

효율적인 대화형 천 시뮬레이션 기법

정 대 현[†] · 김 구 진^{**} · 백 낙 훈^{***} · 유 관 우^{****}

요 약

본 논문에서는 질점-스프링 모델(mass-spring model)에 기반한 대화형 천 시뮬레이션(interactive cloth simulation) 기법을 제시하며, 특히 소수의 질점들(mass-points)에 상대적으로 강한 힘이 가해졌을 경우 사실적으로 천을 시뮬레이션하는 방법에 초점을 맞추었다. 본 논문에서 제시하는 방법은 소수의 점들에 대해 가해진 힘을 모든 질점들에 분산시킴으로써 의사 실시간(pseudo real-time) 내에 시뮬레이션을 수행하며, 이는 기존의 방법들에 비해 수행속도 면에서 매우 효율적이다. 또한, Provot[9]의 역동역학 방법(inverse dynamic method)을 사용하여 초탄성(super-elasticity) 현상을 해결한 뒤, 인접한 질점 간의 각도를 조정함으로써 초탄성 효과에 의해 발생하는 지그재그(zigzag) 현상을 제거하여 사실적으로 천을 시뮬레이션한다.

키워드: 컴퓨터그래픽스, 물리 기반 모델링, 천 시뮬레이션

An Efficient Method for Interactive Cloth Simulation

Dae Hyun Jeong[†] · Ku Jin Kim^{**} · Nakhoon Baek^{***} · Kwan Woo Ryu^{****}

ABSTRACT

We present an interactive cloth simulation method based on the mass-spring model, which is the most widely used one in the field of cloth animation. We focus especially on the case where relatively strong forces are applied on relatively small number of mass-points. Through distributing the forces on some specific points to the overall mass-points, our method simulates the cloth in pseudo-real time. Given a deformed cloth, we start from resolving the super-elasticity effect using Provot's dynamic inverse method [9]. In the next stage, we adjust the angles between neighboring mass-points, to finally remove the unexpected zigzags due to the previous super-elasticity resolving stage.

Key Words : Computer Graphics, Physically Based Modeling, Cloth Simulation

1. 서 론

질점-스프링 모델(mass-spring model)은 천 시뮬레이션(cloth simulation)에 있어서 천을 표현하기 위한 직관적인 표현방식으로, 현재 널리 사용되고 있다. 이 방법은 천을 스프링으로 연결된 질점들(mass-points)의 집합으로 표현한다. 외부에서 힘이 가해지면, 스프링의 탄성과 길이의 제약 하에서 질점들의 위치를 이동시킴으로써 천의 변형을 표현한다. 질점-스프링 모델은 구현이 용이하면서도 심미적으로 만족스러운 결과를 제공한다[1-11].

처음 제안된 이후부터 현재까지 질점-스프링 모델의 시뮬레이션 속도를 높이려는 연구는 계속적으로 수행되어 왔다.

Baraff 등[1]은 기존의 명시적 적분법(explicit integration method)에 비해 넓은 시간 간격으로 계산을 하면서도 시스템의 안정성을 보장할 수 있는 암시적 적분법(implicit integration method)을 도입하였다. 암시적 적분법은 각 시간 단계에 스프링에 의해 발생하는 내부힘을 추정하여 미리 계산함으로써, 명시적 적분법보다 더 정확하게 내부힘을 구할 수 있다. 암시적 적분법을 사용하면, 질점이 n 개인 천에서 현재 시각 t 에 대해 모든 질점들의 위치가 결정된 후, 다음 시각 $t+\Delta t$ 에 대해 한 질점의 속도를 구하기 위하여 시각 $t+\Delta t$ 에 대한 다른 질점들의 속도가 필요하다. 이때, 다음 시각 $t+\Delta t$ 에서 모든 질점들의 속도를 미지수로 하는 선형방정식의 해를 구해야 하며, 이는 시간복잡도 $O(n^3)$ 의 수행시간을 필요로 한다. Desbrun 등[5]은 암시적 적분법에서의 계산량을 줄이기 위하여 선형방정식에 들어가는 헤시안 행렬을 근사화하였으며, 그들이 제안한 방법은 기존의 암시적 적분법보다 빠르지만 여전히 선형방정식의 해를 구하기 위해 시간복잡도 $O(n^3)$ 의 수행시간이 필요하다.

* 이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (R04-2004-000-10099-0, R05-2004-000-12641-0)

† 중 회 원 : 경북대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사과정

** 정 회 원 : 경북대학교 컴퓨터공학과 조교수

*** 정 회 원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 조교수(교신저자)

**** 정 회 원 : 경북대학교 컴퓨터공학과 교수

논문접수 : 2005년 4월 9일, 심사완료 : 2005년 6월 3일

Kang 등[6, 7]은 암시적 적분법을 개선하여 천 시물레이션을 $O(n)$ 의 시간복잡도로 수행될 수 있게 하였다. 그들은 현재 시각 t 에서 계산된 질점들의 속도와 질량, 스프링상수만을 이용하여 다음 시각 $t+\Delta t$ 에서의 질점들의 위치 변화를 구할 수 있도록 기존의 수식들을 근사화하였다. 현재 시각 t 에 대해 이미 계산된 정보만을 가지고 다음 시각 $t+\Delta t$ 에서의 질점 위치를 계산할 수 있으므로, 복잡한 선형방정식을 사용하지 않고 $O(n)$ 의 시간복잡도로 계산이 수행될 수 있다.

천 전체에 힘이 가해지는 위의 경우와 달리 소수의 질점에 강한 힘이 가해지는 경우에는 천의 변형(deformation) 방법이 달라져야 한다. 이러한 경우를 시물레이션하기 위해 Provot[9]은 역동역학(inverse dynamics) 방법을 제시하였다. 그는 외부에서 가해지는 힘에 의해 영향을 받는 질점들의 위치 변화를 계산하는 대신, 소수의 질점들의 위치를 미리 고정시킨 후 이러한 위치를 생성할 수 있도록 외부에서 주어지는 힘을 역으로 계산하였다. 이때 초탄성(super-elasticity) 현상이 부작용으로 발생할 수 있는데, 초탄성 현상이란 전체 스프링 중의 일부가 임계값을 넘어서 과도하게 늘어나는 것을 의미하며, 결과적으로 천의 모습을 비사실적인 기형으로 만들게 된다.

Provot은 과도하게 늘어난 스프링에 연결된 양 끝 질점의 위치를 조정함으로써 초탄성현상을 해결하였다. 하나의 질점의 위치를 조정하면 그에 연결된 모든 스프링의 길이에 영향을 미치기 때문에, 한 질점의 위치가 조정되면 이것과 한 개 이상의 스프링으로 연결된 다른 모든 질점에 대해서도 위치가 조정되어야 한다. 즉, 한 질점을 기준으로 다른 모든 질점에 대해 반복적으로 위치를 조정해주어야 하며, 이에 따라 Provot의 해결방법은 반복적인 방법(iterative method)이라고 할 수 있다. 초탄성 현상을 해결하기 위하여 기존에는 주로 스프링의 저항 상수를 증가시키는 방법을 사용했지만, Provot은 반복적인 방법이 더욱 효과적이라는 것을 보였다. 그의 방법은 많은 경우에 있어서 좋은 결과를 보이지만, 시물레이션 과정에서 많은 횟수의 반복을 요하며, 수치적으로 불안정한 상태가 발생할 수도 있다는 단점이 있다.

본 논문에서는 소수의 질점들에 상대적으로 강한 외부의 힘이 가해진 경우에 초점을 맞추어 대화형으로 천을 시물레이션하는 효율적인 방법을 제시한다. 이러한 경우는 천의 일부가 어떤 강체에 고정되어 있고, 강체의 움직임으로 인해 외부 힘이 천에 가해질 때 발생한다. 이 기법의 응용으로는 깃발을 흔드는 시물레이션을 고려할 수 있다. 깃대에 깃발의 일부분이 한 점 또는 두 점으로 고정되어 있을 때, 깃대를 빠른 속도로 흔드는 경우에 대한 시물레이션을 응용으로 고려해 볼 수 있다.

본 논문에서 제시하는 방법은 Provot[9]에 의해 제안된 결과를 개선하였다. 주어진 외부의 힘에 의해 직접 영향을 받는 질점들의 집합을 S 라고 하자. 상대적으로 외부의 힘이 약하다면, 질점들의 위치 변화는 적으며, 천의 변형은 집합 S 주변의 한정된 영역에서만 발생한다. 반대로 주어진 힘이

충분히 크다면, S 에 속한 특정 영역의 질점들에 가해지는 힘은 천 전체의 변형을 가져올 것이다. 정해진 임계값보다 큰 외부의 힘이 집합 S 의 질점들에 가해질 때, 우리는 주어진 힘을 천의 모든 질점들에 분산을 시켜 적용한다. 이러한 방법은 집합 S 의 질점들에 가해지는 힘의 크기를 줄이며, 결과적으로 과도하게 늘어나는 스프링의 개수를 감소시킨다. 힘이 분산됨으로써 천의 변형을 구하기 위한 전체 계산 시간을 감소시킬 수 있다. 분산된 힘에 의해 변경되는 질점들의 위치는 Kang 등[6, 7]이 제시한 암시적 적분법을 이용하여 계산하였다. 또한, 우리의 방법은 이웃한 질점들의 연속성을 고려하여 질점 위치를 보정함으로써 변형된 천의 지그재그(zigzag)를 방지한다. 본 논문에서 제시하는 방법은 안정적이며, 심미적으로 만족스러운 결과를 보인다. 또한, 의사 실시간 내에 수행되므로 대화형 시물레이션이 가능하다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서 암시적 적분 방법을 사용하는 질점-스프링 모델 및 초탄성 효과를 해결하기 위한 기존의 연구결과를 기술한다. 3절에서는 질점-스프링 모델을 사용한 실시간 천 시물레이션에 대한 방법을 제시한다. 4절에서는 시스템 구현 및 결과를 제시하고, 5절에서 결론을 맺는다.

2. 천 시물레이션의 선행 연구

2.1 질점-스프링 모델

질점-스프링 모델은 질점들과 스프링으로 천(cloth object)을 표현한다. 이웃하는 질점들은 스프링에 의해 연결된다. 각각의 질점들의 위치를 변화시킴으로써 천의 움직임과 변형을 시물레이션할 수 있다. 천에 가해지는 힘은 외부에서 가해진 힘과 질점들을 연결하는 스프링의 힘으로 분류된다. 시물레이션을 할 때, 질점들은 먼저 외부의 힘에 의해 움직이고, 그에 따라 생기는 질점들의 위치의 변화가 스프링의 힘들을 발생시킨다. 스프링 힘들은 다시 질점들의 위치를 바꾸어서, 천이 사실적인 형태로 변형된다.

천을 표현하기 위해, 본 논문에서는 Kang 등[6, 7]이 제시한 선형 시간 질점-스프링 모델을 사용한다. 이 모델에서 각 질점의 속도와 위치는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i^{t+h} &= \mathbf{v}_i^t + \mathbf{F}_i^{t+h} \frac{h}{m_i} \\ \mathbf{x}_i^{t+h} &= \mathbf{x}_i^t + \mathbf{v}_i^{t+h} h \end{aligned} \quad (1)$$

시각 t 의 질점 i 에 대해, \mathbf{x}_i^t 와 m_i 는 각각 i 의 위치와 무게를 나타낸다. 애니메이션 프레임 간의 시간간격을 h 로 나타낸다고 할 때, 암시적 적분법은 다음 시각 $t+h$ 의 힘을 미리 계산한 뒤 이를 이용하여 질점-스프링의 다음 상태를 갱신할 수 있다. 암시적 적분법은 안정적인 계산이 가능하고 명시적 적분법에 비해 더 큰 시간 간격을 사용할 수 있으므로 효율적이다. 시각 $t+h$ 의 힘을 해석적으로 구하는 것은 어

려우므로, 다음과 같이 근사화를 통하여 계산한다.

$$\mathbf{F}^{t+h} = \mathbf{F}^t + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} \Delta \mathbf{x}^{t+h} \quad (2)$$

여기에서 \mathbf{F}^t 는 시각이 t 일 때 질점 i 에 가해지는 내부 힘 \mathbf{F}_i^t 으로 구성된 집합으로서 $\mathbf{F}^t = [\mathbf{F}_1^t, \dots, \mathbf{F}_n^t]$ 이며 $\Delta \mathbf{x}^t$ 는 $[\Delta \mathbf{x}_1^t, \dots, \Delta \mathbf{x}_n^t]^T$ 이다. $\Delta \mathbf{x}^{t+h} = \mathbf{x}^{t+h} - \mathbf{x}^t = (\mathbf{v}^t + \Delta \mathbf{v}^{t+h})h$ 라는 성질을 이용하여 (식 1)과 (식 2)를 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$\left(\mathbf{I} - \frac{h^2}{m} \mathbf{H}\right) \Delta \mathbf{v}^{t+h} = (\mathbf{F}^t + h \mathbf{H} \mathbf{v}^t) \frac{h}{m} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{H} 는 헤시안 행렬 $\frac{\partial^2 \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}^2}$ 을 나타낸다. (식 3)을 계산하기 위해 Kang 등[6, 7]은 다음과 같이 $\Delta \mathbf{v}^{t+h}$ 를 근사화하였다.

$$\Delta \mathbf{v}^{t+h} = \frac{\tilde{\mathbf{F}}_i^t h + h^2 k \sum_{(i,j) \in E} \tilde{\mathbf{F}}_j^t h / (m_j + h^2 k n_j)}{m_i + h^2 k n_i} \quad (4)$$

여기서 E 는 질점을 연결하는 스프링 에지들의 집합이고, k 는 스프링 상수, $\tilde{\mathbf{F}}_i^t$ 는 질점 i 에 작용하는 내부힘과 외부힘을 포함한 전체힘을 나타내고, n_i 는 질점 i 에 이웃하고 있는 질점들의 개수를 나타낸다. (식 4)를 사용하여 선행시간에 다음 시각 $t+h$ 의 질점의 상태를 계산할 수 있다.

2.2 초탄성 현상

주어진 외부의 힘에 의해 천이 변형된 후에, 질점-스프링 모델은 초탄성 현상으로 인하여 시각적으로 비정상적인 결과를 보일 수 있다. 초탄성 현상은 두 개의 질점 사이의 거리가 지나치게 멀어진 결과 천이 비사실적으로 보이는 현상을 말한다. 이 현상은 천을 비정상적으로 변형시킬 뿐 아니라, 스프링의 힘이 너무 강해져서 전체적으로 천 시스템을 불안정하게 한다. 이것을 해결하는 한 가지 방법은 저항 상수를 기반으로 하여 스프링 힘들을 조정하는 것이지만, 스프링의 힘만을 조정하여 초탄성 효과를 해결하기는 어렵다. Provot[9]은 질점의 위치를 조정하여 질점 사이의 거리를 감소시키는 기법을 제안하였다. 이 기법은 변형된 비율이 일정한 임계값 이하로 유지되면서 동시에 스프링의 계산된 방향이 변하지 않는 성질을 만족한다.

Provot의 방법은 직관적이고 시뮬레이션의 결과가 사실적이므로, 천 시뮬레이션에서 널리 사용되어 왔다[3, 6, 7, 8]. 그러나, 그의 방법은 천을 사실적으로 변형시키기 위해 많은 횟수의 반복적인 계산을 요구하므로 시스템의 속도 저하

를 가져올 수 있다. 외부에서 가해진 힘이 강할수록 반복적인 계산의 횟수가 증가하므로, 반복 회수가 일정 기준보다 커지면 실시간 시뮬레이션이 불가능해진다.

3. 대화형 천 시뮬레이션 기법

이 절에서는 본 논문에서 제시하는 천 시뮬레이션 기법을 설명한다.

3.1 힘의 분산

외부에서 천의 국소적인 영역에 힘을 가할 경우, 힘의 크기가 상대적으로 작으면 이 영역내부의 질점들만이 영향을 받는다. 힘이 가해지는 영역 내부의 질점들의 집합을 S 라고 하자. 만약, 주어진 힘이 일정한 임계값보다 더 클 경우에는 S 에 속한 질점들에 가해진 힘의 효과는 모든 질점들로 파급된다. 우리는 국소적인 영역에 가해진 강한 힘을 감소시키면서 동시에 영역 외부의 모든 점에도 힘을 나누어서 가하기 위해, 주어진 외부의 힘을 다음과 같이 2개의 부분으로 나눈다.

- 1) 모든 질점에 적용되는 힘
- 2) 집합 S 에 속한 소수의 질점들에만 적용되는 힘

모든 질점에 적용되는 힘은 외부의 힘 \mathbf{F}_{tot} 을 전체 질점의 질량의 합으로 나누어 구한다:

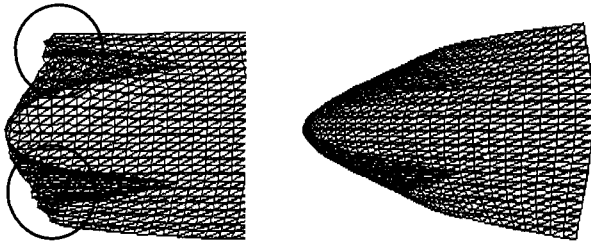
$$\mathbf{F}_{tot} = \frac{\sum_i (\mathbf{F}_i^{ext} - \mathbf{F}_{threshold})}{\sum_i m_i} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{F}_i^{ext} 는 힘을 분산시키기 전에 질점 i 에 가해진 외부의 힘을 나타낸다. 임계값 힘은 $\mathbf{F}_{threshold} = \sum_i m_i \mu$ 로 주어지고, μ 는 최소 가속도 값으로서 사용자가 입력하는 상수이다. 힘을 분산시킨 후, 집합 S 에 속한 질점 i 에 적용되는 갱신된 외부의 힘을 $\hat{\mathbf{F}}_i^{ext}$ 로 표현하면, 다음과 같이 계산된다.

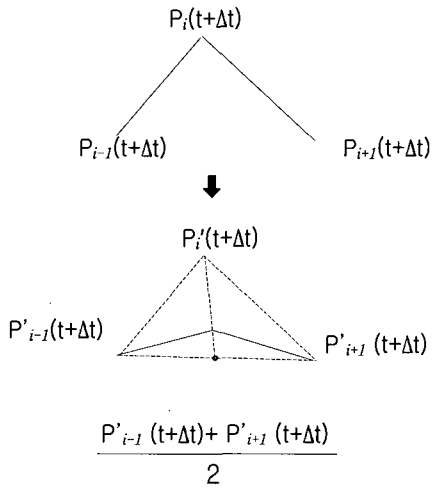
$$\hat{\mathbf{F}}_i^{ext} = \mathbf{F}_i^{ext} - \mathbf{F}_{threshold} \quad (6)$$

3.2 지그재그의 제거

외부에서 주어지는 힘의 방향과 천의 이동 방향이 서로 반대가 될 때, 천은 접히고 지그재그가 나타날 수 있다(그림 1 (a) 참조). 이러한 현상은 인접한 질점들간의 연속성을 고려하지 않은 채 질점의 위치를 변화시킨 결과이다. 질점의 위치 보정과정은 스프링이 과도하게 늘어나는 것을 방지하는 동시에 천의 불연속성을 제거해야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여, 우리는 이웃한 질점들의 위치를 보정할 때 이들 간의 각도를 고려한다.



(a) 지그재그를 가지는 천 (b) 지그재그를 제거한 후의 천
(그림 1) 지그재그를 제거한 결과



(그림 2) 각도 보정 과정

(그림 2)는 각도 보정 전후의 이웃한 질점들의 위치를 보인다. 질점 P_i 와 그에 인접한 질점 P_{i-1} 와 P_{i+1} 사이의 상대적 위치관계를 고려하여 P_i 의 위치를 P'_i 로 다음과 같이 보정한다.

$$P'_i = \alpha P_i + (1-\alpha) \frac{P_{i-1} + P_{i+1}}{2} \quad (7)$$

여기에서 α 는 0.0과 1.0 사이에서 선택할 수 있는 상수이며, α 값이 커질수록 천의 모양이 더 부드러워진다.

각도 보정은 (그림 1) (a)와 같은 천의 형태를 (그림 1) (b)와 같이 바꾼다. (그림 1) (b)에서 보는 것처럼, 지그재그는 제거되고 외곽선 부분은 보다 시각적으로 만족스러운 결과를 얻는다. 강체에 고정되어 위치가 미리 결정되는 질점의 경우에는 이러한 보정과정을 거치지 않는다.

3.3 천 시뮬레이션 과정

천의 시뮬레이션을 위한 과정은 다음과 같은 두 단계로 구성된다.

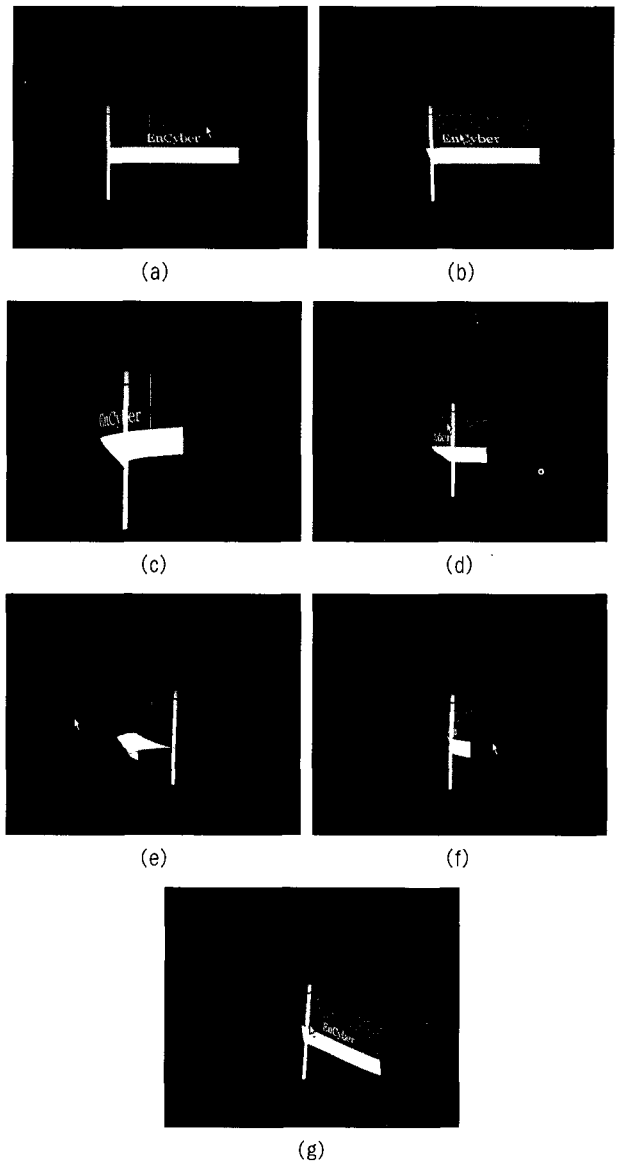
- 1단계: 3.1절에서 유도된 식 (5)와 (6)을 사용하여 각 질점에 가해진 외부의 힘을 구한 뒤, 계산된 힘을 대응

되는 질점에 적용하여 질점의 위치를 변경한다. 주어진 힘에 대해 질점의 위치를 변경하기 위해 식 (3)과 (4)를 이용한다.

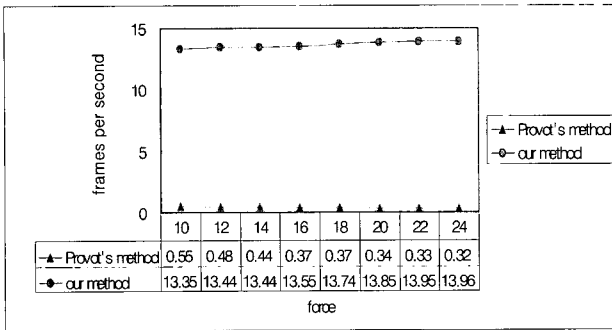
- 2단계: 1단계의 계산 결과에 대해 초탄성 현상을 해결하기 위하여 Provot[9]의 방법을 적용한 뒤, 3.2절에서 설명된 방법을 이용하여 천의 지그재그를 제거한다.

4. 실험 결과

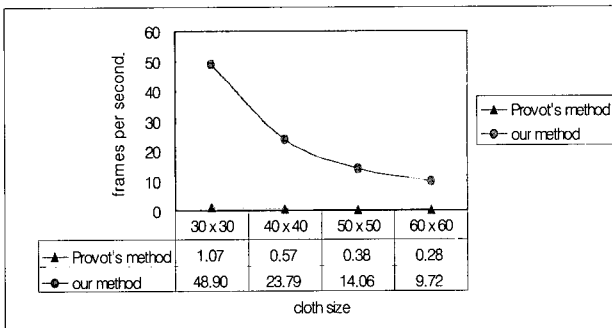
(그림 3)은 본 논문에서 제안한 방법을 적용한 천의 시뮬레이션 결과이다. 그림은 깃대에 고정되어 있는 천의 두 점에 대해 힘을 가한 모습이며, 이 힘의 크기와 방향은 마우스 포인터에 의해 조절한다.



(그림 3) 천의 시뮬레이션에서 캡처한 장면들



(a) 힘의 크기에 따른 속도 비교



(b) 메쉬 크기에 따른 속도 비교

(그림 4) Provot의 방법과 본 논문의 방법 비교

(그림 4)는 본 논문의 방법과 Provot의 방법으로 Pentium IV 2.8GHz에서 천 시뮬레이션을 수행할 때, 1초당 계산할 수 있는 프레임의 수를 비교한 결과를 보인다. (그림 4) (a)는 50x50의 질점으로 구성된 천에 각기 다른 크기의 힘을 적용하여 수행속도를 비교한 결과이다. 본 논문에서 제시한 방법은 외부의 힘이 10부터 24로 변하는 동안 초당 13 프레임 이상의 계산 속도를 보였다. (그림 4) (b)는 외부에서 주어지는 힘의 크기를 20으로 고정시키고 메쉬의 크기를 변화시킨 경우에 수행속도를 비교한 결과이다. 메쉬의 크기가 30x30 내지 40x40 정도일 때, 본 논문에서 제안한 방법은 실시간(real time)으로 시뮬레이션에 필요한 계산을 수행할 수 있었고, 메쉬 크기가 50x50 보다 커지는 경우 의사 실시간의 수행속도를 보였다.

Provot의 방법은 계산 과정의 반복 횟수가 약 150회 내지 200회가 되어야만 그럴듯한 천의 모양이 나오지만, 본 논문에서 제안한 방법은 계산 과정의 반복을 10회만 수행하여도 심미적으로 좋은 결과를 얻을 수 있다. 외부에서 가해지는 힘이 커지거나, 메쉬의 크기가 커질수록 본 논문에서 제시하는 방법이 Provot의 방법보다 수행시간 면에서 더욱 좋은 결과를 보인다.

6. 결 론

본 논문에서는 대화형 천 시뮬레이션을 수행하는 의사 실시간 방법을 제시하였다. 일정 영역에 가해지는 외부 힘을

전체 천에 분산시킴으로써, 천을 변형시키는 데 필요한 수행시간을 감소시켰으며, 천의 사실적인 표현을 위하여 각도 보정을 이용하여 변형된 천에 생긴 지그재그를 제거하였다. 본 논문에서 제시한 방법은 외부에서 힘이 가해진 천을 사실적으로 표현하면서도 안정적이고 빠른 수행속도를 제공한다. 향후에는 천을 부드럽게 하는 효과 외에, 천에 힘이 가해져서 생기는 주름을 좀더 효과적이고 빠르게 표현할 수 있는 방법을 연구하고자 한다. 또한, 본 연구에서 고려되지 않은 충돌탐지 및 충돌반응 기법을 추가하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] D. Baraff and A. Witkin, "Large steps in cloth simulation," *Proc. of ACM SIGGRAPH*, pp.43-54, 1998.
- [2] D. Baraff, A. Witkin, and M. Kass, "Untangling Cloth," *Proc. of ACM SIGGRAPH*, Vol. 22, No. 3, pp.862-870, 2003.
- [3] R. Bridson, R. Fedkiw, and J. Anderson, "Robust treatment of collisions, contact, and friction for cloth animation," *Proc. of ACM SIGGRAPH*, pp.594-603, 2002.
- [4] K. Choi and H. Ko, "Stable but responsive cloth," *Proc. of ACM SIGGRAPH*, pp.604-611, 2002.
- [5] M. Desbrun, P. Schroeder, A. Barr, "Interactive animation of structured deformable objects," *Proc. of Graphics Interface*, pp.1-8, 1999.
- [6] Y.-M. Kang, J.-H. Choi, H.-G. Cho, D.-H. Lee, and Park, C.-J. Park, "Real-time animation techniques for flexible and thin objects," *Proc. Of WSCG*, pp.322-329, 2000.
- [7] Y.-M. Kang, J.-H. Choi, H.-G. Cho, and C.-J. Park, "An efficient animation of wrinkled cloth with approximate implicit integration," *The Visual Computer*, Vol.17, No.3, pp.147-157, 2001.
- [8] M. Meyer, G. DeBunne, M. Desbrun, and A. Barr, "Interactive animation of cloth-like objects in virtual reality," *The Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol.12, No.1, pp.1-12, 2001.
- [9] X. Provot, "Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior," *Proc. of Graphics Interface*, pp.147-155, 1995.
- [10] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, and K. Fleischer, "Elastically deformable models," *Proc. of ACM SIGGRAPH*, pp. 205-214, 1987.
- [11] P. Volino, M. Courchesne, and N. M. Thalmann, "Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects," *Proc. of ACM SIGGRAPH*, pp.137-144, 1995.



정 대 현

e-mail : ktshadow@daum.net
1998년 경북대학교 공과대학 컴퓨터공학과 (학사)
2000년 경북대학교 대학원 컴퓨터공학과 (공학석사)
2000년~현재 경북대학교 대학원 컴퓨터 공학과(박사과정)

관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 알고리즘



백 낙 훈

e-mail : nbaek@knu.ac.kr
1990년 한국과학기술원 전산학과(학사)
1992년 한국과학기술원 전산학과(공학석사)
1997년 한국과학기술원 전산학과(공학박사)
2004년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부 조교수

관심분야: 컴퓨터 그래픽스



김 구 진

e-mail : kujinkim@knu.ac.kr
1990년 이화여자대학교 전자계산학과(학사)
1992년 한국과학기술원 전자계산학과(석사)
1998년 포항공과대학교 컴퓨터공학과(박사)
1998년~2000년 Dept. of Computer Sciences, Purdue University, PostDoc

2000년~2002년 아주대학교 정보및컴퓨터공학부 BK21 조교수
2002년~2003년 Dept. of Mathematics and Computer Science, University of Missouri-St. Louis, Visiting Assistant Professor

2004년~현재 경북대학교 컴퓨터공학과 조교수
관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 애니메이션, 곡면 및 기하모델링 등



유 관 우

e-mail : kwryu@knu.ac.kr
1980년 경북대학교 전자공학과(학사)
1982년 한국과학기술원 전산학과(공학석사)
1990년 메릴랜드대학교 전산공학(공학박사)
1982년~현재 경북대학교 컴퓨터공학과 교수
관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 계산기하학, 계산 이론