

가변형 박판에 대한 촉감 제시

Haptic Display for Deformable Thin Film

이 승 룡, 최 혁 렬**

*성균관대학교 기계설계학과 (Tel: 0331-290-7481; E-mail: beetle@chollian.dacom.co.kr)

**성균관대학교 기계공학부 (Tel: 0331-290-7449; E-mail: hrchoi@yurim.skku.ac.kr)

Abstracts This paper presents the haptic rendering algorithm which gives the feel information to the operator by manipulating a virtual tool with a haptic device in the simulated environment. The movement of a virtual tool grasped by the operator, which is modeled as a square is displayed in the graphic screen of a computer and the virtual environment is modeled as deformable thin film. When the tool contacts with the virtual environment, the operator is forced to feel the contact and the feature of the deformed virtual environment through the torque control of the haptic device. Contact situations are modeled as close as to the reality considering friction, elasticity and multiple contacts. Several experiments are conducted and the effectiveness of the proposed algorithm is confirmed.

Keywords Haptic display, Thin film, Contact, Deformable surface

1. 서론

현재까지 컴퓨터 그래픽스의 발전은 가상 환경상에서 다채로운 시각적 이미지를 표현할 수 있도록 여러 기술들을 제시하고 있다. 특히, 가상 공간상에서 설정된 모델들 사이에 접촉과 충돌을 포함한 상호 작용을 표현하기 위하여 많은 연구들이 진행되고 있다. Lin과 Canny는 돌출한 3차원 모델들 사이에 최근접점을 찾는 알고리즘을 제시하여 가상 환경상에서 물체사이의 상호 작용을 표현하는 효과적인 방법에 대하여 연구하였으며[1], Ponamgi등은 가상 환경상에서 여러 가지 기하적 모델들 사이에 접촉의 결정과 충돌 인식에 대한 효율적인 알고리즘을 연구하였다[2]. 이러한 연구들은 대체로 시각적 이미지의 표현에 중점을 두고 진행되어 왔다고 할 수 있으며, 실제와 같은 시각적 이미지는 조작자가 자신이 조작하는 환경을 인식하는 데 있어서 매우 효율적일 것이다. 그러나 예를 들어 블록을 조립하거나 peg-in-hole 작업과 같이 상호 작용을 포함한 가상 환경에서의 작업에서는 모서리와 면 사이의 미끄럼, 충격, 굴림 등과 같은 여러 가지 상호 운동이 존재하는데 이를 단지 시각적 이미지로만 표현한다면 조작자가 가상 환경을 인식하는 데 있어 현실과 많은 차이를 느낄 것이다. 그러므로, 힘 혹은 촉감의 감지 및 제시(display)는 가상 모델사이에서의 상호 작용을 인식하기 위한 가장 중요한 정보라 할 수 있으며 이에 관하여 다양한 연구가 진행되어 왔다. Ouh-young 등은 물질의 분자 구조를 조작할 수 있는 6-D 힘제시 시스템을 개발하여 시각 이외에 역각의 중요성을 강조하였고[3], Iwata는 스투어트 플랫폼(Stewart platform)을 이용하여 힘을 제시할 수 있는 시스템을 개발하였다[4]. Kotoku등은 모델 환경에서 가상적인 다면체를 조작할 경우 구속력을 생성하는 방법을 제시하였고[5], 이승룡등은 보다 현실감있는 감각의 전달을 위하여 마찰을 포함한 다면체 접촉의 경우에 적용할 수 있는 알고리즘을 제안하였다[11]. 그밖에 Fisher등은 Head-Mounted Display(HMD)와 Glove-like Tactile Input Device(Data Glove)를 사용한 시스템을 제안하였고[6], Tanie 등에 의해서 3차원 모델의 형상을 4축 암(arm)을 통해 반력으로 느낄 수 있는 장치가 제시되기 까지 여러

방법과 알고리즘이 논의되어 왔다[7]. 역각 및 촉각 제시(force feel and tactile perception display)에 관한 기술은 가상 현실 시스템에 적용될 수 있을 뿐 만 아니라, 오프라인 교시 시스템(off-line teaching system)등에도 폭넓게 응용될 수 있다[8].

힘제시 시스템은 제어된 힘을 조작자에게 전달할 수 있는 electro-mechanical system인 haptic device와 정해진 형태와 고유의 물성치를 가지고 수학적으로 표현할 수 있는 object model, 가상 환경에서 조작자가 haptic device를 조작하여 가상 물체를 움직일 때 가상 환경과의 상호 작용을 real-time으로 계산하는 haptic rendering algorithm 세 가지로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 조작자와의 상호작용력에 따라서 변형하는 얇은 가상 물체를 가상 도구를 가지고 조작할 때 이의 조작감을 제시할 수 있는 haptic rendering algorithm을 제안한다.

먼저 haptic display의 과정을 살펴보면 가상 물체는 다면체 형상으로 모델링되어 조작자가 움직이는 데 따라 컴퓨터의 모니터를 통하여 나타나게 되며 가상 물체가 화면상에 설정된 가상 환경과 접촉하였을 때, 조작자는 haptic device의 제어를 통하여 가상 환경의 형상과 가상 환경과의 접촉을 인식하게 된다. 접촉시 반력을 결정하는 것은 물체가 가상 환경인 벽면에 합입된 합입량인 데, 예를 들어 접촉하는 물체가 얇은 박판일 경우 합입량이 박판의 두께보다 클 수도 있다. 이와 같은 경우에 기존의 알고리즘(vector field method)으로는 합입량의 결정에 대한 기준이 모호해지므로 문제가 될 수 있다. Zilles와 Salisbury는 God-object method를 제시하여 기존 알고리즘의 문제점을 해결하려 하였고, 이 방법이 얇은 물체에서도 적용이 가능하다고 주장하고 있다[9]. 그러나 이 방법은 접촉되는 물체가 곡면일 경우 이것을 삼각형의 면이 조합된 것으로 근사화하였는데 이 때 구속 조건으로 쓰인 면의 방정식을 어떻게 구하는가에 문제가 있었다. 본 연구에서 제안하는 알고리즘은 접촉하는 물체의 면이 두께에 상관없이 접촉한 후 변형된 곡면이 다른 다면체의 조합이 아닌 폐곡선으로 둘러싸인 면 그 자체라고 보고 해석한다. 이 면에 조작자가 조작하는 물체가 접촉되었을 때, 접촉되는 물체의 두께와 합입량의 관계에는 무관하게 변형하며 반력을 나타낼 수 있도록 하였으며

로 제안된 알고리즘은 가상 환경상의 물체가 어떤 두께를 가지더라도 haptic display를 할 수 있다는 것을 보여 주게 될 것이다.

실험을 통하여는 3자유도 스카라 로봇을 haptic device로 사용하여 가상 공간에서 도구를 조작하고, 계산된 힘을 얻게 되는 작업을 수행하게 된다. 실험의 결과로부터, 제안된 알고리즘은 조작자가 접촉의 상태를 현실적으로 느낄 수 있고, 시스템이 감지된 힘을 고감도로 표현하는 데 효과적으로 작동한다는 것을 보여 주게 될 것이다.

2. 접촉의 인식

본 연구에서는 벽면을 제외한 모든 도구를 강체로 가정한다. 먼저, 접촉의 유무를 파악하기 위하여 점과 점 사이의 근접 거리를 계산하여 접촉을 인식하도록 하였다. 접촉이 인식되면 접촉의 종류에 따라 반력을 계산할 수 있게 되며 이를 바탕으로 haptic device의 제어를 하게 된다. 가상 도구는 2차원 모델로 가정하므로 접촉은 점과 면, 면과 면의 경우로 구분할 수 있으며 점과 면의 접촉을 기본 접촉으로 고려하며 그 밖의 복잡한 접촉 형태는 이의 조합으로 표현한다.

2.1 접촉의 정의

접촉 인식의 기본 개념은 다음의 식에 의해 나타내어 질 수 있다.

$$d_{SO} = \min | {}^V \mathbf{p} - {}^V \mathbf{q} |, \quad {}^V \mathbf{p}, {}^V \mathbf{q} \in R^3 \quad (1)$$

여기에서, 그림 1 (a)에 보여진 것과 같이 상점자 V 는 가상 공간의 기준 좌표계 \sum_V 에 기준한 좌표임을 나타내고 d_{SO} 는 물체 E와 T사이의 가장 짧은 유클리디언 거리(Euclidean distance)이며, ${}^V \mathbf{p}$ 와 ${}^V \mathbf{q}$ 는 물체 E와 T에 있는 점을 나타낸다. 즉 두 물체의 모든 점과 점 사이의 거리를 계산하여 기준 거리 이내에 들어오면 접촉으로 간주하게 되며 이 때, 가장 짧은 거리를 갖는 점을 찾아서 접촉 유무를 판별하여야 한다. 원과 같은 경우는 가장 짧은 거리를 유지할 수 있는 점이 항상 하나이지만, 다각형의 경우는 변할 수 있으므로 두 물체가 상대적인 위치를 바꿀 때마다 확인해야 한다. 이것은 매우 계산 시간을 많이 요구하는 문제이므로 보다 효율적인 방법으로 그림 1 (b)에 보여진 것과 같이 도구의 주변에 근접점 확인 영역을 설정하고, 이 영역 안에 다른 물체가 들어오면 그 때부터 근접점을 확인하게 하는 방법을 적용하였다.

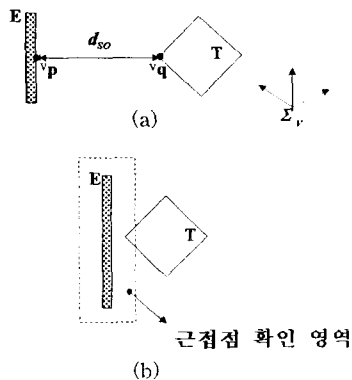


그림 1. 근접 거리 계산과 근접점 확인 영역

Fig. 1. Calculation of the shortest distance and checking region of the closest point

2.2 접촉의 구분

그림 2에 접촉의 경우가 나타나 있다. 여기서 P는 환경 E와 접촉되는 물체 T(가상 도구라고 생각할 수 있다)의 접촉점이다. 이와 같이 벽면에 가상 도구의 한 점이 접촉한 경우를 기본 접촉(basic contact)이라고 부른다.

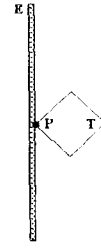


그림 2. 기본 접촉의 경우

Fig. 2. Case of the base contact

물체의 한 면이 벽면에 접촉하는 경우가 생기는데 이와 같은 경우에는 앞에서 설명한 기본 접촉의 조합으로 해석할 수 있다. 그림 3에서 점 A와 점 B는 각각 기본 접촉이라고 가정하고 면과 면의 접촉은 이와 같이 기본 접촉의 조합으로 표시할 수 있다. 여기서 \mathbf{f}_A 와 \mathbf{f}_B 는 환경으로부터 물체에 작용하는 반력을 나타낸다.

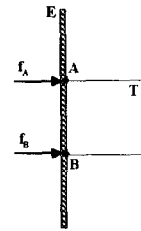


그림 3. 기본 접촉의 조합을 통한 면접촉의 해석

Fig. 3. Analysis of face-face contact through combination of basic contact

3. 접촉시 상호 작용력의 계산

접촉되는 환경이 얇은 박판이라고 가정하고 이 환경이 도구와 접촉하여 발생하는 접촉력에 의하여 변형된다고 할 때 상호 작용력을 계산하여 보자.

3.1 운동 방정식

그림 4는 가상 도구가 환경과 접촉하여 접촉력을 발생시키고 이에 따라 환경이 변형하였을 때에 상호 작용하는 힘들을 보여준다.

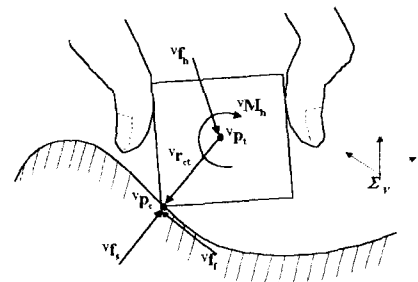


그림 4. 가상 도구에 작용하는 상호 작용력의 해석

Fig. 4. Analysis of interaction forces applied to virtual tool

여기에서 ${}^V \mathbf{p}_t = [x_t, y_t, z_t]^T \in R^3$ 는 가상 공간에서 가상 도구의 중심 좌표이다. 또한 ${}^V \mathbf{f}_h = [f_{hx}, f_{hy}, f_{hz}]^T \in R^3$ 는 조작자가 주는 외력을 나타내고 ${}^V \mathbf{f}_s = [f_{xs}, f_{ys}, f_{zs}]^T \in R^3$ 는 박판으로부터의 반력을 나타내며 ${}^V \mathbf{f}_t = [f_{xt}, f_{yt}, f_{zt}]^T \in R^3$ 는 박판과 가상 도구사이의 마찰력을 나타낸다. ${}^V \mathbf{r}_{ct} \in R^3$ 는 점 ${}^V \mathbf{p}_t$ 와 점 ${}^V \mathbf{p}_c$ 를 연결한 벡터를 나타내고 가상 도구와 박판의 접촉점은 ${}^V \mathbf{p}_c = [x_c, y_c, z_c]^T \in R^3$ 로 나타낸다. 이 때 가상 도구에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{F} = {}^V \mathbf{f}_s + {}^V \mathbf{f}_t + {}^V \mathbf{f}_h = m_t {}^V \ddot{\mathbf{p}}_t \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{M} = \mathbf{I} \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega}) = {}^V \mathbf{r}_{ct} \times ({}^V \mathbf{f}_s + {}^V \mathbf{f}_t) + {}^V \mathbf{M}_h$$

여기에서 $\mathbf{I} \in R^{3 \times 3}$ 는 가상 도구의 inertia tensor를 나타내고 $\boldsymbol{\alpha} \in R^3$ 는 각가속도, $\boldsymbol{\omega} \in R^3$ 는 각속도, m_t 는 가상 도구의 질량, ${}^V \mathbf{M}_h \in R^3$ 는 조작자가 주는 모멘트를 나타낸다.

마찰의 효과는 정마찰 (static friction)과 동마찰 (dynamic friction), 두 가지로 나누어 생각할 수 있으며 정마찰에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며[10]

$$\| {}^V \mathbf{f}_{ct} \| \leq \mu_s \| {}^V \mathbf{f}_s \|, \quad \| {}^V \dot{\mathbf{p}}_t \| = 0 \quad (3)$$

$$\| {}^V \mathbf{f}_{ct} \| = \| {}^V \mathbf{f}_{ct} \|^*$$

또한 동마찰에 대한 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\| {}^V \mathbf{f}_{ct} \| > \mu_s \| {}^V \mathbf{f}_s \|, \quad \| {}^V \dot{\mathbf{p}}_t \| > 0 \quad (4)$$

$$\| {}^V \mathbf{f}_{ct} \| = \mu_d \| {}^V \mathbf{f}_s \|^*$$

여기에서 ${}^V \mathbf{f}_{ct}$ 는 접촉점 ${}^V \mathbf{p}_c$ 에서 접선 방향의 힘을 나타내고, μ_s 는 정마찰 계수 (static friction coefficient), μ_d 는 동마찰 계수 (dynamic friction coefficient)를 나타낸다.

3.2 곡면상의 접촉력 계산

접촉력에 의하여 변형하였을 때 환경은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\phi(x, y, z) = 0 \quad (5)$$

환경과의 접촉점 ${}^V \mathbf{p}_c = [x_c, y_c, z_c]^T \in R^3$ 에서 법선 벡터를 구하면 $\nabla \phi({}^V \mathbf{p}_c)$ 이 되고 이 방향의 단위벡터 $\hat{\mathbf{n}}_c$ 를 구하면

$$\hat{\mathbf{n}}_c = \frac{\nabla \phi({}^V \mathbf{p}_c)}{\| \nabla \phi({}^V \mathbf{p}_c) \|} \quad (6)$$

을 얻을 수 있다. 또한 반 법선 벡터는 $-\hat{\mathbf{n}}_c$ 라고 할 수 있으며, 이 방향으로의 힘은 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^V \mathbf{f}_{cn} = -({}^V \mathbf{f}_t \cdot \hat{\mathbf{n}}_c) \hat{\mathbf{n}}_c \quad (7)$$

이 때 ${}^V \mathbf{f}_{cn}$ 은 곡면상에 수직으로 작용하는 힘벡터를 나타내며 ${}^V \mathbf{f}_{ct}$ 는 곡면 상에서 접선방향으로 작용하는 힘이라고 할 때 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^V \mathbf{f}_{ct} = {}^V \mathbf{f}_t - {}^V \mathbf{f}_{cn} \quad (8)$$

그림 5에서 도구상의 접촉점을 ${}^V \mathbf{p}_h = [x_h, y_h, z_h]^T \in R^3$ 라 하면, 이 때 곡면상의 접촉점 ${}^V \mathbf{p}_c$ 와 이루는 벡터

${}^V \mathbf{p}_{hc} = [x_{hc}, y_{hc}, z_{hc}]^T \in R^3$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^V \mathbf{p}_{hc} = {}^V \mathbf{p}_h - {}^V \mathbf{p}_c \quad (9)$$

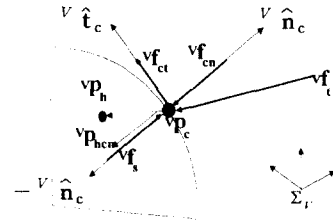


그림 5. 곡면 상에서의 벡터 해석

Fig. 5. Vector Analysis on the curved surface

즉 ${}^V \mathbf{p}_{hc}$ 의 부호에 따라 접촉이 어느 방향에서 일어났는지 알 수 있는 데 이로 인해 접촉의 방향성을 나타낼 수 있으며 이는 박판에서 합입량에 상관없이 반력을 줄 수 있도록 하여 준다.

${}^V \mathbf{p}_{hc}$ 의 접촉점에서 법선 방향 성분 벡터 ${}^V \mathbf{p}_{hcn}$ 을 구하면 다음과 같다.

$${}^V \mathbf{p}_{hcn} = ({}^V \mathbf{p}_{hc} \cdot \hat{\mathbf{n}}_c) \hat{\mathbf{n}}_c \quad (10)$$

이로부터 곡면 상에서 발생하는 반력의 크기는 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^V \mathbf{f}_s = k_s {}^V \mathbf{p}_{hcn} \quad (11)$$

여기서 ${}^V \mathbf{f}_s$ 는 (3)에서와 마찬가지로 곡면 상에서의 반력을 나타내고 k_s 는 접촉되는 곡면 즉 박판의 강성을 나타낸다. 즉 기존 알고리즘(vector field method)의 합입량을 구하는 방법에서 접촉점에서의 법선 방향 성분으로 반력을 구함으로써 곡면에서 보다 효과적으로 반력을 주게 된다.

3.3 Haptic rendering algorithm

그림 6은 앞에서 제시된 접촉 인식 알고리즘, 운동 방정식, 접촉력 계산법을 기초로한 haptic rendering algorithm의 흐름도를 보여준다.

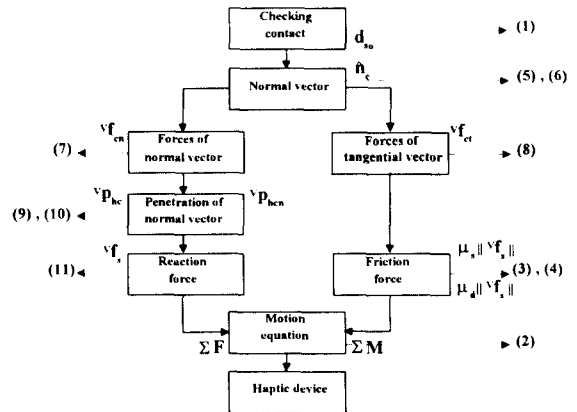


그림 6. Haptic rendering algorithm의 흐름도

Fig. 6 Flow chart of haptic rendering algorithm

4. 힘제시 시스템 (Haptic display system)

앞에서 제안한 접촉 인식 알고리즘과 접촉력 계산법은 힘제시 시스템에 구현되었으며, 그림 7은 이의 하드웨어 개념도를 보여 준다.

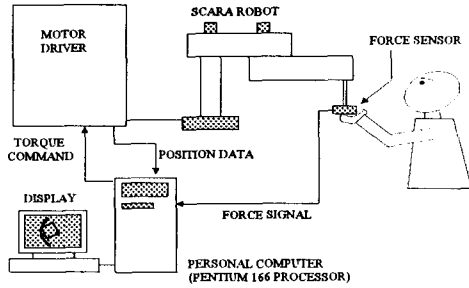


그림 7. 힘제시 시스템
Fig. 7. Haptic display system

힘제시 시스템은 크게 haptic device와 그래픽 디스플레이, haptic rendering algorithm으로 나눌 수 있다. 그래픽 디스플레이와 haptic rendering algorithm은 퍼스널 컴퓨터에 속하며 haptic device로는 3축 SCARA 로봇을 이용하였고 조작자는 6축 Force sensor(JR3 67M25)가 장착되어 있는 손잡이를 쥐고 작동하도록 되어 있다. 작동 원리에 관하여 간단히 설명하면 조작자가 손잡이에 힘을 가하면 측정된 힘은 센서를 통해 컴퓨터에 입력된다. 이 힘은 컨트롤러를 통해 haptic device의 토크로 작용하여 동작하도록 한다. 이와 같이 발생한 토크는 D/A 컨버터를 통해 모터 드라이버로 입력되고 모터를 작동시킨다. haptic device의 움직임은, 로봇의 움직임에 따라 컴퓨터로 입력되는 모터의 리졸버(resolver)신호를 통해 위치를 감지하여 그래픽 상에 디스플레이 하고, 이로 인하여 시각적 정보를 얻을 수 있다. 그래픽 상에서 접촉이 인식되면 이 때의 힘이 접촉 알고리즘을 통하여 계산되어 토크를 발생하고 이 토크를 입력하여 로봇을 작동시킨다. 토크 컨트롤러는 그림 8의 블록 다이어그램으로 나타낼 수 있다.

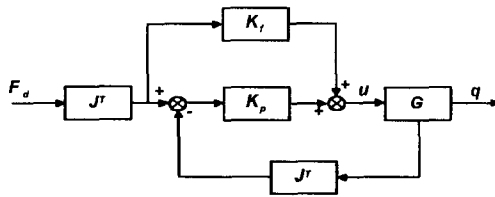


그림 8. 토크 컨트롤러 블록 다이어그램
Fig. 8. Block diagram of torque controller

5. 실험

실험은 정사각형의 가상 도구를 사용하여 박판에 접촉할 경우 조작자에게 느껴지는 힘을 측정하는 방식으로 진행하였다. 가상 도구가 정사각형이므로 접촉은 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 모서리의 끝점이 박판과 접촉하는 경우이고, 또 하나는 면이 박판과 접촉하는 경우이다. 이러한 접촉들을 포함한 두 가지 경우의 실험이 행하여지는 데 하나는 박판의 오른쪽에서 접촉한 경우이고 다른 하나는 박판의 왼쪽에서 접촉한 경우이다. 이는 접촉하는 면이 얇은 박판으로 가정되었으므로 어느 쪽에서 접촉을 하여도 상관이 없다는 것을 나타 낸다. 이 때 박판은 양단 지지로 가정한다.

그림 9와 그림 10에서 보여진 바와 같이 접촉이 없는 상태(A), 모서리로 접촉한 상태(B), 면으로 접촉하면서 박판이 약간 휘어진 상태(C), 휘어진 곡면을 따라 미끄러짐이 있는 상태(D), 다시

접촉이 없는 상태(E) 순으로 박판의 오른쪽과 왼쪽 면으로의 접촉에 대한 실험이 수행된다. 실험을 통하여 가상 도구 T의 위치와 조작자에게 느껴지는 힘을 측정하게 된다.

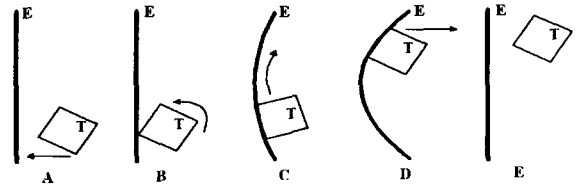


그림 9. 오른쪽 접촉의 실험
Fig. 9. Experiment of right contact

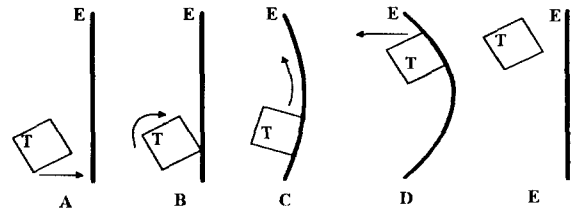
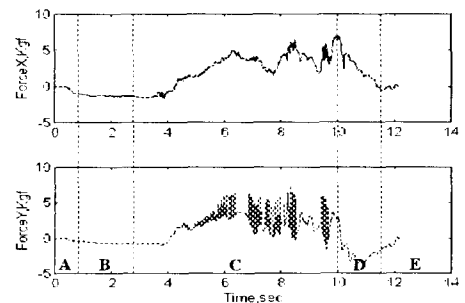


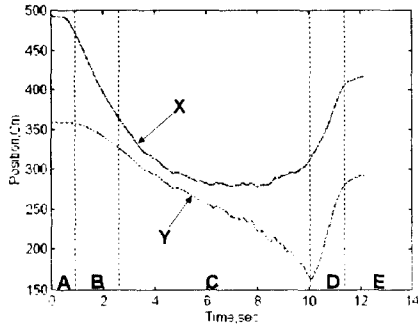
그림 10. 왼쪽 접촉의 실험
Fig. 10. Experiment of left contact

6. 실험 결과 및 고찰

정사각형의 가상 도구로 박판의 오른쪽을 접촉한 경우에 관하여 얻어진 실험 결과는 그림 11에 나타낸 것과 같다. 그림 9의 순서에 따라 그림 11에서 힘에 대한 선도(a)를 보면, A구간과 E구간은 접촉하지 않은 상태를 나타낸다. 이 구간에서는 조작자가 움직이는 데에 따라 물체가 움직인다는 것을 보여주고 (b)에서, B구간은 모서리로 접촉이 일어나면서 모멘트로 인해 물체가 회전되는 것을 나타내며 C구간은 가상 도구가 휘어지고 있는 박판으로 미끄러지고 있음을 보여 준다. 특히 X방향의 위치가 박판의 휘어진 상태를 따라 이동하고 있음을 보여 준다. 이 때 그림 11의 (a)를 보면 Y방향으로의 힘의 변화가 심한 것을 알 수 있는데 이는 정마찰과 동마찰에 의한 효과로 인해 나타나는 것이다. 실제 실험을 통해서 정마찰과 동마찰의 작용으로 인한 stick 마찰의 효과도 느낄 수 있었다. 또한 b)에서 C구간을 보면 위치의 변화가 미세하게 나타남을 알 수 있는데 이것 역시 마찰로 인한 떨림을 나타내는 것이다.

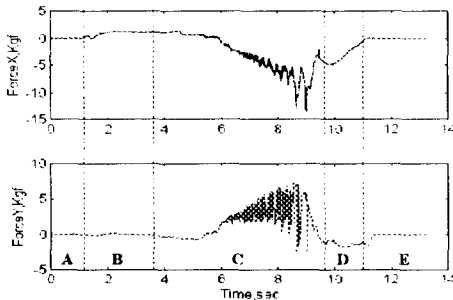


a) X와 Y방향의 힘
a) Force of X and Y direction

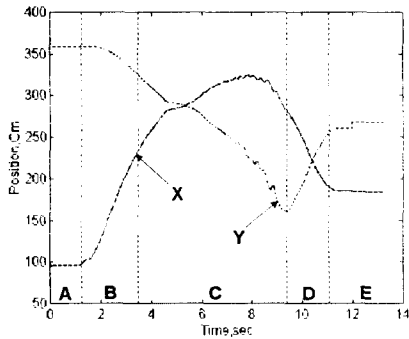


b) 가상 도구의 위치
b) Position of virtual tool

그림 11. 오른쪽 접촉 결과
Fig. 11 Result of right contact



a) X와 Y방향의 힘
a) Force of X and Y direction



b) 가상 도구의 위치
b) Position of virtual tool

그림 12. 왼쪽 접촉의 결과
Fig. 12 Result of left contact

그림 12는 그림 10의 순서에 따라 실험한 결과로서 각 구간에서의 힘과 위치 변화는 그림 11의 오른쪽 접촉의 결과와 매우 유사하다. 오른쪽 접촉 실험과의 차이점은 X방향으로의 힘과 위치가 반대라는 것이다.

7. 결론

가상 환경에서 가상 도구의 조작감 제시를 위한 방법 중 조작자가 haptic device를 조작하여 가상 물체를 움직일 때 가상 환경과의 상호 작용을 real-time으로 계산하는 새로운 haptic rendering algorithm을 제안하였다. 보다 현실감 있는 감각의 전달을 위하여 마찰을 포함한 다면체 접촉의 경우에 적용하였으며 박판의 휘어짐을 고려함과 동시에 박판의 양면에서 접촉이 가능하게 함으로써 기존 알고리즘의 문제를 해결하였다. 또한 실험적으로 구현함으로써 타당성을 입증하였으며 일반적인 가상 도구와 환경에서도 적용이 가능할 것으로 생각된다. 추후 haptic device의 제어에 있어서 동특성에 관한 고려가 첨가되면 보다 현실감 있는 가상 현실 시스템을 구성할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] J. F. Canny and M. C. Lin, "A Fast Algorithm for Incremental Distance Calculation", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1008~1014, 1991.
- [2] M. K. Ponamgi, J. D. Cohen, M. C. Lin and D. Manocha, "Incremental collision detection for polygonal models", Tech. report, Department of Computer Science, University of North Carolina, 1995.
- [3] D. Beard, F. P. Brooks, F. P. Brooks Jr. and M. Ouh-young, "Force display performs better than visual display in a simple 6-D docking task", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1462~1466, 1989.
- [4] H. Iwata, "Artificial reality with force-feedback", *ACM Computer Graphics*, vol.24, no.4, pp. 165~170, 1990.
- [5] A. Fujikawa, T. Kotoku and K. Tanie, "Environment Modeling for the interactive display(EMID) used in tele-robotic systems", *Proc. of IEEE Int. workshop on Intelligent Robots and Systems(IROS'91)*, pp. 999~1004, 1991.
- [6] S. S. Fisher, J. Humphries, McGreevy and W. Robinett, "Virtual Environment Display System", *Comput. Graphics*, 21(1) : 4-5, 1987.
- [7] T. Kotoku and K. Tanie, "Force Display Algorithms", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Workshop S4, pp. 60~78, 1993.
- [8] J. Funda and R. P. Paul, "Efficient control of a robotic system for time-delayed environment", *Proc. of the Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 219~224, 1991.
- [9] J. K. Salisbury and C. B. Zilles, "A Constraint-based God-object Method For Haptic Display", *Proc. of IEEE Int. workshop on Intelligent Robots and Systems(IROS'95)*, pp. 146~151, 1995.
- [10] T. Moriguchi, T. Yoshikawa and X. Zheng, "Display of Operating Feel of Dynamic Virtual Objects with Frictional Surface", *Proc. of the IEEE/RSJ/GI Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS'94)*, pp. 731~738, 1994.
- [11] 이승룡, 이규훈, 최혁렬, "가상 tool의 조작을 통한 simulation 환경에서의 force display에 관한 연구", *춘계정밀공학회 논문집*, pp. 220~226, 1996년 6월.