

구속 공간을 이용한 햅틱 암마스터의 제어

차삼곤*, 김종국*, 손원선*, 김진욱**, 송재복*, 고희동**

*고려대학교 기계공학과, **KIST IMRC

Control of a Haptic Arm Master by Using Intermediate Constraint Space

Sam-Gon Cha*, Jong-Kuk kim*, Won-Sun Sohn*,
Jin-Uk Kim**, Jae-Bok Song*, Hee-Dong Ko**

*Mechanical Eng., Korea Univ. **KIST IMRC

요 약

보다 현실감 있는 가상환경을 제공하기 위하여 시각정보 외에 힘의 정보를 사용자에게 제공할 필요가 있으며, 이러한 힘 반응은 햅틱장치에 의해서 수행된다. 일반적으로 영상 제시기에 의한 영상정보는 낮은 갱신율을 갖는 반면에, 햅틱장치는 상대적으로 높은 갱신율로 인간에게 힘정보를 제공하게 되므로, 이들 정보 간의 동기화가 중요하다. 본 논문에서는 가시모델의 원형을 일반화시켜서 햅틱장치에 전달하고, 영상 제시기의 갱신율과는 상관 없이 햅틱장치 내에서 위의 구속공간을 만들어서 피드백을 수행하는 방법에 대해서 논의하고자 한다.

Keyword: Haptic display, Haptic interface, Virtual environment, Virtual reality, Impedance control

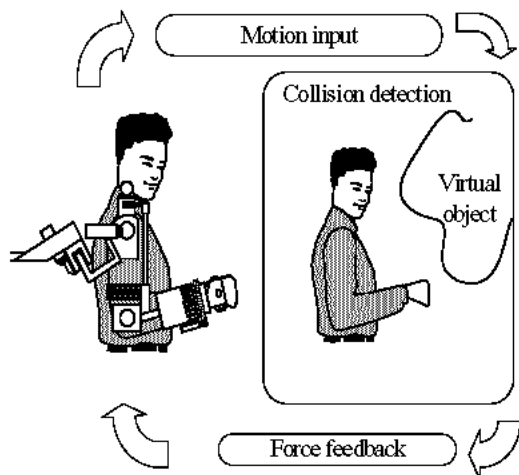
1. 서론

햅틱장치(haptic device)는 가상공간상에서 사용자에게 역감을 전달해 주는 장치이다. 가상공간상에서 역감을 제공하기 위하여 다양한 형태의 햅틱장치와 방법들이 연구되어 왔다.[1] 그러나 이러한 햅틱장치를 사용에 있어서 가장 큰 문제점 중의 하나는 가상현실 시스템의 낮은 갱신율로 인한 시스템의 불안정성을 들 수 있다.[2] 햅틱장치를 사용한 일반적인 제어흐름은 그림 1과 같이 높은 갱신율로 사용자의 움직임을 햅틱장치를 통해 추적하여, 가상현실상에서

의 움직임에 의해 발생하는 가상물체와의 접촉을 검사하고, 이에 의해 제시된 힘을 햅틱장치의 임피던스로 전환하여 전달하는 것이다. 이 경우, 사용자의 움직임을 추적하거나, 사용자에게 힘을 전달하는 작업은 높은 갱신율로 가능하나, 가상물체와의 접촉을 이용하여 접촉계산을 하는 과정에서의 갱신율은 상대적으로 낮게 된다.[3, 4]

이 경우, 햅틱장치는 사용자의 역구동성에 의해 정해진 제적을 크게 벗어나고, 이를 통해 불안정한 힘을 사용자에게 피드백하게 된다. 이러

한 이유로, 그래픽 처리와는 독립적으로 별도의 접촉검사를 햅틱장치 내부의 연산처리를 통해 이를 처리하도록 하는 방법을 제안하고자 한다.[3]



[그림 1] Conventional method of force reflection in virtual environment

2. 햅틱 암마스터

KU-HAM(Korea Univ. - Haptic Arm Master)은 사용자 팔의 위치, 속도를 측정하여 가상환경에 전달하고, 가상환경에서 발생한 힘과 토크 정보를 액추에이터의 제어를 통해서 사용자에게 전달해 주는 역할을 수행하는 햅틱 장치이다.

그림 2에서 보는 바와 같이 KU-HAM는 어깨 3자유도, 팔꿈치 1자유도 및 손목 1자유도를 갖는 5자유도 햅틱장치이다. 바닥고정식으로 구성되어 있어서 대부분의 무게를 받침대가 부담하므로 사용자가 느끼는 무게는 최소화된다. 힘 피드백이 수행되지 않을 때에는 사용자는 어깨, 팔꿈치, 손목 등을 비교적 자유로이 움직일 수 있다. 그러나 가상환경에서 사용자의 팔에 제시하여야 되는 힘이 주어지면 5자유도에 해당하는 5개의 모터가 적절히 제어되면서 사용자의 손에 가상환경의 힘 정보를 정확히 제시하게 된다. [5, 6]

KU-HAM은 외골격 형태로 제작되어 사람의 팔과 직접 접촉하여 움직이게 되며, 각 축의 모터에 장착된 높은 분해능의 엔코더를 통해 각 모터의 움직임을 구할 수 있다. 햅틱 암마스터

의 내부 프로세서인 DSP(digital signal processor)에서는 이를 이용하여 기구학 해를 구하여 정확한 작용점의 좌표를 계산한 다음에 디바이스 서버에 전달한다. 또한, 햅틱 암마스터는 사용자가 단단한 벽에 접촉한다는 느낌을 줄 수 있도록 15N의 힘을 연속적으로 제공할 수 있는 능력을 갖고 있다.



[그림 2] KU-HAM

이러한 제어를 위해서 햅틱 암마스터가 가지는 힘의 분해능과 각 축의 각도 분해능은 표 1과 같다.

[표 1] Position and torque resolutions of KU-HAM.

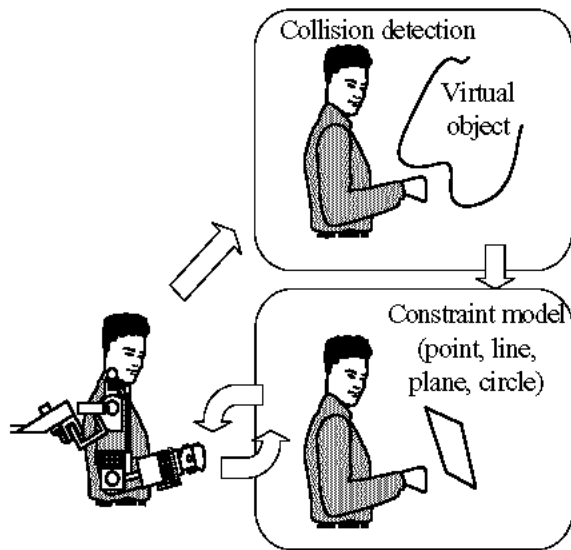
Joint	Axis	Torque	Position
Shoulder	1	0.108 Nm	0.0065°
	2	0.072 Nm	0.0097°
	3	0.044 Nm	0.0161°
Elbow	4	0.044 Nm	0.0161°
Wrist	5	0.060 Nm	1.9850°

3. 모델정보의 처리

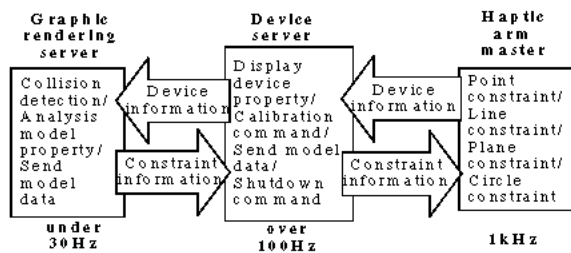
앞서 말한 바와 같이 영상 제시기의 낮은 갱신율로 인해 힘피드백이 제대로 수행되지 않으므로, 가상 모델을 적절한 수준의 원형 모델로 바꾸어 주어야 할 필요성이 있다. 일반적인 접촉의 경우, 단순히 면을 이용하여 단순화하는 것이 가능하다.[2] 그러나 햅틱 암마스터의 경우, 물체를 쥐고 그 물체의 가상환경 내에서의 구속에 의해 궤적이 정해지는 경우도 있으므로, 이에 대한 추가적인 모델정보를 구현해야 할 필요가 있다. 가상현실에서 기본적으로 가상물체의 접촉을 위해, 가상면을 정의하고, 물체를 쥐고, 움직이는 경우를 가정하여, 선, 원 등을

추가로 모델링하였다. 또한, 햅틱 암마스터가 가상현실 내에서 한 점에 구속되어야 할 필요성이 있으므로 이에 대해 점 구속에 대해서도 모델링하였다. 그림 3과 같이 가상현실에서의 가상물체에 대한 이러한 정보를 햅틱장치 내의 제어부가 받아서, 이를 사용자에게 힘 피드백해 주도록 하였다.

이러한 모델링을 통해, 암마스터 내부의 DSP를 이용하여, 이에 대한 모델정보를 처리하도록 하여, 그림 4와 같은 과정에 의해 1kHz의 높은 갱신율로 암마스터를 제어하게 된다.



[그림 3] Intermediate representation of virtual environment by using constraint model



[그림 4] Update rate of virtual environment by using constraint model

4. 구속공간

그래픽 렌더링 서버를 통해 제공되는 가상물체는 물체를 나타낼 수 있는 최소한의 정보만

이 햅틱장치를 제어하는 디바이스 서버로 전달된다. 그래픽 렌더링 서버에서 디바이스 서버로 전달되는 가상물체는 그래픽 렌더링 서버의 좌표계에 의해서 기술된다. 이러한 가상물체의 좌표는 디바이스 서버에서 햅틱장치의 좌표계로 변환되어야 한다.

햅틱장치의 엔드이펙터(KU-HAM의 경우에는 손잡이)에 설정된 발단점을 햅틱장치의 작용점(사용자의 손의 위치에 해당)이라 정의하자. 구속되지 않은 가상공간에서는 사용자가 팔의 운동을 통해서 햅틱장치의 작용점을 6자유도(직선 3자유도 및 회전 3 자유도)로 자유로이 움직일 수 있다. 그러나 가상공간에서 손의 운동이 제한되는 경우가 발생한다. 첫째, 사용자의 손과 가상물체와의 접촉이 발생하는 경우이다. 예를 들어, 사용자의 손이 가상물체와 접촉하여 물체 안으로 들어가는 경우에 사용자의 손에는 반력이 작용하게 되어, 실제 공간에서 물체를 누를 때와 같은 경험을 하게 된다. 이러한 반력은 햅틱장치에 설치되어 있는 액츄에이터의 적절한 제어에 의해서 수행된다. 또한, 사용자의 손이 가상물체 표면을 움직이면서 실제와 같은 마찰력을 경험할 수도 있다.

둘째, 사용자의 손이 가상공간상에서 정해진 궤적에서만 운동하도록 허용되는 경우이다. 예를 들어, 가상환경에서 운전운 하는 상황을 고려하여 보자. 가상공간에서 자동차의 조향휠을 잡고 조향동작을 수행한다면, 사용자의 손은 조향휠에 의해서 정의되는 원궤적 상에서만 움직이도록 구속된다. 이 때 실제로 조향휠을 잡고 있는 것이 아니므로 사용자의 손은 조향동작 중에 원궤적을 벗어날 수 있는데, 이 때는 사용자의 손을 구속된 원궤적으로 복원시키는 힘이 햅틱장치에서 발생하여 햅틱장치의 작용점을 지정된 궤적으로 유지하게 된다. 본 연구에서는 주로 두 번째 경우에 대하여 어떻게 햅틱장치를 제어할 것인지에 대한 연구를 수행하였다.

4.1 가상점 구속

가상공간 상에 어떤 특정한 구속점을 고려하여 보자. 즉, 사용자의 손(따라서 햅틱장치의 작용점)이 이 구속점에서 벗어나면, 손을 구속점으로 복원시키려는 복원력이 햅틱장치에서 발생되어, 사용자의 손은 구속점으로 자연스럽게

이동하게 된다. 이 때 안정성을 위하여 사용자의 손에 너무 큰 힘이 가해지지 않도록 적절한 복원력만을 제공하게 된다. 우선 사용자 손의 위치벡터를 x , 원하는 구속점의 위치벡터를 c 라 하면, 작용점과 구속점 간의 오차 e 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = c - x \quad (1)$$

이 때, 위치벡터와 오차벡터는 모두 x, y, z 축의 3성분을 갖게 된다. 사용자의 손이 구속점에서 벗어나면 벗어난 정도에 비례한 복원력이 작용하게 되는데, 복원력은 다음 식에 의해서 계산된다.

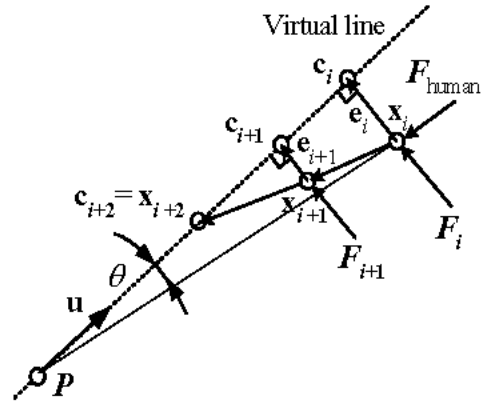
$$F = K_c e + B_c \dot{e} \quad (2)$$

여기서, K_c 와 B_c 는 제어 이득을 나타내는 행렬이다. 이 때, 비례제어에 해당하는 첫째 항만을 구현하면, 복원력의 크기가 갑작스럽게 변화할 수 있으므로, 미분제어에 해당하는 둘째 항을 첨가하여 간섭을 줄으로써 복원력의 변화량을 안정적으로 감소시키게 된다. 이는 사용자의 손이 구속점에서 크게 벗어나는 경우에 오차에 비례하는 너무 큰 힘을 주면 안정성의 문제가 발생할 수 있으며, 사용자에게 불편감을 주기 때문이다.

4.2 가상선 구속

가상선 구속의 경우에는 사용자의 손(작용점)이 구속선상에서는 자유롭게 운동할 수 있지만, 이 선을 벗어나면 현재의 작용점에서 가장 최단거리를 갖는 구속선상의 구속점으로 수렴하도록 한다. 그림 6의 상황을 고려하여 보자. 시간 i 에 손의 위치가 x_i 라 하면, 가상선에서 벗어나 있으므로 현재 위치에서 가상선의 최단거리에 해당하는 점 c_i 로 이동하도록 하는 복원력 F 가 햅틱장치에서 발생된다. 그러나 사용자의 손이 햅틱장치에 작용하는 힘 F_{human} 이 존재하므로 작용점은 바로 점 c_i 로 이동하지는 못하고 다음 샘플링 시간 $i+1$ 에 x_{i+1} 의 위치로 이동하게 된다. 그러면 이 시점에서 다시 최단거리에 해당하는 점 c_{i+1} 을 계산하게 되며 작용점을 이 구속점으로 보내려는 복원력이 발생하게 된다. 이

리한 과정을 거치면서 궁극적으로 몇 샘플링 주기 후에는 작용점이 원하는 가상선 위에 놓이게 되며, 이 가상선 상에서 이동하게 된다.



[그림 6] Constraint in virtual line

이제 주어진 가상선으로부터 구속점의 위치를 계산하고, 복원력을 구하는 과정을 살펴보기로 한다. 그림 6에서와 같이 구속선이 점 $P(p_x, p_y, p_z)$ 를 통과하며, 단위벡터 $u = [u_x, u_y, u_z]^T$ 에 방향이 결정된다고 하자. 햅틱장치의 작용점의 위치벡터를 x , 작용점에서 가장 최단거리를 갖는 가상선상의 점의 위치벡터를 c 라 하면, 가상선상의 구속점 c 의 위치벡터는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$c = s u + p \quad (3)$$

여기서 s 는 점 P 로부터 구속점 c 까지의 거리를 나타낸다. 한편, 구속점은 작용점에서 최단거리를 가지므로 다음 관계식이 성립된다.

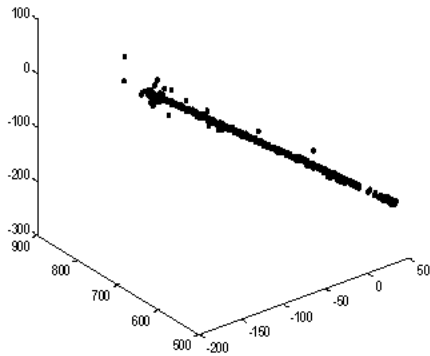
$$u \cdot (c - x) = 0 \quad (4)$$

식 (3)와 (4)로부터 s 는 다음과 같이 계산된다.

$$s = \frac{u \cdot (x - p)}{|u|^2} \quad (5)$$

식 (3)에서 구속점의 위치가 결정되므로 식 (1)에 의해서 오차벡터가 계산되고, 식 (2)로부터 작용점을 구속점으로 보내는 복원력이 산출된다.

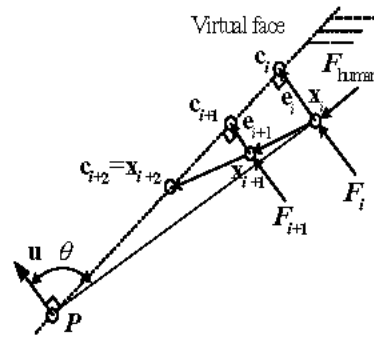
그림 7은 KU-HAM의 강성계수는 2000 N/m, 감쇠계수와 300Ns/m으로 두고, 1kHz의 생신율로 제어한 경우의 궤적을 나타낸다. 이에 대한 평균적인 오차는 약 3.6mm를 나타내었다.



[그림 7] Constraint on virtual line

4.3 가상면 구속

가상공간 상에 어떤 특정한 면을 구속할 경우 사용자의 손이 정의된 면의 윗방향으로는 자유롭게 움직일 수 있지만 아랫방향으로는 그 면을 뚫고 지나가지 않도록 구속해 주어야 한다. 그리고, 면에 대해 구속이 필요한 경우에 손이 면에서 벗어난 위치에서 최단거리를 갖는 구속선상의 구속점으로 수렴하도록 한다. 그림 8의 경우와 같이 시간 i 에서 손의 위치가 x_i 라 하면, 가상면에서 벗어나 있으므로 가상선에서의 경우와 같이 복원력 F 가 작용하며, 역시 사용자의 손이 햅틱장치에 작용하는 힘 F_{human} 에 의해 작용점은 바로 c_i 로 이동하지 못하고 다음 샘플링 시간 $i+1$ 에 x_{i+1} 의 위치로 이동하게 된다. 다음 시점의 샘플링 시간 $i+1$ 에서 x_{i+1} 의 위치로 이동하게 되며, 반복된 계산을 통해 최종적으로 구속면으로 이동하게 된다.



[그림 8] Constraint on virtual plane

이제 주어진 가상면으로부터 구속점의 위치를 계산하고, 복원력을 구하는 과정을 살펴보기로 한다. 평면은 평면에 속하는 한 점과 평면의 법선 벡터에 의해 정의될 수 있다. 햅틱장치의 작용점과 평면 사이의 최단점을 구하기 위해서는 햅틱장치의 작용점과 최단점을 연결하는 벡터는 평면의 법선 벡터와 평행이라는 조건과 최단점은 평면에 속하는 점이라는 조건을 이용하여 구할 수 있다. 그림 8에서와 같이 햅틱장치의 작용점의 위치벡터를 x 라고 하고, 작용점과의 최단거리를 갖는 평면상의 구속점의 위치벡터를 c , 평면상의 한 점 P 의 위치벡터를 p , 평면의 법선 벡터를 $N=[n_x, n_y, n_z]^T$ 이라고 하면, 다음 식이 성립된다.

$$c = -sN + x \quad (6)$$

여기서 s 는 햅틱장치의 작용점 x 로부터 구속점 c 까지의 거리를 나타낸다. 한편, 구속점은 작용점에서 최단거리를 가지므로 다음 관계식이 성립된다.

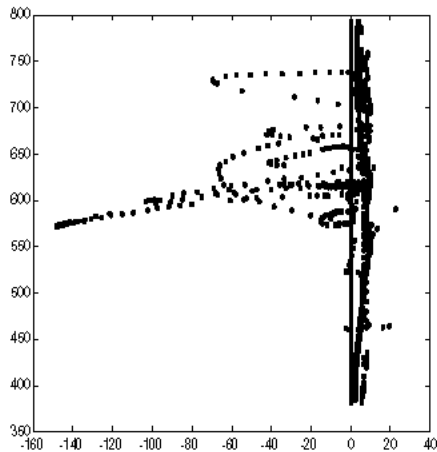
$$s = |x - p| \cos \theta \quad (7)$$

이 식에서 $\cos \theta$ 가 의미하는 것은 법선 방향에 대해 $(x-p)$ 를 투영시켰을 때의 길이를 구하기 위한 값이며, 다음과 같은 식에 의해 $\cos \theta$ 를 구할 수 있다.

$$\cos \theta = \frac{N \cdot (x - p)}{|N| |(x - p)|} \quad (9)$$

역시 식 (6)에서 구속점의 위치가 결정되므로 식 (1)에 의해서 오차벡터가 계산되고, 식 (2)로부터 작용점을 구속점으로 보내는 복원력이 산출된다.

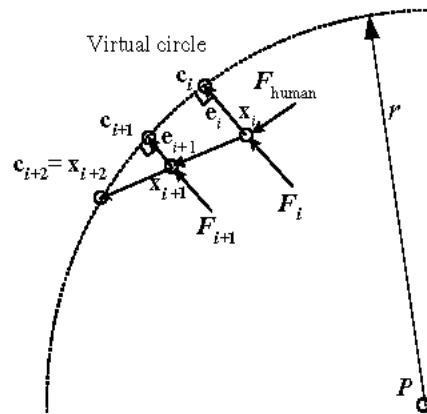
그림 9는 2000 N/m의 강성계수 300 Ns/m의 감쇠계수를 가지는 $x - 0$ 인 면을 기준으로 가상벽을 만들었을 때의 KU-HAM의 궤적을 나타낸 것이다. 평균적인 오차는 7.34mm로 사용자는 가상벽을 약 15N의 힘으로 밀고 있음을 알 수 있다.



[그림 9] Constraint on virtual plane

4.4 가상원 구속

다음으로 구하고자 하는 것은 가상공간 상에 어떤 특정한 원을 구속할 경우이다. 이 경우 사용자의 손이 구속원 상의 원주 방향으로만 자유롭게 운동할 수 있지만, 지름 방향으로만 이동할 수 없다. 이 경우, 손이 원주상의 점에서 벗어난 위치에서 최단거리를 갖는 구속선상의 구속점으로 수렴하도록 한다. 그림 10의 경우와 같이 시간 i 에서 손의 위치가 x_i 라 하면, 가상원에서 벗어나 있으므로 위의 가상선이나 가상면과 같이 복원력 F 가 작용하며, 역시 사용자의 손이 햅틱장치에 작용하는 힘 F_{human} 에 의해 작용점은 바로 c_i 로 이동하지 못하고, 다음 샘플링 시간 $i+1$ 에 x_{i+1} 의 위치로 이동하게 된다. 다음 시점의 샘플링 시간 $i+1$ 에서 x_{i+1} 의 위치로 이동하게 되며, 반복된 계산을 통해 최종적으로 가상원으로 이동하게 된다.



[그림 10] Constraint on virtual circle

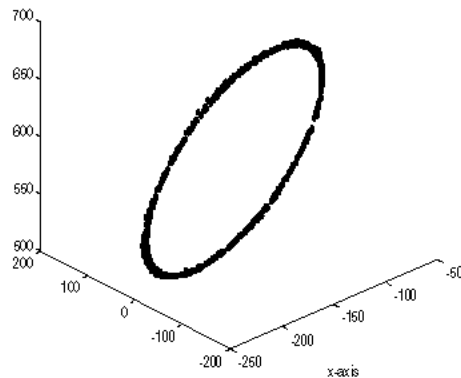
가상원에서 주어진 구속점의 위치를 계산하고, 이에 대한 복원력을 구하는 경우에 다음과 같은 과정을 거치게 된다. 우선 구속원상의 점에 대해서는 평면을 정의하고 그 평면의 한 점에서 일정한 거리를 가지는 점에 의해 정의될 수 있다. 우선 원주상에 속한 구속점 c 를 구하기 전에 햅틱장치의 작용점과 평면 사이의 최단점을 구해야 한다. 이는 이미 4.3절에서 설명하였으며 이 값을 그대로 이용하여 구속원에서의 구속점의 위치를 계산하도록 한다. 그림 10에서와 같이 햅틱장치의 작용점의 위치벡터를 x 라고 하고, 작용점과의 최단거리를 갖는 평면상의 구속점의 위치벡터를 c , 평면상의 한 점이 며, 원의 중심인 P 의 위치벡터를 p , 평면의 법선 벡터를 $N=[n_x, n_y, n_z]^T$, 그리고 정의된 원의 반지름을 r 이라고 하면 세로이 정의되는 가상원 상에서 구속점인 c' 는 다음과 같이 정의된다.

$$c' = \frac{c - p}{|c - p|} r \quad (10)$$

이는 점 P 와 가상면에 의해 구해진 구속점 c 의 값이 P 에서부터 항상 일정한 거리 r 만큼의 거리를 유지하도록 하기 위한 식이다.

역시 식 (10)에서 구속점의 위치가 결정되므로 식 (1)에 의해서 오차벡터가 계산되고, 식 (2)로부터 작용점을 구속점으로 보내는 복원력이 산출된다.

이를 통해, 햅틱장치를 제어하여 그림 11과 같은 결과를 얻었다. 100mm에 해당하는 시점에 대해 2000 N/m의 강성계수 값과 300Ns/m의 감쇠계수 값으로 원래적에 대한 평균적인 추종 오차를 7.94mm로 제어할 수 있었다.



[그림 11] Virtual circle constraint 1khz

5. 결론

햅틱장치를 제어하기 위해 사용자의 역구동성으로 인한 제어의 불안정성을 최소화하기 위해서, 그래픽 렌더링 서버에서의 낮은 갱신율이 아니라, 그래픽 렌더링 시비에서의 최소 모델정보에 의한 높은 갱신율을 가지는 햅틱장치내부의 연산장치를 중심으로 햅틱장치를 제어하였다. 이러한 과정을 햅틱장치의 제어력을 높였으며 사용자에게 구속력을 제공하여, 가상환경상의 물체의 구속(constraint)정보를 사용자에게 전달하는 것이 가능하다.

후기

본 연구는 감성공학 기반기술 개발 사업의 일부로 한국과학기술연구원의 지원하에 수행되었다.

6. 참고문헌

- [1] Burdea G., "Force and Touch feedback for Virtual Reality", A Wiley-Interscience Publishing, 1996.
- [2] Hannaford B., Jee-Hwan Ryu, "Time-Domain Passivity Control of Haptic Interfaces", Robotics and Automation, IEEE Transactions on, Volume 18 Issue 1, Feb., pp. 1-10, 2002.
- [3] Adachi Y., Kumano T., Ogino K., "Intermediate Representation for Stiff Virtual Objects", Virtual Reality Annual International Symposium, 1995. Proceedings. pp 203-210, 1995.
- [4] 김종국, 박창준, 송재복, 고희동, "가상환경을 위한 햅피드백 제시기의 모듈 인터페이스 개발", 한국감성과학회 춘계학술대회 2001.
- [5] 민두기, 정용철, 송재복, 김용일, "관운동감 제시기의 개발 및 능동 임피던스의 구현", 한국 정밀 공학회 추계학술대회논문집, pp. 68-71. 1999.
- [6] 민두기, 권태용, 류동석, 정의정, 송재복, "가상환경을 위한 햅틱 암마스터의 개발", 대한 기계학회 동역학 및 제어부분 하계 학술대회 논문집, pp. 343-347, 2000.