

선형 및 일반형 침투깊이를 이용한 6자유도 햅틱 렌더링 알고리즘

Six-degree-of-freedom Haptic Rendering using Translational and Generalized Penetration Depth Computation

Yi Li¹, 이 영 은², 김 영 준[†]

Yi Li¹, Youngeun Lee², Young J. Kim[†]

Abstract We present six-degree-of-freedom (6DoF) haptic rendering algorithms using translational (PD_t) and generalized penetration depth (PD_g). Our rendering algorithm can handle any type of object/object haptic interaction using penalty-based response and makes no assumption about the underlying geometry and topology. Moreover, our rendering algorithm can effectively deal with multiple contacts. Our penetration depth algorithms for PD_t and PD_g are based on a contact-space projection technique combined with iterative, local optimization on the contact-space. We circumvent the local minima problem, imposed by the local optimization, using motion coherence present in the haptic simulation. Our experimental results show that our methods can produce high-fidelity force feedback for general polygonal models consisting of tens of thousands of triangles at near-haptic rates, and are successfully integrated into an off-the-shelf 6DoF haptic device. We also discuss the benefits of using different formulations of penetration depth in the context of 6DoF haptics.

Keywords: Haptic Rendering, Translational/Generalized Penetration Depth, Penalty-based Method

1. 서론

햅틱 렌더링이란 햅틱 분야의 핵심기술로, 사용자가 가상 객체와 상호작용을 할 때 이를 촉각으로 느낄 수 있도록 힘을 생성하고 사용자에게 전달하는 일련의 과정을 뜻한다^[1]. 최근 들어 높은 자유도를 가지는 햅틱 장치를 이용하여 사용자에게 다양한 목적의 햅틱 피드백을 제공할 수 있게 됨에 따라, 햅틱 장치를 이용하여 복잡한 업무를

수행하고 가상 객체를 자유자재로 다룰 수 있게 되었다. 하지만 6자유도 (6DoF) 장치를 위한 햅틱 렌더링은 낮은 자유도를 가지는 장치에 비하여 아직 많은 연구가 필요하며, 특히 6DoF 햅틱 렌더링은 일반적 객체간의 상호작용을 필요로 한다. 이러한 방법은 객체가 분리됐는지 겹쳐져 있는지에 대한 정보가 필요하며 이는 충돌검사 알고리즘을 통하여 알 수 있다.

햅틱 렌더링 알고리즘은 크게 페널티 기반 알고리즘 (penalty-based algorithm)과 제약 기반 알고리즘 (constraint-based algorithm)으로 분류된다. 페널티 기반 알고리즘은 제약 기반 알고리즘에 비해 이해하기 쉽고 계산량이 적지만, 제약 기반 알고리즘을 사용할 때 비해 렌더링 결과가 불안정하다고 알려져 있다^[2]. 그러나 최근 연구에서는 페널티 기반 동역학(penalty-base dynamics)도 안정적인 결과를 보여줄 수 있다는 것이 입증됐고^[3], 본 논문 또한 페널티

Received : Jun. 2. 2013; Reviewed: Jun. 25. 2013; Accepted: Jul. 25. 2013

※ This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (No.2012R1A2A2A01046246, No. 2012R1A2A2A06047007).

¹ Computer Science and Engineering, Ewha Womans University and Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China (eloveven@ewha.ac.kr)

² Computer Science and Engineering, Ewha Womans University (youngeunlee@ewhain.net)

[†] Corresponding author: Computer Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea (kimy@ewha.ac.kr)

기반 햅틱 렌더링 알고리즘을 기반으로 하고 있다.

페널티 기반 알고리즘의 핵심은 햅틱 프로브(probe)와 상호작용하는 객체간의 침투깊이(Penetration depth)를 계산하고 이를 바탕으로 페널티 힘을 생성하는데 있다. 하지만 침투깊이를 계산하는 방법은 페널티 기반 6DoF 햅틱 렌더링에서 중요한 사항이지만 현존하는 침투깊이 계산 방법은 복잡한 형태의 물체에 대해서는 매우 느리고 고사양의 시스템을 요구한다

본 논문에서는 선형침투깊이(PD), 일반형침투깊이(PD_g)라는 서로 다른 계산 방법을 이용한 6DoF 햅틱 렌더링 알고리즘을 제시하며, 본 알고리즘은 임의의 형태의 객체에 대하여 햅틱 상호작용을 다룰 수 있고 객체의 위상학적 제약을 두지 않는다. 또한 지역 침투깊이를 이용하여 객체의 다접촉(multi contact) 상황도 효과적으로 처리할 수 있다. PD, PD_g를 이용한 침투깊이 알고리즘은 접촉 공간(contact space)에 반복적으로 투사기법을 이용하여 지역 최적화(local optimization) 값을 구하고, 또한 PD_g를 효율적으로 구하기 위하여 비선형 접촉공간을 선형화하는 방법을 이용한다. 또한 본 논문에서는 운동 일관성(motion coherence)을 사용하여 지역 최저치를 피하는 방안을 제시하며 특히 PD_g는 선형이동만 하는 PD_i에 비해서 강체의 회전이동까지 고려하기 때문에, 운동 일관성 방법 사용시 계산 결과가 더 효과적이다. 본 연구의 결과 수만 개의 삼각형으로 이루어진 일반 다각형모델에 본 알고리즘을 적용하여 햅틱 갱신 속도(rate)에 가까운 정확한 햅틱 피드백을 얻었으며, 햅틱 장치에 성공적으로 통합된다는 것을 실험적으로 입증하였다. 본 연구의 더 자세한 내용은 [4]에서 확인할 수 있다.

2. 관련 연구

이 장에서는 6DoF 햅틱 렌더링과 침투깊이에 연관된 연구에 대하여 간단하게 살펴보겠다.

2.1 6DoF 햅틱 렌더링 알고리즘

3DoF 햅틱 렌더링 알고리즘에 비하여, 6DoF 햅틱 렌더링 알고리즘은 렌더링의 복잡성 때문에 상대적으로 연구 결과가 적다. 초기 6DoF 햅틱 알고리즘은 volume 접근법^[5], proximity 기반 접근법^[6], convex-decomposition 기반 접근

법^[7]이 있었다.

그 후, 대형 모델을 다루는 간소화된 6DoF 햅틱 렌더링 방법이 제안되었고^[8], [9]에서는 햅틱 프로브의 6DoF 형상을 결정하기 위하여 구속 최적화(constrained optimization) 방법을 이용하였다. [10]은 본 논문과 같이 6DoF 햅틱 렌더링에서 일반형 침투깊이를 이용하였지만, 본 논문에서 제시하는 방법에 비해 상대적으로 단순한 모델에 관해서만 적용 가능하며, 침투깊이의 최적화 또한 제대로 이루어지지 않았다. 6DoF 햅틱에 관한 좀 더 일반적인 내용은 [1]에서 찾아볼 수 있다.

2.2 침투깊이 알고리즘

선형 침투깊이(PD; translational penetration depth)는 3D에서 겹쳐진 두 물체를 분리하는 최소 평행이동 거리로 정의된다. n 개의 다각형으로 이루어진 다면체의 정확한 PD를 구하기 위해서는 볼록한(convex) 경우에는 $O(n^2)$, 오목한 경우에는 $O(n^6)$ 의 계산이 요구된다. 대부분의 PD알고리즘은 민코우스키합(Minkowski sum)과 연관돼있는데, [11]에서 이를 볼록한 모델에 처음 사용하였다. PD의 계산 복잡도가 매우 높기 때문에, 현존하는 대부분의 알고리즘은 근사치를 계산하며, 햅틱 갱신속도 안에서 일반적인 모델을 위한 근사 침투깊이 알고리즘은 PolyDepth^[12]가 유일하다.

일반형 침투깊이(PD_g; generalized penetration depth)는 [13]에서 처음 제안된 것으로 겹쳐진 두 객체를 분리하는 최소한의 평행, 회전 이동으로 정의된다. 대부분의 방법들은 근사화된 침투깊이를 구하고, 햅틱 갱신 속도 안에서 동작하는 알고리즘은 극히 드물다. 최근, [14]에서 강체와 관절체 모델을 위한 대화형 PD_g 알고리즘을 제안하였다.

3. 선형 침투깊이를 이용한 햅틱 렌더링

이 장에서는 PD를 계산하는 방법과 이를 6DoF 햅틱 렌더링에서 적용하는 방법에 대하여 살펴보기로 한다.

3.1 선형 침투깊이

3.1.1 정의

선형 침투깊이의 더 원활한 설명을 위해 일반성을 잃지 않는 선에서 햅틱 프로브 \mathcal{A} 는 움직일 수 있고, 객체 \mathcal{B} 는

고정되어 있다고 가정하자. 그리고, \mathcal{A} 의 지역 프레임(local frame)은 무게 중심과 같은 위치에서 주축과 평행하고, \mathcal{A} 와 \mathcal{B} 둘 다 원점 \mathbf{o} 를 가지는 전역 프레임(world frame) 안에 있다고 하면, \mathcal{A} , \mathcal{B} 가 겹쳐져 있을 때, \mathbb{R}^3 상에서 선형 침투깊이는 아래와 같이 정의된다^[15]

$$PD_t(\mathcal{A}, \mathcal{B}) = \min\{\|\mathbf{d}\| \mid \text{interior}(\mathcal{A} + \mathbf{d}) \cap \mathcal{B} = \emptyset, \forall \mathbf{d} \in \mathbb{R}^3\} \quad (1)$$

$PD_t(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ 가 두 객체의 민코우스키합 $\partial(\mathcal{A} \oplus -\mathcal{B})$ 의 경계와 \mathbf{o} 사이의 최소 거리라는 것은 잘 알려져 있는 사실이므로^[15], 이를 식 (1)에 적용하면 식 (2)가 된다.

$$PD_t(\mathcal{A}, \mathcal{B}) = \min\{\|\mathbf{d}\| \mid \text{interior}(\mathcal{A} \oplus -\mathcal{B}) \cap \{\mathbf{o} + \mathbf{d}\} = \emptyset, \forall \mathbf{d} \in \mathbb{R}^3\} \quad (2)$$

민코우스키합은 \mathcal{A} 의 선형 접촉공간으로 구성되어 있으므로, PD_t 또한 \mathbf{o} 부터 선형 접촉공간까지의 최소 거리가 된다^[12].

3.1.2 PD_t 계산 알고리즘

PD_t 는 민코우스키합을 이용하여 정확하게 구할 수 있지만 햅틱 렌더링에서 일반적인 다각형 모델 사이의 민코우스키합을 구하는 것은 비효율적이다. 본 논문의 PD_t 알고리즘은 [12]의 PolyDepth를 기반으로 하여, PD_t 를 거의 정확하게 구한다. 좀 더 자세히 살펴보자면, PolyDepth는 민코우스키합의 경계를 욕심쟁이(greedy) 방법을 이용하여 한정된 영역에서만 구한 후, 경계 안에 있는 점 중에서 원점에 가장 가까운 점을 찾으며, 이 점이 지역 최적화 값이 될 때까지 반복적으로 갱신한다. 이 알고리즘은 일반적인 다면체 모델에 대하여 빠르게 PD_t 를 계산하므로 6DoF 햅틱 렌더링에 적합하다. 더욱 자세한 방법은 아래와 같다.

1. 자유형상 선택: 겹쳐진 두 객체 \mathcal{A} , \mathcal{B} 에서, 우선 \mathcal{A} 의 자유형상(free configuration) \mathbf{q}_f 를 선택한다. 이 단계는 응용 프로그램에 따라 다양한 선택이 가능하며, 본 논문에서 사용한 운동 일관성에 대해서는 3.2절에서 자세히 다룬다.
2. 외투사: \mathcal{A} 의 \mathbf{q}_f 에서 \mathbf{o} 로 선형 이동하면서 선형 연속 충돌감지 기술^[16]로 접촉현상 \mathbf{q}_c 를 구한다.
3. 내투사: \mathbf{q}_c 주변에서 LCS(local contact space)를 구성하고, LCS 안에서 \mathbf{o} 에 가장 가까운 점 \mathbf{q}_i 을 얻는다.
4. 샘플 분류: \mathbf{q}_i 의 충돌 여부에 따라, \mathbf{q}_i 를 접촉 공간으로 투사하여 새로운 접촉형상 \mathbf{q}_c 를 구한다.

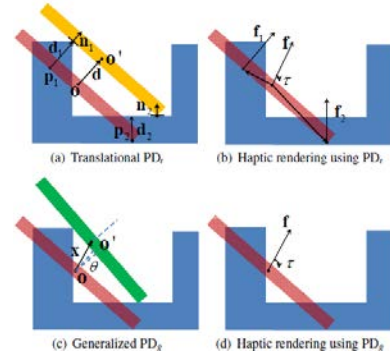


Fig. 1. 6DoF haptic rendering using translational PD and generalized PD. The red stick represents a haptic probe, and the yellow and green sticks denote the corresponding results of PD_t (a) and PD_g (c).

5. 단계 2-4를 지역 최적화 $PD_g \equiv \|\mathbf{q}_c - \mathbf{o}\|$ 를 얻을 때까지 반복한다.

3.2 햅틱 렌더링 알고리즘

본 논문은 페널티 기반의 방법^[1]을 사용하므로, 피드백되는 힘과 토크(torque)의 합은 햅틱 프로브가 객체에 침투되는 깊이에 비례하여 결정된다. PD_t 를 6DoF에 제대로 적용하기 위해서는 세가지 사항을 유념해야 한다.

- 햅틱 프로브와 객체가 다수의 접촉 영역을 형성할 때 각 영역에 대해 서로 다른 햅틱 피드백을 계산해야 하지만, 식 (1)에 정의된 PD_t 는 항상 단일 결과를 생성하므로 불안정한 햅틱 렌더링 결과를 야기할 수 있다.

- PD_t 는 6DoF 햅틱 렌더링에 필요한 토크를 생성하는 회전 이동을 포함하고 있지 않다. 따라서 PD_t 의 결과인 평행 이동에서 토크를 유추할 수 있는 회전 요소가 필요하다.

- 본 연구에서 사용하는 PolyDepth와 같이, 반복적인 알고리즘을 수행할 경우 초기 값에 따라 결과의 정확성이 달라진다. 그러므로 주어진 충돌 형상에서 가장 가까운 비 접촉 형상을 선택하는 것이 중요하다.

첫 번째 유의사항과 같이 다 접촉 영역의 경우에는 전역 PD_t 로부터 각 접촉 영역에 대한 지역 침투깊이를 유추하여 해결할 수 있다. 이때, 지역 침투깊이는 각 접촉 영역에서 가장 깊게 침투된 접촉요소로 정의된다. 더 정확히 설명하자면, 접촉 점 \mathbf{p}_i 의 지역 침투깊이를 \mathbf{d}_i , 접촉법선을 \mathbf{n}_i 라 할 때(Fig. 1(a)), 접촉영역 i 에 대한 지역 침투깊이 \mathbf{d}_i 는 전역 침투깊이 \mathbf{d} 를 접촉법선 \mathbf{n}_i 에 투사하여 얻을

수 있다.

$$\mathbf{d}_i = (\mathbf{d} \cdot \mathbf{n}_i) \mathbf{n}_i \quad (3)$$

그 후, 탄성계수 k 와 후크의 법칙(Hooke's Law)을 적용하면 식 (4)와 같이 복원력을 계산할 수 있다.

$$\mathbf{f}_i = k \mathbf{d}_i = k(\mathbf{d} \cdot \mathbf{n}_i) \mathbf{n}_i \quad (4)$$

두 번째 유의할 사항은 선형 침투깊이로부터 토크를 계산하는 것으로, 식 (5)와 같이 선형력과 토크를 대응시켜 해결할 수 있다.

$$\boldsymbol{\tau}_i = (\mathbf{p}_i - \mathbf{o}) \times \mathbf{f}_i \quad (5)$$

여기서 \mathbf{o} 는 프로브의 무게중심이다. 그리고 햅틱 디바이스에 보내질 합력과 토크 피드백은 아래 식으로 구할 수 있다.

$$\mathbf{f} = \sum_i \mathbf{f}_i \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \sum_i \boldsymbol{\tau}_i \quad (7)$$

마지막 사항인 비 충돌형상 \mathbf{q} 은 운동 일관성을 이용하여 햅틱 갱신 속도를 높여 해결할 수 있으며, 햅틱 시뮬레이션 동안 비 충돌형상을 연속적으로 저장하여 그 중 현재 프로브 형상과 가장 가까운 것을 선택하여 사용한다.

4. 일반형 침투깊이를 이용한 햅틱 렌더링

선형 침투깊이는 정의에 의해 회전 움직임을 고려하지 않으므로, PD_g 를 바탕으로 한 페널티 기반 햅틱 렌더링은 선형 움직임에 대응되는 회전 움직임 추론되어야 한다. 그러나 이러한 방법에는 두 가지 문제점이 있다.

1. Fig 1와 같은 PD_g 를 이용한 침투깊이 측정법은 PD_g 에 비하여 측정값이 지나치게 보수적일 수 있다.
2. 회전과 회전력(토크)은 선형 움직임으로부터 추론되므로 부정확하고 비현실적일 수 있으며, 이론적으로 선형과 회전 움직임은 \mathbb{R}^3 와 $SO(3)$ 에서 정의되므로 속성 자체가 매우 다르다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 일반형 침투깊이를 소개하고 이를 어떻게 6DoF 햅틱 렌더링에 적용하는지 설명하겠다.

4.1 일반형 침투깊이

4.1.1 정의

일반형 침투깊이 PD_g 는 겹쳐진 두 객체를 분리하기 위

해 평행이동과 회전을 모두 이용한다. 따라서 PD_g 는 6D 형상 공간(configuration space)에서 아래처럼 정의된다^[13].

$$PD_g^{\sigma}(\mathcal{A}, \mathcal{B})$$

$$= \{\min\{\sigma_{\mathcal{A}}(\mathbf{q}, \mathbf{o})\} \mid \text{interior}(\mathcal{A}(\mathbf{q})) \cap \mathcal{B} = \emptyset, \mathbf{q} \in \mathcal{F}\} \quad (8)$$

여기서 \mathcal{A} 의 지역 프레임은 전역 프레임으로 초기화되고, \mathcal{F} 는 \mathcal{A} 의 자유형상공간이다. $\sigma_{\mathcal{A}}$ 는 6D 형상공간에서 \mathcal{A} 의 두 형상의 거리를 측정하는 방법이다. 직관적으로 설명하자면, PD_g 는 σ 측정법 안에서 \mathcal{A} 를 \mathcal{B} 로부터 분리하는 최소 강제 운동이다. σ 는 형상공간 안에서 임의로 정의될 수 있으나, 본 연구에서는 [17]처럼 상대적으로 계산이 간단한 객체 높(nom)을 사용한다. \mathcal{A} 의 서로 다른 형상 \mathbf{q}_0 과 \mathbf{q}_1 사이의 객체 높은 아래와 같다^[13].

$$\begin{aligned} \sigma_{\mathcal{A}}(\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1) \\ = \frac{1}{V} \int_{\mathbf{x} \in \mathcal{A}} (\mathbf{x}(\mathbf{q}_0), \mathbf{x}(\mathbf{q}_1))^2 \\ = \frac{4}{V} (I_{xx}q_1^2 + I_{yy}q_2^2 + I_{zz}q_3^2) + q_4^2 + q_5^2 + q_6^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$\mathbf{x}(\mathbf{q})$ 는 형상 \mathbf{q} 에서 \mathcal{A} 의 한 점을 의미하고, $[q_1, q_2, q_3]$ 는 \mathbf{q}_0 과 \mathbf{q}_1 사이의 상대적인 방향(orientation) 차를 표현하는 사원수의 벡터 부분이고, $[q_4, q_5, q_6]$ 는 \mathbf{q}_0 과 \mathbf{q}_1 의 상대 위치 차, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 는 \mathcal{A} 의 관성텐서의 대각성분, V 는 \mathcal{A} 의 부피이다.

4.1.2 PD_g 계산 알고리즘

PD_g 와 같이 PD_g 도 정확한 값을 구하기 위해서는 시간이 오래 걸리는데, 주된 이유는 6D 형상공간의 조합복잡도가 매우 높기 때문이다. 이론적으로 $O(n)$ 다면체의 6D형상공간을 형성하기 위해서는 $O(n^2)$ 의 정렬 연산이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 PD_g 를 계산하기 위해서 PolyDepth⁺⁺^[14]라는 근사법을 이용한다. PolyDepth와 비슷하게 PolyDepth⁺⁺도 반복최적화에 기반을 두지만, PolyDepth⁺⁺는 PolyDepth에서 사용하지 않는 선형화된 6D 접촉공간을 필요로 한다. PolyDepth⁺⁺에서 PD_g 를 계산하는 자세한 방법은 아래와 같다.

1. 자유형상 선택: \mathbf{o} 와 가장 가까운 자유형상 \mathbf{q} 를 선택한다.
2. 접촉공간 투사: \mathbf{q} 를 \mathbf{o} 로 투사하면서 연속 충돌 감지 기술을 사용해 접촉현상 \mathbf{q}_c 를 얻는다.
3. 구속최적화: \mathbf{q}_c 주변에 LLCs(linearized local contact space)를 구성한 후, 객체 높 σ 를 최소화하는 최적 형상 \mathbf{q} 를 얻는다.

4. 재투사: \mathbf{q}_c 가 접촉공간에 없다면 이를 다시 접촉공간으로 투사한다.
5. 단계 2-4를 반복적으로 수행하여 객체 높의 지역 최소값을 갖는 접촉 형상 \mathbf{q}_c 를 구한다. $PD_g = \sigma_{\mathcal{A}}(\mathbf{q}_c, \mathbf{o})$

4.2 햅틱 렌더링 알고리즘

PD_g 는 평행이동과 회전을 모두 포함하므로, 6DoF 햅틱 렌더링 시 힘과 토크가 자연스럽게 연결된다.

더 상세히 설명하자면, 주어진 탄성계수 k 에 대하여 본래의 형상과 PD_g 형상의 선형 변위는 탄성력을 야기한다.

$$\mathbf{f} = k(\mathbf{o}' - \mathbf{o}) \quad (10)$$

회전각 θ 와 회전축 ω 을 가지는 PD_g 의 회전 변위에 해당하는 토크 τ 는 아래 식과 같다. (Fig 2(c))

$$\tau = \xi \theta \omega \quad (11)$$

여기서 ξ 는 회전 강도(stiffness)다.

PD_i 를 사용하는 PolyDepth와 같이 PolyDepth++ 또한 지역 최저치를 정확하게 구하기 위해서 초기 충돌 자유형상을 잘 선택하는 것이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 운동 일관성을 적용하여, PD_i 보다 더욱 자연스러운 움직임을 생성해냈다. 또한 PD_i 의 경우 전 프레임과 현 프레임의 햅틱 프로브의 회전각이 다른 경우가 발생하는데, 이때 전 프레임 결과를 현 프레임의 회전각으로 일치시켜야 한다. 그러나 이것은 객체 간의 충돌을 발생시킬 수 있으므로, \mathbf{q}_c 를 구하는데 사용될 수 없다. 그에 반해, PD_g 를 어떤 회전각에서든지 이러한 문제를 겪지 않는다.

PD_g 가 PD_i 와 다르게 지역 침투깊이를 계산하지 않는 데는 다음과 같은 두 가지 이유가 있다. 첫째, PD_g 는 정의상 회전 요소를 포함하고 있어 직접적으로 토크를 계산할 수 있으므로 회전을 발생시키기 위한 지역 침투깊이를 구할 필요가 없다. 둘째, Fig 1(a), (c)에서 볼 수 있듯이, 주어진 프로브에 대하여 PD_i 는 안정적인 햅틱 시뮬레이션을 위해 지역 침투깊이를 구하지만 PD_g 는 침투깊이를 정확하게 계산하므로 지역 침투깊이없이 안정적인 햅틱 시뮬레이션이 가능하다.

4. 실험 결과 및 분석

본 연구의 6DoF 햅틱 렌더링 알고리즘을 C++ 프로그

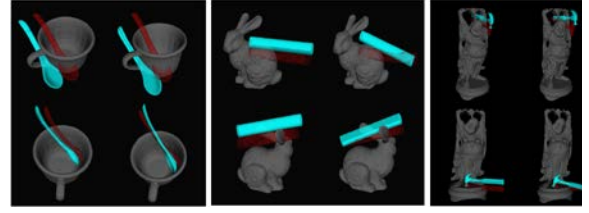


Fig. 2. Benchmarking models. In each figure, the red objects are the configurations of the haptic probe and the cyan objects are their PD results using PD_i (left column) and PD_g (right column) methods.

Table 1. Benchmark statics.

Benchmark	# of Tri	Timing (msec)		# of Contacts	
		PD_i	PD_g	PD_i	PD_g
Spoon Vs. Cup	1.3K/8.5K	2.29	4.97	5.05	5.70
Stick VS. Bunny	92/70K	3.28	5.47	5.52	5.02
Buddha VS. Hammer	20K/1.7K	5.09	6.48	5.39	5.32

램 언어와 OpenHaptic 3.0 API를 이용하여, Windows XP상의 dual-processor Xeon CPU와 2G 메모리를 탑재한 컴퓨터에서 구현되었다. 이 알고리즘은 6DoF PHANToM Premium 1.5에서도 실험되었다.

5천개부터 1만천개의 삼각형으로 구성된 임의의 위상을 가진 모델(Fig 2)을 Table 1과 같이 짝을 묶어 햅틱 렌더링하고 그 성능을 통계 내었다. 본 연구의 결과는 이상적인 햅틱 갱신 속도인 1KHz보다 낮지만, 힘 평활법(smoothing method)없이 안정적인 햅틱 렌더링을 얻었다. 그러나 접촉 개수가 증가함에 따라, 갱신 속도가 200FPS로 줄어들고, 햅틱 피드백이 불안정해진다.

실험 결과에서 보듯이 다수의 접촉이 발생할 때 PD_g 가 PD_i 보다 더 현실적인 토크 피드백을 생성한다. 또한, PD_g 가 PD_i 보다 침투된 깊이를 정확하게 측정하므로, pop-through 상황이 더 적게 나타난다. 그렇지만 PD_g 계산 시간이 PD_i 보다 더 걸리고, 복잡한 기하학적인 모델의 경우 PD_g 기반의 햅틱 피드백이 불안정할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 일반적인 다각형 모델을 위한 PD_i 와 PD_g 를 사용한 페널티 기반의 6DoF 햅틱 렌더링 알고리즘을 제

시하였다, 이 방법은 효과적인 햅틱 피드백을 생성해낼 수 있었다. 특히, PD와 PD_z의 계산에 운동 일관성 방법을 적용하여 높은 햅틱 갱신 속도를 얻었다.

본 연구의 햅틱 렌더링 알고리즘은 갱신 속도가 1KHz에 도달하지 못한다는 단점은 있지만, 실험에서 보인 햅틱 피드백은 안정적이었으며, 앞으로는 알고리즘의 성능을 가속화할 기술에 대해 연구할 예정이다.

References

[1] M. C. Lin and M. A. Otaduy, Haptic Rendering: Foundations, Algorithms, and Applications, AK Peters, 2008

[2] M. Ortega, S. Redon, and S. Coquillart, "A six degree-of-freedom godobject method for haptic display of rigid bodies", In Proceedings of the IEEE conference on Virtual Reality, VR '06, pp 191-198, Washington, 2006, IEEE Computer Society

[3] M. Tang, D. Manocha, M. A. Otaduy, and R. Tong, "Continuous penalty forces", ACM Trans. Graph, vol. 31, no. 4, pp.107:1-107:9, July, 2012

[4] Yi Li, M. Tang, S. Zhang, and Y. J. Kim, "Six-degree-of-freedom Haptic Rendering using Translational and Generalized Penetration Depth Computation", IEEE World Haptics Conference, 2013

[5] W. McNeely, K. Puterbaugh, and J. Troy, "Six degree-of-freedom haptic rendering using voxel sampling", Proc. of ACM SIGGRAPH, pp. 401-408, 1999

[6] A. Gregory, A. Mascarenhas, S. Ehmann, M. C. Lin, and D. Manocha, "6-DoF haptic display of polygonal models", Proc. of IEEE Visualization Conference, 2000

[7] Y. J. Kim, M. A. Otaduy, M. C. Lin, and D. Manocha, "Six-degree-of-freedom haptic rendering using incremental and localized computations", Presence, vol. 13, no. 3, pp. 277-295, 2003

[8] M. A. Otaduy and M. C. Lin, "Sensation preserving simplification for haptic rendering", ACM Trans. on Graphics (Proc. of ACM SIGGRAPH), pp. 543-553, 2003

[9] X. Zhang, D. Wang, Y. Zhang, and J. Xiao, "Configuration-based optimization for six degree-of-freedom haptic rendering using sphere-trees", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2602-2607, 2011

[10] J. Wu, D. Wang, and Y. Zhang, "Haptic display of rigid body contact using generalized penetration depth", Proceedings of the 4th international conference on Intelligent Robotics and Applications, pp. 532-541, 2011

[11] S. A. Cameron and R. K. Culley, "Determining the minimum translational distance between two convex polyhedral", In Proc. of IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, pp. 591-596, 1986

[12] C. Je, M. Tang, Y. Lee, M. Lee, and Y. Kim, "PolyDepth: Real-time penetration depth computation using iterative contact-space projection", ACM Trans. Graph., 2012

[13] L. Zhang, Y. J. Kim, G. Varadhan, and D. Manocha,

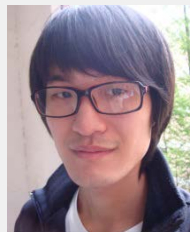
"Generalized penetration depth computation", Computer-Aided Design, vol. 39, no. 8, pp. 625-638, 2007

[14] M. Tang and Y. J. Kim, PolyDepth++: Interactive generalized penetration depth computation for rigid and articulated models using object norm, Tech. Rep. CSE-TR-2012-01, Ewha Womans University, Seoul, Korea, 2012

[15] D. Dobkin, J. Hershberger, D. Kirkpatrick, and S. Suri, "Computing the intersection-depth of polyhedra", Algorithmica, vol. 9, pp. 518-533, 1993

[16] M. Tang, Y. J. Kim, and D. Manocha, "C2A: controlled conservative advancement for continuous collision detection of polygonal models", In IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 356-361, 2009

[17] K. Kazerounian and J. Rastegar, "Object norms: A class of coordinate and metric independent norms for displacement", Flexible Mechanism, Dynamics and Analysis: ASME Design Technical Conference, 22nd Biennial Mechanisms Conference, vol. 47, pp. 271-275, 1992



Yi Li

2007 Wuhan University of Technology(B.A in Mechanical Engineering and Automation)
2007~현재 Zhejiang University (Doctoral Candidate in Computer Science and Technology)

관심분야 : Computer Graphics, Physical Simulation, Haptic Rendering



이영은

2006 이화여자대학교 수학과(이학사)
2010 이화여자대학교 컴퓨터공학과(공학석사)
2010~현재 이화여자대학교 컴퓨터공학과 박사과정

관심분야 : Physically-based simulations, Robot Motion Planning



김영준

1992 서울대학교 계산통계학과(이학사)
1996 서울대학교 전산학과(공학석사)
2000 Purdue University (Ph. D. in Computer Science)

2008~현재 이화여자대학교 컴퓨터공학과 부교수
관심분야 : Haptics, Physically-based Animation, Robot Motion Planning, Geometric Modeling