

# 멀티모달 사용자 중심 인터페이스를 적용한 인체 학습 시스템

## Human body learning system using multimodal and user-centric interfaces

김기민, Kimin Kim\*, 김재일, Jaeil Kim\*\*, 박진아, Jinah Park\*\*\*  
한국정보통신대학교

**요약** ~ 본 논문은 유연하고 다각적인 인터페이스를 이용한 사용자 중심의 능동적인 인체 학습 시스템을 제안한다. 기존의 인체 학습 방법은 이미지, 텍스트, 영상자료부터 학습자료의 주입식 학습이었다. 본 논문에서 제안한 인체 학습 시스템은 실제 인체 장기 데이터로 제작된 3D 인체 장기 모델을 제공함으로써 학습자는 사실적인 장기의 형태를 3차원 공간에서 보고, 장기에 대한 촉감을 제공하는 햅틱 인터페이스와 학습자의 의도에 기반한 카메라 시스템으로써 능동적이고 다각적인 학습을 진행할 수 있다. 그리고 계층 기반 장기 분류를 통하여 구축된 학습 정보를 통하여, 전체적인 시각에 기초한 인체 학습 과정을 진행할 수 있다. 본 인체 학습 시스템으로써 기존의 평면적인 인체 학습 교재, 자료 등에서 얻을 수 없는 입체적인 인터페이스를 통한 학습 효율 향상의 가능성을 보고자 한다.

**Abstract** ~ This paper describes the human body learning system using the multi-modal user interface. Through our learning system, students can study about human anatomy interactively. The existing learning methods use the one-way materials like images, text and movies. But we propose the new learning system that includes 3D organ surface models, haptic interface and the hierarchical data structure of human organs to serve enhanced learning that utilizes sensorimotor skills.

**핵심어:** *Multimodal, Haptics, Virtual Reality, Human Organ Simulation, Education, Multimedia, Virtual Teaching,*

본 논문은 2007년 학술진흥재단 기초연구과제 지원 사업(과제번호: KRF-2006-311-D00803)의 지원에 의하여 연구되었음.

\*주저자 : 한국정보통신대학교 공학부 석사과정 김기민; e-mail: kiminkim@icu.ac.kr

\*\*공동저자 : 한국정보통신대학교 공학부 석사과정 김재일; e-mail: threeyears@icu.ac.kr

\*\*\*교신저자 : 한국정보통신대학교 공학부 교수 박진아; e-mail: jinah@icu.ac.kr

### 1. 서론

가상 현실(Virtual Reality) 시스템에서 촉감을 느끼게 하고 전달하는 햅틱 인터페이스에 대한 연구는 90년대 초부터 활발히 진행되고 있으며 최근에는 학습 시스템에도 적용되어 가고 있다. 예를 들면 Dev[1]은 인터넷을 기반으로 한 의료 학습 시스템을 제안했으며 Eid[2]는 햅틱 인터페이스를 기반으로 글쓰기 학습 시스템을 제안하였고 햅틱 상호 작용이 학습 능력 향상에 도움이 된다는 것을 입증하기 위한 사용자 평가 사례도 포함하고 있다.

인체 내부 구조 학습의 목적은 우리 몸의 구조를 관찰하고 이해하도록 하는 것이다. 올바른 인체 학습은 의사들에게는 실수 없는 수술과 정확한 환자의 진찰을 위해서 필수적이지만 보통의 학생들에게는 생물시간에 배우는 단순한 암기 과목으로 알려져 있다. 이러한 인체 학습을 위해 의대생들은 실습을 통해 실제로 장기를 보고 만져보는 체험을 하지만 대부분은 멀티미디어를 통해 일방적인 학습을 한다. 하

지만 여기에는 다음과 같은 제약이 있다.

- 디지털 기기의 보급화로 최신 정보화 기기에 익숙해져 있는 학생들에게 마우스와 키보드만을 사용하는 GUI로는 만족스러운 학습효과를 얻기 어렵다.
- 사람의 몸은 입체적인 구조를 가지고 있기 때문에 장기들의 명칭과 위치, 기능들을 일차 시켜 이해하는 데에 한계가 있다.
- 학습자가 마우스를 통하여 정해진 정보의 선택만이 가능하기 때문에 학습자 중심의 맞춤형 학습이 어렵다.
- 마우스를 사용하여 3D 장기 데이터를 조작할 경우에는 2D 입력장치의 한계 때문에 직관적이지 못하며 적절한 카메라 시점을 얻기 위해서는 많은 상호 작용이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하며 인체 학습 효과를 높일 수 있는 사용자 인터페이스 개발을 목표로 Visible Korean Human 데이터[3]를 이용하여 인체 장기를 사실적으

로 표현하며, 인체 장기를 계층적 구조로 분류하고 그에 기초한 데이터베이스를 구축함으로써 다양한 학습 과정이 가능한 유연성 있는 시스템을 개발하였다. 또한 가상의 학습 공간에서 햅틱 인터페이스를 통해 직관적인 3D 커서의 움직임과 장기를 만지는 촉감을 제공하여 멀티모달한 학습시스템이 가능하도록 하였다. 마지막으로 촉감 생성에 사용되는 장기의 속성 값을 조정할 수 있도록 하였고 변경된 값을 실시간으로 반영하여 학습효과를 높일 수 있는 촉감을 쉽게 찾을 수 있도록 하였다.

## 2. 인체 학습 시스템 구성

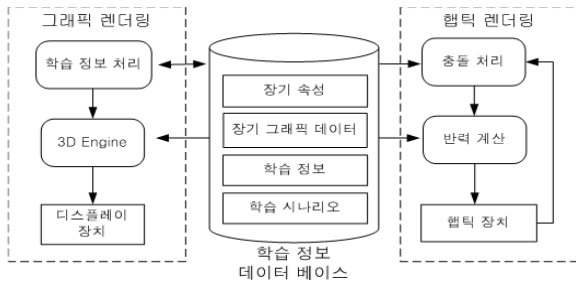


그림 1 전체 시스템 구성

본 인체 학습 시스템은 그림 1과 같이 학습에 필요한 데이터베이스를 정의하고 그래픽 렌더링과 햅틱 렌더링을 통해 학습자에게 멀티 모달한 학습 환경을 제공한다.

## 3. 계층 기반 장기 분류를 통한 학습 정보 구축

인체 장기는 골격계, 근육계, 생식기계, 소화기계, 순환기계, 신경계, 호흡기계 등 여러 계통(System)으로 분류하며, 이는 체계적으로 장기를 이해할 수 있는 토대를 마련해 준다. 본 시스템에서는 이런 분류를 기초로 장기 데이터를 계층적 데이터 구조로 구성하여 학습자의 인체 장기에 대한 학습을 유도한다. 또한 유연한 재구성 기능을 더하여 학습자가 다양한 관점에서 인체 학습을 진행할 수 있는 환경을 제공함으로써 학습 효과를 높이고자 하였다.

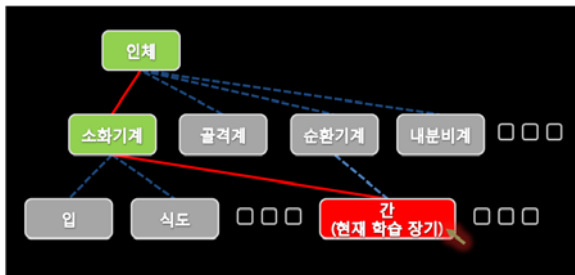


그림 2 계통 기반 데이터 구조 : 간 학습

인체 장기 분류는 크게 계통으로 구분되고, 계통은 하위

의 장기들을 포함한다. 또 각 인체 장기는 모양, 기능, 다른 장기와의 교차 등으로 세부 분류된다. 이런 인체 장기의 계층 구조는 그림 2와 같은 계층적 형태의 데이터 구조로 구성되고, 학습자는 그래프의 노드 간 연결 고리를 따라 인체 학습을 진행하게 된다. 학습자가 학습을 진행하고자 하는 계통을 선택할 경우 계통의 하위 장기들을 Top-Down 방식으로 순회하면서, 계통에 대한 장기의 역할 등에 대한 정보를 제공받는다.

예를 들어 인체의 소화기계에 대한 학습을 하거나 소화기계로서 간을 학습하고자 할 때, 그림 2와 같이 데이터 구조의 연결 관계를 따라 설명 정보와 장기 렌더링 방식 등을 결정하게 되는 것이다.

이와 같은 계층적 장기 분류 데이터 구조는 본 시스템에 있어 인체 계층의 구조에 따른 학습 유도 목적 이외에 다른 기준으로 학습을 유도할 수 있도록 정보를 재구성할 수 있는 유연성을 갖추고 있다. 예로 간은 소화계뿐 아니라 순환계에도 포함되는데, 앞서 설명한 일반적인 Top-Down 방식의 학습 유도 방식은 간 전체 기능을 포괄적으로 학습하기에 적합하지 않다. 따라서 그림 3과 같이 간을 중심으로 학습 유도를 위한 데이터 구조를 재구성하여 해부학적 세부 분류에 대한 Top-Down 탐색과 간의 상위 계통에 대한 간의 역할 학습을 위한 Bottom-Up 탐색을 동시에 경험하도록 학습을 유도할 수 있다.

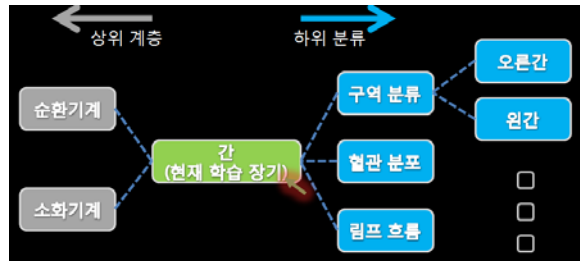


그림 3 간 중심의 학습 유도 방식

유연성을 갖춘 인체 장기의 계층적 구조 기반 분류 기법과 그에 따른 인체 장기 데이터베이스 구축은 현재 ‘사람 해부학’ [8]과 기타 의학 자료를 기준으로 임의로 진행하였으나, 실제 인체 전체에 대한 의학적 기준으로서의 분류와 정의를 위해서는 의학적 전문 지식을 갖춘 전문가의 도움이 필요하다.

## 4. 3D 장기 모델과 장기 정보 표현

본 시스템에서 사용된 3D 장기 모델은 아주대학교 해부학교실에서 진행된 Visible Korean Human 연구 결과로, 실제 한국 남성의 시체를 얇게 절단하여 촬영한 해부학적 데이터를 기초로 3D Surface Reconstruction 과정을 통하여 만들어진 것이다. VKH 연구 결과로 2D 절단면 촬영 이

미지, 3D 표면 장기 모델의 절대적 위치 등이 본 시스템 개발을 위해 이용되었다.[3]

현재 본 시스템에서 활용하는 인체 3D 장기 모델들은 간과 쓸개, 비장 등을 포함하여 총 27가지이며, 주로 간 주변 장기나 혹은 간의 세부적 분류에 따른 장기들로 구성되어 있다. 그림 4는 27개 3D 장기 모델을 화면에 출력한 결과로서, 오른쪽 그림은 간의 내부 분류에 따른 장기들을 표현하기 위해 반투명 효과를 주어 학습자가 간에 대한 포괄적인 인식이 가능하도록 하였다.

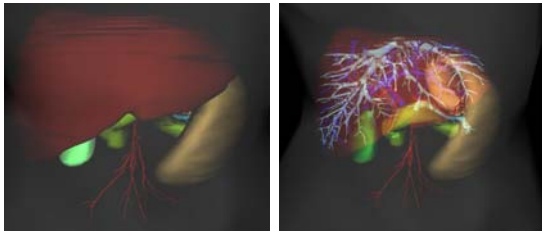


그림 4 간과 주변 장기 렌더링

3D 인체 장기 모델을 통하여 학습자는 장기의 부피나 3D 공간에서의 모양 뿐 아니라, 인체에 대한 각 장기의 절대적 위치, 장기 간 상대적 배치 등의 정보를 얻게 된다. 이는 나아가 서로 연결된 장기들을 입체적으로 한 눈에 볼 수 있으므로 장기의 각 명칭과 기능을 주변의 장기들과 서로 연관하여 이해할 수 있는 토대를 제공한다.

본 시스템에서는 장기의 상대적 위치와 크기, 표면 속성 및 Shading 기법 등, 장기의 3D 정보 표현에 중요한 요소들을 데이터베이스에 사전 정의하여, 학습자가 즉각적인 상호작용을 제공받으며 학습을 진행할 수 있도록 하였다. 특히 사용하고 있는 3D 장기 모델의 정점이나 면의 수가 제각기 다르기 때문에 장기 표면에 대한 속성을 3D 모델별로 정의하고, 셰이더 언어(GLSL)를 사용하여, 장기의 부드러운 표면을 표현하기 위해 픽셀 당 셰이딩을 구현하였다.



그림 5 Portal Vein (문맥) 설명 정보 표현

인체 장기에 대한 텍스트로 구성된 장기 설명 정보는 학습자가 현재 학습하는 장기와 학습 흐름에 따라 화면에 표

시된다. 모든 장기 설명 정보는 앞서 설명한 계층적 구조에 기반하여 사전 정의된다. 학습자는 현재 학습하는 장기의 가장 포괄적인 설명을 3D 모델과 같은 공간에서 제공받게 된다. 그림 5는 Portal Vein을 선택하여 학습하는 과정으로서, 그림 상단에 Portal Vein에 대한 일반적인 설명이 출력된다.

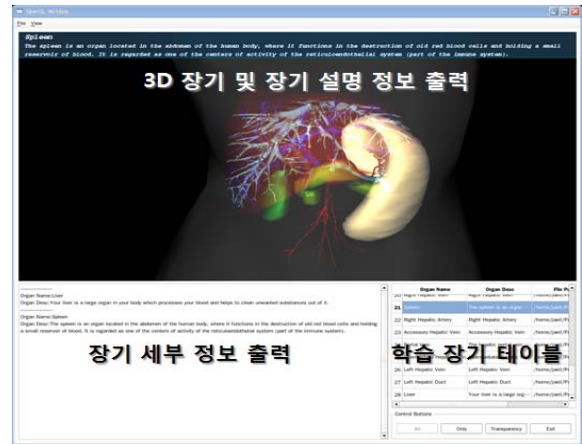


그림 6 인체 학습 시스템 (Spleen 선택 화면)

하지만 인체 장기에 대한 상세한 설명을 모두 출력하기에 적합하지 않은 문제가 있어, 본 시스템에서는 장기의 세부 정보를 출력하는 창과 현재 학습 과정의 인체 장기들의 목록을 보여주는 장기 테이블을 추가하여 보완하고자 하였다. 그림 6은 Spleen(비장)을 선택한 인체 학습 시스템의 캡처 화면이다. 선택되어 학습하고 있는 Spleen는 다른 장기에 비해 하이라이트 되어 있고, 장기 테이블과 장기 세부 정보 출력 창을 통하여 Spleen에 대한 정보가 제공되고 있다.

학습 과정에서 보고자 하는 장기의 선택은 마우스나 키보드 등 기본적인 사용자 인터페이스를 통한 3D 장기 모델 선택이나 현재 학습하고 있는 장기들이 표시된 테이블에서의 장기 선택으로도 결정 가능하다. 하지만 본 시스템에서는 이런 기본적인 인터페이스 이외에 햅틱 장치를 이용한 입체적이고 능동적인 사용자 인터페이스를 제공함으로써, 학습자가 다각적이고 상호 보완하는 인터페이스들로 학습의 방향을 선택, 변경함으로써 보다 능동적인 학습을 진행할 수 있도록 하였다.

## 5. 3D 인터페이스 상호 작용

본 시스템에서는 3D 인터페이스 상호작용을 지원하기 위하여 그림7과 같은 가상의 학습 공간을 정의 하고 각 장기 모델을 가상의 학습 공간에 적절한 위치에 배치하였다. 학습을 할 때 학습자는 카메라 탐색 기능을 통해 자유롭게 가상공간을 이동하며 다양한 각도로 장기 모델을 볼 수 있도록 하였다.

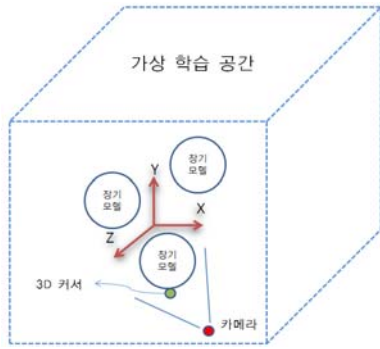


그림 7 가상 학습 공간의 정의

현재 대부분의 3D 학습시스템은 그림7과 같은 구조로 되어 있으며 마우스를 이용하여 상호작용을 한다. 하지만 여기에는 다음과 같은 문제점이 있다.

- 학습 공간에서 학습자가 마우스를 인터페이스로 사용할 경우 정밀한 좌표를 사용자로부터 입력받을 수 없기 때문에 3차원 공간의 점을 정확하게 제어할 수 없다.
- 모니터는 수직으로 세워져서 학습자에게 정보를 주지만 마우스는 수평으로 놓고 앞뒤로 움직이기 때문에 손의 움직임과 마우스의 움직임에서 학습자는 많은 괴리감을 느끼게 된다.
- 마우스는 입력 장치의 기능만 하기 때문에 시스템은 모니터를 통해서만 정보를 전달 할 수 있다.

본 시스템에서는 이러한 문제점을 보완하고 더 높은 학습 효과를 얻기 위해 햅틱 인터페이스를 입력 장치로 사용하였으며 Sensable사에서 개발한 PHANTOM Omni를 실험에 적용하였다. PHANTOM Omni는 기본적으로 3D 입력을 지원하고 촉각 정보전달을 위한 힘 피드백 기능을 가지고 있기 때문에 이를 통해 마우스의 입력장치로서의 한계를 극복하고 멀티모달한 학습 환경을 구축할 수 있었다.

## 6. 가상 공간에서 카메라와 3D 커서 처리

학습자가 3D 가상공간에서 햅틱 인터페이스를 사용하여 커서를 조작 한다면 다음과 같은 요소들이 고려되어야 한다.

1. 햅틱 인터페이스의 작업공간과 가상공간의 매핑
2. 카메라 위치에 따른 작업공간의 이동 및 회전
3. 카메라 위치를 반영한 반력 생성

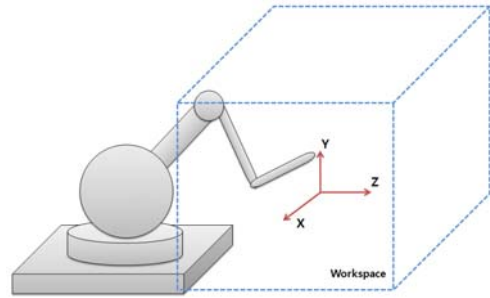


그림 8 햅틱 인터페이스의 작업공간

햅틱 인터페이스의 실제 작업공간은 그림 8과 같이 정의되며 가상 학습 공간에서의 작업 공간은 시야 절두체의 크기에 맞도록 스케일 변환을 하고 Camera의 위치에 따라서 회전된다.[그림9] 작업공간과 가상공간의 매핑이 결정된 후에는 가상공간에서 햅틱 인터페이스의 위치를 얻을 수 있으며 이를 커서의 움직임에 반영한다. 따라서 학습자는 카메라의 상태와 관계없이 직관적으로 커서를 움직일 수 있으며 현재 카메라 시점과 일치하는 힘 피드백을 느끼게 된다.

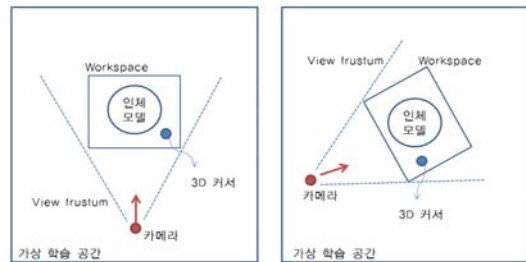


그림 9 카메라 변화에 따른 작업영역과 커서의 변화

3D 가상환경 시스템에서 카메라 조작은 상호작용에서 큰 부분을 차지한다. 만약 여기에 햅틱 인터페이스가 추가된다면 시점을 고정시키거나 3D 마우스와 같은 별도의 장비를 필요로 한다. 본 학습 시스템에서는 장기와 접촉된 지점과 커서의 위치를 고려하여 자동으로 최적화된 카메라의 위치를 찾는 기능과 학습 시나리오에 따라서 커서가 특정한 곳으로 유도되는 기능을 개발의 필요성을 인식하였으며 현재 개발하고 있다.

## 7. 햅틱 상호작용

새로운 학습 방법을 연구 및 지원하는 Future lab[9]에서 2004에 발표한 Report에는 Tangible User Interface(TUI)가 학습에 대해 미치는 영향에 대한 광범위한 조사를 포함하고 있으며 TUI가 아이들의 이해력과 문제 해결능력을 증진시키는데 효과가 있다고 보고했다.[10] 여기에 영감을 얻어 본 시스템에서는 구축된 장기 데이터와 햅틱 렌더링 알고리즘을 통해서 장기를 만져 볼 수 있는 체험을 제공함으로써 더 높은 학습 효과를 얻고자 하였다.

본 시스템에서는 폴리곤을 기반으로 하는 햅틱 렌더링 알고리즘을 사용하였으며 이는 3D 모델 데이터를 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한 햅틱 렌더링 알고리즘을 적용할 때 장기마다 구별되는 힘 피드백이 학습 효과를 높인다는 가정으로 장기에 따라서 굳기, 점성, 정지 마찰계수, 운동 마찰계수를 적용할 수 있도록 하였다. 학습자에게 전달될 힘은 아래와 같이 수직반력과 마찰력의 합으로 이루어진다.

$$F = F_n + F_t \quad (1)$$

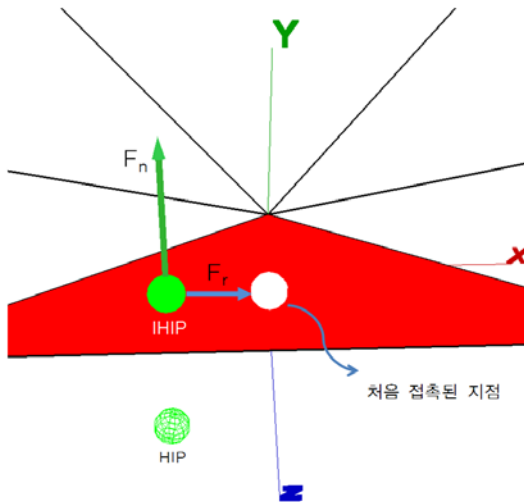


그림 10 반력과 마찰력 계산

수직 반력( $F_n$ )과 마찰력( $F_t$ )의 계산은 매 햅틱 사이클마다 수행되며 Ho et al.가 제안한 방법[4]을 적용하였다. 먼저 수직 반력의 계산을 위해 현재 Haptic Interface Point(HIP)에서 현재 접촉된 면에 최단거리에 있는 Ideal Haptic Interface Point(IHIP)를 찾아서 힘의 크기와 방향을 계산한다. 이는 Zilles et al.가 제안한 'God-object' [11]를 바탕으로 하고 있지만 Ho의 방법으면, 정점, 선에 인접한 정보를 미리 계산해 두어 지역적으로 IHIP를 찾기 때문에 한번 접촉이 일어나면 장기 3D 모델의 복잡도(Complexity)에 영향을 받지 않는 장점이 있다.

마찰력은 처음 접촉한 지점에서 하나의 제약(constraint)을 만들어 현재의 IHIP와 거리에 비례한 힘을 만들어 구현하였다. 마찰력은 정지마찰력과 운동 마찰력으로 나뉘며 학습자가 장기에 처음 접촉할 때는 정지마찰력 상태가 되며 마찰력 값이 임계값 이상이 되면 운동 마찰력 상태로 바뀌게 된다. 여기서 임계값은 수직 반력에 비례하여 변한다.

정지 마찰력 상태에서는 제약이 고정되며 운동 마찰력 상태에서는 제약이 IHIP의 위치를 따라가도록 함으로써 적절한 마찰력을 유지하도록 하였다. 제약이 IHIP를 따라가는 속도는 수직 반력의 크기에 반비례한다. 따라서 수직 반력이 커질수록 제약이 천천히 따라오게 되어 마찰력이 커지게 되며 수직반력이 작을수록 제약이 빨리 따라 오기 때문에 마찰력이 줄어들게 된다.

## 8. 빠른 햅틱 상호작용을 위한 충돌 모델

학습자의 의도를 실시간으로 반영하고 안정적인 힘 생성을 위해서는 1000Hz의 속도속 충돌처리와 반력을 계산해야 한다. 따라서 충돌 처리를 가속화 할 수 있는 바운딩 볼륨 계층 구조나 공간 분할 기법과 같은 충돌처리 가속화 기법의 사용은 필수적이라고 할 수 있다. 현재는 3000개 정도의 삼각형으로 이루어진 간 데이터에만 햅틱 렌더링을 적용해 보았다.[그림11] 하지만 아직 충돌 가속화 기법을 적용하지 않고 있기 때문에 안정적인 힘 생성에 어려움이 있다. 또한 간 주변에 있는 비장, 쓸개, 문맥과 같은 주변 장기의 햅틱 렌더링을 고려한다면 수십만개의 삼각형에 대해서 충돌을 처리해야 한다. 따라서 기존의 충돌처리 가속화 방법에 1) 장기 모델데이터를 간소화(Simplification)시켜 햅틱 렌더링 모델로 사용하는 방법 2) 폴리곤 모델에 영향을 받지 않는 복셀 기반의 햅틱 렌더링 방법 3) 햅틱 렌더링 모델에 Level-of-Detail을 적용하는 방법을 고려하고 있다.

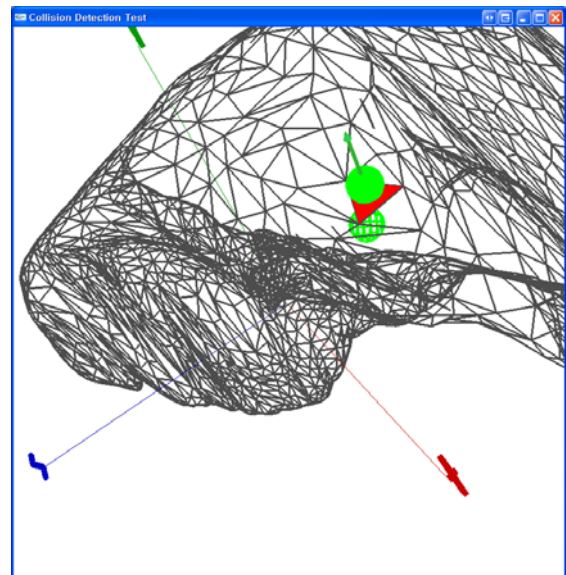


그림 11 간 모델에 적용된 햅틱 렌더링, 슬라이드 구는 HIP를 와 이어프레임으로 보이는 구는 IHIP를 화살표는 수직반력을 나타낸다.

## 8. 결론

본 인체 학습 시스템은 인체 학습 교재나 영상 자료를 통한 단방향 학습보다 유연하고 다각적인 사용자 인터페이스를 이용한 양방향 학습을 목표로 한다. 이를 위해 햅틱을 통한 능동적인 경험과 계층적 구조로 구축된 인체 장기 정보에 따른 학습 유도 방식 등으로 다양하고 입체적인 관점에서 학습할 수 있는 시스템을 제안하였다.

인체 학습 시스템에서 장기 학습 정보의 표현 방식은 앞으로 연구가 되어야 하는 부분이다. 인체는 복잡한 구조를 가지며, 또 인체의 상태에 따라 장기는 다른 형태를 갖게 되는데, 이런 다양성에 대한 학습을 위해서는, 3D 인체 장기

모델이 표준화된 형태 이외에 병이나 특정 상황에 따른 변형된 형태의 3D 장기 모델들을 개발하거나 변형을 3D 장기 모델에 반영하는 자동화된 시스템이 필요하다. 또 본 시스템에서 화면에 텍스트를 통한 설명 정보 출력 방식 이외에, 실제 해부 이미지와의 연계를 강조한 정보 출력 등 더 개선된 인체 정보 표현 방식이 연구될 수 있다.

인체 학습 시스템에 의한 학습 효과를 확인하기 위해서는 기존 학습 방식과 학습 결과 비교, 햅틱 인터페이스에 의한 물리적 경험의 학습 효과 검증, 학습 이해도 평가, 햅틱 기반 능동적 인터페이스의 사용성 평가의 과정이 필요하다. 이 검증 과정은 현재 아직 수행되지 않았으나, 시스템의 개발이 완료되는 시점에 반드시 필요한 과정이다.

본 연구에서 제안된 인체 학습 시스템이 해부 등의 실제 인체에 대한 실습이나 의학 교육 교재를 통한 인체 학습 과정을 완전히 대체할 수 없다. 그러나 본 연구에서 제안한 시스템을 통하여 학습자에게 인체에 대해 포괄적인 관점에서 경험을 할 수 있는 환경을 제공할 수 있게 되었고, 앞으로 인체 교육에 대한 변화의 가능성을 시험해 볼 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 2007년 학술진흥재단 기초연구과제 지원 사업(과제번호:KRF-2006-311-D00803)의 지원으로 수행되었으며 연구에 사용된 3D 장기 모델은 아주대학교 해부학교실에서 진행된 Visible Korean Human의 연구 결과로 정민석 교수님과 신동선 연구원께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Parvati Dev, et al., "Simulated Medical Learning Environments on the Internet," Journal of the American Medical Informatics Association, Vol.9, No.5, pp. 437-447, 2002
- [2] Mohamad A. Eid, et al., "A Haptic Multimedia Handwriting Learning System," Proc. of EMME, ACM press, pp. 103-108, 2007
- [3] 정민석 외. "Visible Korean Human", 아주대학교 해부학 교실, <http://vkh.ajou.ac.kr>
- [4] Ho, C., Basdogan, C., Srinivasan M.A, "Efficient Point-Based Rendering Techniques for Haptic Display of Virtual Objects," Presence, Vol.8, No.5, 477-491, 1999
- [5] 김래현, 박세형, "햅틱 인터페이스를 이용한 가상 조각 시스템," 정보과학회 논문지, pp.682-691, 2004
- [6] Christopher Richard, Mark R. Cutkosky, "Friction Identification for Haptic Display," Proc. of ASME IMECE, 1999
- [7] Miguel A. Otaduy and Ming C.Lin, "User-Centric Viewpoint Computation for Haptic Exploration and Manipulation," Proc. of IEEE Visualization, 2001
- [8] 정인혁. "사람해부학, 넷째판", 아카데미서적, 2005
- [9] <http://www.futurelab.org.uk>
- [10] Claire O'Malley, Danae Stanton Fraser, "Literature Review in Learning with Tangible Technologies", FUTURELAB, 2004
- [11] Zilles, C. B., Salisbury J., "A Constraint-based god-object method for haptic display," Proc. of the IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 146-151, 1995