

PC기반의 6자유도 촉각장치의 개발

論 文

50D-5-1

Development of PC-Based 6DOF Force Display System

申碩斗*·姜園贊**·金桐玉**·金源培***·金永炯§

(Suck-Doo Shin · Won-Chan Kang · Dong-Ok Kim · Won-Bae Kim · Young-Dong Kim)

Abstract - In this paper, we have developed the 6 DOF force display system to be based on the single PC. The system is composed of the force display device, the force reflecting rendering algorithm and the high-speed controller. The previous systems had a problem, that must adopt high performance workstation or 2-PC in order to control the graphics speedily and stably. In this paper, it is possible to improve the problem as to develop its exclusive controller and new rendering algorithm. The proposed new rendering algorithm is based on the Proxy algorithm, which can convert information of the position, the velocity, and the haptic information into the force-data. Especially, as to use the proxy algorithm, we can construct dynamical virtual-environment with the elasticity, the viscosity, the mass, and the friction force. As the result of the experiment, we found that our system has much superior characteristics than some other haptic interfaces, because it can control of 30,000 polygon model constructed virtual object with 1[kHz] haptic interrupt cycle and 20[Hz] graphic interrupt cycle in the single PC based system.

Key Words : Haptic, Force-display system, Haptic rendering, Proxy algorithm, Virtual reality

1. 서 론

가상현실에서 인간에게 현실감을 제공하기 위한 방법은 그래픽적인 요소에 치중되어 왔다. 이는 외부에서 받아들이는 수많은 정보들 중 약 70%는 시각에 의해 흡수되기 때문이었다. 대표적인 가상현실 시스템은 일리노이드 대학에서 개발된 CAVE (Cave Automatic Virtual Environment)[1]로 이 시스템은 가상세계를 구축하고 모델링하는 작업을 그래픽전용 슈퍼컴퓨터에 의해 계산하고 고해상도 프로젝트를 4면에서 투사하여 1평정도의 공간을 완전한 가상세계로 만들 수 있는 능력이 있으며 이 가상세계를 탐험하기 위해 입력장치인 3D 마우스나, HMD에 헤드 트래킹장치를 부착하거나, Cyber Glove등을 이용하였다. 그러나 이 시스템은 시각과 청각에 국한되어 완전한 몰입감 구현에는 문제가 있었다. 따라서 보다 몰입감을 배가시키도록 촉각에 대한 관심이 높아가고 있다. 최근 연구들 중에 촉각정보를 포함한 가상환경을 구축하기 위해 MIT의 팬텀(PHNTOM)이라는 촉각장치가 개발되어 현재 수술 시뮬레이터 등에 널리 이용되고 있다[2].

일반적으로 가상세계 구현에 있어서는 시각적 요소는 가

상세계에 완전한 몰입감을 얻기 위해 동굴형, 돔형 등의 입체적인 그래픽 투사방법이 제안되고 있으며, 청각 분야에서는 3차원 오디오 기술의 적용으로 많은 발전을 이뤘다. 그러나 촉각분야의 연구는 로봇의 손끝에 부착하는 촉각센서, 모터나 리니어 액츄에이터를 이용한 힘 반향 기술들이 적용되어지고 있다. 현재 상업화된 촉각장치로는 앞서 제시한 팬텀이 있으나 이는 인간 손목을 기준으로 설계되어 제시할 수 있는 공간이 제한되고, 1[kHz] 인터럽트 처리를 위해 그래픽변환에서의 계산량이 많아 PC급에서의 구현이 제한되었다. 그러므로 이를 개선하기 위해 여러 장치가 개발되고 있으나 만족할만한 성과를 이루지는 못했다[3].

본 연구에서는 단일 PC에서 데스크탑형 가상현실 시스템을 구현하는데 있어서 하드웨어 구성과 촉각 처리 알고리즘에 대한 이론적 정립과 실험을 통해 가능성을 증명하였다. 우선 제시공간의 확장이 가능하도록 카티아(CATIA)를 이용해 시뮬레이션 후 두랄미늄을 소재로 제작되어 관성이나 백러쉬, 마찰을 최소화하였다. 1[kHz] 고속제어를 위해 FPGA(Field programmable Gate Array)를 이용 전용 제어칩을 설계하고, 모터까지 제어가 가능하도록 통합보드로 설계하여 제어기 자체는 100[kHz]까지 처리가 가능해졌다. 무엇보다 PC에서 구현의 문제는 그래픽처리에 있어서 가상객체의 폴리곤 수가 증가하면 계산량이 많아져 안정된 처리와 실시간 처리가 확립되지 않으므로 대부분 워크스테이션을 이용하거나 2대의 PC로 분할 처리해야 하는 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 Direct X 그래픽 라이브러리를 이용 30,000개의 폴리곤으로 구성된 가상객체를 가지고 실험한 결과 1[kHz]의 실시간 처리가 가능하였다. 기존에 사용하던 햅틱

* 正 會 員 : 朝鮮理工大 電氣科 教授 · 工碩

** 學生會員 : 朝鮮大 制御計測工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 松源大 電氣科 助教授 · 工博

§ 正 會 員 : 朝鮮大 情報 · 制御計測工學科 教授 · 工碩

接受日字 : 2000年 5月 24日

最終完了 : 2001年 4月 18日

렌더링 알고리즘을 개선하여 재질감처리까지 구현하는 프락시 알고리즘을 햅틱 렌더링에 적용 재질감처리까지 수행하는 촉각시스템을 개발하였다.

2. 촉감의 모델링

인간의 역감기관은 근육이나 힘줄, 관절 등에 있는 신장 수용기관을 말한다. 이 기관에서는 외력에 대한 근육이나 관절의 위치변화를 감지하고 각각의 결합력에 대한 신호를 신경계통을 통해 뇌로 보낸다. 뇌에서는 이 신호를 해석하여 외력에 의해 발생한 접촉력과 수족의 위치를 추정한다. 가상물체의 존재 여부와 형상 등에 관한 정보는 이와 같은 역감기관을 통하여 곧바로 감지된다. 촉각장치는 인간 신체의 일부분에 외력을 제공함으로써 역감기관을 자극시킨다. 따라서 근육의 운동감각 및 힘의 감각들을 액추에이터의 토크로 표현함으로써 가상 물체를 감지 및 조작할 수 있다[4].

2.1 점·탄성 모델링

기본적인 역학법칙으로부터 단단한 물체와 상호작용 하였을 때 느낄 수 있는 반응력은 강성 및 점성의 영향이 크게 작용한다. 첫째, 물체의 유연성을 결정하는 강성의 반응력은 식 (1)과 같이 표현할 수 있는데 이는 물체가 갖는 유연성을 기계적인 스프링 에너지로 변환함으로써 효과적으로 모델링 할 수 있고 강성은 탄성의 역수이다. 따라서 눌러진 물체의 표면에 의해 발휘된 반응력은

$$f_K = K(x_v - x_h) \quad (1)$$

여기서 $(x_v - x_h)$ 는 이동 변위이고, x_v 는 가상점의 위치, x_h 는 엔드 포인터, K 는 물체의 강성을 말한다. 가상물체를 움직이기 위해서는 그 모델이 압축력이 없는 경우, 즉 강체로 표현함으로써 효과적으로 모델링 할 수 있다.

둘째, 가상물체의 속도차에 비례하는 점성 인자 B 가 있는데, 이것은 가상물체와 작용점이 접촉하였을 때의 에너지 방출효과를 나타낸다. 즉, 댐퍼 요소를 추가함으로써 물체가 갖는 딱딱한 정도를 표현 할 수 있다. 따라서 이때의 반응력은

$$f_B = B((\dot{x}_v - \dot{x}_h) \cdot \bar{N})\bar{N} \quad (2)$$

단, \bar{N} 은 물체 표면의 법선 벡터, 결국 가상세계를 점·탄성만으로 모델링하면 두 힘의 합력인 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$f_n = f_K + f_B \quad (3)$$

2.2 재질감 모델링

점·탄성 모델링의 경우는 마찰을 고려하지 않았지만 표면을 나타내는 경우 대부분의 촉감효과는 마찰에 있다. 마찰이 없을 때 사용자는 가상환경을 조작하는 것과 만지는

것에 한계가 있다. 마찰이 있다면 사용자는 더 자연스러운 감각을 얻을 수 있다.

이를 실제 프락시(Proxy) 알고리즘에 적용하기 위해 식 (3)을 계산할 때 정마찰과 동 마찰력을 추가함으로 가능하다[5]. 여기서 프락시란 구속표면에 남는 가상점을 말하며 이 가상점과 엔드포인트와의 거리로 피드백 할 힘을 결정한다.

① 정 마찰(Static Friction)

식 (1)을 다시 프락시 힘으로 근사화 시키면

$$f = h_s(x_v - x_h) \quad (4)$$

로 되는데 여기서 x_v 는 가상점의 위치이고 x_h 는 엔드포인트의 위치이다. 그리고 h_s 는 제어기에서 주어진 비례항(이득)이다. 주어진 구속 면을 위해 가상점의 법선 f_n 과 각각의 구속 면에 접하는 요소를 f_t 라하고 만약 주어진 구속면이 정 마찰 계수 μ_s 를 갖고 가상점이 $\|f_t\| \leq \mu_s \|f_n\|$ 인 정적인 접촉이라 하자. 모든 구속 면이 가상점과 정적인 접촉이면 가상점의 위치는 현재 가상점의 위치와 같은 새로운 목표 위치를 만들어 변화를 방해한다.

② 동 마찰(Dynamic Friction)

동 마찰이 나타내는 표면 즉 점성 영역에서 움직이는 질량이 m 인 한 물체의 운동방정식은 다음과 같다.

$$f - \mu_d f_n = m\ddot{x} + B\dot{x} \quad (5)$$

여기서 B 는 점성이고, $x = (x_v - x_h)$, μ_d 는 동 마찰의 계수이다. 그 물체의 질량이 0으로 접근할 때 그 힘은 빠르게 평형상태에 이른다. 동적 평형에서 그 물체의 속도는

$$\dot{x} = \frac{f - \mu_d f_n}{B} \quad (6)$$

로 주어진다. 이것은 프락시 가상점이 주어진 시간동안 움직일 수 있는 양을 제한하는데 사용되며 가상점의 위치는 변화하지 않는다. 만약 $B=0$ 이면 어떠한 점성 조건도 존재하지 않고 최대 속도도 제한되지 않는다. 주어진 표면의 강성 K 는, $0 < K < 1$ 이고 다음 식을 사용하여 새로운 가상점 x'_v 를 선택함으로써 모든 제어기의 파라미터를 바꾸지 않고 표면강성의 변화를 구현할 수 있다.

$$x'_v = x_v + K(x_v - x_h) \quad (7)$$

단, x'_v : 새로운 가상점, x_v : 가상점, x_h : 엔드포인트의 실제위치이다.

3. 렌더링 알고리즘

패널티(Penalty) 방법에서 가상 체적 안으로 관통되는 양에 비례하는 힘을 촉각장치에서 사용된다. 이러한 접근은

관통두께를 힘으로 표현하는데 성공적으로 사용되었다. 이를 그대로 적용한 벡터필드 방법에서는 오목한 부분 검출과 두께가 얇은 물체의 처리에 문제가 있었다. 이를 개선한 방법이 구속에 의한 방법으로 벡터필드 방법의 한계를 극복하기 위해 Zilles와 Salisbury에 의해 처음으로 God-object가 제안되었다[6]. God-object 알고리즘은 가상점의 크기와 복잡한 폴리곤 모델을 사이를 모델링하기 위해 사용되었다. 그러나 이 방법도 재질감 표현 및 모서리처리에서 불연속성이 발견되어 이러한 가상점을 보완한 방법인 가상 프락시점(이하 가상점)을 제안한다. 본 연구에서는 구속면이 간단하게 가상점의 위치를 변화 시켜서 모델링 할 수 있도록 하였다. 또, 가상 프락시가 유한한 크기를 가졌기 때문에 대부분의 폴리곤적인 매쉬나 본래 God-object에서 요구되는 표면양의 재구성 없이 아주 작은 갭이 있더라도 안으로 밀려들지 않는다.

3.1 가상점의 위치 선정

여기서는 가상점을 질량이 없는 구로 표현하였고, 이 가상점은 가상 환경 내에서 물체의 표면을 따라 움직인다. 데이터를 처리하는 동안 가상점에 대한 목표위치는 매 주기마다 계산되어 직접적인 선형 운동에 의해 이 목표위치로 움직이도록 시도된다. 목표 위치는 촉각장치의 엔드포인트이다. 그러나 이 위치는 가상점이 가상의 환경에서 장애물을 만나면 변할 것이다. 가상점이 움직이면서 지나간 궤적은 가상환경 내에서 어떤 프리미티브를 관통했는지 알아보기 위해 체크된다. 각 구속 면이 평면 위의 반(半)공간에 대해 직선운동을 제한하는 것이 관찰되면 새로운 목표점이 생성된다. 모든 평면에 대한 반공간의 교차점은 무한한 다면체의 볼록한 점이라고 규정한다. 해는 이 볼록한 영역내의 점이고 엔드포인트와의 거리를 최소화한다. 이러한 문제는 모든 구속평면이 현재 가상점의 위치를 통과할 때 다음과 같이 간단히 쓰여질 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \|x-p\| \text{ subject to} \\ & \overrightarrow{N}_1^T \geq 0, \\ & \overrightarrow{N}_2^T \geq 0, \\ & \vdots \\ & \overrightarrow{N}_n^T \geq 0. \end{aligned}$$

여기서 p 는 현재 가상점 위치부터 엔드포인트 위치까지의 벡터, x 는 새로운 목표점, $\overrightarrow{N}_i^T, 0 \leq i \leq n$ 은 구속 면들에 대한 단위 법선 벡터이다.

일단 가상점의 위치가 결정되면 힘은 식 (3) 힘의 방정식을 이용하여 계산한다. 이때 활성화된 구속평면이 발견되면 새로운 가상점의 위치를 결정하기 위해 위치에너지와 운동에너지의 차를 나타내는 라그랑지 방정식을 사용한다 [7]. 단위 강성을 갖는 가상 스프링에서의 에너지는 식 (8)과 같다.

$$Q = \frac{1}{2} (x-x_p)^2 + \frac{1}{2} (y-y_p)^2 + \frac{1}{2} (z-z_p)^2 \quad (8)$$

여기서 (x, y, z) 는 가상점의 좌표이고, (x_p, y_p, z_p) 는 엔드포인트의 좌표를 의미한다. 구속은 식 (9)와 같은 평면을

추가함으로써 표현할 수 있다.

$$Ax + By + Cz - D = 0 \quad (9)$$

만약 가상물체가 3개의 구속평면을 갖는다면 새로운 가상점의 위치는 식 (10)의 L에 대하여 6개의 변수에 관한 편미분 값을 0으로 두어 L을 최소화함으로써 찾을 수 있다. 이와 같은 방법을 사용하면 쉽게 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} L = & \frac{1}{2} (x-x_p)^2 + \frac{1}{2} (y-y_p)^2 + \frac{1}{2} (z-z_p)^2 \\ & + l_1(A_1x + B_1y + C_1z - D_1) \\ & + l_2(A_2x + B_2y + C_2z - D_2) \\ & + l_3(A_3x + B_3y + C_3z - D_3) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을 6 개의 변수 (x, y, z, l_1, l_2, l_3) 에 대해 편미분한 결과를 행렬식으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & A_1 & A_2 & A_3 \\ 0 & 1 & 0 & B_1 & B_2 & B_3 \\ 0 & 0 & 1 & C_1 & C_2 & C_3 \\ A_1 & B_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ A_3 & B_3 & C_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} \quad (11)$$

식 (11)에서와 같이 좌우대칭 구조를 가지고 있는데, 좌측 상위 3×3 행렬은 단위행렬, 우측 상위의 3×3 행렬과 좌측 아래 3×3 행렬은 전치행렬 이어서 교환이 가능하다. 구속이 없는 경우 가상점은 촉각장치의 작용점, 즉 엔드포인트 위치를 나타낸다[6].

3.2 충돌 검출

기존 연구에서 개발된 H-COLLIDE[8] 알고리즘은 각 폴리곤대 폴리곤의 정확한 접촉위치와 가상물체간의 접촉을 검출하여 PC급에서 계산이 가능하게 하지만 본 실험에서는 가상물체의 동역학적인 특성을 고려하여 엔드 포인트를 중심으로 가상물체를 형성하는 선분과의 교점을 검사하는 방법을 사용했다.

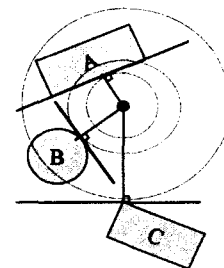


그림 1 충돌검출의 과정

Fig. 1 Process of collision detection

접촉위치는 폴리곤으로 한정시켜 OBS(Oriented Bounding Sphere)트리에 등록시키고 다음 처리를 프락시 알고리

중에서 OBS 트리를 검사하도록 하는 방법을 적용했다. 그림 1에서 엔드포인트를 중심으로 물체 표면의 법선벡터와의 거리를 비교하여 A, B, C중 가장 가까운 물체는 A로 법선의 길이가 엔드포인트의 반경내이면 충돌로 인식한다.

3.3 프락시의 힘처리

다양한 접촉형태에 따른 힘의 가공방법은 실시간에 가상 점을 사용해 접촉을 처리한다. 예를 들어 두 개의 힘을 표현할 실린더가 나란히 있을 때를 가정하면 힘 가공효과는 가상점의 위치를 이동함으로써 만들어 낼 수 있다. 그러므로 해의 안정성을 보장한다.

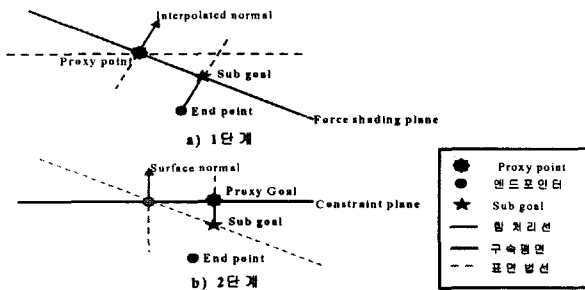


그림 2 적용된 법선으로 2단계 힘 처리
Fig. 2 Two pass force shading with supplied normals

한 개의 다각형 표면이 엔드포인트에 의해 특정화된 법선으로 유연히 만나게 될 때, 새로운 위치의 표면 법선은 폴리곤의 꼭지점으로부터 법선을 보간함으로써 계산된다. 이 보간법은 컴퓨터 그래픽 응용에서 Phong 셰이딩 (Phong shading)을 위해 요구되는 것과 매우 유사하다. 보간된 법선은 접촉점을 통과하는 새로운 구속 면을 지정하고, 기존의 구속 면을 대신하는 보간된 면을 사용하면서 새로운 목표를 찾도록 우선 처리된다. 게다가 이 중간목표(Sub goal)는 엔드포인트 위치를 얻고, 업데이트 절차 두 번째 단계는 이러한 반복을 통해 최종의 목표위치인 프락시 가상점을 얻기 위해 수행된다. 이 두 번째 단계는 구속면 들을 사용하면서 실행된다. 이 방법은 두 경우 모두 모든 구속 면의 영향을 고려하여 다양한 표면 힘 처리가 존재한다할지라도 정확한 결과 값을 산출한다. 이러한 과정은 그림 2에 그려져 있다. 만약 1단계를 지나 중간목표 위치가 모두 순수한 구속 면 위에 있다면 그 목표점은 우선 구속 면에 가장 가까운 곳으로 투영된다. 이것은 새로운 목표점이 물체의 표면 위에 있고, 마찰 (Friction)이나 재질감(Texture)같은 표면 효과도 처리 가능하다[5].

3.4 촉감 렌더링

촉감 렌더러는 가상물체와 상호작용을 하는 촉각장치를 제어하는 것이다. 우선 1[kHz]의 인터럽트가 발생하면 엔코더로부터 값을 읽어들이어 각축의 각도를 순기구학(Forward kinematics)에 의해 현재 포인터의 위치를 계산하고, Affine 행렬에 의해 그래픽 좌표계로 변환하여 충돌 검출을 하고 OBS 트리에 등록한다. 프락시 알고리즘에서 충돌점은 OBS

트리에서 찾고, 발생할 힘을 계산하여 제시할 힘을 출력부로 전송한다. 제시될 힘은 식 (12)에 의해 계산된다.

$$\tau = \xi \cdot f \cdot J^T \tag{12}$$

여기서 ξ 는 모터의 기계정수, f 는 프락시 알고리즘에 의해 구해진 제시할 힘의 벡터이고, J^T 는 속도에 기초한 매니플레이터의 자코비안 매트릭스이다.

3.5 그래픽 렌더링

그래픽 렌더러는 그림 3과 같은 순서로 진행되는데 20[Hz] 주기로 인터럽트 벡터가 생성될 때 가상환경에서 이뤄진 결과를 다이렉트 X 라이브러리에 의해 렌더링한 후, 모델링하여 그 결과를 화면에 디스플레이 한다.

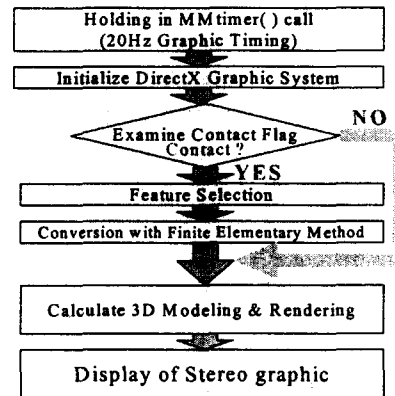


그림 3 그래픽 렌더러의 내부 알고리즘
Fig. 3 Flowchart of internal graphic renderer

4. 촉각장치의 설계

4.1 매니플레이터

제작된 촉각장치는 액추에이터로는 맥스 DC서보 모터를 사용하였고, 링크는 일반적인 패럴렐 구조로 안정성 및 토크증가를 기하였고, 와이어 증폭에 의한 구동방식으로 토크 손실이 최소화 되도록 제작하였다[9].

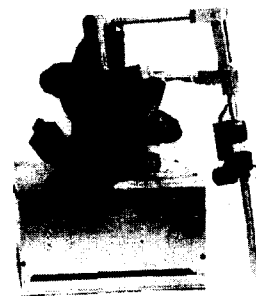


그림 4 시험 제작한 촉각 장치
Fig. 4 Prototype of force display system

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 4는 시험 제작한 촉각장치의 사진을 보인다.

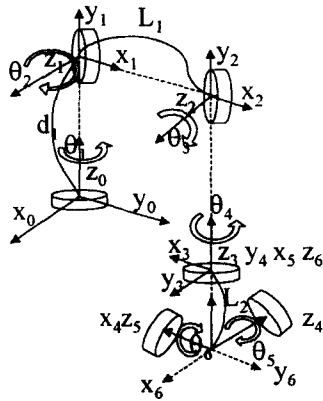


그림 5 촉각장치의 순기구학적 표현
Fig. 5 Kinematic representation of the Force display

촉각장치의 끝점을 계산하기 위해 일반적으로 많이 사용하는 Denavit-Hartenberg법을 사용하여 다음과 같이 유도한다.

$$T_6^0 = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 \cdot A_4^3 \cdot A_5^4 \cdot A_6^5 = \begin{bmatrix} C_1C_2C_3 - C_1S_2S_3 & 0 & C_1C_2S_3 - C_1S_2C_3 & L_1C_1C_2C_3 - L_1C_1S_2S_3 + L_1C_1C_2C_3 \\ S_1C_2C_3 - S_1S_2S_3 & -C_1 & S_1C_2S_3 + S_1S_2C_3 & L_2S_1C_2C_3 - L_2S_1S_2S_3 + L_1S_1C_2C_3 \\ S_1C_3 + C_2S_3 & 0 & S_1S_3 - C_2C_3 & L_2C_3S_1 + L_1C_2S_3 + L_1S_2C_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, $C_i = \text{Cos}\theta_i$, $S_i = \text{Sin}\theta_i$ 이다. 식 (13)에 실제 엔드포인트의 위치는 식 (14)로 간략화 한다.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_2\text{Cos}\theta_1 \text{Cos}(\theta_2 + \theta_3) + L_1\text{Cos}\theta_1\text{Cos}\theta_2 \\ L_2\text{Sin}\theta_1 \text{Cos}(\theta_2 + \theta_3) + L_1\text{Sin}\theta_1\text{Cos}\theta_2 \\ L_2\text{Sin}(\theta_2 + \theta_3) + L_1\text{Sin}\theta_2 + d_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

끝점의 위치를 검출하여 식 (12)의 속도에 비례한 토크를 발생시키도록 식(14)를 편미분하여 자코비안 행렬의 전치 행렬을 구하면 식 (15)와 같이된다.

$$J^T = \begin{bmatrix} -L_2S_1C_2C_3 - L_1S_1C_2 & L_2C_1C_2C_3 + L_1C_1C_2 & 0 \\ -L_2C_1S_2C_3 - L_1C_1S_2 & -L_2S_1S_2C_3 - L_1S_1S_2 & L_2C_2C_3 + L_1C_2 \\ -L_2C_1S_2S_3 & -L_2S_1S_2S_3 & L_2C_2S_3 + L_1S_2S_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

단, $C_i = \text{Cos}\theta_i$, $S_i = \text{Sin}\theta_i$, $C_{ii} = \text{Cos}(\theta_i + \theta_j)$, $S_{ii} = \text{Sin}(\theta_i + \theta_j)$ 이다.

4.2 제어기 및 드라이버 구성

그림 6은 촉각장치 액츄에이터의 제어회로를 나타낸다. 위치는 500[P/R] 엔코더를 통해 검출되어 FPGA로 구성된

XC4010E에서 4채배 되므로 2000[P/R]의 분해능을 갖는다. 소프트웨어와 하드웨어의 인터페이스 속도를 증가시키고 안정한 동작을 위해 VxD로 작성된 가상 장치 드라이버가 이를 처리하도록 하였고, 컴퓨터로 입력된 위치는 촉각 렌더링 알고리즘에 의해 처리되어 D/A출력부로 전송된다. D/A출력부는 12비트 출력 데이터 값을 AD664에서 전압으로 변환, 각 모터에 계산된 힘이 분배되어 디바이스가 가상환경의 느낌을 제시하게 한다. 제어 프로그램에서 정확하게 1[kHz], 20[Hz]의 인터럽트 주기를 얻기 위해 소프트웨어로 제작한 MMtimer()함수를 이용하였다. 이때 인터럽트 타이밍이 서로 일치하지 않기 때문에 실제 엔드 포인트의 위치와 그래픽이 상이한 결과를 초래할 수 있다 이를 해결하기 위해 힘 적분을 통한 물체의 속도 결정방법을 이용한다[10].

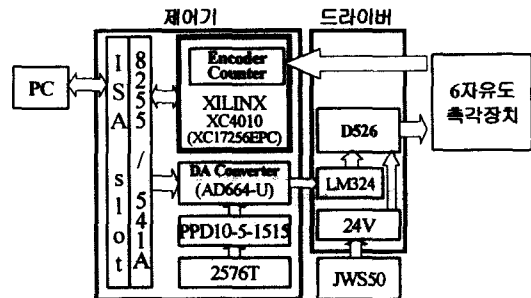


그림 6 제어기의 회로
Fig. 6 Circuit of controller

드라이버 회로는 D/A컨버터에서 전송되는 아날로그 전압 값을 LM324에서 전압-전류 변환시키고, D526에 의해 모터에 흐르는 전류를 조절하며 민감한 힘의 제시가 가능하도록 하는 전류제어기법을 사용하였다.

5. 실험

실험은 가상환경의 마찰력은 일정하게 두고 그림 7중앙에 보이는 가상물체의 재질정보를 변화시키며 접촉했을 때 모터로 출력되는 전압 파형을 LeCroy 오실로스코프 9354AM로 측정된 결과이다.



그림 7 시뮬레이션 프로그램
Fig. 7 Program of simulation

그림 8은 재질정보(탄성, 점성, 질량, 마찰력)를 기본값으로 나타냈을 때 각 모터에 흐르는 전류량을 나타내는 전압

을 측정 한 것이다. 채널1은 X축, 채널2는 Y축, 채널3은 Z축을 의미하며, Y축 즉 미는 방향으로 힘이 크게 나타나고 있음을 보여준다. 하지만 각각의 파라미터는 재질정보 없이 가상벽에 해당하는 정보로 나타내었기 때문에 그래프는 계단형 파형을 보이고 있다. 그림 9는 기본값 중 강성값을 10배 증가시켰을 때로 Y축의 파형은 빠르게 밀었을 때 잡음처럼 나타나며, 떼었다가 다시 천천히 밀 때 그림8과 같은 계단형 파형을 볼수 있다. 하지만 최대힘을 8[N]으로 제한하였으므로 더 큰 힘은 출력되지 않는다. 그림 10은 점성값을 10배 증가 시켰을 때로 단속적인 전압 출력이 진흙이나 뱀을 만지는 듯한 느낌을 나타낸다, 그림 11은 정 마찰과 동 마찰력을 추가했을 때의 상황으로 같은 가상 벽이지만 그래프 상으로는 잡음이 많이 섞이는 듯 하다. 이는 마찰계수들로 인해 최대 힘에 근접하지 않고 천천히 증가 시켜 아주 부드러운 힘을 생성해 낸다.

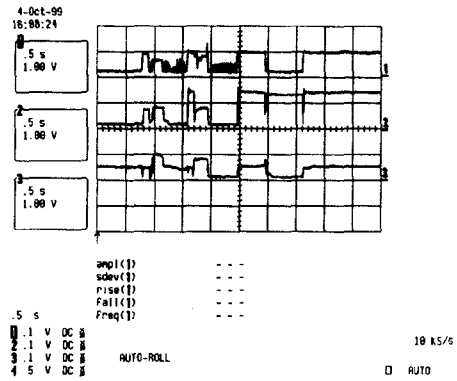


그림 10 점성 값을 크게 주었을 때
Fig. 10 Situation of high Viscosity

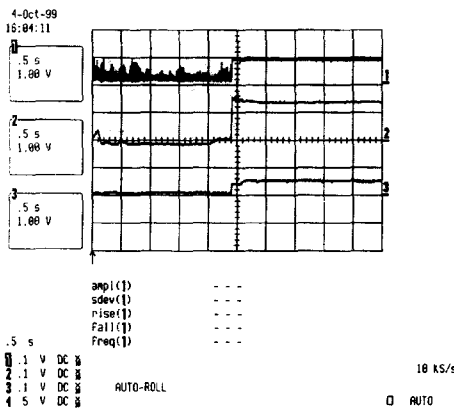


그림 8 기본 값으로 지정할 때
Fig. 8 Situation of default parameter

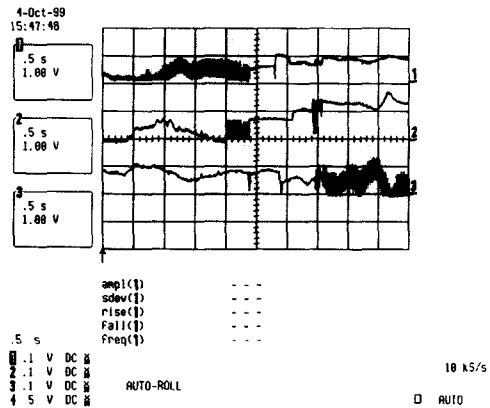


그림 11 마찰력을 크게 했을 때
Fig. 11 Situation of high friction

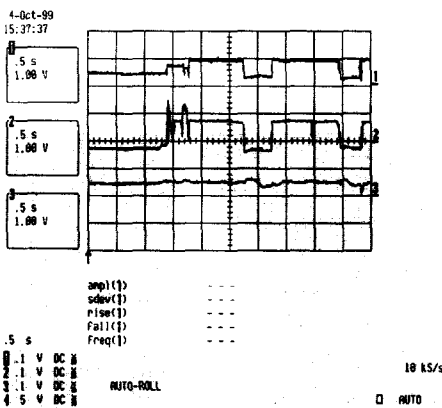


그림 9 강성 값을 크게 주었을 때
Fig. 9 Situation of high elasticity

실험결과 가상 물체의 폴리곤 수는 펜티엄III 450 PC에서 30,000개의 폴리곤 데이터 처리가 가능했으며 Lonnie와 Wayne이 안정한 조작을 할 때 1[kHz]의 갱신이 필요하다고 보고한 바처럼 강성, 점성, 질량, 마찰력을 각각 변화 시켰을 때 그에 따른 각기 다른 촉감을 생성함을 실험을 통해 확인 하였다. 디바이스의 경우 상업용인 펜텀과 비교할 때 비슷한 성능을 가졌으나 제시된 장치가 위치 분해능이 더 우수하다. PC급 데스크탑 시스템의 경우 동경공업대의 SPIDAR 시스템은 2대의 PC를 이용해 촉감 렌더링 하는데 반해 본 시스템은 단일 PC에서 모든 처리가 가능하므로 본 논문에서 제안한 알고리즘과 시스템 구성이 우수함을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 가상물체내의 물체에 재질정보(점성, 탄성, 질량, 마찰력)등을 부여하고, 촉각장치를 사용하여 가상 물체와 접촉했을 때 반향되는 재질감을 안정하게 제공하는 6자유도 촉각장치를 개발하였다. 기존의 시스템이 그래픽 처리의 문제로 고성능 워크스테이션이나 PC 2대를 사용하던 문제점을 전용 제어기의 개발로 하드웨어적인 처리속도를 증가 시켰고, 소프트웨어는 프락시 알고리즘의 적용으로 안

정성과 처리속도를 높였고, 특히 재질감 기능 처리가 추가되어 동역학적인 가상환경의 표현이 가능해졌다. 그래픽 처리를 Direct X의 빠른 하드웨어적인 처리로 단일 PC에서도 30,000개의 폴리곤 모델을 1[kHz]장치제어와 20[Hz]그래픽 처리를 수행하였다. 따라서 본 시스템은 상업용 시스템이 촉각과 시각의 처리를 위해 고성능 컴퓨터를 요구하던 것을 하드웨어와 소프트웨어적인 양면을 개선하여 PC에서도 처리 가능해졌다. 따라서 제안된 시스템을 이용하여 여러 가지 PC급 데스크탑 가상현실 시스템의 개발이 가능하리라 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Maria R., Andrew J., Thomas M., "Learning and Building together in an immersive Virtual World", PRESENCE Vol 8, No. 3, pp. 247-263, 1999.

[2] Marc Raibert, "VR surgical simulators and Virtual humans", ICAT98, pp. 15-20, 1998.

[3] Ziles, C., "Haptic Rendering with the ToolHandle Haptic Interface", Masters Thesis, Dept. of Mechanical Eng. MIT, 1995.

[4] 강원찬, 김동욱, 신석두, 김영동, "3자유도 힘반향 역감 장치", 전력전자학회 논문지, 제4권, 제5호, pp. 455-461, 1999.

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

[6] Zilles C., Salisbury J. K., "Constraint based God Object Method for haptic Display", Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and System, 1995.

[7] David Baraff, "Linear-Time Dynamics using Lagrange Multipliers", SIGGRAPH96, new orleans, pp. 137-146, 1996.

[8] A. Gregory, Ming C. Lin, Stefan Gottschalk, Russell Taylor, "A Framework for fast and Accurate Collision Detection for Haptic Interaction", HTTP:// www.cs.unc.edu/~geom/collide.html

[9] Mennas Ching & David, W .L. Wang, " A Five bar linkage Force Reflecting Interface for a Virtual Reality System", Proc. of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3012- 3017, 1997.

[10] S. Hasegawa, M. Ishii, M. Sato, Y. Koike, "Haptic Interface protocol for complex dynamic virtual world", ICAT98, pp. 83-89, 1998.

저 자 소 개



신 석 두 (申 碩 斗)
 1946년 6월 10일 생. 1974년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 조선대 산업대학원 졸업(석사). 현재 조선이공대학교 전기과 교수
 Tel : 062-230-8351, Fax : 062-230-8350
 E-mail : sdshin@mail.chosun-c.ac.kr



강 원 찬 (姜 園 贊)
 1970년 12월 23일 생. 1993년 조선대 공대 제어계측공학과 졸업. 2000년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2000년~현재 동 대학원 제어계측공학과 박사과정
 Tel : 062-230-7764, Fax : 062-230-7106
 E-mail : kwc89@shinbiro.com



김 동 옥 (金 桐 玉)
 1971년 5월 1일 생. 1994년 조선대 공대 제어계측공학과 졸업. 1996년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1996년~현재 동 대학원 제어계측공학과 박사과정
 Tel : 062-230-7764, Fax : 062-230-7106
 E-mail : dongok7@netian.com



김 원 배 (金 源 培)
 1958년 7월 15일 생. 1982년 조선대 공대 졸업. 1989년 동 대학원 (석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~현재 송원대학 전기과 교수
 Tel : 062-360-5831, Fax : 062-360-5831
 E-mail : mokip@songwon.ac.kr



김 영 동 (金 永 炯)
 1944년 11월 28일 생. 1968년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 명지대 대학원 졸업(석사). 1993년 일본 애지 공업대 객원 연구원, 현재 조선대 전자정보공과대학 정보제어계측공학과 교수
 Tel : 062-230-7032, Fax : 062-230-7106
 E-mail : ydkim@mail.chosun.ac.kr