

# 소성변형특성을 이용한 사실적인 직물 시뮬레이션

(Realistic Cloth Simulation using Plastic Deformation)

오 동 훈 <sup>†</sup>      정 문 렬 <sup>\*\*</sup>      송 창 근 <sup>\*\*\*</sup>      이 중 완 <sup>\*\*\*\*</sup>  
(Donghoon Oh)      (Moonryul Jung)      (Changgeun Song)      (Jongwan Lee)

**요 약** 본 논문은 소성변형(plastic deformation)특성을 갖는 직물의 움직임을 시뮬레이션하는 기법을 제안한다. 소성은 탄성과 반대되는 개념으로, 물질이 외부의 힘에 의해 변형되었을 때, 초기상태로 완전히 회복되지 못하는 성질이다. 직물은 파티클 모델(particle model)을 이용하여 모델링하며, 파티클간의 상호작용은 바로 인접한 파티클간의 순차연결과 한 파티클 건너에 있는 파티클간의 교차연결을 설정함으로써 표현한다. 순차연결은 직물의 압축과 인장변형을, 교차연결은 직물의 굽힘변형을 표현한다. 연결은 스프링으로 모델링하는데, 순차연결은 탄성스프링으로, 교차연결은 변형정도에 따라, 탄성스프링 또는 소성스프링으로 모델링한다. 본 논문은 기존의 파티클 모델에서 사용하는 탄성스프링에 소성스프링을 추가하여 직물의 소성변형현상을 표현한 것이다. 그 결과, 굽힘주름과 영구변형된 구김주름, 그리고 주름이 직물 전체에 고루 분포되는 현상을 시뮬레이션할 수 있었다. 연결의 탄성스프링과 소성스프링을 모델링할 때 직물운동방정식 수치해법의 안정성을 보장하기 위해 직물 시스템의 강성 매트릭스(stiffness matrix)가 indefinite이 되지 않도록 주의를 기울였다.

**키워드** : 직물 시뮬레이션, 소성변형

**Abstract** This paper presents a cloth simulation technique that implements plastic deformation. Plasticity is the property that material does not restore completely to the original state once deformed, in contrast to elasticity. We model cloth using a particle model, and posit two kinds of connections between particles, i.e. the sequential connections between immediate neighbors, and the interlaced connections between every other neighbors. The sequential connections represent the compression and tension of cloth, and the interlaced connections the bending in cloth. The sequential connections are modeled by elastic springs, and the interlaced connections by elastic or plastic spring depending on the amount of the current deformation of the connections. Our model is obtained by adding plastic springs to the existing elastic particle model of cloth. Using the new model, we have been able to simulate bending wrinkles, permanently deformed wrinkles, and small wrinkles widely distributed over cloth. When constructing elastic and plastic spring models for sequential and interlaced connections, we took pain to prevent the stiffness matrix of the whole cloth system from being indefinite, in order to help achieve physical stability of the cloth motion equation and to improve the effectiveness of the numerical method.

**Key words** : cloth simulation, plastic deformation

· 본 연구는 산업자원부의 지역혁신 특성과 사업의 연구결과로 수행되었습니다.

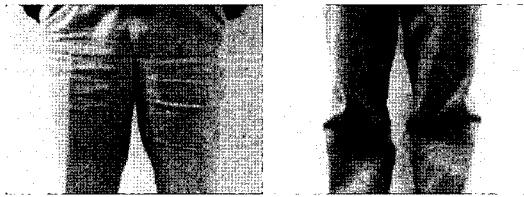
<sup>†</sup> 비 회 원 : 서강대학교 미디어공학과 odh1199@sogang.ac.kr  
<sup>\*\*</sup> 종신회원 : 서강대학교 미디어공학과 교수 moon@sogang.ac.kr  
<sup>\*\*\*</sup> 종신회원 : 한림대학교 정보통신공학부 교수 cgsong@hallym.ac.kr  
<sup>\*\*\*\*</sup> 비 회 원 : 한림대학교 물리학과 교수 jwlee@hallym.ac.kr  
논문접수 : 2005년 5월 30일  
심사완료 : 2006년 2월 22일

## 1. 서 론

직물 시뮬레이션은 3차원 컴퓨터 그래픽으로 제작된 애니메이션이나 게임, 그리고 의류 전자상거래를 위한 인터넷 쇼핑몰에서 캐릭터가 입고 있는 옷의 움직임을 표현하기 위해 이용될 수 있다. 컴퓨터 그래픽스 기법의 발전으로 영화나 애니메이션에서 보여주는 특수효과나 가상의 물체, 캐릭터들은 실사와 구분하기 힘들 정도의 시각적 완성도를 보여주고 있지만 옷은 실제 경우에 비

해 그 움직임이나 형태가 아직 어색하고 단조롭다.

직물 시뮬레이션에 관한 이전 연구들은 주로 직물의 물리적 모델이나 시뮬레이션 결과의 안정성에 초점을 맞추었다. Barraf와 그 동료[1]는 직물의 운동방정식을 암시적 시적분 방법(implicit integration method)으로 계산하여 큰 시간간격에서도 안정한 해를 구할 수 있게 되었다. Choi와 Kol[2]는 직물이 일반 고체와는 달리 좌굴 현상(buckling)을 가지고 있지 않다는 점에 착안하여 좌굴현상을 갖지 않는 직물의 탄성모델을 제시하여 안정성을 확보하면서 생동감 있게 움직이는 직물을 시뮬레이션 하는 것에 성공했다. 그러나 여전히 옷매쉬의 해상도에 비해 주름이 상대적으로 적고 완만하다. 탄성 스프링모델 기반의 직물모델을 적용한 시뮬레이션 결과를 보면, 그 움직임이 출렁이는 느낌을 주고, 주름의 곡률이 완만하여 고해상도의 매쉬를 사용한다 하더라도 그림 1과 같은 실제 옷 주름의 표현에는 한계가 있다.



(a) 면바지의 강한 구김 (b) 청바지의 구김  
그림 1 소성변형 후 바지에 남아있는 구김

Hadap과 동료[3]는 주름정보가 담긴 텍스처 이미지를 이용하여 생긴 옷 매쉬의 표면에 주름을 렌더링하여 시뮬레이션하는 기법을 제시하기도 했다. 이 방법은 계산시간이 빠르기 때문에 게임처럼 실시간 처리가 요구되는 분야에 적합하다고 볼 수 있지만, 텍스처 정보에 의존하므로 캐릭터의 동작에 종속적인 실제 옷의 주름과 움직임을 표현할 수는 없다.

주름은 직물의 굽힘변형에 의해 생성되는 변형현상이다. 탄성 모델에서의 굽힘강성은 직물이 굽혀지는 것에 저항하여 초기상태로 퍼지게 하는 작용을 한다. 재료공학분야에서 다루는 금속과 같은 물질들은 인장, 압축, 굽힘등에 대한 강성이 매우 커서 그 초기형태를 유지하지만, 직물의 굽힘강성은 매우 약해서 이것에 작용하는 중력, 신체와의 접촉에 의한 마찰력에 의해서도 쉽게 굽혀서 주름을 형성한다. 그러나 탄성만을 고려한 직물모델은 그림 1에서 보는 것과 같은 구김 주름을 표현할 수 없다. 이런 주름은 앉아 있거나 다른 동작을 취하고 있을 동안 바지에 작용된 외부의 힘(주로 몸과 바지간의 마찰력)에 의한 변형흔적이며 그 힘이 없어져도 남아있다.

이처럼 변형시키기 위한 힘이 제거되어도 초기상태(직물에서는 퍼져있는 상태)로 완전히 회복되지 못하고 변형된 상태를 유지하려는 성질을 소성(plasticity)이라고 한다. 탄성 물체는 외부에서 가해진 힘을 복원에너지의 형태로 보존하고 있다가 힘이 제거되면 초기상태로 회복시키는데 이 에너지를 쓴다. 이와는 달리 소성물체는 외부 힘이 물체 내부에 에너지의 형태로 저장되지 않고 소산되기 때문에 힘이 제거되어도 변형상태에서 완전히 빠져 나오지 않는다.

O'Brien과 동료는 취성파괴(brittle fracture)현상, 즉 외부에서 가해진 힘이 물체 초기상태로의 회복을 위한 복원에너지로 축적되지 않고 물체가 파편으로 분해되어 날라 가는데 필요한 힘으로 쓰이는 경우를 모델링했다 [4]. O'Brien과 동료[5]는 그 이후 추가적으로 물체의 소성특성을 모델링했다. 그 결과 유리와 같은 취성물질의 파괴현상과 함께 점토처럼 파편이 튀지않는 무른물질의 연성파괴(ductile fracture)현상도 시뮬레이션했다. 요컨대, O'Brien과 동료는 탄성변형특성만 갖는 탄성물질의 파괴현상[4]과 탄성, 소성변형특성을 모두 갖는 소성 물질의 파괴현상[5]을 시뮬레이션 했다.

직물 시뮬레이션에서 [5]와 같이 변형 후 파괴현상은 없지만 직물이 탄성, 소성 변형특성을 모두 갖는 물질로 모델링함으로써 직물의 움직임과 주름을 더욱 사실적으로 시뮬레이션 할 수 있다. 본 논문은 물질의 소성변형특성을 적용한 새로운 직물 모델을 제시하며 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 직물의 변형과정에서 나타나는 주름의 분산현상과 접힘이 표현 가능하다.
- 직물의 변형 후에 남은 구김이 표현 가능하다.
- 동일 매쉬 해상도에서 탄성 직물모델에 비해 더 많은 잔 주름을 표현할 수 있다.

## 2. 직물의 물리적 성질

엄밀히 말해서, 탄성과 소성은 균질한 단일 물질이 갖는 고유한 물리적 성질에 기인한 변형특성을 말한다. 따라서 직물은 실들로 이루어진 비 균질 재료이기 때문에 탄, 소성을 평가 할 대상이 될 수 없다. 그러나 본 연구에서는 직물이 변형한 결과적인 수치에 대한 해석을 통해 그 변형특성을 평가하고자 한다.

직물의 주요한 변형유형은 압축(compression), 인장(tension), 그리고 굽힘(bending)이다. 옷에서의 인장은 늘어남을, 굽힘은 주름을 형성시킨다. 압축 또한, [2]에서 제시한 즉 좌굴(immediate buckling)모델에 의해 주름을 유도한다. 직물은 인장에 대해서 매우 큰 인장강성을 갖기 때문에 일상적인 외부힘에 대해 눈에 보이는 늘어남은 없다. 그러나 굽힘에 대한 강성이 매우 작아

중력이나 신체의와 접촉 마찰력에 의해서도 쉽게 굽혀져 주름을 형성한다.

2.1 인장변형의 소성특성

실은 인장강성이 크기 때문에 고무줄과 같이 눈에 보이는 탄성변형특성을 갖지는 않는다. 직물이 실보다 더 늘어날 수 있는 것은 그림 2의 아래처럼 실의 초기상태가 구부러져 있어 잡아당겨졌을 때 퍼질 수 있는 구조적 잠재성을 지니고 있기 때문이다. 따라서 직물이 늘어날 수 있는 최대 길이는 직물을 구성하는 실의 초기 상태와 완전히 퍼졌을 때의 길이의 비를 연신율이라 정의하면, 직물의 늘어남은 연신을 이하의 변형이며, 연신을 넘어서는 것은 실의 끊어짐, 직물에서는 찢어짐을 의미한다고 볼 수 있다.

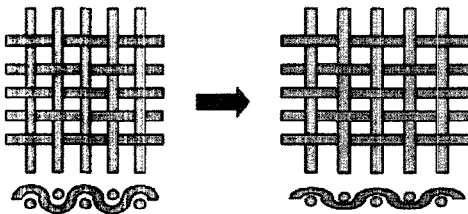


그림 2 직물구조와 인장변형

직물은 연신율의 범위 내에서 늘어날 수 있으며 직교하는 실과 실사이의 접촉마찰로 인해 초기 상태로 완전히 수축되지 못 할 수도 있다. 바지의 무릎, 옷의 팔꿈치 부분에서의 늘어남 현상이 좋은 예이다. 그러므로 직물은 인장변형에 대해서 소성변형특성을 갖는다. 그림 3은 직물상의 인접한 두 질점 간 인장변형량과 힘의 관계를 보여준다. 그림에서 보듯이 작은 변형력에 대해서는 탄성변형을 하지만(가-나 구간), 그 힘이 커지고 반복되면 연신을 범위 내에서 소성변형을 시작하게 되며(나-다 구간) 그 이후로는(다-라 구간, 연신을 이후의 구간) 매우높은 인장강성을 가지는 제 2차 탄성변형 구

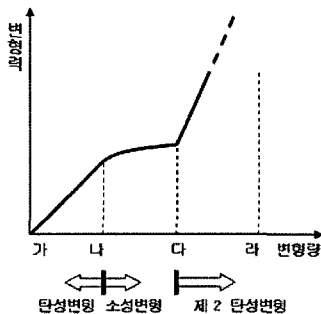


그림 3 직물의 인장변형 모델

간으로, 힘을 가해도 더 이상 늘어나지 않게 된다. 소성 변형구간에서는 힘이 제거되어도 원래 상태로 회복되지 않고 영구변형을 한다.

본 연구의 직물모델에서 직물의 2차 탄성변형을 반영되지 않았다. 또한 인장변형에 대한 소성모델을 적용하지 않고, 굽힘변형에 대해서만 소성변형특성을 구현하였다. 직물의 주름은 굽힘변형에 의해 주로 표현되며 이에 비해 인장에 대한 소성변형특성은 시각적으로 크게 드러나지 않기 때문이다.

2.2 굽힘변형의 소성특성

물체의 단위면적에 작용하는 힘을 스트레스(stress, 응력)라고 한다. 본 연구에서는 물질이 촘촘한 격자구조를 가지고 있다고 본다. 또한 격자구조의 구성단위인 노드는 모두 균일한 단면적을 가지고 있다고 가정하므로 노드에 작용하는 힘을 바로 응력으로 정의한다. 각 노드에 각 노드에 작용하는 응력은 외력과 인접한 노드와의 연결관계에서 발생하는 내력(연결관계의 변형을 복원하려는 힘)의 합이다. 각 노드에 작용하는 굽힘응력 분포가 불균일하면 격자구조의 일부분이 굽힘변형을 하게 된다. 임의 노드에 연결된 두 개의 이웃 노드를 생각하면 이들 노드에 응력들이 상호작용하여 중앙 노드에 굽힘모멘트(bending moment)를 증가시켜 중앙 노드를 중심으로 굽힘변형이 일어나게 할 수 있다.

굽힘변형이 특정기준 이상 진행되면 소성을 갖게된다. 즉 굽힘변형에 의한 탄성변형에너지가 모두 탄성복원에너지로 전환되지 않는다. 따라서 소성을 갖게된 노드는 그렇지 않은 다른 노드에 비해 굽힘에 대한 복원력이 약화되어 굽힘변형이 더 크게 진행되는 응력 집중현상이 발생한다. 또한 굽힘응력이 제거되어도 완전히 퍼지지 못하고 굽힘변형 상태를 유지하게 된다. 굽힘변형에 대한 소성모델은 인장에 대한 소성모델(그림 3)의 “가-다”와 유사한 변형구간을 갖는다.

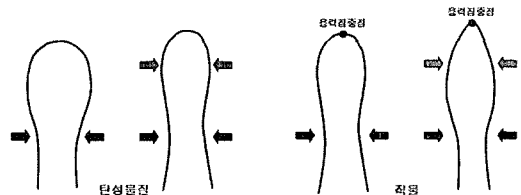


그림 4 (좌) 응력집중점이 없음 (우) 다른 부분보다 응력집중점에 더 큰 굽힘 모멘트가 작용하며, 여기에서 직물의 접힘현상이 발생

3. 제안된 직물 모델

3.1 순차, 교차연결 스프링 계

본 논문은 직물의 구조가 그림 5와 같은 격자구조를 가지고 있다고 가정한다. 각 노드는 대표질량을 갖고 있는 질점이며, 노드간 연결에 따른 힘의 상호작용은 스프링 모델을 적용한다. 본 논문은 [2]에서처럼, 격자구조가 그림 5의 순차연결과 교차연결을 가지고 있다고 가정한다. 순차연결은 직물의 수축과 인장변형을 표현하고, 교차연결은 두 개의 순차연결 i-j와 j-k로 구성된 연결인데, 이것은 중간 노드 j에서의 굽힘을 표현하는데 사용한다. 순차연결은 압축과 인장변형에서 탄성변형을 한다고 가정한다. 교차연결은 본 논문에서 제안하는 변형모델의 조건에 따라 압축(굽힘)과 인장(펴짐)에 대해 탄성 또는 소성변형을 한다.

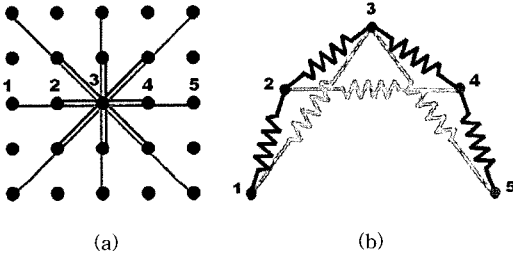


그림 5 직물 모델의 스프링 연결 구조 : (a) 노드 3에 8개의 순차연결노드, 8개의 교차연결 노드가 연결되어있다. (b) 순차, 교차스프링 연결 : 노드간 연결 1-2, 2-3, 3-4, 4-5는 순차연결이고, 1-3, 2-4, 3-5는 교차연결이다. 순차, 교차 연결관계는 스프링으로 모델링된다.

3.2 직물 운동 모델

직물 격자의 운동을 시뮬레이션 하려면 각 노드들의 운동방정식을 유도해야 한다. 이를 위해서는 우선 임의의 노드 i의 에너지식을 모델링해야 한다.

직물을 이루는 노드의 수를 N개라 하고, 임의의 노드 i에 연결된 순차연결 노드들의 집합을 N1(i), 교차연결 노드들의 집합을 N2(i)라 하자. 그림 5에서 보듯이 N1(i)과 N2(i)는 각각 8개의 요소를 가지고 있으며, 직물노드의 외곽 경계 부분에서는 물론 그 이하의 개수를 가지게 된다.

노드 i의 위치벡터를  $X_i$ 라 하면 직물시스템의 상태벡터는 식 (1)과 같이 3차원 벡터들로 표시된다.

$$X = (X_1, X_1, \dots, X_N)^T \quad (1)$$

노드 i, j간의 거리벡터를  $X_{ij} (= X_j - X_i)$ 라 하고  $l_{ij}$ 를 순차 또는 교차 연결된 두 노드간의 초기 길이라 하자.

순차연결의 인장변형과 압축변형은 각각 서로 다른

탄성계수  $k_t, k_c$ 를 가진다. 압축강성  $k_c$ 는 인장강성  $k_t$ 에 비해 훨씬 작은 값을 갖는다. 교차연결은 굽힘강성  $k_b$ 와 펴짐강성  $k_s$ 를 갖는데, 탄성변형구간에서는 동일한 값  $k_b$ 를 부여하고 소성변형구간에서는  $k_b, k_s$ 를 적용한다.

에너지 식을 쓸 때, 강성과 연결 노드간 초기길이가 연결 유형(순차, 교차), 연결 노드간 길이(임의 시간간격), 변형구간(탄성, 소성)에 따라 달라지므로, 일반적인 표기를 위해 이 값들이 노드간 연결 ij에 종속되게 표현한다. 즉, 강성은  $k_{ij}$ 로, 초기길이는  $l_{ij}$ 로 표시한다. 교차연결의 경우, 탄성변형구간에서는  $l_{ij} = l_{ij}^0$ 이고, 소성변형구간에서는 시뮬레이션 단계(시간간격) t에서의 초기길이가  $l_{ij} = l_{ij}^t$ 이다. N(i)는 노드 i에 순차 또는 교차연결된 노드들의 집합이다. 즉  $N(i) = N1(i) \cup N2(i)$ 이다. i와 N(i)로 이루어진 스프링 시스템의 복원에너지  $E_i$ 는 식 (2)로 표시된다.

$$E_i = \sum_{j \in N(i)} \frac{1}{2} k_{ij} (|X_{ij}| - l_{ij})^2 \quad (2)$$

노드 i에 가해지는 힘벡터  $f_i$ 는 식(3)과 같다. 압축 및 인장변형에 의한 복원력은 노드간 연결거리  $|X_{ij}|$ 에 대한 간단한 함수로 표현된다. 교차연결의 굽힘복원력도 같은 방식으로 표시된다. [2]에서도 굽힘복원력을  $|X_{ij}|$ 의 함수로 표현하지만, 이를 굽힘노드에서의 곡률과 연관시키고 굽힘복원력을 이 곡률의 함수로 표현하여 상당히 복잡하다.

$$f_i = \sum_{j \in N(i)} \left( - \frac{\partial E_i}{\partial X_i} \right) = \sum_{j \in N(i)} k_{ij} (|X_{ij}| - l_{ij}) \frac{X_{ij}}{|X_{ij}|} \quad (3)$$

직물 시스템의 운동방정식은 식 (4)와 같다.

$$m_i \ddot{X}_i = f_i(X) + d_i(\dot{X}) + g_i + fr_i(X), i = 1, \dots, N, \text{ subject to } C(X, \dot{X}, \ddot{X}) = 0 \quad (4)$$

여기서  $d_i, g_i, fr_i$ 는 각각 감쇠력(연결 노드길이의 변화율에 비례하는 저항힘), 중력, 그리고 마찰력(옷과 물체간 접촉)을 말한다.  $C(X, \dot{X}, \ddot{X}) = 0$ 은 시스템이 추가적으로 만족해야 할 제약조건이다. 제약조건은 이 조건을 만족시키기 위한 힘을 모델링하기는 어려운 경우, 시스템이 어떻게 하든 그 조건을 만족해야 된다는 말한다. 직물 시뮬레이션에서는 직물과 인체간의 침투를 방지하기 위해 직물 노드의 가속도 제약조건을 사용한다. 이것은 미리 주어지는 것이 아니라, 시뮬레이션 과정에서 동적으로 적용되거나 해제된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i}{\partial X_j} &= \frac{\partial}{\partial X_j} k_{ij} (|X_{ij}| - l_{ij}) \frac{X_{ij}}{|X_{ij}|} \\ &= k_{ij} \frac{X_{ij} X_{ij}^T}{|X_{ij}|^2} + k_{ij} (1 - \frac{l_{ij}}{|X_{ij}|}) (I - \frac{X_{ij} X_{ij}^T}{|X_{ij}|^2}) \quad (5) \\ \frac{\partial f_i}{\partial X_i} &= \sum_{j \in N(i)} (-\frac{\partial f_i}{\partial X_j}) \end{aligned}$$

$f_i$ 의 편미분은 식 (5)와 같이 계산된다. 복원력의 자코비안 행렬  $\frac{\partial f_i}{\partial f_j}$ 은 노드 i와 j간의 강성행렬(stiffness matrix)이며, 운동방정식의 수치적 해법에 사용된다. 식 (5)에서  $\frac{\partial f_i}{\partial f_j}$ 의 고유치(eigen value)는  $k_{ij}$ ,  $k_{ij}(1 - \frac{l_{ij}}{|X_{ij}|})$ ,  $k_{ij}(1 - \frac{l_{ij}}{|X_{ij}|})$ 이다.  $k_{ij}$ 는 강성이므로 고유치가 항상 양수이다. 그러나 고유치  $k_{ij}(1 - \frac{l_{ij}}{|X_{ij}|})$ 는 순차 또는 교차연결  $X_{ij}$ 가 인장변형을 할 때는 ( $|X_{ij}| > l_{ij}$ ) 양수이고, 압축변형을 할 때는 ( $|X_{ij}| < l_{ij}$ ) 음수이다. 후자의 경우 강성행렬  $\frac{\partial f_i}{\partial f_j}$ 를 indefinite로 만들어 수치적 불안정성을 초래할 수 있다.

본 논문에서는 순차 또는 교차연결  $X_{ij}$ 가 압축변형을 할 때, 강성행렬  $\frac{\partial f_i}{\partial f_j}$ 를 positive definite로 만들기 위해,  $\frac{\partial f_i}{\partial f_j}$ 의 두 번째 항을 제거하고 첫 번째 항만 사용한다. 이 경우는 강성행렬이  $k_{ij}$ , 0, 0을 고유치로 갖게 되어 positive definite이다.

$\frac{\partial f_i}{\partial f_j}$ 가 indefinite이면, 전체 직물 시스템의 강성행렬  $K = \frac{\partial f_i}{\partial f_j}$ ,  $i, j = 1, \dots, N$ 이 indefinite가 된다.  $K$ 는 직물 미분방정식의 수치해법의 일환으로 생성되는 선형시스템(연립방정식)의 시스템 행렬 A의 한 성분으로 등장하는데,  $K$ 가 indefinite이면, A도 indefinite가 될 가능성이 커진다. A가 indefinite가 되면 선형시스템을 풀기가 어렵고, 특히 본 논문에서 사용하는 Conjugate Gradient Method는 A가 positive definite이기를 요구한다. A의 다른 성분은 감쇠(damping)행렬인데, 이것을 잘 조절하면 A를 positive definite로 만들 수 있다. 그러나, [2]에서 지적했듯이, 직물시스템 자체의 자연스러운 감쇠 성질을 모델링하는 것은 필요하지만, A를 positive definite로 만들기 위해서 인위적인 감쇠력을 부과하면, 직물 시스템이 지나치게 무거워져 생동감을 상실한다.

3.2.1 순차연결 스프링 모델

$X_{ij} = X_j - X_i$ 라 하고,  $l_{ij}^0$ 를 순차연결 된 두 노드 i, j간의 초기길이,  $k_t$ ,  $k_c$ 를 각각 순차연결에 대한 인장, 압축스프링강성이라고 하자. 압축강성  $k_c$ 는 인장강성  $k_t$ 에 비해 훨씬 작은 값을 갖는다. 순차연결의 에너지는 식 (6)에 의해 계산된다. 에너지에 의한 복원력  $f_{ij}$ ,  $j \in M(i)$ 는 식 (7)과 같다.

$$E_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2} k_t (|X_{ij}| - l_{ij}^0)^2 : |X_{ij}| \geq l_{ij}^0 \\ \frac{1}{2} k_c (|X_{ij}| - l_{ij}^0)^2 : |X_{ij}| < l_{ij}^0 \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{ij} = -\frac{\partial E_{ij}}{\partial X_j} = \begin{cases} k_t (|X_{ij}| - l_{ij}^0) \frac{X_{ij}}{|X_{ij}|} : |X_{ij}| \geq l_{ij}^0 \\ k_c (|X_{ij}| - l_{ij}^0) \frac{X_{ij}}{|X_{ij}|} : |X_{ij}| < l_{ij}^0 \end{cases} \quad (7)$$

3.2.2 교차연결 스프링 모델

본 연구의 직물 모델은 굽힘변형을 표현하는 교차연결 스프링에 소성변형특성을 반영한다. 따라서 교차연결 노드간 길이가 초기 상태로 회복하지 못하고 영구 변형을 일으킬 수 있다. 이것은 굽힘에 대해 소성변형 효과를 주기 위한 것이지만, 교차연결의 굽힘강성은 동시에 순차연결의 압축강성 역할을 하므로 직물의 수축을 발생시키는 부작용이 발생한다(그림 6). 본 논문에서는 교차연결 스프링의 소성화에 기인해 발생하는 직물의 수축현상을 해결하기 위해, 순차연결 스프링이 압축될 때 압축에너지를 부여하여 순차연결 노드간의 초기길이를 복원될 수 있게 한다. 이것은 [2]에서 순차연결에 압축에너지를 제거하고 인장에너지만 고려했던 것과 비교된다. [2]의 방법은 강성행렬 K를 positive definite로 만들어 직물시스템의 안정성을 보장하기 위해서였다. 그러나, 동적 운동시스템의 물리적 안정성 문제는 복원력뿐 아니라, 시스템에 가해지는 모든 외력을 다 고려한 운동방정식을 만족하는 궤도의 성질에 대한 해석을 필요로 하는 복잡한 문제이다. 강성행렬을 positive definite로 하면 시스템이 안정적인 가능성을 높일 수 있지만, 이를 보장할 수는 없다. 따라서 본 논문에서는 안정성 평가에 대한 이론적 해석은 다루지 않고, 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 직물모델을 평가한다.

탄성변형구간에서 소성변형구간으로의 전이를 표현하기 위해서는 두 구간의 경계를 결정해야 한다. 이 지점은 처음 소성변형이 시작될 때의 교차연결 거리  $|X_{ij}^p|$ 와 초기 교차연결길이  $l_{ij}^0$ 의 비율  $\alpha$ 로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{|X_{ij}^p|}{l_{ij}^0} (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (8)$$

본 논문에서는  $\alpha$ 를 소성변형지점 이라 정의한다.  $\alpha$ 는

직물의 종류에 맞게 사용자가 지정해 주는 상수이다. 시뮬레이션의 매 시간간격마다 교차연결의 현재거리에 대해, 비율  $\frac{|X_{ij}^p|}{l_{ij}^0}$ 을 계산, 이를 소성변형지점  $\alpha$ 와 비교하여 탄성에서 소성변형구간으로의 진입여부를 검사한다.  $\alpha=1$ 이면 직물이 퍼진 상태에서 굽힘이 시작되면 바로 소성변형이 발생하게 되고,  $\alpha=0$ 이면 완전히 접히게 되더라도 소성변형이 발생하지 않는 기존의 탄성변형을 의미하게 된다.

교차연결에 대한 굽힘 모델은 다음과 같이 탄성변형구간과 소성변형 구간의 두 경우로 구분하여 정의 된다. 굽힘의 정도를 [2]에서와는 달리 굽힘이 일어나는 노드에서의 곡률이 아닌, 교차연결간 거리의 함수로 간단히 정의했다.

굽힘에너지, 굽힘힘  $f_{ij}, j \in \mathcal{N}2(i)$ 는 각각 식 (9), (10)에 의해 계산된다.

- 탄성변형 구간 ( $\frac{|X_{ij}|}{l_{ij}^0} > \alpha$ )

$$E_{ij} = \frac{1}{2} k_b (|X_{ij}| - l_{ij}^0)^2 \quad (9)$$

$$f_{ij} = -\frac{\partial E_{ij}}{\partial X_j} = k_b (|X_{ij}| - l_{ij}^0) \frac{X_{ij}}{|X_{ij}|} \quad (10)$$

- 소성변형 구간 ( $\frac{|X_{ij}|}{l_{ij}^0} < \alpha$ )

$$E_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2} k_s (|X_{ij}| - l_{ij}^1)^2 : |X_{ij}| \geq l_{ij}^1 \\ \frac{1}{2} k_b (|X_{ij}| - l_{ij}^1)^2 : |X_{ij}| < l_{ij}^1 \end{cases} \quad (11)$$

$$f_{ij} = -\frac{\partial E_{ij}}{\partial X_j} = \begin{cases} k_s (|X_{ij}| - l_{ij}^1) \frac{X_{ij}}{|X_{ij}|} : |X_{ij}| \geq l_{ij}^1 \\ k_b (|X_{ij}| - l_{ij}^1) \frac{X_{ij}}{|X_{ij}|} : |X_{ij}| < l_{ij}^1 \end{cases} \quad (12)$$

첫 번째의 탄성변형 구간은 굽힘변형을  $\frac{|X_{ij}|}{l_{ij}^0}$ 가 소성변형지점  $\alpha$ 보다 큰 값을 가지는, 즉 소성변형이 일어날 정도의 굽힘이 진행되지 않은 상태이다. 여기서  $l_{ij}^0$ 은 교차 연결된 두 노드간의 초기길이 이고,  $k_b$ 는 교차연결 굽힘강성이다.

두 번째는 굽힘변형률이 소성변형지점보다 작아지는 경우로 직물은 소성변형구간으로 접어들게 된다. 소성변형구간에서 교차연결노드가 회복해야 할 초기길이를  $l_{ij}^1$ 라 하자. 소성변형구간으로 진입한 직후  $l_{ij}^1$ 는 교차연결이 소성변형을 시작하는 길이인  $|X_{ij}^p|$ 와 같다. 그러나,  $|X_{ij}|$ 가  $|X_{ij}^p|$ 보다 작은 경우, 이를 계속해서 회복하려고

노력하는 것이 아니라,  $|X_{ij}|$ 의 현재길이를  $|X_{ij}|$ 가 다음 시뮬레이션 시간간격에서 복원해야 될 길이  $l_{ij}^1$ 로 간주한다. 이와같은  $l_{ij}^1$ 의 축소경향은  $|X_{ij}|$ 가 0으로 수렴해도 굽힘 변형에너지의 축적을 막기 때문에 직물의 접힘 현상을 유도한다.  $k_s$ 는 퍼짐강성이며, 소성변형구간에서  $|X_{ij}|$ 가  $l_{ij}^1$ 보다 큰 경우, 즉 직물이 퍼지려 할 때 식 (11)의 두 번째 행으로 정의되는 퍼짐 변형에너지를 발생시켜 굽힘상태를 유지시키는 작용을 한다. 그 결과, 직물은 원 상태로 퍼지는 탄성회복을 하지 못하고 구김을 유지할 수 있다.

### 3.2.3 순차 및 교차연결 모델

직물노드  $i$ 는 여기에 순차 및 교차연결된 노드의 영향을 받으므로 식 (7), (10), (12)를 고려하여  $f_i$ 를 식 (13)과 같이 계산한다.

$$f_i = \sum_{j \in \mathcal{M}(i)} f_{ij} + \sum_{j \in \mathcal{N}2(i)} f_{ij} \quad (13)$$

각 노드에 작용하는 복원력  $f_i$ 에 대한 자코비안

( $\frac{\partial f_{ij}}{\partial X_j}$ )은 식 (14)에 의해 계산된다.

$j \in \mathcal{M}(i)$ :

$$\frac{\partial f_{ij}}{\partial X_j} = \begin{cases} k_i \frac{X_{ij} X_{ij}^T}{X_{ij}^T X_{ij}} + k_i (1 - \frac{l_{ij}}{|X_{ij}|}) (I - \frac{X_{ij} X_{ij}^T}{X_{ij}^T X_{ij}}) : |X_{ij}| \geq l_{ij} \\ k_c \frac{X_{ij} X_{ij}^T}{X_{ij}^T X_{ij}} + k_c (1 - \frac{l_{ij}}{|X_{ij}|}) (I - \frac{X_{ij} X_{ij}^T}{X_{ij}^T X_{ij}}) : |X_{ij}| < l_{ij} \end{cases}$$

$j \in \mathcal{N}2(i)$ :

- (1) 탄성변형구간 ( $\frac{|X_{ij}|}{l_{ij}^0} > \alpha$ ):

$$\frac{\partial f_{ij}}{\partial X_j} = k_b \frac{X_{ij} X_{ij}^T}{X_{ij}^T X_{ij}} + k_b (1 - \frac{l_{ij}^0}{|X_{ij}|}) (I - \frac{X_{ij} X_{ij}^T}{X_{ij}^T X_{ij}})$$

- (2) 소성변형구간 ( $\frac{|X_{ij}|}{l_{ij}^0} \leq \alpha$ ):

$$\frac{\partial f_{ij}}{\partial X_j} = \begin{cases} k_s \frac{X_{ij} X_{ij}^T}{X_{ij}^T X_{ij}} + k_s (1 - \frac{l_{ij}^1}{|X_{ij}|}) (I - \frac{X_{ij} X_{ij}^T}{X_{ij}^T X_{ij}}) : |X_{ij}| \geq l_{ij}^1 \\ k_b \frac{X_{ij} X_{ij}^T}{X_{ij}^T X_{ij}} + k_b (1 - \frac{l_{ij}^1}{|X_{ij}|}) (I - \frac{X_{ij} X_{ij}^T}{X_{ij}^T X_{ij}}) : |X_{ij}| < l_{ij}^1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i}{\partial X_i} &= \sum_{j \in \mathcal{M}(i)} \frac{\partial f_{ij}}{\partial X_i} + \sum_{j \in \mathcal{N}2(i)} \frac{\partial f_{ij}}{\partial X_i} \\ &= \sum_{j \in \mathcal{M}(i)} \frac{-\partial f_{ij}}{\partial X_j} + \sum_{j \in \mathcal{N}2(i)} \frac{-\partial f_{ij}}{\partial X_j} \end{aligned} \quad (14)$$

### 3.3 직물의 종류를 표현하기 위한 계수 조정

옷감의 종류는 매우 많지만 실로 짜여진 경우 크게 편성물과 직물로 구분할 수 있다. 편성물은 한올의 실로 모두 연결되어진 것으로 스웨터와 같은 옷을 예로 들 수 있으며, 직물은 경사(날실)와 위사(씨실)이 직교하며 짜

어진 옷감을 말한다. 직물은 섬유의 원료에 따라 천연섬유에는 면직물, 마직물, 모직물, 견직물 그리고 합성섬유에는 혼방직물, 교직물등이 있다.

직물 모델에서의 직교 스프링 연결구조는 실제 직물의 구조를 잘 표현하며, 편성물 또는 다른 재료로 만들어진 옷감에 대해서도 물리적 성질을 결정하는 계수들의 적절한 조정을 통해 충분한 표현이 가능하다.

직물의 종류는 재료의 변형특성을 결정하는 물리적 성질에 관한 계수  $k_s, k_b, k_c, \delta$ (연신율), 그리고  $\alpha$ (소성 변형지점)에 의해 정의될 수 있고, 사용자가 이 계수를 조정하여 그 종류를 표현 가능하다.  $\delta$ 값은 옷이 늘어나는 정도를 결정하고  $\alpha$ 값은 소성변형구간의 결정과 밀접하므로 응력집중현상에 기인한 세밀한 주름의 형성 가능성을 높여준다.  $k_s$ 값은 굽혀진 직물이 퍼지려 하는 것에 대한 저항력을 결정하므로 구김을 남게한다.

표 1은 면직물가 울 소재 옷감의 대비적인 소성변형 특성을 잘 표현하기위한 적절한 계수값을 보여주고 있다. 면소재 옷의 경우 일반적으로 두께가 얇고 직조구조가 밀하기 때문에 늘어남이 적고 세밀한 주름이 형성되며 구김이 잘 생긴다. 반면, 울소재의 옷은 두툼하고 실의 얽힘이 성기기 때문에 늘어남이 많으면서 큼직하고 완만한 주름이 생기며 구김이 없다.

표 1 직물의 종류에 따른 계수조정 예

	면직물	울
연신율( $\delta$ )	0.03(조금늘어남)	0.1(많이 늘어남)
소성변형률( $\alpha$ )	0.8(주름이 잘생김)	0.1(완만한 주름)
퍼짐강성( $k_s$ )	10(구김이 잘 남음)	0.1(구김없이 잘 퍼짐)

#### 4. 직물 지배 운동방정식의 수치적 해

직물의 움직임을 시뮬레이션 하기 위해서는 직물 메쉬를 이루는 모든 버텍스들의 위치값을 시간간격마다 결정해 주어야 한다. 각각의 버텍스들은 운동방정식의 영향을 받으며, 수치해법으로 운동방정식의 해를 구하여 버텍스들의 위치값을 구할 수 있다.

직물 메쉬의 각 버텍스들은 질량을 갖고 있는 질점으로 표현되며 이웃한 다른 버텍스들과 연결되어 서로 힘을 주고 받는다. 질점에 작용하는 힘과 그에따른 움직임의 관계는 식으로 나타낼 수 있다. 식 (15)가 질점의 움직임을 결정하는 지배 운동방정식이다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \tag{15}$$

$m\ddot{x}$ 는 관성력을 나타내며 질량  $m$ 과 가속도  $\ddot{x}$ 의 변화량에 비례하여 질점의 움직임에 저항하는 힘이다.  $c\dot{x}$ 는 감쇠력이라 하고 감쇠계수  $c$ 와 속도  $\dot{x}$ 의 변화에 비

례하는 저항력,  $kx$ 는 복원력으로 스프링상수(강성)  $k$ 와 변위  $x$ 의 변화에 비례하는 저항력을 나타낸다.

식 (15)는 한 개의 질점에 관한 식이다. 모든 질점들의 상호작용을 고려한 직물의 지배운동방정식은 식 (16)과 같은 행렬식이다.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \tag{16}$$

식 (16)은 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.  $f(X, \dot{X})$ 는 직물을 이루는 각각의 질점들에 작용하는 모든 힘으로 현재 질점의 변위  $X$ 와 속도  $\dot{X}$ 에 의해 결정되어, 가속도  $\ddot{X}$ 를 구할 수 있고, 시간에 대해 적분하여 모든 질점의 위치를 구할 수 있다.

$$\ddot{X} = M^{-1}f(X, \dot{X}) \tag{17}$$

직물의 움직임을 지배하는 운동방정식의 수치적 해를 구하기 위해 본 논문에서는 [1]에서 사용했던 암시적 오일러 방법(implicit backward Euler's method)을 택했다.

2차 미분방정식 (17)은 식 (18)과 같이 1차 형식으로 표현 할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} X \\ \dot{X} \end{pmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} X \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V \\ M^{-1}f(X, V) \end{pmatrix} \tag{18}$$

식 (18)을 암시적 오일러 방식으로 이산화 하면 식 (19)와 같다.

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta V \end{pmatrix} = h \begin{pmatrix} V_0 + \Delta V \\ M^{-1}f(X_0 + \Delta X, V_0 + \Delta V) \end{pmatrix} \tag{19}$$

식 (19)에서 비선형 항인  $f(X_0 + \Delta X, V_0 + \Delta V)$ 를 선형화하여 다시쓰면 식 (20)과 같고,

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta V \end{pmatrix} = h \left( M^{-1} \left( f_0 + \frac{\partial f}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial f}{\partial V} \Delta V \right) \right) \tag{20}$$

1행의  $\Delta X = h(V_0 + \Delta V)$ 를 2행에 대입하여 정리하면 식 (21)과 같다.

$$(M - h \frac{\partial f}{\partial V} - h^2 \frac{\partial^2 f}{\partial X^2}) \Delta V = h(f_0 + h \frac{\partial f}{\partial X} V_0) \tag{21}$$

식 (21)에서  $\Delta V$ 를 구할 때 제약조건 (22)를 만족하도록 구해야 한다.

$$\Delta V_j = Z_j, \quad j \text{는 인체와 접촉한 직물 버텍스} \tag{22}$$

$Z_j$ 는 직물 버텍스에 부과된 가속도 제약

식 (21)의 선형시스템  $A\Delta V = b$ 를 제약조건 (22)와 함께 풀어야 하는데, 본 논문에서는 Baraff[1]가 제안한 수정 공액기울기법(modified conjugate gradient method, CG)을 이용한다[1,6,7]. Baraff는 선형시스템을 만족하는  $\Delta V$ 를 반복적으로 구할 때, 각 단계에서  $\Delta V_j = Z_j$ 는 처음에 부과된 값을 그대로 유지하고,  $\Delta V$ 의 다른 성분만을 조절해서  $A\Delta V = b$ 를 만족하는  $\Delta V$ 를 구한다. 즉, CG기법은 초기  $\Delta V$ 가 주어지면,  $A\Delta V = b$ 를 만족하는

데 유리한 방향으로 초기값을 수정하는데, 수정된 CG기법은 이 방향 성분 중에서  $\Delta V_j = Z_j$ 에 해당되는 방향 성분은 제거하고 나머지 성분만 사용해서  $\Delta V$ 를 수정한다. Baraff는 수정 CG 기법이 수렴하는지를 수학적으로 증명하지는 않았지만, 다양한 실험의 결과 수렴한다는 것을 보고하였다.

5. 실험 결과

본 논문에서 제안한 직물 시뮬레이션 기법의 실험 결과를 잘 보여주기 위해서는 팔꿈치, 무릎처럼 주름, 접힘, 그리고 구김이 많이 생기는 부분을 대상으로 실험하는 것이 적합하다. 그러나 현재 구현 단계상의 문제로, 본 실험에서는 구와 탁자에 천을 덮었을 때 생기는 주름과 접힘, 그리고 다시 천을 걷어 냈을 때 생성되는 주름의 흔적과 구김현상을 보여주고자 한다. 실험에 사용한 직물메쉬의 벡텍스 수는 441개로 매우 성기다. 이러한 실험조건을 설정한 것은 많은 주름을 표현하기 위해 고해상도의 메쉬가 필요한 탄성 직물모델과 달리, 저해상도의 메쉬에서도 충분한 주름을 표현할 수 있는 본 연구의 실험결과를 보여주기 위함이다. 본 실험의 메쉬는 곡면평활화(스무딩) 처리를 통해 곡면을 부드럽게 해주었다.

[2]의 직물 모델에서는 시뮬레이션의 안정성 확보를 위해 순차연결의 압축스프링을 제거하고 교차연결의 굽힘스프링을 통해 굽힘은 물론 순차연결 노드간의 수축을 방지하는 방법을 사용했다. 이 스프링 모델에 교차연결 굽힘스프링에 대한 소성모델을 그대로 적용하면 그림 6과 같은 직물의 수축현상이 발생한다. 교차연결 스프링이 소성화에 의해 초기 노드간 길이가 더 작게 변경되어 순차연결 노드의 수축방지에 필요한 탄성 복원력을 발휘하지 못하기 때문이다. 이문제는 순차연결 노드간의 수축현상을 막으면서도 안정성을 확보할 수 있는 최소의 순차연결 압축강성 사용으로 해결되었다.

그림 7은 탁자에 천을 덮었을 때와 걷어 낸 후의 변형현상을 탄성 모델과 제안된 모델에 대해 비교 실험한 결과이다. 직물메쉬의 벡텍스와 물체의 삼각메쉬간 충돌 검사만을 시행했고, 직물메쉬가 성기기 때문에 탁자의

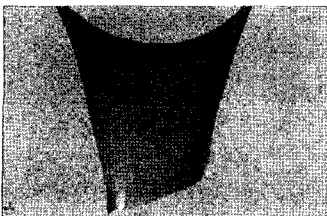
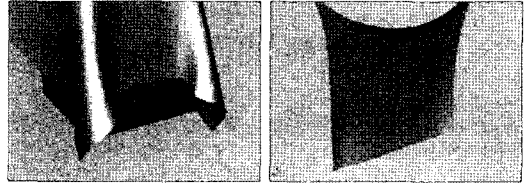
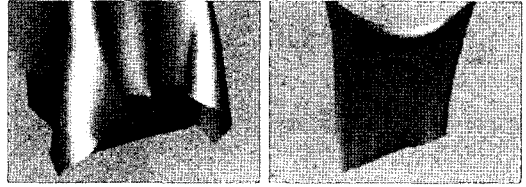


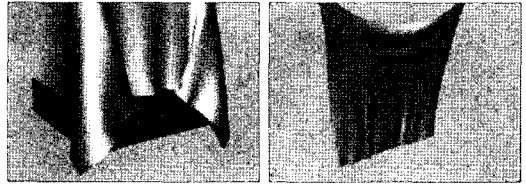
그림 6 직물의 수축현상



탄성 모델( $\alpha=0$ ): 변형흔적이 없음



소성 모델( $\alpha=0.5$ ): 약한 구김 발생, 중앙에 주름 생성



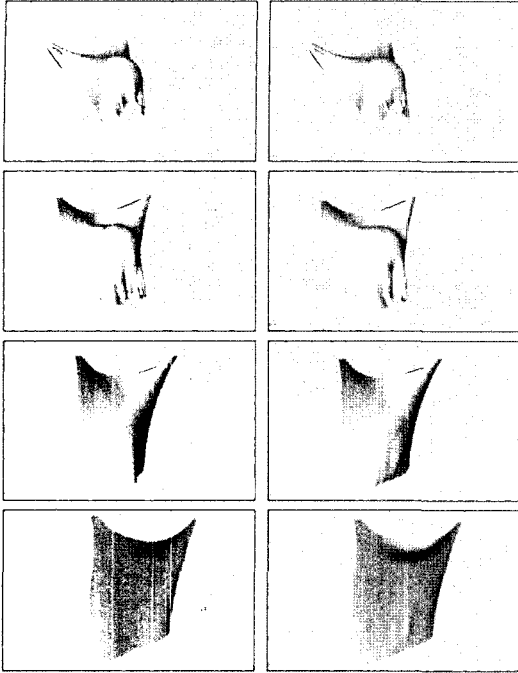
소성 모델( $\alpha=0.8$ ): 구김 발생, 중앙에 더 많은 주름 생성

그림 7 탁자를 덮은 천을 걷어내는 실험

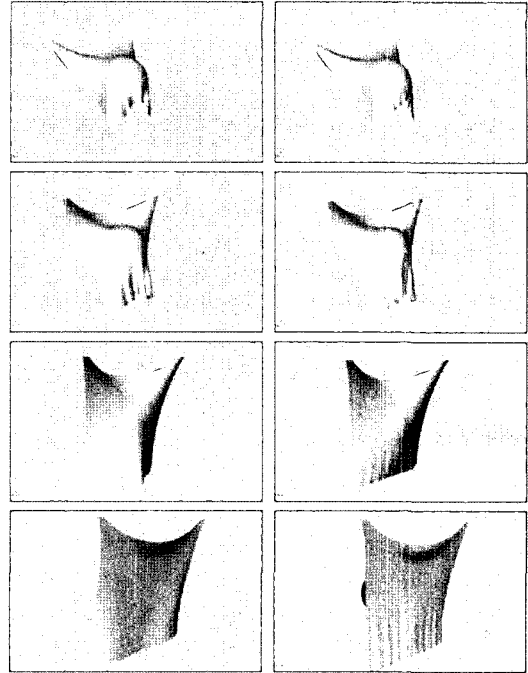
각진 부분에서 약간의 침투 현상이 있었다. 그래서 침투된 부분은 결과 그림에서 보여주지 않았다.  $\alpha$ 가 0인 경우 탄성변형만이 생기기 때문에 주름의 곡률 변화율이 완만하여 접힘현상이 발생하지 않고 중앙부분에도 주름이 잡히지 않고 있다. 천이 퍼진 후에도 탄성회복이 이루어져 영구 변형된 흔적이 보이지 않는다.  $\alpha$ 가 0.5가 되면 약한 접힘과 중앙 부분에서의 주름이 생성되고 약한 구김이 남게된다. 0.8이 되어 천의 소성변형 특성이 더욱 커지면 약간의 굽혀진 부분도 집중 응력을 받아 주름으로 바뀌다 접히게 되고, 더 세밀하고 많은 주름을 생성한다.

그림 8과 9에서도 유사한 실험 결과를 보여주고 있다. 제안된 모델로 시뮬레이션 된 결과가 상대적으로 주름의 수가 더 많으며, 주름의 형태면에서도 탄성 모델보다 실제 직물과 더 유사한 것을 확인할 수 있다. 특히 그림 8, 9의 세 번째 줄의 결과를 보면 주름의 세밀화와 분산 현상이 잘 나타나고 있다. 다만 그림 9의 펼쳐진 결과 그림은 다소 단순하고 부자연스러워 보인다. 이것은 물체에 의해 직물에 작용하는 힘이 대칭적이기 때문이고, 직물메쉬의 최소 구성단위인 벡텍스간의 거리가 세밀한 변형을 표현해 줄 수 있을만큼 충분히 작지 않기 때문이다. 수천 개 이상의 벡텍스로 시뮬레이션 할 경우, 더 자연스럽게 세밀한 표현이 가능하다.





탄성모델( $\alpha=0$ ) 탄성모델( $\alpha=0.8$ )  
그림 8 구에 천을 덮은 후 걷어내는 실험 1



탄성모델( $\alpha=0$ ) 탄성모델( $\alpha=1.0$ )  
그림 9 구에 천을 덮은 후 걷어내는 실험 2

6. 결론

직물 시뮬레이션에 관한 지금까지의 연구는 탄성 직물 모델 기반이었다. 그러나 실제의 직물은 탄성, 소성 변형특성을 모두 지니고 있다. 본 논문에서는 기존의 탄성 모델에 소성 모델을 접목하여 실제 직물에서 나타나는 소성 변형특성을 시뮬레이션 하였다. 그 결과 직물 전체에 골고루 분포되는 작고 많은 주름을 표현할 수 있었고, 격인듯한 주름과 변형 후에 퍼지지 않고 남는 구김을 표현할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 소성모델은 성긴 메쉬로도 탄성 모델에 비해 더 세밀하고 많은 주름을 얻을 수 있었고, 실제 옷의 움직임과 변형성에 더욱 유사한 시뮬레이션 결과를 얻었다. [2]의 연구가 실크처럼 탄력있고 민감한 움직임을 보이는 직물 시뮬레이션에 효과적이라면, 본 논문에서의 기법은 면과 같이 세밀한 주름과 구김이 많으면서도 차분한 움직임을 보이는 직물의 느낌을 잘 살려주고 있다.

본 연구의 소성 직물모델은 변형률과 그에 따른 노드 간 초기길이의 변경, 그리고 교차연결 퍼짐강성을 반영하여 직물의 소성변형 현상을 다루었다. 이러한 방법은 실험 결과에서도 알 수 있듯이 일시적으로 물체에 덮혔다 펼쳐진 천에도 주름의 흔적과 구김이 남는 비현실적인 부분을 드러내고 있다. 진행중인 연구에서는 변형률

뿐만이 아닌 변형상태의 지속시간과 반복정도에 종속적인 소성변형특성을 모델링 할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Baraff, D., and Witkin, A. Large steps in cloth simulation. *In Computer Graphics(SIGGRAPH '98 Proceedings)*, Pages 43-54, 1998.
- [2] Choi, K., And Ko, H. Stable but responsive cloth. *In Computer Graphics(SIGGRAPH '02 Proceedings)*, Pages 604-611, July 2002.
- [3] Sunil Hadap, Endre Bangerter, Pascal Volino, Nadia Magnenat-Thalmann. Animating Wrinkles on Clothes *In Computer Graphics(IEEE '99 Proceedings)*, Pages 175-183.
- [4] O'Brien, J. F., and Hodgins, J. K. Graphical modeling and animation of Brittle fracture. *In Computer Graphics(SIGGRAPH '99 Proceedings)*, August 1999.
- [5] O'Brien, J. F., and Hodgins, J. K. Graphical modeling and animation of Ductile fracture. *In Computer Graphics(SIGGRAPH '02 Proceedings)*, Pages 291-294, July 2002.
- [6] Ascher, U., and Boxerman, E. On the modified conjugate gradient method in cloth simulation. *(submitted to) The Visual Computer, 2002.*
- [7] J. Shewchuk. An introduction to the conjugate gradient method without the agonizing pain.

Technical Report CMU-CS-TR-94-125, Carnegie Mellon University, 1994.

- [8] Crandall, Dahl, Lardner. "An Introduction to the Mechanics of Solids(2nd ed)," McGraw-Hill 1978.
- [9] Donald H. House and David E. Breen. "Cloth Modeling and Animation," A K Peters 2000.
- [10] Edward R. Champion, JR. "Numerical Methods for Engineering Applications," Marcel Dekker 1993.
- [11] Francoise Tisseur, Karl Meerbergen. The quadratic eigenvalue problem.
- [12] Norman E. Dowling. "Mechanical Behavior of Materials(2nd ed)," Prentice Hall 1999.
- [13] R.C. Hibbeler. "Mechanics of Materials," Prentice Hall 1999.
- [14] Robert Bridson, Ronald P. Fedkiw, and John Anderson. Robust treatment of collisions, contact, and friction for cloth animation. *In Computer Graphics(SIGGRAPH' 02 Proceedings)*, Pages 594-603, July 2002.
- [15] S.S.Rao. "Mechanical Vibration, 2nd ed," Addison-Wesley 1992.
- [16] Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu. "Introduction to Finite Elements in Engineering," Prentice Hall 2000.
- [17] Volino, P., and Magnenat-Thalmann, N. Implementing fast cloth simulation with collision response. *In Proceedings of the Conference on Computer Graphics International(CGI-00)*, pages 257-268, 2000.
- [18] Volino, P., and Magnenat-Thalmann, N. Comparing efficiency of integration methods for cloth animation. *In Proceedings of the Conference on Computer Graphics International(CGI-01)*, 2001.

학과 정교수. 관심분야는 컴퓨터 그래픽스, 캐릭터 애니메이션, 디지털 방송



송 창 군

1981년 서울대학교 계산통계학과 이학사  
1983년 한국과학기술원(KAIST) 공학석사.  
1992년 University of Oklahoma (EECS) 공학박사. 1984년~현재 한림대학교 정보통신공학부 교수. 관심분야는 그래픽스, 가상현실, 과학적 가시화, 게임, 애니메이션



이 종 완

1985년 서울대학교 물리학과 이학사  
1988년 독일 뮌헨대학교(University of Munich) 물리학과 이학석사. 1993년 독일 뮌헨대학교(University of Munich) 물리학과 이학박사. 1993년~1998년 LG 종합기술원 책임연구원. 1998년~현재 한림대학교 전자물리학과 부교수. 관심분야는 물리기반모델링, 과학적 가시화, 게임, 애니메이션



오 동 훈

2002년 서강대학교 공과대학 기계공학과 학사. 2004년 서강대학교 영상대학원 미디어공학과 석사. 현재 서강대학교 영상대학원 미디어공학과 박사과정



정 문 렬

1980년 서울대학교 자연대학 계산통계학과 학사. 1982년 한국과학기술원 전산학과 석사. 1992년 University of Pennsylvania 전산학과 Ph.D. 1982년~1986년 국방과학연구소 연구원. 1992년~1994년 일본 구주공업대학 조교수. 1994년~1999년 숭실대학교 컴퓨터학부 조교수. 정보과학회 컴퓨터 그래픽스 연구회 발족. 현재 컴퓨터 그래픽스학회 이사. 현재 방송공학회 학술위원. 현재 정보 과학회 컴퓨터 그래픽스 연구회 부위원장. 현재 서강대학교 영상대학원 미디어공