

절차적 방법을 이용한 천의 실시간 동작 생성

Procedural Approach to generate Real Time Motions of Cloth

배희정*, 백낙훈**, 이종원***, 유관우*

*경북대학교 컴퓨터공학과

동국대학교 컴퓨터멀티미디어공학과

***KOG

HeeJung Bae*, Nakhoon Baek**, Won Lee***, Kwyun Woo Ryu*

*Department of Computer Engineering, Kyungpook National University

Computer Engineering Dept., Dongguk University

***KOG

요 약

천의 변형은 가상 현실이나 게임 제작 분야에서 현실감을 증가시키는 측면에서 필수적인 요소들 중의 하나이다. 반면, 옷을 착용하거나 깃발을 매단 캐릭터가 돌발적이면서 급격한 움직임들 나타낼 때에는, 이에 따른 천의 움직임을 원하는 시간내에 자연스럽게 생성하기가 쉽지 않다. 본 논문에서는 천의 사실적인 변형에 있어 필수 요소인 비선형성을 고려하면서도, 돌발적이고 빈번하게 작용하는 외부 힘에 대하여 안정적이고 빠른 위치 기반의 근사 방법을 제안하고자 한다. 또한, 이에 따른 사실성을 유지하기 위하여 스프링의 비선형적인 성분을 기하학적으로 처리하는 방법을 제안한다. 이 방법은 기하학적 관계에 물리적 속성을 반영하여 해결함으로써 시각적으로 받아들일 수 있는(visibly-plausible) 천의 자연스러운 움직임을 생성할 수 있다. 본 논문의 결과로 자동차의 급격한 움직임에도 안정적이고, 자동차가 달리는 방향이나 노면 등의 외부 환경의 변화에도 사실적인 천의 애니메이션을 생성할 수 있다.

1. 서 론

가상 현실이나 게임 제작 분야에서 천의 변형을 실시간에 사실적으로 표현하는 것은 중요한 요소들 중의 하나이다. 옷을 착용한 캐릭터나 깃발을 매단 자동차가 움직일 때, 이에 따른 천의 움직임을 사실적으로 표현하는 것은, 그림 1에서와 같이, 애니메이션의 현실감을 증가시키기 위한 필수적인 요소가 된다. 반면에, 캐릭터의 움직임이 돌발적으로 급격하게 일어날 수도 있는, 가상 세계의 특성 때문에 천의 움직임을 제한된 시간 내에 안정적으로 생성하기는 쉽지 않다.



그림 1. 자동차의 움직임에 따른 깃발의 변화

물리 기반의 질량-스프링 모델은 천과 같이 부드러운 물체의 변형을 표현하기 위해 사용되어 온 전통적인 기법이다. 이 기법에서는 천의 표면 상에 위치하는 여러 개의 질점(mass point)들과 그들을 서로 연결하는 스프링(spring)을 사용하고, 천의 변형된 모양은 스프링에 작용하는 힘들을 적분하여 각 질점의 위치들을 이동시킴으로서 표현한다. 바람이나 당기는 힘 등과 같이 외부에서 힘이 작용하면, 천을 구성하는

각각의 질점들은 수직, 수평 또는 대각선 방향으로 연결된 스프링들을 통하여 내부의 힘들을 받게 되어 변형된 천의 모양을 생성한다. 이러한 천의 변형은 상호작용(interaction)하는 비선형(non-linear) 내부 힘들을 정확하게 적용시켜야 사실적인 표현이 가능하지만, 전통적인 스프링 모델에서는 이러한 변형 과정을 실시간에 만족스럽게 처리하기가 곤란하였다[1,2].

암시 적분(implicit integration)을 이용하는 방법들은 변형 과정의 빠르면서 안정적인 처리를 위하여 연구되고 있다. 이들은 변형되어지는 질점의 위치를 비교적 큰 시간 간격을 사용하여 구성된 선형 시스템을 풀이함으로써, 안정적이면서도 비교적 사실적인 결과를 얻을 수 있으나, 선형 시스템의 풀이 과정에서 상당한 처리 시간이 소요되기 때문에, 사용자의 요구가 빈번한 시스템에서는 사용하기에 한계가 있다 [1,3]. 실시간 처리를 위해서는 암시적 방법의 근사 방법들이 제안되었으나[1], 비선형 방정식의 과도한 근사화로 인하여 천의 변형을 사실적으로 표현하기에 미흡할 수도 있다는 문제점을 가진다.

유한 요소(finite element)를 이용하는 방법들은 변형의 사실적이고 정확한 표현을 위하여 연구되었다[4,5]. 이 방법은 비선형적으로 변하는 물체의 모양을 유한 요소를 구성하는 각 선분의 길이와 방향의 기하학적 성질을 이용함으로써, 정확하게 계산할 수 있다. 반면, 이 경우에는 천의 물리적 성질과 외부 힘을 정확하게 설정하기가 곤란하고, 특히 복잡한 계산량 때문에 처리 시간이 상당히 소요된다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 천의 사실적인 변형에 있어서 필수 요소인 비선형성을 고려하면서도, 빈번하게 돌발적으로 작용하는 외부 힘에 대하여 안정적이고 근사 방법을 제안하고자 한다. 급격한 힘의 변화에도 안정적인 시스템을 제안하기 위해서는 post-stability 방법[6]에 의한, 위치 기반의 절차적 방법[7]을 사용한다. 또, 위치 기반의 처리에서도 사실성을 유지하기 위하여, 질량-스프링 모델에 방향성을 추가하여 비선형적인 내부 힘들을 기하학적으로 처리할 수 있음을 보인다. 본 논문이 제안하

는 위치 기반의 처리 방법은 기하학적 제약 조건들을 물리적 성질을 반영하여 해결함으로써 시각적으로 받아들일 수 있는 (visibly-plausible) 천의 움직임을 실시간에 생성할 수 있다.

2. 기본 아이디어

질량-스프링 방법은 물체를 구성하는 질점의 위치와, 이를 연결하는 스프링에 작용하는 내부 힘(internal force)들을 해석함으로써, 변형되는 모양을 구한다. 변형에 작용되는 실제 힘은 비선형적으로 변하는 질점의 위치량으로 근사시킬 수 있는데[1,3], 이를 이용하여 스프링의 내부 힘을 구하는 방법이 다수 제시되었다. 그러나, 스프링의 불안정성(instability)문제와 비등방성(anisotropy)의 힘을 다루기가 까다로우며, 실시간에 만족스러운 해를 구하기가 쉽지 않다.

본 논문에서는 천의 변형에 사용되는 스프링의 힘을 하이브리드(hybrid) 방식[8]으로 구함으로써, 선형 시스템의 풀이 과정 없이 변형되는 모양을 빠르게 비교적 사실적으로 구해내는 방법을 제안한다. 즉, 위치 기반의 질차적 방법을 적용하여 스프링에 작용하는 힘을 안정적으로 근사하고, 이로 인한 사실성을 보완하기 위하여 스프링 힘의 비선형적인 성분을 고려한다.

기본 아이디어는 각 질점의 물리기반 움직임과 질점사이의 상호작용을 각각 나누어 처리하고, 이들 상호작용을 기하학적으로 해석하는 것이다. 즉, 이 방법은 질차적인 방법을 기본으로 하여 각 질점의 위치를 동역학 법칙에 따라 제각기 갱신하는 update 단계와, 질점의 상호작용을 처리하는 adjust 단계로 구성한다. 따라서, update 단계에서 질점사이의 상호관계를 고려하지 않고 갱신된 각 질점은, adjust 단계에서 질점사이에 주어지는 제약을 만족하도록 그 위치를 보정한다. update 단계에서의 위치와 속도를 각각 $x(t+\Delta t)^{update}$ 와 $v(t+\Delta t)^{update}$ 라 한다면, 제약이 만족되는 최종 위치 $x(t+\Delta t)$ 와 속도 $v(t+\Delta t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v(t+\Delta t) = v(t+\Delta t)^{update} - \delta v$$

$$x(t+\Delta t) = x(t+\Delta t)^{update} - \delta x$$

여기서, δx 와 δv 는 update 단계에서 갱신된 위치와 속도의 오차값이 되며, 이들을 보정함으로써 안정적인 상태의 위치와 속도를 구할 수 있다.

본 논문에서는 기하학적 해석으로 이 오차 값을 계산한다. 제안하는 방법은 Desbrun이 지적한 바와 같이[1], 연결된 질점 i 와 j 간에 상호작용하는 스프링의 힘 $F(i,j)$ 를 선형적인 요소 $-k_{ij}(x_i - x_j)$ 와 비선형적인 요소 $k_{ij} \cdot |j_i| \cdot (x_i - x_j) / \|x_i - x_j\|$ 로 나누어 처리함으로써 가능하다. 여기서, 선형 성분은 스프링의 길이를 제한하는 역할을 하며, 비선형 성분은 단위 시간에 동일한 크기($|j_i|$)의 벡터를 회전시키는 역할을 하여 스프링이 비등방성(anisotropy)으로 힘이 작용하도록 한다. 본 논문에서는 모델링시에 질점들에 방향(orientation)을 두어, 이 위치와 방향의 기하학적 상호관계를 이용하여 비선형적인 힘을 구해낸다.

3. 질차적 방법의 적용

외부 작용에 의해 변형된 천의 모양을 표현하기 위하여, 표면에 힘이 미치는 영향을 여러 가지로 생각해 볼 수 있다. 기존의 질량-스프링 모델에서는 주로 면적의 변형을 고려하여 질점 사이의 길이 등을 다루었다. 연속되는 표면을 규칙적인 격자로 구성하는, 질량-스프링은 격자사이의 길이 제한만으로 그 표면의 변형을 사실적으로 나타내기가 부족하므로[2], 표면의 형상(topology)에 대한 고려가 더 필요하다. 질량-스프링 모델에서 이 3차원 형상의 변형을 결정짓는 데 스프링의 비선형 성분이 큰 영향을 미친다고 지적되고 있으나[9], 질량-스프링 모델의 특성상 이 성분을 적용하기가 까다롭다.

본 논문에서는 스프링의 비선형적인 성분을 표면의 기하학적 특성으로 근사시킴으로써, 스프링의 힘이 규칙적으로 구성된 edge방향으로만 작용하는 것이 아니라, 각 질점이 기하학적 특성을 만족하도록 설정된 방향으로도 작용하도록 한다. 이때, 추가되는 스프링의 힘은 update 단계에서 갱신된 질점사이에 기하학적 관계를 유지하도록 계산되고, adjust 단계에서 그 값을 이용하여 질점의 위치와 방향을 보정하여 사실상 표면의 모양으로 만들어 주는 역할을 한다. 기하학적 특성은 일반적인 평면의 제약 조건을 이용하며, 모델링 시 주어지는 질점의 법선 벡터(normal vector)와 질점 사이의 edge 정보를 분석하여, 질점의 질량과 inertia tensor 등의 물리량을 적용하여 해석된다.

3.1 천의 모델링

사용하는 모델은 질량-스프링 모델에 방향을 추가하여 사용한다. 옷감을 씨실과 날실로 짜여진 천으로 가정한다면, 각 질점은 수직으로 연결된 씨실과 수평으로 연결된 날실이 교차된 망(network)형태로 그림 2와 같이 구성할 수 있다. 이때, 실제 천은 길이의 변형이 거의 없으며, 단지 씨실과 날실이 이루는 위상에 따라 굽어지고 휘는 변형이 일어나므로[10], 각 질점은 작은 크기의 표면 요소

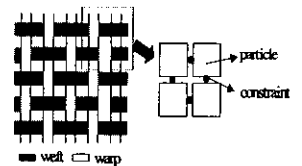


그림 2. 모델

(surface element)로 구성할 수 있다. 표면 요소는 질량과 위치를 포함하여, inertia tensor 그리고 방향(orientation)의 정보를 가지는 particle로 구성한다. 각 particle의 방향은 법선(normal) 벡터로 표현된다.

3.2 동작

각 particle은 외부의 제어에 의해 동역학적으로 움직인다. 즉, update 단계에서 particle들은 연결된 particle에 상관없이 독립적으로 움직이고, 이전 단계에서의 거리의 변화량으로 속도를 근사시키는 Stoermer 적분법을 이용한다. 본 방법에서 $t+\Delta t$ 시간에서의 위치

$$x_i(t+\Delta t)^{update}$$

은 $x_i(t) + \Delta x_i(t+\Delta t)$ 로 계산하며, 위치 증가값

$\Delta x_i(t+\Delta t)$ 는 $k \cdot \Delta x_i(t) + a_i(t) \cdot \Delta t^2$ 로 근사한다. 즉, 현재 속도보다 거리 변화량으로 근사시키고, 가속도는 현재 적용되는 힘의 방향에 비례하는 값으로 가정하여 계산한다. k ($k \in [0,1]$)는 외부 환경에 의한 속도 변화와 천의 물리적 속성을 반영하기 위한 damping 상수이다. 위의 근사값 $x_i(t+\Delta t)^{update}$ 는 연결되는 particle과의 작용을 고려하면, 위치의 오류값인 δx 를 포함하는데, adjust 단계에서 이 오류값들을 보정하여, 연결된 질점사이에 상호작용을 처리한다. 방향에 대해서도 같은 방식으로 오류 값 $\delta \omega$ 를 처리한다.

3.3 상호작용의 기하학적 제약 해결

particle들은 외부 힘의 작용에 의해 위치가 변하게 되는데, 이 particle들은 서로 연결된 질점의 상태 변화에 영향을 받아 안정된 상태를 유지하도록 위치를 이동한다. 안정된 상태는 2장에서 제시한 바와 같이, particle 사이에 위치 에너지 변화량에 비례하는 내부 힘이 작용하여 늘어지거나(stretching) 휘어지거나(shear) 굽어지는(bending) 등의 표면의 변형된 모양을 만들어낸다.

이 비선형적인 변형들을 실시간에 사실적으로 고려하기 위하여, 표면의 기하학적 성질 즉, planarity, normality 그리고 circularity[11]를 사용한다. 이들은 질점 사이의 길이 제한과 함께 질점들의 위상 관계를 만족시키기 위해 사용되며, 각 질점은 연결되는 질점과의 관계를 만족하는 범위내에 위치하게 되고, 지나치게 늘어지거나 뒤트는 변형 등을 막을 수 있으며, 비교적 구체적인 표면의 모양을 만들어 낼 수 있다. update과정에서 자유롭게 갱신된 각 particle의 상태는, 연결되는

particle과의 기하학적 관계에서 평면의 성질을 위배하는 위치와 방향의 값을 포함한다. 이 위배값은 아래와 같이 구할 수 있으며, 다음 절에서 다루는 물리적 성질을 고려한 강제이동과 회전으로 보정된다.

■ **planarity & stretching** : 표면의 연결을 위해 사용되며, 연결되는 두 particle이 동일한 tangent plane을 이루어야 하므로, 각 particle의 법선 벡터 방향으로의 변화량을 제한하여 그 plane에 직각이 되도록 한다. 따라서, 각 particle의 법선 벡터 $\mathbf{n}_a, \mathbf{n}_b$ 와 두 particle을 연결하는 벡터 \mathbf{s}_{ab} 를 이용하여 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\delta \mathbf{x}_a = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_a, \quad \delta \mathbf{x}_b = -\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_b, \quad \mathbf{v} = \mathbf{n}_a \times \mathbf{s}_{ab}$$

$\delta \mathbf{x}$ 는 각 particle의 법선벡터 방향으로의 이동량이며, 연결벡터와의 회전량 만큼 조정한다. 마찬가지로, $\delta \theta$ 는 법선벡터의 회전량을 조정할 수 있으며, $\lambda \cdot (\mathbf{s}_{ab} \times \delta \mathbf{x})$ 으로 계산된다. 여기서 λ 는 두 벡터의 외적 벡터의 크기 $\mathbf{s}_{ab} \cdot \delta \mathbf{x} \cdot \sin \theta$ 에 비례하는 상수이다. 이 제한들은 늘어지는 변형을 막을 수 있다.

■ **normality & shear** : 표면으로 연결된 두 particle은 그 법선 벡터들이 동일한 상에 있어야 하므로, 각 particle의 법선 벡터의 방향을 제어하여 서로 꼬여(twist)있는 정도를 조정한다. 두 법선벡터들의 차를 이용하여 서로 붙어져 있는 정도를 조정한다.

$$\delta \theta = \lambda \cdot (\mathbf{n}_a \times \mathbf{n}_b)$$

$\delta \theta$ 는 두 particle을 동일한상에 유지하도록 각 회전의 위배량을 제거하기 위하여 사용되며, 지나치게 뒤물리는 변형을 방지한다.

■ **curvature & bending** : 표면의 curvature를 부드럽게 해주는 역할을 하며, 연결되는 두 particle이 곡면을 이룰 때, 그 법선벡터의 방향이 동일한 각도를 유지하도록 제한할 필요가 있다. 따라서, 법선의 합벡터와 각 particle의 법선벡터의 차이만큼 그 회전을 조정한다.

$$\delta \mathbf{x} = \mathbf{v} \cdot (\mathbf{n}_a + \mathbf{n}_b), \quad \delta \theta = \lambda \cdot (\mathbf{n}_a + \mathbf{n}_b) \times \mathbf{s}_{ab}$$

여기서, \mathbf{v} 는 $(\mathbf{n}_a + \mathbf{n}_b) \cdot \mathbf{s}_{ab}$ 에, λ 는 두 벡터의 외적 벡터의 크기에 비례하는 상수이다. 이 값들은 표면이 부드럽게 굽어지도록 사용되며, 특히 굽어지는 정도를 변화시킬 수 있다.

각 particle의 위치와 방향의 위배값은 세가지 성질의 위배값을 선형 조합(linear combination)하여 계산된다. 전체 위배값은 다음 장에서 구하는 강제 이동과 회전량에 의해 관계를 유지하도록 위치와 방향을 보정하며, 이 보정은 서로 연결된 particle들에 대하여 모두 적용된다.

3.4 물리 속성을 보존한 재구성

particle들 간의 기하학적 연결 관계를 유지하기 위해 가해지는 강제 회전과 이동은 각 particle의 물리적 속성을 최대한 보존할 수 있도록 그 위치와 방향에 최소한의 변화만을 가져오는 것이 자연스럽다. 강제 이동과 회전은 update 과정 후 각 particle a와 b의 기하학적 상태 즉, 두 particle의 법선 벡터의 방향과 두 particle의 거리를 이용하여 구하는데, 이것은 상호작용에 의한 위치와 방향를 결정하도록 작용한다.

외부 제이시 particle의 질량과 inertia tensor등의 물리적 성질에 의해 자유롭게 이동한 두 particle의 상태가 주어졌을 때, 적용되는 강제 이동과 회전량은 해당 위배량에 비례한다. 따라서, 위 관계식에서 주어진 위배량은 두 벡터 $\mathbf{v}_a, \mathbf{v}_b$ 의 크기와 그 사이각에 비례하므로, 이들을 해석하여 가해야 하는 회전량과 이동량을 구할 수 있다.

먼저, 위배되는 회전량은 회전축 \mathbf{A} 와 회전각 θ 로 나타낼 수 있다. 회전각을 최소화하기 위해, 회전축은 $\mathbf{A} = \mathbf{v}_a \times \mathbf{v}_b / |\mathbf{v}_a \times \mathbf{v}_b|$ 로 설정하고, 회전각 θ 는 보정시키고자 하는 particle의 각운동량을 최소화하도록 구한다. 이때, 두 벡터간의 이동거리 \mathbf{s}_{ab} 에 적용될 가상의 힘 \mathbf{f} 는 $\mathbf{m}_b \cdot \mathbf{a} = (2m_b / (\Delta t)^2) \cdot \mathbf{s}_{ab}$ 로 근사시키고, 각운동량 $\boldsymbol{\tau}$ 는 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{v}_a \times \mathbf{f}$ 로 계산된다. 보정하고자 하는 particle의 moment of inertia, 각 가속도를 각각 I_b, α 라 하면, $\boldsymbol{\tau}$ 의 크기는 $I_b \cdot \alpha$ 로 계산되므로 각 가속도 α 는 $(2m_b / I_b \cdot (\Delta t)^2) \cdot \mathbf{v}_a \cdot \mathbf{s}_{ab} \cdot \sin \phi$ 로 근사시킬 수 있다. 여기서, ϕ 는 \mathbf{v}_a 와 \mathbf{v}_b 가 이루는 각도이다. 강제 회전에 사용되는 회전각 θ 는 이제

각 가속도 α 로 부터 설정되는데, θ 의 범위는 0에서 ϕ 사이이고, 그 계산에는 다음의 조정 함수를 사용한다.

$$\theta = \phi \cdot e^{-\frac{h}{v_a \cdot s}} \quad (3)$$

여기서, h 는 $2m_2 / (I_2 \cdot (\Delta t)^2)$ 이다. 식 (3)은 회전량을 부드럽게 변화시키며, 급격한 변화를 막아주는 역할을 한다. 회전각 θ 는 $\mathbf{v}_a, \mathbf{v}_b$ 의 크기가 증가함에 따라 ϕ 에 가까워지게 되며, $\mathbf{v}_a, \mathbf{v}_b$ 가 아주 작은 값일 경우에는 0에 가까워진다. 또한, particle의 물리적인 속성을 나타내는 h 의 변화에 따라 회전의 변화 폭을 조정할 수 있다. 구한 강제 회전은 기준축과 조정된 각 θ 로부터 계산할 수 있다.

4. 결과 및 향후 연구

본 논문에서는 사용자의 빈번하고 돌발적인 제어가 있는 가상 환경에서 안정적이면서 빠른 천의 시뮬레이션 방법에 대하여 다루었다. 특히, 캐릭터의 돌발적이고 급격한 움직임에도 천의 움직임을 실시간내에 생성할 수 있음을 보였다. 그림 3은 본 방법의 구현 결과로서, 펜티엄 II 600MHz급 PC에서 초당 30~50 프레임으로 생성된 화면들이다. 자동차의 급격한 움직임에 대해서도 안정적이고, 자동차가 달리는 방향이나 노면 등의 외부환경의 변화에도 그럴듯한 천의 움직임의 모양을 볼 수 있다.

제한하는 방법은 위치기반으로 변형을 처리함으로써, 스프링에 작용하는 비선형적인 힘을 안정적이면서 빠르게 구할 수 있었다. 이 스프링의 힘은 천의 물리적 성질과 표면의 기하학적 성질을 반영함으로써 천의 움직임을 비교적 사실적으로 표현할 수 있었다. 향후 연구과제로는 천을 이루는 표면의 자체 충돌을 해결하여야 할 것이다.



(a) 자동차의 주행시 기발의 예제화면

(b) 자동차 브레이크를 밟을 경우 기발의 예제화면

그림 3. 예제

[참고문헌]

- [1] M.Desbrun, P.Schroder, and A. Barr, "Interactive animation of structured deformable objects," *Graphics Interface'99*, 1999.
- [2] P. Howlett and W. T. Hewitt, "Mass-Spring Simulation using Adaptive Non-Active Points," *EuroGraphics'98*, Vol.17(3), pp.345-354, 1998.
- [3] D.Baraff and A.Witkin, "Large steps in cloth simulation," *SIGGRAPH'98*, Vol.32, pp.43-52, 1998.
- [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] G.Celniker et al., "Deformable curve and surface finite-elements for free-form shape design," *SIGGRAPH'91*, pp.257-266, 1991.
- [6] J. Baumgarte, "Stabilization of constraints and integrals of motion in dynamical systems," *Computer Methods in Applied Mechanics*, Vol.1, pp.1-36, 1972.
- [7] J. W. Lee, et al., "A procedural approach to solving constraints of articulated bodies," *EuroGraphics 2000*, short presentations, pp.55-64, 2000.
- [8] H.N. Ng, and R.L.Grimdale, "Computer graphics tecniques for modeling cloth," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.16(5), pages. 28-41, 1996.
- [9] G.S.P.Miller, "The motion dynamics of snakes and worm," *SIGGRAPH'88*, pp.169-178, 1988.
- [10] D.E.Breen, et al., "Predicting the drape of woven cloth using interacting particles," *SIGGRAPH'94*, pp.365-372, 1994.
- [11] Celniker, G. et al., "Deformable curve and surface finite-elements for free-form shape design," *SIGGRAPH'91*, Vol.25(4), pp. 257-266, 1991.