

증강현실 환경에서의 실시간 옷감 시뮬레이션

박민기*, 김현수*, 최한균*, 이승주*, 이관행*

*광주과학기술원 기전공학과

e-mail:{minkp, hskim, korwairs, sf2952, khlee}@gist.ac.kr

Real-time Cloth Simulation in Augmented Reality Environments

Min Ki Park*, Hyun Soo Kim*, Han Kyun Choi*, Seung Joo Lee*, Kwan H. Lee*

*Dept. of Mechartronics, Gwang-Ju Institute Science and Technology

요 약

옷감 시뮬레이션은 지금까지 게임, 애니메이션, 영화 등에 많이 사용되어왔고, 현재 증강현실 (Augmented Reality) 환경에서의 교육자료, 쇼핑물 뿐만 아니라 휴대용 게임기, 휴대폰 등 모바일 기기에서도 그 응용이 점점 증가하는 추세다. PC에 비해 그래픽스 하드웨어의 성능이 떨어지는 기기에서 3차원 시뮬레이션을 가능하게 하기 위해서는 모델의 움직임을 최대한 근사(Approximation)하면서 계산 속도를 보장하는 방법이 필요하다. 즉, 상호작용(Interaction)이 필요한 사용자 입장에서는 최소한의 정확성만 보장한다면 실시간 시뮬레이션이 더 큰 이슈가 된다.

따라서 이 논문에서는 증강현실 환경에서 실시간 시뮬레이션을 보장하는 옷감 시뮬레이션 방법을 제안한다. 안정성과 정확성이 보장되는 적분법(Integration)을 사용하였고, 옷감의 길이가 비사실적으로 늘어나지 않게 하기 위해 제약 조건(Constraints)을 주었다. 또한 각 지점에서의 곡률(Curvature)을 고려하여 충돌 검사를 함으로써 옷감 내부 충돌 검사로 요구되는 많은 계산량을 효율적으로 처리하였다.

1. 서론

최근 CPU 및 그래픽카드 성능의 향상과 그래픽스 기술의 발달에 따라 많은 응용 프로그램에서 실시간 시뮬레이션이 가능하게 되었다. 하지만 아직도 모바일 기기나 휴대용 게임기와 같은 저성능 플랫폼(Platform)에서는 고품질의 3차원 그래픽을 실시간으로 시뮬레이션 하는 데 많은 한계가 있다. 또한 최근 이슈가 되고 있는 증강현실 환경에서 게임 또는 애니메이션 등과 같이 실시간 상호작용이 필요한 응용 프로그램을 실행시키기 위해서 속도 향상에 중점을 둔 연구가 많이 진행되고 있다. 증강현실 환경에서 가장 큰 문제는 많은 계산량을 요구하는 프로그램, 특히 물리기반 변형 시뮬레이션의 실시간 디스플레이(Display)가 쉽지 않다는 것이다.

이 논문에서는 옷감 모델의 물리적인 정확성 보다는 실시간 시뮬레이션에 초점을 맞춘 시뮬레이션 방법을 제안한다. 실제로 게임, 교육자료, 애니메이션 등과 같이 속도에 민감한 응용 프로그램에서는 최소한의 정확성만 보장이 된다면 나머지 관심사는 속도를 높이는 데 있다. 많은 계산량을 줄이기 위해 오일러 방법(Euler method) 대신 버렛 방법(Verlet method)을 사용하였고[6], 간단한 제약 풀이법(Constraint solver)을 제안하였다. 또한 가장 많은

시간이 소요되는 충돌 검사에는 삼각 메쉬(Triangular meshes)의 곡률을 고려하여 충돌 가능성이 없는 파티클(Particle)은 충돌 체크 과정을 생략하여 효율성을 향상 시켰다. 논문에서 제안하는 방법의 장점은 다음과 같다.

- **안정성** : 버렛 방법과 스프링 길이에 대한 제약조건으로 큰 시간 간격(Time step)에도 안정적인 결과를 얻을 수 있다.
- **실시간 시뮬레이션** : 효율적인 충돌 검사 방법의 제안으로 실시간 상호작용이 필요한 응용 프로그램에서 빠른 시뮬레이션 속도를 보장한다.

2장에서는 옷감 시뮬레이션과 관련된 연구에 대해서 설명하고 3장에서는 논문에서 제안하는 질점-스프링 시스템을 설명한다. 4장에서는 실험 결과를 보이고 5장에서 결론을 기술한다.

2. 관련연구

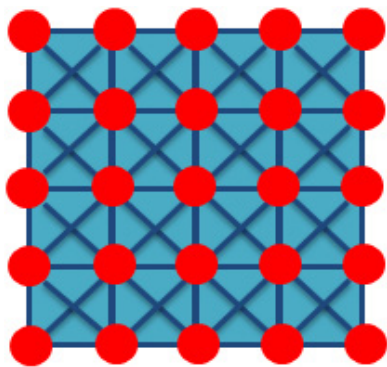
가상현실(Virtual Reality)을 기반으로 한 옷감 시뮬레이션에 대한 연구는 초기 산업공학에서부터 최근 컴퓨터 그래픽스 분야까지 폭넓게 진행되고 있다.

초기 연구에서는 불안정성을 피하기 위해 매우 작은 시간 간격의 명시적 오일러 방법(Explicit Euler method)을 주로 사용하였다. 작은 시간간격을 사용하여 발생하는 병목현상(Bottle-neck)을 해결하기 위해 옷감 각각의 파티클에 제약을 주는 방법과 암묵적 오일러 방법(Implicit Euler method)을 결합하여 비교적 큰 시간 간격을 사용하면서 안정적인 결과를 낼 수 있게 되었다[1]. 하지만 옷감의 변형에 따른 중요한 특징인 좌굴현상(Buckling)은 무시되어 왔고, 좌굴현상의 고려 없이 자연스러운 옷감 모델링은 쉽지 않다. Choi와 Ko는 역학 시뮬레이션에 감쇠력(Damping force) 없이 좌굴후(Post-buckling) 현상의 불안정성을 다루고 반암묵적 오일러 방법(Semi-Implicit Euler method)을 사용하여 안정적이면서 자연스러운 결과를 만들어냈다[2].

이러한 연구들은 매우 정확한 결과를 가지지만 파티클의 개수가 늘어남에 따라 게임, 애니메이션과 같이 상호작용이 필요한 응용프로그램에서는 실시간 시뮬레이션에 제약을 받는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Jakobsen은 오일러 방법 대신 버렛 방법과 이완법(Relaxation)을 사용한 제약 풀이법(Constraint Solver)을 제안 하였다[3]. 본 논문에서는 버렛 방법을 바탕으로 하여 증강현실 환경에서 실시간으로 시뮬레이션 가능한 옷감 모델을 제안한다.

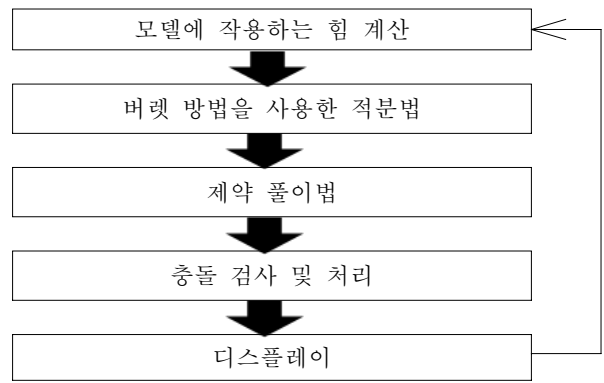
3. 질점-스프링 시스템

옷감처럼 얇은 판과 같은 변형 가능한 물체는 질점-스프링 시스템으로 모델링 할 수 있다. 그림 1과 같이 옷감 내부에 일정한 간격으로 파티클을 배치하고 스프링으로 이웃하는 파티클들을 연결하여 스프링의 탄성력을 통해 옷감의 움직임을 시뮬레이션 하는 방법이다.



(그림 1) 질점-스프링 시스템

하지만 파티클의 개수가 늘어날수록 매 단계 계산량이 늘어나기 때문에 파티클의 움직임을 잘 근사할 수 있는 방법이 필요하다. 이 논문에서 제안하는 시뮬레이션에 사용될 과정은 그림 2와 같다.



(그림 2) 시뮬레이션 과정

우선 모델에 작용하는 힘들을 계산한 후 버렛 방법으로 파티클의 위치를 계산한다. 다음 제약 풀이법으로 각각의 파티클의 위치가 안정적인 위치로 수렴하도록 하고 스프링의 길이가 일정 비율 이상으로 늘어나거나 줄어들지 않게 제약을 가한다. 충돌 검사는 각 파티클에서의 사이각(Dihedral angle)이 π 이상인 파티클에 대해서만 충돌검사를 수행하여 효율성을 높이는 방법을 제안한다.

3.1. 모델에 작용하는 힘 계산

시뮬레이션 환경에서 각 파티클에 작용하는 힘은 크게 내부적인 힘과 외부적인 힘으로 구분할 수 있다. 내부적인 힘으로는 전단력(Shear force), 늘어남(Stretch force), 구부러짐(Bending force) 등이 있고 외부적인 힘으로는 중력, 바람에 의한 공기저항, 감쇠력 등이 있다.

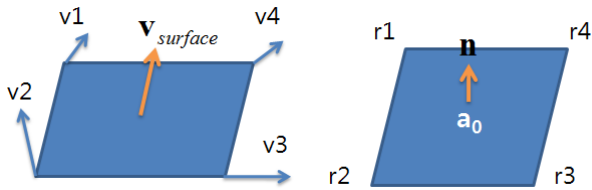
후의 법칙(Hooke's law)에 따라 내부적인 힘을 아래와 같이 정의할 수 있다.

- N_i : i 와 연결된 파티클 집합
- k_{ij} : i, j 를 연결하는 스프링 상수
- \mathbf{r}_{ij} : i, j 를 연결하는 스프링 벡터
- l_{ij} : 두 파티클을 연결하는 스프링의 초기 길이

외부에서 작용하는 힘 중 공기 저항력은 다음과 같은 베르누이 방정식(Bernoulli's equation)으로부터 유도할 수 있다.

- ρ : 공기 밀도
- \mathbf{v} : 물체의 속도
- C_d : 물체의 저항(drag) 상수
- a : 공기와 접촉하는 면적
- \mathbf{e} : 물체의 이동 반대 방향 단위 벡터

그림 3과 같이 접촉하는 면의 속도와 면적, 노멀 벡터 (Normal vector) \mathbf{n} 을 구할 수 있다.



(그림 3) 공기와 접촉하는 면

최종적으로 공기 저항력이 각 파티클 i 에 작용하는 힘은 아래와 같다. 일반적으로 옷감의 저항 상수는 1.8~2.0을 사용한다.

3.2. 버렛 방법을 사용한 적분법

일반적인 동적 시뮬레이션에서 사용하는 오일러 방법은 안정성 또는 실시간 시뮬레이션에 많은 제약이 따른다. 명시적인 오일러 방법은 간단하게 구현 가능하지만 적절한 시간 간격의 선택이 안정성의 기준이 되고, 암묵적인 오일러 방법을 사용하면 다음 단계의 속도를 예측하기가 쉽지 않다. 반면 버렛 방법에서는 오일러 방법의 속도항을 한 단계 동안의 위치의 변화로 대체하여 아래와 같은 식으로 계산한다. 아래 식에서 \mathbf{x}^* 는 이전 단계의 위치를 나타낸다.

따라서 버렛 방법은 위치를 계산하기 위해서 가속도만을 필요로 하기 때문에 매우 안정적이며, 작은 계산량으로 인해 실시간 시뮬레이션에 적합하다.

3.3. 제약 풀이법

실제 옷감은 구부러짐에 의한 변형에 비해 늘어나거나 줄어들어짐에 의한 변형은 현저히 작다. 따라서 각 스프링이 탄성력에 의해 비사실적으로 늘어나거나 줄어드는 현상이 발생하는 것을 방지해야 한다. 제약 풀이법이란 스프링의 길이에 제약을 주는 방법이며, 이완법을 사용하면 3~4번의 반복으로 안정적인 위치로 수렴한다[1][3][7].

\mathbf{X}_k 는 파티클 k 의 위치 벡터이고 k_c 는 제약 상수 (Constraint constant)이다. 만약 스프링의 한쪽 파티클이 고정되어 있으면 나머지 한쪽 파티클만 2배 크기의 벡터만큼 이동시켜 위치를 계산할 수 있다.

3.4. 충돌 검사 및 처리

충돌 검사는 옷감 시뮬레이션에서 시간이 가장 많이 소요되는 과정이다. 충돌은 두 가지로 나눌 수 있는데 옷감과 외부 물체와의 충돌, 옷감과 옷감의 내부 충돌 문제가 있다. 기본적으로 충돌이 체크되면 충돌전의 위치로 되돌리거나 접평면(Tangent plane)으로 사영(Projection)시키는 방법을 사용한다. 옷감과 물체와의 충돌 체크는 단순히 물체와 각 파티클과의 거리를 비교하여 할 수 있으나, 옷감과 옷감의 충돌 체크는 상대적으로 복잡한 과정이 필요하다. 모든 파티클에 대해서 수행할 경우 $O(n^2)$ 의 시간 복잡도를 가지게 되는데, 파티클의 개수가 늘어나면 계산 시간이 급격하게 늘어난다. 공간해싱(Spatial Hashing)을 사용하면 최고 $O(n)$ 까지 시간 복잡도를 줄일 수 있다 [7]. 여기서는 내부 충돌이 발생할 가능성이 없는 경우에 대해서는 충돌 체크 과정을 생략함으로써 효율성을 높이는 방법을 사용한다. 옷감 내부 삼각 메쉬의 곡률을 고려하여 사이 각이 π 이하이면 충돌 체크 과정을 생략한다. 충돌이 발생할 가능성이 있는 파티클에 대해 바운딩박스(Bounding box) 접근법을 사용하여 충돌을 검사한다[4][5].

4. 실험 결과

그림 2의 과정에 따라 구현된 옷감의 움직임은 모델링 해보았다. 40×40, 모두 1600개의 파티클로 구성된 옷감을 그림 1과 같은 구조로 모델링 하였으며, 전단력을 고려해 주기 위해 대각선 스프링을 추가하였다. 또한 제약 풀이법에서는 3번 반복 계산하는 이완법을 사용하였다. 그림 4는 위 방법에 따른 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 특히 두 번째 그림은 충돌 문제가 정확하게 처리되고 있음을 보여주고 있다. 시뮬레이션 속도는 실시간 디스플레이가 가능한 25~30 프레임/초(fps)를 유지하였다.

5. 결론

본 연구에서는 실시간 상호작용이 필요한 응용 프로그램에서 사용할 수 있는 옷감 시뮬레이션의 방법을 제안하였다. 실시간 시뮬레이션을 유지하면서 정확성을 보장하기 위해 수학, 물리적인 항들을 근사하였다. 이완법을 통한

제약 풀이법의 사용으로 스프링 길이를 제어하여 큰 시간 간격에도 안정적인 시뮬레이션을 가능하게 하였다. 또한 각 지점에서 곡률을 고려한 내부 충돌 검사법을 제안하여 많은 계산량을 효율적으로 줄일 수 있었다.

앞으로 더 정확한 근사화를 위해 이산 미분기하 (Discrete differential geometry)를 고려한 옷감 내부의 벤딩(Bending) 에너지에 대한 연구가 요구된다. 또한 증강현실 환경에서 여러 개의 마커(Marker)를 이용한 응용프로그램에 대한 연구를 수행할 것이다.



(그림 4) 증강현실 환경에서 40×40 파티클로 구성된 옷감 시뮬레이션 결과. (위) 노멀맵 셰이딩(Normal map shading) (아래) 충돌 검사 및 처리.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업(No. R0A-2007-000-20049-0) 및 문화체육관광부 및 한국문화콘텐츠진흥원의 문화콘텐츠 기술연구소 육성사업의 연구결과로 수행되었음

6. 참고문헌

[1] David Baraff and Andrew Witkin, "Large Steps in

Cloth Simulation", SIGGRAPH 98 Conf. Proc., pp43-54, 1998
 [2] Kwang-Jin Choi and Hyeong-Seok Ko, "Stable but responsive cloth", SIGGRAPH 2002 Conf. Proc., pp604-611, 2002
 [3] Thomas Jakobsen, "Advanced Character Physics", Gamasutra, 2003
 [4] Xavier PROVOT, "Collision and self-collision handling in cloth model dedicated to design garments", 8th Eurographics Workshop on Animation and Simulation Proc., 1997
 [5] David Baraff. "Dynamic Simulation of Non-Penetrating Rigid Bodies", PhD thesis, Cornell University, 1992
 [6] Verlet, L. "Computer experiments on classical fluids. I. Thermodynamical properties of Lennard-Jones molecules", Phys. Rev., 159, 98-103, 1967
 [7] M. Müller, D. James, J. Stam and N. Thuerey. "Real Time Physics", SIGGRAPH 2008 Conf, Course Note, 2008