

옷감-고체 충돌에서 떨림 문제를 줄이기 위한 효율적인 SDF 기반 접근 방식

박은수^o, 김종현^{*}

^o인하대학교 정보통신공학과,

^{*}인하대학교 소프트웨어융합대학 디자인테크놀로지학과

e-mail: jonghyumkiun@inha.ac.kr

Efficient SDF-based Approach to Reduce the Trembling Issue in Cloth-Solid Collisions

Eun-Su Park^o, Jong-Hyun Kim^{*}

^oDept. of Information and Communication Engineering, Inha University,

^{*}College of Software and Convergence (Dept. of Design Technology), Inha University

● 요약 ●

본 논문에서는 PBD(Position-based dynamics)를 이용한 옷감 시뮬레이션에서 페이스(Face) 및 에지(Edge)의 충돌/접촉을 처리할 때 나타나는 표면 떨림 문제를 SDF(Signed Distance Field) 접근법을 통해 안정적으로 해결할 수 있는 기법을 제안한다. 충돌 제약 조건을 이용한 충돌처리에서 나타나는 옷감 시뮬레이션의 떨림 현상을 개선하기 위해 본 논문에서는 페이스 및 에지 내부에 존재하는 충돌 지점의 속도를 충돌 법선 방향과 접선 방향으로 나누어 계산하는 과정을 거치며, 그 운동량을 페이스 및 에지에 포함된 연결된 정점(Vertex)에 전달한다. 본 논문에서 제안하는 기법은 일반적인 SDF 기반 충돌 처리에서 나타나는 충돌 시 떨림 현상을 개선하며, 기존의 방법보다 안정적인 SDF 충돌처리가 가능하기 때문에 다양한 변형체 재질을 시뮬레이션 할 때 활용될 수 있다.

키워드: 옷감 시뮬레이션(Cloth simulation), PBD(Position-based dynamics), SDF(Signed distance field), 충돌처리(Collision handling)

I. Introduction

SDF를 이용한 충돌처리 접근법은 전처리 과정에서 고체로부터의 거리를 계산할 수 있기 때문에 실시간 애플리케이션에서 충돌처리 및 사용자 상호작용에 많이 사용되고 있다. 하지만 다양한 재질을 쉽게 표현할 수 있는 동역학 기법인 PBD에서 사용하는 충돌 제약 조건은 속도를 업데이트하는 과정에서 표면이 떨리는 문제가 발생하며 [1], 본 논문에서는 이 떨림 문제를 완화하기 위한 효율적인 SDF 기반 충돌처리 기법을 제안한다.

시뮬레이션하고, 이를 이용한 충돌처리에 대한 몇 가지 접근법에 대해서 간단히 리뷰한다.

PBD는 각 정점에 대해 제약조건을 생성하고, 이를 만족시키기 위해 Newton-Raphson 방법을 사용해 반복적으로 투영하는 방법을 제안한다[1]. 본 논문은 옷감 시뮬레이션을 구현하기 위해 제약 조건을 생성하고 Sub-Steps 방식을 통해 반복적인 제약 조건 투영을 진행한다.

충돌처리는 각 정점의 위치 x 에 대한 SDF를 함수 $\phi(x)$ 로 가정한다[2,3]. 이때 $\phi(x)$ 는 해당 위치에서의 부호화된 유클리드 거리에 해당하며, $\phi < 0$ 인 점들의 집합을 오브젝트의 내부로 정의하기 때문에 $\nabla\phi$ 값은 표면으로부터 최대로 멀어지는 방향 즉, 충돌 법선 방향이 된다. 이를 이용해 각 정점의 속도를 충돌 법선 방향과 접선 방향으로 나누어 충돌처리를 진행하며, 본 논문에서는 이러한 개념을 확장하여 안정적인 충돌처리를 진행한다.

충돌감지는 SDF를 활용한 삼각형을 구성하는 페이스와 에지 사이의 접촉을 연속적인 방식으로 충돌 처리하는 방법을 제안한다[4].

II. Preliminaries

1. Related works

PBD를 이용한 옷감 시뮬레이션에서 충돌처리는 컴퓨터 그래픽스 분야에서도 특히, 물리 기반 시뮬레이션 분야에서 오랜 기간 동안 연구되어 왔다. 본 논문에서는 옷감 시뮬레이션을 PBD 기반으로

이산화된 위치에서 접촉을 생성하던 이전 접근법과는 다르게, Projected Gradient Descent와 Frank-Wolfe 방법과 같은 로컬 최적화를 위한 수치 해석적 방법을 사용하여 실제 정점이 존재하지 않는 페이스와 에지 내부에 연속적인 접촉을 생성한다.

먼저, 옷감의 모든 삼각형 메쉬에 대해 임의의 점 x 을 지정하고 Projected Gradient Descent 방법을 이용해 거리 값이 가장 작은 지점을 계산한다. 이때, 삼각형 메쉬 내부에서 $\phi(x)$ 값이 가장 작은 점 x 을 계산하는 과정은 다음과 같은 수식의 반복 계산을 통해 이루어진다 (수식 1 참조).

$$x_{i+1} = P(x_i - \alpha \nabla \phi) \quad (1)$$

여기서 P 는 무게중심 좌표(Barycentric coordinate)에 의한 삼각형 메쉬 위의 투영을 의미하고 x_i 는 i 번째 투영된 삼각형 메쉬 내부의 점이다. 또한, α 는 $\nabla \phi$ 방향으로의 하강 가중치로, step size를 의미한다.

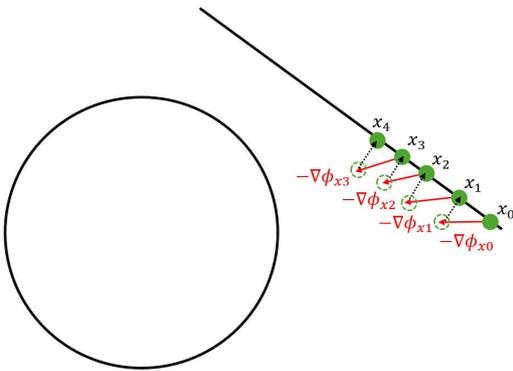


Fig. 1. Projected Gradient Descent in 2D.

Fig. 1은 x_0 부터 시작하는 2차원에서의 Projected Gradient Descent를 나타낸다. 검정색 화살표는 투영을 나타내며, 빨간색 화살표는 Gradient Descent 방향을 나타낸다. 본 논문에서는 충돌 감지에서 메쉬와 SDF로 표현되는 물체 사이의 가변 되는 원활한 접촉을 생성하기 위해 Macklin *et al.*이 제안한 Projected Gradient Descent 방법을 이용하여 로컬 최적화를 진행시켜, 충돌을 감지하는 접근법을 사용한다[4].

III. The Proposed Scheme

1. Notation

먼저, 설명의 편의를 위해 표기법을 설명한다. Macklin *et al.*이 제안한 충돌감지를 사용하여 계산한 삼각형 메쉬 내부의 접점을 p 라 하고, 해당 메쉬의 세 정점을 $p_i, i \in [1, 2, 3]$ 라 한다[4]. 또한, n 번째 시간간격(Time-step)에서 점 p 의 위치는 x_p^n , 정점의 속도는 v_p^n 으로 표기한다. v_{pm}^n 은 속도 v_p^n 의 충돌 법선 방향 속도를 의미하고, v_{pt}^n 는 충돌 접선 방향 속도를 의미한다. 이때 충돌 법선 방향은 크기가

1인 $\nabla \phi$ 방향이며, 제약조건 투영으로 계산된 속도는 v_c 로 표기하고, 시뮬레이션 시간을 Δt , sub-step의 시뮬레이션 시간을 Δt_s 로 표기한다.

2. Constraint based collision handling

삼각형 mesh 내부의 점 p 에 대해 생성된 충돌 제약 조건은 PBD에서 제안한 다음 식을 통해 투영이 이루어진다[1] (수식 2 참조).

$$C(p + \Delta p) \approx C(p) + \nabla_p C(p) \cdot \Delta p = 0 \quad (2)$$

여기서 C 는 p 에 대한 제약 조건 함수이며, $C(p + \Delta p)$ 를 0으로 만들기 위한 Δp 는 다음 식을 통해 계산한다 (수식 3 참조).

$$\Delta p = - \frac{C(p)}{|\nabla_p C(p)|^2} \nabla_p C(p) \quad (3)$$

위 수식은 비선형 방정식의 해를 구하는 Newton-Raphson 방법의 형태를 가진다. 또한, 이를 각 정점 Δp_i 에 대한 식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다 (수식 4 참조).

$$\Delta p_i = - \frac{C(p_1, \dots, p_n)}{\sum_j |\nabla_{p_i} C(p_1, \dots, p_n)|^2} \nabla_{p_i} C(p_1, \dots, p_n) \quad (4)$$

이와 같은 식을 이용해 삼각형 메쉬 내부의 점 p 에서 $\phi(x)$ 값을 0으로 만드는 주변 정점 p_i 의 변위를 계산할 수 있다. 그 다음, 수식 4를 통해 얻은 메쉬의 각 정점 p_i 의 변위를 시뮬레이션 시간 Δt 로 나누어 v_c 를 계산하고, 속도를 $v_p^{n+1} = v_p^n + v_c$ 로 업데이트한다.

제약 조건을 기반으로 속도를 업데이트했을 때, Fig 2에서처럼 현재 속도에 의해 Δt 시간 뒤에 정점 p 의 $\phi(x_p^{n+1})$ 값이 0이 되지 못하고, 충돌처리 과정에서 떨림 현상이 관측된다 (Fig 2에서 빨간색 화살표 참조).

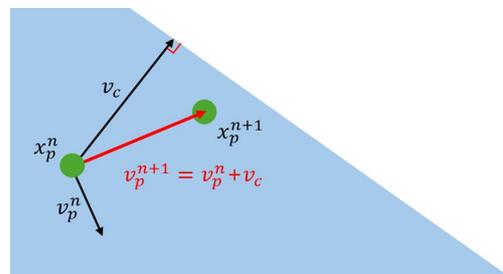


Fig. 2. Constraints based Collision Handling with previous method[2].

앞에서 관측된 떨림 현상 개선을 위해 현재 속도 v_p^n 을 $v_{pm}^n = v_p^n \cdot N$ 과 $v_{pt}^n = v_p^n - v_{pm}^n N$ 로 구분한 뒤, 다음 식을 통해 속도를 업데이트한다 (수식 5 참조).

$$v_p^{n+1} = v_{pt}^n + v_c \quad (5)$$

위 식은 현재 속도의 충돌 법선 방향 성분을 제거하여 Δt 시간 뒤에 정점 p 의 $\phi(x_p^{n+1})$ 값이 0이 되는 위치로 이동 가능하며, 접선 방향 성분을 유지한다.

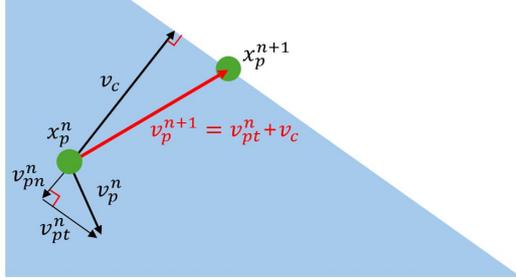


Fig. 3. Improved Constraints based Collision Handling

3. Implementation

본 논문에서 제안하는 PBD 제약 기반 충돌 알고리즘을 기반으로 설계했다. Fig. 4의 알고리즘은 Sub-steps 방식의 PBD 시뮬레이션을 진행하고 있으며, Δt 는 0.01, n 은 5이다. 또한, 충돌감지 과정에서 경계 구(Bounding sphere)를 이용해 Culling을 진행하였고 점점의 수렴을 위한 반복 횟수를 20으로 설정하였다. 추가적으로, Projected Gradient Descent에서의 하강 가중치 α 와 $|\nabla\phi|$ 의 크기를 1로 설정하였다.

Algorithm 1 PBD Collision Handling

```

1:  $\Delta t_s \leftarrow \Delta t/n$ 
2: while simulation  $\Delta t$  do
3:   for  $n$  substeps do
4:     for all vertices  $i$  do
5:        $v_i \leftarrow v_i + g \times \Delta t_s$ 
6:        $pos1_i \leftarrow pos_i + v_i \times \Delta t_s$ 
7:     end for
8:     for all constraints  $C$  do
9:       solve( $C, \Delta t_s$ )
10:    end for
11:    for all vertices  $i$  do
12:       $v_i \leftarrow (pos1_i - pos_i)/dt_s$ 
13:       $pos_i \leftarrow pos1_i$ 
14:    end for
15:    for all faces  $i$  do
16:      Bounding Sphere (Culling)
17:      Projected Gradient Descent( $f_i$ )
18:      if sdf( $p$ ) < 0 then
19:        solve Constraints
20:         $v_i \leftarrow v_c + v_{pt}$ 
21:      end if
22:    end for
23:  end for
24: end while

```

Fig. 4. PBD Collision handling algorithm.

IV. Results

본 논문에서는 옷감-고체 상호작용 시 떨림 문제가 얼마나 크게 나타나는지 실험하기 위해 SDF 형상으로 구성된 고체의 PBD 기반 옷감 시뮬레이션을 상호작용했다. Fig 5는 상호작용 된 옷감에 포함된 정점 하나의 Y축 값 변화를 나타내는 표이다.

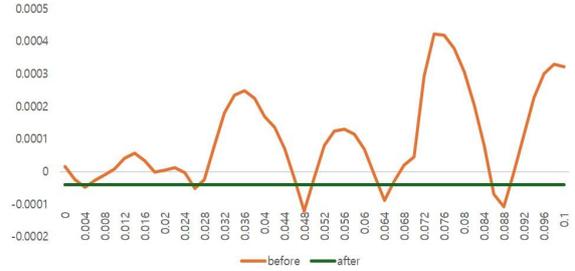


Fig. 5. Changing the Y-value of a vertex on the cloth.

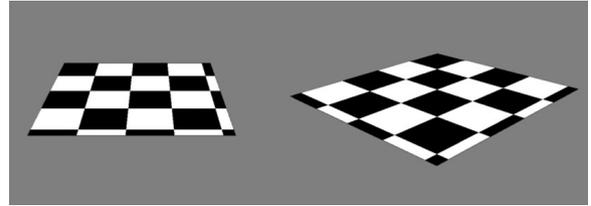


Fig. 6. Cloth-solid(plane) interaction with our method.

Fig 6은 우리의 방법을 이용하고 PBD기반 옷감과 평면을 상호작용 한 결과이다. 옷감을 평면에서 드래그 했을 때, 기존 방법은 정점이 떨리는 문제가 시각적으로 나타나지만, 제안하는 방법은 Fig. 5에서 보여주듯이 깔끔하게 평면상에서 미끄러지는 듯한 움직임을 잘 보여주고 있다.

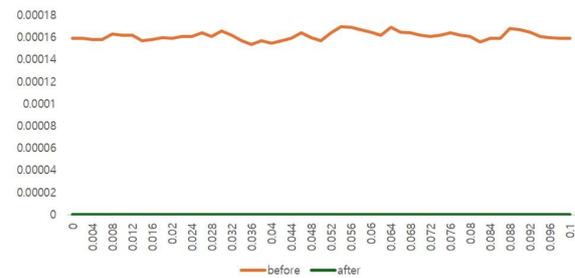


Fig. 7. Average position change of all vertices.

Fig 7은 옷감 전체 정점의 평균 위치 변화의 강도를 나타내는 차트이다. 실험 환경은 Fig. 5와 같으며, Δt_s 마다 값을 측정했다. 차트에서 보듯이 본 논문에서 제안한 SDF 충돌처리 기법이 기존 방법의 떨림 현상을 보완한 것을 확인할 수 있다.

V. Conclusions

본 논문에서는 SDF로 변환된 고체와 PBD 기반 옷감의 상호작용 시 발생하는 떨림 문제를 완화시켜줄 수 있는 새로운 방법을 제안했다. 제안하는 방법은 PBD의 속도에 직접 제어하기 때문에 위치 업데이트 방식의 PBD보다 충돌 과정에서 발생하는 마찰력과 같은 현상을 더욱 간단하게 구현할 수 있다. 향후, 이러한 확장성을 이용하여 더욱 복잡한 삼각형 메쉬 모델에 대하여 SDF를 구현하고, 이와 충돌 관련 상호작용 현상을 GPU에서 구현하도록 확장할 계획이다.

REFERENCES

- [1] Müller, Matthias, Bruno Heidelberger, Marcus Hennix, and John Ratcliff. "Position based dynamics." *Journal of Visual Communication and Image Representation* 18, no. 2 (2007): 109-118.
- [2] Bridson, Robert, Sebastian Marino, and Ronald Fedkiw. "Simulation of clothing with folds and wrinkles." In *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, pp. 3-es. 2005.
- [3] Selle, Andrew, Jonathan Su, Geoffrey Irving, and Ronald Fedkiw. "Robust high-resolution cloth using parallelism, history-based collisions, and accurate friction." *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 15, no. 2 (2008): 339-350.
- [4] Macklin, Miles, Kenny Erleben, Matthias Müller, Nuttapong Chentanez, Stefan Jeschke, and Zach Corse. "Local optimization for robust signed distance field collision." *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques* 3, no. 1 (2020): 1-17.