

Simulation of Stable Cloth on Triangular Mesh via LOD-Based Bending Springs on Strain-Based Dynamics

Jong-Hyun Kim*

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

[Abstract]

This paper describes a level of detail (LOD) based bending spring structure and damping technique that can reliably represent strain-based dynamics (SBD) on a triangular mesh. SBD models elastic energy using strain instead of energy based on the edge length of a triangular mesh. However, when a large external force occurs, the process of calculating the elastic energy based on edges results in a degenerate triangle, which stretches in the wrong direction because it calculates an unstable strain. In this paper, we introduce an LOD-based bending spring generation and energy calculation method that can efficiently handle this problem. As a result, the technique proposed in this paper can reliably and efficiently handle SBD based on bending springs, which can provide a stable representation of cloth simulation.

▶ **Key words:** Strand-based dynamics, Physically-based simulation, Cloth simulation, Bending spring, Degenerate triangle

[요 약]

본 논문에서는 삼각형 메쉬(Triangular mesh) 기반에서 변형률 기반 동역학(Strain-based dynamics, SBD)을 안정적으로 표현할 수 있는 LOD(Level of detail)기반의 굽힘 스프링(Bending spring) 구조와 감쇠 기법에 대해 설명한다. SBD는 삼각형 메쉬의 에지 길이(Edge length) 기반의 에너지 대신 변형률(Strain)을 활용하여 탄성 에너지를 모델링한다. 하지만, 큰 외력이 발생하면 에지 기반으로 탄성 에너지를 계산하는 과정에서는 비정상적인 삼각형(Degenerate triangle)이 나타나고 이 문제는 불안정한 변형률을 계산하기 때문에 잘못된 방향으로 늘어나는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이 문제를 효율적으로 처리할 수 있는 LOD기반의 굽힘 스프링을 생성하고 에너지를 계산하는 방법에 대해 소개한다. 결과적으로 본 논문에서 제안하는 기법은 굽힘 스프링 기반의 SBD를 안정적이고 효율적으로 처리할 수 있기 때문에 옷감 시뮬레이션을 안정적으로 표현할 수 있다.

▶ **주제어:** 변형률 기반 동역학, 물리 기반 시뮬레이션, 옷감 시뮬레이션, 굽힘 스프링, 비정상적인 삼각형

-
- 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: 2023. 08. 22, Revised: 2023. 09. 18, Accepted: 2023. 09. 18.

I. Introduction

위치 기반 동역학(Position-based dynamics, PBD)은 질량-스프링 구조보다 안정적이고 빠르게 수렴이 가능하기 때문에 실시간 애플리케이션에서 주로 사용되고 있다 [1,2]. PBD는 길이의 변화 방향인 ∇p 와 위치 변화량인 Δp 를 기반으로 원본 길이를 보존하는 방식이다. 하지만, PBD는 삼각형 메쉬의 에지 길이를 기반으로 에너지를 계산하기 때문에 영역이나 볼륨을 보존하는 것에 대해서는 안정성이 떨어진다. SBD는 이 문제를 해결하기 위해 제안된 기법이며[3], 에지 길이 대신에 삼각형의 변형률을 기반으로 동역학을 계산하는 구조이다. 전처리 과정에서 초기 삼각형의 변형률인 s 와 그의 기울기는 ∇s 를 기반으로 동역학을 계산한다.

SBD는 에지 길이를 제한하는 대신에 변형된 입자 위치에서 유도된 Green-St Venant 변형 텐서를 활용한다[4]. 변형(Strain)에서 응력(Stress)을 도출하고 변형 에너지로 통합하여 최종 힘을 계산하는 유한요소법과는 달리, SBD는 변형 텐서의 각 항목에 대한 위치 제약 조건을 이용하여 변형 텐서를 계산한다. 삼각형과 독립적으로 변형 텐서를 계산할 수 있다는 특징은 상대적으로 재질 제어를 쉽게 할 수 있기 때문에 다양한 물리 기반 시뮬레이션에서 장점이 된다. 하지만, 큰 외력이 발생할 경우 비정상적인 삼각형 형태가 나타나고, 결과적으로 변형률이 잘못 계산되기 때문에 원하지 않은 옷감 형태가 나타난다 (Fig. 1 참조).

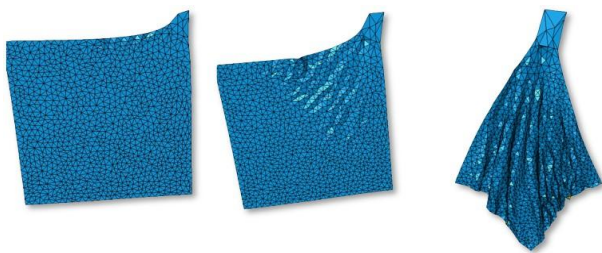


Fig. 1. Unstable strain occurring at a fixed point, and SBD based cloth simulation using this strain.

이러한 문제는 정점 하나를 고정시킬 때 명확하게 나타난다. Fig. 1에서 보듯이 오른쪽 상단 정점 부근에 존재하는 삼각형들의 변형이 이상하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 완화시킬 수 있는 LOD 기반의 굽힘 스프링 구조와 감쇠 기법을 통해 안정적으로 탄성 에너지를 계산할 수 있는 방법을 제안한다.

일반적으로 LOD는 컴퓨터 그래픽스에서 사용되는 개념으로, 시각적인 세부 수준을 제어하여 성능을 최적화하는 기술이며, 주로 실시간 3D 그래픽 애플리케이션에서 사용

되며, 대규모 환경이나 복잡한 모델을 다룰 때 유용하다. LOD는 다양한 세부 수준의 모델을 사용하여 화면에 표시되는 개체의 세부 수준을 자동으로 조절하기 때문에, 그래픽 처리 성능을 향상시키고 실시간 애플리케이션에서도 부드러운 영상을 표현할 수 있다.

II. Related Work

Müller *et al.*은 PBD를 물리 기반 시뮬레이션에 도입하였고[1], 그 이후 이 방법은 다양한 재질을 표현하는데 활용되고 있다. Kubiak *et al.*은 PBD를 확장하여 끈 시뮬레이션을 할 수 있는 방법을 제시했고[5], Müller *et al.*은 고해상도 메쉬 시뮬레이션의 계산 비용을 줄이기 위한 계층적 PBD 기법을 소개했다[6,7]. Keleger *et al.*은 삼각형 메쉬에서 새로운 굽힘 모델을 제안했고[8], Diziol *et al.*은 새로운 체적 보존 제약 조건을 제시했다[9]. Kim *et al.*[10]과 Müller *et al.*[11]은 머리카락과 털 시뮬레이션을 위한 끈 역학을 제시했다.

옷감 시뮬레이션에서 변형 텐서를 사용하는 아이디어는 Baraff와 Witkin이 처음으로 제안하였다[12]. SBD[3]는 이 기술을 위치기반 프레임워크에 적용하여 옷감 및 사면체 시뮬레이션에 적용했다. Pivovot *et al.*[13]과 Bridson *et al.*[14]은 질량-스프링 기반에서 스프링의 길이가 주어진 한계를 넘어 늘어나거나 압축되지 않도록 제한하는 방법을 제시했다. Hong *et al.*은 큰 타임스텝(Time-step)을 허용하기 위해 암시적 공식법(Implicit formation)을 제안했다[15]. Goldenthal *et al.*은 수렴 속도를 높이기 위해 전역 해법을 사용하여 일반 쿼드 메쉬의 에지 길이를 상한으로 제한했다[16].

유한요소법을 기반으로 Picinbono *et al.*은 특정 방향의 변형에 제약을 주는 에너지 항을 추가하여 변형률을 이방성하게 정제시킬 수 있는 방법을 제시했다[17]. Perez *et al.*은 라그랑주 승수(Lagrange multipliers)를 사용하여 변형 성분을 등방성하게 제한할 수 있는 방법을 제시했다[18]. 또한 Hernandez *et al.*은 위 방법을 개선하여 비등방성한 재질을 표현할 수 있도록 했다[19]. SBD와 가장 밀접한 두 가지 접근법은 Thomaszewski *et al.*[20]와 Wang *et al.*[21]의 방법이다. 두 방법 모두 수치 해법을 찾기 위해 가우스-자이델(Gauss-Seidel) 혹은 자코비 반복법(Jacobi iterations)을 사용한다. Wang *et al.*은 변형률을 등방성하게 제한하는 방법을 제시했으며[21], 이들은 Tsiknis *et al.*의 변형률 제한 접근법을 확장한 버전이다

[22]. Wang *et al.*은 극분해법(Polar decomposition)을 사용하여 변형 기울기에서 주요 변형(Principal strains)을 추출했다[21]. 그 다음 주요 변형을 제한하여 기울기를 정제했고, 이 값을 통해 목표 형상을 추정했다.

Thomaszewski *et al.*은 Cauchy의 선형 변형 텐서와 극분해를 통해 변형 기울기로부터 회전을 안정적으로 계산할 수 방법을 제시했다[20]. 이 방법에서는 선형 시스템이 과도하게 제약되어 최소 제곱 문제로 제약사항을 풀어야 한다. 이와는 대조적으로 PBD 프레임워크에서는 정점의 역질량을 0으로 설정하여 간단하게 제약사항을 해결할 수 있다. 최근에는 인공지능을 통해 옷감을 시뮬레이션하는 연구도 있다[25]. 이 기법은 옷감의 형태가 아닌 학습을 통해 옷감의 동역학을 시뮬레이션 할 수 있는 방법을 제시했다. 이와 다르게 그래프 컨볼루션을 이용하여 삼각형 메쉬로 표현된 임의의 옷감을 표현한 연구도 있다[26].

III. The Proposed Scheme

1. Strain-Based Dynamics

SBD는 PBD에 적용될 새로운 제약 조건을 제안했다[4]. 시뮬레이션 메쉬의 에지 방향에 상관없이 물체가 움직이는 방향의 변형률을 조절할 수 있도록 하였다. 이 과정에서 두 정점 사이의 거리를 제약 조건으로 사용하는 것이 아닌, 그린 변형률 텐서(Green's strain tensor)를 제약함수로 사용하며, 각 삼각형의 변형률을 다음과 같이 계산한다 (수식 1 참조).

$$S = F^T F = Q^{-T} P^T P Q^{-1} \quad (1)$$

여기서 P 는 월드 공간에서의 변형을 나타내는 행렬이며, Q 는 재질 위치(Material position)를 나타는 행렬이다. 위 수식에서 $P, Q \in R^{3 \times 2}$ 이기 때문에 Q^{-1} 가 존재하지 않는다. 이 문제를 피하기 위해 삼각형의 텍스처 좌표를 이용하면 Q 가 2×2 행렬이 돼서 Q^{-1} 를 계산할 수 있다.

2. Bending Spring Structure and Dynamics

굽힘 힘(Bending force)은 옷감의 뻣뻣함(Stiffness)을 제어하기 위해 많이 사용하는 방법이며, 삼각형 메쉬에서는 일반적으로 삼각형간의 접힘을 완화하기 위해 각도나 스프링 구조를 추가한다 (Fig. 2 참조).

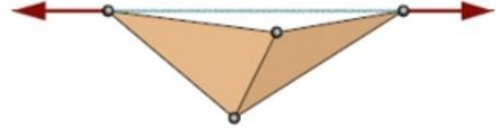


Fig. 2. Bending force can be computed according to tensile crossover springs.

많은 연구들에서 위 방법을 채용하고 있고[14,23,24], 질량-스프링 구조를 활용하는 방법들에서 안정적으로 실행된다. 하지만, SBD는 삼각형 기반에서 변형률을 계산하기 때문에 비정상적으로 늘어나는 경우에 시뮬레이션이 발산하거나 과한 변형률(Over-strain)에 의해 옷감 형태가 왜곡되는 문제가 발생한다 (Fig. 1 참조). 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 느슨한 레벨(Loose-level)을 나타내는 m^l 과 엄격한 레벨(Tight-level)을 나타내는 n^l 을 두어 고정된 노드와 그렇지 않은 노드를 처리한다.

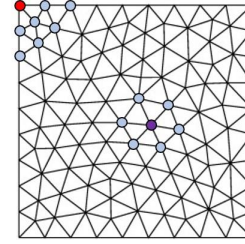


Fig. 3. Adaptive bending spring (red : fixed node, violet : non-fixed node).

Fig. 3은 레벨별 인접 노드의 구조를 보여주는 그림이다. 상대적으로 삼각형의 변형률이 심하게 나타나는 고정된 노드들은 n^l -ring 인접 노드 구조로 굽힘 스프링을 추가하고, 고정되는 않는 노드들은 m^l -ring 인접 노드 구조로 연결한다. 여기서, $n^l > m^l$ 이며, n^l 은 m^l 보다 커야 한다. 이렇게 만들어진 굽힘 스프링은 PBD를 기반으로 동역학을 계산하여 위치를 업데이트 한다 (수식 2 참조)[1].

$$C(p + \Delta p) \approx C(p) + \nabla_p C(p) \cdot \Delta p = 0 \quad (\text{by Taylor}) \quad (2)$$

여기서 Δp 는 다음과 같이 계산한다 (수식 3 참조).

$$\begin{aligned} \Delta p &= -\frac{C(p)}{\nabla_p C(p)} = -\frac{C(p)}{\nabla_p C(p)} \cdot \frac{w}{w} \cdot \frac{\nabla_p C(p)}{\nabla_p C(p)} \left(\text{where } w = \frac{1}{m} \right) \\ &= -\frac{C(p)}{|\nabla_p C(p)|^2} \cdot w \cdot \nabla_p C(p) \\ &= \lambda w \nabla_p C(p) \left(\text{where } \lambda = -\frac{C(p)}{w |\nabla_p C(p)|^2} \right) \\ &= -s w \nabla_p C(p) \left(\text{where } s = \frac{C(p_1, \dots, p_N)}{\sum_j w_j |\nabla_{p_j} C(p_1, \dots, p_N)|^2} \right) \end{aligned}$$

(3)

여기서 투영에 의해 얻어진 변위(Displacement)는 다음과 같다 (수식 4 참조).

$$\Delta p_i = -skw_i \nabla_p C(p_1, \dots, p_N) \quad (4)$$

$$(k : \text{stiffness param} \in [0, 1], w_i = \frac{1}{m_i})$$

$$s = \frac{C(p_1, \dots, p_N)}{\sum_j w_j \nabla_p C(p_1, \dots, p_N)^2} \quad (5)$$

3. LOD-based Bending Spring Structure

굽힘 스프링을 추가할 때 중요한 것은 n^l 과 m^l 의 값을 결정하는 것이다. 이 값들은 옷감의 해상도에 의존하기 때문에 본 논문에서는 이 값을 자동으로 찾기 위한 방법을 제시한다. 우선, 옷감 메쉬의 에지 길이를 활용하여 느슨한 레벨을 나타내는 m^l 을 찾는다 (수식 6 참조).

$$m^l = \max\left(\left(\frac{\Omega}{e_{avg}} \cdot 0.1\right) + 1, 1\right) \quad (6)$$

$$\Omega = \frac{\|AABB_{\min} - AABB_{\max}\|}{2} \cdot 0.5 \quad (7)$$

$$n^l = 2m^l + 1 \quad (8)$$

여기서 e_{avg} 는 에지의 평균 길이이고, Ω 는 시뮬레이션 도메인의 크기로 입력 옷감 메쉬의 경계상자를 기반으로 계산한다 (수식 7 참조). 이 값을 기반으로 엄격한 레벨을 나타내는 n^l 을 계산한다 (수식 8 참조). 이렇게 결정된 n^l 과 m^l 을 이용하여 적응형 굽힘 스프링을 추가한다. 앞에서 설명하였듯이 고정된 포인트는 n^l 을 이용하여 굽힘 스프링을 추가하고, 고정되지 않은 포인트는 m^l 을 이용하여 굽힘 스프링을 추가한다 (Fig. 3 참조). 본 논문에서는 비정상적인 삼각형을 최소화하기 위해 고정시키는 단위는 i 노드뿐만 아니라, i 노드의 1-ring 인접 노드들도 고정시키도록 추가하였다.

4. Connection of Bending Spring on LOD-structure

앞에서 설명한 방법은 안정적으로 수행되지만, 고해상도 옷감 시뮬레이션이 되면 상대적으로 에지의 길이가 짧아지기 때문에 n^l 과 m^l 의 값이 커지게 되어 계산량이 증가된다. 이 값을 강제로 줄이게 되면 비정상적인 삼각형들로 인해 변형률이 기하학적으로 이상하게 표현된다. 이번 장에서는 이 문제를 완화하기 위해 LOD기반으로 굽힘 스프링을 연결하는 방식에 대해 소개한다. Fig. 3에서 보듯이, 너무 많은 스프링은 계산량이 증가될 뿐만 아니라, 오

히려 옷감을 너무 뻣뻣하게 만든다. 이 문제를 해결하기 위해 목표치 레벨 t^l 를 두어, 노드의 인접 노드가 t^l -ring에 해당하는 노드만들 이용하여 굽힘 스프링을 추가한다. Fig. 4는 본 논문에서 제안하는 LOD기반 스프링 연결 방법을 보여주고 있는 그림이며, 여기서 $t^l \in [n^l, m^l]$ 이다.

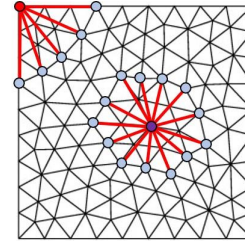


Fig. 4. LOD-based structural connection of bending spring.

IV. Experiment and Results

본 연구의 결과들을 만들기 위해 실험한 환경은 Intel Core i7-7700K CPU, 32GB RAM, Geforce GTX 1080Ti GPU가 탑재된 컴퓨터를 이용하였다. 본 논문에서 제안하는 방법의 우수성을 입증하기 위해 일반적인 옷감 시뮬레이션에서 많이 사용하는 굽힘 스프링 구조와 비교/실험하였다.

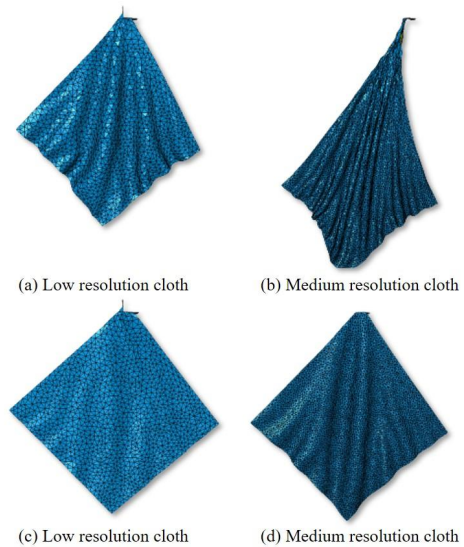


Fig. 5. Comparison results of bending forces between tensile crossover springs(a,b) and our method(c,d).

Fig. 5는 이전 기법과 우리의 방법을 비교한 결과이다. Fig. 5a,b는 일반적으로 많이 사용하는 크로스 오버 에지

기법이며[14,23,24], 저해상도 옷감 시뮬레이션에서는 잘 되는 것처럼 보이지만, 해상도가 증가하면 고정된 포인트들 주변에서 발생하는 비정상적인 변형률로 인해 불안정한 결과가 나타난다 (Fig. 5a,b 참조). 반면, 우리의 방법은 해상도와 관계없이 정상적인 옷감형태를 잘 표현했으며, 해상도에 따라 뻣뻣함 정도가 변하지 않고 안정적으로 SBD 시뮬레이션 결과를 만들었다 (Fig. 5c,d 참조).

이전 기법은 고정된 포인트 지점에서 과한 힘이 작용되고, 늘어나지 않으려면 제약조건 때문에 불안정성이 나타난다. 특히 과한 외력에 비해 상대적으로 적은 개수의 제약조건 스프링은 이 문제를 더 악화시키고, 고해상도로 갈수록 심각해진다 (Fig. 5b와 Fig. 1 참조). 이전 기법과 우리의 방법에서 외력에 대한 크기는 동일함에도 불구하고 안정성이 개선된 결과를 시각적으로 잘 보여주고 있다.

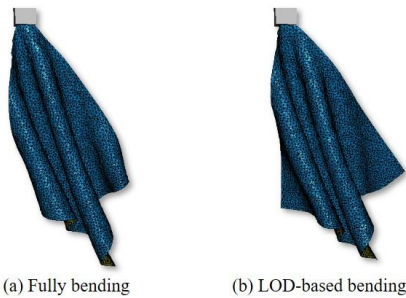


Fig. 6. Comparison results of LOD-based bending structure.

Fig. 6은 LOD기반 굽힘 스프링 구조를 이용한 결과를 비교한 그림이다. LOD를 사용하지 않은 굽힘 스프링 구조와 LOD기반 굽힘 스프링 구조의 시각적 차이는 거의 발생하지 않았지만, 20% 적은 개수의 굽힘 스프링만을 사용하였다 (Fig. 6b 참조).

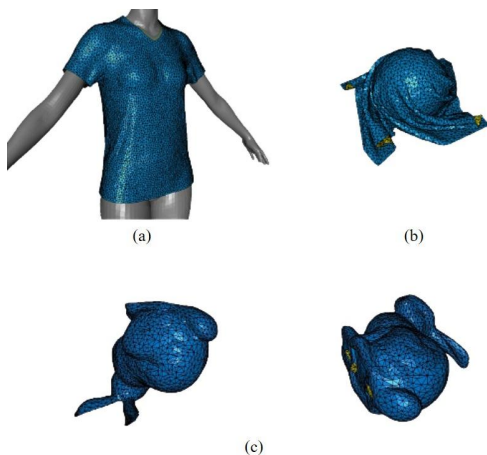


Fig. 7. Various results with our method.

Fig. 7은 제안하는 방법을 통해 다양한 삼각형 모델에 대해서 시뮬레이션 한 결과이다. 쿼드 형태의 옷감뿐만 아니라 다양한 형태에서 안정적으로 탄성 기반의 옷감 시뮬레이션을 잘 표현했다.

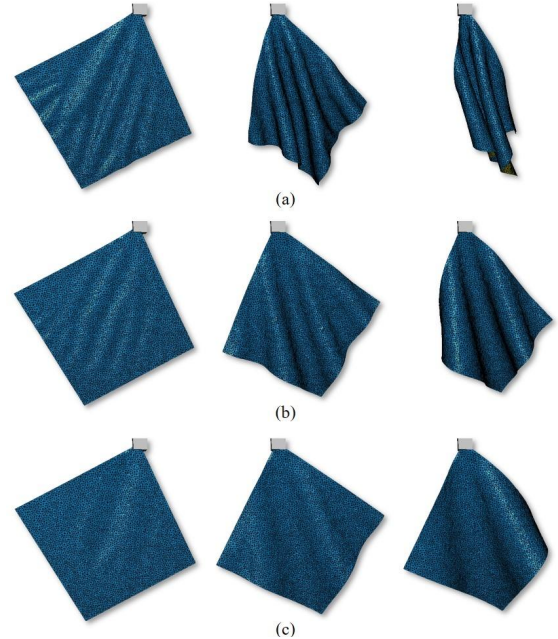


Fig. 8. Changing the material of cloth using our method : (a) default, (b) $n^l = \times 2$, (c) $n^l = \times 4$.

Fig. 8은 우리의 방법을 이용하여 옷감의 재질을 변화시킨 결과이다. 비정상적인 변형률 없이 안정적으로 재질 변화 제어가 가능하기 때문에 가상 옷감을 사용하는 다양한 산업체에 활용이 가능할 것으로 기대한다.

V. Conclusions

본 논문에서는 효율적이고 안정적으로 변형률 기반 동역학을 계산하기 위해서 새로운 굽힘 스프링 구조를 제안했다. 이 기법은 메쉬의 해상도에 따라 자동으로 굽힘 스프링 개수인 n^l 과 m^l 을 찾기 때문에 안정적으로 옷감의 뻣뻣함을 표현할 수 있다. 뿐만 아니라, 이 값을 조절함으로써 옷감의 재질을 쉽게 제어할 수 있다. 향후, 이 기법을 이용하여 실크와 같이 굽힘이 거의 없는 재질에서도 안정적으로 수행될 수 있도록 알고리즘을 확장할 예정이다.

REFERENCES

- [1] Müller, Matthias, et al. "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] Bender, Jan, Matthias Müller, and Miles Macklin. "Position-Based Simulation Methods in Computer Graphics." In *Eurographics (tutorials)*, p. 8. 2015. DOI: 10.2312/egt.20151045
- [3] Müller, Matthias, N. Chentanez, T. Y. Kim, and M. Macklin. "Strain based dynamics." In *Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, pp. 2, 2014.
- [4] Musesti, Alessandro. "A nonlinear korn inequality based on the green-saint venant strain tensor." *Journal of Elasticity*, vol. 126, pp. 129-134, 2017.
- [5] Kubiak, Blazej, Nico Pietroni, Fabio Ganovelli, and Marco Fratarcangeli. "A robust method for real-time thread simulation." In *Proceedings of the 2007 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 85-88, 2007. DOI: 10.1145/1315184.1315198
- [6] Müller, Matthias. "Hierarchical position based dynamics.", 2008.
- [7] Wang, Meili, Hua Zheng, Kun Qian, Shuqin Li, and Xiaosong Yang. "Sampling Hierarchical Position-Based Dynamics Simulation." In *Next Generation Computer Animation Techniques: Third International Workshop, AniNex 2017, Bournemouth, UK, June 22-23, 2017, Revised Selected Papers 3*, pp. 45-55. Springer International Publishing, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-69487-0_4
- [8] Kelager, Micky, Sarah Niebe, and Kenny Erleben. "A Triangle Bending Constraint Model for Position-Based Dynamics." *Vriphys*, vol. 10, pp. 31, 2010. DOI: 10.2312/PE/vriphys/vriphys10/031-037
- [9] Diziol, Raphael, Jan Bender, and Daniel Bayer. "Robust real-time deformation of incompressible surface meshes." In *Proceedings of the 2011 ACM SIGGRAPH/eurographics symposium on computer animation*, pp. 237-246. 2011. DOI: 10.1145/2019406.2019438
- [10] Kim, Tae-Yong, Nuttapong Chentanez, and Matthias Müller-Fischer. "Long range attachments-a method to simulate inextensible clothing in computer games." In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp. 305-310. 2012. DOI: 10.2312/SCA/SCA12/305-310
- [11] Müller, Matthias, Tae-Yong Kim, and Nuttapong Chentanez. "Fast Simulation of Inextensible Hair and Fur." *VRIPHYS*, vol. 12, pp. 39-44, 2012. DOI: 10.2312/PE/vriphys/vriphys12/039-044
- [12] Baraff, David, and Andrew Witkin. "Large steps in cloth simulation." In *Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries, Volume 2*, pp. 767-778. 2023. DOI: 10.1145/280814.280821
- [13] Provot, Xavier. "Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behaviour." In *Graphics interface*, pp. 147-147. Canadian Information Processing Society, 1995. DOI: 10.20380/GI1995.17
- [14] Bridson, Robert, Sebastian Marino, and Ronald Fedkiw. "Simulation of clothing with folds and wrinkles." In *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, pp. 3. 2005.
- [15] Hong, Min, Min-Hyung Choi, Sunhwa Jung, Samuel Welch, and John Trapp. "Effective constrained dynamic simulation using implicit constraint enforcement." In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4520-4525. IEEE, 2005. DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570816
- [16] Goldenthal, Rony, David Harmon, Raanan Fattal, Michel Bercovier, and Eitan Grinspun. "Efficient simulation of inextensible cloth." In *ACM SIGGRAPH 2007 papers*, pp. 49. 2007. DOI: 10.1145/1276377.1276438
- [17] Picinbono, Guillaume, Hervé Delingette, and Nicholas Ayache. "Non-linear anisotropic elasticity for real-time surgery simulation." *Graphical models* 65, no. 5 (2003): 305-321. DOI:10.1016/S1524-0703(03)00045-6
- [18] Perez, Alvaro G., Gabriel Cirio, Fernando Hernandez, Carlos Garre, and Miguel A. Otaduy. "Strain limiting for soft finger contact simulation." In *2013 World Haptics Conference (WHC)*, pp. 79-84. IEEE, 2013. DOI: 10.1109/WHC.2013.6548388
- [19] Hernandez, Fernando, Gabriel Cirio, Alvaro G. Perez, and Miguel A. Otaduy. "Anisotropic strain limiting." In *Proc. of Congreso Español de Informática Gráfica*, vol. 2, p. 2. 2013.
- [20] Thomaszewski, Bernhard, Simon Pabst, and Wolfgang Strasser. "Continuum-based strain limiting." In *Computer Graphics Forum*, vol. 28, no. 2, pp. 569-576, 2009. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2009.01397.xCitations: 60
- [21] Wang, Huamin, James O'Brien, and Ravi Ramamoorthi. "Multi-resolution isotropic strain limiting." *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 29, no. 6, pp. 1-10, 2010. DOI: 10.1145/1882261.1866182
- [22] Tsiknis, Konstantinos Dinos. "Better cloth through unbiased strain limiting and physics-aware subdivision." PhD diss., University of British Columbia, 2006.
- [23] Choi, Kwang-Jin, and Hyeong-Seok Ko. "Stable but responsive cloth." In *ACM SIGGRAPH*, pp. 1, 2005. DOI: 10.1145/566654.566624
- [24] Kang, Young-Min, and Hwan-Gue Cho. "Complex deformable objects in virtual reality." In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 49-56. 2002. DOI: 10.1145/585740.585749
- [25] Bertiche, Hugo, Meysam Madadi, and Sergio Escalera. "Neural Cloth Simulation." *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 41, no. 6, pp. 1-14, 2022. DOI: 10.1145/3550454.3555491
- [26] D. Li, Y., Min Tang, Yun Yang, Zi Huang, R. F. Tong, Shuang Cai Yang, Yao Li, and Dinesh Manocha. "N-Cloth: Predicting 3D Cloth Deformation with Mesh-Based Networks." In *Computer Graphics Forum*, vol. 41, no. 2, pp. 547-558. 2022. DOI: 10.1111/cgf.14493

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.