

역감 제시 장치를 이용한 가상 과학 체험 공간 개발 (Development of Virtual Science Experience Space(VSES) using Haptic Device)

김 호 정 * 류 제 하 **
(Ho-Jeong Km) (Jeha Ryu)

요 약 본 논문에서는 과학 교육 분야에서 기존의 교육방식이 갖고 있는 한계성을 극복하고 교육 및 학습 효과를 향상시키기 위한 방안으로 역감 제시 장치를 이용한 가상 현실 시스템을 제안한다. 제안된 시스템의 효용성과 응용가능성, 활용방법을 효과적으로 나타낼 수 있는 4가지 과학세계로 구성된 가상 과학 체험 공간을 구축하여 미시 세계에서는 원자간의 현상을, 마찰 세계에서는 스틱-슬립 마찰현상을, 기전 세계에서는 모터 및 발전기의 원리를, 거시 세계에서는 코리올리스 가속도로 인한 물리적 현상을 각 세계에서 역학적으로 모델링하고 역감 제시 장치와 인터페이스를 위한 에뮬레이션 기법을 고안한다. 그리고, 역감 제시 장치, HMD(Head Mounted Displays), 가상환경(스테레오 그래픽스와 GUI)을 포함한 디지털 제어기로 구성된 가상 과학 체험 시스템을 구축한다. 끝으로 본 연구를 통해 교육의 보조 대체와 학습의 도구로서 효용성을 극대화시키기 위한 가상 과학 체험 공간의 설계 및 구현에 관한 고려사항을 제시한다.

키워드 : 가상현실, 가상환경, 역감 제시 장치, 휴먼 컴퓨터 인터페이스, 에뮬레이션

Abstract A virtual science experience space(VSES) using virtual reality technology including haptic device is proposed to overcome limits which the existing science education has and to improve the effect of it. Four example scientific worlds such as Micro World, Friction World, Electromechanical World and Macro World are demonstrated by the developed VSES. Van der Waals forces in Micro World and Stick-Slip friction in Friction World, the principle of induction motor and power generator in Electromechanical World and Coriolis acceleration that is brought about by relative motion on the rotating coordinate are modeled mathematically based on physical principles. Emulation methods for haptic interface are suggested. The proposed VSES consists of haptic device, HMD or Crystal Eyes and a digital computer with stereoscopic graphics and GUI. The proposed system is believed to increase the realism and immersion for user.

Key words : Virtual Reality, Virtual Environment, Haptic device, HCI(Human Computer Interface), Emulation

1. 서 론

최근 십 여년 동안 컴퓨터 및 정보통신 기술의 발달과 더불어 가상 현실 기술이 급속도로 발전하였다. 이중 역감 제시 장치(Haptic Display Device)를 이용한 가상 현실 시스템은 의학과 오락, 원격로봇(Telerobotics), 군대, 교육 분야에서 주로 연구되어 왔다[1,2].

과학 교육 분야에서는 복잡하고 난해한 물리적, 화학적, 생물학적 개념 및 법칙들을 이용하여 관심의 대상이

되는 자연 현상을 해석하고 설명함으로써 피교육자의 이해와 응용력을 향상시킨다. 이러한 기존의 과학 교육은 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 첫째, 대부분의 교육이 교육자의 음성과 교과서를 위주로 수동적인 교육이 이루어지기 때문에 실제 자연 현상으로 연결되는 직관력을 기르는데 어려움이 따른다. 이로 인해, 피교육자의 집중과 흥미, 동기유발을 기대하기에는 한계가 있다. 물론 간단한 실험장치를 이용하여 실제 현상을 보여주고 경험하게 할 수 있으나 비용 때문에 제한적인 장비들이 주로 사용된다. 둘째, 과학 교육에서 이해하기 어려운 자연 현상 중에는 실제 실험으로 구현이 불가능한 경우가 많다. 셋째, 특히 힘과 관련된 물리적인 현상 및 개념들에 대한 교육은 시각과 청각적인 자료만으로는 한계성을 갖는다.

* 정 회 원 : 국방과학연구소 연구원
hjkim511@korea.com

** 비 회 원 : 평주과학기술원 기전공학과 교수
ryu@kjist.ac.kr

논문접수 : 2002년 12월 11일

심사완료 : 2003년 6월 25일

따라서, 가상 현실은 모든 특히 과학 교육 분야에서 가상 환경으로의 몰입감에 의한 집중력 향상과 상호작용으로 인한 흥미 및 동기유발, 인터넷을 통한 시간 및 공간의 초월, 3차원 공간에서 정보의 다각적인 표현 가능성 등의 특성을 이용하여 교육자와 피교육자에게 유용한 교육도구로 필요 있다.

Harvey and Erica[3]은 역감 제시 장치를 이용해 자유롭게 항해할 수 있는 3차원 영상 공간과 확률밀도 함수에 비례하는 역감을 제공함으로써 원자 궤도 함수에 대한 이해를 높여 주었다. Wanger and Len[4], Bayazit et. al[5]은 단백질 구조 및 합성에 관련된 연구과정 중 분자결합(Molecular docking) 현상의 이해를 돕기 위하여 특수한 단백질의 구성 및 지도와 같은 영상정보와 포텐셜(Potential) 에너지에 비례하는 역감 제시를 사용하였다. Dede et. al[6]은 가상 현실 기술의 교육적 효과와 시각과 청각, 촉각 인터페이스에서 나타나는 일반적인 문제점을 제시하면서 1 자유도 동역학 교육을 목적으로 가상 현실 시스템을 제안하였다. Richard et. al[7]은 동역학 및 제어 교육과정에 역감 제시 장치를 이용하여 학생들의 참여도 및 호기심을 유발시키고 물리적 현상의 이해를 향상시키려고 하였다.

그러나 과학 교육의 보조수단으로서 역감 제시 장치를 이용한 가상 현실 시스템의 효과적이고 구체적인 이용 가능성과 활용방법, 설계 및 구현방안에 관한 연구는 부족하다.

본 논문에서는 가상 현실 기술 중 특히, 역감 제시 장치가 포함됨으로써 과학 교육 및 학습 효과를 극대화하기 위해 몇 가지 전형적인 물리 현상을 간접적으로 경험케 하기 위한 가상 과학 체험 공간을 구축한다. 제2, 3, 4, 5장에서 개발된 예들은 특히 힘과 운동에 관련된 물리현상 중에서 수식이나 도표 등 시각적으로는 경험하기 힘든 현상들을 선별하여 사용자가 느끼는 역감을 제공하기 위해 현실기반의 수학적 모델링과 에뮬레이션 기법을 고안한다. 실험으로 계측된 힘을 그대로 재현시키지 않고 수학적 모델링을 통해(물론 수학적 모델링이 실제 실험으로 계측된 현상을 상당히 잘 대변 한다고 가정 할 경우) 제시하는 이유는 여러 변수들을 변화 시켜줄 경우 힘의 크기, 방향 등이 어떻게 변하는지를 대화식으로(Interactive) 제시할 수 있기 때문이다. 제6장에서 가상 현실 시스템을 설계 및 구현하고 제7장을 마지막으로 결론 및 향후 연구과제를 기술한다.

2. 미시 세계(Micro World)

미시(Micro) 세계는 거시(Macro) 세계에 비해 사람 눈에 보이지 않으므로 물리적인 현상 및 법칙들을 교육하기 위하여 경험 및 실험을 동반하기에는 많은 제약이

따른다.

본 장에서는 나노미터 크기의 극히 작은 미시 세계에서 원자와 표면벽사이의 기하학적 구조에 따라 작용하는 반데르발스 힘을 역감 제시하기 위한 수학적 모델링과 에뮬레이션 기법을 고안한다. 거시 세계에서는 벽과 접촉했을 때부터 반발력을 느낄 수 있지만[8], 미시 세계에서는 접촉하지 않아도 반발력 및 인력이 작용함으로 좀더 현실적인 역감을 표현하기 위해서는 실제 실험으로 얻은 정보를 이용한 현실 기반의 새로운 모델링이 요구된다[9].

2.1 반데르발스(Van der Waals) 힘

이상적인 미시 세계의 환경조건은 습기가 없는 건조한 공기로 채워진 상태이거나 진공 상태이므로 액체에 의해 발생하는 표면력이나 전자기력은 무시될 수 있고, 물체간의 금속이나 화학결합은 고려하지 않으므로 짧은 범위의 표면력 또한 무시된다.

따라서, 본 장에서는 거시 세계의 중력과 같이 미시 세계에서 어떠한 환경조건에도 물질 사이에 존재하고, 물체의 기하학적 특성과 물질의 종류에 많은 영향을 받는 힘을 고려한다.

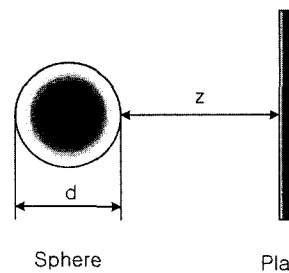


그림 1 작용력을 계산하기 위한 좌표계

그림 1과 같은 좌표계에서 원자와 벽 사이에 작용하는 반데르발스 힘은 다음과 같이 단순화된다[10].

$$F_{vdw} = -\frac{Ad}{12z^2} \tag{1}$$

여기서, A는 Hamaker상수를 나타낸다. 이상적인 미시 세계에서 원자와 벽 사이에서 작용하는 반데르발스 힘은 항상 인력으로 작용하며, 두 물체 사이의 거리 제곱에 반비례함을 알 수 있다. 실제 물리적 현상은 AFM (Atomic Force Microscope)을 이용한 실험을 바탕으로 팁(tip)-샘플(sample)의 힘과 거리 정보를 이용하여 그림 2와 같이 그래프로 표현될 수 있다[11].

2.2 미시 세계의 표면 벽 모델링

1절에서 제시된 방정식은 가상 벽과 접촉하지 않았을 때만 고려되며 접촉점에서 계산된 무한대의 최대 인력은 접촉한 후의 물리적 현상과 불연속성을 야기시켜

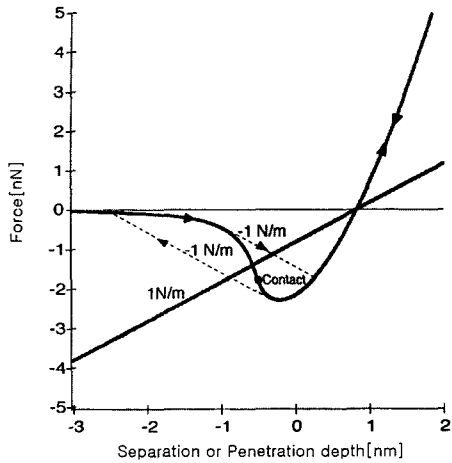


그림 2 원자사이의 힘과 거리 곡선 및 외팔보(Cantilever)의 강성(직선): 힘(Force)은 팁-샘플의 이격(Separation) 거리와 침투(Penetration) 거리의 함수로 그려진다. "Contact"라는 점은 팁이 샘플에 접촉했을 때를 나타낸다. 점선은 1N/m의 강성을 갖는 외팔보가 사용되었을 때 힘과 거리 곡선을 나타낸다.

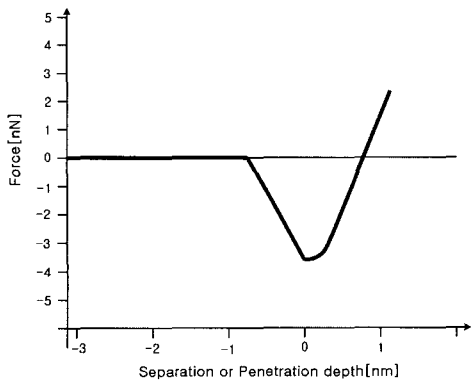


그림 3 반데르발스 힘의 선형 근사화

실제로 역감 제시 장치를 통해 구현하기에는 어려움이 따른다. 따라서, 그림 3과 같이 역감 제시 장치가 발휘할 수 있는 최대 힘의 성능을 고려하여 최대 인력을 제한할 수 있는 근사화가 요구된다.

둘째, 벽과의 접촉점으로 부터 인력이 영인 지점까지의 거리를 L 이라고 가정하자. 물체간의 인력은 속도와 관계없이 대상이 되는 물체와 상대거리가 커질수록 영에 가까워진다. 따라서, Hamaker 상수 A 와 기하학적인 요소를 반영하는 강성(Stiffness)을 가진 스프링으로 모델링할 수 있다. 셋째, 물체가 접촉했을 때의 반발력은 거시 세계의 벽 모델을 사용한다. 침투가 일어났을 때

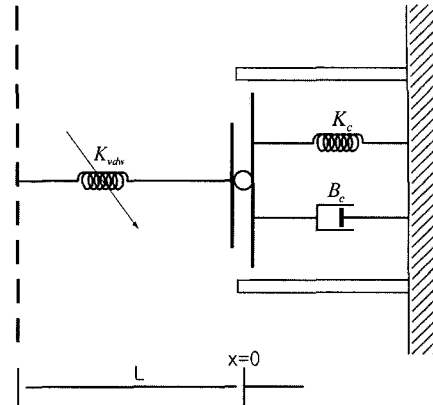


그림 4 미시 세계의 가상 벽 모델링: 원점에 있는 구는 물체가 받는 힘의 작용점이다. 또한 L 은 물체가 받을 수 있는 인력의 최대값을 제한하고 K_{spr} 는 미시 세계의 환경조건을 반영하며 K_c 와 B_c 는 벽을 구성하는 물질의 물리적인 특성을 반영한다.

발생되는 반발력은 침투된 깊이와 속도에 비례하므로, 물질의 특성이 반영된 강성계수와 감쇠계수를 이용하여 모델링 할 수 있다. 넷째, 두 물체가 접촉하여 작용력이 영이 되는 현상은 접촉하는 순간부터 같은 크기와 침투 방향으로 작용하는 인력이 반발력으로 인하여 작용력이 영이 되는 것으로 모델링할 수 있다.

2.3 역감 제시를 위한 예물레이션

역감을 위한 힘 계산과정은 인력이 작용하지 않는 부분과 접촉하지 않고 인력이 작용하는 부분, 접촉하여 침투함으로써 작용력이 영이 되는 부분, 반발력만 작용하는 네 부분으로 나누어진다. 만일 작용점 x_k 가 인력이 작용하는 범위 즉 L 밖에 존재한다면 작용력 F_k 는 영이 된다. 또한, 접촉하지 않고 $|x_k|$ 가 L 보다 작은 위치에 있다면, F_k 는 $L - |x_k|$ 에 비례하게 된다. 그리고, x_k 가 침투하게 되면 F_k 는 최대 인력에 반발력을 더한 값이 되고, 힘이 영이 되는 부분은 이 과정에 포함되게 된다.

2.4 가상 과학 체험 공간 구현

미시 세계에서 발생하는 물리적 현상 중에 원자와 원자 또는 원자와 벽 사이에서 작용하는 반데르발스 힘을 교육 및 체험할 수 있도록 그림 6과 같이 여러 가지 구형의 원자들과 직육면체의 가상 벽으로 구성된 가상 환경을 구현하였다.

사용자는 역감 제시 장치를 통해 가상 환경에 있는 원자를 움직이게 한다. 그리고 움직임에 따라 상호 작용하는 반데르발스 힘을 2.3절에서 고안된 예물레이션 기법으로 계산하여 다시 역감 제시 장치로 전달한다. 이와 같이 사용자는 실시간으로 역감 제시 장치를 통해 힘을 느끼면서 미시 세계를 경험할 수 있다. 또한, 대화 상자

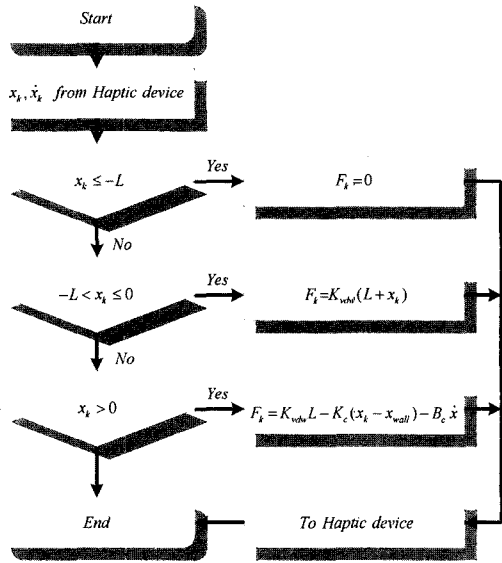
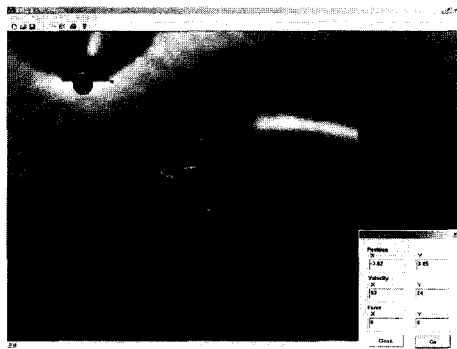
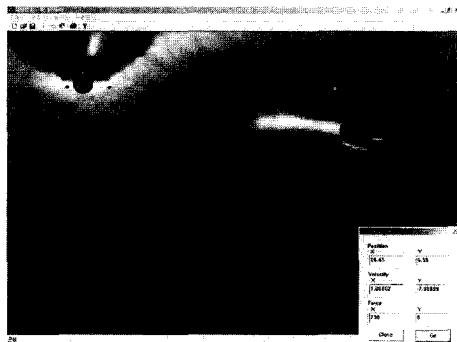


그림 5 반데르발스 힘의 역감 계산과정



(a) 가상 벽과 접촉하지 않을 때



(b) 가상벽과 접촉했을 때

그림 6 미시 세계의 가상 과학 체험 공간

의 에디터 창을 통해 실시간으로 원자의 변위와 속도, 상호 작용 힘 등의 물리적 변화를 문자로 보여줌으로써 교육 및 학습 효과를 높일 수 있다고 사료된다.

3. 마찰 세계(Friction World)

마찰현상은 거시 세계에서 기계나 기구의 정밀한 제어 및 조작에서부터 미시 세계에서 사용되는 기구인 AFM의 팁 제어 및 샘플 조작까지 반드시 고려해야 할 사항 중에 하나이다. 또한, 이런 현상을 이용하여 물체를 들 수 있으며 표면의 거칠기도 느낄 수 있다.

본 장에서는 여러 가지 마찰현상 중 주기적인 스틱(stick)-슬립(slip)현상을 고려한다. 표면의 기하학적인 특성은 스틱-슬립현상의 주요한 원인이며, 특히 미시 세계에서 발생하는 마찰현상의 중요한 요인 중에 하나이다. 따라서, 표면의 기하학적인 형상을 토대로 Karnopp[12] + Daul[13] 모델을 수정하여 주기적인 스틱-슬립 마찰현상의 역감 제시를 위해 수학적으로 모델링하고 에몰레이션 기법을 고안한다.

3.1 Stick-Slip마찰현상의 모델링

여러 가지 마찰모델 중 Coulomb & Viscous 모델과 Karnopp모델, Dahl모델, LuGre모델[14]이 일반적으로 사용된다[15-18]. 본 절에서는 각 마찰 모델의 특성과 역감 제시 및 시뮬레이션에 대한 적합성을 비교하여 주기적인 스틱-슬립 마찰 현상의 역감 제시를 위해 수학적으로 모델링한다.

표면의 기하학적 형상은 표면의 거칠기나 규칙적으로 발생하는 스틱-슬립 마찰 현상에 중요한 요인이며, 특히 미시 세계에서는 원자의 주기적인 배열로 인해 나타나기도 한다. 우선, 표면의 기하학적 영향을 반영하기 위하여 주기적이 아닌 표면을 고려할 수도 있지만 계산의 단순성을 위해 그림 7과 같이 근사화한다.

스틱 상태의 정밀한 표현을 위하여 Daul 모델을 응용하여 Coulomb마찰력은 접선방향으로 강성 계수 k_{stick} 과

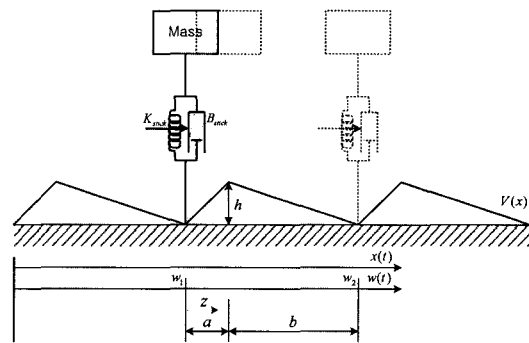


그림 7 주기적인 기하학적 특성을 가진 표면에서의 마찰현상 모델링. (z : 탄성변형 부분의 변위, w : 변형되지 않은 부분의 변위, $x(t)$: 총 변위, $V(x)$: 표면상의 기하학적 형상, a : 최대 탄성 변형범위와 스틱 상태, b : 미끄럼(sliding)의 범위)

점성 계수 B_{stick} 에 비례한다. 슬립 상태에서 표면과의 점성 마찰력은 점성 계수 $B_{sliding}$ 에 비례한다. 또한, 표면의 기하학적인 영향은 V_0 와 형상의 변화율로 표현할 수 있다. 따라서, 그림 7을 기반으로 표면의 기하학적 형상을 고려한 주기적인 스틱-슬립 마찰 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$F_f = K_{stick} z + B_{stick} \frac{dz}{dt} + V_0 \frac{\partial V(x)}{\partial x} + B_{sliding} \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

$$|z| < z_{max} \quad \forall x$$

제안된 마찰 모델의 안정된 역감 제시를 위해 K_{stick} 와 B_{stick} 는 Colgate et al가 제안한 수동성(passivity)의 필요충분 조건으로 선택될 수 있다[19].

$$b > \frac{K_{stick} T}{2} + |B_{stick}| \quad (3)$$

여기서, b 는 역감 제시장치의 감쇠 계수이고 T 는 샘플링 주기를 나타낸다.

스티크 상태의 정확한 역감 제시를 위해서는 임계속도, $\dot{x}_{critical}$ 를 고려해야 한다.

$$\left| \dot{x} \right| \leq \left| \dot{x}_{critical} \right| = \frac{a}{T} \quad (4)$$

그러므로, 슬립 상태의 최대 마찰력이 스틱 상태 보다 작도록 V_0 와 $B_{sliding}$ 를 정해야 한다.

$$K_{stick} + \frac{B_{stick}}{T} > \frac{B_{sliding}}{T} - V_0 \cdot h \cdot \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{ab} \right) \quad (5)$$

, at $\dot{x}_{critical}$

또한, 실시간 시뮬레이션을 위해 Karnopp이 제시한 방법을 이용하여 스틱과 슬립의 상태를 나누어 계산한다. 근사화된 표면의 형상 특성과 물체의 운동방향에 따라 스틱에서 슬립 상태로 또는 반대 상황으로 상태 변환 조건은 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{sgn}(\dot{x}) > 0 : \\ & |z| > a : \text{stick} \rightarrow \text{slip} \\ & |x - w_i| \geq a + b : \text{slip} \rightarrow \text{stick} (w_{i+1} = w_i + (a + b)) \\ & \text{sgn}(\dot{x}) < 0 : \\ & |z| > b : \text{stick} \rightarrow \text{slip} \\ & |x - w_i| \geq a + b : \text{slip} \rightarrow \text{stick} (w_{i+1} = w_i - (a + b)) \end{aligned}$$

3.2 역감 제시를 위한 에뮬레이션

여러 가지 형태의 복잡한 표면 형상이 존재하지만 계산을 간략화하기 위해 스틱 상태에서 $V(x) = (h/a)x$ 이고 미끄럼상태에서 $V(x) = -(h/b)x$ 라고 가정한다.

$\text{sgn}(\dot{x}) > 0$ 일 때, 만일 $0 < z < z_{max} = a$ 이면 스틱 상태이고, 마찰력 $F_f = K_{stick}z + B_{stick}(dz/dt) - V_0(h/a)$ 이

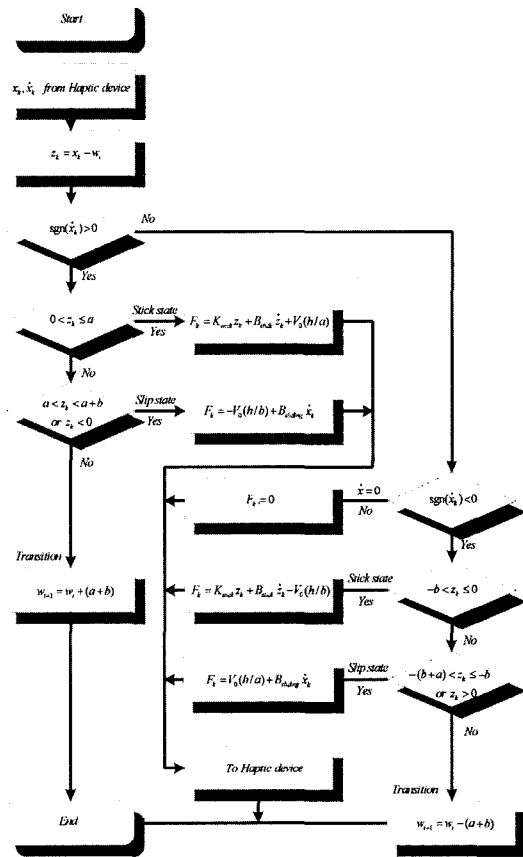


그림 8 마찰력의 역감 계산과정

된다. 만일 $a < x - w_i < a + b$ 이면 슬립 상태를 나타내고, 마찰력 $F_f = -V_0(h/b) + B_{sliding}(dx/dt)$ 이 된다. 슬립 상태에서 스틱 상태로의 전환조건은 $x - w_i \geq a + b$ 이고, $w_{i+1} = w_i + (a + b)$ 로 갱신된다.

$\text{sgn}(\dot{x}) < 0$ 일 때, 만일 $|z| < b$ 이면 스틱 상태이고, 마찰력 $F_f = K_{stick}z + B_{stick}(dz/dt) - V_0(h/a)$ 이 된다. $a < |x - w_i| < a + b$ 이면 슬립 상태가 되고, 마찰력 $F_f = V_0(h/b) + B_{sliding}(dx/dt)$ 이 된다. 슬립 상태에서 스틱 상태로의 전환조건은 $|x - w_i| \geq a + b$ 이고, $w_{i+1} = w_i - (a + b)$ 로 갱신한다.

3.3 가상 과학 체험 공간 구현

마찰학 교육 분야에서 핵심적인 스틱-슬립 현상을 교육 및 체험하기 위해 그림 9와 같이 AFM에서 텅이 샘플 위를 탐색(Scanning)하는 상황을 가상 환경으로 구현하였다.

사용자는 역감 제시 장치를 통해 가상 환경에 있는 썬기 모양의 원뿔을 움직이게 한다. 그리고, 3.2절에서 고

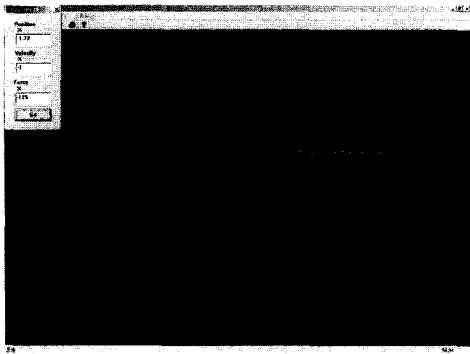


그림 9 마찰 세계의 가상 과학 체험 공간

안된 에블레이션 기법에 의해 움직임에 따른 마찰력을 계산하여 다시 역감 제시 장치로 전달한다. 이와 같이 사용자는 실시간으로 샘플 표면의 기하학적인 요소를 반영하는 마찰력을 느낄 수 있다. 현실감을 향상시키기 위하여 texture mapping 기술을 이용하여 샘플 표면의 기하학적인 형상을 표현하였고 대화상자의 에디터 창을 통해 실시간으로 팁의 변위와 속도, 마찰력 등 물리적 변화를 시각적으로 보여줌으로써 교육 및 학습 효과를 높일 수 있다고 사료된다.

4. 기전 세계(Electromechanical World)

본 장에서는 전자기계 분야에서 전기적인 에너지와 기계적인 에너지의 상호변환 과정에서 발생하는 물리적 현상 및 원리에 대한 교육 및 학습 도구로서 역감 제시 장치를 이용한 가상 현실 시스템의 효용성 및 구현방안을 보인다.

4.1 가상현실의 효용성

전기적인 에너지와 기계적인 에너지간의 상호변환 과정에서 자기의 역할은 필수적이다. 만일 임의의 자기장 내에 전류가 흐르는 도체가 놓여진다면, 전기적인 에너지에 의해 발생하는 자장과 임의의 자장의 상호작용에 의해 도체의 운동을 야기시키는 기계적인 에너지가 발생할 것이다. 이와 같은 물리적 현상으로 전동기 및 발전기의 기본 원리를 교육하기 위해서는 그림 10과 같이 자기장 내에서 전하의 운동과 전류의 흐름에 따라 도체에 작용하는 힘에 관련된 물리적 현상 및 원리가 우선 설명되어야 한다.

B 는 자기장, q 는 자기장 내에서 움직이는 전하이다. 전하의 운동은 v , 전하의 움직임과 관련되어 작용하는 힘은 F 로 나타낸다. 작용력을 받으며 움직이는 전하는 궤적 T 를 그린다. 이와 같은 물리적 현상은 식 6과 같이 벡터 방정식으로 나타낼 수 있고 피교육자는 오른손 및 왼손 법칙을 숙지함으로써 물리 현상의 변화를 이해

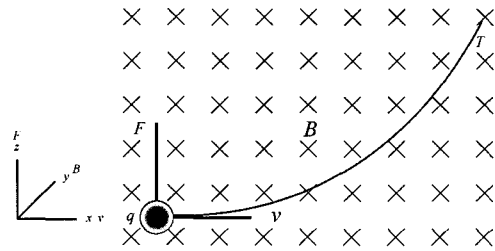


그림 10 자기장 내에서 전하의 운동과 힘의 관계

하고 예측할 수 있다.

$$F = qv \times B \tag{6}$$

이와 같이 기존의 교육방식은 2차원적인 그림과 주석, 벡터 방정식을 이용하여 물리적인 현상을 표현하고 설명하며 단순한 지식의 암기와 상상을 통해 물리적 변화를 이해시키고 예측케한다. 그러므로, 처음 접하는 피교육자에게는 자기장과 전하, 힘이 정의되는 공간조차 생소하게 느껴질 것이고, 벡터 방정식을 구성하는 변수들의 물리적인 의미 또한 직관적으로 이해하기 힘들 것이다.

따라서 이와 같은 물리적 현상 및 원리의 교육적 효과를 향상시키기 위해 실제 현상과 직관적인 상호작용을 가능하게 하는 역감 제시 장치를 이용한 가상 현실 시스템이 효과적이다.

4.2 역감 제시를 위한 에블레이션

식 6에서 벡터 F, v, B 는 다음과 같이 성분벡터로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = q \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = q \begin{bmatrix} v_y B_z - v_z B_y \\ v_z B_x - v_x B_z \\ v_x B_y - v_y B_x \end{bmatrix} \tag{7}$$

만일 그림 10과 같이 전하의 운동이 x 방향이고, 자기장이 y 방향이면,

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = q \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_x B_y \end{bmatrix} \tag{8}$$

이 된다. 즉, 전하 q 는 z 방향으로만 힘을 받게 된다.

$$F_z = qB_y v_x \tag{9}$$

전하가 받는 힘 F_z 는 전하량 q 와 자기장에서 전하의 운동 방향에 수직 성분인 자속 밀도 B_y 와 전하의 운동 속도 v_x 에 비례한다. 전하량 q 와 영구자석에 의한 자속 밀도 B_y 가 정해진다면, 전하에 작용하는 힘 F_z 는 전하의 운동 속도 v_x 에 따라 결정될 수 있다. 전하가 받는 힘은 운동 속도에 비례하므로, 힘은 z 방향으로 작용하고, 감쇠 계수 α 를 갖는 감쇠기로 표현될 수 있으며, α 는 자속 밀도와 전하량에 따라 결정된다. 따라서, 이산 시간 영역에서 역감 제시 장치가 나타내는 힘은

식 10과 같다.

$$F_z(kT) = \alpha v_z(kT) \quad (10)$$

4.3 가상 과학 체험 공간 구현

전기적인 에너지와 기계적인 에너지의 변환을 나타내는 전동기와 발전기의 원리를 교육하고 체험하기 위하여 그림 11과 같이 N극과 S극을 나타내는 두개의 자석, 건전지와 도선, 힘을 받아 운동이 가능한 도체와 받침대 역할을 하는 두개의 도체로 구성된 가상 환경을 구현하였다. 두극 사이의 반투명한 화살표는 자기장의 세기와 방향을 나타내고 자기장내에서 전류의 흐름은 힘을 받는 도체 내부의 작은 구로 표현하였다.

사용자는 역감 제시 장치를 통해 가상환경에 있는 자기장 내부에서 전류를 나타내는 구를 움직이게 한다. 4.2절에서 제안된 에블레이션에 의해 전류가 흐르는 도체가 받는 힘이 계산되어 사용자는 역감 제시 장치를 통해 실시간으로 힘을 느끼며 체험할 수 있다.

사용자는 가상 환경에서 전류에 나타나는 화살표 변화를 통해서 전류의 방향과 작용하는 힘을 시각적으로 확인할 수 있으며 대화상자의 에디터 창을 통해 실시간으로 임의의 자속밀도를 입력하고 물리적 변화를 체험해 봄으로써 가상 환경과의 상호작용을 향상시켰다.

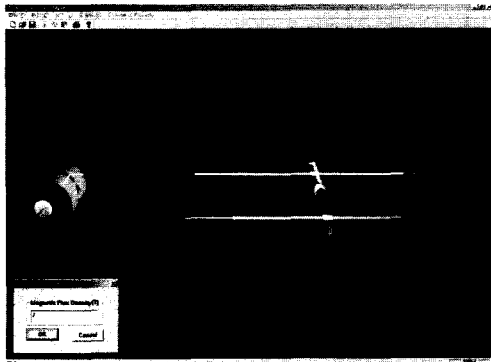


그림 11 기전 세계의 가상 과학 체험 공간

5. 거시 세계(Macro World)

거시 세계의 동역학은 기계공학과 제어공학, 로봇공학, 영상 애니메이션, 다물체 시뮬레이션 등의 여러 분야에서 응용되고 뉴턴 운동법칙, 일과 에너지 원리, 에너지 보존법칙, 역적과 선/각운동량 및 보존 원리, 병진/회전/상대운동, 고정/이동 좌표계, 관성모멘트, 자이로스 코프 운동 등 많은 복잡한 개념들을 포함한다.

본 장에서는 동역학 교육에서 회전 좌표계를 이용한 상대 운동과 힘에 관련된 물리적 현상에 대한 교육 및 학습의 도구로서 역감 제시 장치를 이용한 가상 현실

시스템의 효율성과 구현방안을 보인다.

5.1 가상현실의 효율성

회전 좌표계를 이용한 상대운동 해석을 적용할 수 있는 물리적인 상황은 일상 생활에서 쉽게 접할 수 있다. 그러나, 복잡하고 난해한 식을 적용하여 물체의 운동을 해석하기 위해서는 각 항목들의 물리적 의미와 현상을 정확하게 이해하고 있어야 한다.

먼저, 회전 좌표계를 이용한 상대 운동 해석에 대한 기존의 교육방법에 대해 알아보자. 강체들(혹은 기구들)이 조합되어 있고 연결된 물체들 사이에 미끄럼(sliding)이 발생하는 경우에 대한 운동학 해석은 병진운동과 회전 운동을 함께 하는 좌표계를 이용하는 것이 최선의 방법이다. 이와 같은 물리적 현상은 그림 12와 같이 그림과 글로 설명된다.

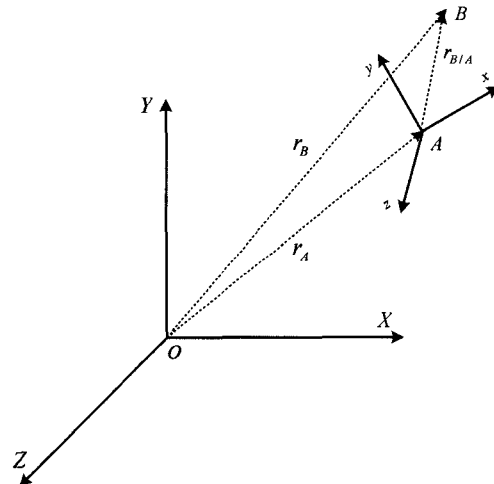


그림 12 병진운동과 회전운동을 함께 하는 좌표계

그리고 식 11, 12와 같은 수식의 유도를 통해 각 항목에 물리적인 의미를 부여함으로써 점 B의 운동과 회전 및 병진 운동을 동시에 하면서 움직이는 좌표계 A의 물리적 관계를 설명한다.

첫째, 질점 B의 절대 속도는 위치벡터 $r_B = r_A + r_{B/A}$ 를 미분함으로써 유도한다.

$$v_B = v_A + \Omega \times r_{A/B} + (v_{B/A})_{xyz} \quad (11)$$

둘째, 질점 B의 절대 가속도는 식 (5.1)을 미분함으로써 식 (5.2)와 같이 구할 수 있다.

$$a_B = a_A + \dot{\Omega} \times r_{B/A} + \Omega \times (\Omega \times r_{B/A}) + 2\Omega \times (v_{B/A})_{xyz} + (a_{B/A})_{xyz} \quad (12)$$

이와 같이 복잡한 수학적 기술에 의해 유도된 각 항들이 지니고 있는 물리적인 현상이나 의미는 단순한

2차원적인 그림이나 그래프 또는 글로 설명되고 실험에 의한 실제 경험은 거의 불가능하다. 또한, 연습문제 풀이과정에서도 유도된 공식에 맞춰서 수학적으로 계산된 결과는 임의의 숫자로만 나타나므로 물리적 현상의 진행과정이나 의미를 직관적으로 이해하고 예측하기에는 부족한 점이 많다.

그러므로, 교육자나 피교육자의 의지에 따라 물리적인 의미를 지니고 있는 여러 가지 동역학 수식의 항목에서 변수들의 변화로 야기된 물리적 영향을 다각적인 정보로 나타낼 수 있고 체험할 수 있는 역감 제시 장치를 이용한 가상 현실 시스템이 효과적이다.

5.2 역감 제시를 위한 에몰레이션

식 12의 4번째 항목은 제일 먼저 찾아낸 G.C. Coriolis의 이름을 따서 Coriolis가속도라고 부른다. 이 항은 xyz좌표계가 회전하기 때문에 생겨나는 성분으로 로켓이나 장거리 미사일에 작용하는 가속도와 힘을 다루거나 지구의 회전에 많은 영향을 받는 물체의 운동을 다루는 경우에는 항상 고려되는 것이다. 하지만 실제로 시험하고 경험하기에는 서론에서 기술한 여러 가지 제한점이 따른다.

따라서 식 12의 여러 항목 중 Coriolis가속도의 변화에 의해 질점이 받는 힘을 역감 제시하기 위해 다음과 같은 에몰레이션 방법을 제안한다.

Coriolis가속도의 벡터 운동(Kinematics) 식은

$$a_c = 2\Omega \times (v_{A/B})_{xyz} \quad (13)$$

이 된다

계산을 단순화하기 위해 XYZ좌표계와 xyz 좌표계의 원점은 일치하고 각속도 Ω 는 Z축 방향이며 xyz 좌표계에 대한 B는 xy평면에서 운동한다고 가정하면 식 13은 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} (a_c)_x \\ (a_c)_y \\ (a_c)_z \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} -\Omega_z (v_{A/B})_y \\ \Omega_z (v_{A/B})_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Rotation Matrix, R_o^A 를 이용하여 XYZ좌표계로 변환하면,

$$R_o^A = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} (a_c)_x \\ (a_c)_y \\ (a_c)_z \end{pmatrix} = 2R_o^A \begin{pmatrix} -\Omega_z (v_{A/B})_y \\ \Omega_z (v_{A/B})_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

이 된다. 질량 m 을 가진 질점 B에 작용하는 힘 성분에서 Coriolis가속도를 발생시키는 힘은 식 17과 같다.

$$F_c = m(a_c)_{xyz} \quad (17)$$

따라서, 이산시간 영역에서 절대 좌표계 XYZ 대해 역감 제시 장치가 나타내는 힘은 식 18과 같다.

$$F_c(kT) = m(a_c(kT))_{xyz} \quad (18)$$

5.3 가상 과학 체험 공간 구현

회전 좌표계를 이용한 상대운동 해석을 교육하고 체험할 수 있도록 그림 13과 같이 가상 환경을 구현하였다. 원판은 가운데 축을 중심으로 일정한 속도로 회전하는 상대 좌표계를 의미하며 그 위를 금속성 구슬이 상대 운동을 하면서 Coriolis가속도를 받게 된다.

사용자가 역감 제시 장치를 통해 가상 환경으로 입력하는 변위정보는 상대 좌표계에서 본 구슬의 상대변위를 의미하고, 상대 운동에 의해 구슬에 발생하는 Coriolis가속도와 힘은 5.2절에서 제안된 에몰레이션 기법에 의해 계산되어 다시 역감 제시 장치를 통해 사용자는 느낄 수 있다.

교육 및 학습효과를 향상시키기 위해 반경 방향으로 물체의 운동을 나타내고 회전속도를 느낄 수 있도록 원판 바닥에 시각적으로 줄무늬를 보여주었고 쇠구슬이 상대운동을 했을 때 발생하는 속도와 작용력을 화살표로 나타내었다. 또한, 대화상자의 에디터 창을 통해 실시간으로 임의의 각속도 변화가 가능하며 물리적 현상을 시각 및 촉각으로 체험할 수 있도록 하였다.

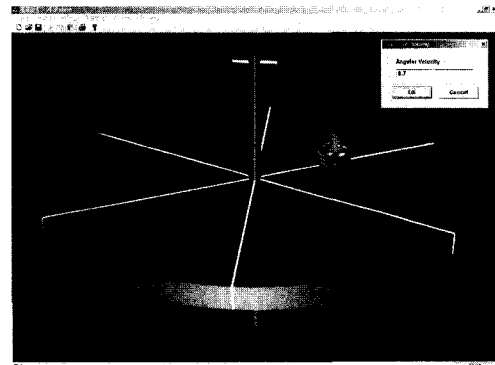


그림 13 거시 세계의 가상 과학 체험 공간

6. 시스템 구성

가상 현실 시스템의 구성은 사용하는 하드웨어와 소프트웨어에 따라 많은 차이가 있다.

본 논문에서 설계된 가상 현실 시스템은 사람과 역구동이 가능한 역감 제시 장치, 이산 시간 제어기로 구성되어 연속 시간 신호와 이산 시간 신호가 동시에 존재하는 sampled data system이다. 그림 14에서 사용자의 조작에 따라 역감 제시 장치의 인코더(encoder)로부터

나오는 신호는 A/D변환기를 통해 x_k 와 \dot{x}_k 같이 샘플링 된 신호가 된다. 이 신호를 받은 Digital computer에서 앞에서 고안된 에몰레이션 기법에 의해 역감 제시 장치로 들어가는 힘 F_k 를 계산하고, D/A 변환기를 통해 연속 시간 신호 $F(t)$ 로 변환한다. 그리고, 신호에 비례하는 전류가 역감 제시 장치의 구동기에 입력되어 사용자는 힘을 느낄 수 있게 된다. 또한 Digital computer는 시각과 청각적인 상호작용을 위해 입체적인 그래픽 정보와 음향 정보를 출력한다.

본 연구에서 구축된 가상 현실 시스템은 그림 15와 같이 Immersion사의 2 자유도 Impulse engine을 역감 제시 장치로 사용하였고 Windows 기반에서 OpenGL과 MFC를 이용하여 가상환경 및 에몰레이션 엔진을 구축하였다. 또한 I-Glasses나 CrystalEyes를 통해 texture mapping과 stereoscopic view기술을 이용한 그래픽 정보를 제공함으로써 현장감과 몰입감을 향상시켰다.

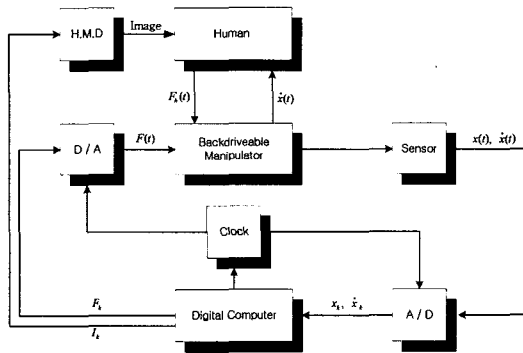


그림 14 시스템 구성도

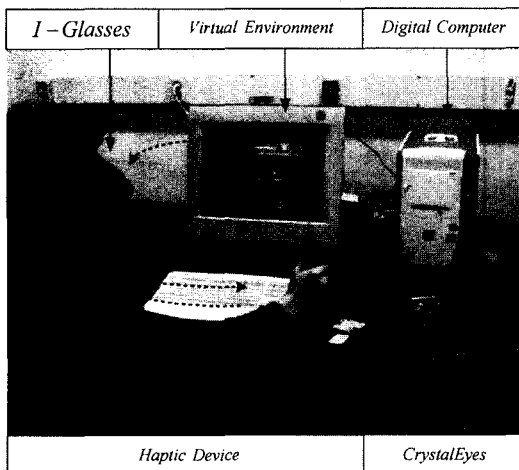


그림 15 가상 현실 시스템

7. 결론

과학 교육 분야에서 역감 제시 장치의 효용성 및 활용방안을 효과적으로 나타낼 수 있는 4가지 과학 세계에 대하여 주요 물리적 현상의 역감 제시를 위한 에몰레이션 기법을 고안하였고 교육적 효과를 향상시킬 수 있도록 가상 현실 시스템을 설계 및 구현하였다.

가상 과학 체험동안 에디터 창을 통해 실시간으로 물리적 정보(위치, 속도, 힘 등)의 입력 및 확인을 가능하게 함으로써 교육 효과뿐만 아니라 고안된 모델링의 정확성을 확인할 수 있었다. 또한, 역감 제시 장치의 거동을 통해 sampled data system의 안정성을 볼 수 있었다. 하지만, 정보의 다양한 표현방법과 시스템의 안정성을 보장하는 모델 변수의 도출 및 해석적인 선택 조건이 요구되었고 2 자유도 역감 제시 장치의 제한된 움직임과 역감 제시, 입체적인 (stereoscopic) 그래픽 실행의 시간지연으로 현실감이 감소하였다.

본 연구를 통하여 효과적인 가상 과학 체험 공간을 설계하고 구현하기 위해서는 다음과 같은 사항이 고려되어야 함을 확인할 수 있었다. 첫째, 가상 현실 속에서 자연스런 항해를 위해 역감 제시 장치는 3자유도 이상을 가져야 한다. 둘째, 역감 제시 장치가 낼 수 있는 힘은 최소한 역구동(backdrive) 마찰력 보다는 커야 하고, 에몰레이션되는 최대 역감을 나타낼 수 있어야 한다. 셋째, 역감 제시를 위한 힘 대역폭(bandwidth)은 미시 세계와 같은 경우 손이나 손가락의 힘 작용 대역폭인 5-10Hz 이상이 요구되고, 마찰 세계와 기전 세계, 거시 세계와 같이 동역학적인 경우 근육의 감지 대역폭인 20-30Hz 이상이 되어야 한다 shimoga(1992). 넷째, 주기적인 마찰 현상의 정확한 에몰레이션을 위해서 한 샘플링 주기 동안 역감 제시 장치의 최대 변위 변화량은 스틱 상태의 최대 변위량, z_{max} 보다 작아야 한다. 다섯째, 구동기에 의해 물리적인 힘이나 촉감을 주는 역감 제시 장치의 불안정성은 사용자에게 거부감이나 위험감을 느끼게 하여 몰입감 및 흥미를 떨어뜨리므로 역감 제시 장치는 강인한 안정성과 실시간 실행이 필요하다.

앞으로 HMD를 착용한 상태에서 키보드나 마우스, 역감 제시 장치를 동시에 사용하는 것은 어려움이 따르므로 사용자에게 직관적인 인터페이스와 몰입감을 향상시키기 위하여 motion tracking과 음성인식 등의 가상 현실 기술을 통합한 시스템의 구성 및 설계방안이 요구된다. 또한 공식이나 방정식과 같은 문자교육의 자연스런 가상 현실과 접목 방안에 관한 연구가 필요하며 가상 환경과 사용자의 상호작용을 통해 단계적인 교육진행이 가능하도록 내용물과 진행 방식에 관한 연구가 요구된다.

참고 문헌

[1] Grigore C. Burdea "FORCE AND TOUCH FEEDBACK FOR VIRTUAL REALITY" John Wiley & Sons, Inc. 1996.

[2] Grigore C. Burdea, Philippe Coiffet "VIRTUAL REALITY TECHNOLOGY" John Wiley & Sons, Inc. 1994.

[3] Harvey, Erica "Haptic Representation of the Atom." Developer's meeting, National Science Foundation funded group, Physical chemistry On-Line, Monmouth, NJ, August, 1999.

[4] Wanger, Len. "Haptically Enhanced Molecular Modeling: A Case Study." Proceedings of the Third PHANTOM Users Group Workshop, AI Lab Technical Report No. 1643, MIT: 1998.

[5] Bayazit, O.B.; Guang Song; Amato, N.M. "Ligand binding with OBPRM and user input "Robotics and Automation Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on , Volume: 1 , Page(s): 954 -959 vol.1, 2001.

[6] Dede, C., Salzman, M., and Loftin, B. "The Development of a Virtual World for Learning Newtonian Mechanics." In P. Brusilovsky, P. Kommers, and Nstreitz, Eds., Multimedia, Hypermedia, and Virtual Reality. Berlin: Springer(in press)

[7] Christopher Richard Allison M. Okamura and Mark R. Cutkosky, "Getting A Feel for Dynamics: Using Haptic Interface Kits for Teaching Dynamics and Controls" American Society of Mechanical Engineering, Dynamic Systems and Control Division, Vol. 61, pp. 15 3-157, 1997.

[8] E. Colgate, P. Grafing, M. Stanley and G. Schenkel, "Implementation of Stiff Virtual Walls in Force-Reflecting Interfaces." Proceedings of VRAIS, Seattle, WA, pp. 202--208, September, 1993.

[9] Okamura, A.M., Dennerlein, J.T., and Howe, R.D., "Vibration feed back models for virtual environments," Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation, , pp. 674-679, 1998.

[10] Arai F., Andou D., Fukuda T., Nonoda Y., Oota T., "Micro manipulation based on micro physics-strategy based on attractive force reduction and stress measurement," IEEE/RSJ Conf. on Intell. Robots and Systems IROS '95, vol 2:236-241, Pittsburgh, USA, 1995.

[11] Bharat Bhushan, Othmar Marti, "HAND BOOK OF MICRO/NANO TRIBOLOGY," CRC Press LC, 2001.

[12] Karnopp D. "Computer Simulation of Stick Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems," ASME J. of Dyn. Systems, Meas. and Control. 107:100-103, 1985.

[13] Dahl, P. R. "Solid friction damping of mechanical

vibration," AIAA J., 1 4(2):16 75-82, 1976.

[14] C. Canudas de wit, H. Olsson, K.J. Astrom, and P.Lischinsky. "A new model for control of systems with friction," IEEE Trans. On Automatic Control, 40(3): 419-425, 1995.

[15] Salcudean S. E., Vlaar T.D. "On the emulation of stiff walls and static friction with a magnetically levitated input/output device," Proc. ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol. 55-1, New York: ASME, pp.303-310, 1994.

[16] Chen, J., DiMattia, C., Taylor II, R.M., Falvo, M., Thiansathon, P., Superfine, R. "Sticking to the point: A friction and adhesion model for simulated surfaces." Prod. ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol. 61, pp.167-171, 1997.

[17] Vincent Hayward and Brian Arm strong "A New Computational Model of Friction Applied to Haptic Rendering," in Experimental Robotics VI, P. Corke and James Trevelyan(eds.), Springer: New-York, LNCS 250, pp 403-412, 2000.

[18] Pierre Dupont, Brian Armstrong and Vincent Hayward "Elasto-Plastic Friction Model: Contact Compliance and Stiction" American Control Conference, Chic ago, June, 2000.

[19] J. Edward Colgate, Gerd G. Schenkel "Passivity of a Class of Sam pled-Data Systems: Application to Haptic Interfaces" Journal of Robotic Systems 14(1), 37-47, 1997.



김 호 정
1974년 7월 25일생. 2000년 중앙대학교 기계공학부(공학사). 2002년 광주과학기술원 기전공학과(공학석사). 2002년~현재 국방과학연구소 연구원. 관심분야는 VR(Virtual Reality), HCI(Human Computer Interface), 실시간 분산 모델링 및 시뮬레이션



류 제 하
1959년 7월 19일생. 1982년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1984년 KAIST 기계공학과(공학석사). 1991년 The University of Iowa, 기계공학과(공학박사) 1992년~1994년 United Defence LP 선임 연구원. 1995년~현재 광주과학기술원 기전공학과 교수. 관심분야는 역/촉감제시장치 설계 및 제어, 컴퓨터 햅틱스, 교육 및 재활 훈련에 적용