2002년도 대한전기학회 전문대학교육위원회 학술대회 논문집 2002.6.30-7.2

촉각시스템을 위한 그래픽 변형 알고리즘

°강원찬*, 정원태*, 김영동*, 신석두**
조선대학교*, 조선이공대학**

Graphic Deformation Algorithm for Haptic Interface System

Won-Chan Kang*, Won-Tae Jeong*, Young-Dong Kim*, Suck-Doo Shin**
Chosun Univ.*, Chosun College**

Abstract - In this paper, we propose a new deformable model based on non-linear elasticity, anisotropic behavior and the finite element method and developed the high-speed controller for haptic control. The proposed controller is based on the PCI/FPGA technology, which can calculate the real position and transmit the force data to device rapidly. The haptic system is composed of 6DOF force display device, high-speed controller and HIR library for 3D graphic deformation algorithm & haptic rendering algorithm. The developed system will be used on constructing the dynamical virtual environment. we demonstrate the relevance of this approach for the real-time simulating deformations of elastic objects. To show the efficiency of our system, we designed simulation program of force-reflecting. As the result of the experiment, we found that the controller has much higher resolution than some other controllers.

1. 서 론

가상현실에서 보다 사실적인 그래픽 환경 구축에 많은 연구가 진척되고 있으며 특히 의사에게 수술 훈련을 시키고자 하는 목적의 다양한 수술훈련용 시뮬레이터가 연구되고 있다. 척수 추출훈련 같은 경우에는 손끝의 감각적인 훈련이 필요함으로 촉각장치를 도입해 임상훈련을 실현시키기도 하고 있다. 따라서 이와같은 자연스런 가상환경 구축을 위해서 많은 연구가 진행되었지만 현재까지는 인간의 몸을 구성하는 각종 장기같은 비선형 탄성체의 변형(deformation)을 시뮬레이션하는 것이 매우 난해하였다. 자동적으로 현실적인 변형을 만들어 내기 위한 정확한 물리 시뮬레이션을 하기 위해서는 고성능의 컴퓨터 하드웨어와 많은 계산 시간을 필요로 한다[1,2]. 그러나 그래픽 가속 기능을 지원하는 그래픽카드와 H/W의 성능 향상은 웍스테이션급에서나 가능하던 작업을 PC급에서 가능하게 하고 있다. 변형(deformation)기술은 변형이 가능한 물체를 실시간으로 변형을 허용하는 것은 매우 능률적인 동시에 물리적, 시각적 측면에서 매우 현실적이어야 한다. 이를 가능하도록 가상물체를 변형이 쉬운 형태의 재료 모델로 놓고 변형하는 다양하게 연구되었는데 대표적으로 spring-mass모델[3,4], free form deformation[5], linear elasticity with finite volume method[6], 또는 다양한 유한요소법[7,8]등이 있다. 본 논문에서는 개선된 방법으로 선형 탄성 모델의 결점을 보완한 비선형 탄성과 유한요소법에 기초를 둔 새로운 실시간 변형가능한 모델을 제안하고 실험하였다.

또한 가상세계의 반력을 PC에서 실시간으로 제공하도록 개발된 PCI 제어기를 통해 실시간 가상환경 제어를 하였다. 이는 촉각장치가 여러 개의 모터와 여러 개의 엔코더로 구성되어 있으므로 동시에 고속처리가 가능해야 하기 때문이다. 이를 위해 개발된 고속 제어기는 이를 장치들의 실시간 제어를 위하여 다중 D/A 출력과 엔코더 카운터, 인터럽트 타이머 1[kHz]이상을 지원하여, A/D 입력도 지원한다. 특히 엔코더 카운터는 엔코더 카운터에 여러 기능을 확장해 사용하도록 FPGA 설계기법을 도입 다양한 기능을 갖는 제어기를 개발하여 그래픽 변형을 연구하였다.

PC에서 생성한 가상물체에 여러 가지 재질정보를 부여하고, 이 재질정보를 바탕으로 충돌검출 및 힘 처리를 수행하므로 일반적으로 2대의 PC를 그래픽 제어용, 디바이스제어용으로 분리하여 실현하였지만 제안하는 고속제어기, 6자유도 촉각장치, 그래픽 디포메이션 알고리즘으로 구성된 가상현실 시스템을 이용해 다양한 그래픽 변형 실험과 안정된 출력특성의 고찰로 PC베이스 개인형 가상현실 시스템 개발에 기여를 할 것으로 생각되며 다양한 응용을 기대할 수 있다.

2. 시스템 설계

2.1 6자유도 촉각장치

제작된 촉각장치는 액츄에이터로는 맥슨 DC서보 모터를 사용하였고, 링크는 일반적인 패럴럴 구조로 안정성 및 토크증가를 기하였고, 와이어 증폭에 의한 구동방식으로 토크손실이 최소화 되도록 제작하였다[9,10].

와이어 증폭 방식은 정·역의 급속한 변환시 진동을 흡수하며 일정한 와이어 궤적을 따라 모터가 움직이므로 마찰손 및 백러쉬 해결에 가장 알맞은 구조였다. 힘의 제어를 위해 자체 제작한 제어기를 사용하여 최대 8[N]의 힘을 제시할 수 있도록 설계하였다. 이 힘은 완전구속을 제시하기에 적은 양이지만 가상물체의 느낌을 제시하는데 충분하다. 그림 1은 시험 제작한 촉각장치의 사진을 보인다.

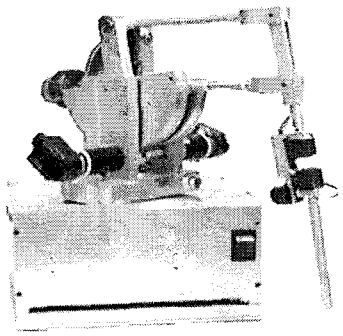


그림 1 6자유도 촉각장치
Fig. 1 6DOF haptic interface

2.2 PCI형 제어기

제어기는 ISA 포트대신 PCI 포트를 사용하므로 기존 제어기에 비해 15배 이상의 속도 향상을 가져왔다. ISA 제어기는 8255를 통해 D/A칩 등에 제어신호와 데이터를 전달하므로 데이터 처리중에는 다른 작업에 지연이 발생하였고, 이로 인한 딜레이가 실시간 처리에 지장을 주었다. 따라서 이의 개선을 위해 통신속도가 비교적 빠른 방식인 PCI, USB, IEEE1394등의 방법이 제안되었고, 이를 이용한 제어기의 개발이 대두되었다. 본 연구에서는 안정성이 증명된 PCI 브리지 칩인 PLX 9050을 이용하여 PCI 제어기를 구현하고, 주변장치와의 인터페이스를 통해 실시간 처리를 구현하였다. 완성된 제어기의 구성도는 그림 3을 참고하기 바란다.

제어기에서는 여러 촉각장치 출력을 위한 12비트 분해능의 D/A출력 칩인 AD664를 2개 부착하여 8채널을 구현하고, 포텐션미터 사용을 위한 AD입력은 AD1674를 이용 2채널을 설계하였다. 이들 칩에 기준전압을 공급하고자 레믹람다사의 DC-DC컨버인 PPD10-5-1515를 사용하고 불안한 PC의 전압을 안정시키고자 앞단에 LM3276T를 사용하여 기준전압을 안정시켰다. 32비트 8채널의 엔코더 카운터를 실현시키고자 FPGA로 엔코더 카운터 전용 칩을 구현하여 이용하였다. 이는 보드의 크기를 줄이고, 여러 가지 카운터 기능 즉, Z(I)상 검출, 채배, 기타기능 등을 쉽게 구현할 수 있기 때문이다.

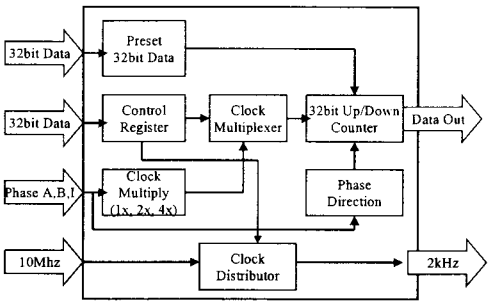


그림 2. FPGA의 구성도
Fig. 2 Diagram of FPGA

FPGA의 세부적인 블록의 구성은 그림 3에 보인바와 같고, 컴파일 된 블록의 게이트 수와 속도를 고려하여 XC4006E를 사용하였다. FPGA 작업은 XILINX 파운데이션 시리즈를 이용하여 VHDL로 코딩하고, 롬라이팅은 일반적인 XACT툴을 사용하는 대신 ALL-11 롬라이터를 이용 ATMEL사의 Serial EPROM인 AT17C256에 직접 프로그램을 써넣은 과정으로 수행되었다.

FPGA의 구성은 Preset Register, Control Register, Clock Multiply, Clock Multiplxer, Phase Direction, Un/Down Counter, Clock Distributor의 7가지부분으로 구성되어 있으며 사용자에 의해 VHDL 코딩을 전환함으로서 여러 가지 기능의 추가와 삭제 등이 가능해졌다.

2.3. 시스템 인터페이스

그림 3의 시스템 구성도에서는 윈도우즈환경에서 촉각장치를 안정하게 동작시키도록 우선 순위가 높은 가상장치 드라이버(VxD)를 제작하고, 3D 그래픽 출력은 프로젝터에 투사하는 형식을 취하였다. 드라이버는 6자유도 촉각장치 안에 탑재된 구조로 전류제어기법이 이용되었고, 디바이스의 위치는 엔코더 6개의 출력을 받아 가상장치 드라이버에서 엔드포인터의 위치를 실시간 계산하고 힘처리 알고리즘을 거쳐 계산된 힘이 다시 디바이스로 피드백하게 되는데 기존 시스템에 비해 PCI 제어기를 사용함으로 장치들 간의 통신 딜레이에 의한 오동작이 줄어들어 안정성이 크게 향상 시켰다.

촉각장치로 힘을 출력하기 위해서는 제어기에서 부하에 흘릴 전류 값을 전압형태로 출력하므로 이 전압 신호를 받아 모터에 흐르는 전류를 제어하는 드라이버 회로가 필요하다. 전류를 제어하는 칩은 기존에 사용하던 LF356과 TIP-41C의 조합방법을 개선하여 LM324와 D526칩의 조합으로 전환, 발열현상 및 불안전영역을 극복한 안정된 전류 제어를 실현 왜란 및 토크개선에 우수한 특성을 나타냈다.

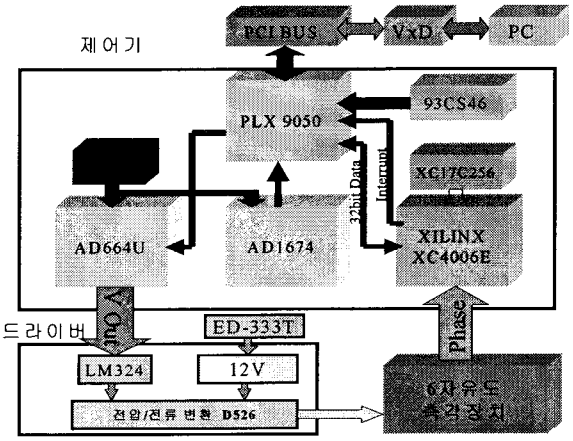


그림 3. 시스템 구성도
Fig. 3 Block diagram of system composition

3. 그래픽 디포메이션

변형 모델링을 작업하는 것은 컴퓨터그래픽을 포함하여 기하학적 모델링, 컴퓨터 비전, 수학적 계산, 의학, 공학과 같은 많은 분야를 연구해야 한다. 특히 물리기반 모델링 기술과 부드러운 조직(신경, 근육(soft tissue))과 그 밖의 높은 비선형성 물질의 모델링 변형을 위한 역학 변형에 초점을 두어 비선형 탄성과 유한요소법에 기초를 둔 새로운 실시간 변형이 가능한 모델을 제안한다. 유한요소법을 통해 선형 탄성 이론과 그것의 실행을 소개하고 "작은변위"의 전제가 지속되지 않을 때 안는 문제의 해결에 주안점을 두었다. 이 문제를 St Venant-Kirchhoff 탄성과 비압축성 제약에 의해 해결하고자 한다[7,8].

선형 탄성 모델에서 단지 작은 변형(deformation)과 변형률(strain) 발생을 실시간 응용 프로그램에서 성공적으로 사용한 예도 있다. 질량-스프링(mass-spring)모델을 이용한 시스템이 단순하기 때문에 모델의 변형에 널리 이용되었다[3,4]. 하지만 강성 파라미터와 모델링 비압축성을 결정하는 어려움 등이 실시간 구현에 많은 제약을 두고 있다. 유한요소법(FEM)은 연속체 모델의 이산화를 위한 정밀하고 다양한 효과를 처리할 수 있는 기술이라 여겨지는데 특히 비선형 탄력성을 모델링 하는 것에 적합하다. 물론 자주 응용프로그램에 응용되고 있기는 하지만 수학적인 복잡성으로 인한 계산 때문에 컴퓨터그래픽과 애니메이션 등으로 제한되고 있다.

3.1 재료모델(material models)

탄성 재료의 속성이 응력(stress)과 변형률(strain) 간의 구성법칙사이의 관계로 정의된다. 실험실과 생체실험으로부터 얻은 응력-변형률(stress-strain)데이터를 기초로 제안된 몇몇 모델과 생물역학으로 유기적인 티슈의 속성이 활발하게 연구되어지고 있다. 측정기술의 한

계 때문에 그 모델들이 엄밀하게 유효하다고 할 수는 없다. 단지 본 연구에서는 세 개의 서로 다른 다양한 물질적인 모델을 함축하여 나열한다. 첫째 모델은 Mooney Rivlin 재료[11,12]이다.

$$\psi(F) = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) + a(I_3 - 1) - (C_1 + 2C_2 + a)\ln I_3 \quad (1)$$

C_1과 C_2는 경직성을 제어하는 상수로 a는 압축성을 결정한다. 이모델은 상대적인 선형 변형률-응력(strain-stress)커브를 보인다. 더 높은 비선형성에 의해 종종 생물학적인 티슈의 특징이 나타난다. 그러한 재료가 늘어날 때 극적으로 경직성이 증가한다. 본 연구에서 사용하는 두 번째 모델인 veronda재료[13,14]는 지수 함수를 가지고 이 비선형성을 나타낸다.

$$\psi(F) = 2\alpha exp(I_1 - 3) + \alpha\beta(I_2 - 3) + \alpha I_3 - a\ln I_3 \quad (2)$$

여기에 α는 전체적인 경직성, 그리고 β는 경직성증가율를 제어한다. 비선형 외에 많은 티슈는 그들의 현미경적인 섬유 구조 때문에 anisotropy를 보인다. 따라서 여기서는 섬유 보강 모델을 사용한다.

$$\lambda_f^2 = f^T C f \quad (3)$$

$$\psi(F) = \alpha exp(\beta(\lambda_f^2 - 1)) - \alpha\beta\lambda_f^2 \quad (4)$$

여기에 비선형성을 추가하면λ_f는 섬유방향 f를 따르는 섬유 신축성(stretch),α 와β 는 Veronda 모델과 유사한 물질적인 상수이다. 단독으로 그것을 사용하는 것보다 보정을 위해 Veronda이나 Mooney Rivlin 재료 위에 이 모델을 첨가한다.

사용하는 모든 모델에서 에너지는 I_3가 0에 대한 볼륨압축율은 무한대로 진행시킬 수 있다. 이것은 요소 반전 현상을 막는 필수적인 속성이다. 또한 위의 모델은 거의 압축할 수 없도록 실행될 수도 있다.

3.2 유한 요소 모델링

앞에서 소개된 유한 요소 이론을 가지고 St venant-kirchhoff 탄성 모델을 나타내면 식 (5)와 같다.

$$W(T_i) = \sum_{j,k} U_j^t [B_{jk}^{T_i}] U_k + \sum_{j,k,l} (U_j C_{jkl}^{T_i})(U_k \cdot U_l) + \sum_{j,k,l,m} D_{jklm}^{T_i} (U_j \cdot U_k)(U_l \cdot U_m) \quad (5)$$

여기서 식$B_{jk}^{T_i}, C_{jkl}^{T_i}, D_{jklm}^{T_i}$는 강성 파라미터(stiffness parameters)라고 부르고, 다음과 같이 주어진다. $B_{jk}^{T_i}$는 (3x3) 대칭 행렬(어떤 것은 에너지의 선형 성분에 해당한다)로

$$B_{jk}^{T_i} = \frac{\lambda}{2}(\alpha_j \otimes \alpha_k) + \frac{\mu}{2}[(\alpha_k \otimes \alpha_j) + (\alpha_j \cdot \alpha_k) Id_3] + (\frac{\lambda^L - \lambda}{2} + \mu^L - \mu)(a_0 \otimes a_0)(\alpha_j \otimes \alpha_k)(a_0 \otimes a_0) \quad (6)$$

단, $C_{jkl}^{T_i}$는 벡터이다.

$$C_{jkl}^{T_i} = \frac{\lambda}{2}\alpha_j(\alpha_k \cdot \alpha_l) + \frac{\mu}{2}[\alpha_l(\alpha_j \cdot \alpha_k) + \alpha_k(\alpha_j \cdot \alpha_l)] + (\frac{\lambda^L - \lambda}{2} + \mu^L - \mu)(a_0 \otimes a_0)(\alpha_j \otimes \alpha_k)(a_0 \otimes a_0)\alpha_1 \quad (7)$$

그리고 $D_{jklm}^{T_i}$는 스칼라이다.

$$D_{jklm}^{T_i} = \frac{\lambda}{8}(\alpha_j \cdot \alpha_k)(\alpha_i \cdot \alpha_m) + \frac{\mu}{4}(\alpha_j \cdot \alpha_m)(\alpha_k \cdot \alpha_l) + \left(\frac{\lambda^L - \lambda}{8} + \frac{\mu^L - \mu}{4}\right)(a_0 \cdot \alpha_j)(a_0 \cdot \alpha_k)(a_0 \cdot \alpha_l)(a_0 \cdot \alpha_m) \quad (8)$$

마지막 식은 재료의 이방성인 행동을 나타내는 각각의 강성 파라미터이다. 이동 U_p에 대해서 탄성 에너지 $W(T_i)$으로 유도된 4면체 내부의 각 P_p점에 적용된 힘을 얻으면 식 (9)와 같다.

$$F^p(T_i) = 2\sum_j [B_{Pj}^{T_i}] U_j + \sum_{j,k} 2(U_k \otimes U_j) C_{jkp}^{T_i} + (U_j \cdot U_k) C_{jkp}^{T_i} + 4\sum_{j,k,l} D_{jklm}^{T_i} U_l U_k^t U_j \quad (9)$$

탄성 힘을 나타내는 $F_l^p(T_i)$의 첫째 식은 선형 탄성 경우와 일치하고, 다음 부분은 큰 이동을 위한 tensor-mass모델의 일반화를 이루어 객체변형에 이용한다.

3.3 가상환경 모델링 알고리즘

힘 계산 알고리즘은 프락시(proxy)와 God-Object 방법에 의해 계산된다[9,10,15]. 힘 계산을 위해서 충돌 검출이 선행되어야 하는데 기존에 제시된 방법인 바운딩 스피어(Bounding Sphere)방법은 빠른 검출을 이루었지만 충돌점의 정확한 위치는 검출하지 못하여 OBB Tree를 사용하여 정확한 충돌위치를 계산하는 새로운 알고리즘인 PQP알고리즘을 적용하여 PC급에서 충돌위치를 실시간으로 검출하여 안정된 힘 처리를 하도록 개선되었다.

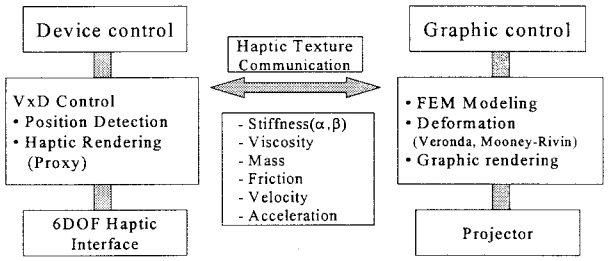


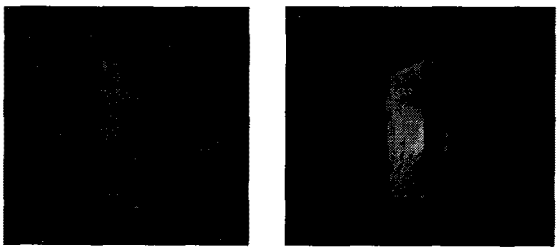
그림 4. 알고리즘
Fig. 4 Algorithm

시뮬레이터에서는 크게 3부분의 쓰레드로 구성되었고, 디바이스를 제어하는 부분은 가상장치 드라이버에서 관리한다. 여기서는 위치검출과 충돌 검출 알고리즘에 의해 계산된 힘을 디바이스로 출력할 힘으로 변환해 디바이스를 관리한다. 그래픽 제어부분에서는 얻어진 가상점과 가상객체를 유한요소법에 의한 모델링을 통해 자연스러운 그래픽을 구현하고 이를 프로젝터에 30[Hz]간격으로 투사한다.

두 제어기를 관리하는 중앙제어부분에서는 양쪽에서 필요한 각종 재질정보(강성, 점성, 질량, 등등)를 관리하여 자연스러운 그래픽 묘사와 촉각렌더링을 구현하도록 한다.

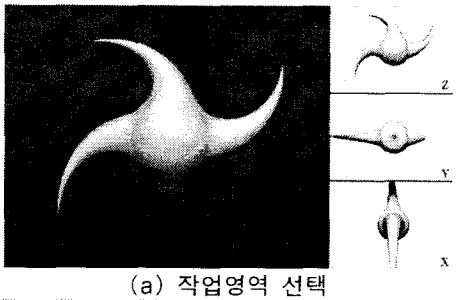
3.4 그래픽 변형

그림 5는 유한요소법에 의한 가상객체의 실시간 변형을 보여주는 그림으로 (a)는 변형전의 평평한 가상객체이고, (b)는 적당한 힘을 주어 실시간 변형의 예를 보인것이다.

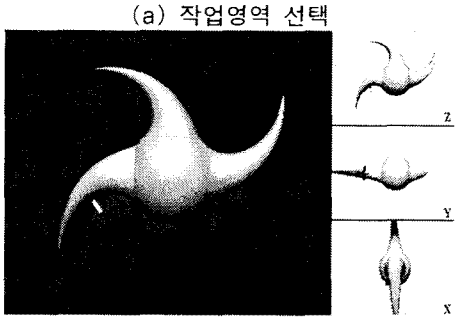


(a)변형전 (b)변형후

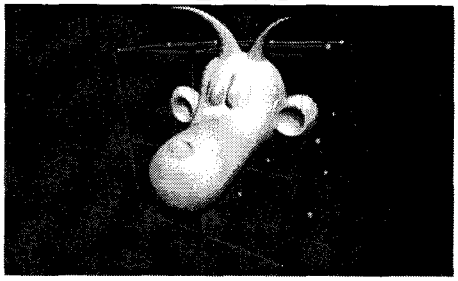
그림 5. 유한요소법에 의한 그래픽 변형
Fig. 5 Deformation with FEM



(a) 작업영역 선택



(b) 변형의 강도



(c) 완성된 가상객체

그림 6. 그래픽 변형
Fig. 6 Graphic deformation

그림 6은 촉각장치를 이용해 3차원 가상객체를 생성/편집하는 과정을 보여준다. (a)는 변형을 발생시킬 영역을 선택하고, (b)는 선택된 영역을 신장시켜 새로운 형태를 만드는 과정이다. (c)는 원하는 3차원 가상객체를 완성한 그림이다.

3.5 출력 특성 실험

가상물체의 3 차원 그래픽 구현을 위해 Direct X 그래픽 라이브러리를 사용하였으며 그래픽 시뮬레이션은 Visual C++ 6.0으로 작성하였다. 본 연구에서는 폴리곤의 수를 10,000개 이내로 제한하였다. 이는 PC를 가지고 계산을 수행할 때 1[kHz]의 햅틱 렌더링 계산에 대응시키기 위해서 제한을 해야했다. 다음 그림 7은 가상환경 내에 위장 모양의 그래픽을 만들고 변형 및 힘 반영 실험을 하는 시뮬레이션 화면을 나타낸 그림이다. 사용자는 역감장치 끝을 잡고(그림의 작은 황색 원) 가상 위장을 인터페이스 한다.

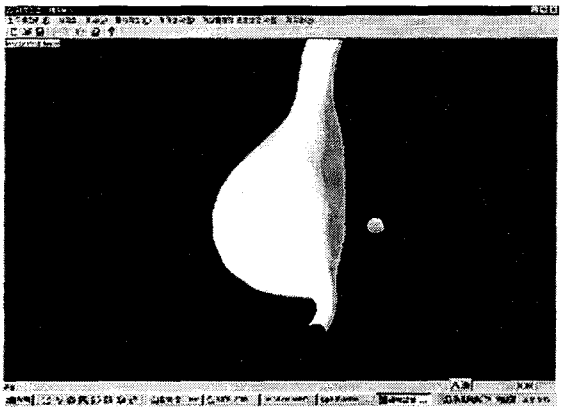


그림 7. 실험 프로그램
Fig. 7 program of experiment

그림 8은 먼저 폴리곤 형태의 객체를 로딩하는 FEM 모델링하기 위한 다이얼로그 박스를 보여주고 있다. 텍스쳐 파일을 지정하여 비쥬얼한 질감을 표현하고 입력된 모델을 확장자 *.nff인 전용 파일 포맷형태로 지정된 파라메터에 따라 계산과정을 거쳐 보관을 하고 이를 변형을 하는 초기 구동화면이다.

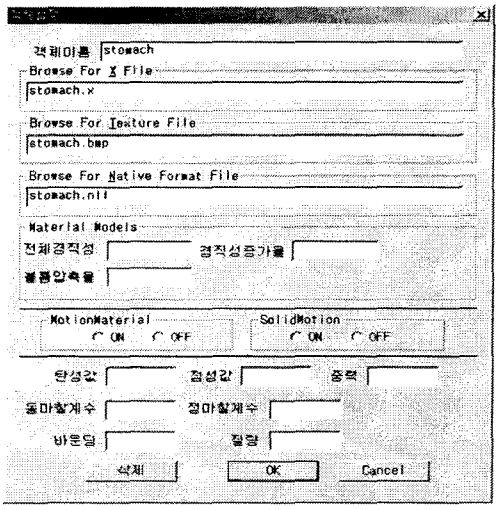


그림 8. 파라미터 입력용 다이얼로그 박스
Fig. 8 Dialog box for parameter input

가상객체의 재질감 반향은 LeCroy 오실로스코프 9354AM으로 D/A의 전압 출력을 검출하였다. 그림 9에 PCI제어기를 사용할 때의 출력을 나타낸 것으로 X,Y,Z축으로의 힘 분배와 출력의 안정성이 있는 것을 증명해 주고 있다. 1번 채널은 X축, 2번 채널은 Y축, 3번 채널은 Z축으로 Y축에 대한 힘이 크게 나타나고 있다. 실험한 가상객체는 점성이 약간 있는 딱딱한 물체(강성: 10[N/m], 점성: 2[N/m/s] ,동 마찰계수: 1, 정 마찰계수: 1, 바운딩: 0.1, 질량: 200g)로 나타내었기 때문에 중간이후 출력은 가상 벽과 같은 효과를 나타낸다. 여기에 점성 값을 크게 하면 다른 느낌을 검출할 수 있다.

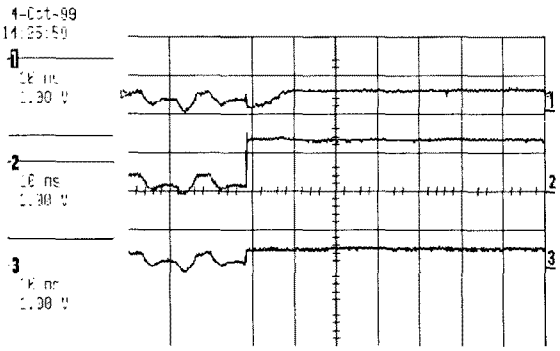


그림 9. 제어기의 출력 특성
Fig. 9 Output characteristic of controller

4. 결 론

본 논문에서는 기존 장치의 출력속도 및 안정성을 향상시키기위해 PCI 제어기를 적용해 하드웨어적인 안정성을 향상시켜 실시간 처리할수 있는 가상객체의 크기를 20,000 폴리곤 모델까지 향상 시켰고, 아울러 의료용 시뮬레이터를 위한 변형 가능한 모델의 제시를 통해 효과적이고 사실적인 그래픽 변형을 실험을 통해 증명하였다.

그래픽 변형에서 더 복잡한 모델을 다루기 위해서는 햅틱디바이스와 그래픽 랜더러등을 분산처리기법을 적용할 필요가 있으며 앞으로는 대부분의 계산이 유한요소법에서 지역적이므로 병렬처리기술을 알고리즘에 적용하여 속도향상을 할 필요가 있다. 촉각장치의 제어에 있어서 인간이 느낄 수 있는 최대분해능인 1[kHz]를 만족하도록 시스템을 구성해야한다. 1[kHz]의 인터럽트 타이밍에 맞춰 촉각장치의 끝점을 얻고, 그래픽 좌표계로 옮겨 충돌 검출을 하고, 매 주기마다 현재 상태를 그대로 스테레오 그래픽으로 출력하고, 다시 반향 될 힘을 계산하여 다음 스텝으로 옮기기 전에 출력해야하기 때문이다. 하지만 현재까지의 연구결과 그래픽 모델이 20,000개 이내의 폴리곤으로 구성된 모델이라면 1[kHz]인터럽트 타임 내의 처리가 가능하였으며 해상도를 640x 480에 Direct X를 지원하는 비디오 카드가 장착되었다면 CPU의 계산을 분담하여 충분히 구현가능 함이 PCI제어기를 장착한 시스템의 실험을 통해 증명되었다.

앞으로는 PCI제어기에 실제 인간이 느끼는 감각을 데이터베이스화하여 여러 시뮬레이터 즉, 수술이나 원격제어, 스포츠 시뮬레이터, 재활기구 등에 응용함으로서 보다 완벽한 가상세계의 느낌을 사용자에게 제공할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

[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 Tele operator Systems", Proc. of the ASME Winter Annual Meeting. IL, 1994, November.

[2] Diego C. Ruspini, Krasimir K., Oussama K., "Haptic Interaction in Virtual Environments", Proc. of the IROS97, pp. 128-133, 1997.

[3] F. Boux de Casson and C. Laugier, "Modeling the Dynamics of a Human Liver for a Minimally Invasive Surgery Simulator", MICCAI'99, Cambridge UK, 1999.

[4] D. Lamy and C. Chaillou, "Design, Implementation and Evaluation of an Haptic Interface for Surgical Gestures Training", Intl. Scientific Workshop on Virtual Reality and Prototyping, pp. 107-116, Laval, France, June 1999.

[5] C. Basdogan, C. Ho, M. A. Srinivasan, S D. Small, and S. L. Dawson, "Force Interaction in Laparoscopic Simulation: Haptic Rendering Soft Tissues", Medecine Meets Virtual Reality (MMVR'6), pp. 28-31, San Diego CA, january 1998.

[6] G. Debunne, M. Desbrun, A. Barr, and M.-P. Cani, "Interactive multiresolution animation of deformable models", 10th Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation (CAS'99), September 1999.

[7] Morten Bro-Nielsen and Stephane Cotin, "Real-time Volumetric Deformable Models for Surgery Simulation using Finite Elements and Condensation", Eurographics '96. ISSN 1067-7055, pp. 57-66. Blackwell Publishers, 1996.

[8] S. Cotin, H. Delingette, and N. Ayache, "Real-time elastic deformations of soft tissues for surgery simulation", IEEE Transactions On Visualization and Computer Graphics, Vol. 5 No. 1 pp. 62-73, January-March 1999.

[9] Won-Chan Kang, Suck-Doo Shin, Young-Dong, Kim, "Development of PC-based 6DOF Force Display System", Journal of KIEE, Vol. 50, No. 5, pp. 211-217, 2001.

[10] Won-Chan Kang, Suck-Doo Shin, Young-Dong, Kim, "Force-display system using wire-tension", Journal of KIEE, Vol. 50P, No. 4, 2001.

[11] Ciarlet., P. G., "Mathematical Elasticity", North-Holland, 1998.

[12] Mooney M., "A theory of large elastic deformation", Journal of applied physics, Vol. 11 pp. 582-592, 1940.

[13] Pioletti, D. P., Rakotomanana L. R., Benvenuti, J.F., Leyvraz P.F., "Viscoelastic constitutive law in large deformations: application to human knee ligaments and tendons", Journal of Biomechanics Vol. 31 pp. 753-757, 1998.

[14] Veronda D. R., Westmann R. A., "Mechanical characterization of skin-finite deformation", Journal of Biomechanics Vol 3, pp. 111.124, 1970.

[15] Zilles C., Salisbury J. K., "A constraint based god-object method for haptic display," Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and System, 1995.