

실시간 종이 구김 시뮬레이션을 위한 적응적 메쉬 구조

강영민
 동명대학교 게임공학과
 ymkang@tu.ac.kr

Adaptive Mesh Structure for Realtime Paper Crumple Simulation

Young-Min Kang^o
 Dept. of Game Engineering, Tongmyong University

요 약

본 논문은 적응적 메쉬 구조를 이용하여 가상 종이 객체를 실시간에 시뮬레이션 하는 방법을 제안한다. 제안된 기법은 임의의 삼각 메쉬에 적용될 수 있으며, 안정적인 수치 적분과 변형 기반 메쉬 세분화를 이용하여 효율적으로 종이 표면의 주름과 구김을 생성한다. 종이 객체의 구겨짐을 사실적으로 표현하기 위하여 부러지는 스프링을 가진 적응적 메쉬 구조를 사용한다. 적응적 구조가 지속적으로 질점을 삽입 혹은 삭제하기 때문에, 질량과 운동량의 보존이 고려되어야만 사실적인 종이 시뮬레이션이 가능하다. 제안된 기법은 실시간 환경에서 종이와 같이 얇은 쉘 구조의 사실적인 애니메이션을 생성한다.

ABSTRACT

In this paper, a realtime approach to the simulation of virtual paper with an adaptive mesh structure is proposed. The proposed method can be applied to arbitrary triangular mesh structures and efficiently produces wrinkles and creases on the paper surface with stable numerical integration and deformation-based mesh refinement. In order to plausibly represent the crumples on the paper object, we employed an adaptive mesh structure with breakable springs. Because the adaptive structure continuously inserts or removes vertices and edges to or from the mesh structure, the conservation of the mass and the momentum should be carefully taken into account for the plausible simulation of the virtual paper. The proposed method produced plausible animation of paper-like thin shell in realtime environments.

Keyword : realtime animation, physically-based animation, virtual paper, adaptive mesh

접수일자 : 2009년 07월 06일

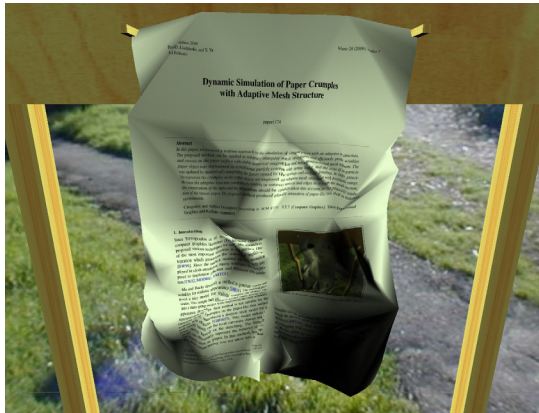
심사완료 : 2009년 08월 11일

※ 이 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음

1. 서론

Terzopoulos 등이 그래픽스 분야에서 변형가능한 객체를 컴퓨터 그래픽스에서 다룬 이래로[1], 많은 연구자들이 연체(soft object)를 다루기 위한 다양한 기법을 제안하였다.

이러한 연구들 가운데 가장 중요한 진전 가운데 하나는 애니메이션의 안정성을 보장하는 암시적 적분 기법을 도입한 것이었다[2]. 암시적 적분법 옷감 애니메이션에 성공적으로 적용된 이후 효율적이면서도 표현력이 풍부한 다양한 기술들이 옷감 애니메이션을 위해 제안되었다[3,4,5].



[그림 1] 가상 종이 객체의 실시간 애니메이션 결과

봉제선을 제어하여 가상 옷감 표면에 사실적인 주름을 표현할 수 있는 방법도 제안되었다[6]. 간단하지만 효과적인 이 기법은 용이하게 질량 스프링 모델과 통합되며 주름진 외형 표현 능력을 크게 개선할 수 있다. 하지만 이 기법은 종이와 같이 얇은 표면 위에 생기를 구김을 표현하기에는 적합하지 않다.

Grinspun 등은 이산 쉘(discrete shell) 모델을 제안하여 얇은 객체의 움직임을 효율적으로 다룰 수 있도록 하였다[7]. 이 모델은 지역적인 곡률 변화에 기반한 굴곡 에너지(flexural energy)와 표면 확장에 기반한 막 에너지(membrane energy)를 이

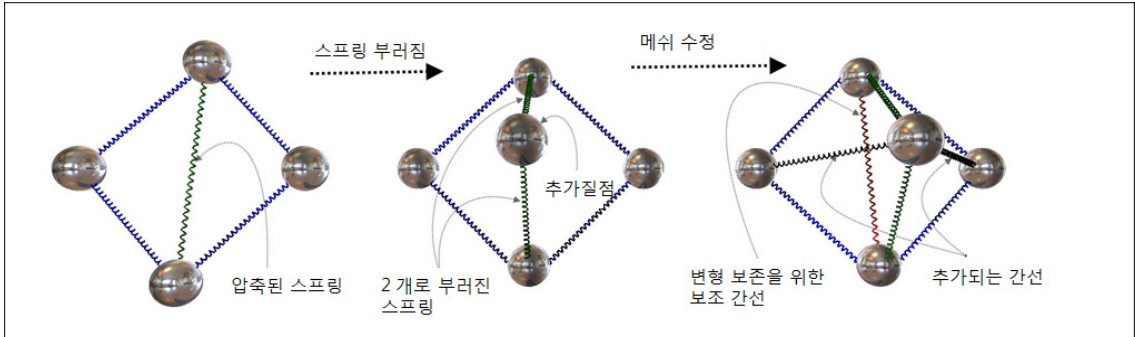
용하여 애니메이션을 수행한다. 이산 쉘 모델은 효율적으로 얇고 유연한 객체의 행동을 표현할 수 있다. 그러나 이 기법은 적응적인 메쉬 재구조화가 고려되지 않아 구김이 주어진 메쉬의 간선을 따라서만 생성된다는 한계를 가진다. 비록 이산 쉘 모델이 오리가미(折り紙) 시뮬레이션을 위해 개선되기는 했으나[8], 이 기법 역시 외부 힘에 의한 반응으로 생성되는 임의적 구김 현상을 표현하지는 않는다.

본 논문은 적응적이고 확실적인 메쉬 재구성 기법을 제안하여 부드럽고 얇은 가상 종이 객체를 실시간 상호작용적 응용에서 구현할 수 있는 방법을 소개한다. 많은 연구자들이 가상 오리가미(折り紙) 시뮬레이션 기법을 제안하였다[9,10,11]. 그러나 종이의 물리적 움직임은 이들 연구에서 중요한 관심이 아니었다. 이들 연구에서는 원하는 방향으로 종이를 접고, 이에 따라 메쉬를 재구성하는 것이 핵심적인 관심이었다. 따라서 재구성되는 메쉬의 기하적 특성만 다루고 물리적인 특성은 고려하지 않는 한계를 가진다.

늘어나지 않는 얇은 객체는 경직도(stiffness)가 높은 질량 스프링 모델로 표현할 수 있다. 이런 높은 경직도의 질량 스프링 모델은 암시적 적분법을 통해 안정적으로 시뮬레이션 할 수 있다[2]. 잘 알려진 바와 같이 암시적 적분법에서 질량 스프링 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \mathbf{v}^{t+h} = h \left(\mathbf{M} - h^2 \frac{\partial \mathbf{f}_\delta}{\partial \mathbf{x}} - h \frac{\partial \mathbf{f}_\delta}{\partial \mathbf{v}} \right)^{-1} \left(\mathbf{f}_\sigma + \mathbf{f}_\delta + h^2 \frac{\partial \mathbf{f}_\sigma}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{v} \right) \quad [\text{식 1}]$$

이때 \mathbf{x} , \mathbf{v} , \mathbf{f}_σ 와 \mathbf{f}_δ 는 질점에 적용되는 위치, 속도, 스프링 힘, 댐핑 힘으로 구성되는 벡터이며, \mathbf{M} 은 질량 행렬이다. 이 적분을 효율적으로 수행하기 위해 [12]에서 제안된 근사 암시적 적분법을 적용하였다. 하지만 생성된 결과는 종이 객체의 특성을 보이지 않았는데, 이는 가장 종이 표면에 적절한 구김이 나타나지 않기 때문이다. 이를 해결하기 위해 [13]에서 적응적 메쉬를 활용하였으나, 질량 및



[그림 2] 부러지는 스프링 모델 개념의 가시화

운동량 보존 등이 적절히 다루지지 않았다.

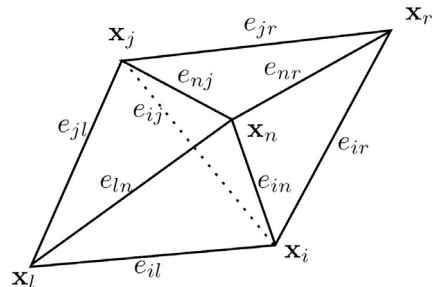
본 논문에서는 [그림 1]에 나타난 것과 같은 가상 종이 객체를 효율적으로 시뮬레이션 할 수 있는 기법을 제안한다. 제안된 기법은 임의의 삼각 메쉬 구조에 적용될 수 있으며 실시간 환경에서 효율적으로 주름과 구김을 생성한다.

2. 적응적 메쉬 구조

[그림 2]는 부러지는 스프링 모델의 개념을 시각적으로 보이고 있다. 압축된 스프링은 두 개의 스프링으로 부러져서 원래의 길이를 유지하려고 한다. 두 개의 추가적인 에지가 삽입되어 질량-스프링 구조가 삼각 메쉬를 유지하도록 하며, 이러한 손상을 유지하기 위한 보조적인 간선이 하나 삽입된다.

[그림 3]은 부러진 스프링 간선의 주변에 있는 질점과 스프링들을 보이고 있다. 질점 \mathbf{x}_i 와 \mathbf{x}_j 를 연결하는 특정한 간선 e_{ij} 가 부러져 새로운 질점 \mathbf{x}_n 이 삽입되고 간선은 e_{in} 와 e_{nj} 로 나뉜다. 원래의 간선 e_{ij} 는 보조 간선으로 바뀌게 되며, \mathbf{x}_i 와 \mathbf{x}_r 은 간선 e_{ij} 의 왼쪽과 오른쪽 이웃 질점이 된다. 간선이 부러지면 새로운 질점이 추가되므로 전체적인 질량을 보존하는 것이 중요하다. 따라서 주변 질점들은 자신의 질량 일부를 새로운 질량에게 나눠 주어야 한다. 새로운 질량 m_n 이 추가되면 인

접한 질점들의 질량 m_0, m_1, m_2, m_3 를 새로운 값 m'_0, m'_1, m'_2, m'_3 로 수정하여 전체 질량을 일정한 값으로 유지해야 한다. 추가된 질점과 다른 질점 k 사이의 거리를 변형되지 않은 메쉬 구조에서 측정된 값을 d_k 라고 하면, 추가되는 질점의 질량 m_n 은 m_k 와 d_k 의 함수로 표현할 수 있다.



[그림 3] 부러진 간선의 인접 질점과 간선

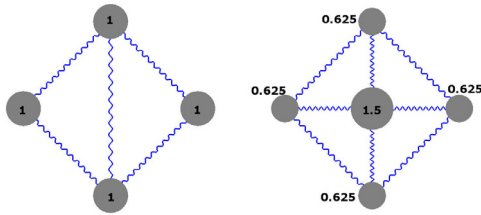
어떤 질점의 인접한 질점들을 나타내는 인덱스 값의 집합을 N 이라고 하고, 질량을 재분배하는 기법을 마련하기 위해 다음과 같은 극단적인 두 경우를 살펴보자.

- (a) 새로운 입자가 인접 질점 가운데 하나인 i 질점과 정확히 일치하는 위치에 삽입되는 경우 ($d_i = 0$)
- (b) 이웃 질점 i 이 새로운 질점과 극단적으로 멀리 떨어져 있는 경우. 즉, 다른 모든 이웃 질점과 새 질점이 거의 같은 곳에 있는 경

우 ($d_i \approx \sum_{k \in N} d_k$).

경우 (a)에서는 새로운 질점의 질량이 m_i 의 반이 되어야 하므로 $m_n = m'_i = (1/2)m_i$ 이 되며, 경우 (b)에서는 질점 i 의 질량이 변하지 않아야 함을 고려하면 다음과 같이 질량을 수정할 수 있다.

$$m'_i = \frac{1}{2} \left(\frac{d_i}{\sum_{k \in N} d_k} + 1 \right) m_i \quad [\text{식 2}]$$



[그림 4] 간단한 질량 수정 기법의 결과

새로 추가된 질점의 질량을 결정하기 위해서는 $m_n = \sum_{k \in N} (m_k - m'_k)$ 와 같이 인접한 질점이 가졌던 원래의 질량 m_i 와 수정된 질량 m'_i 의 차이를 누적하여 구한다.

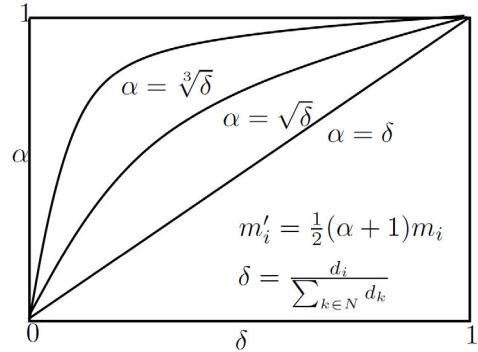
[식 2]에 나타난 질량 수정 방법이 앞서 살펴본 두 개의 극단적 경우를 만족하지는 않지만, 이 방법은 과도한 질량을 새로 추가된 질점에 부여한다. [그림 4]는 새로 추가되는 질점이 가지게 되는 질량이 얼마나 큰 값이 되는지를 보이고 있다. 그림에서 각 질점은 원으로 표현되어 있고, 그 넓이가 질량과 비례하고 있다. 새로운 입자가 이웃 질점에 비해 큰 값을 갖게 됨을 알 수 있다.

[그림 5]는 질량 수정 기법을 어떻게 제어할 수 있는지를 보이고 있다. 수정된 질량 m'_i 이 가질 수 있는 값의 범위는 $[\frac{1}{2}m_i, m_i]$ 이다. 즉, m'_i 는 $m'_i = 0.5(\alpha + 1)m_i$ ($0 \leq \alpha \leq 1$)로 표현할 수 있다. 이때, α 가 [그림 4]에서 δ 로 표현되어 있는 $d_i / \sum_{k \in N} d_k$ 에 의존한다고 가정하자. [식 2]는 α 에 대해 선형 모델을 사용했기 때문에, 새로운 질

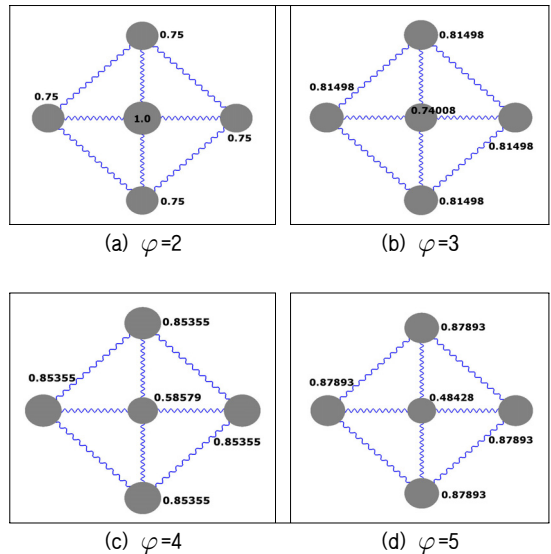
점에 지나치게 많은 질량을 부여하는 것이다. 따라서 두 개의 극단적 경우인 (a) $d_i = 0 \mapsto m'_i = m_i/2$ 와 (b) $d_i \approx \sum d_k \mapsto m'_i \approx m_i$ 를 만족하면서 $\alpha = \sqrt[\varphi]{\delta}$ 와 같은 비선형 모델을 적용하면 새로운 질점이 갖는 질량을 감소시킬 수 있다. 따라서 질량 수정은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$m'_i = \frac{1}{2} \left(\sqrt[\varphi]{\frac{d_i}{\sum_{k \in N} d_k} + 1} + 1 \right) m_i \quad [\text{식 3}]$$

$$m_n = \sum_{k \in N} (m_k - m'_k)$$



[그림 5] 질량 수정 기법의 제어



[그림 6] 파라미터 φ 에 따른 질량 수정 결과

[그림 6]은 φ 파라미터를 조절하여 질량을 재분배한 결과이다. 이 결과는 [그림 4]와 동일한 가정에서 φ 만을 변경하여 얻은 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 새로 추가된 질점의 질량은 φ 가 증가함에 따라 감소하게 된다.

질량과 함께 운동량도 보존되어야 한다. 각 질점의 운동량은 질량이 줄어들면 같이 줄어들게 된다. 따라서 새롭게 추가된 질점은 전체 운동량을 보존하기 위해 보충적인 운동량을 가져야 한다. 사라진 운동량은 $\sum_{k \in N} (m_k - m'_k) \mathbf{v}_k$ 으로 계산되며, 전체적인 운동량은 새로운 질점의 속도를 다음과 같이 수정하여 보존할 수 있다.

$$\mathbf{v}_n = \frac{\sum_{k \in N} (m_k - m'_k) \mathbf{v}_k}{m_n} \quad [\text{식 4}]$$

적응적 메쉬 구조가 표면에 사실적인 구김을 생성하기는 하지만, 불안정성 문제를 일으킬 수도 있다. 구김이 늘어남에 따라 가상 종이 객체에 추가된 새로운 질점이 갖게 되는 질량의 크기도 작아지게 된다. 모든 스프링 간선이 동일한 경직도를 갖는다고 하면, 작은 질량을 가진 입자가 지나치게 가속될 수 있기 때문이다. 따라서 간선 e_{ij} 의 경직도 $\kappa_{e_{ij}}$ 는 메쉬 전체의 경직도인 k 와 연결된 질점의 질량에 따라 변화하도록 다음과 같이 구하였다.

$$\kappa_{e_{ij}} = \kappa (m_i + m_j) \quad [\text{식 5}]$$

3. 확률적 스프링 분절 모델

본 논문의 기법에서 스프링이 부러지는 일은 확률적으로 이루어진다. 스프링 부러짐의 확률은 스프링의 휴지 길이 l_{ij}^0 와 현재 길이 l_{ij}^t 로 구할 수 있는 스프링 압축률 $(1 - l_{ij}^t/l_{ij}^0)$ 에 비례한다. 스프링 방향과 수직방향으로의 곡률을 고려하기 위해

두 개의 이웃 질점 \mathbf{x}_r 과 \mathbf{x}_l 이 고려된다. 두 질점에서의 법선 벡터를 각각 \mathbf{n}_r 과 \mathbf{n}_l 이라고 하다. 스프링 방향으로의 곡률은 스프링이 부러질 확률을 높이고, 수직 방향으로의 곡률은 그 확률을 감소시킨다. 따라서 분절 확률을 $(1 - n_{ij})/2$ 와 $(1 + n_{rl})/2$ 와에 비례하도록 모델링할 수 있다. 이때 n_{ij} 와 n_{rl} 은 $\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j$ 와 $\mathbf{n}_r \cdot \mathbf{n}_l$ 을 의미하는 스칼라 값이다. 평평한 물체도 접힐 수 있도록 제어 파라미터 ϕ 를 도입하여 법선 벡터들의 내적 결과의 크기를 조정할 수 있다. 이러한 관찰을 바탕으로 스프링 분절 확률은 다음과 같이 계산되었다

$$P_{ij} = \frac{1}{4} (l_{ij}^0 - l_{ij}^t) (1 - \phi n_{ij}) (1 + \phi n_{rl}) \quad [\text{식 6}]$$

새로운 질점의 위치는 스프링의 중심점에서 표면 법선 벡터 방향으로 조정된다. 조정의 크기 ϑ 는 제어 파라미터 ψ 로 다음과 같이 결정된다.

$$\vartheta = \frac{\psi}{2} \sqrt{(l_{ij}^0)^2 - (l_{ij}^t)^2} \quad [\text{식 7}]$$

4. 표면 힘에 대한 반응

질량 스프링 모델은 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있지만 표면의 힘에 의해 발생하는 힘을 고려하지 못한다는 단점이 있다. 하지만 곡면의 힘에 의해 발생하는 힘은 얇은 쉘 객체의 움직임에 매우 중요한 역할을 수행하며, 이러한 표면 힘은 표면의 구김을 없애는 역할도 수행한다.

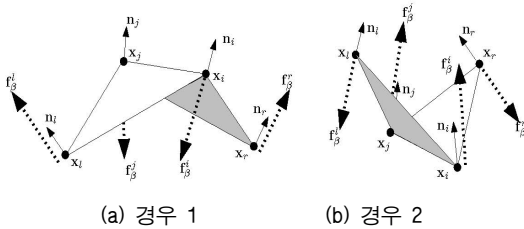
간선의 휨 에너지는 Grinspun 등이 제안한 방법을 통해 변형된 메쉬와 변형 이전의 메쉬에서 특정한 간선이 가지는 이면각(dihedral angle)의 차이를 이용하여 쉽게 계산할 수 있다[7]. 보다 효율적으로 휨 에너지를 근사하기 위하여 본 논문에서는 단순히 좌우 이웃 질점 \mathbf{x}_r 과 \mathbf{x}_l 에서의 법선

벡터를 고려하여 다음과 같이 부러진 에지에 작용하는 휨 에너지를 계산하였다.

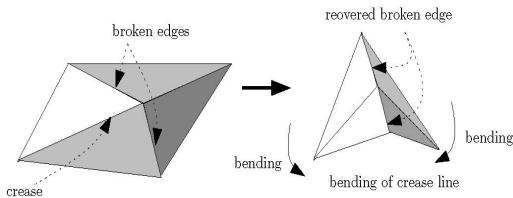
$$B^{e_{ij}} = \frac{(1 - n_{rl})|e_{ij}|}{2} \quad [\text{식 8}]$$

표면이 휘면, 휨 저항력이 발생한다. 휨 저항력을 구현하기 위해 [식 8]을 이용하여 모든 간선의 휨 에너지를 계산하였으며, 이웃 질점에 휨 저항력을 적용하였다. [그림 7]은 휨 저항력이 작용하는 방향을 보이고 있다. \mathbf{f}_β^k 를 질점 k 에 작용하는 휨 저항력이라고 하자. 휨 저항력의 방향은 그림에 나타난 것과 같은 두 가지 경우를 고려하여 판단할 수 있다. [그림 7]의 (a)는 두 이웃 질점의 법선 벡터가 간선 축에서 멀어지는 경우이며 (b)는 가까워지는 경우로 $|(\mathbf{x}_r + \mathbf{n}_r) - (\mathbf{x}_l + \mathbf{n}_l)| - |\mathbf{x}_r - \mathbf{x}_l|$ 의 부호를 살펴보면 판정할 수 있다. 이 부호를 s 라고 하면, 휨 저항력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_\beta^i &= -s C_\beta B^{e_{ij}} \mathbf{n}_i & \mathbf{f}_\beta^j &= -s C_\beta B^{e_{ij}} \mathbf{n}_j \\ \mathbf{f}_\beta^r &= s C_\beta B^{e_{ij}} \mathbf{n}_r & \mathbf{f}_\beta^l &= s C_\beta B^{e_{ij}} \mathbf{n}_l \end{aligned} \quad [\text{식 9}]$$



[그림 7] 휨 저항 힘의 방향



[그림 8] 휨에 의해 부러진 간선이 복원되는 과정: 부러진 간선이 표면에 주름을 생성(왼쪽), 주름 선이 휘어짐에 따라 부러진 간선이 복원됨

이때 C_β 는 표면의 휨 저항 특성을 결정하는 휨 저항력 계수이다.

부러진 간선은 특별한 경우 다시 원래의 간선으로 복원된다. 어떤 간선 e_{ij} 가 두 개의 간선 e_{in} 과 e_{nj} 로 부러진 경우, 원래의 스프링 간선 e_{ij} 는 더 이상 부러지지 않는 보조 간선이 되며, 새롭게 추가된 질점 n 과 새로운 간선인 e_{in} 과 e_{nj} , 그리고 e_{rn} , e_{nl} 에 대한 포인터를 가진다. 부러진 간선 e_{ij} 을 복원하려면 이 간선을 부러질 수 있도록 변경하고 추가되었던 질점과 간선을 없애기만 하면 된다. 더욱 복잡한 경우는 e_{ij} 가 부러져 생긴 간선이 또 다시 부러지는 경우이다. 이 경우 e_{ij} 는 바로 복원될 수 없다. 본 논문에서는 한 번 부러진 간선만 복원의 대상이 된다. 간선 복원 작업은 다음 조건이 만족될 때에만 이루어진다.

$$\begin{aligned} &\neg e_{ij} \cdot \text{breakable} \wedge e_{in} \cdot \text{breakable} \wedge e_{nj} \cdot \text{breakable} \quad [\text{식 10}] \\ &\wedge (\neg e_{rn} \cdot \text{valid} \vee e_{rn} \cdot \text{breakable}) \\ &\wedge (\neg e_{nl} \cdot \text{valid} \vee e_{nl} \cdot \text{breakable}) \end{aligned}$$

부러진 간선을 원래의 간선으로 복원할 수 있지만, 어떤 간선을 선택하여 복원할 것인지는 아직 결정되지 않았다. 본 논문의 기법은 휨 에너지를 이용하여 이를 결정하였다. [그림 8]은 휨 에너지가 이러한 결정에 사용될 수 있는 이유를 보이고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 부러진 간선은 표면에 구김을 남기는데, 구김선이 휘게 되면 구김선이 사라지고 부러진 간선이 다시 일직선으로 복원되는 경향을 가진다. 부러진 간선 e_{ij} 의 휨 에너지를 계산하여 $B^{e_{ij}}/|e_{ij}|$ 가 특정 임계치 ϵ 이상이면 이 간선을 복원한다, 따라서 파라미터 ϵ 를 통해 구김이 복원되는 경향을 제어할 수 있다. 간선 복원을 통해 질점이 제거되는 전체적인 질량과 운동량이 보존되도록 하는 작업이 다시 수행되어야 한다. [식 2]에 나타난 질량 분배 방법을 고려하여 질량 m_n 을 이웃 질점에 분배하는 방법은 다음과 같다.

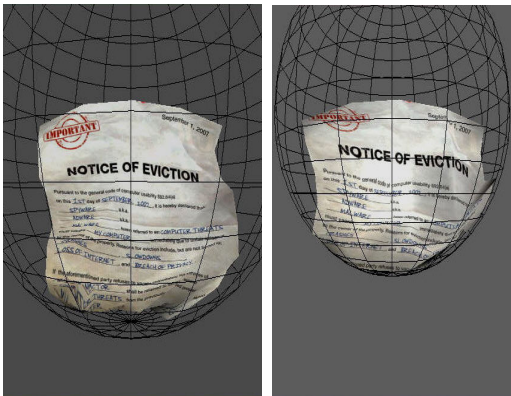
$$m'_i = \frac{2m_i}{\sqrt{\frac{d_i}{\sum_{k \in N} d_k} + 1}} \quad [\text{식 11}]$$

운동량을 보존하기 위해 이웃 질점의 속도 역시 변경되어야 한다. 사라진 운동량이 $m_n \mathbf{v}_n$ 이므로 이 운동량을 각 질점의 질량을 기준으로 분배하면 각 질점이 갖게 되는 새로운 속도는 다음과 같다.

$$\mathbf{v}'_i = \mathbf{v}_i + \frac{m_n \mathbf{v}_n}{\sum_{k \in N} m_k} \quad [\text{식 12}]$$

5. 실험 결과

[그림 9]는 종이와 같은 가상 객체를 상호작용적 환경에서 구겨지게 한 결과이다. 종이 객체는 조작을 위한 구체(球體) 내부에 있으며, 구체의 크기를 변경하여 종이를 상호작용하도록 하였다. 본 논문의 모든 실험 결과는 이러한 방식으로 생성되었다.

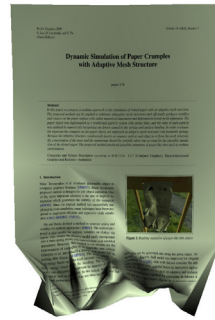


[그림 9] 종이와 같은 객체의 상호작용적 변형

[그림 10]은 파라미터 ϕ 의 역할을 보이고 있다. ψ 를 0.25로 고정한 상태에서 ϕ 값을 변경하면 [식 6]에 의해 간선이 부러지는 확률을 제어할 수 있다. 이 값이 작아지면 스프링 분절 확률이 곡률에 더욱 민감해져서 더욱 잘 부러지게 된다.

파라미터 ψ 의 효과는 [그림 11]에 나타나 있다. 이 값이 작아지면 부러진 간선이 계속적으로 부러지려는 경향이 강해진다.

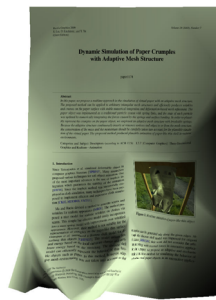
부러진 간선을 복원하기 위한 휨 에너지 기반 모델은 [그림 12]에 보인 것과 같이 잘 동작하였다. 그림 12의 (a)는 작은 ϵ 값을 가진 경우로 가상 종이 객체가 쉽게 부러진 간선을 복원할 수 있다. 반면 12 (b)는 큰 ϵ 값을 가진 예로서 한 번 부러진 간선은 잘 복원되지 않는 특성을 갖는 예이다.



(a) $\phi = 0.0$



(b) $\phi = 0.5$

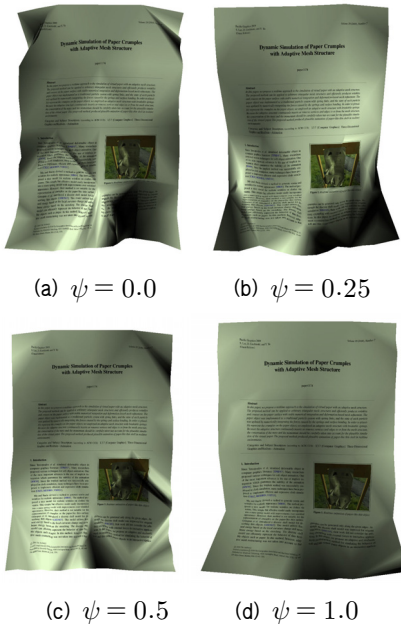


(c) $\phi = 0.75$

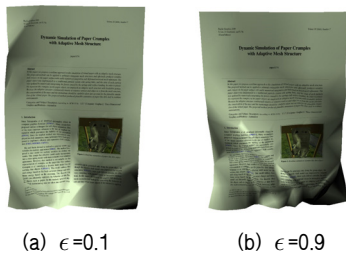


(d) $\phi = 1.0$

[그림 10] 파라미터 ϕ 를 이용한 제어: 파라미터 ψ 가 0.25로 고정된 상태에서 ϕ 를 (a) 0.0, (b) 0.5, (c) 0.75, (d) 1.0으로 설정했을 때의 결과



[그림 11] 파라미터 ψ 를 이용한 제어: 파라미터 ϕ 가 0.25로 고정된 상태에서 ψ 를 (a) 0.0, (b) 0.5, (c) 0.75, (d) 1.0으로 설정했을 때의 결과



[그림 12] 제어 파라미터 ϵ 의 효과



[그림 13] 제안된 기법의 사실성: (a) 제안된 기법을 통해 생성된 가상 종이 객체 (b) 실제 종이의 사진

[그림 13]는 제안된 기법을 통해 생성한 가상 종이 객체와 실제 종이 객체를 비교한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 제안된 기법은 사실적인 가상 종이 객체의 외형을 생성할 수 있다.

6. 결 론

질량 스프링 모델이 다양한 수치 적분 방법과 함께 결합되어 쉽게 구현될 수 있지만 경직도가 매우 높고 얇은 종이 객체와 같은 물체를 표현하는 데에는 적합하지 않다. 이러한 어려움은 수치적 불안정성 문제뿐만 아니라 사실적인 주름과 구김을 생성하기 힘들기 때문이다. 본 논문에서는 직관적이고 효율적인 방법을 통해 상호작용적 환경에서 가상 종이 객체를 시뮬레이션 할 수 있는 기법을 제안하고 있으며, 제안된 기법은 부러지는 스프링 간선과, 확률적인 스프링 분절 모델 및 복원 모델을 포함하고 있다. 더욱 사실적인 종이 움직임 표현하기 위해 표면의 휨에 반응하는 저항력도 고려되었으며, 휨 에너지를 기반으로 하는 간선 복원 모델도 제안되었다.

본 논문은 주름을 생성하기 위해 기하적으로 메쉬의 구조만을 변경하는 것이 아니라, 물리적으로 정확한 동작을 생성하기 위해 전체적인 질량과 운동량을 보존할 수 있도록 개별 질점의 질량과 속도를 변경하는 방법도 제안하였다.

실험 결과를 통해 확인할 수 있는 바와 같이 제안된 기법은 사실적인 가상 종이 객체 애니메이션을 실시간 환경에서 생성할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] TERZOPOULOS D., PLATT J., BARR A., FLEISCHER K.: "Elastically deformable models." Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 87) 21, 4 (July 1987), 205 - 214.
- [2] BARAFF D., WITKIN A.: "Large steps in

- cloth simulation.” Proceedings of SIGGRAPH 98 (July 1998), 43 - 54.
- [3] CHOI K.-J., KO H.-S.: “Stable but responsive cloth.” ACM Transactions on Graphics: Proceedings of SIGGRAPH 2002 (2002), 604 - 611.
- [4] MEYER M., DEBUNNE G., DESBRUN M., BAR A. H.: “Interactive animation of cloth-like objects in virtual reality.” The Journal of Visualization and Computer Animation 12 (2001), 1 - 12.
- [5] VOLINO P., MAGNENAT-THALMANN N.: “Comparing efficiency of integration methods for cloth simulation.” Proc. of Computer Graphics International 2001 (June 2001), 265 - 272.
- [6] MA L., BACIU J. H. G.: “Generating seams and wrinkles for virtual clothing.” Proceedings of ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications (2006), 14 - 17.
- [7] GRINSPUN E., HIRANI A., DESBRUN M., SCHRÖDER P.: “Discrete Shells.” In ACM SIGGRAPH/ Eurographics Symposium on Computer Animation (Aug 2003), pp. 62 - 67.
- [8] BURGOON R., WOOD Z. J., GRINSPUN E.: “Discrete shells origami.” In Computers and Their Applications (2006), pp. 180 - 187.
- [9] DEMAINE E. D., DEMAINE M. L., MITCHELL J. S.: “Folding flat silhouettes and wrapping polyhedral package: New results in computational origami.” In Symposium on Computational Geometry (1999), ACM, pp. 105 - 114.
- [10] HULL T.: “On the mathematics of flat origamis.” Congressus Numerantium 100 (1994), 215 - 224.
- [11] IDA T., TAKAHASHI H., MARIN M., GHOURABI F., KASEM A.: “Computational construction of a maximum equilateral triangle inscribed in an origami.” Lecture Notes in Computer Science 4151 (2006), 361 - 372.
- [12] KANG Y.-M., CHO H.-G.: “Real-time animation of complex virtual cloth with physical plausibility and numerical stability.” Presence - Teleoperators and Virtual Environments 13, 6 (2004), 668 - 680.
- [13] KANG Y.-M., CHO H.-G.: “A simple and effective model for interactive paper folding.” In Poster Proceedings of Pacific Graphics 2008 (2008).



강영민(Young-Min Kang)

1996년 부산대학교 전산학과 이학사
1999년 부산대학교 전산학과 이학석사
2003년 부산대학교 전산학과 이학박사
2003년~2005년 한국전자통신연구원
2005년~현재 동명정보대학교 게임공학과

관심분야 : 게임 프로그래밍, 실시간 애니메이션

— 실시간 종이 구김 시뮬레이션을 위한 적응적 메쉬 구조 —