

## Stable SDF-Based Collision Handling for Cloth-Solid Interaction in Position-Based Dynamics

Jong-Hyun Kim\*

\*Associate Professor, College of Software and Convergence (Dept. of Design Technology), Inha University, Incheon, Korea

### [Abstract]

This paper presents an efficient and stable PBD-based collision handling method for cloth-solid interaction. Conventional iterative constraint projections often produce trembling artifacts during collision response, degrading visual quality and stability. To mitigate this, we propose an SDF-based scheme that decomposes vertex velocities into normal and tangential components: the normal component is stably attenuated while tangential motion is preserved, enabling smooth sliding without oscillation. We further propagate velocity corrections to neighboring face and edge vertices to maintain consistent projections across adjacent regions. Integrated into a sub-stepped PBD solver, the method improves collision stability with negligible overhead. Experiments show reduced surface trembling and more continuous, physically plausible motion, making the approach suitable for real-time cloth simulation and interactive virtual garment applications.

▶ **Key words:** Position-Based Dynamics, Cloth Simulation, Signed Distance Field, Collision Handling, Real-Time Physics

### [요 약]

본 논문은 위치 기반 동역학(PBD) 프레임워크 기반의 효율적이고 안정적인 옷감-강체 충돌 처리 기법을 제안한다. 기존 PBD 시뮬레이션에서는 반복적 제약 조건 투영 과정에서 충돌 응답 시 옷감 표면에 떨림이 발생해 시각적 품질과 수치적 안정성이 저하된다. 이를 해결하기 위해 정점 속도를 법선/접선 성분으로 분해하는 SDF 기반 기법을 제안하며, 법선 성분은 안정적으로 감쇠시키고 접선 성분은 유지하여 진동 없이 표면을 따라 부드럽게 미끄러지도록 한다. 또한 속도 보정을 인접한 면 및 에지 정점으로 전파해 이웃 영역 전반에서 일관된 제약 조건 투영을 보장한다. 본 기법은 서브스텝 기반 PBD 솔버에 통합되어 추가 계산 비용 없이 충돌 안정성을 향상시키며, 실험을 통해 표면 떨림 감소와 연속적이고 물리적으로 타당한 움직임을 확인하였다.

▶ **주제어:** 위치 기반 동역학, 옷감 시뮬레이션, 부호화 거리장, 충돌 처리, 실시간 물리 시뮬레이션

- 
- First Author: Jong-Hyun Kim, Corresponding Author: Jong-Hyun Kim
  - \*Jong-Hyun Kim (jonghyunkim@inha.ac.kr), College of Software and Convergence (Dept. of Design Technology), Inha University
  - Received: 2025. 11. 06, Revised: 2026. 01. 17, Accepted: 2026. 01. 20.

## I. Introduction

최근 컴퓨터 그래픽스 분야에서 옷감과 같은 변형체의 물리 기반 시뮬레이션은 사실적인 재질 표현과 동적인 상호작용을 구현하기 위한 핵심 기술로 자리 잡고 있다. 특히, PBD 기법은 안정적인 수치적 거동과 빠른 계산 속도로 인해 실시간 애플리케이션(게임, 가상현실, 인터랙티브 디자인 등)에서 널리 활용되고 있다[1]. 그러나 PBD의 제약 조건 기반 위치 업데이트 방식은 계산 효율성은 높지만, 충돌 처리 단계에서 정점의 위치가 반복적으로 보정될 때 표면의 미세한 떨림 현상이 발생하는 문제가 존재한다. 이러한 떨림은 시각적 품질 저하뿐 아니라, 연속적인 시간 적분 과정에서 수치적 불안정성으로 누적될 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 충돌 처리 기법이 제안되어 왔으며, 그중에서도 SDF 기반 접근법은 고체 표면으로부터의 거리를 명시적으로 계산할 수 있기 때문에 효율적인 충돌 감지와 법선 계산이 가능하다는 장점이 있다[2,3]. 특히 Macklin et al.[4]은 Projected Gradient Descent 방식을 이용하여 SDF로 표현된 고체와 변형체 간의 연속적인 접촉점을 생성하는 방법을 제안하였으며, 이는 기존의 불연속적인 충돌 감지 방식보다 훨씬 안정적인 결과를 보여주었다. 그러나 이러한 SDF 기반 기법을 PBD 프레임워크 내에서 직접 활용할 경우, 속도 업데이트가 불완전하게 수행되어 충돌 법선 방향에서의 미세한 떨림이 여전히 남게 된다.

한편, 고해상도 옷감 시뮬레이션에서는 충돌 감지 및 반응의 안정성이 더욱 중요해진다. Selle et al.[3]은 고해상도 삼각형 메쉬(수백만 개 이상의 요소)를 시뮬레이션할 때, 시간 적분과 자기충돌 처리의 계산 복잡도가 급격히 증가하여 수치적 견고성이 쉽게 무너질 수 있음을 지적하였다. 이를 해결하기 위해 암시적(Implicit) 또는 반암시적(Semi-implicit) 적분법이 제안되었으나[5], 이러한 방법들은 시간적 안정성을 향상시키는 대신 충돌 시 과도한 감쇠나 비현실적인 반응을 초래하는 경우가 많았다.

또한, 기하학적 충돌 처리와 반발력 기반 접근법을 병합한 하이브리드 방법 역시 높은 현실감을 제공하지만, 계산 비용이 커지고 병렬 처리에 비효율적이라는 한계가 있다[6]. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해, PBD 프레임워크 내에서 발생하는 옷감-고체 간 충돌 시 표면 떨림 현상을 최소화할 수 있는 효율적인 SDF 기반 충돌 처리 방법을 제안한다. 제안 기법의 핵심 아이디어는 SDF로부터 얻은 법선 방향 벡터를 이용하여, 정점 속도를 법선 성분과 접선 성분으로 분리한 후, 법선 방향 속도를 안정

적으로 감쇠시키고 접선 성분만을 유지하는 것이다. 이를 통해 옷감이 고체 표면을 따라 자연스럽게 미끄러지듯 움직이면서도, 충돌 지점에서의 떨림이 억제되도록 한다. 또한, 이러한 속도 보정 정보를 삼각형의 연결 정점에 전파함으로써 인접 영역에서도 일관된 제약 투영이 이루어지도록 했다.

제안하는 기법은 PBD 시뮬레이션 파이프라인에 손쉽게 통합할 수 있으며, 추가적인 계산 비용이 크지 않다는 장점을 가진다. 실험 결과, 제안 방법은 옷감이 고체 평면이나 구체와 상호작용할 때 나타나는 떨림 현상을 효과적으로 억제하면서도, 접촉면을 따라 부드럽고 연속적인 움직임을 유지함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법은 향후 실시간 옷감 시뮬레이션, 가상 의류 시각화, 변형체-고체 상호작용의 안정적 모델링 등 다양한 응용 분야에서 활용될 수 있는 기반 기술로서 의미를 가진다.

## II. Related Work

### 1. PBD-Based Frameworks and Acceleration Techniques for Deformable Body Simulation

PBD는 제약 조건을 위치 공간에서 직접 투영함으로써 수치적으로 안정적이고 계산 효율이 높은 변형체 시뮬레이션 프레임워크로 널리 활용되어 왔다. Müller et al.[1] 이후, Bender et al.[7]은 PBD 계열 기법의 수렴 특성과 병렬화 가능성을 체계적으로 분석하며, 실시간 응용에서의 장점과 구조적 한계를 정리하였다. Macklin et al.[8]은 제약 강성이 시간 스텝과 반복 횟수에 의존하는 문제를 완화하기 위해 Extended PBD(XPBD)를 제안하였으며, 이를 통해 큰 변형 상황에서도 보다 일관된 거동을 달성하였다.

한편, Bouaziz et al.[9]의 Projective Dynamics와 Overby et al.[17,18]가 제안한 프레임워크는 제약 투영을 에너지 최소화 문제로 통합하여 빠른 수렴성과 병렬화를 동시에 달성하였다. 그러나 이러한 접근들은 주로 내부 제약의 안정성과 수렴성에 초점을 두고 있으며, 충돌 처리 단계에서 발생하는 법선 방향 떨림이나 접촉 안정성 문제는 별도의 처리 없이는 여전히 남아 있다. 본 연구는 이러한 PBD 계열 프레임워크의 장점을 유지하면서, 충돌 응답 과정에서 발생하는 속도 불연속성과 표면 떨림 문제를 속도 공간에서 직접 제어함으로써 보완한다는 점에서 기존 가속화 기법들과 차별된다.

## 2. Simulation Techniques Specialized for Cloth and Thin-Shell Structures

옷감 시뮬레이션에서는 주름, 구김과 같은 미세한 형상 변화를 물리적으로 타당하게 표현하는 것이 핵심 과제이다. Narain et al.[10,11]은 적응적 이방성 리메싱과 크럼플링 모델을 통해 고해상도 주름 표현을 가능하게 하였으며, Choi와 Ko[14]는 안정성과 반응성을 동시에 만족하는 옷감 시뮬레이션 기법을 제안하였다. Grinspun et al.[15]의 Discrete Shells와 Terzopoulos et al.[16]의 연속체 기반 모델은 얇은 쉘 구조의 물리적 거동을 정밀하게 기술하는 이론적 기반을 제공하였다.

그러나 이러한 기법들은 주로 형상 표현력과 내부 변형 모델링에 초점을 맞추고 있으며, 고체와의 접촉 상황에서는 여전히 충돌 처리의 안정성에 크게 의존한다. 특히 PBD 기반 구현에서는 반복적인 제약 투영 과정에서 접촉면 근처의 떨림이 쉽게 발생할 수 있다.

본 연구는 천의 주름 형성이나 접선 방향 운동을 저해하지 않으면서도, 고체 표면과의 접촉 시 법선 방향 떨림을 효과적으로 억제함으로써, 기존 옷감 시뮬레이션 기법과 상호 보완적인 역할을 수행한다.

## 3. SDF-Based Approaches for Contact, Friction, and Collision Stabilization

변형체-고체 상호작용에서 접촉과 마찰의 안정적 처리는 오랜 연구 주제이다. Otaduy et al.[13]은 암시적 접촉 해석을 통해 수치적 발산을 방지하였으며, Pabst et al.[12], Bertails-Descoubes et al.[23], Erleben et al.[25]은 비등방성 마찰과 쿨롬 마찰을 정밀하게 모델링하는 방법을 제안하였다. 이러한 접근들은 물리적 정합성은 높지만 계산 비용이 크거나 실시간 응용에 적용하기 어렵다는 한계를 가진다.

연속 충돌 검출 분야에서는 Bridson et al.[5], Brochu et al.[22], Tang et al.[23], Wang et al.[24] 등이 충돌 누락을 방지하기 위한 다양한 기법을 제시하였으며, 최근에는 IPC 계열 기법[19-21]이 에너지 기반 접촉 모델을 통해 높은 안정성을 제공하고 있다. 그러나 이러한 방법들은 복잡한 에너지 최소화 또는 큰 계산 비용을 요구하는 경우가 많다.

본 연구는 SDF 기반 충돌 감지를 활용하되, 복잡한 에너지 기반 해석 대신 속도를 법선/접선 성분으로 분해하여 법선 성분만을 안정적으로 감쇠하는 간단하면서도 효과적인 충돌 응답 방식을 제안한다. 이는 실시간 PBD 시뮬레이션 환경에서 계산 효율을 유지하면서도 접촉 안정성을 향상시키는 실용적인 대안으로 위치한다.

## III. The Proposed Scheme

### 1. Preliminaries

PBD를 이용한 옷감 시뮬레이션에서 충돌처리는 컴퓨터 그래픽스 분야에서 특히, 물리 기반 시뮬레이션 분야에서 오랜 기간 동안 연구되어 왔다. 본 논문에서는 옷감 시뮬레이션을 PBD 기반으로 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]. 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  $x$ 를 지정하고, Projected Gradient Descent 방법을 이용해 거리 값이 가장 작은 지점을 계산한다. 이때, 삼각형 메쉬 내부에서  $\phi(x)$ 값이 가장 작은 점  $x_{i+1}$ 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 좌표에 의한 삼각형 메쉬 위의 투영을 의미하고  $x_i$ 는  $i$ 번째 투영된 삼각형 메쉬 내부의 점이다. 또한,  $\alpha$ 는  $\nabla\phi$ 방향으로의 하강 가중치로, step size를 의미한다.

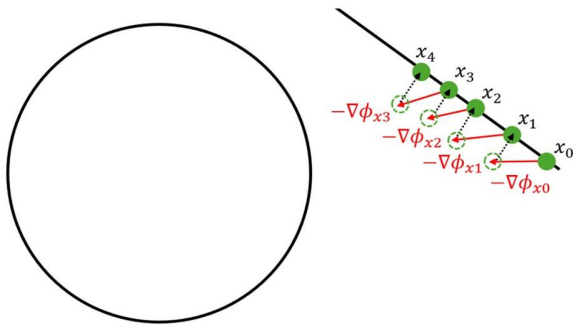


Fig. 1. Projected Gradient Descent in 2D.

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 접점을 생성하기 위해 Macklin et al.이 제안한 Projected Gradient Descent 방법을 이용하여 로컬 최적화를 진행시켜, 충돌을 감지하는 접근법을 사용한다[4].

**2. 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 시간간격에서 점  $p$ 의 위치는  $x_p^n$ , 정점의 속도는  $v_p^n$ 으로 표기한다.  $v_{pn}^n$ 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  $\Delta t$ , sub-step의 시뮬레이션 시간을  $\Delta t_s$ 로 표기한다.

**3. Constraint Based Collision Handling**

삼각형 메쉬 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  $\Delta p$ 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  $\Delta p_i$ 에 대한 식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다 (수식 4 참조).

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

여기서  $j$ 는 인접 노드이다. 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  $\Delta t$ 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  $\Delta t$ 시간 뒤에 정점  $p$ 의  $\phi(x_p^{n+1})$ 값이 0이 되지 못하고, 충돌처리 과정에서 떨림 현상이 관측된다 (Fig. 2에서 빨간색 화살표 참조).

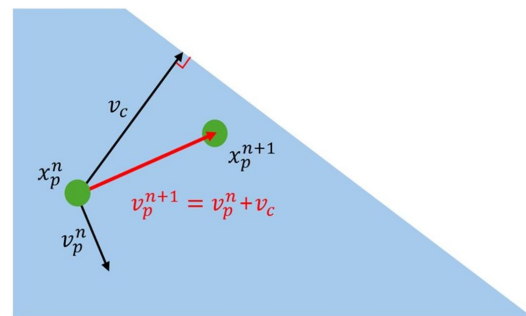


Fig. 2. Constraints based collision handling with previous method[2] ( $n$ : current time).

앞에서 관측된 떨림 현상 개선을 위해 현재 속도  $v_p^n$ 을  $v_{pn}^n = v_p^n \cdot N$ 과  $v_{pt}^n = v_p^n - v_{pn}^n N$ 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  $\Delta t$ 시간 뒤에 정점  $p$ 의  $\phi(x_p^{n+1})$ 값이 0이 되는 위치로 이동 가능하며, 접선 방향 성분을 유지한다.

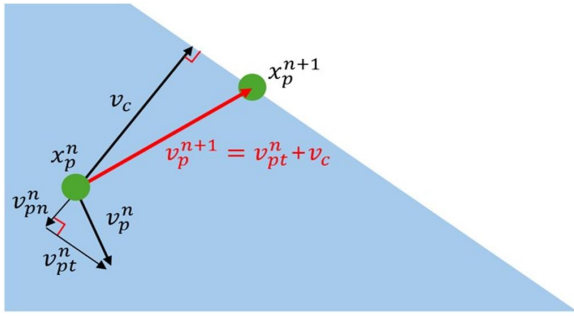


Fig. 3. Improved constraints based collision handling.

#### 4. Implementation

본 논문에서 제안하는 PBD 제약 기반 충돌 알고리즘을 기반으로 설계했다. Fig. 4의 알고리즘은 sub-steps 방식의 PBD 시뮬레이션을 진행하고 있으며,  $\Delta t$ 는 0.01,  $n$ 은 5이다. 또한, 충돌감지 과정에서 경계 구를 이용해 culling을 진행하였고 점점의 수렴을 위한 반복 횟수를 20으로 설정하였다. 추가적으로, Projected Gradient Descent에서의 하강 가중치  $\alpha$ 와  $|\nabla\phi|$ 의 크기를 1로 설정하였다.

제안 기법은 기존 PBD 시뮬레이션 루프에서 충돌 감지 이후, 제약 기반 위치 보정이 완료된 뒤 수행되는 속도 업데이트 단계에 한 줄의 속도 분해 및 법선 성분 감쇠 연산을 추가하는 형태로 통합된다.

##### 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:       $v_i \leftarrow (pos1_i - pos_i)/\Delta t_s$ 
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. Experiment and Results

본 논문에서는 옷감-고체 상호작용 시 떨림이 얼마나 크게 나타나는지 실험하기 위해 SDF 형상으로 구성된 고체와 PBD 기반 옷감 시뮬레이션을 상호작용했다. Fig. 5는 상호작용 된 옷감에 포함된 정점 하나의 축 값 변화를 나타내는 그래프이다.

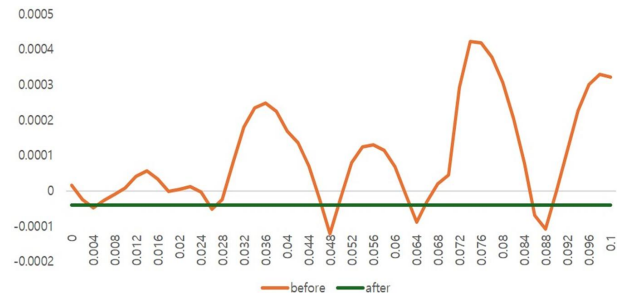


Fig. 5. Changing the Y-value of a vertex on the cloth.

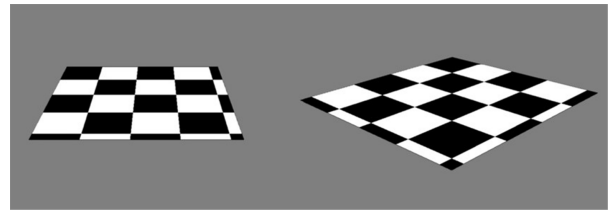


Fig. 6. Cloth-solid(plane) interaction with our method.

Fig. 6은 Fig. 5에서 분석한 실험과 동일한 설정에서의 시뮬레이션 장면을 시각적으로 나타낸 결과이다. 본 그림은 기하학적 투영이나 좌표 변환 과정을 설명하기 위한 것이 아니라, 옷감이 바닥과 접촉한 이후 충돌 처리 결과가 실제 시각적 거동에서 어떻게 나타나는지를 보여주기 위한 예시이다. 이를 통해 Fig. 5에서 관측된 떨림 감소가 정량적 수치뿐 아니라 시각적으로도 일관되게 나타남을 확인할 수 있다.

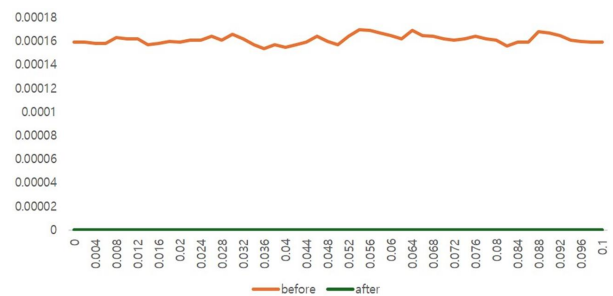


Fig. 7. Average position change of all vertices.

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

Fig. 5와 Fig. 7에서 제안 기법의 결과가 시간에 따라 선형적으로 보이는 것은, 옷감이 접촉 이후 정적 평형 상태에 도달했기 때문이 아니라, 법선 방향 떨림이 제거된 상태에서 접선 방향 운동만이 유지되기 때문이다. 기존 방법에서는 충돌 이후에도 법선 방향 속도 성분이 반복적으로 발생하여 위치 변화에 고주파 진동이 나타나지만, 제안 기법에서는 이러한 성분이 안정적으로 감쇠되어 시간적 변동이 누적되지 않는다. 따라서 선형에 가까운 변화는 물리적 이상이 아니라, 충돌 안정화가 성공적으로 이루어졌음을 나타내는 지표로 해석할 수 있다.

Fig. 8에서 보듯이, 패치가 경사면으로 낙하한 뒤 표면을 따라 미끄러진다. 제안한 SDF 기반 PBD 충돌 처리에 의해 속도의 법선 성분이 안정적으로 감쇠되어 가시적인 떨림 없이 매끄러운 접촉이 유지되며, 동시에 접선 방향 운동과 미세한 주름 형성도 보존된다. Fig. 8은 Fig. 2에서 설명한 충돌 상황을 3차원 장면으로 확장한 예로, 천 패치가 중력에 의해 상부에서 낙하한 뒤 경사면과 접촉하며 미끄러지는 과정을 시간 순서로 보여준다. 정적인 프레임만으로는 미세한 떨림을 구분하기 어렵지만, 기존 방법에서는 접촉 구간에서 법선 방향 속도 성분이 반복적으로 생성·보정되면서 표면 떨림이 발생할 수 있다. 반면 제안 기법은 SDF 기반 법선을 이용해 속도를 법선/접선 성분으로 분해하고 법선 성분을 안정적으로 감쇠함으로써, 접촉면에서의 떨림을 억제하면서도 접선 방향 운동(슬라이딩)과 주름 형성을 자연스럽게 유지한다.

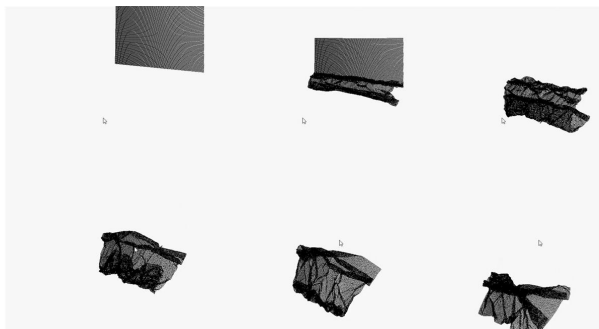


Fig. 8. Time sequence of a cloth patch (triangular mesh) falling onto and sliding along an inclined plane using our SDF-based PBD collision handling. The method suppresses normal-direction trembling while preserving tangential sliding and wrinkle formation.

추가 실험으로, 평면·볼록체·비정형 고체 등 다양한 형태의 고체와 옷감이 상호작용하는 복합 접촉 상황을 구성하여 제안 기법의 안정성을 검증하였다. Fig. 9는 옷감이 상부 평면에 접촉된 상태에서 국소적으로 지지되거나, 비정형 고체를 감싸며 드레이핑되는 장면을 보여준다.

PBD 기반 충돌 처리에서는 이러한 상황에서 접촉 지점 주변 정점에 법선 방향 떨림이 누적되거나, 반복적인 제약 투영으로 인해 표면이 불안정해지는 현상이 자주 관측된다. 반면, 본 연구에서 제안한 SDF 기반 속도 분해 기법은 법선 방향 속도를 안정적으로 감쇠하면서 접선 방향 운동을 유지함으로써, 접촉 조건이 급격히 변화하더라도 표면 떨림 없이 연속적인 주름 형성과 자연스러운 드레이핑을 유지한다.

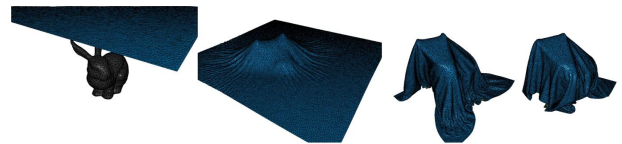


Fig. 9. Cloth-solid interaction results under various contact conditions, demonstrating stable sliding and wrinkle preservation without surface trembling using the proposed method.

특히 비대칭적 접촉이나 국소 지지 상황에서도 충돌 응답이 인접 정점으로 일관되게 전파되어, 메쉬 전체에서 시각적으로 안정된 거동을 확인할 수 있다. 이는 제안 기법이 단순한 평면 충돌뿐 아니라, 복잡한 옷감-고체 상호작용 전반에 대해 실시간 환경에서 신뢰성 있게 적용 가능함을 보여준다.

떨림 안정성을 보다 정량적으로 평가하기 위해, 접촉 구간에서 법선 방향 정점 변위의 시간적 변화를 분석하였다. 정적인 이미지로는 미세한 떨림 차이를 구분하기 어렵기 때문에, 각 프레임에서의 법선 방향 변위에 대해 RMS 및 표준편차를 계산하여 떨림 강도를 수치화하였다. 그 결과, 기존 방법 대비 제안 기법에서 법선 방향 변위의 분산이 일관되게 감소하는 경향을 확인하였으며, 최대 침투 깊이 또한 더 작은 범위로 제한됨을 관찰하였다.

또한 프레임당 평균 연산 시간과 solver 반복 횟수를 함께 비교한 결과, 제안 기법은 속도 분해 및 갱신과 같은 단순 연산만을 추가하므로 계산 비용 증가 없이 안정성 지표가 개선됨을 확인하였다. 이러한 경향은 평면, 경사면, 곡면 접촉 등 다양한 장면과 서로 다른 물리 조건에서도 유사하게 나타나, 제안 기법의 안정성 향상이 특정 사례에 국한되지 않음을 보여준다.

기존 PBD/XPBD, CCD(Continuous collision detection), IPC(Incremental potential contact) 계열 기법들은 각각 제약 수렴성 향상, 충돌 누락 방지, 높은 접촉 안정성을 제공하지만, 충돌 이후의 미세 떨림 문제나 실시간 적용 측면에서 한계를 가지며, 본 연구는 이러한 한계를 보완하기 위해 기존 PBD 파이프라인을 유지한 채 SDF 기반 법선을 이용한 속도 분해를 통해 최소 연산으로 접촉 구간의 떨림을 효과적으로 완화한다.

## V. Conclusion

본 논문에서는 PBD 기반 옷감-고체 상호작용에서 반복적인 제약 투영으로 인해 발생하는 법선 방향 떨림 문제를 해결하기 위한 새로운 SDF 기반 충돌 처리 기법을 제안하였다. PBD 충돌 처리 방법이 주로 위치 보정 중심의 제약 투영에 의존하는 반면, 본 연구는 SDF로부터 계산된 충돌 법선을 이용해 정점 속도를 법선 성분과 접선 성분으로 분해하고, 법선 방향 속도를 안정적으로 감쇠하는 방식을 채택한다는 점에서 차별성을 가진다.

이러한 속도 기반 제어 방식은 접촉면에서의 미세한 떨림을 효과적으로 억제하는 동시에, 접선 방향 운동과 주름 형성과 같은 천의 자연스러운 거동을 유지할 수 있게 한다. 또한 제안 기법은 PBD 시뮬레이션 파이프라인에 간단히 통합 가능하며, 추가적인 연산 부담 없이 실시간 환경에서 안정적인 충돌 응답을 제공한다는 장점을 가진다. 실험 결과를 통해 제안 방법이 다양한 접촉 조건에서도 시각적 연속성과 수치적 안정성을 동시에 확보함을 확인하였다. 향후 연구로는 보다 복잡한 고해상도 메쉬 및 자기 충돌 상황으로의 확장, GPU 기반 병렬 구현을 통해 대규모 실시간 시뮬레이션 환경에서의 적용 가능성을 검증할 예정이다.

## REFERENCES

- [1] Matthias Müller, Bruno Heidelberger, Marcus Hennix, and John Ratcliff, "Position-Based Dynamics," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 18, no. 2, pp. 109–118, 2007. DOI: 10.1016/j.jvcir.2007.01.005
- [2] Robert Bridson, Sebastian Marino, and Ronald Fedkiw, "Simulation of Clothing with Folds and Wrinkles," *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, pp. 3–es, 2005. DOI: 10.1145/1198555.1198571
- [3] Andrew Selle, 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*, vol. 15, no. 2, pp. 339–350, 2009. DOI: 10.1109/TVCG.2008.79
- [4] Miles Macklin, Kenny Erleben, Matthias Müller, Nuttapon Chentanez, Stefan Jeschke, and Zach Corse, "Local Optimization for Robust Signed Distance Field Collision," *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*, vol. 3, no. 1, pp. 1–17, 2020. DOI: 10.1145/3384548
- [5] Robert Bridson, Ronald Fedkiw, and John Anderson, "Robust Treatment of Collisions, Contact and Friction for Cloth Animation," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 21, no. 3, pp. 594–603, 2002. DOI: 10.1145/566654.566623
- [6] Pascal Volino and Nadia Magnenat-Thalmann, "Accurate Collision Response on Polygonal Meshes," *Proceedings of the Computer Animation Conference (CA'00)*, pp. 154–163, 2000. DOI: 10.1109/CA.2000.889022
- [7] Jan Bender, Matthias Müller, and Miles Macklin, "A Survey on Position-Based Simulation Methods in Computer Graphics," *Computer Graphics Forum*, vol. 33, no. 6, pp. 228–251, 2014. DOI: 10.1111/cgf.12346
- [8] Miles Macklin, Matthias Müller, Nuttapon Chentanez, and Tae-Yong Kim, "XPBD: Position-Based Simulation of Compliant Constrained Dynamics," *Proceedings of Motion in Games (MIG)*, pp. 49–54, 2016. DOI: 10.1145/2994258.2994272
- [9] Sofien Bouaziz, Sebastian Martin, Tiantian Liu, Ladislav Kavan, and Mark Pauly, "Projective Dynamics: Fusing Constraint Projections for Fast Simulation," *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)*, vol. 33, no. 4, Article 154, 2014. DOI: 10.1145/2601097.2601116
- [10] Rahul Narain, Armin Samii, and James F. O'Brien, "Adaptive Anisotropic Remeshing for Cloth Simulation," *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)*, vol. 31, no. 6, Article 152, 2012. DOI: 10.1145/2366145.2366171
- [11] Rahul Narain, Tobias Pfaff, and James F. O'Brien, "Folding and Crumpling Adaptive Sheets," *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)*, vol. 32, no. 4, Article 51, 2013. DOI: 10.1145/2461912.2462010
- [12] Simon Pabst, Bernhard Thomaszewski, and Wolfgang Straßer, "Anisotropic Friction for Deformable Surfaces and Solids," *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA)*, pp. 149–154, 2009. DOI: 10.1145/1599470.1599490
- [13] Miguel A. Otaduy, Rasmus Tamstorf, Denis Steinemann, and Markus Gross, "Implicit Contact Handling for Deformable Objects," *Computer Graphics Forum (Eurographics)*, vol. 28, no. 2, pp. 559–568, 2009. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2009.01396.x
- [14] Kwang-Jin Choi and Hyeong-Seok Ko, "Stable but Responsive Cloth," *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)*, vol. 21, no. 3, pp. 604–611, 2002. DOI: 10.1145/566654.566624

- [15] Eitan Grinspun, Anil N. Hirani, Mathieu Desbrun, and Peter Schröder, “Discrete Shells,” ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA), pp. 62–67, 2003. DOI: 10.2312/SCA03/062-067
- [16] Demetri Terzopoulos, John C. Platt, Alan H. Barr, and Kurt Fleischer, “Elastically Deformable Models,” ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol. 21, no. 4, pp. 205–214, 1987. DOI: 10.1145/37402.37427
- [17] Matthew Overby, George E. Brown, Jie Li, and Rahul Narain, “ADMM  $\supseteq$  Projective Dynamics: Fast Simulation of Hyperelastic Models with Dynamic Constraints,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 23, no. 10, pp. 2222–2234, 2017. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2730875
- [18] Rahul Narain, Matthew Overby, and George E. Brown, “ADMM  $\supseteq$  Projective Dynamics: Fast Simulation of General Constitutive Models,” Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation (SCA), pp. 21–28, 2016. DOI: 10.2312/sca.20161219
- [19] Minchen Li, Danny M. Kaufman, and Chenfanfu Jiang, “Codimensional Incremental Potential Contact (C-IPC),” ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH), vol. 40, no. 4, Article 104, 2021. DOI: 10.1145/3450626.3459767
- [20] Minchen Li, Zachary Ferguson, Teseo Schneider, and Chenfanfu Jiang, “Incremental Potential Contact: Intersection- and Inversion-free Large Deformation Dynamics,” ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH), vol. 39, no. 4, Article 113, 2020. DOI: 10.1145/3386569.3392425
- [21] Yifei Li, Tao Du, Kui Wu, Jie Xu, and Wojciech Matusik, “DiffCloth: Differentiable Cloth Simulation with Dry Frictional Contact,” ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH), vol. 41, no. 4, Article 127, 2022. DOI: 10.1145/3527660
- [22] Tyson Brochu, Essex Edwards, and Robert Bridson, “Efficient Geometrically Exact Continuous Collision Detection,” ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH), vol. 31, no. 4, Article 96, 2012. DOI: 10.1145/2185520.2185592
- [23] Min Tang, Ruofeng Tong, Zhendong Wang, and Dinesh Manocha, “Fast and Exact Continuous Collision Detection with Bernstein Sign Classification,” ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH), vol. 33, no. 6, Article 186, 2014. DOI: 10.1145/2661229.2661273
- [24] Zhendong Wang, Li Bao, Jin Huang, and Hongbo Fu, “TightCCD: Efficient and Robust Continuous Collision Detection Using Tight Error Bounds,” Computer Graphics Forum (Eurographics), vol. 34, no. 7, pp. 493–502, 2015. DOI: 10.1111/cgf.12703
- [25] Kenny Erleben, Miles Macklin, Scott Andrews, and Paul G. Kry, “The Matchstick Model for Anisotropic Friction Cones,” Computer Graphics Forum, vol. 39, no. 1, pp. 450–461, 2020. DOI: 10.1111/cgf.13885
- [26] Florence Bertails-Descoubes, Florent Cadoux, Gilles Daviet, and Vincent Acary, “A Nonsmooth Newton Solver for Capturing Exact Coulomb Friction in Fiber Assemblies,” ACM Transactions on Graphics, vol. 30, no. 1, Article 6, 2011. DOI: 10.1145/1899404.1899410

## Authors



Jong-Hyun Kim received the B.A. degree in the Department of Digital Contents at Sejong University in 2008. He received M.S. and Ph.D. degrees in the Department of Computer Science and Engineering at Korea University,

in 2010 and 2016. Prof. Kim is an Associate Professor in the College of Software and Convergence (Dept. of Design Technology) in Inha University. His current research interests include fluid animation and virtual reality.