플라이스틱 시뮬레이션*

조동철[0], 이제희
서울대학교 컴퓨터공학부
(dcjo, jehee)@mrl.snu.ac.kr

Flystick Simulation

Dongchul Jo[0], Jehee Lee
Dept. of Computer Science and Engineering, Seoul National University

요약

변형될 수 있는 얇은 도체에 전하가 가해지면 전하들 사이의 반발력으로 인해 도체의 형태가 변한다. 우리는 이 변형에 대한 물리 시뮬레이션 방법을 제안한다. 시뮬레이션은 크게 2단계로 이루어진다. 매 순간마다 현재 도체의 형태로부터 도체 내의 전하의 분포를 계산한다. 그리고 계산한 전하의 분포로부터 도체 내의 각 부분에 가해지는 전기력을 계산하여 적용한다. 이 과정의 반복으로 얇은 도체는 매 순간 변형된다. 우리는 부분적으로 잘린 사각형 모양의 얇은 도체를 시뮬레이션 하여 사실적인 결과를 얻을 수 있었다.

1. 서론

플라이스틱은 과학 완구의 한 종류로 가벼운 도체를 접촉을 통해 공중에 띄울 수 있다. 이 스틱과 접촉한 도체는 전자를 잃어 양전하를 띠게 되며, 가벼운 도체의 경우 스틱의 양전하와 반발력을 일으켜 공중에 뜨게 된다. 이 때, 가벼운 도체가 변형가능 하다면 도체는 내부의 양전하들의 서로 밀어내는 힘으로 인해 모양이 변형되면서 날아가게 된다.

이 논문에서는 이러한 얇고 변형가능한 도체에 전하가 가해졌을 때의 도체의 변형을 시뮬레이션 하는 방법을 제시한다. 변형이 일어나는 도체에서는 도체 내부의 전하의 움직임을 추적해야 한다. 동시에 이 전하로 인해 발생하는 도체 내부의 반발력에 의한 도체의 변형도 추적해야 한다. 여기서 가장 큰 문제점은 도체 내부의 전하의 위치가 도체 내부의 전하의 반발력에 영향을 미치고, 이 반발력에 의한 도체의 변형이 다시 도체 내부의 전하 사이의 상호작용에 영향을 미친다는 점이다.

* 구두발표논문
* 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2007-0056094 & No.2011-0018340)

우선 얇은 도체의 변형을 효율적으로 표현하기 위해 종이나 옷과 같은 얇은 물체의 구김이나 접힘을 표현하는데 쓰인 기술[1,2]을 활용하였다. 이 기술은 도체 내부의 반발력으로 인해 나타나는 도체의 몇몇 부분에서의 극단적인 뒤틀림을 표현하기에 적절하다.

도체 내에서 전자가 매우 빠른 속도로 이동한다는 점에 착안하여 전하들의 움직임을 추적하는 대신 전하들이 도달하려는 목적지를 찾는다. 매 순간 전하들은 서로간의 척력으로 인해 도체 내에서 보다 안정된 형태로 분포되고자 한다. 도체 내의 각 부분에서 같은 전기 포텐셜 에너지를 갖기 위한 전하들의 분포는 이 조건을 만족한다.

전하를 가진 물체 사이에 존재하는 힘은 쿨롱의 법칙에 따라 쉽게 계산할 수 있다. 이 논문에서는 대전된 변형가능한 얇은 도체 내부의 각 부분들 사이에 작용하는 힘을 쿨롱의 법칙에 따라 계산하였다.

2. 얇은 도체 모델

대전된 얇은 도체는 내부의 전하들의 반발력에 의해 대개 둥글게 부풀어지는 형태로 변형된다. 부분적으로 잘린 종이와 같이 얇은 도체를 생각해보자. 이 도체에 전하가 가해지면 전체적으로 둥글게 부풀어오르면서 대부분의 부분에서는 완만한 곡선의 형태를 띠도록 변형이 일어난다. 동시에 잘려진 몇몇 부분에서는 급격한 뒤틀림이 발생한다. 시뮬레이션에서 사용될 모델은 완만한 곡선과 급격한 뒤틀림을 동시에 잘 표현할 필요가 있다. R. Narain이 제시한 동적 리메싱은 시뮬레이션 도중에 각 부분에 가해지는 힘에 따라 필요한 경우에만 리메싱을 하는 방법으로 이와 같은 상황에 적합하다. 이 논문에서는 이 모델에 전하와 전기력의 작용을 추가하여 변형가능한 얇은 도체 모델로 활용한다.

서울대학교 | IP: 147.46.242.*** | Accessed 2017/07/05 15:34(KST)

3. 시뮬레이션

매 순간 얇은 도체의 형태로부터 전하의 분포를 계산한다. 이 전하의 분포로부터 도체 내의 각 부분에 작용하는 전기력을 쿨롱의 법칙으로 계산하여 적용한다.

3.1. 전하 분포 계산

전하 사이에 작용하는 상호작용에 의해 도체 내에서 전하들은 이동한다. 도체 내에서 전자들은 매우 빠른 속도로 움직이기 때문에 이 전하들의 이동을 하나씩 추적하는 것보다 전하들이 안정한 상태를 이룰 때의 분포를 구하는 것이 훨씬 효과적이다.

도체 내에서의 전하들의 안정된 분포를 가질 때, 이 분포는 시간이 흘러도 달라지지 않는다. 즉, 전하들은 이동하지 않으며, 이는 도체의 각 표면은 모두 동일한 전기 포텐셜 에너지를 가진다는 것을 의미한다. 삼각형 메쉬로 표현된 얇은 도체에서 메쉬의 점마다 전하가 배치된다고 할 때, 메쉬의 모든 점에서 동일한 포텐셜 에너지를 이루기 위한 전하의 분포는 선형 시스템으로 표현하여 구할 수 있다. [3]

3.2. 전기력 계산

대전된 변형가능한 얇은 도체 내부의 각 부분들 사이에 작용하는 힘을 쿨롱의 법칙에 따라 계산할 수 있다. 한 점에 존재하는 전하와 다른 점들에 존재하는 전하들 사이의 반발력은 중첩의 원리에 따라 한 점과 다른 한 점 사이에 존재하는 반발력들의 합으로 나타낼 수 있다. 이 방법으로 대전된 얇은 도체의 각 부분에 가해지는 반발력을 구할 수 있으며, 이 힘으로 얇은 도체 모델을 변형시켜 다음 순간의 얇은 도체의 형태를 결정할 수 있다.

3.3. 계산 속도 향상

3.2.에서 전기력을 계산할 때, 메쉬의 모든 점들 사이에 각각 쿨롱의 법칙을 적용시켜 그 결과를 중첩의 원리에 따라 더해 각 점에 가해지는 전기력을 계산한다. 이 방법의 시간복잡도는 $O(n^2)$로 점의 수가 조금만 늘어나도 필요한 계산의 수가 급격히 늘어난다.

K-D tree를 이용하면 이 문제를 완화시킬 수 있다.[4] 메쉬의 각 점의 위치를 기준으로 K-D tree를 형성하고 각 점에 분포한 전하량을 저장한다. 비말단 노드는 자신과 그 하위노드의 모든 점들에 분포된 전하량의 합과 그 전하량이 하나의 가상의 점 전하라고 생각할 때의 그 전하의 위치 값을 가진다. 이 전하의 위치는 하위 노드들의 전하량을 기준으로 한 전하들의 위치의 가중합으로 구해진다.

K-D tree를 사용하면 한 점에 작용하는 전기력을 계산하는데에 K-D tree의 높이에 비례하는 시간이 소모된다. (그림 1 참조) 그래서 각 점에 가해지는 전기력을 계산할 때의 시간복잡도는 $O(n \log n)$이 된다.

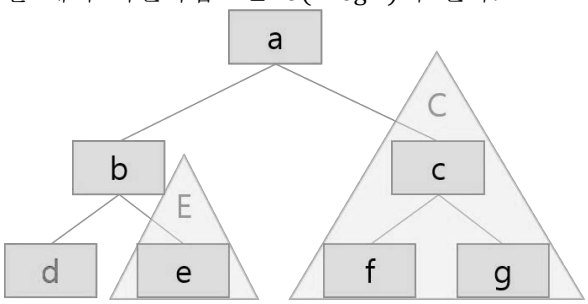

그림 1: 7개의 점으로 구성된 K-D tree이다. C는 c노드와 그 하위노드의 전하량를 모두 가진 가상의 점 전하이다. 점 d에 작용하는 전기력은 점 d와 점 a, b사이의 쿨롱힘과 점 d와 가상의 점 전하 C, E 사이의 쿨롱힘의 합으로 구할 수 있다.

4. 결과

플라이스틱에서 사용되는 것과 같은 칼집을 낸 사각형 모양의 얇은 도체를 시뮬레이션 하여 사실적인 결과를 얻을 수 있었다. 대전된 도체의 각 부분은 서로 반발력을 일으켜 가능한 멀리 떨어지려는 움직임을 보였다. 또한, 잘린 몇몇 부분에서는 실제와 같은 급격한 뒤틀림 현상이 잘 나타났다.

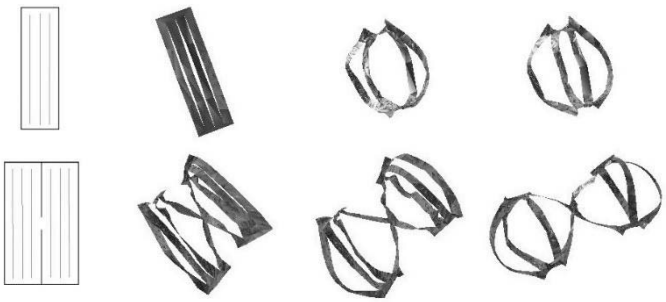

그림 2: 가운데 부분이 길게 잘린 특징을 가진 얇은 도체들의 시뮬레이션 결과이다. 맨 왼쪽의 사각형은 얇은 도체의 초기 디자인 형태이다. 오른쪽은 시뮬레이션이 진행됨에 따라 도체가 변형된 모습을 보여준다.

참고문헌

[1] R.Narain, A.Samii and J.F.O'Brien, Adaptive Anisotropic Remeshing for Cloth Simulation, *ACM Transaction on Graphics 31*, 6, 152:1-152:10, 2012

[2] R.Narain, T.Pfaff and J.F.O'Brien, Folding and Crumpling Adaptive Sheets, *ACM Transaction on Graphics 32*, 4, 51:1-51:8, 2013

[3] H.Wang, K.A.Sidorov, P.Sandilands and T.Komura, Harmonic Parameterization by Electrostatics, *ACM Transaction on Graphics 32*, 5, 155:1-155:12, 2013

[4] C.Shen, J.F.O'Brien and J.R.Shewchuk, Interpolating and Approximating Implicit Surfaces from Polygon Soup, *Proceeding of ACM SIGGRAPH 2004*, 896-904, 2004

서울대학교 | IP: 147.46.242.*** | Accessed 2017/07/05 15:34(KST)