

# 햅틱 모델을 이용한 3차원 가상 판화 시스템

박세길<sup>1</sup>, 박지환<sup>2</sup>, 이동욱<sup>3</sup>, 박진아<sup>4</sup>  
한국정보통신대학교<sup>1234</sup>  
{ skpark<sup>1</sup>, jihwanpark<sup>2</sup>, aalee<sup>3</sup>, jinah<sup>4</sup> }@icu.ac.kr

## 3D Virtual Engraving with Haptic Feedback

Sekil Park<sup>1</sup>, Jihwan Park<sup>2</sup>, Dongwook Lee<sup>3</sup>, Jinah Park<sup>4</sup>  
Information and Communications University<sup>1234</sup>

### 요약

3차원 입력 장치는 키보드나 마우스 같은 일반적인 입력 장치로는 받아들이기 어려운 3차원 입력을 사용자로부터 간편하고 직관적인 방법으로 받아들일 수 있다는 측면에서 활발히 연구 및 사용되고 있다. 또한 햅틱 장치는 가상 물체의 조작에 따른 시각적인 피드백 외에 가상 물체의 느낌을 피드백 힘을 통해 사용자에게 전달해 줌으로써 컴퓨터와 사용자간의 상호 작용에 큰 도움을 준다.

본 논문은 햅틱 피드백이 적용된 실시간 가변형 모델과 효과적인 3차원 입력에 대한 기반 연구를 하고자 한다. 그리고 이에 대한 한 가지 사례로써 햅틱 장치를 이용한 가상 판화 시스템을 제작 한다. 가상 판화 시스템은 시각 처리 부분과 촉각 처리 부분, 그리고 사용자의 3차원 입력을 돕는 인터페이스 부분으로 구성되어 있다. 시각 처리 부분은 3차원 공간 상에서 사용자의 조작에 따른 판화 표면의 변형을 처리하며 촉각 처리 부분은 실제 판화를 제작할 때 느끼는 촉각을 햅틱 인터페이스를 이용하여 사용자에게 전달한다. 이를 위해 먼저 시각 처리 부분에서는 NURBS 기반의 자유 형상 변형 (FFD) 기법을 이용하였는데 가상 조각도에 의한 물체 표면의 지역적인 변형을 구현하기 위해 조각도가 닿는 부분에 대해 기조 격자점 (control point)을 증가시켜 원하는 부분에 대한 지역적인 변화를 용이하도록 하였고 다음으로 촉각 처리 부분에서는 S-chain 모델을 이용하였는데 S-chain 모델을 객체 전체에 적용하지 않고 접촉이 일어날 경우 그 접촉점을 기준으로 S-chain 모델을 지역적으로 적용하는 방법을 고안하여 실제 구현에 이용하였다. 인터페이스 적인 측면에서 사용자의 3차원 입력장치를 통한 인터랙션은 사용자로 하여금 보다 자유로운 입력을 허용하지만 이에 따른 깊이 지각 문제를 발생시킨다. 이러한 문제를 최소화 시키고 사용자의 깊이 지각을 강화시키기 위해 사용자에게 제공되는 시각적 자극을 변형시키고 다양한 정보를 제공하도록 하였다.

가상 판화 시스템은 가상 환경에서 사용자의 조작에 따른 다양한 결과물을 제작 및 출력해 볼 수 있도록 해준다. 또한 가상 환경에서 이러한 기반을 제공함으로써 가상 환경의 장점인 복사, 이동 및 영구 보존 특성을 동시에 얻을 수 있다. 본 논문은 이러한 작업을 위한 기반 기술로써 햅틱 및 가변형 모델, 3차원 입력 장치에 대한 시각적 인터페이스에 대해 다루고 이 기반 기술을 바탕으로한 가상 판화 시스템의 구현에 대하여 논하고자 한다.

Keyword : Haptic feedback, FFD, Depth perception

## 1. 서론

3차원 입력 장치는 키보드나 마우스 같은 일

반적인 입력 장치로는 받아들이기 어려운 3차원 입력을 사용자로부터 간편하고 직관적인 방법으로 받아들일 수 있다는 측면에서 활발히 연구 및 사

용되고 있다. 또한 햅틱 장치는 가상 물체의 조작에 따른 시각적인 피드백 외에 가상 물체의 느낌을 피드백 힘을 통해 사용자에게 전달해 줌으로써 컴퓨터와 사용자간의 상호 작용에 큰 도움을 준다. 본 논문은 햅틱 피드백이 적용된 실시간 가변형 모델과 효과적인 3 차원 입력에 대한 기반 연구를 하고자 한다. 그리고 이에 대한 한 가지 사례로써 햅틱 장치를 이용한 가상 관화 시스템을 제작 한다.

## 2. 관련 연구

햅틱 인터페이스를 이용하여 사용자에게 햅틱 피드백을 전달하고자 할 때 떨림이 없고 안정적인 피드백 힘을 전해 주려면 1KHz 라는 짧은 주기 안에 피드백 힘을 계산해 내어 햅틱 인터페이스에 전달해 주어야 한다. 기존의 FEM(Finite Element Method)이나 Mass-spring 과 같은 물리 기반 모델들은 시스템 행렬을 작성하고 푸는데 있어 역행렬을 구하는 과정이 포함되는 등 실시간으로 시스템에 적용하기에 연산량이 너무 많은 문제점을 지녔다. S-chain 모델은 이러한 문제점을 해결하기 위해 객체를 체인으로 연결된 구성물로 보고 체인의 줄어듬과 늘어남을 힘으로 변환함으로써 피드백 힘의 선형적인 계산이 가능하도록 접근하였고 이를 통해 연산량을 대폭 감소시켰다. [1] 그리고 이렇게 계산된 힘이 기존의 방법과 비교하였을 때 인간의 촉각 인지 능력으로 분별하지 못할 정도의 작은 오차임을 증명하였다. [2]

Sederberg 와 Parry 에 의해 제안된 FFD[3]는 사용자가 원하는 데로 물체를 변형시키기 위해 제안되었다. 이 방법은 물체를 이루는 각 격자점을 이동하면서 bezier solid 보간을 하면서 전체적으로 자연스러운 변형을 하는 방법이다.

Kameyama 는 Bezier patch 보간법을 사용해서 표면의 각 부분에 대한 변형을 하였다. 이러한 변형을 위해 격자로 된 표면데이터를 모델로 사용하였다. 그리고 격자점들을 가지고 tangent 평면을 형성하고 그 표면간에 일관성을 유지하기 위해서

Bezier 격자점을 사용하였다.

3 차원 공간상에서 3 차원 입력 장치를 사용할 경우 발생하는 깊이 지각문제를 극복하기 위한 인간의 지각능력 연구는 여러 분야에 걸쳐서 진행되고 있다. Hudson [6] 은 사용자가 조작하는 커서에 그림자를 적용시킴으로써 3 차원 공간상의 네비게이션을 강화시키는 방안을 제안하였다. 또한 Zhai et al. [7]은 3 차원 공간상의 물체에 대해 반투명한 공간을 적용시킴으로써 물체의 상대적인 위치에 대한 정보를 제공하는 방안에 대해 제안하였다.

본 논문에서 제안하는 가상 관화시스템은 3 차원입력 장치를 이용하여 사용자로 하여금 실제 관화작업을 가상 공간에서 수행할 수 있도록 하는 시스템이다. 이와 비슷하게 3 차원 입력 장치를 사용하며 사용자에게 시각적, 촉각적 피드백을 제공하는 연구는 여러 분야가 집약적으로 구성되어 진행되고 있는 경우가 많다. Frank Dache, IX[8]은 3 차원 입력장치인 PHANTOM 을 이용하여 실제적인 촉각적 자극과 시각적 자극을 제공하는 기본적인 시스템을 제안하였고, 이와는 다르게 Shinji Mizuno[9]는 압력감지 펜 이라는 2 차원 입력장치를 적용시킨 가상 관화시스템을 제안하였다. 가상 관화 시스템과 유사한 경우로는 Kevin T. McDonnell[10]이 제안한 가상 점토 시스템이 있다. 이 시스템은 3 차원 입력장치와 가변형 모델 등을 이용, 가상공간상의 점토조작을 실제 점토조작과 유사하게 표현하였다.

## 3. 가상 관화 시스템

본 가상 관화 시스템은 시각 처리 부분과 촉각 처리 부분, 그리고 사용자의 3 차원 입력을 돕는 인터페이스 부분으로 구성되어 있다. 시각 처리 부분은 3 차원 공간 상에서 사용자의 조작에 따른 관화 표면의 변형을 처리하며 촉각 처리 부분은 실제 관화를 제작할 때 느끼는 촉각을 햅틱 인터페이스를 이용하여 사용자에게 전달한다. 이때 시각 처리에 사용되는 모델과 촉각 처리에 사용되는 모델을 서로 독립적으로 관리함으로써 단

일 시스템일지라도 각기 다른 모델을 사용할 수 있도록 하였고 이를 통해 보다 융통성 있는 시스템 제작이 가능하였다. 그리고 판화 제작 시 햅틱 장치의 용이한 입력을 위해 3 차원 인지에 도움을 주기 위한 방법이 적용되었다. 다음 각 부분에서 이에 대해 보다 자세히 설명한다.

### 3.1 시각 처리 부분: NURBS based FFD

사용자가 가상판화로 조각을 할 시에 조각도가 닿는 부분에 변형이 일어나야 한다. 일반적인 FFD[4]방법을 사용할 때에는 조각도가 닿았을 때 지역적인 영향을 주지 못하기 때문에 지역적인 변형을 주기 위해서 NURBS based FFD 를 사용하였다.

조각도가 판화 판에 닿았는데 닿는 부분에 격자점, P 를 조각도가 움직이는 방향으로 움직임으로써 변형을 하였다.

$$X_{FFD} = \frac{\sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n w_{i,j,k} B_{i,p}(t) B_{j,q}(u) B_{k,r}(v) P_{ijk}}{\sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n w_{i,j,k} B_{i,p}(t) B_{j,q}(u) B_{k,r}(v)}$$

여기서  $X_{FFD}$  는 변형된 물체의 좌표이고 B 는 기조함수, w 는 각 포인트에 가해지는 가중치 값이고 P 는 격자점이다.

기존의 FFD 에서 가장 큰 문제가 되어왔던 정점들을 세밀하게 제어하기 위해서 격자점의 개수를 늘리면 그에 따라 계산에 소요되는 다항식의 차수가 늘어나는 것에 대한 문제점이었으나 NURBS 곡선의 특성상 NURBS 기반의 FFD 에서 격자점의 개수가 늘어남에 따라 다항식의 차수가 늘어나지는 않는다. 다만 개수가 늘어날 시에 선형적인 계산 시간의 증가가 존재한다. 가상 판화 시스템의 경우 격자점들이 가상 조각도에 접촉되었을 경우 조각이 되는 것이기 때문에 많은 수의 격자점이 필요로 하게 된다. 그러므로 기존의 NURBS based FFD 로 각 격자점들이 이동할 때마다 모든 점에 대한 변형된 점을 구하는 데는 많은 시간이 소요된다. 그래서 NURBS based FFD 가 지역적인 변형을 한다는 점을 활용해서 접촉이

가해진 격자점을 중심으로 일정 구역을 변형시킴으로써 짧은 시간에 원하는 변형을 하도록 하였다.

$$|X_i| \leq P_{ijk} + \alpha$$

$X_i$  는 판화 평면을 이루는 각 정점들,  $P_{ijk}$  는 접촉이 가해진 격자점,  $\alpha$  은 지역적인 변형을 행할 구역을 나타낸다.

이렇게 지역적인 계산을 함으로써 빠른 시간에 사용자가 원하는 부분에 대한 변형을 가할 수 있게 하였다.

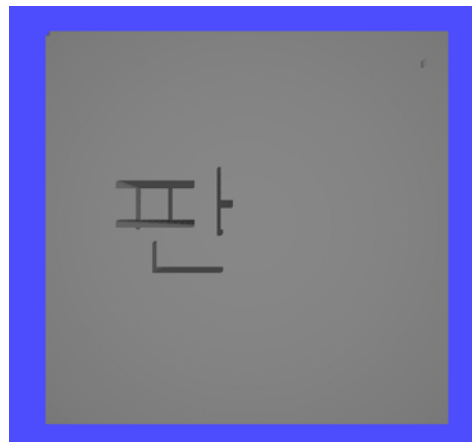


그림 1. 지역적인 변형을 이용한 시각 처리 구현 화면

### 3.2 촉각 처리 부분: 접촉 점 기준 지역적 S-chain 모델

촉각 부분은 실제 판화를 제작할 때 느끼는 촉각을 햅틱 피드백을 이용하여 사용자에게 제공한다. 이때 빠르게 햅틱 피드백 힘을 생성해 낼 수 있는 S-chain 모델을 사용함으로써 판화의 세밀한 표현을 위한 시각적 처리에 보다 많은 시간을 투자할 수 있도록 하였다. 또한 더 나은 성능을 위하여 S-chain 모델을 판화 전체에 적용하지 않고 접촉이 일어날 경우 그 접촉점을 기준으로 S-chain 모델을 지역적으로 적용하였다.

S-chain 모델의 지역적 적용이란 다음 그림에서 볼 수 있듯이 시각 모델에서 조각 칼이 접촉할 때 그 접촉 위치인 A 또는 B 위치에 햅틱 모델인 S-chain 모델이 기준점을 달리하여 따로 적용되는 것을 말한다.

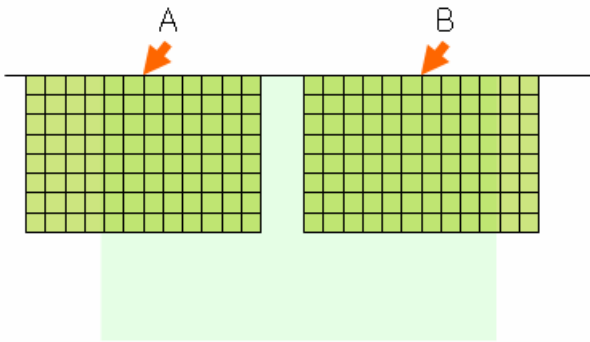


그림 2. 시각 모델에서 조각 칼의 접촉 A, B와 그에 따른 햅틱 모델의 지역적 적용

조각 처리 부분에 대해 좀 더 자세히 살펴보자. 먼저 아래 그림과 같이 가변형 모델(시각 모델)에 조각 칼이 접촉하게 되면 시각 모델로부터 충돌이 감지되어 햅틱 모델에 전달된다.

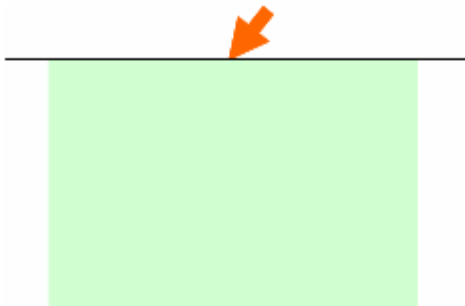


그림 3. 가변형 모델(시각 모델)과 조각 칼의 접촉

그러면 햅틱 모델은 그 정보를 이용하여 아래 그림과 같이 접촉점을 기준으로 S-chain 모델을 적용하고 충돌이 계속 유지되는 상태에서 조각 칼에 변위가 발생할 경우 그에 해당하는 피드백 힘을 계산하여 PHANTOM® Omni™ 햅틱 인터페이스 장치에 전달한다.

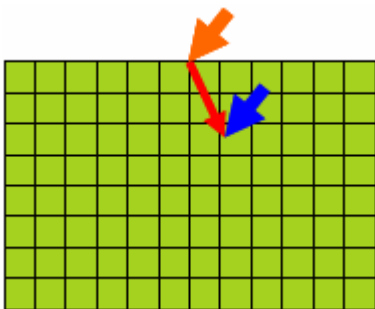


그림 4. 시각 모델로부터 얻은 접촉점에 대한 정보를 기준으로 접촉점 위치에 자리한 햅틱 모델

다음 그림은 햅틱 모델의 실제 구현 화면이다.

조각을 위해 조각 칼로 판화를 눌렀을 때 접촉점을 기준으로 3 차원 S-chain 모델이 위치한 후 눌린 만큼 변위가 발생되어 그에 해당하는 힘이 벡터로 표현된 상황이다. 화면에서 보는 바와 같이 햅틱 모델은 판화의 변형을 보여주는 시각 모델과는 다르게 표현되어 있으며 시각 모델이 판화의 변형을 보여주는 데 사용되는 반면 햅틱 모델은 사용자에게 전달할 힘을 계산하는데 적합하게 작성되어 사용되고 있다. 두 모델은 서로 독립적인 내부 구조와 동작 방식을 가지고 있지만 상호 인터랙션을 통해서 하나의 모델처럼 일관성 있게 변형과 그에 해당하는 햅틱 피드백을 계산하여 처리하도록 되어 있다.

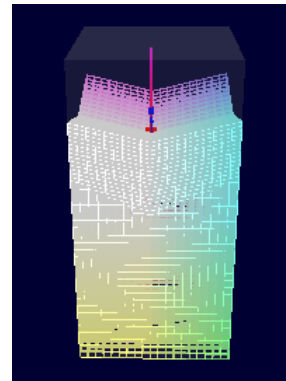


그림 5. 햅틱 모델의 구현 화면

### 3.3.3 차원 입력 및 시각적 인터페이스

가상 판화시스템은 3 차원 입력장치를 사용함에 따라, 2 차원 입력장치만을 사용할 경우와는 다르게 1 개의 추가적인 자유도를 가지게 되며, 이는 보다 직관적이고 효과적인 방법으로 3 차원 공간상의 물체를 조정할 수 있는 환경구성이 가능해짐을 뜻한다. 그러나 3 차원 입력장치의 사용 시 사용자는 자신이 조정하는 커서의 깊이적인 위치를 정확히 인지하지 못한다는 깊이지각 문제를 겪게 되고 이는 상대적으로 사용자의 작업 능률을 현저하게 저하시키는 경향이 있다. 따라서 우리는 가상 판화시스템의 시각적 인터페이스를 제작하는 과정에서 깊이지각 문제를 최소화 시키고 사용자의 깊이지각을 강화시킬 수 있도록 하고자 하였다. 시각적 인터페이스의 목표는 사용자가 가상 판화시스템을 통해 3 차원 공간상에서 조각을 행할 때,

사용자가 조정하는 커서의 위치를 사용자로 하여금 보다 쉽고 직관적으로 인지할 수 있도록 하는 것이다.

이를 위하여 시각적 인터페이스에서 우리는, 사용자에게 제공하는 시각적인 자극을 인위적으로 조작하고 보다 더 다양하게 제공하고자 한다.

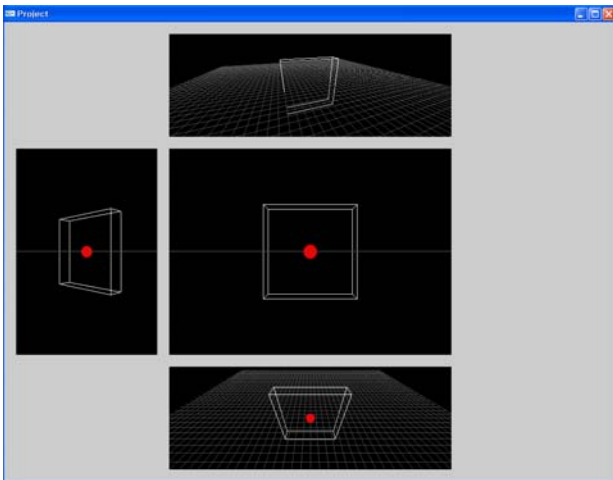


그림 6. 시각적 (사용자) 인터페이스의 레이아웃.

왼쪽 중단: 측면 화면

가운데 상단: ‘카메라 인 핸드 메타포’ 화면

가운데 중단: 주 작업화면

가운데 하단: 하단 화면

위 그림은 시각적 (사용자) 인터페이스의 레이아웃을 보이고 있다. 레이아웃 구성은 크게 4개의 렌더링 화면들로 이루어져 있으며, 각 화면들은 동일한 작업공간을 각각 다른 좌표와 방향을 가지고 있는 카메라에 의해서 렌더링 된 결과이다.

관화의 정 중앙에 위치한 주 작업화면은 사용자가 조정하는 3 차원 입력장치의 좌표축과 사용자에게 시각적 정보를 제공하는 조망 절두체의 좌표축이 동일한 회전 값을 가지는 화면으로써, 사용자에게 관화조각에 필요한 시각적 정보를 가장 많이 제공하는 화면이다. 그러나 3 차원 입력장치를 이용하면서 이 화면만을 단독으로 사용할 경우 깊이지각 문제가 발생하기 때문에, 시각적 인터페이스에서는 이를 최소화 시킬 수 있도록 다른 각도의 화면을 제공한다. 측면 화면은 시각적 정보를 제공하는 조망 절두체의 좌표축을 3 차원 입력장치의 좌표축에 대해 y 축으로  $-60^\circ$  회전한 화면

을 보이며, 하단 화면은 x 축으로  $-45^\circ$  회전한 화면을 보인다. 이러한 화면들은 사용자가 3 차원 입력장치를 움직일 때, 현재 움직이는 커서의 깊이적 위치에 대한 별도의 시각적 자극을 더해 줌으로써 사용자의 깊이 지각을 강화시키는 역할을 하고 있다. 마지막으로 ‘카메라 인 핸드 메타포’ 화면은 Joan De Boeck[11]이 제안한 메타포로써 3 차원 입력장치의 팁 부분을 카메라의 렌즈로써 활용하는 방안이다. 이 경우 보다 3 차원 공간상의 물체에 대해 보다 세밀한 관찰이 가능하고 그에 따른 정보를 통한 깊이 인식 및 관화조각의 작업 향상이 가능하다.

#### 4. 결과

본 연구는 햅틱 피드백이 적용된 실시간 가변형 모델과 효과적인 3 차원 입력에 대한 기반 연구를 목표로 연구를 진행하였으며 그에 대한 실제 구현으로써 아래와 같은 햅틱 장치를 이용한 가상 관화 시스템을 제작하였다.

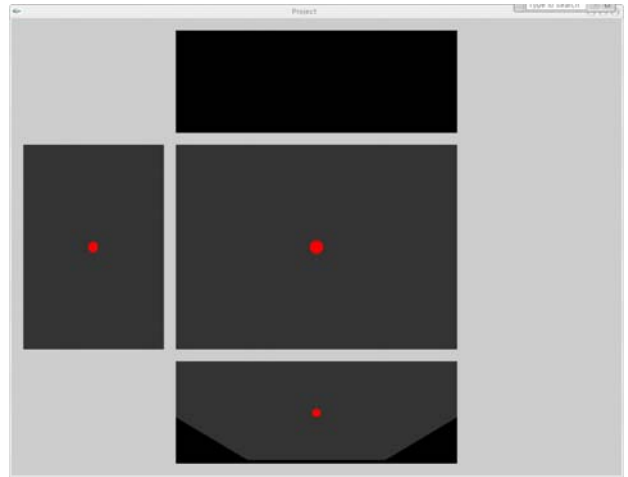


그림 7. 가상 관화 시스템

가상 관화 시스템을 기반 연구에 적합한 사례 연구로 채택하여 실험한 결과 햅틱 피드백이 존재하는 경우 분명 사용자에게 좀 더 몰입감을 주었고 그 점이 장점으로 작용하였으나 고무 관화보다 더 딱딱한 물체에 조각을 하고자 할 때 현재의 햅틱 인터페이스의 물질 속성에 대한 표현 한계상

그에 대한 처리가 어려웠다. 또한 제안한 방법을 통해 3 차원 입력 장치의 깊이 인지에 많은 도움을 받았으나 피실험자가 어느 정도 인터페이스에 학습되는 과정이 필요하다는 단점이 있었다.

## 7. 결론

본 가상 관화 시스템은 가상 환경에서 사용자의 조작에 따른 다양한 결과물을 제작 및 출력해 볼 수 있도록 해준다. 또한 가상 환경에서 이러한 기반을 제공함으로써 가상 환경의 장점인 복사, 이동 및 영구 보존 특성을 동시에 얻을 수 있다. 본 논문은 이러한 작업을 위한 기반 기술로써 햅틱 및 가변형 모델, 3 차원 입력 인터페이스에 대해 다루고 이 기반 기술을 바탕으로한 가상 관화 시스템의 구현에 대하여 논하였다.

향후 과제로 본 가상 관화 시스템을 이용하여 제작된 가상 관화를 시스템에 후처리 부분을 두어 사용자가 원하는 몇 가지 효과를 적용시킨 뒤 프린터를 이용해 출력해 볼 수 있도록 작성함으로써 보다 흥미 있는 시스템으로 완성하고자 한다.

## 8. 후기

본 연구는 한국정보통신대학교 디지털미디어 연구소의 정보통신연구개발사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었다.

## 9. 참고 문헌

[1] J Park, SY Kim, SW Son, DS Kwon, "Shape Retaining Chain Linked Model for Real-time Volume Haptic Rendering," Proc. of IEEE/Siggraph Symposium on Volume Visualization and Graphics, pp. 65-72, Boston, MA, October 2002.  
 [2] J Park, SY Kim, DS Kwon, "Mechanical Representation of Shape-retaining Chain Linked Model

for Real-time Haptic Rendering," International Symposium on Medical Simulation (Cambridge, MA, June 2004), LNCS 3078: 144-152, 2004.

[3] T. W. Sederberg and S.R. Parry, "Free-Form Deformation of Solid Geometric Models", Proceedings of SIGGRAPH '86, in Computer Graphics, 20,4, pp 151-160, 1986  
 [4] H. J. Lamoussin and W. N. Waggenspack, Jr., "NURBS-Based Free-Form Deformations", IEEE Computer Graphics and Application, 14,6, pp 59-65, 1994  
 [5] K. Kameyama, "Virtual Clay Modeling System", VRST'97, pp.197-200, 1997  
 [6] Scott E. Hudson, Adding Shadows to a 3D Cursor, ACM Transactions on Graphics Volume 11, Issue 3, July 1992, pp. 193 - 199  
 [7] Shumin Zhai, William Buxton, Paul Milgram, The Partial-Occlusion Effect: Utilizing Semitransparency in 3D Human-Computer Interaction, Proceedings of ACM Transactions on Computer-Human Interaction, Volume 3, Issue 3, September 1996, pp. 254 - 284  
 [8] Frank Dacheille, Hong Qin, Arie Kaufman, Jihad El-Sana, Haptic sculpting of dynamic surfaces, Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics  
 [9] Shinji Mizuno, Daigo Kobayashi, Minoru Okada, Jun-ichiro Toriwaki, Shinji Yamamoto, Virtual Sculpting with a Pressure Sensitive Pen, Proceedings of the SIGGRAPH 2003 conference on Sketches & applications: in conjunction with the 30th annual conference on Computer graphics and interactive techniques  
 [10] Kevin T. McDonnell, Hong Qin and Robert A. Wlodarczyk, Virtual Clay: A Real-time Sculpting System with Haptic Toolkits, Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics  
 [11] Joan De Boeck, Erwin Cuppens, Tom DeWeyer: Multisensory Interaction Metaphors With Haptics and Proprioception in Virtual Environments, Proceedings of the third Nordic conference on Human-computer interaction