

---

# 실시간 옷감 애니메이션과 LOD 제어를 위한 계층적 시뮬레이션

강 영 민\*

Hierarchical Simulation for Real-time Cloth Animation and LOD control

Young-Min Kang\*

---

이 논문은 2005학년도 동명정보대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

---

## 요 약

본 논문에서는 사실적인 질량-스프링 기반 옷감 모델의 애니메이션을 효율적이며 사실적으로 생성하기 위해 근사된 암시적 적분법을 계층적으로 적용하는 기법을 제안한다. 제안된 계층적 시뮬레이션 방법은 매우 많은 정점을 가진 메쉬(mesh)의 사실적인 움직임을 상호작용적으로 생성할 수 있다. 이 기법은 암시적 적분법을 근사하는 빠르고 안정적인 방법을 사용한다. 이 근사 기법은 효율적이기는 하지만 극도로 부정확하며 지나치게 댐핑(damping)이 많이 일어난다. 본 논문에 제안된 계층적 시뮬레이션 기법은 메쉬 구조를 다중 단계로 구성하여 옷감 모델의 사실적인 외형을 표현하도록 하며, 각각의 단계에 시뮬레이션을 적용할 때 현재 단계의 메쉬에 존재하는 일부 질점이 이전 단계의 시뮬레이션 결과를 따르도록 한다. 이러한 계층적 시뮬레이션 방법은 많은 수의 질점으로 구성된 옷감 모델의 사실적인 동작을 효율적으로 생성한다. 또한 계층적 기법은 옷감 모델에 사실적인 주름을 생성할 수 있도록 하며, 계층적 단계에 따라 스프링의 수축 저항을 제어할 수 있도록 하여 주름의 패턴도 쉽게 제어할 수 있도록 한다.

## ABSTRACT

In this paper, a hierarchical simulation with an approximate implicit method is proposed in order to efficiently and plausibly animate mass-spring based cloth models. The proposed hierarchical simulation method can generate realistic motion of extremely fine mesh in interactive rate. The proposed technique employs a fast and stable simulation method which approximates the implicit integration. Although the approximate method is efficient, it is extremely inaccurate and shows excessively damped behavior. The hierarchical simulation technique proposed in this paper constructs multi-level mesh structure in order to represent the realistic appearance of cloth model and performs simulation on each level of the mesh with constraints that enforce some of the mass-points of current level to follow the movement of the previous level. This hierarchical method efficiently generates a plausible movement of a cloth model composed of large number of mass points. Moreover, this hierarchical method enables us to generate realistic wrinkles on the cloth, and the wrinkle pattern on the cloth model can be easily controlled because we can specify different contraction resistance force of springs according to their hierarchical level.

## 키워드

옷감 애니메이션, 질량-스프링 모델, 암시적 방법, 계층적 시뮬레이션

## I. 서론

옷감 모델의 사실적인 동작을 효율적으로 생성하는 것은 어려운 문제이다. 다양한 방법이 제안되었지만 [2,14,17,19], 상호작용적 환경에서 그럴듯한 수준의 주름을 가진 옷감 모델의 움직임을 사실적으로 생성하는 것은 여전히 어려운 문제이다. 제안된 다양한 기법에 사용된 모델들이 서로 다르지만, 거의 모든 방법들이 옷감의 움직임을 미분 방정식의 형태로 표현하고 이를 수치적으로 적분하여 시물레이션을 수행한다.

질량-스프링 모델은 간단하면서도 직관적인 방법으로 옷감과 같이 변형 가능한 물체를 표현하며, 많은 기법들이 이 간단한 모델을 이용하여 옷감의 동작을 표현하였다 [4, 6, 14]. 이 모델은 옷감을 스프링으로 연결된 질점의 집합으로 표현하며, 각 질점의 위치는 변형에 의해 생성되는 스프링 힘을 수치적으로 적분하여 얻는다.

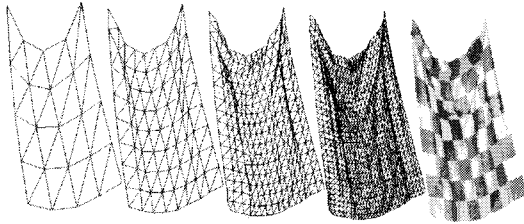


그림 1. 계층적 메쉬 구조  
Fig. 1 Hierarchical Mesh Structure

수치 적분을 수행하는 가장 간단한 접근법은 명시적 오일러 적분을 수행하는 것이다. 그러나 명시적 기법은 적분 과정이 불안정하다는 잘 알려진 문제를 가지고 있다. 이러한 불안정성 문제는 지나치게 작은 시간 간격을 요구하여 옷감 애니메이션을 효율적으로 생성할 수 없게 한다 [1, 6, 9].

불안정성 문제는 암시적 적분법을 통해 피할 수 있다 [10]. 바라프(Baraff)와 윌트킨(Witkin)은 암시적 기법을 이용하여 안정적이며 효율적인 옷감 애니메이션 기법을 제안하였다 [1]. 그러나 암시적 적분법은 대규모 선형 시스템을 풀어야 한다는 단점이 있어 실시간 환경에 그대로 적용하기에는 여전히 문제가 있다.

암시적 적분법의 계산 부담을 줄이기 위해 미리 계산된 역행렬을 이용한 기법이 제안되었다 [6]. 이 방법은 간단한 옷감 모델에는 잘 동작하지만, 옷감의 기하구조가

복잡할 경우에는 제대로 동작하지 않는다. 많은 수의 질점을 가진 메쉬로 표현된 옷감을 상호작용적 환경에서 움직이게 하려면 더욱 효율적인 기법이 요구된다. 이 논문에서는 메쉬 상태를 더욱 효율적으로 갱신할 수 있는 근사 기법을 사용하는데, 이 기법의 가장 큰 문제는 안정성을 위해 정확성을 포기한다는 것이다. 본 논문이 이러한 안정적이지만 부정확한 기법을 복잡한 옷감에 계층적으로 적용함으로써 애니메이션 결과의 사실성을 획기적으로 높이고, 옷감 모델의 상세도를 필요에 따라 조절하여 계산 부담을 더욱 경감할 수 있는 기법을 제안한다.

## II. 안정적이며 구현이 용이한 근사 기법

옷감 모델의 안정적인 애니메이션을 생성하기 위해서는 암시적 수치 적분법을 사용해야 한다. 따라서 다음 상태의 힘  $f^{t+h}$ 를 포함하는 역 오일러 기법을 다음과 같이 적용하여 안정적인 옷감 애니메이션을 생성할 수 있다 [1, 9, 6]:

$$\begin{pmatrix} v^{t+h} \\ x^{t+h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v^t + hM^{-1}f^{t+h} \\ x^t + hv^{t+h} \end{pmatrix} \quad (1)$$

이때  $h$ 는 시간 간격이며, 질점의 수를  $n$ 이라고 할 때,  $v$ 는 각 질점의 속도를 원소로 하는  $3n$  차원의 벡터로  $[v_1, v_2, \dots, v_n]^T$ 를 의미한다.  $f$ 와  $x$  역시 각 질점의 힘과 위치를 원소로 하는  $3n$  차원 벡터이다. 행렬  $M$ 은  $3n \times 3n$ 의 질량 행렬이다. 암시적 적분법에 의한 옷감 애니메이션은 질점의 속도 변화 벡터인  $\Delta v^{t+h} = hM^{-1}f^{t+h}$ 를 계산하는 문제인데, 문제는 안정성을 위해 도입된 다음 상태의 힘  $f^{t+h}$ 를 현재 스프링 상태로 계산할 수 없다는 것이며, 이 값은 다음과 같이 근사를 통해 얻어야 한다.

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

이때  $J$ 는 힘 벡터를 각 정점의 위치로 이루어진 벡터  $x$ 로 미분한 자코비안(Jacobian) 행렬이며, 질량 스프링 모델의 애니메이션은 결국 다음과 같은  $Ax = b$  형태의

선형 시스템으로 표현할 수 있다:

$$(M - h^2J)\Delta v^{t+h} = h(f^t + hJv^t) \quad (3)$$

옷감 애니메이션은 식 3에 나타난 선형 시스템의 해를 구하는 문제가 되며 행렬  $M - h^2J$ 는 매우 큰 행렬이다. 식 3의 우변은 스프링에서 발생하는 힘에 점성력  $hJv^t$ 이 추가된 것으로 다음과 같이 연결된 질점만을 고려함으로써 쉽게 계산할 수 있다[5]:

$$\bar{f}_i^t = f_i^t + h \sum_{(i,j) \in E} J_{ij}(v_j^t - v_i^t) \quad (4)$$

따라서 옷감 애니메이션은 결국 다음과 같은 선형 시스템으로 표현된다.

$$(M - h^2J)\Delta v^{t+h} = h\bar{f}^t \quad (5)$$

복잡한 메쉬의 효율적인 애니메이션을 위해서는 식 5에 나타난 선형 시스템을 근사하여 각각의 질점에 대해 명시적 적분처럼 한 번의 갱신식을 적용하여 변화한 상태를 얻을 수 있도록 하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 미리 계산된 필터 방식[6]에서 사용된 자코비안 행렬 근사를 적용하였다. 즉,  $J_{ij}$ 는 질점  $i$ 와  $j$ 를 연결하는 스프링의 스프링 상수  $\kappa_{ij}$ 로 근사되며, 대각 성분인  $J_{ii}$ 는  $i$ 에 연결된 모든 스프링의 스프링 상수를 더해 부호를 바꾼  $-\sum_{j \neq i} \kappa_{ij}$ 로 근사한다. 이 값을 식 5에 적용하고 자코비 반복법을 2회 적용하여 각각의 질점이 가지는 속도 변화를 계산하면 다음을 얻는다.

$$\Delta v_i^{t+h} = \frac{\bar{f}_i^t h + h^2 \sum_{(i,j) \in E} \frac{\kappa_{ij} \bar{f}_j^t h}{m_j + h^2 \sum_{(i,l) \in E} \kappa_{jl}}}{m_i + h^2 \sum_{(i,j) \in E} \kappa_{ij}} \quad (6)$$

스프링 모델에 의해 생기는 힘과 점성력을 구하는 것을 간단한 작업이므로  $\bar{f}_i^t$ 를 구하는 것은 매우 쉽다. 또한  $\sum_{(i,j) \in E} \kappa_{ij}$ 와  $\sum_{(j,l) \in E} \kappa_{jl}$ 이 상수이므로, 식 6을 통해 각각의 질점에 대해 속도 변화를 계산하는 것은 매우 빠르게 이루어질 수 있다.

### III. 근사 기법의 문제

식 6에 나타난 근사 기법은 옷감 모델의 경직도, 즉 스프링 상수가 큰 값을 가질 때에도, 매우 큰 시간 간격  $h$ 를 사용하여 효율적인 애니메이션을 생성할 수 있는 수치적 안정성을 보인다.

식 6의 근사 기법이 충분한 안정성을 보이기는 하지만, 매우 중요한 단점을 가지고 있다. 이 방법은 안정성을 보장하기 위하여 옷감 모델의 움직임에 매우 큰 댐핑(damping)을 도입한 것이다. 즉, 스프링의 상수가 매우 큰 값이 될 때, 안정성을 유지하기 위해 전체적인 움직임이 느려지게 되는 것이다. 이러한 문제는 옷감을 매우 조밀한 메쉬로 표현했을 때에도 발생한다. 매우 많은 수의 질점으로 이루어진 조밀한 메쉬는 그 외형을 유지하기 위하여, 각각의 스프링이 매우 높은 스프링 상수를 가져야 하며, 이들의 움직임을 식 6로 근사하여 생성할 경우, 지나친 댐핑 때문에 점성이 높은 물체처럼 보이게 된다.

### IV. 사실적인 움직임을 위한 계층적 기법

높은 기하복잡도를 가진 물체의 움직임을 자연스럽게 생성할 수 없다는 근사 기법의 문제를 해결하기 위해, 본 논문의 기법은 계층적 시물레이션을 적용한다. 이 계층적 기법은 하나의 옷감 객체를 표현하기 위하여 질점의 수가 적고 기하복잡도가 낮은 초기 메쉬와 매우 많은 질점을 가진 메쉬 모델 사이에 다양한 단계의 기하적 복잡도를 가진 메쉬 모델을 가지도록 만든다. 그림 2는 계층적 시물레이션 기법의 개념을 보여주고 있다. 첫 번째 줄에 나타나 있는 세 개의 메쉬 구조는 옷감 모델의 계층적 구성을 보이고 있다. 하나의 옷감 모델은 이렇게 몇 개의 기하 복잡도에 따른 계층을 가지고 있다. 초기 메쉬, 즉 수준 0의 메쉬는 가장 적은 수의 메쉬 정점과 간선을 가지고 있다.

그림 2의 아래쪽에는 계층적 시물레이션의 동작을 개념적으로 보여주고 있다. 첫 번째 줄의 메쉬들이 시간  $t=0$ 일 때의 상태라며, 두 번째 줄의 메쉬들은 모두  $t=h$  즉 시간  $h$ 가 지난 후의 모습이다. 우선 시물레이터는 초기 메쉬의 다음 상태를 계산한다. 이렇게 구해진 결과 메쉬에서 각 정점의 위치는 그 다음 단계의 메쉬 구조에 제한조건으로 사용된다. 즉 시간  $h$ 에서 두 번째

(level 1) 메쉬 상태는 이전 단계인 첫 번째 (level 0) 메쉬의 상태를 가져와서 대응되는 정점에 적용하는 것이다. 이런 과정을 반복적으로 모든 단계에 적용하여 가장 많은 질점을 가진 단계까지 시뮬레이션을 하게 된다.

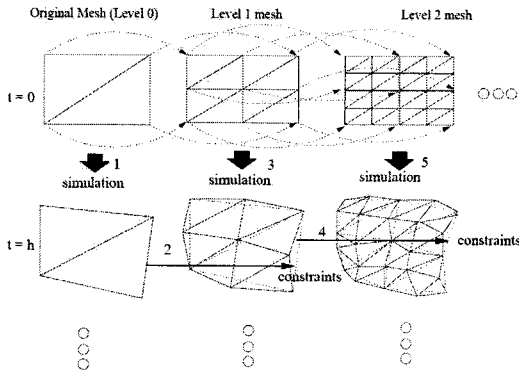


그림 2. 계층적 시뮬레이션 개념  
Fig. 2 Hierarchical Simulation Concepts

계층적 시뮬레이션에 사용되는 시뮬레이션은 정확도가 매우 낮은 근사 기법이다. 그러나 이 근사 기법은 적은 수의 메쉬 질점에 대해서는 만족할만한 수준의 결과를 보여준다. 따라서 질점의 수가 적은 초기 메쉬의 움직임은 정확도가 높은 상태를 유지할 수 있다. 이 결과를 이후 단계의 제한조건으로 사용함으로써 전체적인 사실성을 높일 수 있는 것이다. 따라서 근사 기법의 효율성을 유지하면서 사실적인 결과를 얻을 수가 있다.

단계  $k$  메쉬의 질점 수를  $n_k$ 라고 하자. 이 단계를 구성하는 질점들의 위치는  $(x_1, x_2, \dots, x_{n_k})$ 를 간단히  $x(1:n_k)$ 로 표현하자. 이들 메쉬 정점의 위치 가운데  $x(1:n_{k-1})$ 는 이전 단계에서 얻어진 값으로 제한된다. 따라서 단계  $k$ 에 적용되는 시뮬레이션은 단지  $x(n_{k-1}+1:n_k)$ 에 대해서만 적용되는 것이다. 현재 단계의  $n_k$  개 질점에 대해 이전 단계에 대응되는  $n_{k-1}$  개의 질점을 이전 단계에서 얻은 결과와 동일하게 만드는 절차를  $C(x(1:n_k), n_{k-1})$ 라고 하자. 또  $S(x(n_{k-1}+1:n_k))$ 를 현재 단계의  $n_k$  개 질점 중에서 앞 단계에 의해 결정되는 질점을 제외한 나머지에 대해 시뮬레이션을 수행하는 작업이라고 정의하자. 그러면 계층적 시뮬레이션은 이 두 개의 작업을 반복적으로 적용하는 것이 된다.

초기 메쉬에 대해서는 식 6에 나타난 근사 기법을 적용할 수밖에 없다. 이 식에서는 질점  $j$ 에 연결된  $j$ 의 속도 변화를  $\Delta v_{j+k}$ 를 간단히 자코비 반복 1회를 수행한  $\tilde{f}^t_j/m_i(h^2 \sum_{(i,j) \in E^{k_{ij}}})$ 로 근사하고 있다. 그러나 그 이후의 기하 단계에서는 이 값을 좀 더 정확하게 얻을 수가 있다. 만약 어떤 질점  $j$ 가 자신의 속도 변화를 계산하기 위해 연결된  $j$  질점의 속도 변화를 알아야 할 경우, 이  $j$ 가 이전 기하 단계에 존재하는 질점이라면, 이전 기하 단계를 시뮬레이션하여 얻은 속도 변화를 사용하는 것이 더욱 정확한 것이다.

단계  $k-1$ 에서 계산된 질점  $j$ 의 속도변화를  $\Delta^{k-1}v_{j+k}$ 라 하자. 단계  $k$ 의 메쉬를 시뮬레이션 할 때, 이전 단계의 결과를 식 6의  $\tilde{f}^t_j/m_i(h^2 \sum_{(i,j) \in E^{k_{ij}}})$ 를 대신하여 사용하는 것이다.  $j$ 가 이전 단계의 메쉬에 존재하지 않는 질점이라면,  $j$ 는 이전 단계에 존재했던 두 개의 질점  $p_1$ 과  $p_2$ 의 연결 에지 사이에 삽입된 정점이다. 따라서 이 경우는 두 질점의 속도변화를 이용하여  $(\Delta^{k-1}v_{p_1+k} + \Delta^{k-1}v_{p_2+k})/2$ 로 근사할 수 있다. 이렇게 어떤 질점  $j$ 의 속도 변화를 이전 단계인  $k-1$ 의 결과를 이용하여 근사한 값을 간단히  $\Delta_{app}^{k-1}v_{j+k}$ 로 표현하면, 식 6의 시뮬레이션은 이제 다음과 방법으로 수행이 가능하다.

$$\Delta v_i^{t+h} = \frac{\tilde{f}_i^t h + h^2 \sum_{(i,j) \in E^{k_{ij}}} \Delta_{app}^{k-1} v_j^{t+h}}{m_i + h^2 \sum_{(i,j) \in E^{k_{ij}}} \kappa_{ij}} \quad (7)$$

식 6에 의한 시뮬레이션을  $S(x(n_{k-1}+1:n_k))$ 라고 하고 7을 이용하는 것을  $S'(x(n_{k-1}+1:n_k))$ 라고 하자. 계층적 시뮬레이션은 표 1과 같은 의사 코드로 표현할 수 있다.

표 1. 계층적 시뮬레이션 의사 코드  
Table. 1 Pseudocode for hierarchical simulation

<b>Proc Hierarchical-Simulation</b>
<b>Input</b> : level $L$ mesh points $x^t(l:n_L)$
<b>Output</b> : updated mesh points $x^{t+h}(l:n_L)$
$x^{t+h}(l:n_0) \leftarrow S(x^t(l:n_0))$
<b>For</b> $k$ from 1 to $L$
$C(x^t(l:n_k), n_{k-1})$
$x^{t+h}(n_{k-1}+1:n_k) \leftarrow S'(x^t(n_{k-1}+1:n_k))$
<b>End For</b>
<b>End Proc</b>

V . 실험 결과

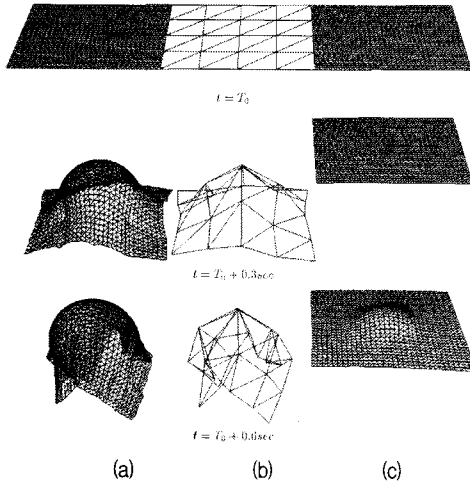


그림 3. 계층적 모델과 많은 질점으로 잘게 분할된 메쉬에 근사 기법을 적용했을 때의 운동 특성: (a) 계층적 모델 (b) 계층적 모델의 초기 메쉬 (c) 잘게 분할된 메쉬

Fig. 3 Motion properties of hierarchical model and finely discretized mesh model when the approximate implicit method applied: (a) hierarchical model (b) corresponding coarse mesh (c) finely discretized mesh

계층적 시물레이션은 기하복잡도가 매우 높은 메쉬로 표현된 옷감 객체의 사실적인 운동을 효율적으로 생성할 수 있다. 이 기법은 근사 기법의 지나친 뎀핑 효과는 피하면서는 다음 상태를 빠르게 갱신할 수 있는 특성은 그대로 유지한다. 그림 3은 계층적 시물레이션과 식 6의 근사기법을 통해 생성한 결과를 비교하고 있다. 그림의 왼쪽 열은 계층적 시물레이션을 적용한 결과이며, 가운데 열은 가장 적은 수의 질점을 가진 초기 메쉬에 식 6의 근사 기법을 적용한 결과이며, 오른쪽 열은 식 6의 근사 기법을 복잡도가 높은 메쉬에 적용한 결과이다.

그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이, 암시적 기법을 근사한 방법은 지나친 뎀핑을 보여 낙하 속도도 느리게 된다. 메쉬의 외형 역시 지나치게 부드러운 곡면을 생성하여 옷감의 사실적인 외형을 만들어내지 못하고 있다. 반면 계층적 시물레이션 기법은 그림 3의 (b)에 나타나 있는 초기 메쉬의 움직임에 따라서 많은 질점을 가진 메쉬를 생성하므로 그럴듯한 모습의 외형을 생성할 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 계층적 시물레이션은 매우 많은 수의 질점을 가진 복잡한 메쉬의 사실적인 동작을 상호작용적 환경에서 효율적으로 생성할 수 있다.

본 논문의 기법의 유효성을 실험하기 위하여 그림 4와 같이 실시간 애플리케이션에 활용하기에 충분한 복잡도를 가진 메쉬 구조에 계층적 시물레이션을 적용하였다. 그림 4의 옷감 모델은 8192 개의 질점으로 이루어졌으며, 실시간 환경에서 시물레이션 되었다. 그림에서 보는 바와 자연스러운 외형의 결과를 생성할 수 있었다.

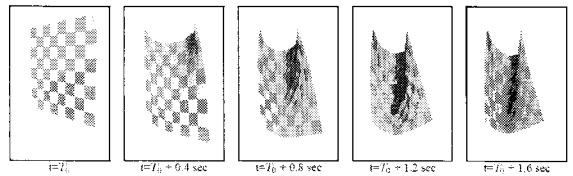


그림 4. 질점의 수가 8192인 메쉬의 실시간 시물레이션

Fig. 4 Real-time simulation of mesh with 8192 mass-points

그림 5는 계층적 시물레이션과 근사 암시적 기법의 결과를 비교하고 있다. 그림 5의 (a)와 (b)는 모두 동일한 수의 질점으로 이루어진 메쉬 구조로 표현된 옷감 모델이다. 여기서 그림 5의(a)의 모델은 계층적 시물레이션 기법을 이용하여 생성된 애니메이션 결과를 보이고 있으며, 그림 5의(b)는 근사 암시적 기법만을 적용한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 그림 5의(b)에 나타난 결과는 지나친 뎀핑 때문에 옷감과 같은 느낌의 외형을 생성하지 못하고 있다. 이와 달리 그림 5의 (a)의 결과는 사실적인 옷감 애니메이션을 생성하고 있다.

그림 6은 계층적 시물레이션의 각 단계에서 스프링이 수축에 저항하는 힘을 조절함으로써 더욱 사실적인 주름을 생성할 수 있음을 보이고 있다. 그림 5의 모든 옷감 객체는 동일한 정점과 간선으로 이루어진 모델이며, 이 메쉬는 4 개의 계층으로 모델링 되어 있다. 그림 6의 (a)는 모든 계층이 동일한 수축 저항, 즉 (1,1,1)을 가지고 있다. 이는 모든 계층에서 스프링이 스프링 상수가 정의하는 힘을 생성함을 의미한다. 이와 달리 (b)는 수축 저항이 첫 번째 계층과 두 번째 계층에서 0.5로 설정되어 있다. 즉, 이 모델은 (0.5, 0.5, 1, 1)로 표현할 수 있다. 이는 첫 번째와 두 번째 계층의 스프링은 길이가 수축했을 때, 원래 스프링이 생성하는 힘의 0.5 배만을 일으킨다는 것이다. 이는 두 계층의 수축이 용이하게 하여, 주름이

더 많이 발생하게 하는 것이다. 그림 6은 이렇게 수축 저항을 조절함으로써 옷감의 주름 상태를 제어할 수 있음을 보이고 있다.

그림 7은 본 논문의 기법을 이용하여 생성한 옷감 애니메이션의 결과를 보이고 있다.

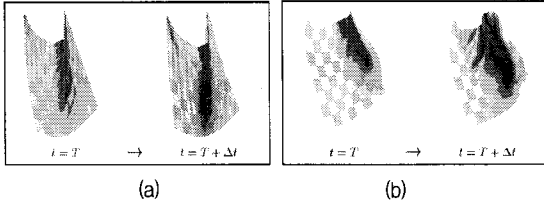


그림 5. 계층적 시뮬레이션과 근사 기법의 비교: (a) 계층적 모델 (b) 1계층 근사 암시적 기법  
 Fig. 5. Comparison between hierarchical method and approximate implicit method: (a) hierarchical model (b) 1-layer approximate implicit method

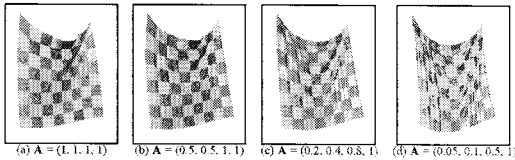


그림 6. 수축 저항을 통한 주름 제어  
 Fig. 6. Wrinkle control with contraction resistance

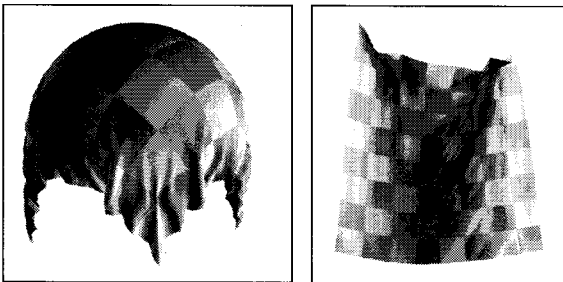


그림 6. 제안된 기법을 이용한 애니메이션 생성 결과  
 Fig. 6. Animation results with the proposed method

## VI . 결론

본 논문에서 우리는 옷감과 같이 얇고 변형 가능한 객체의 사실적이고 효율적인 애니메이션을 위한 계층적 시뮬레이션 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 질량-스프링 기반 모델의 다음 상태를 선형 시간에 안정적으로

구할 수 있는 근사 암시적 기법을 사용하면서도, 이 근사 암시적 기법이 가지고 있는 지나친 댐핑 효과를 피하여 많은 질점을 가진 메쉬나 스프링 상수가 높은 객체에서 발생하는 부정확하고 비현실적인 계산 결과를 크게 개선할 수 있다.

제안된 기법에 사용되는 상태 갱신식은 암시적 기법의 안정성을 이용하며, 명시적 기법과 같이 한번의 연산으로 다음 상태를 얻을 수 있기 때문에 실시간 애니메이션에 적용하기에 충분한 안정성과 효율성을 가지고 있다. 또한 본 논문에서 제안된 기법은 옷감 객체의 기하 복잡도 단계를 기본적으로 포함하고 있기 때문에 옷감 애니메이션에서 옷감의 상세도 제어를 바로 수행할 수도 있다.

## 참고문헌

- [ 1 ] David Baraff and Andrew Witkin. Large steps in cloth simulation. *Proceedings of SIGGRAPH 98*, pp. 43-54, 1998.
- [ 2 ] M. Carignan, Y. Yang, N. M. Thalmann, and D. Thalmann, Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 92)*, 26(2):99-104, July 1992.
- [ 3 ] G. Celniker and D. Gossard. Deformable curve and surface finite elements for free-form shape design. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 91)*, 25(4):257-266, July 1991.
- [ 4 ] Y. Chen, Q. Zhu, and A. Kaufmann. Physically-based animation of volumetric objects. *Computer Animation '98*, pages 154-169, June 1998.
- [ 5 ] G. Debunne, M. Desbrun, A. Barr, and M.-P. Cani. Interactive multiresolution animation of deformable models. *Computer Animation and Simulation '99*, September 1999.
- [ 6 ] M. Desbrun, P. Schröder, and A. Barr. Interactive animation of structured deformable objects. *Graphics Interface '99*, pp. 1-8, 1999.
- [ 7 ] S. Gottschalk, M. Lin, and D. Manocha. OBB-tree: A hierarchical structure for rapid interference detection.

- Proceedings of SIGGRAPH '96, pages 171-180, August 1996.
- [ 8 ] S. Hadap, E. Bangarter, P. Volino, and N. Magnenat-Thalmann. Animating wrinkles on clothes. *IEEE Visualization '99*, pages 175-182, October 1999.
- [ 9 ] M. Kass. An Introduction to continuum dynamics for computer graphics. In SIGGRAPH Course Note: Physically-based Modeling. ACM SIGGRAPH, 1995.
- [10] S. Nakamura. Initial value problems of ordinary differential equations. In *Applied Numerical Methods with Software*, pages 289-350. Prentice-Hall, 1991.
- [11] H. N. Ng and R. L. Grimsdale. Computer graphics techniques for modeling cloth. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 16(5):28-41, September 1996.
- [12] H. Okabe, H. Imaoka, T. Tomiha, and H. Niwaya. Three dimensional apparel cad system. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 92)*, 26(2):105-110, July 1992.
- [13] J. Plath. Realistic modelling of textiles using interacting particle systems. *Computers & Graphics*, 24(6):897-905, December 2000.
- [14] X. Provot. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. *Graphics Interface '95*, pages 147-154, May 1995.
- [15] X. Provot. Collision and self-collision handling in cloth model dedicated to design. *Computer Animation and Simulation '97*, pages 177-190, September 1997.
- [16] D. Terzopoulos and K. Fleischer. Modeling inelastic deformation: Viscoelasticity, plasticity, fracture. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 88)*, 22(4):269-278, August 1988.
- [17] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, and K. Fleischer. Elastically deformable models. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 87)*, 21(4):205-214, July 1987.
- [18] D. Terzopoulos and A. Witkin. Physically based models with rigid and deformable components. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 8(6):41-51, November 1988.
- [19] P. Volino, M. Courshesnes, and N. M. Thalmann. Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects. *Proceedings of SIGGRAPH 95*, pages 137-144, August 1995
- [20] P. Volino and N. M. Thalmann. Efficient self-collision detection on smoothly discretized surface animations using geometrical shape regularity. *Computer Graphics Forum*, 13(3):155-166, 1994.
- [21] A. Witkin and D. Baraff. Differential equation basics. In *SIGGRAPH Course Note: Physically-based Modelling*. ACM SIGGRAPH, 1994.

저자소개

강 영 민 (Young-Min Kang)



1996 부산대학교 전산학과 이학사  
 1999 부산대학교 전산학과 이학석사  
 2003 부산대학교 전산학과 이학박사

2003년~2005년 한국전자통신연구원  
 2005년~ 현재 동명정보대학교 게임공학과  
 ※ 관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 물리기반 애니메이션