

## 3자유도 힘 반향 역감장치

강원찬\*, 박진석\*, 김대현\*, 신석두\*\*, 김영동\*

\*조선대학교 공과대학 제어계측공학과

\*\*조선이공대학 전기과

## 3DOF Force-Reflecting Interface

Won-Chan Kang\*, Jin-Suk Park\*, Dae-Hyun Kim\*, Suk-Doo Shin\*\*, Young-Dong Kim\*

\*Dept. of Control &amp; Instrumentation Eng., Chosun University

\*\*Dept. of Electrical Eng., Chosun College of Science &amp; technology.

## Abstract

In this paper, we present the 3DOF force-reflecting interface which allows to acquire force of object within a virtual environment. This system is composed of device, virtual environment model, and force-reflecting rendering algorithm. We design a 3 DOF force-reflecting device using the parallel linkage, torque shared by wire, and the controller of system applied by impedance control algorithm. The force-reflecting behaviour implemented as a function position is equivalent to controlling the mechanical impedance felt by the user. Especially how force should be supplied to user, we know using a God-Object algorithm.

As we experiment a system implemented by the interface of 3D virtual object and 3DOF force-reflecting interface, we can feel a contact, non-contact of 3D virtual object surface and sensing of push button model

## 1. 서 론

지금까지 가상현실에서 인간에게 현실감을 제공하기 위한 수단으로 외부에서 받아들이는 수많은 정보들 중에 약 70%는 시각에 의해 흡수되기 때문에 대부분의 연구는 가상현실이나 원격 조종에 관한 실시간 3차원 입체영상 구현에 치중되어왔다. 컴퓨터 메모리 상에 가상의 세계를 모델링하고 인간에게 이 가상세계에 대한 정보를 제공하는 디바이스를 역감장치라 한다. 이를 위해 여러 장치가 개발되고 있는데 단 순히 위치정보만을 제공하는 Cyber-Glove와 DataGlove가 있으며, 역감을 제시하는 장치로는 Thomas H. Massie 의 PHANTOM과, Iwata의

Haptic Master등이 있다.[1] 그러나 기 개발된 장치들은 가상공간의 제시능력과 분해능이 떨어지고 구조적인 문제로 토크 손실 및 백러쉬, 부피 및 무게 등의 단점으로 작업자가 이 디바이스를 의식하며 작업을 해야했다. 한편 국내에서는 기초적인 연구단계에 그치고 있으며, 현재 상품화된 장치들은 대부분 고가이다. 따라서 본 연구에서는 저가이며 인간에게 안정된 상호작용력을 제공하는 범용의 Man-machine Haptic Interface 장치의 개발을 목적으로 우선 3자유도 힘 반향 역감장치를 개발 하고자 한다.

본 연구에서 개발한 역감 장치의 액츄에이터는 DC 서보 모터를 사용했고, 구조는 패러럴 방식의 링크를 이용하여 안전성 및 토크의 증폭을 꾀했다. 또한 본 역감장치는 와이어 증폭방식으로 종래에 개발된 장치의 문제점인 토크손실, 마찰 손실 등을 최소화하여 원하는 힘을 그대로 반영시킬 수 있도록 설계하였다. 이번 실험에서는 자체 제작한 역감장치를 가상환경과 인터페이스하여 3차원 그래픽환경에서 여러 가지의 역감 실험을 행한 후 그 역감 제시 결과와 그 응용 방향을 제안한다.

## 2. 역감발생의 원리

인간 근-골격은 손가락 끝에서 측정된 동력학적인 임피던스(impedance)에 비례하여 관절이 일정한 강성(stiffness)을 발생함으로써 탄성력을 가지고 움직이므로 관절의 강성을 변화시킴으로써 손가락 끝의 임피던스가 지속적으로 변화하여 어려운 작업을 행하게 된다.[6] 그러므로 탄성체의 평행상태 위치  $\theta_{set}$  를 변화시켜 위치 제어로 힘 제어를 대신할 수 있다.

$$\tau = K_{joint}(\theta_{set} - \theta) - B_{joint} \dot{\theta} \quad (2-1)$$

여기서  $\theta$  와  $\theta_{set}$  은 각각 현재 위치와 원하는 목표 위치이다. 식(2-1)에서 점·탄성특성을 변화시켜 측

각장치의 각 관절에 임피던스 특성이 변화되어 인감이 느낄 수 있는 촉각의 제시를 할 수 있다.

가상환경 가운데서 가장 간단히 모델화 할 수 있는 가상 벽은 탄성(spring)과 점성(damper) 요소가 병렬로 구성되어 있으며 그림 1과 같이 모델화 될 수 있다. 역감장치의 매니플레이터가 가상 벽과 접촉한 순간에 발생하는 힘은 그림 3과 같이 점성과 탄성 요소에 의존한다. 1,

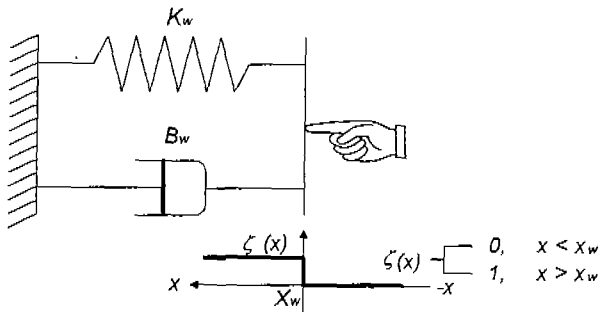


그림 1. 점성과 탄성으로 병렬 구성되었는 가상벽의 모델( $K_w$ 는 가상 강성,  $B_w$ 는 가상 점성,  $x_w$ 은 가상벽의 위치)

이때 매니플레이터의 탄성과 점성은 가상 벽의 탄성과 점성으로 식(2-2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{x}{x_d - x} \cdot K_w \quad (2-2)$$

$$B = \frac{x}{x_d} \cdot B_w$$

이것은 점·탄성 제어에 의하여 매니플레이터에 가상환경의 촉각을 전달 할 수 있다는 것을 의미한다.

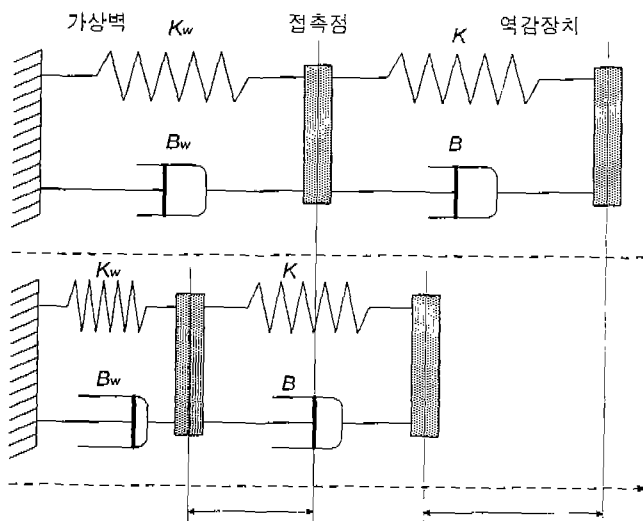


그림 2. 역감장치와 접촉이 이루어질 때의 가상 벽

### 3. 역감장치의 설계

#### 3.1 매니플레이터

역감장치는 컴퓨터 그래픽으로부터 만들어진 가상의 물체와 접촉이 일어났을 때, 실제 물체와의 접촉 느낌을 제시해 주어야 하며 또한 역감장치를 사용하는 사용자의 움직임이 방해되어서는 안된다. 이러한 것들을 고려할 때 역감장치 설계시 다음 사항을 기초로 설계하였다.[6]~[9]

- 제시할 수 있는 최대 힘 - 8[N]
- 백드라이브 마찰 - 30:1
- 관성 - 두랄미늄을 이용 제작
- 백러쉬 - 0.01[inch]이하 위치 진동
- 강성 - 서보루프의 강성이 크도록 제작

(여러 가지 강성 요소 중 역감장치의 강성의 한계를 결정하는 것은 결국 서보 루프의 강성이다. 따라서 안정된 서보루프로 얻을 수 있는 최대 강성은 디바이스의 관성, 디바이스 접촉시의 임피던스, 전달장치 비, 서보율(servo rate), 위치센서에 의해 결정된다.)

이상과 같은 사항들을 고려하여 제작된 역감장치는 액츄에이터로서 맥스 DC서보 모터를 사용하였고, 링크는 패럴럴 구조로 안정성 및 토크증가를 기하였고, 와이어 증폭에 의한 구동방식으로 토크손실이 최소화되도록 제작되었다. 자체 제작한 제어기를 사용하여 최대 8[N]의 힘을 제시할 수 있도록 설계하였다. 이 힘의 크기는 딱딱한 벽을 제시하기에 적은 양이지만 벽에 근접한 느낌을 제시할 수 있었다.

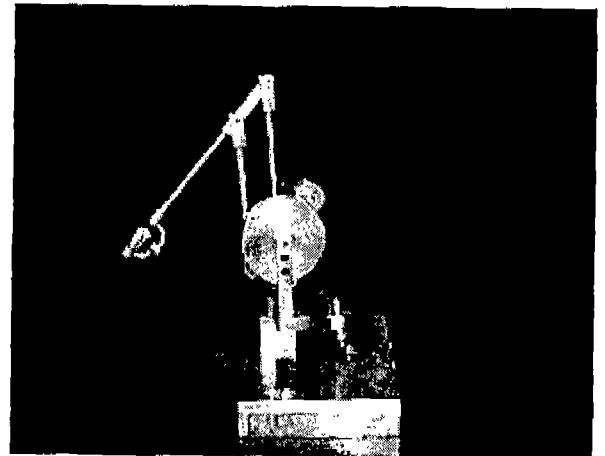


그림 3. 시험 제작한 역감 장치

#### 3.2 제어기 및 드라이버 구성

그림 4는 역감장치 액츄에이터의 제어회로 구성도

를 나타낸다. 관절의 위치 데이터는 500[p/r] 엔코더를 통해 검출되어 소프트웨어적으로 4채배 되므로 2000 [P/R]의 분해능을 갖는다. 관절의 위치 데이터들은 1[kHz]인터럽트 주기에 따라 XILINX XC4010에 의해 읽혀져 ISA슬롯을 통해 컴퓨터로 입력되어진다. 컴퓨터로 입력된 데이터는 내부 렌더링 알고리즘에 의해 위치좌표로 변환되어져 3차원 그래픽 처리부와 D/A출력부로 전송된다. D/A출력부로 들어온 데이터는 모터의 이동 변위량으로 환산되어 D/A컨버터가 전압으로 변환할 값으로, 12비트 전압 데이터가 D/A 컨버터를 거쳐 각 모터에 공급되어 디바이스에 느낌을 제시하게되고, 그래픽 처리부로 들어온 데이터는 OpenGL 라이브러리에 의해 화면에 현재 엔드포인트와 가상물체를 그려주게 된다. 제어 프로그램에서 인터럽트는 인터럽트 벡터를 생성한 후 하드웨어의 타이머에 의해 1000[Hz]의 주기로 발생된다.

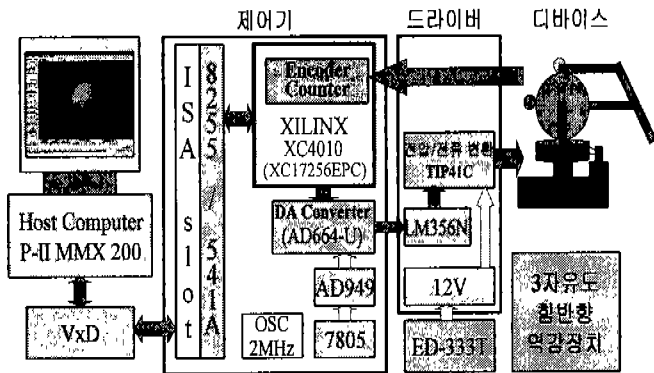


그림 4. 역감장치의 제어시스템

이 인터럽트 벡터에 의해 VxD는 엔코더의 값을 메모리에 저장하고, 필요시에 지정된 번지의 메모리에서 엔코더 값을 얻을 수 있고, 주기적으로 모터로 출력되는 값이 지정된 번지에서 데이터를 얻어 D/A 컨버터를 통해 모터를 동작하게 한다.

드라이버 회로는 D/A컨버터에서 전송되는 아날로그 전압 값을 LF356N에서 이득 조정 후 TIP41C에 의해 전류 값으로 변환되어 모터에 흐르는 전류를 조절하게 되어 민감한 힘의 제시가 가능하게 된다.

#### 4 역감 렌더링 알고리즘

역감 렌더링은 가상물체와 상호작용을 하는 역감장치를 제어하는 것이다. 그림 5는 역감 렌더러(renderer)의 입출력 관계를 나타낸다. 가상 점의 위치를 계산하기 위해서 디바이스의 각 자유도당 1개의 평면을 정의함으로써 간단한 방법으로 가상 점 운동의 경로(history)를 유지할 수 있다. 이 실험에서는 (x, y, z) 좌표 값을 갖는 하나의 점으로 나타내었다. 일단 가상 점의 위치가 결정되면 디스플레이 될 힘을 계산하기 위해 간단한 임피던스 제어 방법을 이용한다.



그림 5. 역감 렌더러의 입출력 개념도

먼저 물체의 강성을 제시하기 위해 식 (4-1)과 같은 작용점과 가상 점간의 거리에 비례하는 힘을 발생시키는 Hooke의 법칙[10]을 이용한다. 여기서  $K_w$ 는 물체 표면의 강성인자이다.

$$F_s = K_w(x - x_w) \quad (4-1)$$

둘째로, 가상물체의 점성력은 작용점의 운동과 가상 점의 운동이 비례한다는 데에 기준을 두어야 한다. 왜냐하면 표면의 수직벡터 N에 대한 운동만을 이용하기 위해서는 표면 접선방향의 마찰에 방해를 받아서는 안되기 때문이다. 식 (4-2)에서  $B_w$ 는 점성요소이다.

$$F_d = B_w((\dot{x} - \dot{x}_w) \cdot N)N \quad (4-2)$$

따라서 접촉하고 있는 가상물체 표면의 법선 방향의 힘은 다음과 같다.

$$F_n = F_s + F_d \quad (4-3)$$

그리고, 일단 활성화된 구속평면이 발견되면 새로운 가상 점의 위치를 결정하기 위해 위치에너지와 운동에너지의 차를 나타내는 Lagrange-multiplier를 사용한다. 식 (4-4)은 단위 강성을 갖는 가상 스프링에서의 에너지이다.

$$Q = \frac{1}{2}(x - x_p)^2 + \frac{1}{2}(y - y_p)^2 + \frac{1}{2}(z - z_p)^2 \quad (4-4)$$

여기서 (x, y, z)는 가상 점의 좌표이고, (x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>, z<sub>p</sub>)는 촉각장치 포인트의 좌표를 말한다. 구속은 식 (4-5)와 같은 평면을 추가함으로써 표현할 수 있다.

$$Ax + By + Cz - D = 0 \quad (4-5)$$

개발한 3 자유도 역감장치는 3개의 구속평면을 갖는다. 구속이 없는 경우 평면의 갯수는 0이 된다. 새로운 가상 점의 위치는 식 (4-6)의 L에 대한 6 개 변수에 대한 편미분 값을 0으로 두어 L을 최소화함으로써 찾을 수 있다. 이와 같이 Lagrange multiplier를 사용하면 쉽게 미분식을 얻을 수 있다.

$$L = \frac{1}{2}(x - x_p)^2 + \frac{1}{2}(y - y_p)^2 + \frac{1}{2}(z - z_p)^2 + l_1(A_1x + B_1y + C_1z - D_1) + l_2(A_2x + B_2y + C_2z - D_2) + l_3(A_3x + B_3y + C_3z - D_3) \quad (4-6)$$

이 식을 6 개의 변수 ( $x, y, z, l_1, l_2, l_3$ ) 에 대해 편미분한 결과를 행렬식으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & A_1 & A_2 & A_3 \\ 0 & 1 & 0 & B_1 & B_2 & B_3 \\ 0 & 0 & 1 & C_1 & C_2 & C_3 \\ A_1 & B_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ A_3 & B_3 & C_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix}$$

(4-7)

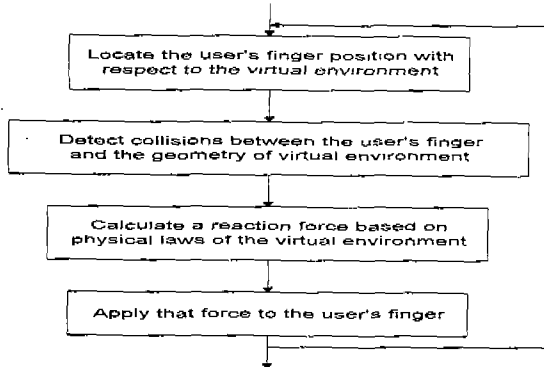
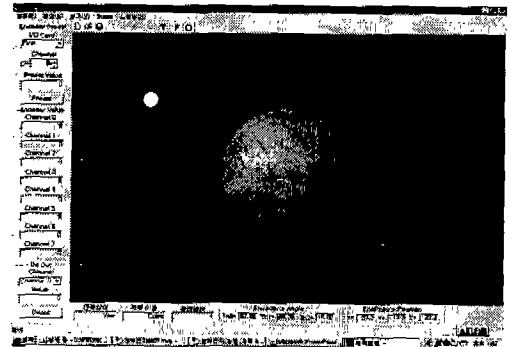


그림 6. 역감 렌더러의 내부 알고리즘 흐름도

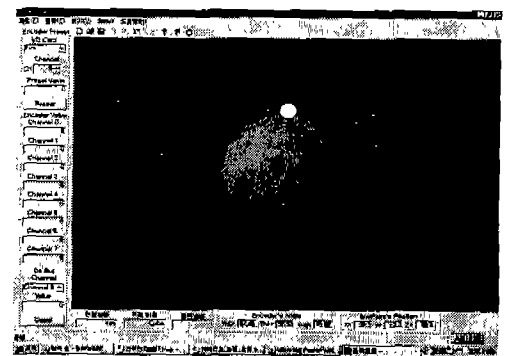
이 행렬 방정식은 사용하기 편한 특징을 가지고 있다. 식 (4-7)에서와 같이 좌우대칭 구조를 가지고 있는데, 좌측 상위  $3 \times 3$  행렬은 단위행렬, 우측 상위의  $3 \times 3$  행렬과 좌측 아래  $3 \times 3$  행렬은 역행렬 이어서 교환이 가능하다. 구속이 없는 경우 가상 점은 역감 장치의 작용점, 즉 엔드포인트 위치를 나타낸다.

## 5. 실험

제작된 매니플레이터를 이용하여 가상환경에서 사용자에게 어떤 감각을 제시할 수 있는지를 실험하기 위해 점성과 탄성 값을 조절하면서 이때의 느낌을 검출하였다. 우선 그림 7(a)는 가상환경과 접촉하지 않는 자유상태를 표시하고 있으며, (b)는 접촉하고 있는 상태를 표현하고 있다. 그림 8은 점성 값은 주지 않고, 탄성 값만 주어 가상 벽 효과를 검출하기 위해 파라미터  $k, b$  값을 조정 할 때의 모터에 출력되는 전압을 측정 한 것이다. 그림 9와 같이 단위 스텝함수와 같은 파형을 볼 수 있으며, 탄성을 줄이고 점성을 늘릴 경우 진폭 뺄과 같은 느낌을 검출할 수 있다. 그림 9와 같이 출력 상태는 램프함수와 비슷한 출력을 얻을 수 있다.



(a) 가상물체와 비접촉상태



(b) 가상물체와 접촉상태

그림 7. 3차원 가상물체 그래픽화면 (WIN NT V4.0, VC++ V6.0, Open GL사용)

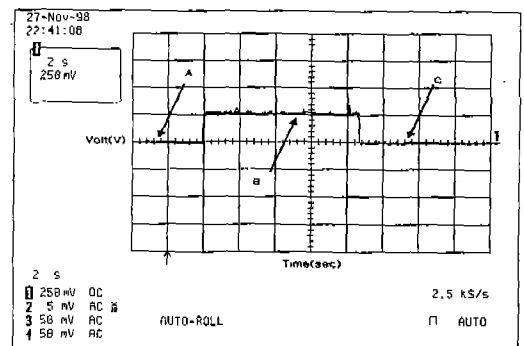


그림 8  $k=100, b=0$ 일때의 모터출력 (A: 비 접촉시, B:접촉시, C:비 접촉시)

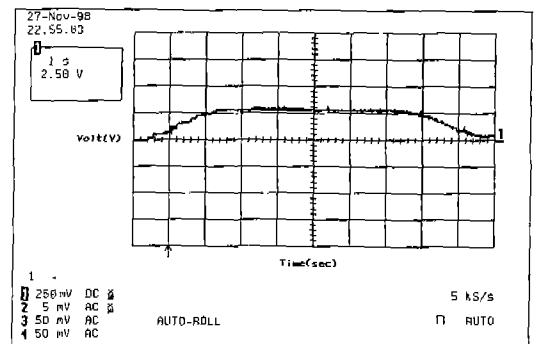


그림 9  $k=50, b=50$ 일때의 모터 출력

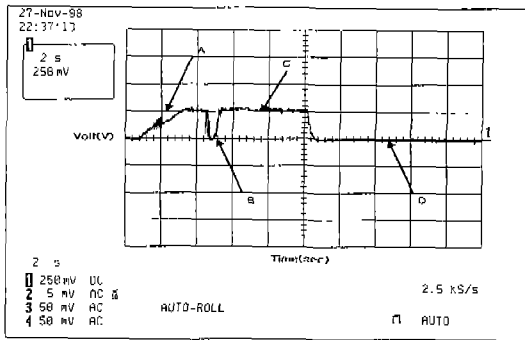


그림 10 버튼 느낌을 줄때의 출력

그림 10은 최대토크인  $\tau_{max}$ 를 줄이고 그 최대 토크 값을 초과한 경우 출력을 제거하는 방법으로 버튼을 누른 것 같은 느낌을 실현하였다. 그러므로 점성과 탄성 값을 변화시켜서 가상물체에 촉감정보를 부여할 수 있음을 실험으로 확인하였다. 그림 10의 A부분의 완만한 경사는 버튼 안의 내장된 스프링을 의미하고, 버튼이 눌렸을 때 딸각거리는 느낌, C부분은 계속해서 버튼을 누를 때, D부분은 버튼에서 손을 뗄 때를 의미한다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 직접 제작한 역감장치와 제어를 이용하여 실험을 실행하여 가상물체에 부여하는 점성과 탄성 값의 조절만으로 여러 가지 느낌을 지니는 가상물체의 설계가 가능함을 입증하였다. 아울러 점성값과 탄성값의 배열을 적용하여 한 종류의 물체로도 부분적인 여러 역감제시가 가능함을 푸쉬버튼 모델을 통하여 확인할 수 있었다. 역감 렌더러의 정밀하고 정확한 위치제시로 다양한 응용이 가능함을 알 수 있으며, 특히 본 역감장치의 응용분야는 수술 시뮬레이션, 원격제어용 로봇의 마스터로봇, 기타 느낌을 요하는 시뮬레이션 및 게임 등 폭넓게 거론할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] Thomas Massie and J.Kenneth Salisbury: "The PHANTOM haptic interface A device for probing virtual objects. In Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems." Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting. IL, November 1994.
- [2] Chang, S., Tan, H. Z., Eberman, B. E., and Marcus, "B.:Sensing, perception, and Feedback for Virtual Reality." In Proc. of Virtual Reality Systems Conference. Fall, 1993.
- [3] Craig Zille. "Haptic Rendering with the Tool-handle Haptic Interface." Master's thesis. Ma-

ssachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, May 1995.

- [4] H. Kazerooni, Tsing-Iuan Tsay, and Karin Hollerbach: "A ControllerDesign Framework for Telerobotic System." IEEE Trans. on Control Systems Technology. Vol. 1, No. 1, pp. 50-62, 1993.
- [5] Mandayam A. Srinivasan, "Virtual haptic environments: Facts behind the Fiction." In Proceedings of the Eighth Yale Workshop on Adaptive and Learning Systems. June 1994.
- [6] Neville Horgan: "The mechanics of multi-joint posture and movement control." Biomedical Cybernetics. Vol. 52, pp. 315-331, 1993.
- [7] Thomas H. Massie "Virtual Touch Through Point Interaction". The 6th Int. Conf. on Artificial Reality and Tele-Existence. JAPAN, November, pp. 19-38, 1996.
- [8] Thomas H. Massie " Design of a Three Degree of Freedom Force-Reflecting Haptic Interface." SB thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 1993.
- [9] R. E. Ellis, O. M. Ismaeil, and M. G. Lipsett "Design and Evaluation of a High-Performance Haptic Interface." Robotica. Vol. 4, pp. 321-327, 1996.
- [10] Craig Zilles and J.Kenneth Salisbury "A constraint-based god-object method for haptic display." In Proceedings of the IROS conference on Robotics. IROS, 1995.