

# 햅틱 상호작용을 제공하는 가상 전시공간 개발

## (Development of A Haptic Inter- active Virtual Exhibition Space)

유 용 희<sup>†</sup>      조 윤 혜<sup>\*\*</sup>  
(Yonghee You)    (Yun Hye Cho)

최 근 석<sup>\*\*</sup>      성 미 영<sup>\*\*\*</sup>  
(Geon Suk Choi)    (Mee Young Sung)

**요 약** 본 논문에서는 촉각 상호작용이 가능한 가상 전시공간을 제안한다. 제안하는 가상 전시공간은 3차원공간에서 3D 객체로 표현된 전시물들을 시각적으로 관람하고 전시물에 대한 정보를 습득할 수 있을 뿐 아니라 촉감을 통해서도 전시물을 체험할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 햅틱 가상 전시공간은 시각, 청각, 촉각을 사용한 다양한 관람 방법을 제공한다. 전시물에 따라 재질의 변화를 두어 다양한 촉감을 제공하고, 전시물의 기능을 실제로 구현한 햅틱 드림과 햅틱 피아노를 구현하였다. 햅틱 가상 전시공간은 사용자 인터페이스의 효율성을 높이기 위하여 화면 이동수단으로 햅틱 장치를 이용하였다. 햅틱 가상 전시공간은 사용자들의 상호작용을 위해 클라이언트 서버 구조로 네트워크 전송을 실시하고 사용자들의 존재감을 높이기 위해 사용자들을 아바타로 표현하였다. 추가적으로 햅틱 가상 전시공간을 현존하는 가상 전시공간 QTVR, VRML 시스템과 비교하여 성능분석을 실시하였다.

**키워드** : 햅틱, 가상전시, 햅틱가상 박물관, Haptics

**Abstract** In this paper, we present a haptic virtual

- 이 논문은 인천대학교 2007년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음
- 이 논문은 2007 한국컴퓨터종합학술대회에서 '햅틱 상호작용을 제공하는 가상 전시공간 개발'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

<sup>†</sup> 학생회원 : 인천대학교 컴퓨터공학과  
yhinfuture@incheon.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 비 회 원 : 인천대학교 컴퓨터공학과  
youngken@incheon.ac.kr  
firace@incheon.ac.kr

<sup>\*\*\*</sup> 종신회원 : 인천대학교 컴퓨터공학과 교수  
mysung@incheon.ac.kr

논문접수 : 2007년 9월 27일

심사완료 : 2007년 10월 23일

: 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제13권 제6호(2007.11)

Copyright©2007 한국정보과학회

exhibition space that allows users to interact with 3D graphic objects not only through the sense of sight but also through the sense of touch. The haptic virtual exhibition space offers users in different places some efficient ways to experience the exhibitions of a virtual musical museum using the basic human senses of perception, such as vision, audition, and touch. Depending on 3D graphic objects, we apply different properties to let those feel realistic. We also provide haptic device based navigation which prevents users from rushing between various interfaces: keyboard and mouse. The haptic virtual museum is based on Client-Server architecture and clients are represented in the 3D space in the form of avatars. In this paper, we mainly discuss the design of the haptic virtual exhibition space in detail and in the end, we provide performance analysis in comparison to other similar applications such as QTVR and VRML)

**Key words** : Haptics, Haptic Virtual Museum, Virtual museum

### 1. 서 론

햅틱스(haptics)는 인간과 컴퓨터가 정보를 주고 받는 과정에서 시청각 정보에 국한되지 않고 촉각정보도 이용하는 컴퓨터 촉각기술이다. 이 촉각 기술과 현재 활발히 연구 개발되고 있는 가상 전시공간의 융합이 본 논문의 목표이다.

디지털 기술이 발전함에 따라서 시·공간적 제약이 있는 실 세계 문화 콘텐츠의 하나인 전시공간을 홍보나 교육목적을 위해 가상공간에 구현하는 다양한 기법들이 개발되고 있다. 현재 연구되고 있거나 사용중인 가상 전시공간들은 대부분 시각과 청각을 이용하여 사용자에게 정보를 전달하고 있으나, 최근 햅틱 기술을 융합한 형태의 가상 전시공간에 대한 연구가 진행되고 있다[1,2]

가상 전시는 특정한 지역이나 시간에서만 열리는 전시회를 관람할 수 없는 사람들에게 24시간 전시물을 관람할 수 있는 기회를 주는 디지털 기술이다[3]. 현재 가상 전시공간들은 대부분 웹을 기반으로 하며 Pseudo-3D World of QTVR(QuickTime Virtual Reality), 3D Walk-through World of VRML(Virtual Reality Mark-up Language) 등의 기술을 사용하여 개발되고 있다[4].

보다 발전된 가상 전시공간인 햅틱 가상 전시공간은 본 절에서 설명되어진다. Southern California 대학의 Margaret L. McLaughlin 등은 실제 박물관에서 손으로 만질 수 없는 고대 유물 혹은 도자기 등을 3차원 모델로 생성하고, 햅틱 장치를 사용하여 시각뿐만 아니라 촉각으로도 전시물을 체험할 수 있도록 하는 햅틱 박물관을 개발하였다[1]. 일본의 Toshio Asano와 Yutaka Ishibashi 등은 분산 햅틱 박물관을 구현하여 인터넷 환

경에서 공룡 뼈, 미라 등의 3D 객체들을 펜-타입과 글로브-타입의 햅틱 장치를 통해 관람하도록 하였다[2].

본 논문에서는 햅틱 상호작용을 지원하는 가상 전시공간을 제안한다. 이를 위해 기존 가상 전시공간의 문제점을 파악하였고 햅틱스를 사용하여 개선된 가상 전시공간을 개발하였다. 또한 설문 조사를 통하여 햅틱 가상 전시공간의 효율성 및 필요성을 확인 하였다.

본 논문의 2절에서는 햅틱 가상 전시공간의 개요에 대하여 설명하고 3절에서는 햅틱 가상 전시공간의 설계를 논하며 4절에서는 햅틱 가상 전시공간의 효율성을 평가하기 위한 실시한 설문조사 방법을 논하고 결과를 분석한다. 5절에서는 본 논문의 결론과 향후 연구계획을 서술한다.

## 2. 햅틱 가상 전시공간의 설계

본 절에서는 햅틱 가상 전시공간에 필요한 각각의 구성요소들을 정의하고 각 요소들에 대해 설명한다. 그림 3은 햅틱 가상 전시공간의 구성요소를 나타낸다.

이 절에서는 본 연구에서 개발한 Platform 상위계층의 Interface, Renderer, Resource, Application계층을 구성하는 각 요소들에 대해 설명한다.

### 2.1 Haptic Interface Module

Haptic Interface Module은 햅틱 장치와 직접적으로 통신을 하며 실시간으로 햅틱 장치의 좌표 및 버튼 클릭 이벤트를 수신한다. 햅틱 장치로는 PHANToM Omni를 사용하였다. PHANToM Omni는 펜 타입의 햅틱 장치로 6 공간자유도(spatial degrees of freedom; DOF)와 3 힘자유도(force DOF)를 가진다. PHANToM Omni를 사용하기 위하여 OpenHaptics 툴킷을 사용하였다.

### 2.2 Network Module

Network Module은 햅틱 가상 전시공간에서 사용자들의 데이터들을 전송하는데 사용된다. 주요 전송 데이터로는 햅틱 장치의 좌표와 이벤트, 아바타 상태정보, 유저 위치정보 그리고 채팅 메시지가 있다. Network Module을 통해 수신된 데이터들은 User Management Module로 보내져 서버에 접속된 사용자들의 정보를 갱신하는데 사용되고 채팅 메시지는 사용자들의 정보교환 및 협업을 돕는다.

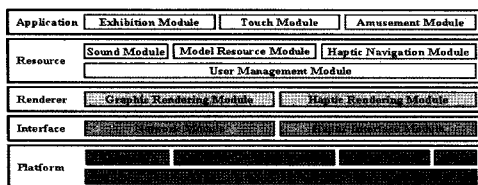


그림 1 햅틱 가상 전시공간 구성요소

### 2.3 Haptic Rendering Module

Haptic Rendering Module에서는 3D 객체의 사실적인 촉각 렌더링을 지원한다. 햅틱 가상 전시공간에서는 두 가지의 햅틱 렌더링 모드가 요구된다. 하나는 3D 객체를 햅틱 장치를 통하여 촉감을 얻는 것이고 또 다른 하나는 햅틱 장치의 상대적인 좌표를 받아 Spring-Damper 방식을 통하여 유저의 이동방향을 결정하는 것이다. 햅틱 포인터의 위치와 객체 외부에 그려진 프록시와의 거리를 사용하여 Spring과 Damper를 구한 후 Hooke's Law를 적용하여 힘 피드백을 구한다[5].

전자를 위해서 OpenGL의 피드백 버퍼를 사용하여 3D 객체를 햅틱 렌더링 해주는 OpenHaptics의 HLAPI를 사용하였다. 후자를 위해서는 프로그래머가 햅틱 장치에 직접 힘 피드백을 제공할 수 있는 HDAPI를 사용하였다.

HLAPI를 사용하여 Haptic Rendering Module은 Model Resource Module로부터 모델의 구현과 재질 데이터를 받아 모델의 시각과 촉각의 느낌을 일치시키는 역할을 한다. 이는 햅틱 렌더링시 대상 객체에 따른 재질 데이터를 적용시킴으로써 이루어지는데 이런 데이터는 Model Resource Module에서 제공된다. 또한 Haptic Interface Module로부터 입력되는 버튼 클릭 이벤트와 햅틱 포인터와 모델 사이에서 나타나는 Touch, On-Click, Motion 등의 이벤트들에 대해 정의하고 각각의 이벤트에 따른 처리를 콜백함수의 형식으로 제공한다.

한편 Haptic Rendering Module은 Haptic Navigation Module로부터 받은 힘피드백 정보를 직접적으로 햅틱 장치에 적용하는데 이는 저수준 하드웨어 접근이 가능한 HDAPI를 통해서 구현되었다.

### 2.4 Graphics Rendering Module

Open Graphics Library를 사용한 Graphics Rendering Module은 User Management Module을 통해 유저의 현재 상태와 그에 따른 모델, 아바타, 전시공간 등에 대한 그래픽 렌더링을 실시한다. 렌더링 주기는 30Hz 이고 햅틱 렌더링 주기와 비 동기적으로 동작한다.

### 2.5 User Management Module

User Management Module의 역할은 다자간 상호작용을 위한 전시공간의 구현을 위해 사용자들의 정보들을 저장하고 관리하는 것이다. 네트워크를 통하여 서버로부터 각 사용자들의 관리 정보를 수신하고 그 정보를 갱신하는 역할을 한다. 관리되는 정보들은 사용자 고유번호, 위치정보, 아바타 타입, 아바타 상태, 아바타 및 햅틱 포인터의 위치 정보등으로 구성되어진다.

Application의 Exhibition Module에서는 User Management Module에서 관리되는 정보를 기반으로 하여 사용자들을 대신하는 아바타들을 정확한 위치와 애니메

이선으로 구성할 수 있다. 또한 Amusement Module에서는 햅틱 포인터의 좌표를 사용하여 사용자간 협업을 유도한다.

**2.6 Sound Module**

Sound Module은 MSDN 라이브러리인 MCI를 사용하여 MP3 파일이나 WAV 파일을 재생하도록 하였으며 Exhibition Module에서 사용되는 배경음악과, Amusement Module에서 사용되는 각종 음원들을 로드하고 재생한다.

**2.7 Model Resource Module**

Model Resource Module은 두 가지 종류의 모델을 지원하고 있다. 하나는 전시물들의 3D스타일의 모델이고 또한 사용자들을 아바타로 표현하기 위한 MD3 모델을 저장하여 그래픽 및 햅틱 렌더링시 모델을 제공한다. 전시물을 나타내는 3D 모델을 로드 할 때, Model Resource Module은 모델에 대한 햅틱 렌더링에 필요한 재질 데이터(Stiffness, Damping, Static Friction, Dynamic Friction)를 함께 로드 하여 Haptic Rendering Module에게 제공한다. 재질 데이터의 예시는 표 1에서 설명된다[7].

표 2의 데이터들을 가상 공간의 객체에 적용한 후 설문 조사를 통해 실제 물체의 느낌과 비교하여 얻어졌다. 이런 데이터를 통해 3D 전시물은 시각뿐만 아니라 사실적인 촉감도 제공할 수 있다.

표 1 햅틱 렌더링 재질 데이터 예제

구분	Stiffness	Damping	Static Friction	Dynamic Friction
Wood	1.0	1.0	0.2	0.2
Rock	1.0	1.0	0.7	0.2
Glass	1.0	1.0	0.0	0.0
Fur	0.5	0.1	0.9	0.2
Leather	1.0	0.0	0.1	0.7

Model Resource Module은 MD3포맷의 3D 데이터도 지원하는데 이는 사용자를 대변하는 아바타를 나타내기 위함이다. Quake3 모델인 MD3 모델을 햅틱 가상 전시공간에서 사용하기 위하여 총 6가지의 애니메이션을 구현하였다. 상체 애니메이션으로는 STAND, TOUCH, GREET, BROWSE가 있고 하체 애니메이션으로는 WALK, STAND가 있다. 이런 애니메이션 동작을 통하여 아바타는 사용자의 현재상태를 나타나게 된다.

**2.8 Haptic Navigation Module**

3D 가상 환경 내에서 사용자가 이동하거나 아바타를 움직일 때 일반적으로 사용되는 것은 마우스와 키보드이다. 앞, 뒤, 좌, 우 이동을 위해 키보드의 방향키를 사용하고 뷰의 회전을 위해 마우스를 사용한다. 하지만 키

보드, 마우스와 더불어 햅틱 장치까지 포함해 하나의 가상환경을 사용하는데 세 가지의 인터페이스 장치를 사용해야 한다면 사용자는 세 개의 장치를 분주하게 바꿔가면서 조작해야 하므로 3D의 몰입감을 반감시킬 것이다. 이런 단점을 보완하기 위해 Haptic Navigation Module는 햅틱 장치만을 이용하여 3D 환경 내에서 이동이나 뷰의 회전을 할 수 있게 해준다.

PHANToM Omni의 행동 반경은 넓이가 160mm(400픽셀), 높이가 120mm(350픽셀) 그리고 깊이가 70mm(150픽셀)이다. 이 행동 반경의 중심을 구하고 그 중심으로부터 현재 햅틱 포인터의 위치를 구하여 이동 방향과 뷰의 회전을 결정한다.

우선 이동을 위해서 그림 2에서 보는 것과 같이 x-z 평면상에서 햅틱 포인터의 위치와 중심점과의 거리를 계산하고 표준화하여 화면의 이동 벡터를 구한 다음, 이동 벡터의 반대 벡터를 구하여 힘 피드백의 값을 결정한다. 그림 3에서 원들은 햅틱 포인터의 좌표를 나타내며 중심을 향한 화살표는 힘 피드백을 나타낸다.

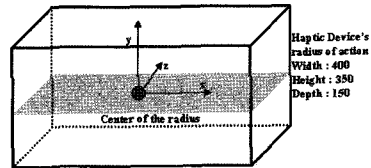


그림 2 화면 이동 벡터를 구하기 위한 햅틱 이동 반경

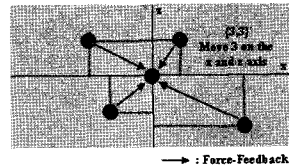


그림 3 화면 이동시 힘 피드백

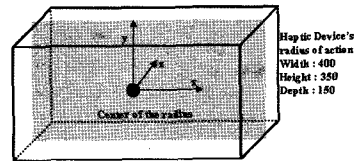


그림 4 화면 회전 벡터를 구하기 위한 햅틱 이동 반경

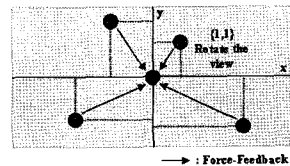


그림 5 화면 회전시 힘 피드백

화면의 회전을 구하기 위해서는 햅틱 이동 반경의 x-y 평면에서 중심을 기준으로 하여 화면의 회전 벡터를 구하였다. 회전을 구하기 위한 햅틱 이동 반경과 힉피드백의 계산은 그림 4와 5에서 설명된다.

이에 더하여 Haptic Navigation Module은 햅틱 장치의 두 개의 버튼을 마우스 버튼과 같은 기능으로 사용하였다. 이를 통해 사용자는 단 하나의 인터페이스로 3D 가상 전시 공간을 이동할 수 있다.

**2.9 Exhibition Module**

Exhibition Module은 유저에게 다양한 3D Walk-through World of VRML과 같은 가상 전시환경을 제공한다. 3D Walk-through World of VRML과 비교해 보면, 3D 공간을 이동하며 관심 있는 전시물을 관람하는 것은 같지만 평면위주로 제작된 VRML의 전시물과는 달리 3D 모델로 제공되는 전시물을 시점의 이동을 통하여 사방에서 관람이 가능하다는 차이점이 있다.

**2.10 Touch Module**

Touch Module는 하나의 전시물에 대한 햅틱 렌더링을 제공한다. Touch Module의 실행화면은 그림 6과 같다. 화면에서 1번 부분은 전시물의 소개에 대한 설명이 제공되고, 2번은 시각과 촉각으로 관람할 수 있는 전시물이다. 3번 부분은 전시물을 조작할 수 있는 인터페이스이고 4번은 햅틱 포인터이다. 사용자는 햅틱 포인터를 인터페이스 위에서 좌우 상하로 이동하면서 회전시키거나 크기를 변경할 수 있다. 이를 통해 사용자는 전시물을 원하는 크기 및 방향으로 관람할 수 있다.

**2.11 Amusement Module**

Amusement Module는 Haptic Piano와 Haptic Drum의 두 가지가 제공된다. 각각 피아노와 드럼이 렌더링 되

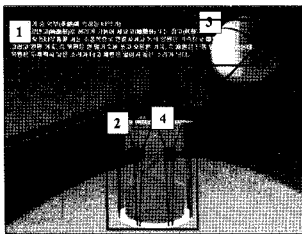


그림 6 Touch Module 실행 화면

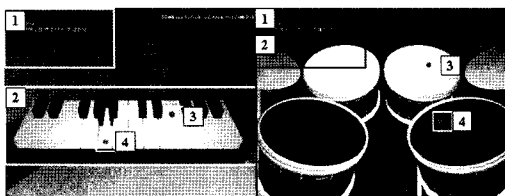


그림 7 햅틱 피아노, 햅틱 드럼 실행 화면

며, 햅틱 렌더링된 객체와 상호작용 할 수 있는 햅틱 포인터도 렌더링 된다. 실행화면은 그림 7과 같다.

각 화면에서 1번 부분에서는 게임에 대한 설명이 나타나고 2번은 햅틱 상호작용을 제공하는 모델이다.

3번은 로컬 사용자의 햅틱 포인터를 나타내며 4번은 원격지 사용자의 햅틱 포인터를 나타낸다. 햅틱 포인터에 의해 감지된 건반은 실제로 건반이 눌리는 것과 같은 애니메이션이 실행되고 드럼은 색이 변하게 된다. 또한 사운드가 발생하여 음악을 연주할 수 있게 된다.

**3. 설문조사**

본 논문에서 제안하는 햅틱 가상 전시공간의 효율성 및 필요성 그리고 문제점을 파악하기 위해 인천대학교 컴퓨터 공학과 20명의 학생을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 본 절에서는 설문조사의 방법과 결과에 대하여 설명한다.

**3.1 설문조사의 방법**

설문 조사는 아래의 3 단계로 나누어진다.

1단계: 우선 햅틱 장치를 전혀 사용해 보지 못한 학생들에게 햅틱 장치와 기술에 대한 간략한 설명을 하였다.

2단계: 그 후 학생들은 Pseudo-3D World of QTVR 기법으로 제작된 국립중앙 박물관의 사이버 박물관(museum.go.kr)과 3D Walk-through World of VRML로 제작된 국립민속박물관 사이버 박물관을 차례로 경험한 후 햅틱 가상 전시공간을 실행하게 된다. 또한 본 연구에서 제안한 햅틱 가상 전시공간에서 햅틱 기능을 제거한 또 하나의 가상 전시공간 테스트 응용을 만들어 햅틱스가 가상 전시공간에 미치는 영향을 분석하였다.

3단계: 위 네 가지의 가상 전시공간 응용에 대한 실험을 마친 학생들은 설문지를 작성하였다. 설문지의 구성은 QTVR, VRML, 가상 전시공간, 햅틱 가상전시공간을 비교하여 몰입감, 사실감, 오락성, 적합성, 이동의 효율성, 상호작용의 정도를 수치로 나타내는 것과 각각의 재질에서 나타나는 실재감의 정도를 표기 하는 것으로 구성되어 있다.

**3.2 설문조사 결과**

설문조사를 통해 얻어진 결과는 그림 8과 그림 9와 같다. 설문조사 데이터를 토대로 “각 시스템의 모평균은 같다.”는 귀무가설을 놓고 유의 수준 5%일 때 각 항목별 ANOVA(분산분석, Analysis Of Variance)를 실시하였다. 각 항목별 분산비는 몰입감, 사실감, 오락성, 적합성, 이동의 효율성 그리고 상호작용의 정도에 대하여 각각 24.61, 0.93, 20.95, 12.95, 14.07 그리고 55.92이다. 각 항목의 분산비를 임계치 F0.95(3,76)와 비교한 결과 사실감을 제외한 모든 항목들이 귀무가설을 기각하여

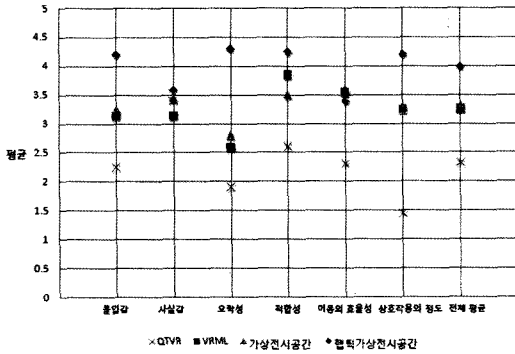


그림 8 시스템 비교 설문조사 결과

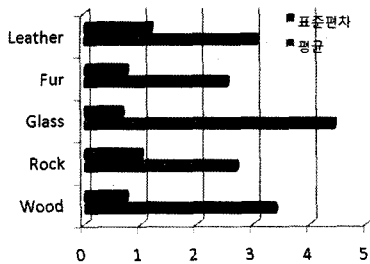


그림 9 재질의 실제감

각 수준의 평균에 차이가 있음을 보였다. QTVA, VRML로 구성된 가상 전시공간과 비교해 햅틱 가상 전시공간은 몰입감, 오락성, 전시공간으로서의 적합성, 그리고 상호작용 정도에서 상대적으로 높은 점수를 얻어 햅틱 가상 전시공간의 필요성을 확인할 수 있었다. 하지만 이동의 효율성에서는 마우스와 키보드를 사용하는 VRML 시스템에 비해 낮은 점수를 얻었는데 설문 대상자들은 햅틱 장치를 사용하는데 익숙하지 않았기 때문이라고 판단된다. 비교 시스템인 국립중앙 박물관과 국립민속 박물관의 사이버 박물관의 그래픽 수준이 본 연구에서 제안하는 햅틱 가상 전시공간의 그래픽 수준보다 상대적으로 우수하였다. 이를 바탕으로 가상 전시공간에서 나타날 수 있는 햅틱 사용을 통한 사실감이 외부 요인에 의해 상쇄 되었다고 분석된다.

재질의 실제감의 정도를 파악하기 위해 실시한 설문 조사에서는 그림 14와 같은 결과가 나타났다. “모든 재질에 대한 평가의 모평균은 같다.”는 귀무가설을 놓고 분산분석을 하였을 때 분산비는 13.04로 임계치 F0.95(3,76)와 비교한 결과 모든 재질감의 수준의 차이가 있음을 알 수 있었다. 매끄러운 재질을 가지는 Glass와 Wood는 많은 학생들이 실제 재질과 비슷하다고 응답하였고, Leather, Fur 그리고 Rock에 대해서는 상대적으로 낮은 점수를 부여하였다. 재질감 실험의 결과, PHAN-ToM Omni를 이용하는 햅틱 렌더링을 통해 어느 정도

의 재질감의 차이는 나타낼 수 있지만 사실적인 재질을 표현하기에는 부족한 것으로 판단되었다. 이는 PHAN-ToM Omni를 햅틱 장치의 한계에서 오는 부분일 수도 있다.

#### 4. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 현재 진행중인 가상 전시공간에 대해 설명하였고 햅틱 가상 전시공간 구현을 위한 소프트웨어 구성에 대하여 서술하였다. 또한 유사 시스템과의 비교를 통하여 본 연구에서 제안하는 햅틱 가상 전시공간의 장단점을 분석하였다. 햅틱 장치를 사용한 화면이동은 상대적으로 낮은 평가를 받았는데 이는 사용자가 3D 입력장치인 햅틱 장치에 대한 사전 경험 부족으로 판단된다. 또한 햅틱 렌더링시 재질정보를 제공하는데 있어서 실제와 같은 재질을 제공하는데 있어서 문제점을 발견하였다. 하지만 햅틱 가상 전시공간은 현존하는 QTVA, VRML 시스템들과 비교하여 향상된 몰입감, 사실감, 오락성 그리고 상호작용을 제공함을 확인하여 가상 전시공간 구현을 위한 가장 적합한 방법임을 증명하였다.

향후에는 본 논문에서 도출된 햅틱 장치를 사용한 네비게이션을 개선하여 초보자도 쉽게 사용할 방법을 개발하고 다양한 재질 표현을 위한 햅틱 렌더링 기법을 개발하는데 중점을 두어 연구를 진행할 것이다. 또한 전시 공간을 효율적으로 구성하는 방법 연구도 동시에 진행될 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] Margaret L. McLaughlin et al., "The Haptic Museum," in Proc. EVA2000, 2000.
- [2] Toshio Asano et al., "Surveys of Exhibition Planners and Visitors about a Distributed Haptic Museum," in Proc. ACE 2005, pp. 246-249, 2005.
- [3] 김희경, "가상 전시의 설계와 구현에 관한 연구", 인문콘텐츠, 제7호, pp. 51-71, 2006.
- [4] Narushige Shiode et al., "Utilising the Spatial Features of Cyberspace for Generating a Dynamic Museum Environment," Proceedings of the fourth symposium on Virtual reality modeling language, Vol.4, pp. 71-78, 1999.
- [5] PHANToM Omni: <http://www.sensable.com/>
- [6] He, E., Alimohideen et al., "Quanta a toolkit for hight performance data delivery over photonic networks," in Proc. IGRID 2002, Vol.19(2003), 2003.
- [7] 박남일, "거친 표면을 위한 촉각 렌더링의 합성 방법에 관한 연구", 인천대학교 대학원 석사학위 논문, 단행본, 2007.