

## 마찰을 고려한 탄성변형 환경과 접촉하는 가상도구의 조작감 제시

최혁렬 · 이승룡 · 류성무

(1997년 8월 11일 접수)

### Display of Operating Feel of Virtual Tool in Frictional Contact with Elastically Deforming Environment

Hyoukryeol Choi, Seungryong Lee and Sungmoo Ryew

**Key Words:** Haptic Display(역/촉감제시), Haptic Rendering Algorithm(힘제시 알고리즘),  
Haptic Device(역/촉감제시기구), Contact(접촉)

#### Abstract

This paper presents a haptic rendering algorithm in the case that the virtual environment elastically deforms in response to the force applied by a user with a virtual tool. Considering friction, elasticity, multiple contacts and dynamics of the virtual object, this algorithm lets the operator have the feel of interactions in the virtual environment as close as to the reality. Based on the proposed algorithm several experiments are conducted and its effectiveness is confirmed.

#### 1. 서 론

최근 가상현실(virtual reality, artificial reality)과 이의 응용기술에 관하여 많은 관심이 기울여지고 있다. 가상현실은 컴퓨터상에 가상적으로 생성된 상황을 조작자가 실감나게 인식할 수 있도록 감각기를 자극하는 기술이며, 따라서 컴퓨터 그래픽스나 HMD(Head Mounted Display)와 같이 시각적인 정보의 전달을 위한 방법은 가장 중요한 요소 기술의 하나이다.<sup>(1~4)</sup>

그러나, 인간이 주위의 물체 혹은 환경과 상호작용을 할때 시각만으로는 현실을 완벽하게 인식할 수 없음을 알 수 있다. 역각, 촉각, 청각, 후각 등의 보조적인 감각들의 동원이 필수적이며, 이중에

서도 역각과 촉각은 시각기능을 보조할 뿐만 아니라 시각으로는 알아낼 수 없는 것을 인식하기 위하여 자체적으로 능동적인 감각을 주도하는 중요한 감각기능이다. 가상현실에서도 역각과 촉각의 전달 혹은 표현은 필수적이며 이러한 기술을 역/촉감제시(haptic display 혹은 force display라고 하며 앞으로는 줄여서 힘제시 또는 역감제시라고 하자), 이를 위한 사용자와의 인터페이스장치를 역/촉감제시기구(haptic device라고 하며 앞으로는 이를 줄여서 힘제시기구 혹은 역감제시기구라고 하자)라고 한다. 컴퓨터 그래픽이나 HMD는 조작자에게 가상세계를 시각적으로 체험할 수 있도록 하는 방법 이기는 하나 이는 조작자의 편에서 보면 가상세계로부터 일방적인 정보의 전달에 불과한 반면에 힘제시기구를 이용한 역감제시는 조작자가 능동적으로 가상현실에 참여하며 가상세계의 물체들을 조작하고, 또한 이들로부터의 상호작용을 경험할 수 있는 유일한 방법이다.

\*회원, 성균관대학교 기계공학부

\*\*회원, LG정밀기술연구소

\*\*\*회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

역감제시는 비교적 최근에 관심을 끌게 된 연구 분야이며, 이에 관해서 다양한 연구가 진행되어 왔다. Ouh-young 등은 물질의 분자구조를 조작할 수 있는 6자유도 힘제시기구를 이용한 가상현실 시스템을 개발하여 현실적으로 접할 수 없는 분자차원의 세계에 조작자가 개입할 수 있도록 하였고,<sup>(5)</sup> Iwata는 손의 움직임을 추종하기 위한 6자유도 스투어트 플랫폼(stewart platform)과 이 위에 손가락의 움직임을 추종하는 3개의 1자유도 링크를 부착한 힘제시기구를 개발하였다.<sup>(6)</sup> Kotoku 등은 가상적으로 생성된 환경에서 다면체들이 상호접촉할 경우 접촉력을 계산하는 방법을 제시하였고,<sup>(7)</sup> 이 방법은 Tanie 등에 의해서 3차원 가상공간에 존재하는 물체들간의 상호작용을 느끼도록 할 수 있는 힘제시기구를 사용하여 구현되었다.<sup>(8)</sup> 그 밖에 Fisher 등은 HMD와 장갑과 같은 입력도구(data glove)를 이용한 시스템을 제안하였다.<sup>(9)</sup> 그러나, 역감제시는 물체상호간의 작용을 표현하기 위한 기술임에도 불구하고 이와 같은 초기의 힘제시에 관한 연구는 대부분이 충돌이나 접촉과 같은 상호작용하에서 접촉력을 계산하고 힘제시장치를 제어하는 명확한 알고리즘을 제시하지 못하고 있다. 반면에 최근에 Yoshikawa 등은 가상물체의 동특성 및 표면에서의 마찰까지 고려된 힘제시 알고리즘을 제안하여 역/촉각제시의 이론적 근거를 확립하고 있으며,<sup>(10)</sup> Colgate 등은 강체로 모델링된 환경과의 접촉감 표현에 있어서 컴퓨터에 의한 이산시간적인 제어환경때문에 필수적으로 동반되는 힘제시기구의 불안정성을 극복할 수 있는 알고리즘을 제안하고 있다.<sup>(11)</sup> 또한, 가상물체가 상호작용력에 의하여 소성 혹은 탄성변형하는 경우의 시뮬레이션방법<sup>(12)</sup> 및 힘제시기술<sup>(13,14)</sup>에 관해서 다양한 연구결과가 발표되고 있으나 대부분이 표면에서의 마찰을 무시한 단순한 모델에 관하여 적용할 수 있는 방법들이었다.

힘제시 시스템(haptic display system)은 세가지 기본적인 요소, 즉 제어된 힘을 조작자에게 전달할 수 있는 기전장치(electro-mechanical system)인 역감제시장치, 정해진 형태와 고유의 물성치를 가지고 수학적으로 표현할 수 있는 가상물체(virtual object model), 그리고 가상환경에서 조작자가 힘제시 기구를 조작하여 가상물체를 움직일 때 가상물체들간의 상호 작용을 실시간(real-time)으로 계산하고 힘제시기구를 제어하는 힘제시 알고리즘

(haptic rendering algorithm)으로 구성된다. 힘제시의 과정을 살펴보면, 조작자는 컴퓨터상에 시뮬레이션되어 움직이는 가상의 물체를 힘제시기구를 이용하여 조작하며, 이때 가상물체간의 상호접촉이나 운동에 의하여 필연적으로 발생하는 물리적인 힘의 변화를 계산하고 이를 바탕으로 힘제시기구를 적절하게 제어함으로써 조작감을 느끼도록 하는 것이다. 이때, 대개의 경우 물체간의 접촉력을 계산하는 방법은 물체들이 단순히 스프링, 댐퍼의 특성을 갖고 변형하는 특성이 있다고 가정하고 구현하려고 하는 물체의 특성에 따라서 탄성계수나 댐핑 계수에 변화를 주는 방식으로 접촉력을 계산하는 것이며 vector field method라고도 한다.<sup>(15)</sup> 그러나 이러한 방법을 사용할 경우 가상물체의 기하학적 형상이나 접촉의 양상 등에 따라서 발생하는 접촉력의 계산이 모호하여 질 수 있으며, 전혀 예상하지 못한 반력을 조작자가 느끼게 될 수 있다.<sup>(16)</sup> 특히 조작자에 의하여 움직이는 가상물체(편의상 가상도구라고 하자)가 얇은 탄성환경과 접촉할 경우 기존에 제안된 알고리즘들은 유일한 상호작용력을 계산할 수 없다. 이에 대하여 Zilles와 Salisbury는 God-object method를 제시하여 기존 알고리즘의 문제점을 해결하려 하였고, 이 방법이 얇은 물체에서도 적용이 가능하다고 주장하고 있다. 그러나 이 방법은 접촉되는 물체가 곡면일 경우 이것을 삼각형의 면이 조합된 것으로 근사화하였는데, 이때 구속조건으로 쓰인 면의 방정식을 어떻게 구하는가에 문제가 있었다.

본 연구에서는 조작자와의 상호작용력에 따라서 탄성변형하는 얇은 가상환경을 가상도구를 가지고 조작할 때 이의 조작감을 제시할 수 있는 역감제시 알고리즘을 제안한다. 본 연구에서 제안된 알고리즘은 기존 알고리즘들과는 다르게 접촉하는 물체의 두께와 무관하게 가상물체의 조작감을 나타낼 수 있다. 제안된 알고리즘은 3자유도 스카라(SCARA) 로봇을 힘제시기구로 사용하는 힘제시시스템에 구현하려고 하며, 가상공간에서 도구를 조작하고, 계산된 힘을 얻게 되는 작업을 통하여 효용성을 보여 주려고 한다.

## 2. 접촉력 계산의 문제점

Fig. 1에서 가상도구  $T$ 는 다각형으로 이루어진 강체이고 가상환경  $E$ 는 탄성변형을 하는 가상의

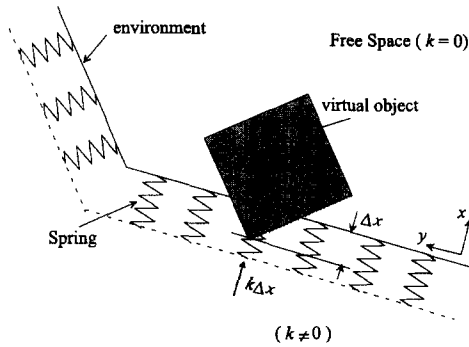


Fig. 1 Environment model with spring effects on the surface.

환경이라고 가정하자. 이 때, 일반적으로 Fig. 1과 같이 가상환경은 단순한 강체로 모델링하게 되며 접촉력은 강체의 강성과 함입량(penetration depth)  $\Delta x$ 와의 곱으로 구하게 된다. 그러나, Fig. 2에 나타난 것과 같이 가상도구가 얇은 가상환경에 접촉하였을 경우에는 함입량만으로 접촉력을 계산하게 될 경우 접촉이 일어난 방향에 따라서 Fig. 2(b)와 (c) 두 가지의 가능한 상황이 발생한다. 함입량을  $\Delta x_1$ 과 같이 계산한다면 가상물체는 Fig. 2(b)와 같이 변형되게 될 것이며, 역으로  $\Delta x_2$ 같이 계산하였을 경우에는 Fig. 2(c)과 같은 결과를 얻게 된다. 이 문제는 이미 Colgate가 지적한 바가 있는 사항이며,<sup>(16)</sup> 물체가 날카로운 모서리를 갖거나 돌출부를 갖는 경우에도 유사하게 발생할 수 있다.<sup>(15)</sup> 따라서, 접촉상황에 따라서 유일한 반력을 계산하고 이를 바탕으로 가상물체의 거동을 시뮬레이션하기 위해서는 접촉의 경로를 바탕으로 하여 적절한 함입량을 결정하고 이로부터 접촉력을 계산해야 한다. 특히, 가상물체가 접촉력에 의하여 변형되는 경우 변형에 따른 접촉조건 및 마찰조건의 변화를 고려하여 접촉력을 구할 필요성이 있다.

### 3. 접촉의 인식

가상물체들간의 상호작용력을 계산하기 위해서는 먼저 물체들간의 접촉여부가 확인되어야 한다. 가상 공간상에 조작자가 힘제시기구를 움직이는 데에 따라서 움직이는 가상의 물체가 존재한다고 하고 이 물체를 가상 도구라고 하자. 본 연구에서는 벽면을 제외한 모든 도구를 강체로 가정하며 접촉의 유무를 파악하기 위하여 점과 점 사이의 근접거리

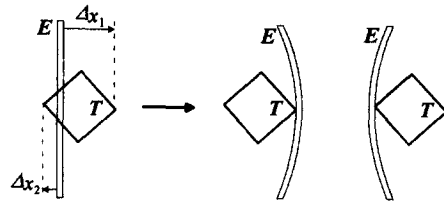


Fig. 2 Ambiguity in the computation of contact forces.

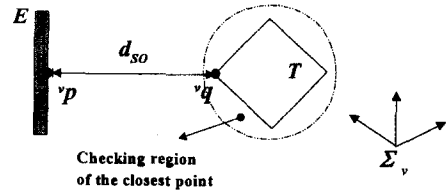


Fig. 3 Contact checking algorithm.

를 계산하여 접촉을 인식하도록 하였다. 접촉이 인식되면 접촉의 종류에 따라 반력을 계산할 수 있게 되며, 이를 바탕으로 힘제시장치의 제어를 하게 된다. 가상도구는 2차원상의 물체로 가정하였으며 따라서 접촉은 점과 면, 면과 면의 경우로 구분할 수 있고 점과 면의 접촉을 기본 접촉으로 하고 그 밖의 복잡한 접촉형태는 이들의 조합으로 표현한다. 접촉인식의 기본 개념은 다음의 식에 의해 나타낼 수 있다.

$$d_{so} = \text{Min} \|v_p - v_q\|, \quad v_p \in E, \quad v_q \in T \quad (1)$$

여기에서, Fig. 3에 보여진 것과 같이  $v(\cdot)$ 는 가상 공간의 기준좌표계  $\Sigma_v$ 에 기준한 좌표값을 나타내고  $d_{so}$ 는 물체  $E$ 와  $T$ 사이에서 가장 짧은 유클리드 언거리(Euclidean distance)이며,  $\|\cdot\|$ 는 2-norm을,  $v_p$ 와  $v_q$ 는 물체  $E$ 와  $T$ 에 있는 점에 해당하는 위치벡터를 나타낸다. 두 물체사이의 접촉을 인식하기 위해서는 두 물체사이의 모든 점과 점 사이의 거리를 계산하여 기준거리이내에 들어오면 접촉으로 간주하는 것이 타당하나 가상물체의 형상이 복잡하게 되고 물체간에 상대적인 운동이 존재하게 되면 이와 같은 과정은 많은 계산시간을 요구하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 짧은 시간에 효율적인 방법으로 접촉을 인식하기 위하여 Fig. 3에 나타난 것과 같이 가상도구의 주변에 근접점 확인 영역을 설정하고 이 영역 안에 다른 물체가 들어오면 그때부터 근접점을 확인하게 하는 방법을 사용하였

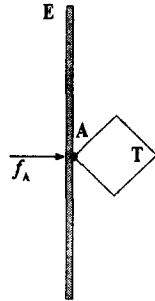


Fig. 4 Face to vertex contact.

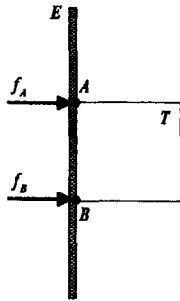


Fig. 5 Face to face contact.

다.

Fig. 4와 같이  $P$ 는 환경  $E$ 와 접촉되는 물체  $T$  (가상도구라고 생각할 수 있다)의 접촉점이라고 할 때 벽면에 가상도구의 한 점이 접촉한 경우를 기본 접촉(basic contact)이라고 하며, 이 경우에는 접촉점  $P$ 에서만 반력  $f_p$ 가 작용하게 된다. 물체의 면과 면이 접촉하는 경우 실제의 현상은 매우 복잡하게 나타나며 이를 실시간 시뮬레이션과 힘제시를 위한 가상현실 시스템에 도입하기는 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 면접촉을 Fig. 5와 같이 기본 접촉의 조합으로 생각하고 면에서 작용하는 힘을 접촉면의 양 끝단에 작용하는 반력  $f_A$ 와  $f_B$ 의 합으로 치환하여 단순화하였다.<sup>(6)</sup>

#### 4. 상호 작용력의 계산

접촉이 확인되고 접촉의 종류가 구분되면, 상호 작용력을 계산할 수 있다. Fig. 6은 가상도구로 두께가 얇고 탄성변형을 하는 가상환경과 접촉하였을 때 변형이 일어난 상황을 나타낸다. 이 때 힘작용점(haptic interface point)은 조작자가 힘제시 장치를 통하여 가상도구에 힘을 가하여 주는 위치를 의

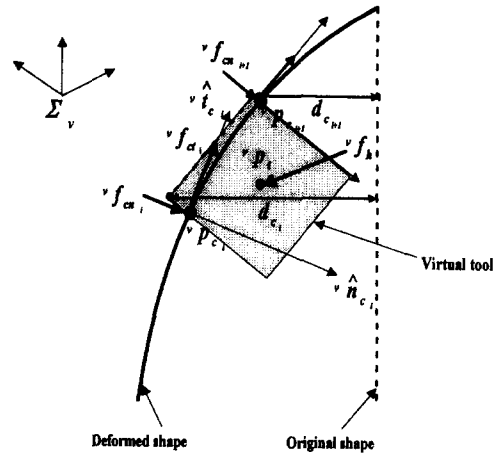


Fig. 6 Interaction forces in the virtual space.

미하며 힘작용점이 도구의 기하학적 중심에 위치한다고 가정하면, 접촉점에서의 반력을 계산하고 도구의 운동방정식을 이용하여 조작자에게 가해지는 힘을 계산할 수 있다. Fig. 6에서  ${}^v p_{c_i} \in R^3$ 는 힘작용점의 위치인 가상도구의 중심위치벡터를 나타내고,  ${}^v f_h \in R^3$ 는 조작자가 가하는 외력을 나타낸다. 또한  ${}^v f_{c_i} \in R^3$ 는 접촉점  $c_i$ 에서의 반력을 의미하고,  ${}^v p_{c_i} \in R^3$ 는 접촉점  $c_i$ 의 위치를 나타내며,  ${}^v a_{c_i} \in R^3$ 는 힘 작용점으로부터 접촉점  $c_i$ 까지의 벡터를 표시한다.

#### 4.1 운동방정식

$n$ 곳에서 접촉이 일어난다고 가정하면 Newton-Euler 방정식을 이용한 가상도구의 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_t {}^v \ddot{p}_t = {}^v f_h + \sum_{i=1}^n {}^v f_{c_i} \quad (2)$$

$$I_t {}^v \alpha_t + {}^v \omega_t \times (I_t {}^v \omega_t) = {}^v M_h + \sum_{i=1}^n {}^v a_{c_i} \times {}^v f_{c_i} \quad (3)$$

여기에서  ${}^v \ddot{p}_t$ 는 도구의 병진가속도,  $m_t$ 는 가상도구의 질량,  $I_t \in R^{3 \times 3}$ 는 관성텐서(inertia tensor),  ${}^v \omega_t \in R^3$ 는 각속도,  ${}^v \alpha_t \in R^3$ 는 도구의 각가속도를 나타내며,  ${}^v M_h \in R^3$ 는 조작자가 도구에 주는 모멘트를 나타낸다.

#### 4.2 반력의 결정

접촉점  $c_i$ 에서의 마찰을 고려하지 않았을 경우 식 (4)와 같이 단순한 탄성모델에 의하여 반력을 구할 수 있다.

$${}^v \bar{f}_{ci} = k_{ei} {}^v d_{ci} \quad (4)$$

여기서  $(\cdot)$ 는 마찰을 고려하지 않았을 경우의 반력,  $k_{ei}$ 는 벽면의 탄성계수,  ${}^v d_{ci}$ 는 도구상에서 접촉된 도구의 접촉점  $c_i$ 로부터 변형되지 않은 원형의 벽면까지에 이르는 최소거리를 나타내며,  ${}^v \bar{f}_{ci} \in R^3$ 는 도구가 벽면에 접촉하였을 경우 발생하는 반력이다. 그러나 마찰이 있을 경우 나타나는 상호작용력은 이와는 다르며 다음과 같은 과정을 통하여 수정되어야 한다.

접촉력으로 인하여 벽면이 변형되었을 경우, 변형된 벽면의 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi(x, {}^v f_{s1}, \dots, {}^v f_{sn}) = 0 \quad (5)$$

여기서,  $x \in R^3$ 는 가상공간상의 임의의 위치 벡터를 나타내며, 이 때 벽면의 안쪽은  $\phi(x, {}^v f_{s1}, \dots, {}^v f_{sn}) > 0$ 으로 나타낼 수 있다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 접촉점  $c_i$ 는  ${}^v d_{ci}$ 와 변형된 면의 교차점에서 다시 결정된다.  $\hat{n}_{ci}$ 를  ${}^v p_{ci}$ 에서 벽면의 단위법선 벡터라고 한다면 이는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{n}_{ci} = \frac{\partial \phi / \partial x}{\|\partial \phi / \partial x\|} \quad (6)$$

$${}^v \bar{f}_{cni} = -({}^v \bar{f}_{ci} \cdot \hat{n}_{ci}) \hat{n}_{ci} \quad (7)$$

여기서,  ${}^v \bar{f}_{cni}$ 는  ${}^v \bar{f}_{ci}$ 의 법선성분이며,  ${}^v \bar{f}_{cti}$ 를  ${}^v \bar{f}_{ci}$ 의 접선성분이라고 할 때 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^v \bar{f}_{cti} = {}^v \bar{f}_{ci} - {}^v \bar{f}_{cni} \quad (8)$$

다음으로, 마찰을 고려하여 실제 반력을 계산하면 정마찰(static friction)의 경우는 다음과 같은 조건을 만족시킬 때이며,  $\|{}^v \bar{f}_{cti}\| \leq \mu_s \|{}^v \bar{f}_{cni}\|$ 이고,  $\|{}^v \dot{p}_{cti}\| = 0$ 일 때 실제 반력은 다음과 같다.

$${}^v f_{cni} = {}^v \bar{f}_{cni}, \quad {}^v f_{cti} = {}^v \bar{f}_{cti} \quad (9)$$

또한, 동마찰(dynamic friction)의 경우는 다음과 같은 경우이며,  $\|{}^v \bar{f}_{cti}\| > \mu_s \|{}^v \bar{f}_{cni}\|$ 이거나  $\|{}^v \dot{p}_{cti}\| > 0$ 일 때 실제 반력은 아래와 같다.

$${}^v f_{cni} = {}^v \bar{f}_{cni}, \quad {}^v f_{cti} = -\mu_d \frac{{}^v \dot{p}_{cti}}{\|{}^v \dot{p}_{cti}\|} \|{}^v \bar{f}_{cni}\| \quad (10)$$

여기서,  ${}^v \dot{p}_{cti}$ 는 접촉점  $c_i$ 에서 측정된 상대적인 속도의 접선성분, 즉 미끄럼속도(sliding velocity)를 나타내고,  ${}^v f_{cni}$ 는 접선방향의 힘,  ${}^v f_{cti}$ 는 접점  $c_i$

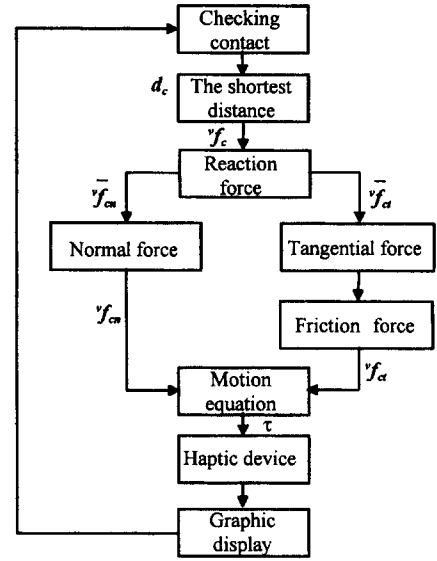


Fig. 7 Haptic rendering algorithm.

에서 법선방향의 힘을 나타낸다.  $\mu_s$ 와  $\mu_d$ 는 각각 정마찰계수와 동마찰계수를 나타낸다.  ${}^v d_{ci}$ 의 방향은 접촉의 방향을 알 수 있게 하는데, 예를 들어 함입량이 가상환경인 벽의 두께보다 더 커질 경우에도 올바른 접촉력을 결정할 수 있도록 한다. 이 상으로부터, 외력을 받아 변형된 가상 물체의 접촉 면상에서 작용하는 반력은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$${}^v f_{ci} = {}^v f_{cni} + {}^v f_{cti} \quad (11)$$

Fig. 7은, 지금까지 설명한 힘제시 알고리즘을 보여주는 흐름선도(flow chart)이다. 앞서 계산된 힘을 바탕으로 힘제시기구는 다음과 같은 비례적분제어를 사용하여 제어하였다.

$$\tau = J(\theta)^T \{K_p({}^v f_n - {}^v \bar{f}_n) + K_i \int ({}^v f_n - {}^v \bar{f}_n) + {}^v f_n\} + \tau_c(\theta) \quad (12)$$

여기에서,  $(\cdot)^T$ 는  $(\cdot)$ 의 전치행렬(transpose matrix),  $\tau$ 는 힘제시기구의 관절구동력,  $\theta$ 는 힘제시기구의 관절각,  $J(\theta)$ 는 Jacobian 행렬을 나타낸다. 또한  ${}^v \bar{f}_n$ 는 조작자에 의해 주어지는 힘을 측정 한 값이며,  $K_p$ 와  $K_i$ 는 각각 비례제어기와 적분제어기의 게인(gain),  $\tau_c$ 는 힘제시기구의 관성과 중력을 보상하기 위한 토크(torque)이다.

### 5. 힘제시 시스템

Fig. 8은 힘제시 시스템의 개략도이다. 본 실험에서 사용된 힘제시 시스템은 가상공간의 그래픽 표현과 힘제시 알고리즘을 위한 퍼스널 컴퓨터(pentium 166 MHz)와 힘제시장치로서 3축 SCARA 로봇(삼성 FARA-SS2, 기어비 80 : 1, 50 : 1, 42 : 1)을 사용하였다.

SCARA 로봇의 엔드이펙터(end-effector)에는 6축 힘센서(JR3 67M25)와 조작자가 쥐고 움직일 수 있는 손잡이가 부착되어 있어서 조작자가 가상

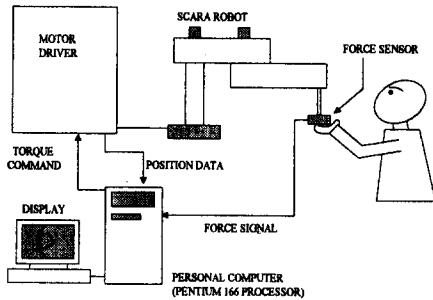


Fig. 8 Schematic diagram of haptic display system.

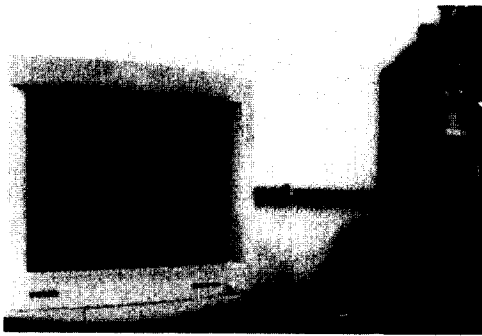


Fig. 9 Overview of haptic display system.

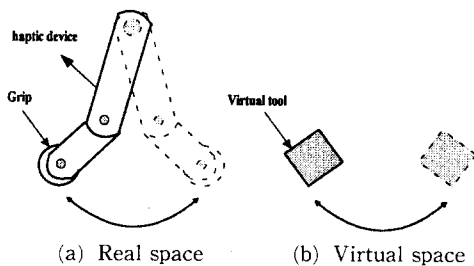


Fig. 10 Experiments of haptic display for inertia force.

공간의 물체에 가하여 주는 힘을 측정할 수 있다. 측정된 힘은 퍼스널컴퓨터 전용 접속카드(interface card)를 이용하여 디지털(digital) 값으로 컴퓨터에 임혀들여지며 제어기에 입력된다. 로봇의 위치는 로봇 관절 구동용 모터에 부착된 리졸버(resolver, 12bit resolution)를 사용하여 측정하고 있으며, 16 bit DIO 카드를 통하여 컴퓨터에 입력되고 제어기에서 계산된 모터토크 명령은 12bit D/A 변환기(PCL-727)로 아날로그 값으로 변환된다. 제어 알고리즘은 1 KHz의 속도로 새로운 토크값을 계산하며 제어프로그램은 C언어와 어셈블리(assembly) 언어로 작성하였다. Fig. 9는 실제 힘제시 시스템을 보여준다.

### 6. 실험 및 결과

#### 6.1 가상물체의 질량제시 실험 및 결과

가상도구가 질량을 가질 경우 조작자는 자신이 움직이는 도구의 질량을 느낄 수 있어야 한다. 본 실험을 통해서 질량을 가진 가상도구를 힘제시장치를 이용하여 조작할 경우 도구의 질량감을 실제로 느낄 수 있음을 보여주려고 하였다.

실험은 가상도구의 질량이 0.3 Kg인 경우와 3 Kg인 경우에 대하여 수행하였고, 이때 조작자에게 느껴지는 힘을 측정하였다. Fig. 10은 힘제시장치와 가상도구의 움직임을 보여준다. 조작자가 힘제시 장치의 손잡이 부분을 잡고 좌우로 움직이면 가상도구도 같은 움직임을 보이는데 이 때 조작자가 느끼는 도구의 관성력을 측정하게 된다.

Fig. 11과 12는 도구의 질량이 0.3 Kg인 경우 조작자가 느끼는 X와 Y방향의 힘을 도시한 것이며, Fig. 13과 14는 도구의 질량이 3 Kg인 경우의 실험 결과이다. Fig. 11과 12에서 기대되어지는 힘(desired force)과 실제 느끼는 힘(measured force)이 일치하고 있음을 알 수 있으며, 측정된 힘이 정현파로 나타나는 것은 힘제시기구를 잡고 좌우로 왕복 운동을 하였기 때문이다. 기대되어지는 힘이 순간적으로 커질 경우가 있는데 이는 가상도구의 가속도 성분을 구하는 과정에서 수치미분을 하였기 때문에 노이즈가 발생하기 때문이라고 여겨진다. Fig. 13과 14에서도 기대되어지는 힘과 실제 느끼는 힘의 경향이 일치하고 있음을 알 수 있다. 질량이 0.3 Kg일 때의 실험결과와 비교할 때, 3 Kg의 경우에 조작자가 더욱 더 무거운 느낌을 가지게 된다는 것

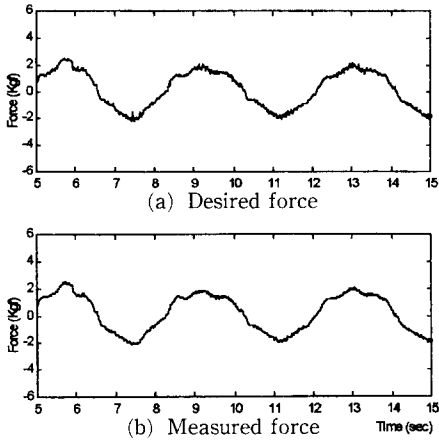


Fig. 11 Measured and desired forces in X direction (mass=0.3 Kg).

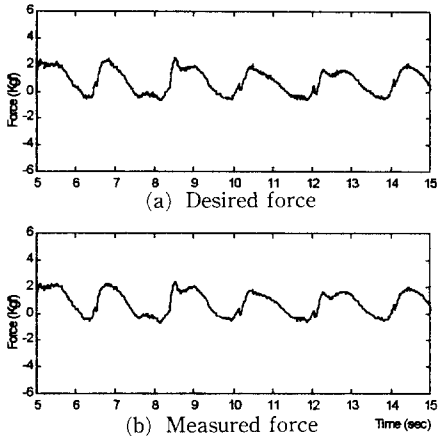


Fig. 12 Measured and desired forces in Y direction (mass=0.3 Kg).

을 알 수 있다.

6.2 탄성변형하는 박판에서의 실험 및 결과

본 실험에서는 정사각형의 가상도구를 사용하여 두께가 얇고 탄성변형을 하는 박판을 조작하여 보았다. 점접촉과 면접촉의 경우 마찰력의 변화를 경험할 수 있도록 하기 위하여 가상도구의 형상을 정사각형으로 설정하였으며 박판의 오른쪽과 왼쪽에서 접촉하는 실험을 수행하여 하여 방향에 관계없이 힘제시가 가능함을 보여주었다. 박판은 양단이 단순히 지지되도록 하였으며 가상도구의 질량은 1 Kg, 한변의 길이가 15 cm인 정사각형으로 하였다. 또한, 박판의 강성 계수는  $EI=59523.81 \text{ Kg}_f \text{ cm}^2$ , 길이 200 cm, 단면의 가로와 세로길이는 각

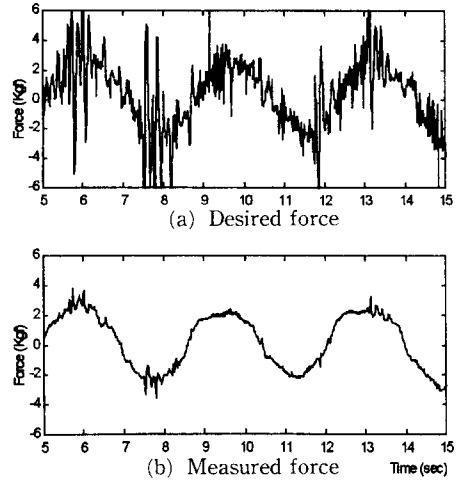


Fig. 13 Current force and desired force in X direction (mass=3 Kg).

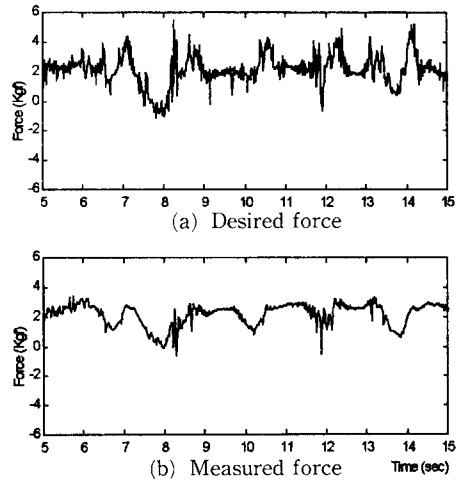


Fig. 14 Measured and desired forces in Y direction (mass=3 Kg).

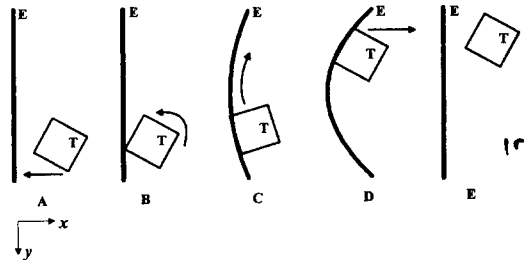


Fig. 15 Experiments of right side contact.

각 1 cm인 알루미늄으로 설정하였다.

실험은 Fig. 15와 Fig. 16에서 보여진 바와 같이

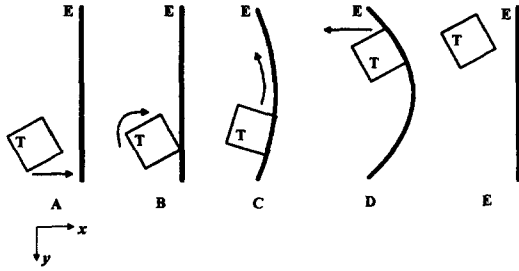
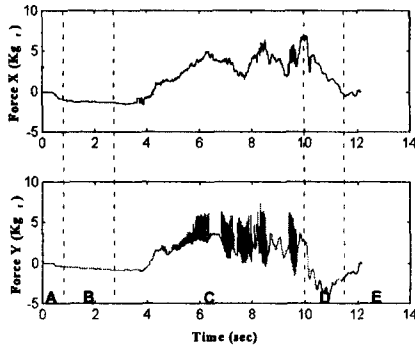
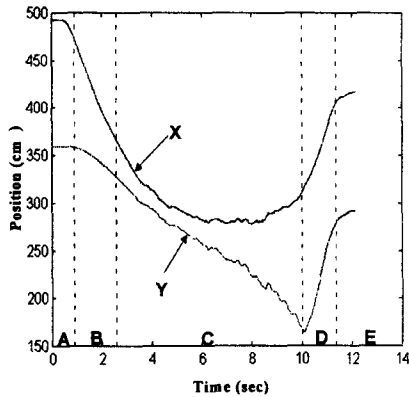


Fig. 16 Experiments of left side contact.



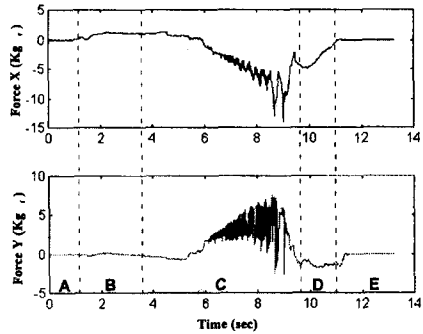
(a) Measured forces of X and Y direction



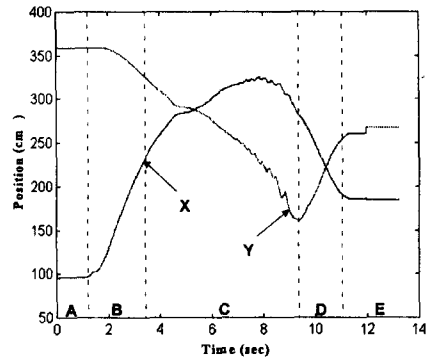
(b) Measured positions of virtual tool

Fig. 17 Results of right side contact.

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 대하여 각각 수행하였고 가상도구 T의 위치와 이 때 조작자에게 느껴지는 힘을 측정하였다. 또한 오른쪽 접촉실험의 경우 박판의 강성계수 EI에 따른 박판의 휘어짐과 그에 따른 반력의 차이를 보여주도록 하였다.



(a) Measured forces of X and Y direction



(b) Measured positions of virtual tool

Fig. 18 Results of left side contact.

박판의 오른쪽에서 접촉한 경우 얻어진 실험결과 는 Fig. 17에 나타낸 것과 같다. Fig. 15의 순서에 따라서 Fig. 17에 나타난 힘과 위치에 관한 그래프를 살펴보면 먼저, A구간과 E구간은 접촉하지 않은 상태를 나타낸다. 이 구간에서는 조작자가 움직이는 데에 따라서 가상물체가 움직이고 있다는 것을 보여주고 B구간은 모서리로 접촉이 일어나면서 모멘트로 인해 물체가 회전되는 것을 나타낸다. C구간은 가상도구가 휘어지고 있는 박판면으로 미끄러지고 있음을 보여 준다. 특히 X방향의 위치가 박판의 휘어진 상태를 따라 이동하고 있음을 보여 준다. 이 때 Fig. 17의 (a)를 보면 Y방향으로의 힘의 변화가 심한 것을 알 수 있는데, 이는 정마찰과 동마찰에 의한 효과로 인해 나타나는 것이다. 실제 실험을 통하여 정마찰과 동마찰의 작용으로 인한 stick 마찰의 효과도 느낄 수 있었다. 또한 Fig. 17의 (b)에서 C구간을 보면 위치의 변화가 미세하게 나타남을 알 수 있는데 이것 역시 마찰로 인한 떨림을 나타내는 것이다. Fig. 18은 Fig. 16의 순서에



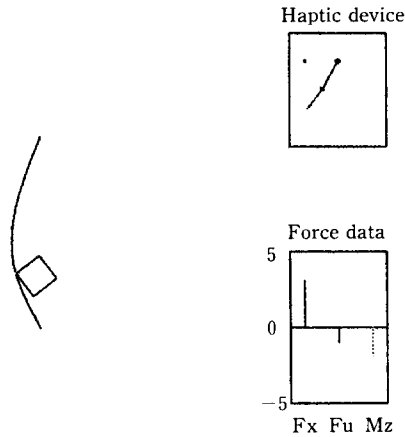


Fig. 19 Display of contact experiments (EI=30000 Kg,cm<sup>2</sup>).

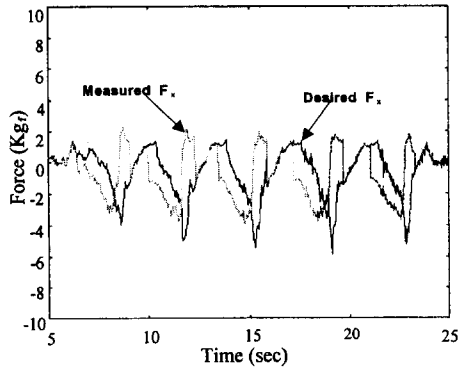


Fig. 20 Measured forces of X direction (EI=30000 Kg,cm<sup>2</sup>).

따라 실험한 결과로서 각 구간에서의 힘과 위치변화는 오른쪽 접촉의 결과와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 19에서 24까지는 박판의 강성계수 EI가 각각 30000 Kg,cm<sup>2</sup>, 90000 Kg,cm<sup>2</sup>로 점점 박판의 강성이 증가하게 되는 경우, 오른쪽 접촉을 하였을 때 조작자가 받는 반력을 측정된 결과이다. 실험결과에 의하면 강성계수가 커지는 정도에 따라 비례적으로 반력이 늘어나고 있으며, 기대되어지는 힘(desired force)과 조작자가 실제 느끼는 힘(measured force)도 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 7. 결 론

본 논문에서는 탄성변형하는 얇은 가상환경의 조작감 제시를 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안된

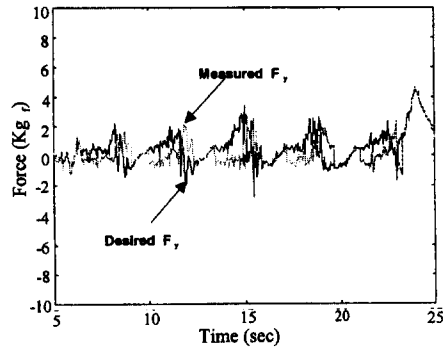


Fig. 21 Measured forces of Y direction (EI=30000 Kg,cm<sup>2</sup>).

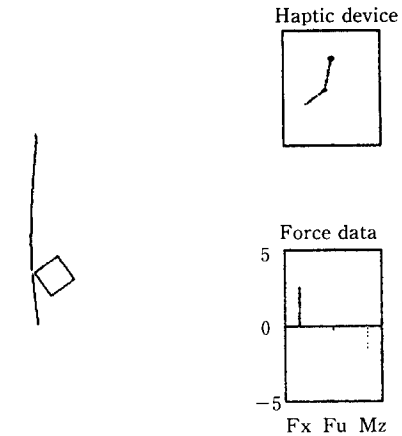


Fig. 22 Display of contact experiments (EI=90000 Kg,cm<sup>2</sup>).

알고리즘은 유일한 반력계산을 할 수 있을 뿐더러, 마찰력에 관한 문제들을 고려하였기 때문에 지금까지의 연구결과들에 비교하여 보다 현실에 가까운 가상세계의 조작감 및 힘제시가 가능한 장점이 있다. 끝으로, 제안된 알고리즘은 SCARA 로봇을 이용한 힘제시기구에 구현함으로써 이의 타당성을 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 논문은 한국과학재단 핵심전문연구와 성균관대학교 산업설비안전성평가 연구센터의 지원으로 수행되어진 것으로, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

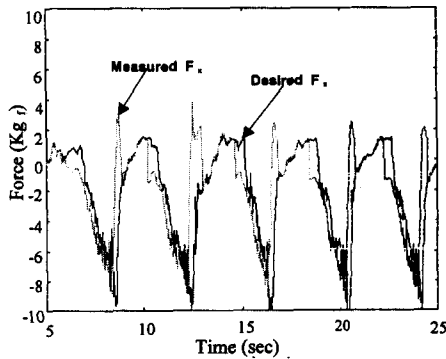


Fig. 23 Measured forces of X direction (EI=90000 Kg,cm<sup>2</sup>).

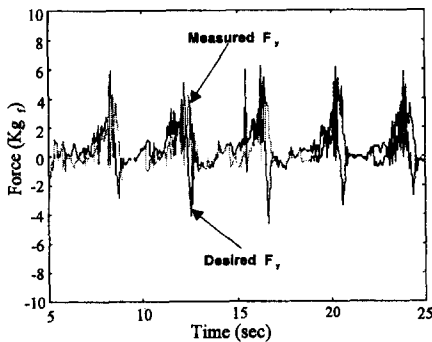


Fig. 24 Measured forces of Y direction (EI=90000 Kg,cm<sup>2</sup>).

참고문헌

(1) Renault, O., Magnenat-Thalmann N., and Thalmann, D., 1990, "A Vision-based Approach to Behavioral Animation," *J. Visualization and Computer Animation*, Vol. 1, No. 1, pp. 18~21.

(2) Kamat, V. V., 1993, "A Survey of Techniques for Simulation of Dynamic Collision Detection and Response," *Computer & Graphics*, Vol. 17, No. 4.

(3) Lin, M. C. and Canny, J. F., 1991, "A Fast Algorithm for Incremental Distance Calculation," *Proc of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1008~1014.

(4) Ponamgi, M. K., Cohen, J. D., Lin, M. C. and Manocha, D., 1995, "Incremental Collision Detection for Polygonal Models," *Tech. Report, Department of Computer Science, University of*

*North Carolina*.

(5) Ouh-young, M., Beard, D., Brooks, F. P. and Brooks Jr., F. P., 1989, "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.

(6) Iwata, H., 1990, "Artificial Reality with Force-feedback," *ACM Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 165~170.

(7) Kotoku, T., Tanie, K. and Fujikawa, A., 1991, "Environment Modeling for the Interactive Display (EMID) Used in Telerobotic systems," *Proc. of IEEE Int. workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS'91)*, pp. 999~1004.

(8) Kotoku, T. and Tanie, K., 1993, "Force Display Algorithms," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Workshop S4*, pp. 60~78.

(9) Fischer, P., Daniel, R. and Siva, V. V., 1990, "Specification and Design of Input Devices for Teleoperation," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 540~545.

(10) Yoshikawa, T., Zheng, X. and Moriguchi, T., 1994, "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.

(11) Colgate, J. E., Grafing, P., Stanley, M. and Schenkel, G., 1993, "Implementation of Stiff Virtual Walls in Force-Reflecting Interfaces," *Proc. of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS)*, pp. 202~208.

(12) Cover, S., Ezquera, N., O'Brien, J., Rowe, R., Gadacz, T. and Palm, E., 1993, "Interactively Deformable Models for Surgery Simulation," *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp. 68~75.

(13) Burdea, G., Gomez, D., Langrana, N., Roskos, E. and Richard, P., 1995, "Virtual Reality Graphics Simulation with Force Feedback," *international Journal in Computer Simulation*, ABLEX Publishing, Vol. 5, pp. 287~303.

(14) Yamamoto, K., Ishiguro, A. and Uchikawa, Y., 1993, "A Development of Dynamic Deforma-

- tion Algorithms for 3D Shape Modeling with Generation of Interactive Force Sensation," *Proc. of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS)*, pp. 505~511.
- (15) Zilles, C. B. and Salisbury, J. K., 1995, "A Constraint-based God-object Method for Haptic Display," *Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS' 95)*, pp. 146~151.
- (16) Colgate, J. E., Stanley, M. C. and Brown, J. M., 1995, "Issues in the Haptic Display of Tool Use," *Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS' 95)*, pp. 140~145.