 처리하는 방법에 대하여 다루었다. 제안하는 방법은 하이브리드 방식의 다단계 시물레이션 방법으로, 인접한 요소 간의 비선형적인 물리적 변형을 기하학 관계로 해석할 수 있음을 보였다. 이로 인하여, 다단계 시물레이션이 가능함을 제시하고, 한 예로 옷을 착용한 캐릭터의 동작에 대응되는 스커트의 모양을 실제와 유사하게 생성할 수 있음을 보였다. 그림 5는 본 방법의 구현 결과로서, 펜티엄 II 600MHz급 PC에서 초당 40~60 프레임으로 생성된 화면들이다. 캐릭터의 급격한 움직임에 대해서도 안정적이고, 캐릭터가 움직이는 방향이나 속도 등의 외부 환경의 변화에도 그럴 듯한 움직임의 모양을 빠르게 생성할 수 있음을 보였다.

[참고문헌]

- [1] M.Desbrun, P.Schroder, and A. Barr, "Interactive animation of structured deformable objects," *Graphics Interface'99*, 1999.
- [2] Y.M. Kang, et al, "Real-Time Animation Technique for flexible fabric parts," *WSCG processing*, pp 322-329, 2000.
- [3] D.E.Breen, et al., "Predicting the drape of woven cloth using interacting particles," *SIGGRAPH'94*, pp.365-372, 1994.
- [4] S. T. Tan, et al., "A constrained finite element method for modeling cloth deformation," *The visual computer*, Vol.15(2), pp.90-99, 1999
- [5] P. Howlett and W. T. Hewitt, "Mass-Spring Simulation using Adaptive Non-Active Points," *EuroGraphics'98*, Vol.17(3), pp.345-354, 1998.
- [6] D.Baraff and A.Wilkin, "Large steps in cloth simulation," *SIGGRAPH'98*, Vol.32, pp.43-52, 1998.
- [7] D.Hutchinson, et al., "Adaptive Refinement for mass/spring simulation," *EuroGraphics'96*, Vol.15(1), pp.45-54, 1996.
- [8] S.Hadap et al., "Animating Wrinkles on Clothes," *IEEE Visualization'99*, pp.175-182, 1999
- [9] H.J. Bae, et al., "Procedural Approach to generate Real Time Motions of Cloth," *Proceeding of KISS*, Vold.28(2), pp616-618, 2001.
- [10] J. W. Lee, et al., "A procedural approach to solving constraints of articulated bodies," *EuroGraphics 2000*, short presentations, pp.55-64, 2000.
- [11] S.P.Timoshenko and J.N.Goodier, *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, 1970.
- [12] G.Taubin, "A signal processing approach to fair surface design," *Computer Graphics*, pp 351-358, 1995.

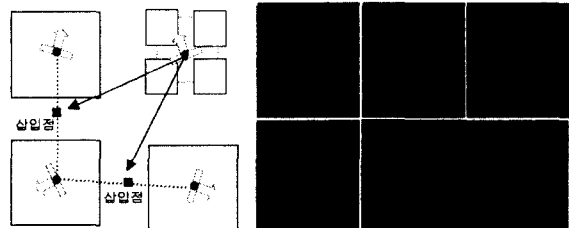


그림 4. 세분화과정 그림 5. 제어에 따른 스커트 변형의 단계적 생성 예