시스템의 성능에 따라 적절한 메쉬 크기 조절이 가능한 천 시뮬레이션 방법

*김대목[0] **이종원 ***백낙훈 *유관우
*경북대학교 컴퓨터공학과, **KOG Soft Inc., ***동국대학교 컴퓨터멀티미디어공학과
miravo@comeng.knu.ac.kr, wonlee@kogsoft.com, nhbaek@dgu.ac.kr, kwryu@bh.knu.ac.kr

A cloth simulation method using adaptive mesh size control depending on the system performance

*Daemog Kim[0] **Won Lee ***Nakhoon Baek *Kwanwoo Ryu
*Dept. of Computer Engineering, Kyungpook National University
**KOG Soft Inc.
***Dept. of Computer & Multimedia Engineering, Dongguk University

요 약

물리기반 모델링(physically based modeling)기법은 현실 세계에서 볼 수 있는 물체의 다양한 움직임을 물리 수식을 통해 사실적으로 표현 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이 기법을 적용하기 위해서는 많은 계산량을 필요로 하기 때문에 사용하는 시스템의 성능에 의존적이다. 예를 들어, 동일한 천 동작 알고리즘과 메쉬 크기를 가진 시스템을 서로 다른 성능을 가진 시스템에서 작동할 경우, 시스템의 성능에 따라 서로 다른 프레임 수를 나타낸다. 즉, 성능이 낮은 시스템에서는 계산 시간이 많아지기 때문에 느린 결과를 생성하게 된다. 반면에 성능이 높은 시스템에서는 상대적으로 계산 시간이 적기 때문에 보다 빠른 결과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 사용자의 요구에 맞는 프레임 속도를 보장할 수 있는 적합한 메쉬 크기로 구성하여 동작하도록 하는 시스템을 제안한다.

1. 서론

최근에 들어 게임 분야나 영화 산업에서는 다양한 컴퓨터 그래픽스 기법을 적용하는 사례를 많이 볼 수 있다. 특히, 실세계에서 표현하기 어려운 상황이나 복잡한 물체의 변형과정 등을 컴퓨터 그래픽스 기법을 이용하여 표현함으로써 더욱 사실감을 느낄 수 있도록 하고 있다.

변형 가능 물체(deformable body)의 모델링 기법과 같은 경우는 상당한 기간 동안 많은 응용 분야에서 적용되어 왔으며, 애니메이션과 컴퓨터 그래픽스 분야에서 천의 동작, 얼굴 표현, 그리고 인간 또는 동물의 움직임을 표현하는데 주로 사용되고 있다. 그러나 우리의 실생활에서 흔히 볼 수 있는 모든 동작을 컴퓨터를 통해 사실적으로 표현하기는 상당히 까다롭다.

Weil[7]의 연구에서는 이러한 어려움을 해결하기 위해 기하학적(geometric)방법을 이용해 시각적으로 수용할 수 있는 결과를 생성하였다. 이 방법은 효율적인 계산량을 나타내지만 사용자의 능숙한 기술에 많이 의존한다. 즉, 다양한 동작이나 예측 불가능한 외부 환경 등을 고려하여 표현하고자 할 경우 매번 사용자의 수정을 필요로 하므로, 활용 범위가 매우 좁아진다.

컴퓨터 그래픽스 분야에서는 물리적인 기법을 추가하여 이들의 동작을 상황에 따른 강체(rigid body)의 움직임이나 유동성있는 물체의 표현에 있어서 각기 다른 동작을 사실적으로 표현하는데 많은 발전을 이루어 왔다. 이러한 물리기법에서 적용 가능한 상황은 사용자의 다양한 반응 요구뿐만 아니라 중력, 바람, 공기저항, 물체들끼리의 부딪힘 등과 같은 외부 조건과, 각 물체마다 가지는 고유한 특성을 나타내는 내부 조건 등이 있다. 그러므로 물리기반 기법을 이용하면 다양한 환경에서도 반응할 수 있는 물체의 동작을 사실적으로 표현할 수 있다.

물리 기반 기법에서는 새로운 프레임 정보를 얻기 위해서는 매번 이전 프레임 정보를 이용하여 속도, 가속도, 그리고 새로운 위치 값을 계산해 주어야 하기 때문에 수행 속도가 느린 단점이 있다. 물리 기반 기법을 이용하여 천의 동작을 표현하고자 할 경우 시스템의 성능에 매우 의존적인 특징을 가지고 있다. 동일한 메쉬 크기인 경우, 시간의 흐름에 따라 나타나는 변형 결과는 매우 다르다.

본 논문에서는 이러한 문제점에 대하여 시스템의 성능에 가장 적합한 천의 크기로 구성하여 유사한 동작을 표현 가능하도록 하는 방안을 제안한다. 즉, 사용자가 원하는 프레임 수(fps: frame per second)를 보장해 주기 위해 높은 성능을 가진 시스템에서는 큰 메쉬 크기를 사용한다. 그러나 낮은 성능을 가진 시스템에서는 동일한 메쉬 크기를 사용하게 되면 원하는 수행 속도를 보장할 수 없기 때문에 적절하게 작은 메쉬 크기를 사용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 천의 동작을 표현하기 위해 제안된 여러 가지 방법 및 문제점 등을 살펴본다. 또한 3장에서는 본 논문에서 제안하고 있는 시스템의 구성과 적절한 메쉬 크기를 찾는 방법, 그리고 천의 구성 및 동작 원리, 적용된 수치 적분 방법에 대하여 기술한다. 4장에서는 본 연구에서 제안된 방법에 대한 실험결과를 보이고 있으며, 끝으로 5장에서는 결론 및 향후 연구과제에 대한 내용을 기술한다.

2. 관련 연구

일반적으로 사용하는 천 모델은 유한한 무게를 가지는 점들을 삼각 또는 사각 격자 형태로 구성하여 이들 사이의 물리적 관계를 계산하여 변형 동작을 나타낸다. 이 과정에서 동작을 표현하기 위하여 천을 구성하는 각 점들과 이웃하는 여러 개의 점들에 대하여 에너지 또는 힘에 관한 수식을 적용한다.

Terzopoulos[6]가 변형 가능 표면(deformable surface)으로 부터 천의 동작에 관한 방법을 제안한 이후로 보다 효율적인 동

작 방법에 대해 연구가 이루어져 왔다.[1,2,3]
Carignan[3]은 천을 격자 형태로 이산화 시켜서, 움직이는 사람의 모형에 천을 적용시켰다. 그러나 암시적 수치적분(implicit integration)을 이용하여 매우 작은 시간 간격을 사용하기 때문에 수행 속도가 상당히 느리다는 단점이 있다.
Breen[2]은 늘어지는 천의 모습에 대해 사실적인 이미지의 생성에 초점을 두었다. 그의 연구에서는 정적인 이미지의 생성을 위해 실제 천의 특성을 이용하였다. 그러나 시뮬레이션 속도는 고려하지 않았다.
Eberhardt[4]는 Breen[2]의 방법을 고차(higher-order)의 명시적 수치적분(explicit integration)을 이용해서 계산 비용을 많이 줄이는 방법을 제안한 바 있다.

3. Adaptive Mesh Size Cloth System

3.1 시스템 구성

일반적으로 동일한 조건을 가진 시스템의 동작을 성능이 서로 다른 시스템에서 시뮬레이션 할 때, 매 시간 마다 다른 결과를 보인다. 특히 물리 기반 시스템을 적용한 천의 동작을 시뮬레이션 하고자 할 경우 많은 계산량으로 인해 시스템의 성능에 매우 의존적인 특징을 가진다.
본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 천의 크기를 적절하게 조절하여 사용자의 요구에 맞는 초당 프레임 수(fps)를 보장하는 시뮬레이션 시스템을 제안한다. fps값은 다음과 같이 소요된 시간(elapsed time)의 역수로 구할 수 있다.

$$fps = \frac{1}{elapsed\ time} \tag{1}$$

그림 1은 본 논문에서 제안하는 전체적인 시스템의 흐름(flow)을 보여 주고 있다.

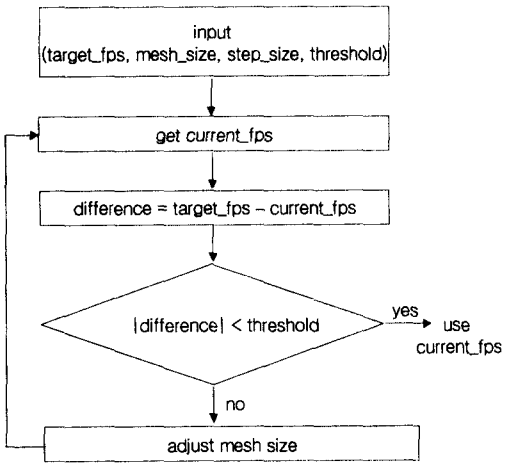

그림 1. 메쉬 크기 조절 시스템 흐름도

여기서, target_fps는 사용자가 수행 보장을 원하는 fps값을 나타낸다. mesh_size는 초기 입력 값으로 설정된 천의 크기를 말하며, step_size는 메쉬 크기를 조절하는 단위를 설정하는 값이다. 그리고 threshold는 사용자가 동작하기 원하는 fps값과 천의 동작 계산 함수 수행시간에 소요된 시간의 차이에 대한 허용 오차 값을 의미한다. 천의 동작을 계산하는 함수의 수행 시간을 계산하여 원하는 fps값과 비교하여 허용 임계값 범위 내에 있을 경우 현재의 메쉬 크기를 사용하게 된다. 그러나 허용 범위 값 내에 있지 않을 경우 메쉬 크기 값을 증가시키거나 감소시킴으로써 프레임 수를 변화시킨다. 그림 1에서 difference 값이 양의 값인 경우 step_size 값만큼 메쉬 크기를 증가시키고, 음의 값인 경우 step_size 값만큼 메쉬 크기를 감소시킨다. 이 방법을 통해 전체 시스템을 재수행하여 적절한 fps값이 얻어질 때까지 위의 과정을 반복한다.

3.2 mass-spring 시스템 구조

본 논문에서는 물리 기반 기법을 이용한 천의 동작을 나타내기 위해 mass-spring 모델을 사용한다. mass-spring 모델은 변형 가능 물체의 모델링에 효율적이고, 폭 넓게 사용되는 가장 간단한 기법들 중의 하나이다.[3,5] 이 모델은 변형 가능 물체를 질점(mass-point)들의 집합과, 질점들을 가상의 스프링 링크들로 연결한 구조로 표현한다. 이들의 동작을 생성하기 위해서 스프링 링크들은 각 질점들에 영향을 미치는 힘들을 생성하게 된다. 이 힘들을 적용하여 수치 적분을 통해 질점들의 새로운 위치를 찾는다. 각 질점들 사이에서 적용되는 스프링 힘에 관한 식은 다음과 같이 표현된다.

$$f_a = -\left[k_s(|l| - r) + k_d \frac{l' \cdot l}{|l|}\right]\frac{l}{|l|}, \quad f_b = -f_a \tag{2}$$

여기서 k_s는 스프링 상수값, l은 두 질점 사이의 거리, l'은 두 질점 사이의 거리에 대한 미분 값, r은 두 질점 사이의 초기 길이, k_d는 Damping 상수 값을 나타낸다.
이들 질점들 사이에서의 힘의 관계를 나타내기 위해 다음과 같이 뉴턴의 동역학 법칙을 적용한다.

$$F_e(i,j) + F_i(i,j) = m\ a(i,j) \tag{3}$$

여기서 m은 점 $P(i,j)$의 질량을 나타내고, $a(i,j)$는 그 점에 대한 가속도를 나타낸다. $F_e(i,j)$와 $F_i(i,j)$는 각각 점 $P(i,j)$에 작용하는 외부 힘(external force)과 내부 힘(internal force)를 의미한다.

3.3 Cloth Modeling

그림 2에서 보는 바와 같이 Provot[5]이 제안한 제한 조건(constraint) 적용이 가능한 전형적인 mass-spring 모델을 사용하여 천을 구성하였다.

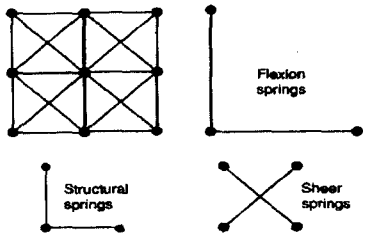

그림 2. Provot의 mass-spring 모델

이 모델에서는 스프링의 힘 전달 구조를 flexion, structural, shear로 나누고 있다. flexion spring은 각각 $(P_{i,j}, P_{i+2,j})$ $(P_{i,j}, P_{i,j+2})$사이에서 사용되는 힘 전달 구조이다.
또한 structural spring은 각각 $(P_{i,j}, P_{i+1,j})$, $(P_{i,j}, P_{i,j+1})$ 사이에서 적용되는 힘 전달 구조를 말한다. 그리고 shear spring은 각각 $(P_{i,j}, P_{i+1,j+1})$, $(P_{i,j}, P_{i,j+1})$에서 전달되는 힘의 구조를 의미한다.

3.4 수치 적분 방법

물리기반 모델링을 기반으로 하는 대부분의 기법들은 상미분 방정식(ODE: Ordinary Differential Equation)[1]을 이용해서 시간의 흐름에 따른 수치 적분 방법을 통해 자연스러운 동작 생

성에 관한 문제를 해결하고 있다. 이들 방법 중에서 가장 간단한 수치 적분 방법인 오일러 방법(Euler method)에 의한 속도와 위치에 관한 식은 다음과 같다.

$$v_i^{n+1} = v_i^n + F_i^n \frac{dt}{m}$$
$$x_i^{n+1} = x_i^n + v_i^{n+1} dt \quad (4)$$

위의 식에서 v는 속도, F는 힘, dt는 시간 간격, m은 질량을 나타낸다.

4. 실험 결과

본 실험에서는 시스템에서 사용할 최적의 메쉬 크기를 결정하기 위해 초기 입력 값으로 target_fps값을 50, 초기 메쉬 크기 값을 30, step_size는 1로 설정하였다. 또한 최대 허용 오차(threshold)값을 0.0001로 하여 거의 정확한 메쉬 크기를 얻도록 하였다. 표 1에서는 사용자가 요구하는 프레임 수의 크기에 따라 수행 성능에 최적인 메쉬 크기를 나타내고 있다.

항목 / fps	메쉬 크기	frame 수행시간(10ms)
5	64	19.93
10	45	10.01
15	37	6.67
20	32	5.09
25	29	3.91
50	21	1.99
100	15	0.99
200	11	0.51
250	9	0.41

표 1. 각 fps에 따른 최적 메쉬 크기

본 시스템은 펜티엄Ⅲ 450MHz, 256M RAM 그리고 Windows 2000 환경에서 Visual C++ 6.0과 OpenGL 1.2를 사용하여 구현되었다. 그림 3에서는 70 fps의 속도로 각각 펜티엄Ⅲ 450MHz와 펜티엄Ⅲ 800MHz에서 수행한 결과를 보여주고 있다.

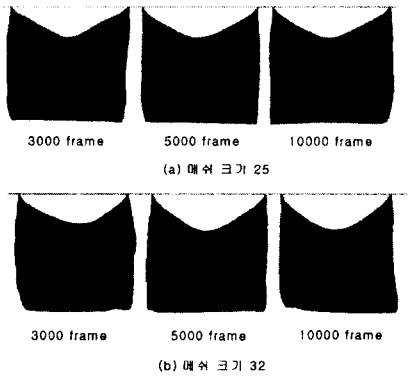

그림 3. 성능이 다른 두 시스템에서의 결과

5. 결론 및 향후 연구 과제

컴퓨터 그래픽스에서 물리 기반 방법을 적용하는 이유는 실세계에서 나타나는 현상을 수치적인 식을 이용하여 사실적으로 표현하는데 있다. 물리 기반 기법을 적용한 천 동작 시스템에서는 하나의 프레임을 출력하기 위해 모든 질점에 대해 힘, 가속도, 속도, 그리고 새로운 위치 값을 매번 계산해야 하기 때문에 실시간 요구를 만족시키지 못하는 경우가 생기기 쉽다. 그림 4에서 보는 바와 같이 메쉬 크기가 증가할수록 대부분의 시간을 계산 과정에서 소비하는 단점이 있다.

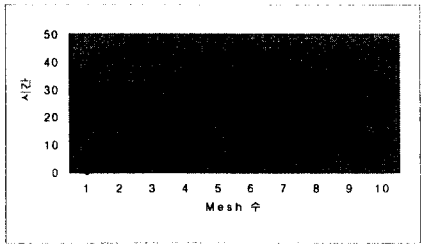

그림 4. 메쉬 크기에 대한 수행시간(100ms)

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 사용자의 요구에 맞는 프레임 속도를 보장하기 위하여, 최적의 메쉬 크기로 재구성하는 시스템을 제안하였다. 본 시스템에서는 사용자의 요구에 대하여 계산과정에서 사용되는 시간을 미리 계산하여, 동작에 가장 적합한 천의 크기를 결정함으로써 시각적으로 유사한 결과를 생성해 낼 수 있었다. 이러한 시스템은 항상 일정한 속도를 요구하는 게임 분야에서 천의 움직임을 적절하게 표현하는데 적용 가능할 것이다. 향후에는 다른 물체와 같이 동작하는 복잡한 환경에서 천의 동작을 표현할 때 동작의 중간 과정에서도 시스템의 성능에 따라 천의 크기가 변화 가능하도록 표현하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

6. 참고 문헌

[1] D. Baraff and A. Witkin. "Large steps in cloth simulation", *Computer Graphics(SIGGRAPH '98)*, pp. 43-52, 1998.

[2] D. Breen, D.House, and M. Wonzy. "Predicting the drape of woven cloth using interacting particles", *Computer Graphics(SIGGRAPH'94)*, pp. 365-372, 1994.

[3] B. Carignan, Y. Yang, N. Thalmann, and D. Thalmann. "Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes", *Computer Graphics(SIGGRAPH'92), pp.* 99-104, 1992.

[4] B. Eberhardt, A. Webber, and W. Strasser. "A fast, flexible, particle-system model for cloth draping", *IEEE Computer Graphics and Applications*, 16:52-59, 1996.

[5] X. Provot "Deformation Constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior", *Proceedings of graphics interface*, pp. 147-154, 1995.

[6] D. Terzopoulos, J. Platt, and A. Barr. "Elastically deformable models", *Computer Graphics(SIGGRAPH'87)* pp. 205-214, 1987.

[7] J. Weil, "The synthesis of Cloth Objects", *Computer Graphics(SIGGRAPH'86)*, Vol.20, pp. 49-54, 1986.