

적은 감쇠효과를 가지는 의복 시뮬레이션을 위한 새로운 암시적 적분법

오승우⁰, 원광연
한국과학기술원 전자전산학과 전산학전공
(redmong, wohn)@vr.kaist.ac.kr

A new implicit integration method for simulation of low-damped cloth

Seungwoo Oh⁰, Kwangyun Wohn
Korea Advanced Institute of Science and Technology

요 약

본 연구는 적은 감쇠(damping) 효과를 가지면서도 안정적으로 의복의 움직임을 생성할 수 있는 시뮬레이션 방법을 제안한다. 최근 의복 시뮬레이션 분야에서는 뛰어난 수치적 안정성을 지닌 암시적 적분법(implicit integration)이 널리 이용되어 왔다. 그러나, 암시적 적분법은 선형화 과정에서 과도한 감쇠효과가 발생하고, 이 감쇠효과는 내부 변형 없는 회전운동 시에도 과도하게 나타나므로, 옷감의 회전 이동이나 주름의 자연스런 움직임을 크게 방해한다. 본 연구는 불필요한 감쇠효과를 줄이고 안정적으로 의복의 움직임을 표현할 수 있는 새로운 암시적 적분법을 제안한다. 제안하는 방법은 선형화 과정에서 발생하는 내부 감쇠력을 회전운동이 아닌 순수한 내부 변형에 대해서만 발생하도록 모델링하며, 이렇게 계산된 내부 감쇠력을 역학식에 안정적으로 반영한다. 실험 결과는 제안하는 방법이 기존의 방법들에 비해 보다 다양한 재질의 옷감을 과도한 감쇠 효과 없이도 안정적으로 실시간에 생성할 수 있음을 보여주었다.

1. 서론

본 연구의 궁극적인 목표는 의류 전자상거래 시스템의 개발에 있다. 의류 전자상거래 시스템은 가상 의복을 입은 아바타의 애니메이션을 통해 사용자에게 착의 모습을 미리 경험할 수 있게 함으로써, 의류 구매를 촉진시킬 수 있는 수단으로 최근 크게 관심이 집중되고 있다[6]. 이러한 목표를 달성하기 위해 이 시스템은 실시간에 다양한 재질의 의복의 움직임을 사실적으로 시뮬레이션 할 수 있어야 한다.

의복의 사실적인 움직임을 표현하기 위해서 흔히 물리 기반 모델이 사용된다. 물리 기반 모델은 크게 연속체 모델(Continuum Model)과 입자 시스템 모델(Particle-System Model)로 나눌 수 있다(각 모델의 [14]). 각 모델에 따라 역학식이 유도되고 이것이 옷감의 움직임을 표현한다. 연속체 모델에서는 보통 유한요소법(Finite Element Method)을 통해 역학식이 계산(이산화)되는데,

유한요소의 수를 늘리거나 모양 함수(shape function)의 차수를 높임으로써 역학식을 보다 정확하게 계산할 수 있다. 그러나 중요한 것은 내부 힘을 선형적으로 모델링 하여도 시각적으로 충분히 사실적이라는 점이다[1]. 따라서 1차 모양 함수를 사용하는 유한요소법만으로도 충분히 좋은 결과를 얻을 수 있다. 1차 모양 함수를 사용하는 경우 얻어지는 결과식은 입자 시스템 모델의 최중속과 유사하다. 식의 형태가 유사할 뿐 아니라, 움직임을 계산하는 매커니즘 또한 같다. 이리하여, 1차 모양함수를 사용하는 연속체 모델이나 입자 시스템 모델들이 Maya나 3D Studio Max, Soft Image 등의 의복 애니메이션 모듈에서 사용되고 있다.

물리 기반 모델에 따른 역학식을 풀기 위해서 수치 적분법이 필요하다. 이러한 적분법으로는 크게 명시적 적분법(explicit integration)과 암시적 적분법(implicit integration)이 있다. Volino[21]와 Hauth[12][13]는 각

방법을 의복 시뮬레이션에 적용하였을 때의 장단점을 잘 분석하였다. 일반적으로 시간 간격이 매우 작다면 모든 적분법은 정확한 결과를 제공한다. 시간 간격이 큰 경우에는 에러가 커지게 되는데, 명시적 적분법에서는 이러한 에러가 시스템을 폭발시키는 결과를 초래한다. 반면에 암시적 적분법에서는 매우 큰 감쇠 현상으로 나타난다(따라서 매우 안정적이다). 결과적으로, 암시적 적분법이 매우 안정적이기 때문에 실시간 시뮬레이션에 더 적합하다.

옷감의 움직임은 직선 이동과 같이 선형적인 운동뿐 만 아니라, 회전 이동이나 복잡한 주름의 생성과 같이 비선형적인 운동을 포함한다. 이러한 비선형성 때문에 옷감 모델에 의해 주어지는 역학식은 비선형적이며, 암시적 적분법은 이러한 비선형식을 풀어야 한다. 이 식을 정확하게 풀기 위해 Newton's method를 적용할 수 있지만[12], 이 방법은 선형 시스템을 푸는 과정을 여러 번 반복해야 한다. 다시 말해, 계산 시간이 매우 길어지므로 실시간 시뮬레이션에는 적용하기 어렵다.

준-암시적 적분법(semi-implicit integration)은 비선형식을 선형화(1차 Taylor 근사에 의해)하여 하나의 선형시스템을 유도하고 이것의 해를 구한다. 이 방법은 선형화로 인한 부정확성에도 불구하고 어느정도 사실적이면서 매우 안정적인 의복의 움직임을 생성하므로 여러 연구들[1][5][20][8][2][4]에서 사용되었다.

준-암시적 적분법은 선형화 과정에서 기인하는 과도한 감쇠 효과를 수반한다. 이러한 감쇠 효과의 원인은 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 선형화 과정에서 인공적으로 주어지는 현재 속도에 대한 내부 감쇠력(인공내부감쇠력)이고, 다른 하나는 속도 변화에 대한 내부감쇠력이다. 모든 내부 감쇠력은 내부 변형에 대한 반발력이어야 하지만, 위의 두 가지 내부 감쇠력은 내부 변형이 없는 회전 이동에 대해서도 반발력을 생성한다. 이 힘은 옷감의 인장력(tension)에 견줄 만큼 크며, 따라서 여러 연구들이 보고한 바 있는 여러 가지 문제들을 야기한다(형성된 주름이 퍼지지 않거나, 중력에 의해 옷감이 떨어지지 않는 문제)[21][8]. 이러한 문제들은 옷감 재질이 강직(stiff)해질수록 커 지므로, 시스템이 표현할 수 있는 옷감 재질에 한

계를 가져온다.

과도한 감쇠력을 피하기 위해 기존 연구들은 Newmark 방법[11]이나 2차 BDF 준-암시적 적분법[12][5], 일반화된 알파 방법(generalized- α method)[18] 등을 채택하였다. 그러나, 이 방법들 역시 1차 Taylor 근사에 의한 선형화에 기반하므로 여전히 과도한 감쇠력을 수반한다.

과도한 감쇠 효과의 두 가지 원인 중에서 인공내부감쇠력에 의한 감쇠 효과는 제거할 수 있다. 인공내부감쇠력이 아닌 속도 변화에 대한 내부 감쇠력은 선형시스템의 해를 푸는 과정에서 감쇠 효과를 발생시키므로, 준-암시적 적분법을 사용하는 경우 이러한 감쇠 효과는 피할 수 없다. 반면에, 현재 속도에 대한 내부 감쇠력(인공내부감쇠력)은 선형시스템을 풀기 전에 알 수 있으므로, 불필요한 감쇠 효과를 가지지 않는 내부 감쇠력으로 대체할 수 있다.

본 연구는 내부 감쇠력을 순수한 내부변형에 대해서만 발생하도록 모델링하고, 이러한 내부감쇠력(순수인공내부감쇠력)을 사용하는 준-암시적 적분법을 제안한다. 다시 말해, 새롭게 제시하는 준-암시적 적분법은 기존의 인공내부감쇠력 대신 순수인공내부감쇠력을 사용한다.

준-암시적 적분법의 선형화 과정에서는 모든 힘의 자코비언 행렬을 계산하여야 한다. 따라서 순수인공내부감쇠력에 대한 자코비언 행렬을 계산하는 방법이 필요하다. 이를 위해 크게 두 가지 접근방법이 있을 수 있다. 하나는, 인장력의 자코비언 행렬을 순수인공내부감쇠력의 자코비언 행렬로 사용하는 것이다. 즉, 이 자코비언 행렬에 맞추어 순수인공내부감쇠력을 변형하는 것이다. 다른 하나는, 순수인공내부감쇠력에 대한 자코비언 행렬을 새롭게 계산하여 선형화 과정에 반영하는 것이다.

제안하는 방법의 효율성을 입증하기 위해, 사각형 천이 바람에 휘날리는 실험과 의복을 입은 아바타가 움직이는 실험을 수행하였다. 제안된 방법이 기존의 준-암시적 적분법에 비해 훨씬 적은 감쇠 효과를 생성하였다. 결과적으로, 본 연구는 실시간에 좀더 다양한 종류의 옷감 재질을 시뮬레이션할 수 있다.

2. 옷감 모델링

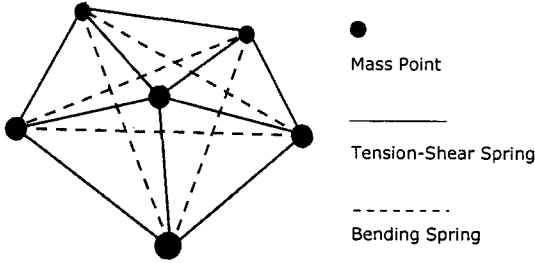


그림 1. 질량 스프링 모델

본 연구는 의복 시뮬레이션 분야에서 널리 쓰여왔던 그림 1과 같은 질량-스프링 모델(mass-spring model)을 사용한다. 삼각형 메쉬상의 각 선분의 두 질점 사이에는 인장-전단(Tension-Shear) 스프링을 연결하고, 각 선분을 가로지르는 두 질점 사이에는 굽힘(Bending) 스프링을 연결한다. 이 모델은 구현이 쉽고 시각적으로 좋은 결과를 보여주기 때문에, 여러 연구들에서 사용되었다 [3][19][5][2][15][22][17].

기존의 연구들은 다양한 방식으로 스프링 힘을 모델링하였다. 가장 단순한 방식은 길이 변화에 대한 반발력을 선형적으로 모델링하는 것으로, [19]을 비롯하여 [2], [15], [22], [17] 등의 연구에서 사용하였다. 선형 스프링의 움직임은 준-암시적 적분법의 1차 근사에 의해 비교적 잘 예측되기 때문에, 그 결과가 매우 안정적이다. 그러나 실제 옷감 재질은 매우 비선형적인 특성을 갖는다.

비선형 스프링은 주로 의복 거동의 정확한 특성을 분석하기 위해 사용되어 왔다. Breen[3]은 스프링을 5차 다항식으로 모델링하였고, 옷감의 늘어뜨림을 잘 표현할 수 있었다. Eberhardt[10]은 이 연구를 애니메이션 생성에 확장 적용하였다. Choi와 Ko[5]는 스프링 길이가 줄어들었을 때 스프링의 곡률과 길이가 유지된다는 가정에 기반하여 비선형 식을 유도하였다. 이를 통해 안정적이고 사실적인 주름을 생성할 수 있었다.

3. 준-암시적 적분법

현재 시각($t^{(n)}$)에서 각 질점의 위치(\mathbf{x})와 속도(\mathbf{v}), 힘(\mathbf{f})이 주어졌을 때, 다음 시각($t^{(n+1)}$)에서의 위치와 속도를 구하기 위해 적분법을 적용한다. 암시적 오일러 적분법(implicit Euler integration)은 다음과 같은 형태로 (비선형) 미분 방정식을 구성한다.

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x} &= h\mathbf{v}^{(n+1)}, & \Delta \mathbf{x} &= \mathbf{x}^{(n+1)} - \mathbf{x}^{(n)} \\ \Delta \mathbf{v} &= h\mathbf{M}^{-1}\mathbf{f}^{(n+1)}, & \Delta \mathbf{v} &= \mathbf{v}^{(n+1)} - \mathbf{v}^{(n)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 h 는 시뮬레이션 시간 간격을 나타낸다. 질점의 수를 N 개로 한다면 각 벡터는 3차원 상에서 정의되므로 $3N$ 개의 스칼라 값을 갖는다. \mathbf{M} 은 각 질점의 질량을 대각 원소로 가지는 대각행렬을 나타낸다.

준-암시적 적분법은 다음의 1차 Taylor 근사에 의해 위 식을 선형화한다.

$$\mathbf{f}^{(n+1)} = \mathbf{f}^{(n)} + \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}\right)^{(n)} \Delta \mathbf{x} + \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{v}}\right)^{(n)} \Delta \mathbf{v} \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입하여 최종 다음과 같은 선형 시스템을 유도한다.

$$\left(\mathbf{M} - h \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{v}}\right)^{(n)} - h^2 \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}\right)^{(n)} \right) \Delta \mathbf{v} = h \left(\mathbf{f}^{(n)} + h \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}\right)^{(n)} \mathbf{v}^{(n)} \right) \quad (3)$$

이 선형 시스템을 풀기 위해서 우리는 모든 힘에 대한 자코비언 행렬을 계산하고 나서, 켈레경사도법을 적용한다 (자세한 내용은 [1]과 [5][20][4]를 참조).

3.1. 자코비언 행렬

자코비언 행렬은 의복의 거동을 결정하는 데 매우 큰 역할을 차지한다. 자코비언 행렬값에 따라 의복의 재질이 표현되며, 주름의 정도나 전체 거동의 감쇠 효과 등이 결정된다. 본 절은 자코비언 행렬값이 의복의 거동에 어떻게 영향을 주는지를 정성적으로 분석한다.

암시적 적분법에 사용되는 자코비언 행렬은 위치 또는 속

도에 대한 여러 가지 힘의 미분치이다. 본 절은 여러 자코비언 행렬 중에서도 의복의 움직임을 표현하는데 가장 중요한 위치에 대한 스프링 힘의 자코비언 행렬만을 가지고 설명한다(앞으로 언급하는 자코비언 행렬은 위치에 대한 스프링 힘의 자코비언 행렬을 가리킨다).

선형 시스템의 해를 구하는 과정은 다음 시각에서의 의복 형태를 결정하는 과정인데, 이 과정에서 자코비언 행렬은 크게 두 가지 역할을 한다. 하나는 두 질점 사이의 거동을 결정하는 것이고, 다른 하나는 질점 자체의 거동을 결정하는 것이다. 본 논문은 이것을 각각 상호 자코비언 행렬과 자체 자코비언 행렬이라고 부른다.

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

상호 자코비언 행렬: 식(4)은 질점 j 가 이동했을 때 이것이 질점 i 에 얼마만큼의 힘을 전달 할 것인지를 표현한다. 전달되는 힘은 이 자코비언 행렬과 질점 j 의 위치 변화 벡터의 곱으로 표현되므로, 자코비언 행렬값이 크다면 많은 힘이 전달된다. 또, 자코비언 행렬이 방향성을 가진다면 여러 방향에 대해 다른 크기의 힘을 전달할 수 있다. 이렇게 상호 자코비언 행렬값에 따라 두 질점 사이의 거동이 결정된다.

$$J_{ii} = \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \quad (5)$$

자체 자코비언 행렬: 식(5)은 질점 i 의 위치 변화가 자신에게 얼마만큼의 힘을 가할 것인지를 표현한다. 본 연구의 선형 시스템의 풀이 과정에서는 식(5)의 역행렬이 사용되며, 질점 i 에 힘의 변화가 생겼을 때 이것이 자신을 얼마만큼 이동시킬 것인지를 표현한다. 질점의 움직임은 자체 자코비언 행렬의 크기와 방향성에 따라 결정된다.

위 두 종류의 자코비언 행렬이 의복의 거동에 어떻게 영향을 주는지를 쉽게 설명하기 위해 선형 시스템의 풀이 방법 중 하나인 자코비 이터레이션(Jacobi iteration)을 예로 든다(앞으로 설명할 내용은 켈레경사도법에서도 그대로 해당된다). 자코비 이터레이션은 현 시각에서 주변 질점들의 상태(위치와 속도)를 통해 다음 시각에서의 해당 질점의 상태를 갱신해 나가는 과정을 반복하여, 최종 해를 찾아나가는 방법이다. 이 방법은 질점 i 에 대해 매 이터레이션마

다 다음 식을 반복 계산하여 속도 변화를 구해나간다(설명 편의를 위해 속도에 대한 자코비언 행렬 생략)[15].

$$\left(\mathbf{M}_i - h^2 \left(\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}_i} \right)^{(n)} \right) \Delta \mathbf{v}_i = \left(h \left(\mathbf{f}_i^{(n)} + h \left(\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}} \right)^{(n)} \mathbf{v}^{(n)} \right) + h^2 \sum_{i \neq j} \left(\left(\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}_j} \right)^{(n)} \Delta \mathbf{v}_j \right) \right)$$

위 식에서 우항은 질점 i 에 주어진 힘을 시뮬레이션 시간 간격으로 곱한 것이다. 이 힘에는 질점 i 에 스프링으로 직접 연결된 질점들이 이동했을 때 생성되는 힘이 상호 자코비언 행렬에 의해 계산되어 포함된다. 이런 방식으로 한 질점의 거동을 결정하는 데 주변 질점들의 거동이 영향을 준다. 따라서 상호 자코비언 행렬이 정확하지 않다면 사실적인 시뮬레이션이 불가능 할 것이다.

위 식의 우항 \mathbf{r}_i 를 자체 자코비언 행렬이 포함된 행렬의 역행렬과 곱함으로써 최종 질점 i 의 속도 변화가 결정된다.

$$\Delta \mathbf{v}_i = \left(\mathbf{M}_i - h^2 \left(\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}_i} \right)^{(n)} \right)^{-1} \mathbf{r}_i$$

따라서 자체 자코비언 행렬에 따라 질점 i 의 거동이 결정됨을 알 수 있다.

여기서 주목할 사항은 자체 자코비언 행렬이 다음과 같이 상호 자코비언 행렬의 합으로 계산되므로, 결과적으로 상호 자코비언 행렬의 정확한 계산이 의복의 거동을 표현하는데 매우 중요하다는 것이다.

$$\frac{\partial \mathbf{f}_{spring\ i}}{\partial \mathbf{x}_i} = - \sum_{i \neq j} \frac{\partial \mathbf{f}_{spring\ j}}{\partial \mathbf{x}_j}$$

문제는 상호 자코비언 행렬이 선형적이라는 사실에서 발생한다. 스프링 인장력의 자코비언 행렬을 예로 들어보자. 스프링 인장력의 자코비언 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}_j} = k_{ij} \left[\left(1 - \frac{l_{ij}^0}{|\mathbf{x}_{ij}|} \right) (\mathbf{I}_3 - \frac{\mathbf{x}_{ij} \mathbf{x}_{ij}^T}{|\mathbf{x}_{ij}|^2}) + \frac{\mathbf{x}_{ij} \mathbf{x}_{ij}^T}{|\mathbf{x}_{ij}|^2} \right] \quad (6)$$

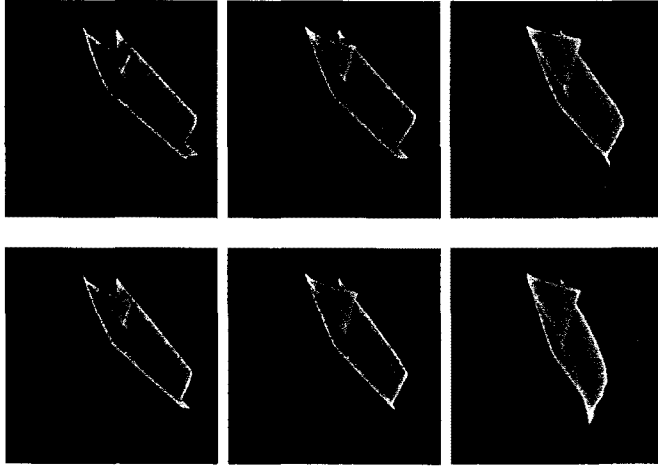


그림 2. 제안된 방법(위)과 암시적 오일러 적분법(아래)을 이용한 시뮬레이션으로부터 캡처된 이미지들. 오른쪽으로 갈수록 높은 강성도가 사용되었다. 시뮬레이션 시작과 동시에 오른쪽으로 바람이 불다가 1초 후에 멈추게 했으며, 모든 이미지는 1초 후에 캡처되었다. 제안하는 방법의 결과가 회전 모멘텀을 더 잘 보존함을 알 수 있다.

여기에서 $\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$ 이다. 위 식에서처럼 스프링 힘의 자코비언 행렬은 스프링 방향과 그 방향의 수직 평면에 대한 정사영 행렬들의 합으로 표현된다. 이들 정사영 행렬은 선형적이므로 질점들은 이 두 개의 기저 축 방향으로만 선형적으로 상호작용할 것이다. 따라서, 상호 자코비언 행렬은 회전 운동과 같은 비선형적 상호작용을 표현할 수 없다.

지금까지 살펴본 상호 자코비언의 특성으로부터, 우리는 등방 행렬(isotropic matrix)을 자코비언 행렬로 사용하거나[7][8] 포함시키는 것이[20] 감쇠 현상을 더욱 심각하게 만든다는 것을 쉽게 알 수 있다. 이것은 등방 행렬이 내부 힘에 상관 없이 모든 방향에 대해 일정하게 질점들을 상호작용하도록 만들기 때문이다.

4. 선형화로 인한 과도한 감쇠 현상

선형화 과정에서 발생하는 감쇠 효과는 크게 두 가지 요인으로 분석할 수 있다. 하나는 현재 속도에 의해 발생하는 감쇠력(인공내부감쇠력)이고, 다른 하나는 시뮬레이션 시간 간격 동안 일어나는 속도 변화에 대해 발생하는 감쇠력이다.

먼저 인공내부감쇠력에 대해 알아보자. 인공내부감쇠력은 식(3)의 우항에 포함된다[7]. 한 질점 i 에 대한 인공내부

감쇠력과 질점 i 와 j 사이의 인공내부감쇠력은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}}\right)^{(n)} h \mathbf{v} &= \sum_{i \neq j} \left(\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}_j}\right)^{(n)} h(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \\ \mathbf{f}_{ij}^{AID} &= \left(\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}_j}\right)^{(n)} h(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \end{aligned} \quad (7)$$

위 식으로부터, 어떤 두 질점 사이의 내부 감쇠력은 그 두 질점의 현재 속도에 따른 위치 변화의 차이 $h(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i)$ 와 상호 자코비언 행렬의 곱으로 계산된다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 내부 감쇠력은 스프링 인장력에 견줄 만큼 큰 값을 가진다(그래서, 인공내부감쇠력은 재질내부감쇠력과 구별된다).

그림 3 (a)와 같은 1차원 스프링의 경우, 인공내부감쇠력은 현재 속도에 상관없이 스프링의 길이를 유지시키려 할 것이다(그래서 항상 안정적이다). 이것은 인공내부감쇠력이 현재 속도에 따라 늘어남 스프링 길이에 대해 발생하는 인장력과 같은 크기를 갖기 때문이다. 본 연구는 이러한 인공내부감쇠력을 순수인공내부감쇠력이라 한다.

그러나, 고차원에서 인공내부감쇠력은 과도한 감쇠 문제를 일으킨다. 그림 3의 (b)를 보면 스프링은 어떤 내부 길이 변화 없이 회전이동하고 있다. 이때 어떠한 내부 힘도 발생되어서는 않된다. 그럼에도 불구하고 위치변화의 차

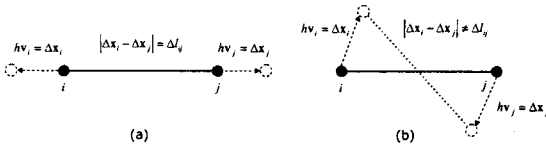


그림 3. 1차원 스프링 (a): 위치 변화의 크기가 변화된 스프링 길이와 일치한다. 2차원에서 스프링의 회전 이동 (b): 위치 변화의 크기가 변화된 스프링 길이와 일치하지 않는다.

이 길이 변화와 같지 않으므로 감소력이 발생한다.

속도 변화에 따른 인공 감소력 또한 인공내부감쇠력과 비슷한 형태로 주어진다. 식(3)의 좌항은

$$\left(\frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{x}} \right)^{(n)} h \Delta \mathbf{v}$$

를 포함하는데, 이것은 식(7)에서 \mathbf{v} 를 $\Delta \mathbf{v}$ 로 바꾼 형태이다. 속도 변화에 따른 인공 감소력은 선형 시스템을 푸는 과정에서 나타난다.

기존의 모든 연구들은 선형화로 인해 발생하는 이러한 과도한 내부감쇠 효과를 그대로 지닌다. 속도 변화에 대한 인공 감소력의 감소 문제는 선형 시스템을 구하는 과정에서 발생하므로 피할 수 없다. 그러나, 인공내부감쇠력은 선형 시스템에 명시적으로 주어지기 때문에 이로 인한 감소 문제는 충분히 제거 할 수 있다. 즉, 인공내부감쇠력 대신 순수한 스프링 길이 변화에 대한 감소력인 순수인공내부감쇠력을 사용한다면, 이러한 감소력은 발생하지 않을 것이다. 이리하여, 본 연구는 순수인공내부감쇠력을 사용하는 준-암시적 적분법을 제안하고자 한다.

5. 순수인공내부감쇠력을 가지는 준-암시적 적분법

5.1. 순수인공내부감쇠력

순수인공내부감쇠력은 현재 속도에 따라 변화하는 스프링 길이에 대한 인장력으로 주어진다(그림 4 (c)의 ④).

$$\mathbf{l}_{ij} = (|\mathbf{x}_{ij}^*| - |\mathbf{x}_{ij}|) \frac{\mathbf{x}_{ij}^*}{|\mathbf{x}_{ij}^*|}$$

$$\mathbf{f}_{ij}^{PAID} = -k_{ij} \mathbf{l}_{ij}$$

여기서, $\mathbf{x}_{ij}^* = (\mathbf{x}_i + h\mathbf{v}_i) - (\mathbf{x}_j + h\mathbf{v}_j)$ 이고 $\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$ 이다. 이

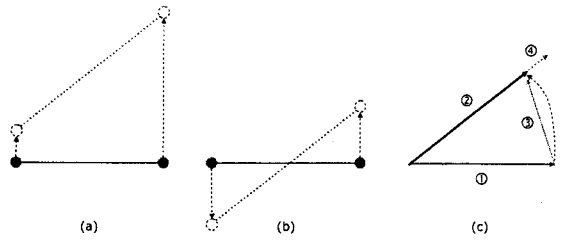


그림 4 (a) 강체 운동과 내부 변형을 포함한 두 질점의 이동, (b) 직선 운동에 독립적인 두 질점의 이동, (c) 운동시 발생하는 힘의 변화값, ①은 현 시각에서의 힘, ②+④는 다음 시각에서의 힘, ③은 회전이동만을 고려한 다음 시각에서의 힘, ⑤은 회전운동에 대한 힘의 변화값, ⑥은 순수한 내부 변형에 의한 힘의 변화값.

아이디어는 지역 기준틀(local reference frame)에 기반한다. 지역 기준틀의 아이디어는 여러 기존 연구들 [16][9]에서 사용되었다. 기존 연구들이 응력(stress)과 변형(strain)의 정확한 계산에 초점을 맞춘 데 반해, 본 연구는 인공내부감쇠력의 정확하고 안정적인 계산에 초점을 맞춘다.

5.2. 순수인공내부감쇠력의 자코비언 행렬

순수인공내부감쇠력은 스프링의 자코비언 행렬을 계산하는 데 반영되어야 한다. 회전 이동의 경우, 순수인공내부감쇠력의 방향은 스프링 인장력의 방향과 크게 다를 수 있는데, 이것은 스프링의 수직 방향으로 매우 큰 변형을 일으킬 수 있다. 이는 자코비언의 수직방향의 크기가 순수인공내부감쇠력의 크기에 비해 매우 작기 때문이다. 따라서 순수인공내부감쇠력과 스프링의 자코비언 행렬을 부합시켜야 한다.

이를 위해 두 가지 방법을 제안한다. 첫번째 방법은 순수인공내부감쇠력을 스프링 인장력의 자코비언 행렬에 맞추는 것이다. 이 방법은 매우 단순하다. 다음과 같이 식(7)에서 단지 위치 변화의 차이를 길이 변화의 차이로 대체하면 된다.

$$\mathbf{f}_{ij}^{PAID} = \left(\frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{x}_j} \right)^{(n)} \mathbf{l}_{ij}$$

이것은 순수인공내부감쇠력을 인장력의 자코비언의 기저

측에 정사영시키는 것으로 해석할 수 있다. 결과적으로, 순수인공내부감쇠력을 원래 크기보다 줄여들게 되므로 불안정한 진동 현상을 초래할 수 있을 것이다. 그러나, 실험 결과에 의하면 어떤 문제도 발생하지 않았다. 이것은 속도 변화에 대한 인공 감쇠력이 시스템을 충분히 안정시키기 때문인 것으로 보인다.

두번째 방법은 스프링의 자코비언 행렬을 계산하는 데 인장력 뿐만 아니라 순수인공내부감쇠력에 대한 상호작용까지 포함시키는 것이다. 결과로서, 스프링의 자코비언 행렬은 다음과 같이 인장력에 대한 자코비언과 순수인공내부감쇠력에 대한 자코비언에 대한 함수 형태가 된다.

$$\mathbf{J}^{spring} = \mathbf{G}(\mathbf{J}^{PAID}, \mathbf{J}^{tension})$$

순수인공내부감쇠력에 대한 자코비언 행렬을 계산하기 위해, 본 연구는 먼저 difference quotient를 이용하여 자코비언 행렬을 근사하는 방법을 적용해 보았다. 즉, 다음과 같이 질점 i 에 대한 질점 j 의 상대적인 위치 변화 $\Delta(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)$ 에 대한 스프링 힘의 변화 $\Delta\mathbf{f}_{ij}$ 를 구하는 것이다.

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{ij} &= \frac{\partial \mathbf{f}_{ij}}{\partial (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)} \\ &\approx \frac{\Delta \mathbf{f}_{ij}}{\Delta (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)} = \frac{\mathbf{f}_{ij}^{(n+1)} - \mathbf{f}_{ij}^{(n)}}{(\mathbf{x}_j^{(n+1)} - \mathbf{x}_j^{(n)}) - (\mathbf{x}_i^{(n+1)} - \mathbf{x}_i^{(n)})} \end{aligned}$$

이제 계산해야 할 것은 벡터 간의 나눗셈이나 이것은 단순한 연산이 아니다. 우리는 벡터 간의 나눗셈을 위해 직교하는 세 축을 구하고 각각에 대한 두 벡터의 정사영값(스칼라값)의 나눗셈 결과를 각 축에 대한 정사영 행렬의 크기로 하여 최종 자코비언 행렬을 계산할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 방법은 자코비언 행렬을 음한정(negative definite) 행렬이나 부정(indefinite) 행렬(0으로 나누기)로 만들 수 있다. 이러한 문제 때문에 본 연구는 다른 대안을 찾아보기로 했다.

또 다른 방법은 순수인공내부감쇠력의 방향(그림 4 (c)의 ㉔)에 맞추어 자코비언 행렬을 계산하는 것이다. 즉, 자코비언 행렬은 현재 속도에 따라 스프링을 움직인 뒤의 스프링 방향에 따라 계산된다. 결과로서, 순수인공내부감쇠력

의 자코비언 행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{J}_{ij}^{PAID} = \frac{\partial \mathbf{f}_i^{PAID}}{\partial \mathbf{x}_j} = k_{ij} \left[\frac{\mathbf{x}_{ij}^* \cdot \mathbf{x}_{ij}^{*T}}{|\mathbf{x}_{ij}^*|^2} \right] \quad (6)$$

이제 남은 것은 스프링의 자코비언 행렬을 표현하는 함수 \mathbf{G} 의 계산이다. 본 연구는 이것을 다음과 같은 두 자코비언 행렬의 가중치 합으로 계산한다.

$$\mathbf{J}_{ij}^{spring} = \left(1 - \frac{\mathbf{x}_{ij}^* \cdot \mathbf{x}_{ij}}{2|\mathbf{x}_{ij}^*||\mathbf{x}_{ij}|} \right) (\mathbf{J}_{ij}^{PAID} + \mathbf{J}_{ij}^{tension})$$

여기서 가중치는 두 자코비언 행렬의 방향의 유사성에 따라 결정한다. 즉, 서로 직교한다면 두 행렬의 합이 되므로 크기 k 인 등방 행렬이 되고, 같은 방향이라면 스프링 인장력의 자코비언 행렬과 같아진다. 따라서, 1차원 스프링인 경우는 기존의 방법과 정확하게 같은 결과를 출력하며, 고차원에서 회전 이동한 경우는 안정적으로 질점 사이의 상호작용을 표현한다.

지금까지 위치에 대한 스프링 힘의 자코비언 행렬을 살펴 보았다. 이것 외에도 속도에 대한 힘의 자코비언 행렬 또한 필요하다. 그러나, 실용적으로는 스프링 인장력과 이것의 위치에 대한 자코비언 행렬만을 계산하여 선형 시스템을 구성하여도 안정적이고 사실적인 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 순수내부감쇠력이 인공적으로 포함되기 때문이다.

본 연구는 속도에 대한 힘의 자코비언 행렬을 옷감 재질의 다양성 측면에서 추가한다. Choi와 Ko[5]의 연구에서와 같이 매우 작은 크기를 갖는 등방 행렬로 모델링한다. 이것의 크기를 조절함으로써 다양한 옷감 재질의 움직임을 표현할 수 있다. 결과로 최종 선형 시스템은 다음과 같다.

$$(\mathbf{M} - hk^{damp}\mathbf{I} - h^2\mathbf{J}^{spring})\Delta\mathbf{v} = h(\mathbf{f}^{(n)} + \mathbf{f}^{PAID})$$



그림 5. 제안된 방법(위)과 암시적 오일러 적분법(아래)을 이용하여 시뮬레이션한 결과.

6. 구현 및 실험 결과

본 연구는 C++ 와 Java를 사용하여 의복 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이션 결과 동영상과 전자상거래 프로토타입 시스템은 다음 웹 페이지에서 접할 수 있다 (<http://vr.kaist.ac.kr/~redmong/research.htm>).

실시간 충돌 처리 방법으로 본 연구는 Oh[17]의 선형 근사 방법을 인체 모델의 삼각형과 의복 모델의 점 사이의 교차 검사에 적용하였고, 복셀 기반으로 공간을 분할하여 충돌 여부를 효율적으로 판단할 수 있었다. 충돌 처리 방법으로는 Baraff[1]의 연구를 채택하였다.

제안한 기법의 성능을 보여주기 위해 암시적 오일러 적분법과의 비교 실험을 수행하였다. 모든 시뮬레이션은 펜티엄 IV 2.4GHz를 가진 PC 상에서 수행되었다. 먼저, 강제 이동에 대한 감쇠 효과를 비교하기 위해 그림 3에서 보여 지듯이 사각형 천을 바람에 휘날리는 실험을 수행하였다. 생성된 애니메이션을 통해 본 연구가 제안하는 방법이 암시적 오일러 적분법에 비해 적은 감쇠 효과를 수반함을 알

수 있었다. 또한 강성도가 높을수록 암시적 적분법은 많은 감쇠 효과를 수반하였다. 다음으로, 의복을 입은 아바타의 걷는 동작에서 사실적인 주름 생성 여부를 비교하였다(그림 5). 제안한 방법이 더욱 사실적인 주름 형성 결과를 보여 주었다. 그림 6은 아바타의 다양한 동작에 따른 애니메이션 결과를 보여준다. 실험에 사용된 모든 의복은 약 1400개의 질점과 8000개의 스프링으로 구성되었으며, 렌더링 시간까지 포함하여 약 30fps의 속도로 시뮬레이션할 수 있었다. 또한 매우 강한 재질의 옷감 역시 움직임이 느려지거나 멈추는 현상 없이 시뮬레이션 할 수 있었다. 이것은 본 연구가 제안하는 방법이 매우 적은 감쇠 효과를 가지기 때문에 가능한 것이다.

7. 결론

본 연구는 매우 적은 감쇠 효과를 가지는 의복의 움직임을 안정적으로 계산 할 수 있는 새로운 준-암시적 적분법을 제안하였다. 회전 이동에 대해서도 많은 감쇠 효과를 포함하는 인공내부감쇠력 대신 순수한 내부변형만을 고려한 순수인공내부감쇠력을 제안하였다. 또한 이것을 선형시스

템에 안정적으로 추가하는 방법들을 제안하였다. 결과로써, 과도한 감쇠력으로 인해 실시간에 시뮬레이션 할 수 없었던 강직한 재질의 옷감조차도 실시간에 안정적으로 시뮬레이션 할 수 있었다.

참조 문헌

- [1] Baraff D. and Witkin A.: Large steps in cloth simulation, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), pp. 43-54, 1998.
- [2] Bridson R., Fedkiw R.P., Anderson J.: Robust treatment of collisions, contact, and friction for cloth animation. Proc. SIGGRAPH, pp. 594-603, 2002.
- [3] Breen, D.E., House, D.H., and Wozny, M.J.: Predicting the drape of woven cloth using interacting particles, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), pp. 365-372, 1994.
- [4] Bridson R., Marino S., Fedkiw R.P.: Simulation of clothing with folds and wrinkles, In Symposium on Computer Animation, 2003.
- [5] Choi, K.-J., Ko H.-S.: Stable but responsive cloth, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), 2002.
- [6] Cordier, F., Seo H., Magnenat-Thalmann N.: Made-to-measure technologies for online clothing store", IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 38-48, January/February 2003.
- [7] Desbrun, M., Schroder P., Barr A.: Interactive animation of structured deformable objects, Proceedings of Graphics Interface '99, 1-8, June 1999.
- [8] Eberhardt, B., Etmuss O., Hauth M.: Implicit-explicit schemes for fast animation with particle systems, Eurographics Computer Animation and Simulation Workshop, 2000.
- [9] Etmuss, O., Gross, J., and Straßer W.: Deriving a Particle System from Continuum Mechanics for the Animation of Deformable Objects, IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, VoL. 9, No. 4, pp. 538-550, 2003.
- [10] Eberhardt, B., Weber, A., and Strasser, W. A.: A fast, flexible, particle-system model for cloth draping, IEEE Computer Graphics and Applications 16, pp. 52-59, 1996.
- [11] Grinspun, E., Hirani A. N., Desbrun, M., and Schroder, P.: Discrete Shells, In Symposium on Computer Animation, 2003.
- [12] Hauth, M. and Etmuss O.: A High Performance Solver of the Animation of Deformable Objects Using Advanced Numerical Methods, Proc. Eurographics, 2001.
- [13] Hauth, M., Etmuss O., and Straßer W.: Analysis of numerical methods for the simulation of deformable models, The Visual Computer, 2002
- [14] House, D. H. and Breen D. E.: Cloth Modeling and Animation, A K Peters, 2000.
- [15] Kang, Y.-M. and Cho H.-G.: Complex deformable object in virtual reality, Proc. of Virtual Reality Software and Technology, pp. 49-56, HongKong, Nov 2002.
- [16] Müller M., Dorsey J., McMillan L., Jagnow R., Cutler B.: Stable Real-Time Deformations, In Symposium on Computer Animation, pp 49-54, 2002.
- [17] Oh, S.-W., Kim H.-S., Wohn K.-Y.: Collision handling for interactive garment simulation, Proc. Of VSMM 2002, pp. 239-251, 2002.
- [18] Parks, D. and Forsyth D.A.: Improved integration for cloth simulation, EUROGRAPHICS Short Presentation, 2002.
- [19] Provot, X.: Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior, Proc. Graphics Interface, pp. 147-154, 1995.
- [20] Volino, P., Magnenat-Thalmann N.: Implementing fast cloth simulation with collision response, Proceedings of CGI'00, 2000.
- [21] Volino, P., Magnenat-Thalmann N.: Comparing efficiency of integration methods for cloth animation", Proceedings of CGI'01, July 2001.
- [22] Vassilev, T., Spanlang B., Chrysanthou Y.: Fast cloth animation on walking avatars, EUROGRAPHICS, 20(3) , 2001.



그림 6. 제안된 방법을 이용하여 얻은 시뮬레이션 결과. 댄스 모션과 발레 모션을 사용한 예.