

# 햅틱 증강 현실을 위한 접촉식 형태 모델링의 성능 개선

임성훈, 최승문  
포항공과대학교

## Modeling System Improvement for Haptic Augmented Reality

Yim, Sunghoon, Choi, Seungmoon

Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

e-mail : {algorab, choism}@postech.ac.kr

### 요 약

햅틱 증강현실 (Haptic Augmented Reality)은 실제 물체와 환경에 가상의 햅틱 자극을 더하여 상호작용할 수 있게 하는 기술이다. 이는 실제의 물체의 형태나 물성을 증강현실 시스템을 통하여 변경할 수 있도록 한다. 그러나 이런 실제 물체의 물성을 변화하기 위해서는 실제 물체에 대한 모델이 제한적인 수준이라도 필요하다. 본 논문에서는 햅틱 증강 현실의 렌더링을 위해 사용되는 시스템 상에서 바로 적용할 수 있는 접촉식 형태 모델링 시스템의 성능 향상에 대해서 소개한다. 접촉식 모델링 시스템은 햅틱 인터페이스와 힘 센서를 이용하여 모델링을 수행하는 시스템이었다. 그러나 이를 햅틱 증강 현실에 바로 적용하기 위해서는 성능 향상이 필요하여 이를 위한 다양한 보정과 개선을 수행하였다.

### 1. 서론

증강 현실은 사용자에게 가상과 실체가 혼합된 형태의 감각을 제공하여 실제 환경을 반 가상 환경으로 변화시키는 기술이다. 현재 시각 증강 현실은 많은 연구가 진행되어 다양한 산업, 의료, 오락 분야에서 이용되고 있다. 이에 더하여 촉각을 증강 하는 햅틱 증강 현실의 연구도 이루어 지고 있다.

본 연구팀은 햅틱 증강 현실 중에서도 가상의 촉각과 실제 촉각이 혼합되거나 실제 촉각이 가상의 촉각으로 인해 변형된 범주의 햅틱 증강 현실을 연구해 왔다 [1].

햅틱 증강 현실을 수행하기 위해서는 실제 물체의 특성을 알아야 한다. 만약 균일 실제 물체를 대상으로 강성 변형을 수행한다면, 물체 전체의 균일한 강

성 정보만을 알고 있으면 되지만 비 균일 한 물체를 대상으로 할 경우엔 물체의 형태 정보 또한 알아야 할 필요성이 있다. 이 경우 얻어지는 물체의 형태 정보의 정확도는 렌더링의 정확도에 영향을 미치게 된다. 따라서 물체의 형태 정보를 얻는 방법의 정확도를 높일 필요가 있다.

본 논문은 증강 현실을 위한 접촉식 형태 모델링의 정확도 개선을 설명한다. 접촉식 형태 모델링은 햅틱 인터페이스의 탐침을 직접 물체와 접촉시키며 접촉점을 얻어낸 다음, 이 모은 접촉점들을 모델링에 사용하는 방법이다 [2]. 접촉점의 판별에 힘 센서의 값을 이용하므로 오차가 적은 정확한 힘 센서의 반응힘 측정이 필요하다. 또한 탐침의 정확한 위치와 탐침의 어느 지점에 물체가 접촉했는지를 확인할 필요가 있다. 탐침의 정확한 위치의 추적은 햅틱 증강

현실의 렌더링 중에도 필요하다 [3]. 본 논문의 정확도 향상 방법은 모델링뿐만 아니라 렌더링 시의 탐침의 정확도에도 향상을 가져와 모델링 및 렌더링 성능을 향상 시킬 수 있었다.

2. 시스템의 구성



[그림 1] 시스템 구성 및 보상대의 전경

전체적인 시스템 구성은 그림 1 과 같다. 임피던스 햅틱 인터페이스인 Sensable 사의 PHANToM Premium 1.5 High Force 모델을 모델링을 위해 이용하였다. 탐침부에는 ATI 사의 NANO25 6 축 힘/토크 센서를 설치하였다.

한편 탐침은 그림 2 와 같이 3mm 의 반지름을 가진 구형으로 설계하였다. 정확한 모델링을 위해서는 원추형의 탐침이 효과적이거나 햅틱 증강 현실 렌더링 중에는 접촉범위 및 마찰력을 일정하게 유지할 수 있는 구형 탐침이 효과적이기 때문이다. 그러나 구형의 탐침을 사용하면 추가적인 접촉점 위치 확인 과정을 필요로 한다.

또한 햅틱 인터페이스의 초기 위치 및 센서의 방향을 정확하게 설정하기 위한 보상대를 추가하였다.



[그림 2] 구형 탐침과 NANO25 힘/토크 센서

3. 센서 중력 값의 보상

모델링 동안 물체의 충돌 확인은 물체에 충돌하였을 때 물체로부터 발생하는 반응 힘을 통해 얻게 된다. 힘 센서로 측정되는 데이터는 반응 힘뿐만 아니라 중력 값, 관성 값을 포함한 다양한 잡음 정보를 포함하게 된다. 따라서 이 값을 제거해야 한다.

센서의 기준 좌표계를 다음과 같이 정의한다. 탐침의 중심은 센서의 기준 좌표 계의 z 축과 일치한다. 한편 센서의 초기 위치에서 중력 방향은 y 축과 일치한다고 가정한다.

이와 같은 환경에서 현재의 시간을 t라고 할 때, 중력 값의 보상은 다음과 같이 이루어 진다. 센서의 좌표계의 반응 힘,  $\mathbf{f}_r(t)$  는 센서로부터 측정되는 센서 힘  $\mathbf{f}_s(t)$  에서 관성력  $\mathbf{f}_i(t)$  과 중력  $\mathbf{f}_g(t)$ , 그리고 잡음  $\mathbf{f}_e(t)$  를 제거한 힘이다.

$$\mathbf{f}_r(t) = \mathbf{f}_s(t) - \mathbf{f}_s(0) + \mathbf{f}_g(0) - \mathbf{f}_i(t) - \mathbf{f}_g(t) - \mathbf{f}_e(t) \tag{1}$$

모델링을 시작한 처음에는 보상대 위에서 힘 센서와 탐침은 z 축 방향으로, 중력 방향은 y 축으로 일치시킨 상태에서 인터페이스의 인코더와 힘 센서의 값을 초기화 한다. 이 시점에서  $\mathbf{f}_r(t)$  과  $\mathbf{f}_i(t)$  의 값은 0 이며 따라서  $\mathbf{f}_s(0)$  의 값은 다음과 같다.

$$\mathbf{f}_s(0) = \mathbf{f}_g(0) + \mathbf{f}_e(0) \tag{2}$$

따라서 초기 힘을 보상하기 위해  $\mathbf{f}_s(0)$  의 값을 측정된 값에서 뺀다.  $\mathbf{f}_g(0)$  의 값은 초기 위치에서 센서에 측정되는 값으로 중력 가속도  $G$  와 탐침의 무게  $m_t$  가 주어질 때, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{f}_g(0) = Gm_t \mathbf{u}^g(0) \tag{3}$$

$$\mathbf{u}^g(0) = [0 \quad -1 \quad 0]^T \tag{4}$$

모델링 중인 센서에 측정되는 중력에 영향을 주는 센서의 방향 요소는 센서의 roll 과 pitch 이다. 이 중 roll 이 고정되어 있다고 가정하면, t 시간의 pitch 의 각도  $\theta$  가 주어질 때, 중력의 방향을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{u}^g(\theta) = [0 \quad -\cos \theta \quad -\sin \theta]^T \quad (5)$$

따라서, 중력 보상에 사용하는 값  $\mathbf{f}_g(t)$  는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{f}_g(t) = Gm_t \mathbf{u}^g(\theta) \quad (6)$$

관성력은 탐침의 가속도를 측정하여 제거할 수 있다.

$$\mathbf{f}_i(t) = m_t \mathbf{a}(t) \quad (7)$$

따라서 식 (1)의 값 중  $\mathbf{f}_e(t)$  를 제외한 모든 값을 얻어서 센서의 좌표계의 반응 힘  $\mathbf{f}_r(t)$  를 알 수 있다. 세계 좌표 계의 반응 힘  $\mathbf{f}_r'(t)$  은 센서의 회전 행렬  $\mathbf{T}_s(t)$  로 변환하면 얻을 수 있다.

$$\mathbf{f}_r'(t) = \mathbf{T}_s(t) \mathbf{f}_r(t) \quad (6)$$

#### 4. 접촉 지점의 탐색

구형의 탐침이 있을 때, 이 탐침과 접촉한 물체 사이의 접촉점을 찾아내기 위해서는 힘과 토크 값이 필요하다. 햅틱 증강 현실은 비교적 연한 물체를 단단한 탐침을 이용하여 접촉하므로, soft-finger contact 으로 취급할 수 있다. 이 때의 접촉 지점은 contact centroid 라는 개념을 이용한다 [4].

Contact centroid,  $\mathbf{c}$  는 주어진 표면이 다른 물체와 접촉할 때, 그 표면 위의 한 점으로 접촉면 전체에 주어지는 힘의 합성력과 같은 힘  $\mathbf{f}$  와 그 힘에 수직인 토크  $\mathbf{m}$  을 가진 점이다. 이 점은 물체와 충돌 지점의 사이에 점 접촉이 일어났을 경우, 접촉 지점과 일치한다. 모델링을 위한 접촉점을 찾아내는 방법론을 사용하면 접촉으로 인한 물체의 변형을 최소화 되어 물체와 탐침 사이의 접촉을 그림 3 과 같이 점 접촉으로 가정할 수 있다 [2].

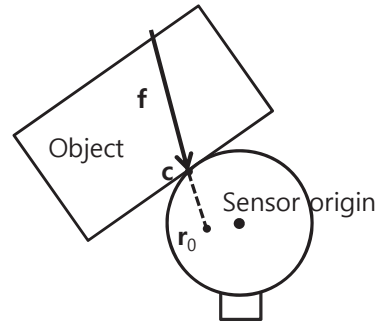
이 때의 접촉점은 다음의 점

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{f} \times \mathbf{m} / \|\mathbf{f}\|^2$$

을 통과하고 힘  $\mathbf{f}$  에 평행한 직선

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \lambda \mathbf{f}$$

이 탐침과 만나는 점  $\mathbf{c}$  이다. 이를 이용하면 단순히 탐침의 끝점을 접촉지점으로 사용하는 것에 비해 정확한 접촉점의 추적이 가능하다.



[그림 3] 점 접촉을 가정하였을 때의 접촉점 추적

#### 5. Pivot calibration

탐침은 햅틱 인터페이스의 말단에 위치한다. 햅틱 인터페이스의 말단, 즉 HIP 는 햅틱 인터페이스의 기구학적 지식과 인코더의 값을 이용하여 계산이 가능하며, 탐침의 위치는 여기에 탐침의 길이를 더하여 확인한다.

그러나 탐침의 정확한 길이를 알고 있어도 설치 과정에서의 불일치나 초기화 과정에서의 오차 등으로 인해 정확한 탐침의 위치를 확인하기 위해서는 추가적인 보정 작업을 거쳐야 한다.

그림 4 과 같이 탐침의 끝이 한 점에 고정되어 있다면 그 위 단의 햅틱 인터페이스의 위치와 상관 없이 탐침의 계산된 위치가 같아야 한다. 따라서 탐침을 한 점에서 고정시킨 상태에서 HIP 의 위치와 방향을 측정하여 다음 least square minimization 을 이용하면 원하는 햅틱 인터페이스의 끝단과 탐침 사이의 거리  $\mathbf{t}_{tip}$  을 구할 수 있다

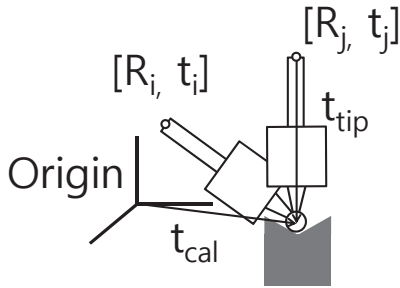
이 때 각각의 점  $i$  의 transformation  $\mathbf{F}_i = [\mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i]$  가 주어지고, 탐침이 고정된 위치  $\mathbf{t}_{cal}$  를 이라 할 때,

$$\mathbf{R}_i \mathbf{t}_{tip} + \mathbf{t}_i = \mathbf{t}_{cal}$$

의 관계가 성립한다. 이 중  $\mathbf{t}_{tip}$  과  $\mathbf{t}_{cal}$  의 6 개의 숫자가 미지의 수이다. 충분히 많은 수의 점이 있다면

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_0 & | & -\mathbf{I} \\ \dots & & \\ \mathbf{R}_n & | & -\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{tip} \\ \mathbf{t}_{cal} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{t}_0 \\ \dots \\ -\mathbf{t}_n \end{bmatrix}$$

이 성립하므로 pseudo inverse 를 구하여 미지수  $t_{tip}$  의 값을 구할 수 있다 [5]. 이를 통해 얻어지는 값은 구형 probe tip 의 중심점과 HIP 사이의 transform 이므로 이 점을 기준으로. 접촉 지점의 탐색을 수행할 수 있다. 초기  $t_{tip\_init}$  값 [0.0,-68.45] 가 주어졌을 때, 보정 결과,  $t_{tip}$  값은 [-2.0,-1.5639,-70.5473]으로 보정되었으며, RMSE 값이 3.3mm 에서 0.4mm 로 감소하였다.



[그림 4] Pivot calibration의 구성

6. 결과

개선 과정을 수행하면 힘 측정의 정확도를 향상시켜 점 접촉 시점의 정밀도를 향상 시키며, 접촉 지점의 정확도도 향상된다. 따라서 이 전체 정확도 향상은 모델링 결과물의 정확도를 통해 알 수 있다.

그림 5 와 같은 스펀지 공을 모델링 하였을 때, 광학 스캐너를 이용하여 모델링 한 결과에 비해서 다음과 같이 향상 되었다. 개선 이전의 시스템을 사용한 모델링의 경우 광학스캐너 모델로부터 4.21mm 의 Hausdorff distance 의 차이를 보였다. 그러나 개선 이후의 모델은 2.39mm 의 Hausdorff distance 를 보여 개선된 성능을 보여 주고 있다.



가) 스펀지 공      나) 보정 전      다) 보정 후

[그림 5] 모델링 대상 실제 물체와 그 결과

사사의 글

이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며 (No. 2011-0018641, 2011-0027953), 동시에 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 미래유망 융합기술 파이오니어 사업의 지원 (과제번호: 2011-0027995) 을 받아 수행된 연구이다.

참고문헌

[1] Seokhee Jeon and Seungmoon Choi, “Real Stiffness Augmentation for Haptic Augmented Reality,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 20, no. 4, pp. 337-370, 2011.

[2] Sunghoon Yim and Seungmoon Choi, “Shape Modeling of Soft Real Objects Using Force-Feedback Haptic Interface,” In *Proceedings of the IEEE Haptics Symposium*, pp. 479-484, 2012.

[3] 임성훈, 전석희, 최승문, “햅틱 증강현실을 위한 형태 모델 기반의 비균일 물체의 경도 변형”, 제 6 회 한국로봇종합학술대회 논문집, pp. 161-164, 2011.

[4] A. Bicchi, J.K. Salisbury, and D.L. Brock, , “Contact Sensing from Force and Torque Measurements”, *The International Journal of Robotics Research*, V01.12, no.3, 1993.

[5] T Haidegger, T Xia, P. Kazanides, Accuracy Improvement of a Neurosurgical Robot System, ” In *Proceedings of International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp. 836-841, 2008.