

# 벡터 필드를 가진 3차원 오브젝트의 햅틱 렌더링 기법

## (A Haptic Rendering Technique for 3D Objects with Vector Field)

김 래 현 <sup>†</sup>    박 세 형 <sup>\*\*</sup>  
(Laehyun Kim)    (Sehyung Park)

**요 약** 벡터 필드는 공간상에 눈으로 보이지 않거나 표현하기 어려운 데이터의 진행을 이해 하기 쉽게 표현하는데 많이 사용되고 있다. 예를 들면, 바람이나 물의 진행 방향 및 세기, 온도의 전도, 전자기파 등의 과학적인 데이터의 시각화에 사용되고 있다. 본 연구에서는 3차원 모델상에 존재하는 벡터 필드에 대해 시각적인 정보와 더불어 촉각을 통한 직관적인 인식을 제공하기 위한 햅틱 렌더링 기술을 개발하였다. 이를 구현하기 위해 벡터 필드를 햅틱 인터페이스에 적합하게 모델링 하는 기법과 시뮬레이션 기술을 개발하였다. 이를 바탕으로 일상생활에 사용되는 지도에서 사용자가 원하는 목적지로 햅틱 인터페이스를 통해 안내해 주는 햅틱 맵과 해류의 흐름을 보여주는 시각적인 벡터 필드를 사용자가 촉각을 통해 직관적으로 느낄 수 있도록 해주는 시스템에 적용하였다. 앞으로 교육, 훈련, 그리고 오락 등 다양한 분야에서 이러한 햅틱 벡터 필드 기술이 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

**키워드** : 햅틱 인터페이스, 벡터 필드, 햅틱 맵, 과학적 가시화

**Abstract** Vector field has been commonly used to visualize the data set which is invisible or is hard to explain. For instance, it could be used to visualize scientific data such as the direction and amount of wind and water field, transfer of heat through thermally conductive materials, and electromagnetic field. In this paper, we present a technique to enable intuitive recognition of the data though haptic feedback along with visual feedback. To add tactile information to graphical vector field, we model a haptic vector field and then apply it to the haptic map to guide a user to destination and haptic simulation of water field on 2D images which can be used in everyday life. These systems allow one to recognize vector information intuitively through haptic interface. We expect that the haptic rendering technique of vector field can be applied to various applications such as education, training, and entertainment.

**Key words** : Haptic interface, Vector field, Haptic map, Scientific visualization

### 1. 서 론

벡터 필드는 다양한 과학적인 정보나 데이터의 특정한 궤적이나 흐름을 보여주기 위해 많이 이용되고 있다. 하지만, 대부분의 경우 단지 시각적인 정보만으로 보여줌으로써 복잡한 현상들에 대해 쉽고 직관적인 이해를 주기에는 부족한 점이 있다. 특히 어린이나 과학적인 사전 정보가 부족한 사람들은 더욱 어려움을 느낄 수 있다. 또한 시각 장애인들에게는 이러한 시각적인 정보는

별 의미가 없을 수도 있다.

본 논문에서는 이러한 어려움을 극복하기 위해 시각적인 정보만으로 표현된 벡터 필드를 인간의 촉감을 이용해 느낄 수 있도록 하여 보다 직관적으로 정보를 제공하는 햅틱 벡터 필드 모델링 및 렌더링 기법을 개발하였다.

기존의 연구들에서는 3차원 공간상의 벡터 필드만을 대상으로 햅틱 렌더링 기법들을 소개하였다.

하지만, 현실에서는 벡터필드는 많은 경우 물리적인 오브젝트와 상호 작용을 하면서 존재한다.

본 연구에서는 이런 점을 고려하여 3차원 오브젝트상에서 햅틱 인터페이스를 통해 직접 벡터 필드를 생성하고 이를 렌더링하는 기법을 소개하고자 한다. 또한 이런 기술을 바탕으로 두 가지 적용 예를 보여주고자 한다.

<sup>†</sup> 정 회 원 : 한국과학기술연구원 시스템연구부 연구원  
laehyunk@kist.re.kr

<sup>\*\*</sup> 비 회 원 : 한국과학기술연구원 시스템연구부 연구원  
sehyung@kist.re.kr

논문접수 : 2005년 7월 11일  
심사완료 : 2005년 11월 22일

일상생활에 흔히 사용되는 지도에서 사용자가 원하는 목적으로 햅틱 인터페이스를 통해 안내해 주는 햅틱 맵과 해안의 지형과 해류의 흐름을 사용자가 직관적으로 느낄 수 있도록 하여 이해를 높이는데 적용하였다.

이러한 햅틱 벡터 필드를 느낄 수 있도록 구현하는데 다음과 같은 3가지 기술을 구현하였다.

먼저, 기존의 시각적인 벡터 필드를 햅틱 인터페이스에 적용하기 위해 모델링 하는 기법이 요구된다. 필요에 따라서는 사용자가 직접 원하는 형태의 햅틱 벡터 필드를 생성해낼 수도 있다.

다음으로 생성된 벡터 필드를 3차원 오브젝트와 함께 렌더링 할 수 있는 햅틱 인터페이스 기술을 개발하였다. 벡터 필드 시뮬레이션은 사용자가 힘을 빼고 햅틱 장치를 살짝 잡고 있을 때 자동적으로 3차원 모델상의 벡터 필드를 따라 잡은 손을 이동하게 만든다.

마지막으로 2차원 이미지 위에 표현된 벡터 필드를 느낄 수 있도록 이미지로부터 높이 정보를 추출하여 이를 바탕으로 3차원 공간 상의 벡터 필드를 시뮬레이션 할 수 있는 기법을 제시하였다.

전체적인 시스템 구조는 그림 1에서 보여 준다. 햅틱 장치로는 SensAble 사의 팬텀(Phantom)과 듀얼 제은 CPUs와 엔비디아의 FX3000비디오카드로 구성된 PC를 사용하였다. 사용자가 팬텀의 스타일러스를 잡고 모니터의 가상 오브젝트와 그 위에 분포하는 벡터 필드를 직접 생성하고 시뮬레이션 할 수 있다.

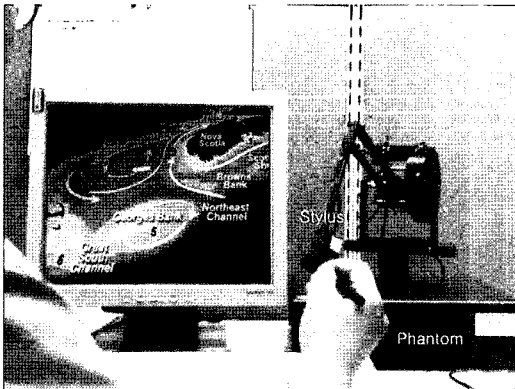


그림 1 햅틱 시스템

관련연구는 2절에서 햅틱 벡터필드에 관한 기존의 연구들을 알아보고 3절과 4절에서는 햅틱 벡터 필드 모델링 기법과 햅틱 렌더링 알고리즘을 설명하고자 한다. 5절에서 이미지 정보로부터 3차원 높이 정보를 추출하는 기법과 6절에서 개발된 기술을 적용한 예를 보여준다. 마지막으로 7절에서 결론을 내리고자 한다.

## 2. 기존 연구

Lawrence등은 시각과 햅틱 인터페이스를 통합하여 다차원의 벡터필드 데이터를 추적할 수 있는 기법을 소개하였다. 특히, 과학적인 데이터에서 충격파(shock wave)와 소용돌이 중심(vortex core)을 시뮬레이션 하였다[1].

Lundin 등은 계산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 데이터를 햅틱 인터페이스를 통해 흐름을 느낌으로 직관적인 이해를 줄 수 있는 시스템을 개발하였다[2].

Donald와 Henle은 3차원 가상 아바타의 모션을 애니메이션 하기 위해 햅틱 벡터 필드를 이용하였다. 이들은 벡터 필드를 로봇 제어 이론을 기반으로 수학적으로 모델링 하였고 이를 바탕으로 애니메이션 궤적을 실시간 수정하였다[3].

Vidholm등은 볼륨 기반의 의료영상에서 혈관을 햅틱 인터페이스를 통해 직접 추적할 수 있고 반자동의 영상 세그멘테이션을 위해 사용하였다. 이때 햅틱 렌더링은 영상이미지의 명암의 로컬 변화 도와 명암 값을 기반으로 구현되었다[4].

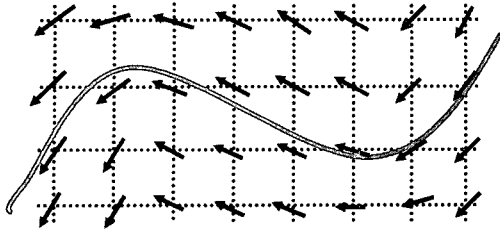
[5]에서는 6DOF 햅틱 렌더링 기법을 적용하여 벡터 필드를 시뮬레이션하였다.

이러한 기존 연구들은 주로 3차원 공간상의 라인으로 표현되는 궤적을 햅틱 렌더링 하는 기법을 개발하였다. 본 연구에서는 가상 오브젝트의 표면에 존재하는 벡터 필드를 표면을 따라 햅틱 렌더링 하는 기법을 소개하고자 한다.

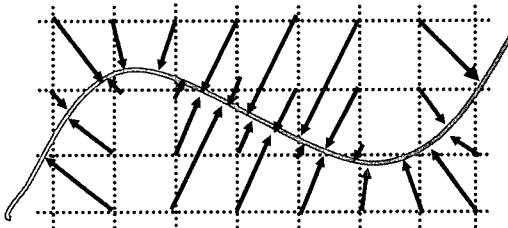
## 3. 햅틱 벡터 필드 모델링

햅틱 벡터 필드를 생성하기 위해 실 세계의 벡터 필드가 갖고 있는 특징을 분석하여 햅틱 렌더링을 위한 모델링이 필요하다. 햅틱 벡터 필드는 3차원 공간상의 그리드 형태의 볼륨 데이터 구조에 저장된다. 먼저 벡터 필드를 특정 궤적  $f(x)$ 을 따라  $\hat{f}(x)$ 에 평행한 접선(tangential)성분  $V_t(x)$ 과  $f(x)$ 의 중심으로 향하는 방사(radial)성분  $V_r(x)$ 으로 나눌 수 있다. 이때 각 벡터 성분은 3차원상에서 같은 거리로 나뉘어진 그리드 볼륨안의 특정 궤적의 주변을 따라 일정한 거리내의 있는 그리드 포인트에서 샘플링 된다. 그리드 포인트의 벡터 성분은 샘플링 포인트로부터 궤적 위의 가장 가까운 점을 계산하고 이 점에서의 값을 샘플링 포인트에 저장한다.

방사 성분의 벡터 크기는 샘플링한 지점에서 궤적과의 최단 거리에 비례하게 된다(그림 2).



(a) 접선 성분(tangential component)



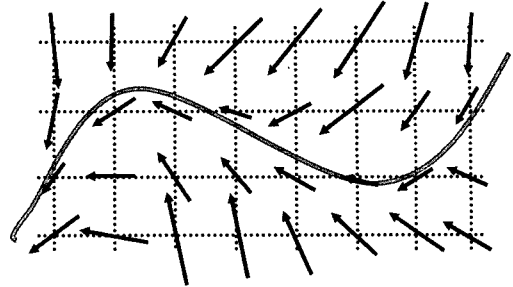
(b) 방사 성분(radial component)

그림 2 햅틱 인터페이스를 위한 벡터 필드의 성분

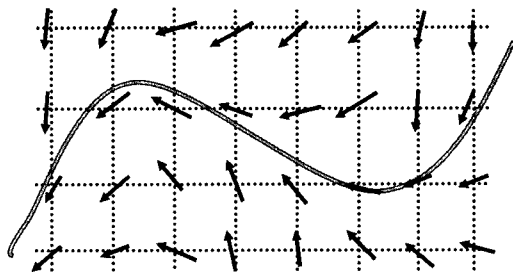
이 두 성분의 조합에 따라 두 가지 벡터 필드  $\vec{F}_v$ 로 모델링 하였다. 먼저 라인모드(Line mode)에서는 접선 성분과 방사 성분의 합으로 벡터 필드를 계산한다(그림 3(a)). 이 모드에서는 햅틱 장치의 스타일러스가 그림에서의 벡터 필드에 따라 강제로 특정 궤적을 따라 움직이도록 가이드 하는 힘을 생성한다. 만약 사용자가 이 궤적의 흐름을 벗어나 다른 방향으로 이동하려고 할 때 자연스럽게 더 큰 반력을 느끼게 된다. 이때, 궤적의 가장 바깥쪽 경계부분에서는 가장 큰 크기의 힘이 생성되고 이 경계를 벗어나면 힘이 없어지게 된다. 이때 이 경계 부분에서 따라 움직이게 되면 심한 불연속 힘 생성이 일어나 시스템이 불안정화 된다. 이를 방지하기 위해 경계부분의 그리드 포인트들은 주변의 벡터 값과 평균화한 값을 가지게 한다.

라인 모드는 사용자에게 미리 지정된 궤적을 따라 물리적으로 움직이면서 정보를 획득하도록 하기 위한 응용에 적합하다. 예를 들면, 복잡한 지하철 노선표나 지도 같은 정보에서 현재 위치와 목표 지점을 주면 2차원 이미지 상에서 사용자를 목표지점까지 햅틱 인터페이스를 통해 안내함으로써 보다 직관적으로 정보를 획득할 수 있도록 한다.

또 다른 모드로는 흐름 모드 (Flow mode)로써 먼저 벡터 필드의 법선 성분과 방사 성분을 정규화(normalize)한 후 두 성분의 합을 구한다(그림 3(b)). 만약 현재 새로운 벡터 값을 계산하고 있는 그리드 포인트에 기존의 벡터 필드가 존재하면 이 벡터 값과 합을 구한 후 다시 벡터 정규화를 수행한다. 결과되는 벡터 필드는



(a) 라인 모드의 햅틱 벡터 필드



(b) 흐름모드의 햅틱 벡터 필드

그림 3 햅틱 벡터 필드 모델링

바람이나 해류 같은 흐름을 햅틱 인터페이스를 통해 느낄 수 있고 직관적인 이해를 줄 수 있다.

### 4. 햅틱 반력 계산

가상 오브젝트 표면에 있는 벡터 필드를 느끼기 위해서는 햅틱 벡터 필드와 동시에 가상 오브젝트의 표면을 햅틱 렌더링 하여야 한다.

본 연구에서는 Kim 등이 제안한 하이브리드 표면을 기반으로 한 햅틱 렌더링 기법[6]을 채용하였다. 이 기법에서는 강체 기반의 햅틱 렌더링은 볼륨 음함수 표면 (Volumetric implicit surface)을 기반으로 구현 되었고 비주얼 렌더링을 위해서는 폴리곤 모델을 사용하였다. 볼륨 간접 모델은 햅틱 렌더링을 위한 충돌 검사 및 반력 벡터를 빠르고 정확하게 구현할 수 있는 장점이 있다. 반면 볼륨 렌더링 기법과 비교하여 폴리곤 모델을 이용함으로써 3D모델의 기하학적 특징을 효과적으로 표현 렌더링 할 수 있다.

볼륨 음함수 표면은 3차원 가상 물체로부터 볼륨 그리드의 각 포인트로부터 표면의 가장 가까운 점까지의 거리를 샘플링하여 이를 해당 포인트에 저장한다. 이때 생성되는 스칼라 값을 포텐셜 값(potential value)라 한다.

이 포텐셜 값은 표면으로부터 얼마나 떨어져 있는가를 나타내므로 현재 햅틱 스타일러스의 위치에서 포텐셜 값을 계산하여 충돌 검사를 수행한다. 또한 정확한

반력의 크기 및 방향도 포텐셜 값들을 이용해 계산할 수 있다. 반력의 방향은 모델 표면 내부의 툴팁이 위치한 복셀을 찾아 이 복셀의 모서리8개 꼭지점들의 포텐셜 필드의 기울기(gradient)를 식 (1)을 이용해서 각각 구한 후 반력의 방향은 구한 기울기들을 3차원 선형 보간하여 계산한다(그림 4(a)).

$$n = \nabla f / \|\nabla f\|, \quad \nabla f = \left[ \frac{df}{dx}, \frac{df}{dy}, \frac{df}{dz} \right] \quad (1)$$

반력의 크기를 구하기 위해 먼저 툴의 위치에서 계산된 방향을 따라 표면과 만날 때 까지 이동하여 얻어진 포인트(Virtual Contact Point, VCP)를 얻는다. 이때 반력의 크기는 툴의 위치와 VCP간의 거리에 비례한다. 따라서 시스템은 계산된 힘 벡터를 햅틱장치에 보내서 VCP와 툴이 같은 위치에 있도록 만드는 반력을 생성한다.

힘 벡터의 방향과 크기를 결정한 후, 식 (2)의 스프링-댐퍼 모델을 사용하여 최종 반력을 계산한다(그림 4(b)).

$$\vec{F}_h = (P_c - P_t) * k - \vec{v} * b \quad (2)$$

이 식에서  $\vec{F}_h$ 은 힘 벡터이고  $P_c$ 은 VCP의 좌표,  $P_t$ 은 툴팁의 좌표,  $k$ 은 스프링 경도(spring stiffness),  $\vec{v}$ 는 툴팁의 속도, 마지막으로  $b$ 은 점성(viscosity)을 나타낸다. 스프링의 경도는 표면의 딱딱한 정도를 비례하고 점성은 햅틱 스타일러스의 위치를 불연속적인 시간에서 샘플링 함으로써 발생하는 여분의 에너지를 소모시켜서 시스템의 진동(oscillation)을 막아준다.

사용자가 햅틱 장치의 스타일러스를 벡터 필드로 이동하면 최종적인 햅틱 벡터  $\vec{F}$ 는 계산된 사용자 벡터

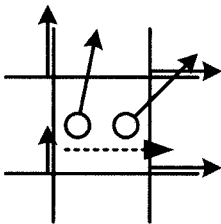
필드를 느낄 수 있도록 해주는 힘  $\vec{F}_v$ 과 가상 오브젝트의 표면을 햅틱 렌더링하기 위한 반력  $\vec{F}_h$ 의 합으로 결정된다(식 (3)). 이때 반력이 없는 자유공간에서 햅틱 벡터 필드 안으로 이동할 때 그 경계부분에서 갑작스런 힘의 변화로 인한 심한 진동과 소음이 발생한다. 이를 피하기 위해 최종 햅틱 벡터는 가상 물체 안의 햅틱 스타일러스의 침투 정도( $P_c - P_t$ )에 비례한다. 즉 사용자가 가상 물체에 힘을 더 가하면 벡터필드를 더 강하게 느끼게 된다. 이때  $d$ 는 비례상수이다.

$$\vec{F} = (P_c - P_t) * d * (\vec{F}_v + \vec{F}_h) \quad (3)$$

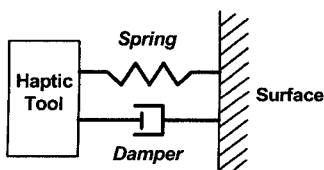
### 5. 이미지로 부터 높이 정보 생성

마지막으로 2차원 이미지로부터 높이 정보를 추출하여 볼륨 음함수 표면을 변형한다. 이를 통해 2 차원 이미지의 3 차원 높이 정보를 햅틱 인터페이스를 통해 느낄 수 있도록 하였다. 이를 이미지 기반의 햅틱 텍스처링(image-based haptic texturing)이라 한다[7].

볼륨 데이터에는 폴리곤 모델로부터 볼륨 음함수 표면을 생성할 때 포텐셜 값과 더불어 각 그리드 포인트로부터 최단거리에 있는 표면 위에 점의 그래픽 텍스처 값(컬러값)을 저장한다. 이때 3차원 공간의 삼각형 폴리곤의 각 꼭지점이 해당하는 2차원 텍스처의 컬러값을 얻어 와서 해당 점의 컬러값을 무게중심 좌표(barycentric coordinate)을 이용하여 계산한다. 각 그리드 포인트에 저장된 컬러값을 그레이스케일로 바꾸어 이미지의 높낮이를 나타내는 높이 맵을 생성한 후 이에 맞게 볼륨 음함수 표면의 포텐셜 값을 바꾸어 준다. 그림 5에서 포텐셜 값이 변경되었을 때 음함수 표면의 변화를 보여준다.

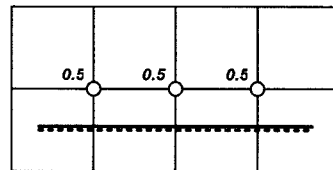


(a) 반력의 방향 계산

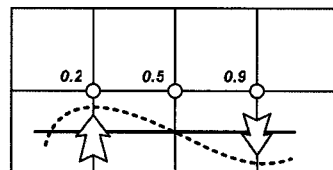


(b) 스프링-댐퍼 모델

그림 4 햅틱 벡터의 방향과 크기 계산

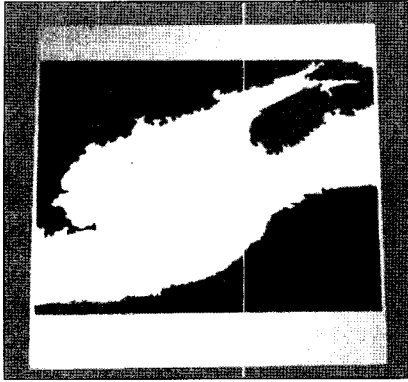


(a) 초기의 폴리곤 모델과 볼륨 음함수 표면



(b) 이미지를 정보를 기반으로 표면의 높이가 수정된 볼륨 음함수 표면

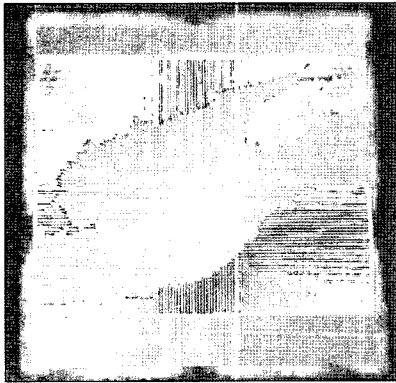
그림 5 이미지 기반의 햅틱 텍스처링의 개념도



(a) 3차원 모델위에 지형그림



(b) 3차원 모델의 볼륨 음함수 표면



(c) 포텐셜 값을 변경한 모습



(d) 변경된 높이를 가진 지도의 시각화

그림 6 3차원 공간상에 높이 정보 추출한 예

그림 6에서는 이미지 기반의 햅틱 텍스처링을 적용하여 육지 부분의 높이를 수정한 예를 보여 준다. 그림 6(c)는 텍스처의 칼라 정보를 이용해 육지 부분의 포텐셜 값을 변경해 주는 과정을 보여준다. 이를 통해 사용자는 벡터 필드와 더불어 2 차원 지도의 3 차원 높이도 느낄 수 있다(그림 6(d)).

### 6. 적용 예

그림 7에서 라인 모드를 이용한 햅틱 맵(haptic map)을 보여준다. 지도 상에서 현재 방문자의 위치(붉은 원)에 햅틱 장치의 stylus를 가져가면 방문자를 목표지점까지 최단거리의 길을 따라 안내한다. 노란색 구가 현재의 햅틱 스타일러스의 위치를 보여준다. 독자의 이해를 돕기 위해 가상 오브젝트의 표면에 위치하는 벡터필드도 함께 볼 수 있다. 이때 벡터의 방향은 분홍색에서 파란색 방향으로 나타낸다. 사용자의 이동속도는 가상지도를 누르는 힘에 비례한다.

흐름모드를 이용한 예로써 교과서에 많이 볼 수 있는 해류를 보여주는 2차원 이미지에서 해류나 바람의 흐름

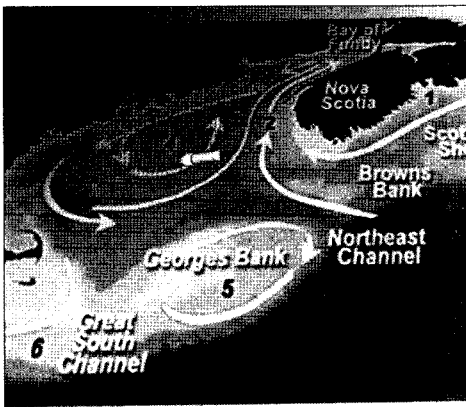


그림 7 라인모드를 이용한 햅틱 맵

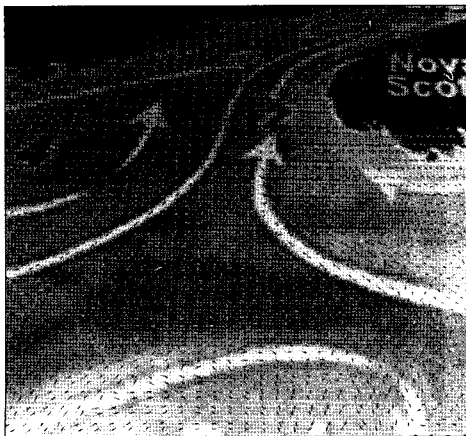
을 햅틱 인터페이스를 통해 직관적으로 이해할 수 있는 시스템을 개발하였다. 2차원 이미지상에서 마치 못으로 그림을 그리듯이 사용자가 햅틱 장치의 스타일러스를 잡고 해류를 따라 움직이면 사용자가 만들어 낸 궤적을

따라 적절한 햅틱 벡터 필드가 실시간 생성이 되고 사용자가 이를 느낄 수 있다. 보다 현실감을 높이기 위해 2차원 지도 정보로부터 3차원 표면을 생성하여 표면을 따라 해류를 느낄 수 있도록 햅틱 텍스처링을 적용하였다. 그림 8에서 육지 부분은 높이 솟아 있어서 바다와 육지간의 경계와 해안선을 느낄 수 있고 해류를 따라 움직일 때 경계 부분에서는 반력을 느낄 수 있다. 그림 4에서는 흐름 모드를 이용하여 복잡한 멕시코 만의 해류를 보여주는 2차원 이미지상에서 햅틱 벡터 필드를 실시간 생성하고 직접 해류의 흐름을 느껴볼 수 있다.

두 가지 예에서 포텐셜 필드와 벡터 필드는 128×128×64 크기의 3차원 그리드에 저장되었다. 햅틱 렌더링은 1 KHz로 수행되었다. 햅틱 시뮬레이션 전에 3차원 모델로부터 음함수 표면을 구하기 위해 전처리 시간이 요구되는데 모델에 따라 3~10초정도 소요되었다.



(a) 멕시코 만의 해류 지도로부터 햅틱 벡터 필드 생성



(b) 완성된 햅틱 벡터 필드

그림 8 흐름모드(flow mode)에서 벡터 필드의 생성 및 시뮬레이션

## 7. 결론 및 토론

햅틱 인터페이스를 이용한 벡터 필드의 모델링과 시뮬레이션 기법, 그리고 2차원 이미지로부터 높이 정보를 추출하는 기법 등을 이용하여 3차원 오브젝트상에서 직접 벡터필드를 생성하고 이를 빠르고 안정하게 햅틱 렌더링 함으로써 보다 직관적으로 정보를 느끼고 이해할 수 있는 기술을 개발하였다. 또한 이런 기법들을 적용한 예들을 소개하였다.

이러한 햅틱 인터페이스를 이용한 가시화 기법은 교육, 훈련, 그리고 과학적 가시화(Scientific visualization)등에 응용하고자 한다.

본 연구에서는 3-DOF 햅틱 렌더링을 사용하여 힘에 의한 위치 이동 만을 제공하였다. 따라서 토크에 의한 회전 정보를 추가하기 위해서는 앞으로 6-DOF 햅틱 렌더링 기법이 요구된다.

## 참고 문헌

- [1] Dale A. Lawrence, Christopher D. Lee, Lucy Y. Pao, Roman Y. Novoselov, "Shock and Vortex Visualization Using a Combined Visual/Haptic Interface," In IEEE Visualization, 2000.
- [2] Karljohan Lundin, Mattias Sillén, Matthew Cooper and Anders Ynnerman, "Haptic Visualization of Computational Fluid Dynamics Data Using Reactive Forces," In Proceedings of the Conference on Visualization and Data Analysis, part of IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging 2005.
- [3] Bruce Randall Donald, Frederick Henle, "Haptic Vector Fields for Animation Motion Control," Fourth Phantom User Groups workshop, pp. 52-55, 1999.
- [4] Erik Vidholm, Xavier Tizon, Ingela Nystrom, Ewert Bengtsson, "Haptic Guided Seeding of MRA Images for Semi-Automatic Segmentation," In Proceedings of IEEE International symposium on biomedical imaging, pp. 288-291, 2004.
- [5] Ming C. Lin et al., "6-DOF Haptic Rendering," <http://www.cs.unc.edu/~geom/6DHaptics/>
- [6] Laehyun Kim, Gaurav S. Sukhatme, Mathieu Desbrun, "A Haptic Rendering Technique Based on Hybrid Surface Representation," IEEE computer graphics and applications, Vol. 24(2), pp.66-75, 2004.
- [7] Laehyun Kim, Gaurav S. Sukhatme, Mathieu Desbrun, "Haptic Editing for Decoration and Material Properties," 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.213-221, 2003.



김래현

1994년 한양대학교 금속공학과 학사  
 1996년 연세대학교 전산학과 석사. 2003  
 년 University of Southern California,  
 전산학과 박사. 1996년~1999년 한국과  
 학기술연구원(KIST) 위촉 연구원. 2003  
 년~현재 한국과학기술연구원(KIST) 선  
 임연구원. 관심분야는 햅틱스(Haptics), 컴퓨터 그래픽스  
 (computer graphics), 인간-컴퓨터 인터랙션(HCI-Human  
 computer interaction), 가상 현실(Virtual Reality)



박세형

1977년 서울대학교 기계설계학과 학사  
 1984년 Cornell 대학교 기계공학과 석사  
 1992년 KIAST 정밀기계과 박사. 1980  
 년~현재 한국과학기술연구원(KIST) 연  
 구원, 선임연구원, 책임연구원. 관심분야  
 는 형상설계(Geometric modeling), 인간  
 -컴퓨터 인터랙션(HCI-Human computer interaction), 역  
 설계(Reverse Engineering), NC 프로그래밍(NC Pro-  
 gramming)