

# 비균일 강도를 가진 물체 표면의 인지적으로 정확한 햅틱 렌더링

천재영, 최승문, 김정현

포항공과대학교 컴퓨터공학과 가상현실감 연구실

{icejae02, choism, gkim}@postech.ac.kr

## Perceptually Correct Haptic Rendering of Surface Topography with Nonuniform Stiffness

Jaeyoung Cheon, Seungmoon Choi, Gerard Jounghyun Kim

Virtual Reality and Perceptive Media Laboratory

Department of Computer Science and Engineering, POSTECH

### 요약

햅틱 렌더링이 발전함에 따라서 촉감을 통하여 사용자에게 전달하려고 하는 가상 물체의 성질도 다양해 지고 있다. 이 논문은 균일하지 않은 강도(Stiffness)를 가지는 가상 물체를 기존의 페널티 기반 알고리즘(Penalty-based algorithms)을 사용하여 렌더링하는 경우 물체 표면의 모양(Topography)이 사용된 모델과 달리 왜곡되어 인지되는 현상을 해결하기 위한 햅틱 렌더링 알고리즘에 관한 연구를 보고한다. 첫 번째로 저자의 선행 연구인 힘 유지 가설(Force Constancy Hypothesis) - 사용자가 물체 표면의 모양을 획득하기 위해 물체를 만질 때 일정한 크기의 접촉 힘을 유지한다 - 을 소개한다. 다음으로 힘 유지 가설에 기반한 물체의 모양 및 강도를 왜곡 없이 정확하게 렌더링하는 알고리즘을 제안하고 폴리곤 모델에 적용하는 방법을 설명한다. 마지막으로 실험을 통하여 개발된 알고리즘의 성능을 입증한다.

Keyword : Haptics, Haptic Rendering, Force Constancy, Surface Topography, Nonuniform stiffness

## 1. 서론

사용자가 가상 물체와 상호작용을 할 때 사용자에게 전달되는 힘을 계산하는 과정을 햅틱 렌더링(Haptic Rendering)이라고 하며 [1], 가장 간단하고도 널리 쓰이는 방법으로 페널티 기반 알고리즘(Penalty-based algorithm)이 있다 [2, 3]. 이 알고리즘은 물체의 표면과 햅틱 장비의 툴팁(Tool Tip)의 관통 깊이(Penetration depth)에 비례하여 사용자에게 전달할 힘을 계산한다.

본 저자의 선행연구에서 [4], 페널티 기반 알고리즘을 사용하여 비균일 강도를 가지는 가상

물체를 렌더링할때 물체 표면의 모양(Topography)이 왜곡되어 인지될 수 있음이 밝혀졌다. 이 현상을 설명하기 위하여 힘 유지 가설 (Force Constancy Hypothesis; 사용자가 물체 모양을 인식하려고 할 때 물체와 일정한 접촉 힘을 유지한다)을 제안하였고 심물리학 실험(Psychophysical Experiment)을 실행하여 힘 유지 가설을 검증하였다.

본 논문에서는 힘 유지 이론에 근거하여 비균일 강도를 가지는 물체의 모양을 왜곡 없이 전달하는 알고리즘을 제안하고 나아가 폴리곤 모델

에 적용할 때 발생하는 문제점 및 이를 해결하는 방법에 대해 설명한다. 그리고 실험을 통하여 제안한 알고리즘의 효용성을 보인다.

## 2. 힘 유지 이론

물체 표면의 모양과 경도가 동시에 변하는 대표적인 예로는 주사형 탐침 현미경(SPM; Scanning Probe Microscope)을 이용하여 얻은 데이터를 들 수 있다. 그림 1은 SPM에서 실제 측정된 예를 나타내며 이 경우 Halo 부분의 경도가 다른 부분보다 낮아 햅틱 장치의 도구 궤적이 실제 물체의 모양을 평행하게 따라가지 않고 왜곡되어 있는 것을 알 수 있다 [4].

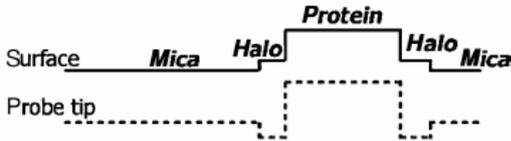


그림 1. 높이 정보의 왜곡 현상

페널티 기반 알고리즘을 사용하여 힘 계산을 할 경우 예를 들면 다음과 같다.

$$f_z(x, y) = k(x, y) \cdot [h(x, y) - p_z] \quad (1)$$

$f_z(x, y)$ 는  $z$  방향으로의 복원력,  $k(x, y)$ 는  $(x, y)$  위치에서의 표면의 강도(Stiffness),  $h(x, y)$ 는  $(x, y)$ 에서의 표면의 높이,  $p_z$ 는 햅틱 인터페이스 포인트(HIP; Haptic Interface Point)의  $z$  좌표를 각각 의미한다.

높이의 왜곡 현상이 발생하는 이유를 설명하기 위하여 사용자가 물체 표면을 스캔하며 가하는 접촉 힘은 일정할 것이라는 힘 유지 가설 (Force Constancy Hypothesis)이 제안되었다 [4]. 힘 유지 가설이란 사용자가 물체 표면의 모양을 인지하기 위한 목적으로 물체를 만질 때 일정한 크기의 접촉 힘을 유지한다는 것이다.

다음 그림 2의 위의 곡선은 물체의 표면을, 아래 곡선은 HIP의 경로를 나타낸다.  $d_i$ 는  $i$  표면에서의 관통 깊이,  $h_i$ 는  $i$  표면에서의  $z$  축으로의 높이,  $p_{zi}$ 는  $i$  표면에서 HIP의  $z$  위치 값,  $f_p$ 는 사용자가 햅틱 장치를 통해 가하는 힘,  $k_i$ 는  $i$  표면에서의 강도를 각각 의미한다.

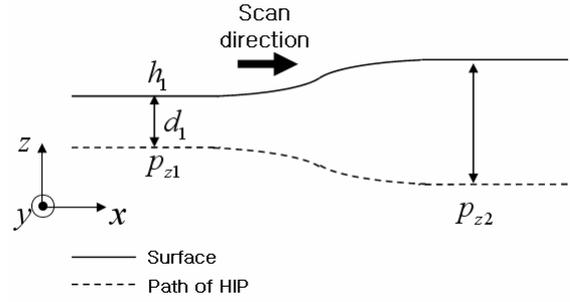


그림 2. 표면과 HIP의 경로

힘 유지 가설에 의해 각 표면에서의 접촉 힘이 같다고 가정하면 각 표면에서의 관통 깊이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_1 = h_1 - p_{z1} = \frac{f_p}{k_1}, \quad d_2 = h_2 - p_{z2} = \frac{f_p}{k_2} \quad (2)$$

사용자가 인지하는 표면의 높이 변화를  $\Delta p_z$ 라고 하고 (2)식을 이용하면 다음 식을 얻는다.

$$\Delta p_z = p_{z2} - p_{z1} = h_2 - h_1 - f_p \left( \frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1} \right) \quad (3)$$

$\Delta h = h_2 - h_1$ 는 가상 표면의 높이 차이이며, 사용자가 가상 표면의 모양을 정확히 인지하기 위해서 렌더링 되어야 하는 값이다. 강도의 차이에 의해 왜곡되는 높이를  $\Delta h_d$ 라고 표시하면 다음 식을 얻는다.

$$\Delta h_d = -f_p \left( \frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1} \right) \quad (4)$$

$$\Delta p_z = \Delta h + \Delta h_d \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에 대하여 강도의 차이에 따라 발생하는 왜곡의 유형이 세가지 존재한다.  $k_1 = k_2$ 이면  $\Delta h_d = 0$ 이므로 왜곡 되지 않는다.  $k_1 > k_2$ 이면  $\Delta h_d > 0$ 이고  $\Delta p_z > \Delta h$ 이므로 사용자가 인지하는 표면의 높이 변화는 원래의 높이 변화보다 더 크다. 마지막으로  $k_1 < k_2$ 이면  $\Delta h_d < 0$ 이고  $\Delta p_z < \Delta h$ 이므로 원래의 높이 차이보다 작은 변화가 발생한다. 특히  $|\Delta h_d| > |\Delta h|$ 일 때는 높이가 반전되는 현상이 나타난다. 그림 3은 이러한 세가지 경우에 대한 가상 물체의 표면과 HIP의 경로를 보인다.

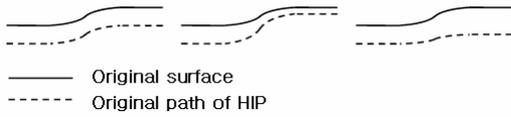


그림 3. 좌측부터  $k_1 = k_2$ ,  $k_1 < k_2$ ,  $k_1 > k_2$  인 경우의 표면과 HIP의 경로

### 3. 제안하는 알고리즘

#### 3-1 기본 알고리즘

페널티 기반 알고리즘에서 발생하는 왜곡 현상은 강도의 차이가 존재하면 항상 나타나는 값이다. 만약 렌더링할 때 처음 접촉한 표면에서의 강도를 항상 유지하며 사용자에게 전달할 힘을 계산하면 높이의 왜곡 현상 없이 물체의 지형 모양이 표현이 되지만 물체의 속성인 강도가 왜곡된다. 따라서 우리는 물체의 지형 모양과 물체의 강도 모두를 왜곡시키지 않고 올바른 표면의 모양을 표현하기 위하여 힘의 계산 과정에서 왜곡되는 높이를 제거하는 방법을 제안한다.

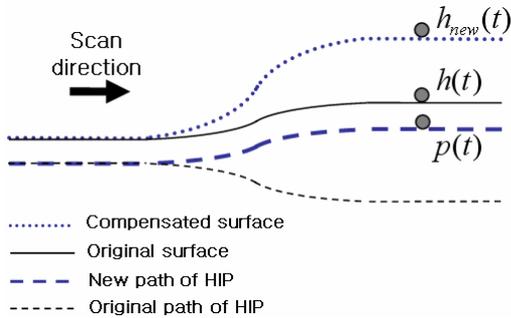


그림 4. 올바른 HIP의 경로와 보상된 표면

그림 4의 보상된 표면 (Compensated surface)은 물체의 원래 높이에서 식 (4)에서 표현한 왜곡되는 높이 성분을 제거해 주어 얻게 되는 높이이다. 이는 자칫 물체의 지형의 높이를 왜곡하는 것처럼 이해될 수 있으나 가상 물체의 지형의 모양은 변하지 않고 힘을 계산하기 위한 높이만을 보상한다는 점에서 구분된다. 보상된 표면을 따라 접촉 힘을 가하면 강도의 차이만큼 높이의 왜곡이 발생하게 되지만 보상된 높이 자체가 왜곡된 높이 성분을 제거한 높이이기 때문에 원래의 표면의 모양의 높이 차이만큼을 표현하게 된다.

왜곡되는 높이를 미리 제거해 주기 위해서는

식 (4)에서 보이듯이  $f_p$  값이 필요한데 이 값은 현재 표면에서 계산해야 할 값이므로 알 수 없는 값이다. 이 때 힘 유지 이론에서의 표면을 접촉할 때의 힘은 일정하다는 사실을 이용하면 바로 전 표면에서 계산된 힘을 사용할 수 있고 따라서 왜곡되는 높이를 미리 계산할 수 있게 된다. 현재 갱신 시간 (Update Tick)을  $t$ , 바로 전 갱신 시간을  $t-1$  이라고 했을 때 한 번의 갱신 시간 변화 동안 왜곡되는 높이는 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta h_d(t) = -f(t-1) \cdot \left( \frac{1}{k(t)} - \frac{1}{k(t-1)} \right) \quad (6)$$

현재 갱신 시간에서의 보상된 표면의 높이는 다음과 같이 구한다. 이전 갱신 시간에서의 보상된 표면의 높이를 기준으로 원래 표면의 높이 차를 더해준 후 갱신 시간 동안 왜곡된 높이를 제거한다. 현재 갱신 시간에서 보상된 표면 높이를  $h_{new}(t)$  로 표현할 때 그림 5는 원래 표면과 보상된 표면의 높이 관계를 보이고 식 (7)과 같이 표현된다.

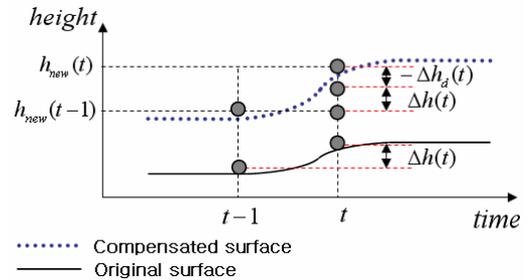


그림 5. 원래의 표면의 높이와 보상된 표면의 높이 관계

$$h_{new}(t) = h_{new}(t-1) + \Delta h(t) - \Delta h_d(t) \quad (7)$$

식 (7)은  $h_{new}(t)$  에 대한 점화식이므로  $h_{new}(t)$  에 대한 일반항을 구하면 식 (8)과 같다.

$$h_{new}(t) = h(t) - \sum \Delta h_d(t) \quad (8)$$

마지막으로 현재 갱신 시간에 사용자에게 전달할 힘은 보상된 표면의 높이와 HIP의 차이의 관통 깊이를 이용하여 계산하며 다음과 같이 표현된다.

$$f(t) = k(t) \cdot \{h_{new}(t) - p(t)\} \quad (9)$$

우리는 위에서 설명한 알고리즘을 표면 보상

알고리즘(Surface Compensation Algorithm)이라 명명한다. 위에서 제안한 알고리즘은  $(x, y)$  위치가 주어지면 강도와 높이 정보를 알 수 있는 환경에 대하여 설명되었고 다음 절에서는 이를 폴리곤 모델에 적용하는 방법을 설명한다.

### 3-2 폴리곤 모델에의 적용

폴리곤 (Polygon)으로 이루어진 가상 환경에서의 렌더링은 가상 프록시 알고리즘 (Virtual Proxy Algorithm) [3]이 널리 사용된다. 가상 프록시란 물체의 표면을 햅틱 장비의 툴팁이 뚫고 지나가더라도 표면 위에 남아 있는 일종의 잔상을 말한다. 이 알고리즘은 페널티 기반 알고리즘을 사용하여 힘을 계산하므로 앞 절에서 제안한 알고리즘을 적용할 수 있다.

표면에 대한 법선 벡터를  $\vec{n}(t)$ , 현재 갱신 시간에서의 왜곡 높이를  $h_d(t)$ , 보상된 표면 위에 있는 가상 프록시를  $cvp(t)$ , 가상 프록시는  $vp(t)$ , HIP의 위치를  $HIP(t)$  라고 하고 앞 절의 식들을 수정하면 아래와 같고 그림 6은 폴리곤 모델에서의 보상된 표면을 보인다.

$$\vec{n}(t) = \frac{vp(t) - HIP(t)}{|vp(t) - HIP(t)|} \quad (10)$$

$$h_d(t) = -\left| \vec{f}(t-1) \right| \cdot \left( \frac{1}{k(t)} - \frac{1}{k(t-1)} \right) \quad (11)$$

$$cvp(t) = vp(t) - \sum h_d(t) \cdot \vec{n}(t) \quad (12)$$

$$\vec{f}(t) = k(t) \cdot \{cvp(t) - HIP(t)\} \quad (13)$$

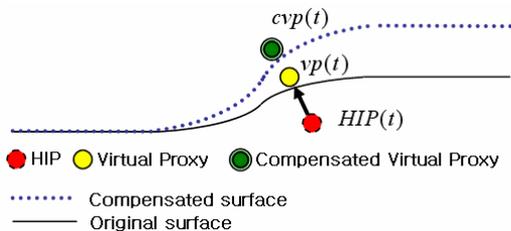


그림 6. 폴리곤 모델에서의 보상된 표면

이처럼 표면 보상 알고리즘은 가상 프록시 알고리즘의 결과 값인 가상 프록시의 위치와 접촉 표면의 강도를 이용하여 힘을 계산함으로써 쉽게 폴리곤 모델에 적용될 수 있다. 그러나 원래 표면과 보상된 표면의 사이에 HIP가 위치할

때에는 힘의 방향이 반대로 되거나 힘이 갑자기 없어지는 현상이 발생한다. 다음 두 절에서는 이러한 문제점이 발생하는 이유를 분석하고 해결 방법을 제안한다.

### 3-2-1 남는 높이 문제

보상된 표면의 높이보다 원래 표면의 높이가 높고 HIP가 두 표면의 사이에 존재하는 경우 사용자는 마치 HIP가 표면으로부터 떨어지지 않도록 방해하는 힘이 존재하는 것처럼 느끼는 현상이 발생하였다. 그림 7은 이와 같은 경우가 발생할 때의 조건을 나타낸다.

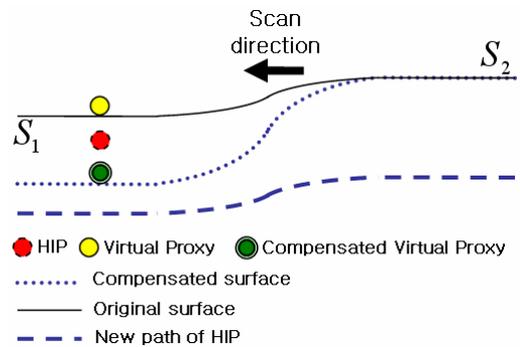


그림 7. 남는 높이 문제:  $h_1 < h_2$ ,  $k_1 > k_2$ ,  $S_2$ 에서  $S_1$ 로 접촉할 때

사용자가 HIP를 표면으로부터 뗄 때 HIP가 보상된 표면보다 높아지게 되면 접촉이 끝난 것이지만 원래 표면과는 계속 접촉을 하고 있기 때문에 가상 프록시 알고리즘은 사용자에게 전달할 힘을 계속 계산한다. 이 때 사용되는 관통 깊이의 방향이 HIP가 원래 표면보다 밑에 있을 때와는 반대가 되기 때문에 힘의 방향도 반대가 되어 위와 같은 현상이 발생하게 되는 것이다.

표면 보상 알고리즘에 HIP가 보상된 표면의 높이보다 낮은 위치에 있다가 높아지는 순간을 검사하고 조건을 만족하는 경우 사용자에게 힘이 전달되지 않도록 하는 루틴을 추가함으로써 이 문제를 해결할 수 있다.

### 3-2-2 부족한 높이 문제

이 문제는 원래 표면보다 보상된 표면의 높이가 높고 HIP가 두 표면 사이에 존재할 때 발생한다. 이 경우에는 HIP 높이가 원래의 표면보다 높아지면 가상 프록시 알고리즘에서 접촉이 일어

나지 않은 것으로 간주되어 사용자에게 가할 힘을 계산하지 않는다. 사용자가 표면을 계속 접촉하고자 하는 의도가 있다 하더라도 순간적으로 힘이 약해져서 원래의 표면보다 HIP의 위치가 높아지게 되면 힘의 전달이 일어나지 않게 되고, 더욱이 다시 접촉이 일어났을 때에는 보상된 표면과의 접촉이 아니라 원래의 표면과의 접촉이 일어나기 때문에 HIP의 위치가 바로 전과 다른 느낌을 받게 된다. 그림 8은 이러한 경우가 발생하는 조건을 나타낸다.

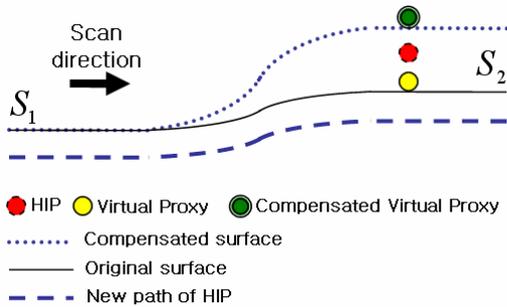


그림 8. 부족한 높이 문제:  $h_1 < h_2$ ,  $k_1 > k_2$ ,  $S_1$ 에서  $S_2$ 로 접촉할 때

이 문제에서는 원래 표면과 접촉이 일어나지 않으므로 표면으로부터 강도를 알 수 없어서 식 (11)을 이용하여 왜곡된 높이를 계산할 수 없고, 가상 프록시 또한 구할 수 없게 되어 식 (12)를 사용하여 보상된 표면의 가상 프록시를 계산하지 못한다.

이를 해결하기 위하여 HIP의 위치를 표면의 아래에 있는 것처럼 값을 조정하여 접촉이 일어난 표면을 구하고 이에 대한 강도와 가상 프록시의 위치를 구하는 방법을 제안한다. 그림 9는 이러한 모조 HIP (Pseudo HIP)의 위치와 이를 기반으로 구한 가상 프록시의 위치 및 보상된 가상 프록시의 위치를 보인다.

HIP에서 현재 표면에서의 법선의 방향으로 왜곡된 높이만큼 빼준 것이 모조 HIP의 위치이며 항상 원래 표면보다 아래에 있는 것이 보장된다. 아래의 식에서 구한 모조 HIP를 식 (13)에 대입함으로써 사용자에게 전달할 힘을 구할 수 있다.

$$PseudoHIP(t) = HIP(t) - \sum \nabla h_d(t) \cdot \vec{n}(t) \quad (14)$$

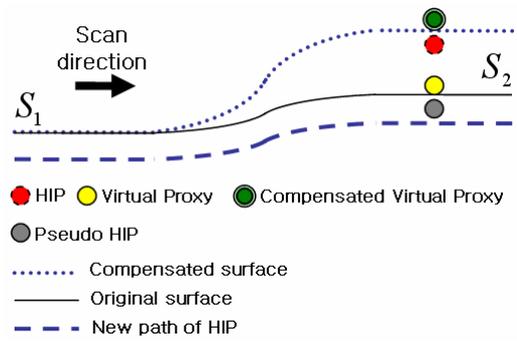


그림 9. 수정된 HIP와 그로부터 계산된 가상 프록시와 보상된 가상 프록시

그러나 이 방법은 가상 프록시를 구하기 위해서 이전 갱신 시간 때의 표면의 법선 벡터를 사용하기 때문에 오차가 발생한다는 단점이 있다. 이 방법은 표면의 변화가 극심하지 않거나 갱신 속도가 중요시 되는 환경에서 적용할 수 있겠으나 표면의 변화가 극심하고 정확도가 요구되는 환경에서는 사용할 수 없다. 오차가 없는 대안 알고리즘은 차후에 연구하도록 한다.

#### 4. 구현 및 실험

제안한 알고리즘이 사용자가 물체의 표면 모양을 인지할 때 어떠한 작용을 하는지 알아보기 위한 실험을 하였다. 왼쪽의 깊은 벽과 오른쪽의 얇은 벽의 깊이 차이가  $4\text{ mm}$ , 벽과 벽 사이의 거리가  $50\text{ mm}$ , 깊은 벽의 강도가  $0.3\text{ N/mm}$ , 얇은 벽의 강도가  $0.8\text{ N/mm}$  인 가상의 물체의 모양을 인지하는 간단한 실험을 하였다. 두 벽 사이를 잇는 표면의 높이와 강도는 아래의 식을 사용하여 보간(Interpolation)하였다.

$$h(p_x) = \frac{1}{2}[(h_2 - h_1)\sin(\frac{\pi p_x}{W}) + h_1 + h_2] \quad (15)$$

$$k(p_x) = \frac{1}{2}[(k_2 - k_1)\sin(\frac{\pi p_x}{W}) + k_1 + k_2] \quad (16)$$

다양한 햅틱 장치의 인터페이스를 지원하는 CHAI 3D 라이브러리[5]를 이용하여 위에서 설정한 가상 물체를 생성하고 표면 보상 알고리즘을 구현하였다. 이 실험에서 사용자는 센서블 (Sensable)사의 팬텀 프리미엄 1.0 (PHANTOM Premium 1.0) [6] 을 사용하여 서로 다른 강도를 갖는 두 벽을 왼쪽에서 오른쪽으로 접촉하는 실

힘을 하였다. 그림 10은 구현된 프로그램의 초기 실행 모습이다.



그림 10. 실험에 사용된 프로그램

실험은 다음의 4가지 경우에 대하여 실행되었다. 두 벽의 강도가  $0.8 N/mm$  인 경우, 두 벽의 강도가  $0.3 N/mm$  인 경우, 깊은 벽의 강도가  $0.8 N/mm$  이고 얇은 벽의 강도가  $0.3 N/mm$  인 경우, 마지막으로 세 번째 경우와 같은 구성에 대하여 표면 보상 알고리즘이 적용이 된 경우이다. 네 번째 경우를 제외한 나머지 실험은 모두 가상 프록시 알고리즘만이 적용되었다.

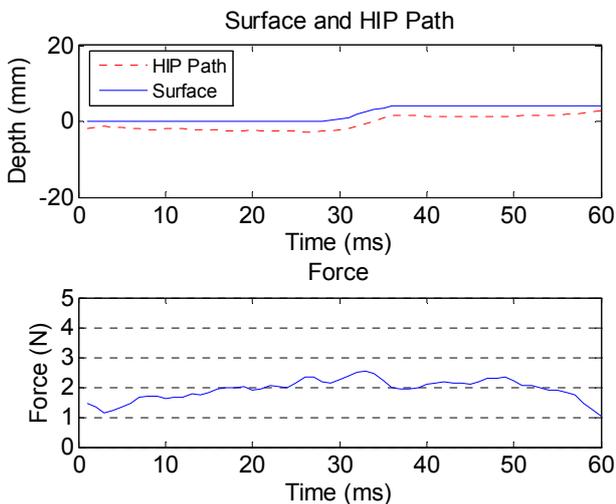


그림 11. 강도가 강한 표면의 HIP 경로

그림 11은 첫 번째 실험의 결과를 보인다. 상단의 그래프는 시간에 대한 벽의 깊이와 HIP의 경로를 나타낸다. 두 벽이 서로 균일한 강도를 갖기 때문에 이에 대한 HIP의 경로는 벽의 모양과 비슷하다. 하단의 그래프는 시간에 대하여 햅틱 장치가 사용자에게 전달한 힘을 나타내며 사용자

가 햅틱 장치에 가한 힘의 근사치로 이해될 수 있다.

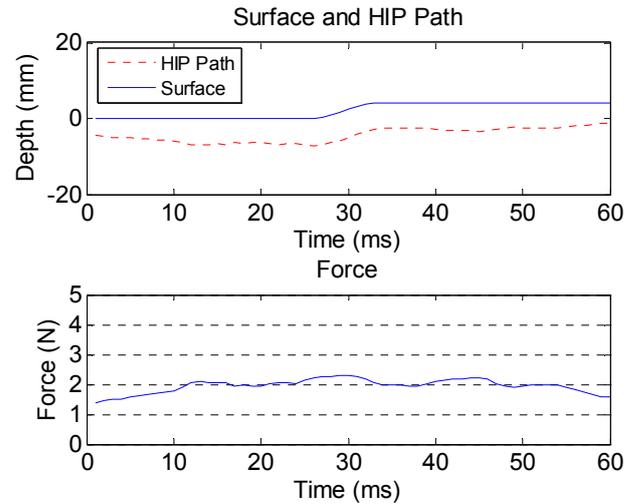


그림 12. 강도가 약한 표면의 HIP 경로

그림 12는 첫 번째 실험보다 낮고 균일한 강도를 갖는 두 벽에 대한 실험 결과를 나타낸다. HIP의 경로는 표면의 모양과 거의 일치하고 첫 번째 실험과 비교하여 관통 깊이가 더 크다는 차이점만을 보인다.

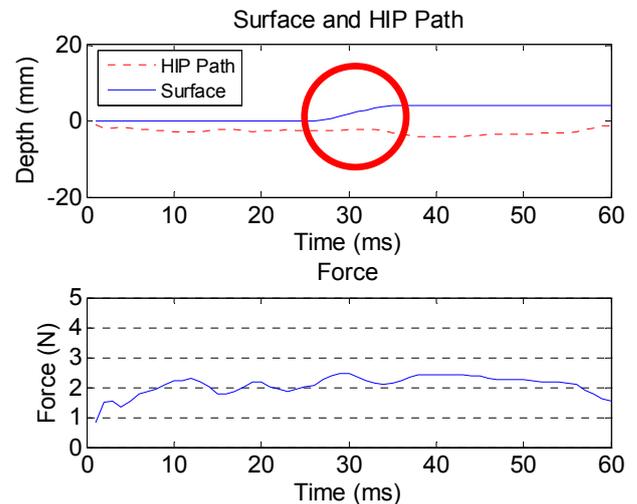


그림 13. 강도가 서로 다른 표면의 HIP 경로

그림 13은 서로 다른 강도를 갖는 두 벽에 대한 실험 결과를 보이며 상단의 그래프에 표시된 부분에서 2장에서 설명한 높이의 반전 현상을 볼 수 있다. 이 때 사용자가 가한 힘이 약  $2 N$  으로 일정한 것을 볼 수 있는데 이를 통하여 힘 유지 이론을 재차 확인할 수 있다.

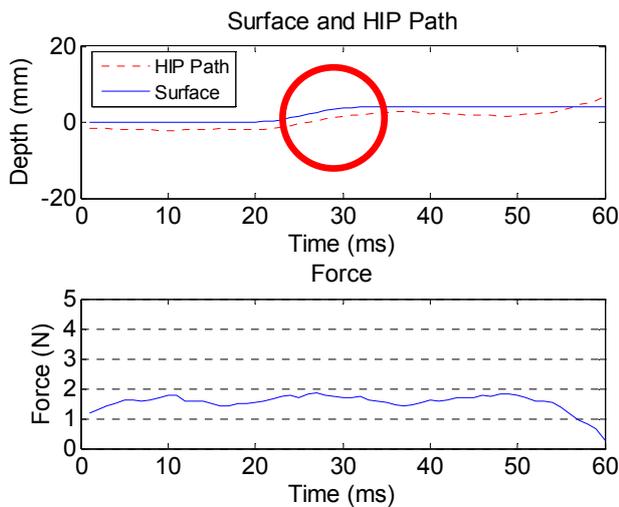


그림 14. 표면 보상 알고리즘이 적용된 경우의 HIP 경로

그림 14는 강도가 서로 다른 두 벽에 대하여 표면 보상 알고리즘을 적용한 결과를 나타낸다. 상단의 그래프에 표시한 바와 같이 (그림 13)과 비교하였을 때 높이의 반전 현상이 나타나지 않으며 표면과 흡사한 모양의 HIP경로가 나타난다. 그러나 접촉이 해제되는 순간에 HIP의 위치가 원래 표면보다 높아지는 현상이 발생한다.

이는 보상된 표면의 높이와 원래 표면의 높이가 같지 않아서 발생하는 표면 보상 알고리즘의 한계로 지적된다. 이에 대한 대안을 찾는 것을 다음 연구의 주요 목표로 삼을 것이다.

## 5. 결론

표면 보상 알고리즘은 주어진 가상 물체의 표면에 대하여 강도와 전달되는 힘의 희생 없이도 접촉 힘 유지에 의해 발생하는 왜곡 현상을 해결하는 장점을 갖는다. 가상 프록시 알고리즘과의 결합을 통하여 폴리곤 모델에도 적용이 될 수 있어 표면 보상 알고리즘이 갖는 의미는 더욱 크다. 부족한 깊이 문제에 대한 대안 알고리즘의 고안 또한 이론적으로 어렵지 않아 상황에 맞는 방법을 선택할 수 있는 유용성을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 왜곡된 표면의 높이와 원래의 높이의 차이로 인하여 발생하는 높이 왜곡 문제가 표면

보상 알고리즘의 한계로 지적된다. 이 후에는 이러한 한계를 극복하는 방법을 제시하고 사용자 실험(Psychophysical Experiment)을 통해 제안한 알고리즘의 효용성을 검증하도록 하겠다.

## 참고 문헌

- [1] K. Salisbury, D. Brock, T. Massie, N. Swarup, and C. Zilles, "Haptic Rendering: Programming Touch Interaction with Virtual Object," in Proceedings of the ACM 1995 Symposium on Interactive 3D Graphics, 1995, pp. 123-130.
- [2] C. B. Zilles and J. K. Salisbury, "A constraint-based god-object method for haptic display," in Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1995, pp. 146-152.
- [3] D. Ruspini, K. Kolarov, and O. Khatib, "The Haptic Display of Complex Graphical Environments," in Computer Graphics Proceedings (ACM SIGGRAPH 97), 1997, pp. 345-352.
- [4] S. Choi, L. Walker, H. Z. TAN, S. Crittenden, and R. Reifemberger, "Force Constancy and Its Effect on Haptic Perception of Virtual Surfaces," ACM Transactions on Applied Perception, vol. 2, pp. 89-105, 2005.
- [5] F. Conti, F. Barbagli, D. Morris, and C. Sewell, "CHAI: An Open-Source Library for the Rapid Development of Haptic Scenes," in Demo paper presented at IEEE World Haptics, 2005.
- [6] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects," in Proceedings of the ASME Dynamics Systems and Control Division, vol. 55-1, 1994, pp. 295-301.