

# 햅틱 변형을 이용한 반응형 디지털 문화 체험

이범찬<sup>1</sup>, 박정철<sup>2</sup>, 김종필<sup>1</sup>, 이관행<sup>2</sup>, 류제하<sup>1</sup>  
광주과학기술원 인간-기계-컴퓨터 인터페이스 연구실<sup>1</sup>  
광주과학기술원 지능 설계 그래픽스 연구실<sup>2</sup>  
{bcee<sup>1</sup>, lowtar<sup>1</sup>, ryu<sup>1</sup>}@gist.ac.kr  
{jucpark<sup>2</sup>, lee<sup>2</sup>}@kyebek.gist.ac.kr

## Responsive Digital Heritage Experience with Haptic Deformation

Beom-Chan Lee<sup>1</sup>, Jeung-Chul Park<sup>2</sup>, Jong-Phil Kim<sup>1</sup>,  
Kwan H. Lee<sup>2</sup>, Jeha Ryu<sup>1</sup>  
Human-Machine-Computer Interface Lab<sup>1</sup>  
Intelligent Design and Graphics Lab<sup>2</sup>  
Department of Mechatronics,  
Gwangju Institute of Science and Technology

### 요약

본 논문은 광주과학기술원(GIST)에서 개발하고 있는 전남지역 '운주사'의 천불천탑 설화를 근간으로 한 반응형 가상 문화 체험 시스템(Responsive Multimedia System for virtual storytelling)의 햅틱 변형 상호작용에 관한 것이다. 기존의 디지털 문화재 체험 시스템은 사실적인 체험을 제공하기 위해 시각 및 청각 기술 개발에 많은 연구 및 노력이 이루어져왔다. 그러나 최근 인간의 인지 체계의 중요 요소인 촉각 상호작용의 중요성이 증대 됨에 따라, 본 논문에서는 가상 문화재 체험을 위한 햅틱 변형 알고리즘 및 상호작용 시스템을 개발하여 가상 불상을 만져보고 그 표면을 변형시키게 함으로써 몰입감을 증대하고 재미를 주는 시스템을 제공하였다. 아울러 체험의 몰입감 증대를 위해 본 시스템은 시/청각과 더불어 청각 효과를 가미하여 체험 시 발생하는 주변 환경의 소리(새, 물, 바람소리)를 제공하고, 기존의 문화체험 시스템과의 차별성을 위해 3 차원 입력장치를 이용하여 체험자가 직접 가상 불상을 변형시키면서 체험자 고유의 작품을 만들어낼 수 있는 상호작용을 제공한다. 따라서 제안된 햅틱 변형 상호작용 시스템은 체험자의 능동적 참여 및 흥미 유발을 통하여 문화 유산에 대한 교육적 효과 및 관심 증대에 기여할 수 있을 것이라 여겨진다.

Keyword : Haptic deformation, Virtual storytelling, Virtual heritage, VR

## 1. 서론

가상현실(Virtual Reality)의 개념이 탄생된 이후, 가상현실은 실제로 존재하지 않는 특정한 환경, 상황을 컴퓨터를 이용한 모의실험을 통하여 인간의 오감에 일종의 착오를 가져오게 해서 마치 실세계에 놓여 있는 것처럼 느끼게 하는 인간-기계-인터페이스(Human-Machine-Interface) 즉, 인체의 오감이 인공적으로 창조된 세계에 몰입됨으로써

마치 자신이 그곳에 있는 듯한 착각에 빠지게 되는 것으로 정의되어 왔다. 오늘날 첨단 과학의 눈부신 발전으로 가상환경은 의료, 군사, 산업, 교육 등에 접목되어 실생활에 응용이 되었으며, 디지털 미디어의 비약적인 발전을 계기로 가상현실은 일상생활에서 대중이 쉽게 접할 수 있는 영화, 방송, 아바타, 게임 등의 매체로 다가 왔다. 이러한 디지털 미디어의 비약적인 발전으로 최근 대중이 접하며 교육, 예술적 가치를 창출하는 문화 체험에 관

심이 증대되어, 디지털 문화재 체험 개발을 위한 노력이 국내외에서 이루어져왔다.

국내외 디지털 문화재 복원 및 체험 시스템 사례로는 일리노이 주립대의 CAVE 를 기반으로 진행 되어온 VIRTUAL SHILLA, 디지털 무령왕릉, 영국 대영박물관의 파르테논 프레이저와 디지털 고구려 등 대중들에게 새로운 경험을 제시하려는 가상 문화 복원 시스템이 소개되었다[1-5]. 또한 KidsRoom [6] 및 NICE [7] 는 이야기 공간에 실 세계와 가상 세계를 접목함으로써 보다 자연스러운 공간을 연출하려고 노력하였으며, 다양한 효과(이미지, 조명, 음향, 비전 기반 행동인식)를 통하여 직관적인 상호작용을 구축하려 노력하였다. 그러나 앞서 언급한 문화 체험 시스템의 상호작용은 주로 시/청각에 의존되어 개발이 되었다. 따라서 보다 몰입감이 증대되는 체험을 제공하기 위해 제 3 의 인지 체계인 촉감 상호작용을 가미한 문화 체험 시스템이 제안이 되었다[8-11]. 그러나 촉감이 추가된 문화 체험은 단순히 형상을 느껴보거나 간단한 조작만을 제공하기 때문에 촉감 체험의 효과를 극대화 시키지 못한 단점을 갖고 있다. 따라서 최근 광주과학기술원의 본 연구 팀에서는 감각적인 시/청각 상호작용뿐 아니라 반응형 촉감 상호작용이 함께 접목된 Responsive Multimedia System (RMS)을 개발하였다[12].

본 논문에서는 RMS 의 중요 시스템 중 하나인 햅틱 변형을 이용한 반응형 문화 체험 시스템을 소개한다. 본 시스템은 시/청/촉감제시를 통해 사용자가 보다 사실적으로 디지털 문화재 체험을 할 수 있도록 구축이 되었으며, 사용자가 능동적으로 참여하여 문화재를 체험할 수 있는 햅틱 변형 알고리즘을 개발하였다. 본 논문에서 제안하는 햅틱 변형 알고리즘 및 햅틱 상호작용을 검증하기 위해 전남 화순 지방의 우리나라에서는 유래를 찾기 힘든 많은 비밀과 신비를 간직하고 있는 사찰인 ‘운주사’의 천불 천탑 설화를 근간으로 체험 시스템을 구축 하였다 [13]. 본 시나리오의 차별적 특징은 체험자에 의해 천불 천탑이 가상 ‘운주사’에 세워지면 돌들의 성스러움이 모여 천 년 동안 누워있던 와불이 서서히 일어나 민중의 세상이 도래

한다는 반응형 실감 미디어 체험을 제공하는 것이다. 따라서 체험자가 불상 및 불탑을 제작할 수 있는 햅틱 상호작용은 보다 사실적이고 직접 체험을 제공함으로써 보다 실제감 있는 문화 체험을 가능하게 하는데 비중이 높다고 할 수 있고, 체험자의 직접적 문화 체험을 유발함으로써 문화재 체험에 대한 흥미 증대 및 교육적 효과 증대에 기여할 것으로 기대된다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어있다. 광주과학기술원에서 개발하고 있는 Responsive Multimedia System (RMS) 개요를 2 장에서 언급하고, 3 장에서는 햅틱 변형을 이용한 반응형 문화 체험 시스템의 개요 및 알고리즘에 대해 자세히 기술할 것이다. 4 장에서는 구현 및 시연을 언급하고, 마지막으로 본 논문의 결론 및 향후 연구 계획을 5 장에서 제시할 것이다.

## 2. Responsive Multimedia System 개요

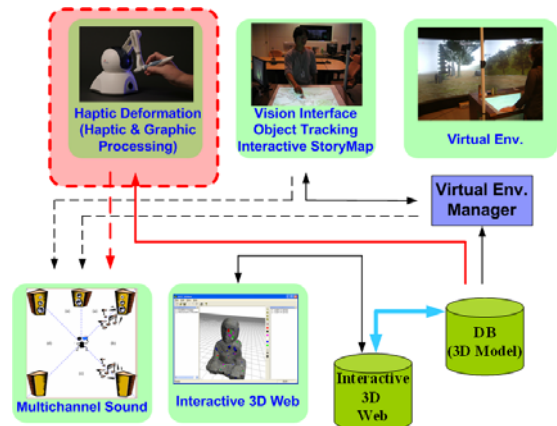


그림 1. Responsive Multimedia System 구성도

Responsive Multimedia System (RMS)은 반응형 문화 체험 시스템으로써 ARTable, 3D sound, interactive 3D web, 3D model database, VEManager, haptic deformation 으로 구성이 되어있다. 그림 1 은 RMS 시스템의 구성을 나타낸다.

ARTable 은 테이블 기반으로 사용자에게 감각형 (tangible) 인터페이스를 제공하며, AR(Augmented reality)기술을 이용하여 사용자에게 가상환경과의 상호작용을 제공한다. 3D sound 는 체험 공간 내 사실적인 음향 효과를 지원하기 위하여 5.1 채널 사운드 출력을 제공하고 있으며, 3D web 은 문화

체험 시스템을 경험 한 후 네트워크를 통해 체험자의 가정 또는 다른 공간에서 다양한 체험 콘텐츠를 경험할 수 있도록 구성되어있다. 3D model database 에는 실제 문헌 자료 및 현장 조사에 근거한 가상 3 차원 불상 및 불탑 모델들이 구축되어있다. VEManager 는 Physical engine 과 Environment engine 으로 구성되어있다. 전자는 가상 운주사 내 특정 물체와 주변 물체와의 충돌 검지를 관장하며, 후자는 가상 환경내의 날씨, 온도, 습도 등 환경의 변화에 대한 제어를 관장한다. RMS 에서 햅틱 상호작용은 3D model database 로부터 불상 또는 불탑 데이터를 전달 받아 체험자에게 촉감 상호작용을 통한 불상 창작 체험을 제공하고, 체험이 끝남과 동시에 3D model database 에 창작 불상이 저장되어 3D web 또는 ARTable 을 통해 체험자가 생성한 객체를 조작할 수 있도록 한다.

### 3. 햅틱 변형을 이용한 반응형 문화 체험

#### 3-1. 시스템 개요

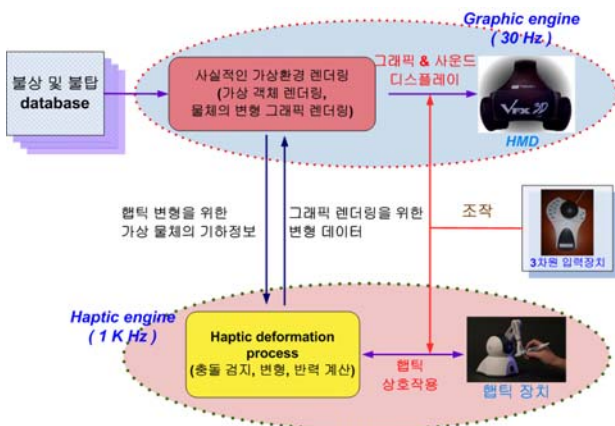


그림 2. 햅틱 변형을 이용한 반응형 디지털 문화 체험 시스템 구성도

본 논문에서 제안된 햅틱 변형을 이용한 반응형 디지털 문화 체험 시스템은 그래픽 렌더링과 햅틱 변형으로 구성되어있으며, 그림 2 는 본 시스템의 구성도를 나타낸다.

본 시스템은 Graphic engine 과 Haptic engine 로 크게 분리되어있으며 각각 30Hz, 1KHz 의 Update rate 를 갖고 있다. 전자에서는 가상환경에 존재하는 콘텐츠를 그래픽적으로 렌더링 함과 동시에 데

이터 베이스에 저장된 불상 또는 불탑 객체를 로딩하여 햅틱 상호작용을 위한 데이터로 사용할 수 있도록 하고, 후자는 햅틱 상호작용에 중요한 요소인 충돌 검출 및 변형 그리고 이에 상응하는 반력을 계산하는 과정을 담당한다. 가상 물체와의 햅틱 상호작용 시 사용자는 HMD 를 통하여 가상 환경을 제시 받음과 동시에 햅틱 인터페이스를 이용하여 가상환경에 구축된 가상 불상을 촉감 인터랙션을 통해 창작할 수 있다. 또한 불상을 만들어 내는 과정에서 사용자에게 불상을 조작하며 창작할 수 있도록 3 차원 입력 장치인 3D Space ball 을 사용자 인터페이스로 제공하였다.

#### 3-2. 사실적 가상 환경의 구성 및 렌더링

문화 체험을 위한 가상환경은 3 차원 배경, 불상 및 탑으로 이루어져있다. 따라서 복잡한 가상환경을 사실적으로 그래픽 렌더링 하기 위해서는 그래픽 렌더링 효율을 고려해야 한다. 본 시스템에 제안된 가상환경을 구성하는 콘텐츠는 정적 물체와 변형이 일어나는 동적 물체로 크게 나눌 수 있다. 정적 물체의 경우 물체의 형상 변화 없이 모양을 느낄 수 있는 햅틱 상호작용이 일어나는 반면, 동적 물체의 경우 물체의 형상이 햅틱 상호작용에 의해 계속 변하게 된다. 따라서 두 물체는 다른 방법으로 그래픽 렌더링 될 수 있다.

가상 물체를 OpenGL 을 이용하여 그래픽 렌더링 하는 경우 일반적으로 컴퓨터 그래픽스 분야에서 indexed geometry, display list, vertex buffer object 등의 방법을 사용한다. Indexed geometry 의 경우 가상 물체를 이루고 있는 점 데이터를 공유하는 메쉬의 인덱스 정보만을 이용하여 렌더링 하는 것이기 때문에 모든 점 데이터를 이용하여 그래픽 렌더링 하는 방법보다 효율적이라 할 수 있다. Display list 는 물체의 기하정보를 프로그램 캐시 메모리에 올려서 그래픽 렌더링을 하기 때문에 일반적으로 앞의 방법 보다는 효율성이 뛰어나다고 할 수 있다. 마지막으로 Vertex buffer object 는 OpenGL 의 확장 명령어를 사용함으로써 물체의 기하 정보를 그래픽스 하드웨어 메모리에 올리고 그래픽스

하드웨어 자체에서 렌더링 하는 기법을 말한다. Display list 와 Vertex buffer object 의 가장 큰 특징은, 전자는 메모리에 등록된 물체 기하정보를 실시간으로 바꿀 수 없지만 후자는 실시간으로 기하정보를 바꿀 수 있다는 것이다. 일반적인 그래픽 렌더링의 효율성을 알아보기 위해 가상 환경에 존재하는 물체의 메쉬 수를 증가 하면서 렌더링 시간을 측정하였다. 표 1 은 각 방법에 대해 가상 물체를 구성하고 있는 메쉬 수를 증가시키면서 그래픽 렌더링 수행 결과이다. 측정된 시간은 millisecond 단위이며 각 방법에 대해 100 번의 시간 측정 후 평균을 구한 값이다. 시간 측정 결과를 토대로 가상환경 내 구성된 정적 물체는 Vertex buffer object 를 이용하였으며, 동적 물체의 렌더링은 Indexed geometry 방법을 이용하여 그래픽 렌더링의 효율을 높였다.

표 1 그래픽 렌더링 시간 측정 결과

Methods	가상 객체의 메쉬 수					
	100K	200K	300K	400K	500K	600K
Indexed Geometry	16.65	16.82	25.31	28.31	30.66	31.98
Vertex Buffer Object	16.65	16.65	16.65	16.65	16.65	16.65
Display List	16.65	16.65	16.65	16.65	16.65	16.65

가상 문화 체험에 있어 사실성 극대를 위해 가상 환경 내 존재하는 불상, 불탑 및 배경은 실제 문헌 자료 및 현장 조사에 근거하여 3 차원 모델링 툴(Maya)을 이용하여 제작하였다. 가상 환경으로 각 물체를 로딩하기 위해 물체는 .Obj 파일 포맷을 따르고 있으며, 보다 사실적인 그래픽 효과를 위해 텍스처 매핑을 수행하였다. 그림 3 은 구현된 사실적 가상 환경을 보여준다.



그림 3. 사실적 가상환경 렌더링

### 3-2. 햅틱 변형 알고리즘

본 절에서는 햅틱 변형의 중요한 단계인 충돌 검출, 변형 및 반력 계산 알고리즘에 대해 상세히 기술한다.

#### 3-2-1. 충돌 검지

충돌 검지는 사용자에게 의해 움직이는 햅틱 인터랙션 포인트(Haptic Interaction Point)와 물체와의 충돌을 검출하는 과정이다. 햅틱 상호작용에서의 빠른 충돌 검지 및 반력 계산은 사용자에게 물체와의 상호작용 시 안정한 힘을 제공하기 위해 필수적이다. 따라서 빠른 충돌 검지를 하기 위해 최근 본 연구팀에서 제안한 그래픽 하드웨어를 이용한 충돌 검지 방법을 이용하였다[14].

사용된 충돌 검지 방법은 가상 카메라로부터 물체까지의 깊이 정보를 이용함으로써 수행된다. 깊이 정보의 획득은 국부적으로 물체를 렌더링 하는 6 개의 가상카메라로부터 획득되며, 6 개의 가상카메라는 물체의 표면상에 항상 위치하는 IHIP (ideal haptic interaction point)를 따라 이동하며 물체를 그래픽렌더링 하게 된다.

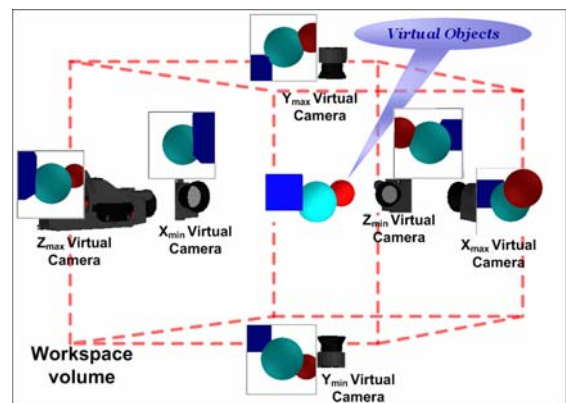


그림 4. 충돌 검지를 위한 6 개의 가상카메라

그림 4 는 6 개의 가상카메라의 위치와 카메라에 의해 물체의 국부가 렌더링 되는 것을 보여준다. 이 정보를 이용하여 HIP 가 객체 내부에 있는지를 검사하며 이것은 바로 충돌 검출로 이어진다. 6 개의 가상 카메라를 통하여 얻어진 깊이 정보는 가상카메라의 파라미터를 통해 객체의 6 면에 대한 기하학적 정보로 변환된다. 이 중 HIP 에 상응하

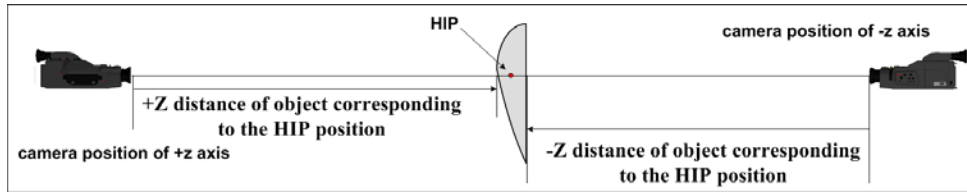


그림 5. Z 축 방향에서의 HIP 와 물체의 충돌 검지

는 객체의 기하학적 정보를 통해 HIP 가 객체의 내부에 있는지 위치 비교를 통해 쉽게 검사할 수 있다.

그림 5 는 Z 축에 위치한 2 개의 가상 카메라로부터 얻어지는 깊이 비교를 통한 충돌 검지의 예를 보여주고 있으며, 3 차원 충돌 검지는 남은 4 개의 가상카메라로부터 얻어지는 깊이 정보를 함께 이용하여 수행된다.

### 3-2-2. 변형 알고리즘

햅틱 장치를 이용한 변형과 같은 동적인 모델에 대해서 렌더링시 가장 시간을 많이 차지 하는 부분은 변형되는 영역을 탐색하는 것이다. 이러한 탐색시간을 효율적으로 줄이기 위해 k-d 트리 알고리즘을 사용하였다. k-d 트리는 n 차원 공간상에 존재하는 유한개의 요소(점)들을 저장하는 자료구조이다[15]. 이러한 k-d 트리는 이진 트리로 구성되어 있다. 그림 6 은 2 차원 평면에서의 k-d 트리 구조를 보여주고 있다.

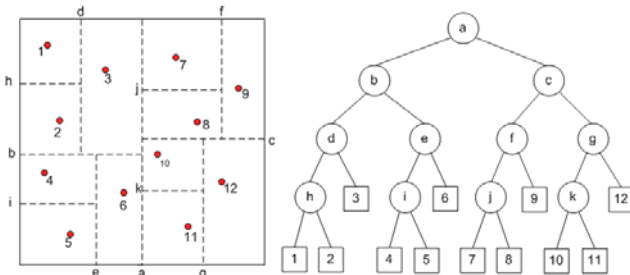


그림 6. 2 차원 평면에서의 k-d 트리 구조

트리 구성 후, 자신으로부터 가장 가까운 점을 찾는 알고리즘인 최근방 탐색 알고리즘을 이용하여 충돌 검지로부터 얻어진 점으로부터 변형이 될 이동 점들을 찾아내는데 사용된다[15]. k-d 트리는 최근방 탐색 알고리즘을 적용하는데 효율적인 방법이다. 최근방 탐색 알고리즘을 간략히 설명하면, 그림 5 에서 node 5 에 대한 가장 가까운 node 를

찾게 되면, node 5 의 부모 node 는 i node 가 된다. 어떤 node 이든지 자기 자신의 부모 node 에서 파생되는 자식 node 즉 자신의 형제(sibling) node 는 자신과 가까운 위치에 있는 node 중 하나가 된다. 그래서 node 4 에 대한 고려가 필요하다. 또한, 각 node 의 영역을 셀(cell)이라고 하면 node 5 번에 인접한 셀인 node 6 이 들어있는 셀에 대한 고려도 요구된다. node 4, 6 을 제외한 나머지 node 는 node 5 와 인접하지 않고 다른 node 는 node 4, 6 을 지나야 다음 node 가 나오기 때문에 node 4, 6 보다 거리가 짧은 node 는 존재하지 않게 된다. 따라서 더 이상 탐색이 필요치 않다. 이러한 과정을 통해 최근방 탐색 알고리즘으로부터 각 점들에 대한 가장 가까운 점을 얻을 수 있다. 아울러 같은 형식으로 각 점들에 대한 그 점의 가장 가까운 점들의 집합을 얻을 수 있다. 이러한 배열은 충돌이 이루어졌을 시 변형이 될 영역 안의 점들의 일부가 된다. 이러한 배열을 입력으로 충돌이 되는 점을 탐색하고 그 점을 중심점으로 힘 벡터를 계산을 통해 변형이 될 영역을 결정 짓는 변형 알고리즘이 적용이 된다.

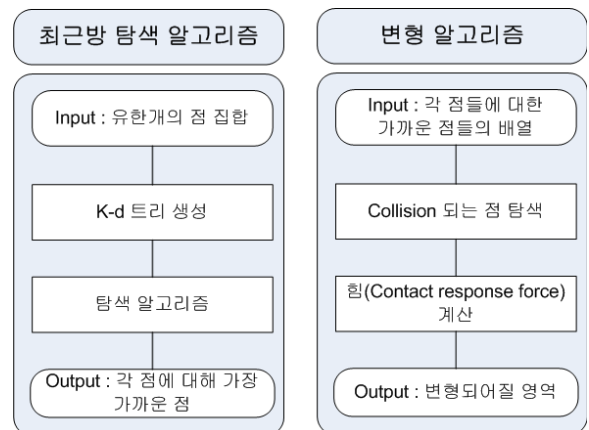


그림 7. 최근방 탐색 알고리즘과 변형 알고리즘

충돌 검지를 통해서 얻어지는 점은 변형이 발생하는 영역의 중심점이 된다. 이러한 중심점은

그림 8 에서 보여지는  $P_1$  이다. 변형이 될 영역은  $\overline{P_1P_2}$  의 길이에 의해서 결정된다. 다시 말하자면,  $P_1$  의 주위의 점들 중에서  $\overline{P_1P_2}$  의 길이보다 작은 영역의 점들이 변형이 될 영역에 속하게 되는 것이다. 그래서  $\overline{P_1P_2}$  의 길이가 커지면 변형이 크게 된다.  $\overline{P_1P_2}$  의 길이는 힘의 반력에 의해서 결정된다. 힘의 반력의 대한 계산은 다음 절에서 하도록 하겠다.

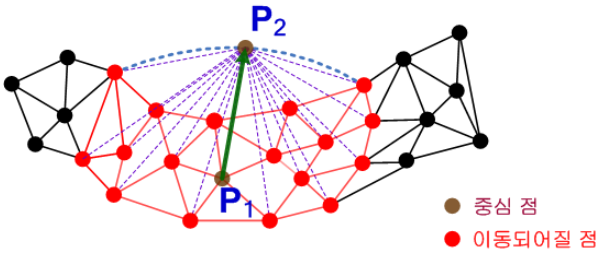


그림 8. 물체 변형이 발생하는 영역

변형이 될 점들이 선택이 되었다면, 그 점들의 이동 방향과 위치가 결정되어야 한다. 이동 방향은  $\overline{P_1P_2}$  의 방향이 된다. 그리고 이동 위치 역시  $\overline{P_1P_2}$  를 기준으로 하지만 모든 점들이  $\overline{P_1P_2}$  의 길이만큼 이동하지 않는다. 만약 그 길이만큼 이동을 하게 되면 변형이 되는 외곽 부분에서 심한 경사를 갖게 된다.

따라서, 수식 (1)과 같이 이동될 점들에 가중치를 부여함으로써 부드러운 곡면을 표현하게 된다.

$$w_i = \sqrt{1 - (|p_1d_i| / |p_1p_2|)} \quad (1)$$

$$\delta_i = |p_1p_2| \times w_i \quad (2)$$

$d_i$  는 이동될 점들,  $w_i$  는 각 점들의 가중치,  $\delta_i$  적용이 될 이동량을 나타낸다. 수식(1), (2)에 의해 중심점으로 멀어지는 점들은 가중치 값이 작아지므로 적은 양의 이동이 이루어진다.

### 3-2-3. 반력 계산

햅틱 상호작용을 위한 중요한 과정 중 하나는 충돌에 상응하는 반력 계산 수행이다. 따라서 충돌이 검지되는 순간 반력 계산을 위한 과정이 매

햅틱 루프에서 이뤄지게 된다. 오브젝트(Object)와 점(Point)사이의 반력 계산을 위해 3 차원 벡터 HIP 와 IHIP 가 정의가 되어야 한다. HIP 는 충돌이 발생 된 후에도 물체의 안으로 들어갈 수 있는 반면, IHIP 는 물체의 표면 위에 항상 존재하는 것이다. 따라서 충돌 검지가 수행 되기 전 HIP 와 IHIP 는 같은 점으로 존재하지만, 충돌이 검출되는 순간 HIP 와 IHIP 는 분리가 되어 두 3 차원 벡터 사이의 거리에 비례한 힘을 계산하게 된다. 충돌이 검출되는 순간 HIP 와 IHIP 의 분리 과정을 수행하기 위해 본 논문에서는 LOMI(Local Occupancy Map Instance) 개념을 이용하였다[12]. LOMI 는 충돌 검지에 이용되는 깊이 정보에 의해 실시간으로 생성되는 3 차원 격자모양의 셀의 집합으로써, 각 셀은 가상 카메라로부터 획득되는 물체와의 깊이 값을 이용하여 물체의 내부, 표면, 외부 정보를 표현하고 있다. 이렇게 실시간으로 생성되는 LOMI 는 물체의 표면 위에 있는 IHIP 를 중심으로 매 햅틱 루프에서 계산되어 움직이게 된다.

그림 9 는 각 햅틱 렌더링에 따라 LOMI 가 생성

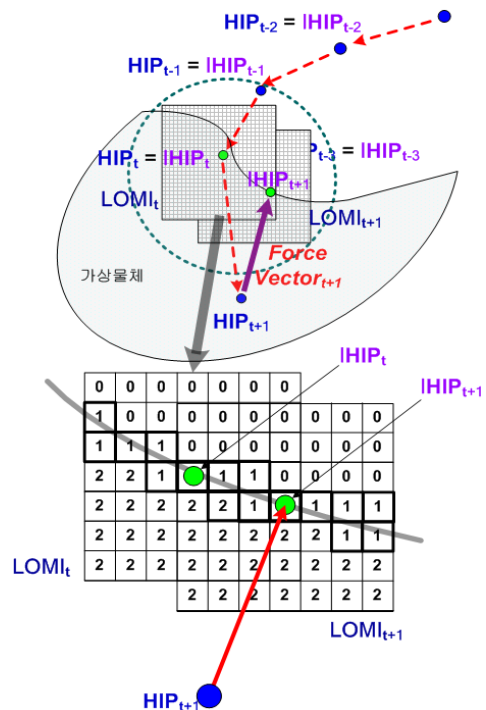


그림 9. LOMI 를 이용한 IHIP 결정 및 반력 계산

되고, IHIP 를 찾아가 HIP 와 IHIP 사이의 거리에 비례하는 힘을 계산하는 과정을 나타낸다. 충돌이 검지 되지 않는 순간 즉, 시간 t 이전의 HIP 와

IHIP 는 같은 점을 나타내며, 충돌이 검지되는 순간  $t$  에서 물체의 표면 위에 위치하는 IHIP 를 결정하기 위해 LOMI 가 생성이 되며 LOMI 의 표면을 나타내는 셀들 중 HIP 와의 최소 거리를 갖는 점이 IHIP 로 결정이 된다. 시간  $t+1$  에서 앞의 과정을 반복하며, 결정된 HIP 와 IHIP 사이의 3 차원 벡터에 의해 힘의 방향과 크기가 결정이 된다. 위 과정은 햅틱 변형이 일어나지 않는 햅틱 상호작용 시 사용자에게 힘을 이용하여 물체의 형상 느낄 수 있도록 제공한다.

햅틱 변형이 일어나는 상호작용 시에는, 가상 물체내의 변형이 발생하는 점을 찾는 과정을 수행하기 위해 변형 영역이 결정이 된다. 시간  $t+1$  에서의 변형 영역은 이전에 계산된 힘의 크기를 반지름으로 갖는 반구에 의해 영역이 결정되며, 이때 영역 내 위치한 점들은 kd 트리의 탐색 방법을 통해 변형 점으로 결정된다. 각 점은 가중치를 갖고 있는데, 각 점에 할당된 가중치는 IHIP 로부터 거리에 비례하여 normalize 된 값을 표현한다. 각 점의 변형 정도는 수식 (3)에 의해 결정된다.

$$\delta_{(i,t+1)} = \sqrt{N_{(i,t+1)}} \times \|\bar{F}_t\| \quad (3)$$

이때  $\delta_{(i,t+1)}$  는 시간  $t$  에서 점  $i^{th}$  에 해당하는 변형 정도를 나타내며,  $N_{(i,t+1)}$  는 점  $i^{th}$  의 normalize 된 가중치를 나타낸다.  $\|\bar{F}_t\|$  는 시간  $t$  에서 계산된 힘의 크기를 나타내며, 변형이 이뤄지는 점의 방향은 힘 벡터와 같은 방향을 갖게 된다. 변형 점이 결정되는 동시에 변형에 상응하는 힘이 계산이 되는데, 변형 힘은 아래의 수식 (4)에 의해 계산된다.

$$\bar{F}_{t+1} = \frac{\sum N_{(i,t+1)} \times \bar{F}_{(i,t+1)}}{\text{Number of } i} \quad (4)$$

$\bar{F}_{(i,t+1)}$  는 시간  $t+1$  에서 각 변형 점과 IHIP 사이의 3 차원 벡터를 나타내며,  $\bar{F}_{t+1}$  는 시간  $t+1$  에서의 계산된 최종 변형 힘을 나타낸다. 즉, 햅틱 변형 상호작용 시 사용자에게 제시되는 힘은  $\bar{F}_{t+1}$  으

로 결정된다.

그림 10 은 햅틱 변형 상호작용이 발생 될 때 변형 점을 나타내며 변형 점과 IHIP 사이의 가중치에 의해 변형 힘이 계산되는 것을 보여준다. 만약 사용자가 많은 힘을 물체에 가하게 되면, 변형이 일어날 영역은 넓어지게 되어 많은 변형 점이 탐색이 된다. 따라서 사용자의 상호작용 행동에 의해 변형 영역이 결정이 되고 이에 상응하는 힘이 계산이 된다.



그림 10. 변형 상호작용 시 변형 점 및 힘의 계산

#### 4. 구현 및 시연

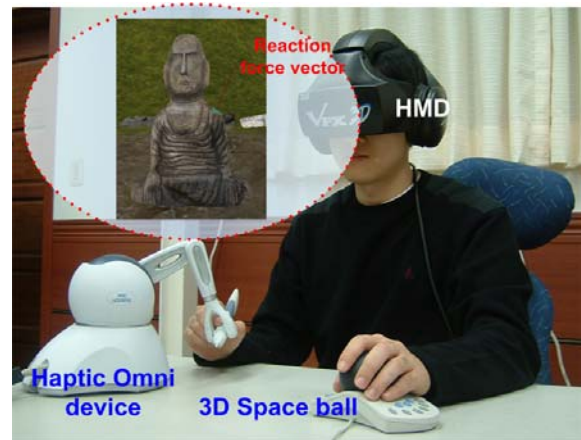


그림 10. 구현 및 시연

본 햅틱 시스템은 PHANToM Omni haptic interface [16]를 사용하였고, Microsoft Visual C++ 6.0 기반에서 구현되었으며, 팬티엄 3.2GHz CPU, 1G RAM, GeForce 6600 그래픽 카드 사양의 컴퓨터에서 구동되었다. 사용자 인터페이스를 위해 HMD, Space Ball 은 각각 VFX 3D 와 Space Ball 4000 FLX 를 사용하였다. 그림 11 은 체험자가 햅틱 상호작용을 통해 가상 불상을 제작하는 모습을 보여준다. 가상환경에 존재하는 모든 물체의 메쉬는 약 30K 가 되며 이때 그래픽, 햅틱 Update rate 는 27Hz 와 0.8 millisecond 의 렌더링 시간을 보였다.

일반적으로 그래픽 렌더링의 경우 30Hz, 햅틱 렌더링의 경우 1 millisecond 이하의 Update rate 성능을 보여야 한다. 따라서 본 시스템은 체험자에게 변형에 상응하는 시/촉각 효과를 적절히 제시한다고 할 수 있다.

가상 불상과 햅틱 상호작용 시 객체를 회전시키며 조각하거나 사용자의 시점으로 가까이 또는 멀리 가상객체를 이동하며 창작 하기 위해 3 차원 입력 장치(Space Ball)를 사용하여 객체를 조작하게 된다. 아울러 Direct Sound 를 통해 불상을 제작하는 동안 주변 환경(물, 새, 바람 소리)에 대한 음향효과를 제공하여 가상 물체와의 햅틱 상호작용 시 체험자의 몰입감 증대를 주었다.

## 5. 결론 및 향후 연구 계획

본 논문에서는 가상 문화 체험에서 체험자가 햅틱 변형을 통해 가상 불상을 창조해낼 수 있는 시스템 및 햅틱 변형 알고리즘을 제안하였다. 인간의 중요 인지 체계 중 하나인 촉감 상호작용은 시/청각 제시와 더불어 가상 환경 분야에서 보다 물체를 사실적으로 인지하는데 도움을 주며 동시에 보다 몰입감이 증대된 체험을 제공한다. 따라서 본 시스템을 통해 체험자는 불상을 창작하는 힘을 느낄 수 있음과 동시에 사용자가 원하는 형태의 불상을 조각하며 만들 수 있는 체험을 제시하였다. 기존의 가상 문화재 체험에서 관람객이 수동적으로 영상미디어 매체에 의존하는 것과 다르게 능동적 참여를 제공하는 햅틱 상호작용은 가상 문화 체험의 효과를 증대시킬 수 있을 것이라 생각되며, 고유 문화 유산에 대한 교육적 효과 증대에 기여할 것이라 여겨진다.

하지만 본 논문에서 제안된 햅틱 변형 알고리즘은 가상 물체의 물성치가 일정하다는 가정하에 수행되어 계산된 변형 힘에 물체의 각 부분에 대한 물성치가 고려되지 않았다. 따라서 보다 물리적 의미를 갖는 불상 변형을 위해 FEM(Finite Elements Method)을 이용하여 가상 객체의 각 부분 물성치를 달리하여 부분에 따라 다양한 힘을 제시 받을 수 있도록 하는 연구가 진행 될 것이며, 아

울러 불상의 미세형상까지 조각할 수 있는 복셀 조각(Voxel Carving)의 연구가 진행 될 것이다. 또한 다양한 응용분야 개발을 통해 보다 많은 대중이 촉감 체험을 할 수 있는 시스템 개발이 진행 될 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 정보통신부 선도기반기술개발사업(차세대 PC 기술개발), 광주과학기술원 실감방송연구센터(RBRC), 과학기술부 실감모델링 개발사업 및 광주과학기술원 기관고유 사업의 지원에 의해 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] Hyun-Jhin Lee, Jinwook Kim, Heekap Ahn, Sang Chul Ahn, Ik Jae Kim, Hyoung-Gon Kim, Heedong Ko, "VR Experience Design in Tangible Space : Heritage Alive!" In Proc. XVth Triennial Congress International Eronomics Association, (IEA 2003), August, Seoul, Korea.
- [2] Yong-Moo Kwon, Ig-Jae Kim, Sang Chul Ahn, Heedong Ko, Hyoung-Gon Kim, "Building a 3D Virtual Museum", In Proc. Virtual Systems and MultiMedia (VSMM 2002), pages 291 - 299, September, Kyongju, Korea.
- [3] YongMoo Kwon, Igjae Kim, Sangchul Ahn, Heedong Ko, Hyounggon Kim, "Virtual Heritage System: Modeling, Database & Presentation", In Proc. Virtual Systems and Multimedia Conference (VSMM 2001) October 2001, Berkeley USA.
- [4] Meehae Song, Thomas Elias, Wolfgang Müller-Wittig, Tony K.Y. Chan, "Interacting with the Virtually Recreated Peranakans", International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia, 11-14 February 2003, Melbourne, Australia.
- [5] Gaitatzes, A., Christopoulos, D., & ROUSSOU, M., "Reviving the Past: Cultural Heritage Meets Virtual Reality."



- In S. Spencer (Ed.) Proc. of VAST 2001: Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST'01), ACM SIGGRAPH, ISBN 1-58113-447-9, pp.103-110.
- [6] Bobick, Aaron & Intille, Stephen et al. (1996) "The Kids-Room: A Perceptually-Based Interactive and Immersive Story Environment", Technical report, MIT Media Laboratory.
- [7] Roussos, M., Johnson, A., Leigh, J., Barnes, C., Vasilakis, C., and Moher, T., "The NICE project: Narrative, Immersive, Constructionist/Collaborative Environments for Learning in Virtual Reality." In Proceedings of EDMEDIA/ED-TELECOM 97, Calgary, Canada, June 1997, pp. 917-922, 1997.
- [8] McLaughlin M. L., Sukhatme G., Hespánha J., Shahabi C., Ortega A., and Medioni G "The Haptic Museum", Proc. EVA 2000, Conference on Electronic Imaging and the Visual Arts, 2000.
- [9] M. Bergamasco, A. Brogni, A. Frisoli, F. Salvini, and M. Vignoni, "Tactual Exploration in Cultural Heritage", XIV Round Table Computer-Aided Egyptology Pisa, 2002.
- [10] Bergamasco M., Frisoli A, and Barbagli F., "Haptics Technologies and Cultural Heritage Applications", IEEE Computer Animation 2002 Conference, Geneva - Switzerland, 2002.
- [11] Dettori, C.A. Avizzano, S. Marcheschi, M. Angerlilli, M. Bergamasco, C. Loscos, and A. Guerraz, "Art touch with CREATE haptic interface", The 11th International Conference on Advanced Robotics, 2003.
- [12] Youngho Lee, Sejin Oh, Youngmin Park, Beom-Chan Lee, Jeung-Chul Park, Yoo Rhee Oh, Seokhee Lee, Han Oh, Jeha Ryu, Kwan H. Lee, Hong Kook Kim, Yong-Gu Lee, JongWon Kim, Yo-Sung Ho, and Woontack Woo, "Responsive Multimedia System for Virtual Storytelling", Lecture Notes in Computer Science, 3767, pp. 361-372, 2005.
- [13] Youngho Lee, Dahee Kim, Youngil Lim, Kyuhyung Kim, Haesun Kim, and Woon-tack Woo, "Dream of Mee-luck: Aspiration for a New Dawn", LNCS (ICVS), pp. 282-285, 2005.
- [14] Jong-Phil Kim, Beom-Chan Lee, and Jeha Ryu, "Haptic Rendering with Six Virtual Cameras", HCI international 2005, pp. 467, 2005.
- [15] Andrew Moore, "An introductory tutorial on kd-trees", PhD. Thesis, Technical Report No. 209, Computer Laboratory, University of Cambridge, 1991
- [16] SensAble Technologies Inc., [www.sensable.com](http://www.sensable.com)