

힘유지 이론에 기반한 비균일 강도를 지닌 표면의 모양에 대한 햅틱화 2007 천재영



석사학위논문

힘 유지 이론에 기반한 비균일 강도를
지닌 표면의 모양에 대한 햅틱화

천재영(千在永)

전자컴퓨터공학부 (컴퓨터공학 가상현실 전공)

포항공과대학교 대학원

2007



힘 유지 이론에 기반한 비균일 강도를
지닌 표면의 모양에 대한 햅틱화

**Haptizing a Surface Height Change
with Varying Stiffness Based on
Force Constancy**



Haptizing a Surface Height Change with Varying Stiffness Based on Force Constancy

by

Jaeyoung Cheon

Department of Computer Science and Engineering

POHANG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

A thesis submitted to the faculty of Pohang University of Science and Technology in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in the Department of Computer Science and Engineering

Pohang, Korea

2006 . 12 . 27 .

Approved by

Major Advisor: Seungmoon Choi



힘 유지 이론에 기반한 비균일 강도를 지닌 표면의 모양에 대한 햅틱화

천재영

위 논문은 포항공대 대학원 석사 학위 논문으로 학위 논문 심사
위원회를 통과하였음을 인정합니다.

2006년 12 월 27 일

학위논문 심사위원회 위원장	최승문	(인)
위 원	김정현	(인)
위 원	이승용	(인)



MECE 20052413 천재영, Jaeyoung Cheon, 힘 유지 이론에 기반한 비균일 강도를 지닌 표면의 모양에 대한 햅틱화, Haptizing a Surface Height Change with Varying Stiffness Based on Force Constancy, Department of Computer Science and Engineering, 2007, 59 p, Advisor: 최승문(Seungmoon Choi). Text in Korean

Abstract

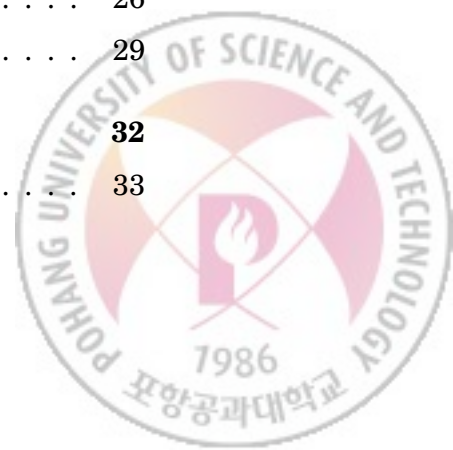
Delivering the attributes of a data set to the user without any perceptual distortions is the most important requirement of data perceptualization. Penalty-based method is one of the prevailing haptic rendering method which was shown to result in distorted perception of surface topography that has varying stiffness. The force constancy theory, which states that the user generates invariant contact force level when s/he strokes a surface to perceive its topography, was proven to well account for this phenomenon. This paper proposes a new haptization algorithm named *Topography Compensation Algorithm*(TCA) that resolves the problem of the penalty-based method. TCA is computationally efficient and delivers topography information consistently with virtual models. When the force direction is varied using virtual surface normals, penalty-based algorithm may render the same surface differently depending on operating conditions, but TCA does not. Since TCA uses the compensated position rather than original surface position, it is subject to two problems. One is rendering surface heights different for each exploratory procedure, and the other is error accumulation. Using the human motion characteristics of slope perception, we developed the method of restoring the compensated height to the original height. TCA expanded by this method was shown to resolve the two artifacts by a psychophysical experiment.





목차

제 1 장 서론	1
제 2 장 힘 유지 이론	6
제 3 장 지형 보상 알고리즘의 기본 개념	9
제 1 절 기본 개념	10
제 2 절 실험: 지형 보상 알고리즘의 성능	12
2.1 방법	13
2.2 결과	17
제 4 장 표면의 법선을 고려한 지형 보상 알고리즘	22
제 1 절 표면 법선 렌더링의 영향	23
제 2 절 실험: 표면 법선 렌더링의 영향	25
2.1 방법	26
2.2 결과	29
제 5 장 표면보상으로 인한 문제점과 그 해결	32
제 1 절 지형의 확장	33

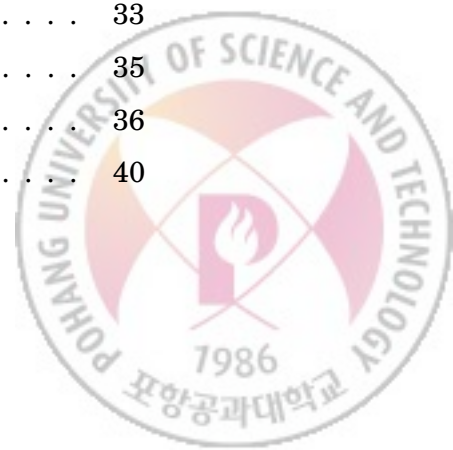


제 2 절 탐구 과정의 확장	36
제 3 절 높이 복원 방법	38
제 4 절 실험: 기울기에 대한 절대 임계값 측정	39
4.1 방법	39
4.2 결과	45
제 5 절 확장된 지형 보상 알고리즘	45
제 6 절 실험: 확장된 지형 보상 알고리즘의 성능	47
6.1 방법	47
6.2 결과	49
제 6 장 지형 보상 알고리즘의 구현	52
제 7 장 결론	55
참고 문헌	57
한글 요약문	59



그림 목차

1.1	데이터 인지화(Data Perceptualization)	2
1.2	“Protein-on-mica” 데이터	3
2.1	두 벽에 대한 햅틱 렌더링을 위에서 내려다 본 모습	7
3.1	실험의 환경 구성	13
3.2	실험에서 측정된 민감도 지수 d'	18
3.3	사람의 손에 전달된 탐침 끝의 궤적과 계산된 힘	19
4.1	HIP와 SCP와 CSP	23
4.2	표면의 높이가 변하는 부분 근처에서 렌더링 되는 힘의 방향	24
4.3	각 조건에 대한 민감도 지수 d'	28
4.4	각 조건에 대한 평균 민감도 지수 d'	29
5.1	두 표면의 경계에서 왕복하며 선을 긋는 경우	33
5.2	오차 누적의 원인	35
5.3	표면의 보상에 따른 가상 표면의 높이	36
5.4	실험 중인 피실험자	40



5.5	실험 진행 화면.	41
5.6	실험에 주어진 경사에 따른 탐침 끝의 경로.	43
5.7	C1 조건에서 S6에게 전달한 자극의 변화.	44
5.8	측정한 임계값.	45
5.9	확장된 방법으로 두 표면의 경계에서 왕복하며 선을 긋는 경우.	46
5.10	조건에 따른 피실험자의 민감도 지수 d'	49
5.11	각 조건에 대한 평균 민감도 지수 d'	50
6.1	충돌 탐지시 고려해야 하는 모든 상황.	53



표 목 차

3.1	실험에 사용된 표면 모델	15
3.2	사용자에게 전달된 힘과 두 표면의 높이 차이 Δp_z	20
4.1	실험에 사용된 표면 모델.	27
4.2	사용자에게 전달된 높이 차이	29
5.1	실험에 사용된 조건.	42
5.2	조건에 따른 평균 임계값	46
5.3	실험에 사용된 표면 모델.	48
5.4	높이 복원 여부에 따른 민감도 지수	50
5.5	사용자에게 전달된 높이 차이	51
6.1	지형 보상 알고리즘.	54



제 1 장

서론

햅틱 렌더링(Haptic Rendering)의 가장 중요한 역할은 가상 물체에 지정된 특징들과 사용자가 인지한 가상 물체의 특징들이 일치하도록 정보를 전달하는 것이다. 그러나 햅틱 인터페이스 장비(Haptic Interface Device)가 전달하는 힘이 최종적으로 사용자에게 전달되는 역학의 영향, 사용자와 햅틱 장비간에 발생하는 불안정한 상태(Instability), 햅틱 렌더링 방법이 표현하고자 하는 속성의 물리적 특성을 충분히 전달함에 한계가 있는 경우에 이러한 역할은 지켜지지 못한다. 이러한 특징들은 사람이 가상 물체의 속성을 인지할 때 잡음이 더해진 자극을 느끼거나, 최악의 경우 잡음 자체만을 느끼게 만든다. 햅틱 렌더링에 대한 최근의 이슈와 기술에 대한 조사 자료는 [1]에 소개되어 있다.

과학적 데이터를 인지화하기 위하여 가상 환경에서 일어나는 물리적 현상을 햅틱 정보로 제대로 표현하는 것은 매우 힘든 일이다. 여기서 데이터의 인지화란 데이터 시각화의 확장된 개념으로서 시각, 청각, 촉각에 이르는 여러 분야를 총칭하는 용어로 그림 1.1에 데이터 인지화에 대한 개념을 표현하였다. GROPE [2]는 데이터 인지화의 선구적인 프로젝트로, 사용자가 분자 수준의 구조를 힘 전달 장비(Force Feedback Device)와 HMD(Head-Mounted Display)를 사용하여 체험하는 기능을 제공한다. 힘 전달 장비를 STM(Scanning Tunneling Microscope)과 연결하여 시



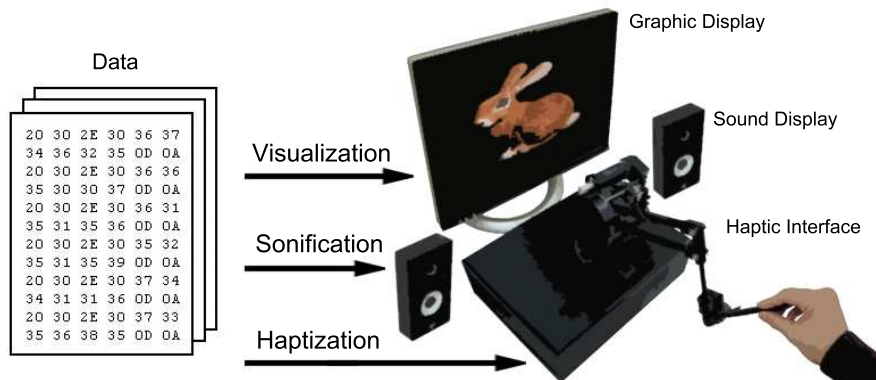
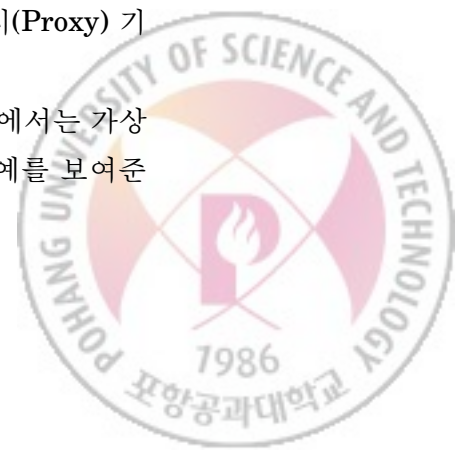


그림 1.1 데이터 인지화(Data Perceptualization).

각과 촉각 정보를 제공하는 원격 조종 시스템(Teleoperation System)에 대한 연구 [3]도 데이터 인지화의 한 분야이다. 최근에는 여러 볼륨 데이터의 집합(Multiple Volume Data Sets)에 대한 데이터 인지화 시스템이 개발되기도 하였다 [4].

이와 같이 과학적으로 얻은 데이터로 만들어지거나, 또는 사람이 인위적으로 디자인한 가상 물체에 대하여 그 물체가 지닌 속성들을 사용자가 인지할 수 있도록 하기 위해서는 이를 전달하는 수단과 방법이 필요하다. 상호 작용에 필요한 요소들을 입력으로 하고 사용자에게 전달할 힘을 출력으로 하는 계산 과정이 필요하며 이를 햅틱 렌더링(Haptic Rendering)이라 한다. 즉 햅틱 렌더링이란 사용자가 가상의 물체와 상호작용을 할 때 햅틱 인터페이스 장치가 사용자에게 전달할 힘을 계산하는 과정을 말한다[5]. 햅틱 렌더링은 가상 물체가 정의된 형식, 힘을 계산하기 위해 사용하는 자료 구조 또는 알고리즘에 따라 분류되는데, 이 중 데이터 인지화 분야의 방대한 자료를 효율적으로 렌더링하는 알고리즘으로 햅틱 볼륨 렌더링(Haptic Volume Rendering) [6][7]이 많이 사용된다. 햅틱 볼륨 렌더링 알고리즘은 지역적 기울기(Local Gradient)를 표면의 법선(Surface Normal)으로 사용하여 햅틱 장비가 사용자에게 전달할 힘을 계산한다. 최근의 새로운 시스템들은 프록시(Proxy) 기반의 햅틱 렌더링 기법을 볼륨 렌더링에 사용한다[8][9].

현실을 모방하는 다른 가상 현실 응용프로그램과 달리 데이터 인지화에서는 가상 물체의 속성들이 서로 연관되어 있는 경우가 많다. 그림 1.2은 그러한 예를 보여준



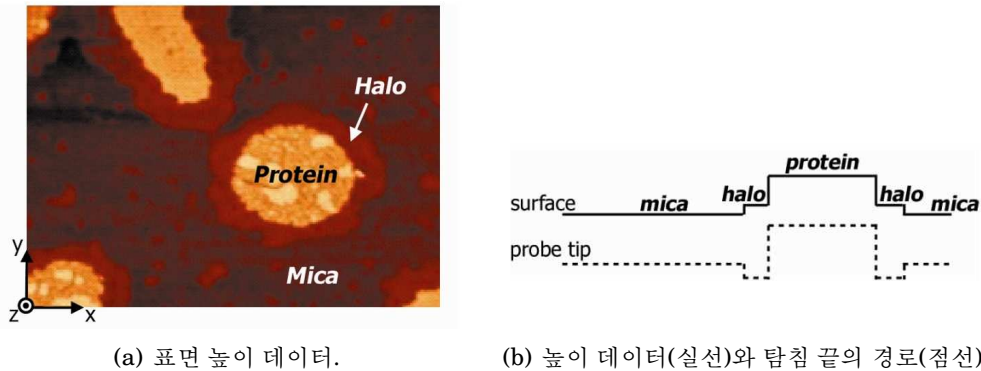


그림 1.2 “Protein-on-mica” 데이터.

다. 그림 1.2(a)는 단백질이 Mica 물질에 끼워져 있는 Bi-lipid Membrane Patch의 표면 높이 맵(Surface Height Map)을 높은 부분은 밝게, 낮은 부분은 어둡게 표현하였으며 편평한 Mica 표면 위에 Halo에 의해 둘러 쌓인 원형의 단백질 Membrane을 보여준다. 편평한 표면에 대하여 나노미터 크기의 함께 존재하는 다양한 특징들을 측정할 수 있는 장비인 주사형 탐침 현미경(Scanning Probe Microscope)을 사용하여 높이 맵을 측정하였다. Membrane Patch는 Transmembrane 단백질의 주기적인 배열로 채워져 있기 때문에 Halo lipid 부분보다 더 단단하다. 이 데이터에 대한 가상 모델을 페널티 기반 알고리즘으로 렌더링함으로써 사용자에게 표면을 톡톡 쳐서 표면의 강도를 느끼거나, 선을 그어보게 함으로써 표면의 모양을 알아낼 수 있는 환경을 제공하였다. 그림 1.2(b)은 높이 정보를 측면에서 바라보았을 때의 모양인데 여기서 확인할 수 있듯이 Halo 영역은 Mica 영역보다 높다. 그러나 사용자들은 일관되게 Halo 영역이 Mica 영역보다 낮다는 반응을 보였다. 이 현상을 명확히 분석하기 위해 사용자의 손이 움직인 진행 경로를 기록하여 관찰하였고 그 결과 명확한 역전 현상을 볼 수 있었다. 그림 1.2(b)는 간단히 표현된 물체의 표면 모양(실선)과 손의 진행 경로(점선)가 평행하지 않음을 보인다. 사실 페널티 기반 알고리즘은 균일한 강도를 갖는 표면을 가정하고 만들어진 기법이었던 것이다.

이러한 현상은 현실적으로도 관찰이 되는 일이다. 표면을 손으로 꺾꺾 누를 때 단단하고 낮은 표면보다 무르고 높은 표면에 대하여, 무른 부분에서 손이 많이 들어가기 때문이다. 이와 같이 물체가 가진 속성들은 서로 영향을 미쳐 사람이 속성 그대



로 인지하는 것을 방해하기도 한다. 그러나 데이터 인지화의 목적은 앞서 말한듯이 사용자에게 물체가 가진 속성을 그대로 전달하여 물체의 모양과 강도를 독립적으로 정확하게 인식시키는 것이기 때문에 페널티 기반 알고리즘은 데이터 인지화의 응용 프로그램에 적합하지 못하다.

위에서 소개한 높이 왜곡 전달 현상을 설명하기 위해 사람의 행동 특징에 대해 세운 가정이 힘 유지 가설(**Force Constancy Hypothesis**)이며, 이는 사용자가 가상 벽의 모양을 인식하기 위하여 측면으로 움직이며 접촉할 때 일정한 힘을 유지한다는 것을 의미한다[10]. 이를 **Halo-Mica** 데이터에 적용하면 사람의 접촉 힘이 일정하기 때문에 무른 표면인 **Halo** 영역에서 깊게 들어가고 보다 단단한 **Mica** 영역에서는 얇게 들어가기 때문에 이러한 높이 왜곡 현상이 생기는 것임을 알 수 있다. 만약 두 영역에서 들어간 깊이의 차이가 원래 높이의 차이보다 크다면 **Halo-Mica** 데이터에서와 같은 역전 현상이 발생하는 것이다.

힘 유지 가설은 정신물리학 실험을 통하여 사실인 것으로 확인되었고 사람의 운동 특징을 설명하는 하나의 이론이 되었다. **Halo-Mica** 데이터는 원래의 모델이 갖고 있는 강도와 표면의 모양을 왜곡 없이 정확하게 사용자에게 전달하는 새로운 렌더링 알고리즘이 필요함을 보여주는 한 예라고 할 수 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 힘 유지 이론에 기반한 지형 보상 알고리즘(**Topography Compensation Algorithm**)을 제안한다. 이후의 본 논문에서는 **Halo-Mica** 데이터에서의 각 물질의 경계와 같이 가상 물체의 높이나 강도가 급격히 변하는 부분을 **변화 구간(Varying Interval)**라고 표현한다.

3 장에서는 표면 보상 알고리즘을 하나의 변화 구간에 대하여 한 번만 선을 긋는 경우를 가정하여 제한된 지형 조건과 행동에 대하여 설계하였다. 설계된 기본 표면 보상 알고리즘은 정신물리학적 실험(**Psychophysical Experiment**)을 통하여 페널티 기반 알고리즘과 비교 분석하였다. 실험 결과 제안하는 알고리즘은 표면의 강도와 모양을 왜곡 없이 전달하는 강력함과 계산의 효율성을 보였다. 이 실험은 햅틱 렌더링이 제공하는 운동 단서(**Kinesthetic Cue**)만의 영향을 살펴보기 위하여 사용자에게 전달되는 힘의 크기는 변하지만 힘의 방향은 변하지 않는 환경으로 구성되었다.

4 장에서는 운동 단서 외의 다른 단서를 제공하기 위해 표면의 법선을 고려하였



고 그 결과 측면 힘 단서가 제공되는 것을 확인하였다. 페널티 기반 알고리즘은 이러한 환경에서 비일관적인 지형 정보를 전달할 가능성이 있음을 발견하였다. 표면의 법선이 렌더링 되었을 때의 지형 정보 전달에 미치는 영향과 기존 알고리즘의 문제점을 확인하기 위하여 정신 물리학적 실험을 하였고 검증하였다.

사용자에게 물체가 가진 속성을 올바르게 전달하기 위한 목적의 표면 보상 알고리즘을 다수의 변화 구간과 다양한 탐구 방식을 지원하는 햅틱 렌더링 방법으로 확장하기 위하여 5 장에서는 그에 따른 도전 과제들이 무엇인지를 분석하고 이를 해결하기 위한 방법 제시한다. 또한 확장된 알고리즘이 원래의 목적인 정확한 정보 전달을 하는지에 대한 여부를 실험을 통해 살펴보았다.



제 2 장

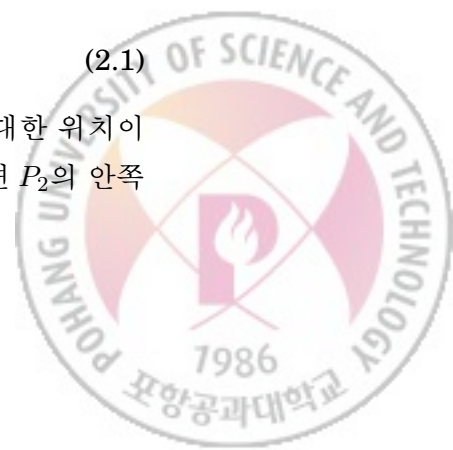
힘 유지 이론

힘 유지 이론이란 사용자가 가상 표면의 모양을 인식하기 위하여 측면으로 움직이며 선을 그을 때 일정한 힘을 유지한다는 이론이다. [10]에서 정신물리학적 실험을 통해 0.3 N/mm 이상의 강도를 지닌 표면의 경우에 이 이론은 잘 설명이 되었는데 강도가 0.3 N/mm 미만의 표면인 경우에는 강도가 너무 낮아 표면의 경계가 뚜렷하게 표현이 되지 않아서 사용자가 일정한 접촉 힘을 유지하기 힘들기 때문이다.

손에 전달되는 두 표면의 높이의 차이는 힘 유지 이론을 사용하여 수학적으로 표현할 수 있다. 그림 2.1는 수직으로 놓여진 두 개의 가상 표면 P_1, P_2 를 보인다. 각 표면의 높이(사용자의 입장에서는 깊이)를 z 축 방향에 대해 h_1, h_2 라고 표현하고 각 표면의 강도는 k_1, k_2 로 표시한다. 본 논문에서는 사용자에게 가까운 벽이 먼 벽보다 높다고 정의한다(그림 2.1의 경우 $\Delta h = h_2 - h_1 > 0$). 페널티 기반 알고리즘을 사용했을 때 햅틱 인터페이스 장치가 사용자에게 z 축 방향으로 전달하는 힘 f_z 는 다음과 같다.

$$f_z = k(h - p_z) \quad (2.1)$$

여기서 p_z 는 햅틱 인터페이스 장비의 탐침 끝(Probe Tip)의 z 축에 대한 위치이다. 만약 탐침 끝이 표면 P_1 의 안쪽에 위치하면 $h = h_1, k = k_1$ 이고 표면 P_2 의 안쪽



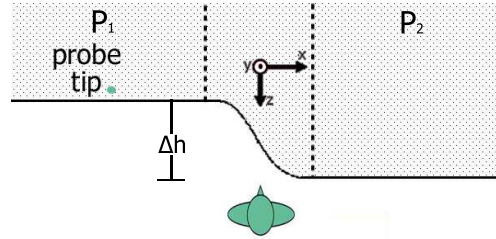


그림 2.1 두 벽에 대한 햅틱 렌더링을 위에서 내려다 본 모습.

에 위치하면 $h = h_2$, $k = k_2$ 이다. 힘 유지 가설에 의해 각 표면에서의 접촉 힘이 같다고 가정하면 각 표면에서의 관통 깊이(Penetration Depth)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_1 = h_1 - p_{z1} = \frac{f_p}{k_1}, \quad d_2 = h_2 - p_{z2} = \frac{f_p}{k_2} \quad (2.2)$$

이 식의 p_{zi} 는 탐침 끝이 표면 P_i 안에 있을 때의 z 축에서의 위치이다. 사용자가 P_1 에서 P_2 로 선을 그을 때 햅틱 장비가 사용자에게 전달되는 높이의 차이 p_z 는 2.2 식을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta p_z = p_{z2} - p_{z1} = h_2 - h_1 - f_p \left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1} \right) \quad (2.3)$$

이 식을 두 개의 항을 갖는 식으로 다시 표현하면 다음의 식을 얻는다.

$$\Delta p_z = \Delta h + \Delta h_d. \quad (2.4)$$

여기서 Δh_d 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta h_d = -f_p \left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1} \right). \quad (2.5)$$

식 2.4의 첫 번째 항($\Delta h = h_2 - h_1$)은 두 표면이 갖고 있는 원래의 높이 차이를 의미하고 두 번째 항(Δh_d)은 표면의 강도가 일정하지 않을 때 사용자에게 전달되는 높이를 왜곡시키는 역할을 한다. 다음은 강도의 배치에 따라 사용자에게 전달하는 높이 차이 Δp_z 에 미치는 영향을 보인다.

1. $k_1 = k_2: \Delta h_d = 0 \Rightarrow \Delta p_z = \Delta h$. 대부분의 햅틱 렌더링 알고리즘은 이처럼 강도가 일정한 환경을 가정하고 고안되었다. 이 경우의 탐침 끝은 가상 벽이 가진 지형에 평행하게 움직이게 된다.



2. $k_1 > k_2: \Delta h_d < 0 \Rightarrow \Delta p_z < \Delta h$. 이 경우에는 원래의 높이 차이보다 전달되는 높이의 차이가 더 작다. **Halo-Mica** 데이터는 P_1 이 보다 P_2 보다 낮은 환경의 경우에 해당한다. 특히 $|\Delta h_d| > |\Delta h|$ 이면 높은 표면인 P_2 가 낮은 표면인 P_1 보다 낮게 전달된다.

3. $k_1 < k_2: \Delta h_d > 0 \Rightarrow \Delta p_z > \Delta h$. 이 경우에는 원래의 높이 차이 보다 더 크게 높이의 차이가 전달된다.



제 3 장

지형 보상 알고리즘의 기본 개념

촉감을 사용하여 인지할 수 있는 물체의 속성 정보를 얻기 위해 사람이 사용하는 손의 움직임을 탐구 과정(**Exploratory Procedure**)이라고 한다[11]. 예를 들면 물체의 모양을 알기 위해서는 손으로 감싸거나 물체의 외곽선을 따라 움직이고, 표면의 모양과 재질을 느끼기 위해서는 표면에 측면으로 움직이며 선을 긋고, 표면의 강도를 알기 위해서는 표면을 눌렀다가 떼었다가 하거나 톡톡 치고, 물체의 신축성을 보기 위해서는 양쪽을 잡아 늘였다가 놓는 것을 말한다.

본 장에서 제안하는 지형 보상 알고리즘(**Topography Compensation Algorithm**)은 하나의 변화 구간(1 장 참조)에 대해 한 번만 선을 긋는(**One-time Stroking**) 탐구 과정에 대해서 물체가 가진 지형과 속성을 올바르게 사용자에게 전달하는 것을 목표로 설계되었다. 다수의 변화 구간과 다양한 탐구 과정에 대한 표면 보상 알고리즘은 5 장에서 소개한다.

1 절에서는 기본 지형 보상 알고리즘을 유도하는 과정을 설명하고 2 절에서는 정신물리학적 실험을 통해 지형 보상 알고리즘과 페널티 기반 알고리즘을 비교하여 제안하는 알고리즘의 성능을 분석한다.



제 1 절 기본 개념

강도가 변하는 표면에서 발생하는 높이 왜곡을 해결하기 위하여 매 햅틱 갱신 주기마다 왜곡된 높이 Δh_d (식 2.5)를 제거하는 방법을 사용한다.

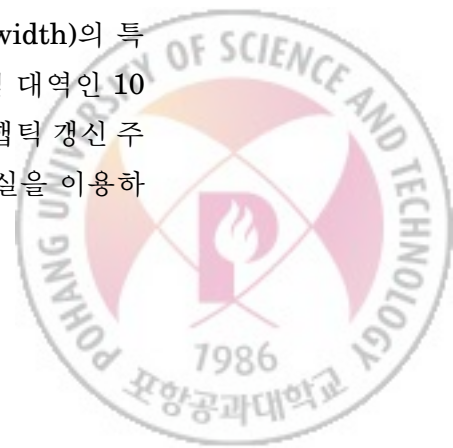
시간에 대한 햅틱 인터페이스 장비의 탐침 끝의 위치는 $\Delta p(t) = (p_x(t), p_y(t), p_z(t))$ 로 표시하고, xy 평면에서의 위치 (x, y) 에 대하여 높이는 $h(x, y)$, 강도는 $k(x, y)$ 이다. 탐침 끝이 위치하는 곳의 높이와 강도는 간단히 $h(t) = h(p_x(t), p_y(t))$, $k(t) = k(p_x(t), p_y(t))$ 로 표시한다. 왜곡되는 높이 Δh_d 를 보상해 주는 높이를 Δh_c 라 하고 식 2.4에 Δh 대신 $\Delta h + \Delta h_c$ 를 이용하여 사용자에게 전달할 힘을 계산하면 다음의 식이 구해진다.

$$\Delta p_z(n) = \Delta h(n) + [\Delta h_c(n) + \Delta h_d(n)] . \quad (3.1)$$

$t = n\Delta T$ 에서 ΔT 는 햅틱 갱신 주기이고 n 은 n 번째 햅틱 갱신 루프를 가리키는 불연속 시간 인덱스이다. 이 식에서 보이듯이 매번 햅틱 갱신을 할 때에 $\Delta h_c(n) = -\Delta h_d(n)$ 의 조건을 만족하면 사용자에게 전달되는 높이의 차이 Δp_z 는 원래의 높이 Δh 의 차이와 같게 된다.

지형 보상 알고리즘의 가장 중요한 부분은 왜곡된 높이를 계산하는 부분이다. 강도가 일정한 표면에서는 왜곡이 없지만 그렇지 않은 표면에서는 왜곡이 생기며 이 높이를 알기 위해선 식 2.5에서 보이듯이 사용자가 가하는 접촉 힘을 알아야 한다. 힘 센서(Force Sensor)를 이용하면 정확하게 사용자의 접촉 힘을 알 수 있지만 임피던스(Impedance) 타입의 햅틱 디바이스인 경우처럼 힘을 감지하는 환경이 항상 주어지는 것은 아니기 때문에 본 논문에서는 힘 센서 대신에 사람의 운동 특성(Human Motor Characteristic)을 이용하여 힘을 예상하기로 하였다.

첫째로 힘 유지 이론을 이용한다. 사람이 표면에 선 곳을 하는 동안 일정한 접촉 힘을 유지하므로 사람이 주는 힘과 햅틱 인터페이스 장비가 사람에게 주는 힘은 같을 것이라고 가정한다. 이 가정을 통하여 렌더링 알고리즘에서 계산한 값을 사용자가 가한 힘으로 간주한다. 둘째로 사람의 움직임 대역(Motion Bandwidth)의 특징을 이용한다. 햅틱 갱신 주기는 보통 1 kHz 정도로 사람 손의 움직임 대역인 10 Hz 미만보다 훨씬 빠르기 때문에 사용자가 가하는 접촉 힘은 일반적인 햅틱 갱신 주기(1 ms) 내에 갑자기 변하기 힘들다는 것을 알 수 있다. 이 두 가지 사실을 이용하



여 시간 인덱스 n 일 때 사용자가 가하는 힘 $\hat{f}_p(n)$ 을 다음과 같이 예상할 수 있다.

$$\hat{f}_p(n) = f_z(n-1). \quad (3.2)$$

여기서 $f_z(n-1)$ 는 이전 갱신에서 햅틱 렌더링 알고리즘이 계산한 z 축 방향으로의 힘의 크기이다. 이 힘을 이용하여 한 번의 햅틱 갱신 주기 ΔT 동안 왜곡되는 높이 $h_d(n)$ 를 다음과 같이 어림할 수 있다.

$$\Delta \hat{h}_d(n) = -f_z(n-1) \left(\frac{1}{k(n)} - \frac{1}{k(n-1)} \right). \quad (3.3)$$

사용자에게 전달되는 높이의 차이를 원래의 표면 높이의 차이와 같게 하기 위한 조건은 $\Delta h_c(n) = -\Delta h_d(n)$ 이며 이 식을 이용하여 n 번째 햅틱 루프에서 사용자에게 전달해야 할 보상된 높이 $h_c(n)$ 은 다음과 같이 구한다.

$$h_c(n) = h_c(n-1) + \Delta h(n) + \Delta h_c(n). \quad (3.4)$$

보상된 높이는 이전에 보상된 높이에 원래 표면의 높이 차이만큼을 더해주고 직전의 햅틱 갱신 주기 동안 왜곡된 높이를 보상하여 구한다. 이 식은 $h_c(n)$ 에 대한 점화식이므로 일반항을 구하면 다음과 같다.

$$h_c(n) = h(n) + \sum_{i=1}^n \Delta h_c(n). \quad (3.5)$$

매 햅틱 갱신 때마다 $t = 1..n$ 까지 더하는 과정을 피하기 위하여 위 식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$h_c(n) = h(n) + S_h(n). \quad (3.6)$$

위 식의 $S_h(n)$ 는 누적 보상 높이이며 다음과 같이 표현된다.

$$S_h(n) = S_h(n-1) + \Delta h_c(n). \quad (3.7)$$

$S_h(n)$ 은 첫 번째 햅틱 갱신 때부터 n 번째 갱신 때까지의 보상 높이를 더한 값이다. 이 식을 사용하면 보상된 높이를 구하기 위하여 매 햅틱 주기 당 두 번의 덧셈만 하면 되므로 식 3.5을 바로 쓰는 것보다 효율적이다. 마지막으로 n 번째 갱신 때 사



용자에게 z 축 방향으로 전달할 힘 $f_z(n)$ 은 보상된 높이에서 탐침 끝의 위치를 뺀 관통 깊이(Penetration Depth)와 강도의 곱으로 계산되며 다음의 식으로 표현된다.

$$f_z(n) = k(n) (h_c(n) - p_z(n)) . \quad (3.8)$$

지금까지 살펴본 알고리즘을 지형 보상 알고리즘(Topography Compensation Algorithm)이라 하고 햅틱 갱신 시에 사용되는 식을 요약 정리하면 다음의 세 단계로 표현된다

(1) 보상할 높이 차 구하기

$$\Delta h_c(n) = \begin{cases} 0 & \text{if } k(n) = k(n-1) \\ f_z(n-1) \left(\frac{1}{k(n)} - \frac{1}{k(n-1)} \right) & \text{if } k(n) \neq k(n-1) \end{cases} .$$

(2) 보상된 높이 구하기

$$S_h(n) = S_h(n-1) + \Delta h_c(n) .$$

$$h_c(n) = h(n) + S_h(n) .$$

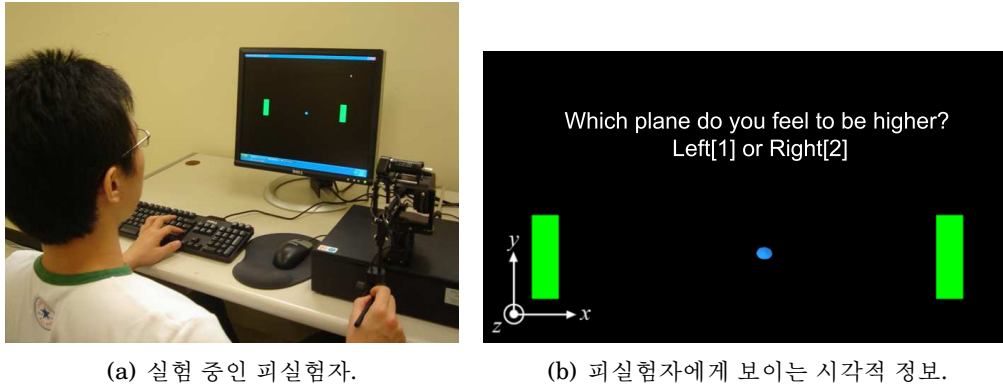
(3) 사용자에게 전달할 힘 계산하기

$$f_z(n) = k(n) (h_c(n) - p_z(n)) .$$

제 2 절 실험: 지형 보상 알고리즘의 성능

앞 절에서 제안한 지형 보상 알고리즘이 가상 물체의 변화 구간 부분을 사용자에게 왜곡 없이 전달하는지를 검증하기 위하여 정신 물리학적 실험을 통해 기존의 페널티 기반 알고리즘과 비교 분석하였다. 사용자에게 주어진 임무는 사용자 앞에 주어진 두 개의 가상의 벽에 왼쪽에서 오른쪽으로 선을 그은 후 왼쪽과 오른쪽 벽중 어느 벽이 상대적으로 높은지를 대답하는 것이었다. 이에 대한 결과는 사람의 인지적 인(Recognition) 차원에서 높이 인식을 제대로 하는지에 대한 지침을 제공한다. 인지적 차원이 아닌 지각적(Perception) 차원에서 사람에게 전달되는 높이를 보기 위하여 실험 중에는 탐침 끝의 위치 정보를 기록하였고 이를 바탕으로 사용자에게 전달하는 표면의 모양과 원래 의도된 표면의 모양이 비슷한지를 살펴보았다.





(a) 실험 중인 피실험자.

(b) 피실험자에게 보이는 시각적 정보.

그림 3.1 실험의 환경 구성.

2.1 방법

실험의 설계 및 분석을 위한 방법과 기준에 대하여 설명한다.

2.1.1 장비

가상 환경의 정보를 사용자에게 전달하는 햅틱 인터페이스 장비로 그림 3.1(a)에 나타난 센서블(Sensable)사의 팬텀 프리미엄 1.0A (PHANToM Premium 1.0A) 모델을 사용하였다.

2.1.2 피실험자

총 8명(S1-S8)의 피실험자들이 참여하였다. S2와 S7은 여성이고 나머지는 모두 남성이었으며 모두 오른손잡이였으며 실험을 하는 동안 모두 오른손을 사용하였다. S1, S6, S8은 햅틱 인터페이스 장비를 자주 다루는 편이었고, S5는 10 번 정도 사용을 해 본 경험이 있었으며 다른 피실험자 (S2, S3, S4, S7)는 이 실험에 참가하기 전까지 햅틱 인터페이스 장비를 사용해 본 적이 없었다고 대답하였다. 피실험자들의 나이는 만 20세부터 만 24세까지 있었고 평균 연령은 만 21.9세였다. 손이나 팔과 관련된 질환이 있는 사람은 아무도 없었다.



2.1.3 자극

피실험자들은 햅틱 인터페이스 장비를 통하여 정면에 놓여진 두 평면에 선을 긋는다. 이때, 두 평면은 서로 다른 깊이와 강도를 갖는데 이를 부드럽게 이어주기 위하여 해닝 윈도우(Hanning Windows)를 사용하는데 이는 속성의 갑작스러운 변화로 인하여 발생할 수 있는 햅틱 인터페이스 장비로부터 불안정한 힘이 렌더링 되지 않도록 한다. 해닝 윈도우는 사인 함수(Sine Function)를 이용한 함수이며 이를 사용하여 탐침 끝의 위치에 따른 두 표면의 깊이와 강도를 다음과 같이 정의한다[10].

$$h(p_x) = \begin{cases} h_1, & \text{if } p_x < -\frac{W}{2} \\ \frac{1}{2} \left[(h_2 - h_1) \sin \frac{\pi p_x}{W} + h_1 + h_2 \right], & \text{if } -\frac{W}{2} \leq p_x \leq \frac{W}{2} \\ h_2, & \text{if } p_x > \frac{W}{2} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$k(p_x) = \begin{cases} k_1, & \text{if } p_x < -\frac{W}{2} \\ \frac{1}{2} \left[(k_2 - k_1) \sin \frac{\pi p_x}{W} + k_1 + k_2 \right], & \text{if } -\frac{W}{2} \leq p_x \leq \frac{W}{2} \\ k_2, & \text{if } p_x > \frac{W}{2} \end{cases} \quad (3.10)$$

본 실험에서 사용되는 모든 표면 모델에 대하여 안정된 힘을 렌더링하기 위하여 두 표면을 이어주는 표면의 높이가 변하는 부분의 폭 W 를 4 mm로 정하였다. 실험을 하는 동안 상하로 움직이는 것을 막아 xz 평면에서만 움직임이 가능하도록 하였다. 햅틱 렌더링의 갱신 주기는 모든 실험에서 항상 1 kHz로 고정되었다. 실험을 하는 동안 손으로 전달받는 자극에 대한 인지 능력만을 보기 위하여 표면의 높이가 변하는 부분을 포함한 가상의 벽은 화면으로 보여주지 않는다. 그림 3.1(b)은 실험할 때 보이는 화면의 모습을 나타내는데 왼쪽과 오른쪽에 있는 두 개의 녹색 박스는 선 긋기의 시작과 끝을 알리는 역할을 한다. 하늘색 원뿔모양의 객체는 햅틱 탐침 끝의 위치를 나타내며 피실험자에게 손의 공간적인 위치 정보를 제공한다. 그림에 있는 문구는 선 긋기가 끝난 후 피실험자의 대답이 필요할 때만 화면에 나타난다. 또한 깊이 정보가 시각적인 단서가 되는 것을 막기 위하여 직각 투영법(Orthogonal Projection)을 사용하여 화면을 렌더링 하였다.

2.1.4 실험 조건

각 실험 조건에 해당하는 변수들의 값을 표 3.1에서 정리하였다. 낮고 단단한 표면



표 3.1 실험에 사용된 표면 모델

표면 모델	k_1 (N/mm)	k_2 (N/mm)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	Δh (mm)	$\Delta \hat{p}_z$ (mm)			
						$f_p=0.5$	$f_p=1.0$	$f_p=2.0$	$f_p=3.0$ (N)
M1	0.6	0.3	-1.5	1.5	3.0	2.17	1.33	-0.33	-2.00
M2	0.9	0.3	-1.5	1.5	3.0	1.89	0.78	-1.44	-3.67
M3	0.9	0.6	-1.5	1.5	3.0	2.72	2.44	1.89	1.33

을 P_1 , 높고 무른 표면을 P_2 로 정하였다. 모든 실험 조건에서 변화 구간의 높이 차이는 3 mm로 고정되어 있고, 두 벽이 갖는 강도의 쌍이 세 개가 존재하여 서로 다른 표면 모델(M1-M3)을 결정한다. 표 3.1에는 페널티 기반 알고리즘이 사용된 환경에서 사용자가 표면에 대하여 0.5–3.0 N의 접촉 힘을 유지할 때 예상되는 사용자에게 전달하는 높이 차이 $\Delta \hat{p}_z$ 가 계산되어 있다. 이 힘의 범위는 연구 [10]에서 피실험자들이 가한 접촉 힘의 범위 0.87–2.23 N을 포함하도록 결정되었다.

실험은 표면 모델들이 갖는 서로 다른 강도의 쌍이 서로 다른 수준의 높이 왜곡을 나타내도록 설계 되었다. 동일한 강도를 지닌 서로 다른 높이의 두 표면에 대하여 선 굵기를 하였을 때 사람이 인지할 수 있는 높이의 차이는 0.67 mm [10]임을 염두하여 표 3.1에 있는 $\Delta \hat{p}_z$ 를 살펴보자. 만약 페널티 기반 알고리즘이 사용된 환경에서 사용자가 표면 모델 M3에서 0.5 N의 힘으로 접촉 힘을 유지하였다면 3.0 mm가 아닌 2.72 mm가 렌더링 될 것이고 임계값 0.67 mm 보다는 크므로 사람은 두 표면의 상대적인 높이를 인지할 것이다. 만약 표면 모델 M1에서 2.0 N의 접촉힘을 유지하였다면 -0.33 mm가 렌더링 될 것이며 임계값 보다 작기 때문에 사람은 높이 차이를 인지하지 못할 것이다. 만약 표면 모델 M2에서 3.0 N의 접촉힘을 유지하였다면 -3.67 mm가 렌더링 되어 높은 표면이 낮게 인지될 것이다. 전체적으로 $\Delta \hat{p}_z$ 값을 살펴보면 M3가 의도된 표면의 높이에 가장 가깝게 렌더링이 될 것이고, M2는 가장 왜곡이 심할 것임을 알 수 있다.

지형 보상 알고리즘은 표면의 강도를 반영하여 표면 높이를 보상하므로 모든 조건에 대하여 원래의 높이 차이를 전달할 것으로 기대되며($\Delta p_z = \Delta h$), 이는 실험을 하는 동안 탐침 끝의 궤적을 기록해 두어 확인이 가능하도록 하였다.



2.1.5 실험 진행

1-간격 2-대안 강제 선택 방법(1-interval 2-alternative forced-choice paradigm)을 사용하여 피실험자의 서로 다른 두 표면의 높이 차이에 대한 인지 능력을 측정하였다. 실험의 각 시도(Trial, 본 논문에서는 한 번의 선 긋기에 해당함) 때에 P_1 은 무작위로 왼쪽(이 경우 P_2 는 오른쪽) 또는 오른쪽(P_2 는 왼쪽)에 배치되었으며 본 실험에서는 이를 $P_1 \rightarrow P_2$, $P_2 \rightarrow P_1$ 으로 표기한다. 피실험자들은 앞에 있는 가상의 벽을 왼쪽에서 오른쪽으로 선을 한 번 긋고 왼쪽과 오른쪽 벽들 중 어느 벽이 자신과 더 가까이 있는지를 키보드를 사용하여 대답하였다. 각 피실험자는 하나의 조건에 대하여 100 번의 선 긋기를 하였다. 페널티 기반 알고리즘과 지형 보상 알고리즘에 대해 각각 세 개의 표면 모델을 렌더링하였으므로 총 $2 \times 3 \times 100 = 600$ 번의 선 긋기를 하였다. 피실험자의 학습 효과(Leaning Effect)를 줄이기 위하여 다이어그램-균형 라틴 정사각형(Diagram Balanced Latin Square)을 사용하여 조건의 순서를 정하였다. 실험이 진행되는 동안 피실험자의 대답에 대한 정답 여부는 알려주지 않았다.

그림 3.1(b)에서 왼쪽에 위치한 녹색 박스를 햅틱 인터페이스 탐침 끝으로 접촉하면 빨간색으로 변하며 실험의 한 시도가 시작되며 사용자의 정면에 수직으로 된 두 개의 벽이 생성된다. 사용자는 왼쪽에서부터 오른쪽으로 선 긋기를 진행하며 오른쪽 녹색 박스에 접촉하는 순간 빨간색으로 되며 시도가 끝나게 되고 탐침 끝은 사용자의 대답이 있을 때까지 녹색 박스에 접촉한 지점에 고정된다. 오른쪽 박스에서 접촉을 떼면 왼쪽과 오른쪽 박스가 모두 녹색으로 변하며 “어느 쪽 표면이 더 높게 느껴지는가? 왼쪽[1], 오른쪽[2]” 이라는 문구가 뜨며 사용자의 대답을 기다리게 되고 사용자가 키보드로 대답을 입력하면 실험은 처음의 상태로 초기화된다. 가상의 벽에 선을 긋는 동안 탐침 끝의 위치와 렌더링 알고리즘에 의하여 계산된 힘을 파일에 기록하였다. 피실험자들은 훈련 과정을 제외한 모든 실험을 완료하는데 평균 1시간 정도를 소모하였다. 훈련 과정은 실험에 모든 조건을 3번씩 하는 것으로 진행되었다. 피실험자들은 보통 한 번의 세션으로 적응을 하였으며 일부 피실험자의 요구에 따라 최대 세 번의 세션을 훈련하였다.



2.1.6 실험 분석

피실험자의 각 조건에서의 반응을 이용하여 민감도 지수(Sensitivity Index) d' 를 계산하였다. 민감도 지수는 구분하는 능력의 정도를 나타내는 척도이며, 반응 왜곡(Response Bias)에 대해 독립적인 특성을 갖고 있어 실험 결과의 신뢰성이 높다 [12]. 본 실험 환경에 대해 d' 가 1보다 큰 양수이면 피실험자는 P_2 를 P_1 보다 높다고 판단했음을, 0에 가까우면 P_1 과 P_2 의 상대적인 높이 차이를 구분하지 못했음을, -1보다 작은 음수이면 P_2 가 P_1 보다 낮다고 판단했음을 의미한다.

피실험자에게 실제로 전달되는 높이를 알아보기 위하여 선을 긋는 동안 탐침 끝의 위치를 기록하였다. 한 시도에 대하여 표면의 높이가 변하는 부분의 중심을 기준으로 변화 구간이 시작되기 전의 8 mm 구간($p_x(n) \in [-10mm, -2mm]$)에서 왼쪽 표면에서의 $p_z(n)$ 들의 값을 평균하고, 변화 구간이 끝난 후의 8 mm 구간($p_x(n) \in [2mm, 10mm]$)에서 오른쪽 표면에서의 $p_z(n)$ 들의 값을 평균한 후 이들의 차이를 구하여 사용자에게 전달되는 표면의 높이 차이를 계산하였다. 이렇게 구한 각 시도에서의 높이 차이들을 평균하여 하나의 실험 조건에 대한 높이 차이를 구하였다. 이와 같이 피실험자에게 전달된 평균 높이 차이 Δp_z 를 높이 차이 구분에 대한 민감도 d' 와 비교하여 이들의 관계에 대하여 분석하였다.

피실험자에게 전달된 힘은 표면의 높이가 변하는 부분의 중심을 기준으로 좌우로 100 mm 구간, 총 200 mm 구간에 대하여 평균을 구하고, 위의 높이와 같은 방식으로 하나의 실험 조건에 대한 평균 힘을 구하였다.

2.2 결과

실험 결과는 그림 3.2에 막대 그래프로 요약되어 표현되었다. 그림 3.2(a)–3.2(a)는 각 실험 조건하에 대한 피실험자들의 민감도 지수를 표현한다. 그림 3.2(d)는 모든 실험자들의 혼동 행렬(Confusion Matrix)을 합산하여 계산한 실험 조건별 민감도 지수이다. 각 그림에서 왼편에 있는 자료는 본 논문에서 제안한 지형 보상 알고리즘이 적용된 환경에서의 민감도 지수이고 오른편에 있는 자료는 페널티 기반 알고리즘이 적용되었을 때의 결과 자료이다. 피실험자가 $P_1 \rightarrow P_2$ 와 $P_2 \rightarrow P_1$ 를 완벽하게 구분한 경우에는 d' 의 값이 ∞ 인데 이를 막대 그래프에서는 5 값으로 표현하였고 구분을 하되 서로 완전히 반대로 느낀 경우는 $-\infty$ 이며 -5 값으로 표현하였다.



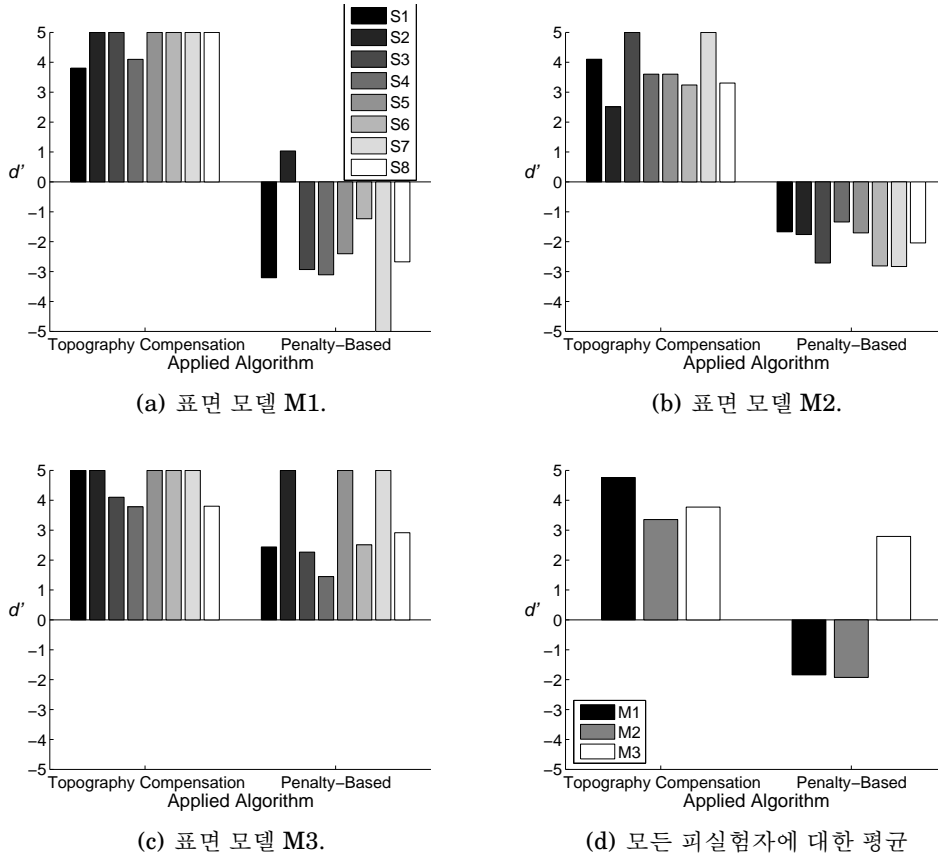
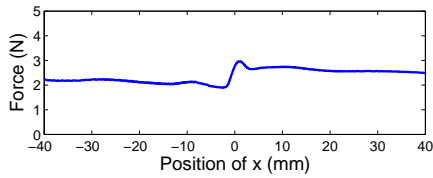
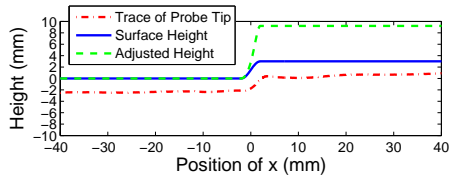


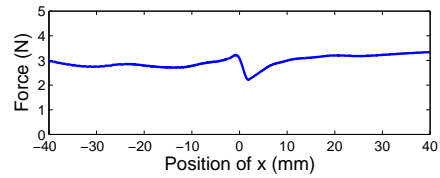
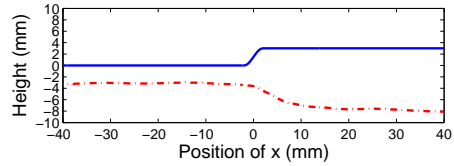
그림 3.2 실험에서 측정된 민감도 지수 d'

모든 조건하에서 제안한 지형 보상 알고리즘이 항상 1보다 큰 양수를 나타냄을 그림 3.2에서 명백히 나타냈다. 이는 피실험자들이 P_1 과 P_2 표면 사이의 강도 차이에 상관 없이 높고 무른 표면 P_2 를 낮고 단단한 표면 P_1 보다 항상 높게 인지하였음을 의미한다. 반면 페널티 기반 알고리즘은 조건에 따라 다른 결과를 나타내는 신뢰적이지 못한 특성을 보였다. 특히 표면 모델 M1과 M2에서 페널티 기반 알고리즘의 경우 민감도 지수 d' 가 1보다 작은 음수로 나타나 사용자는 표면 P_2 가 P_1 보다 낮다고 인지하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 표 3.1에서 예상한 $\Delta\hat{p}_z$ 과 일관된다. 표면 모델 M3의 경우 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘으로 렌더링 된 경우의 d' 가 모두 1보다 큰 양수를 나타내어 가상 물체의 속성을 잘 인지하는 것으로 확인

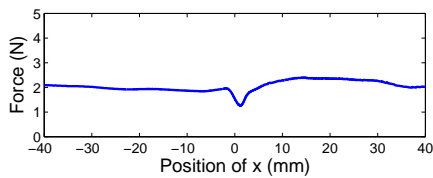
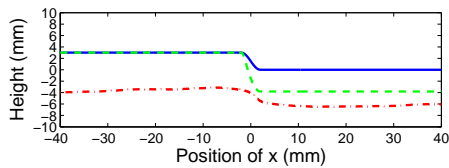




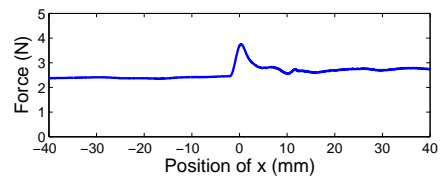
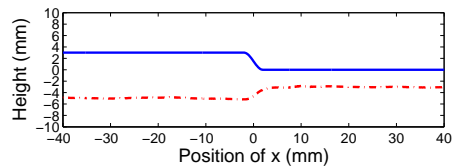
(a) 지형 보상 알고리즘, $P_1 \rightarrow P_2$.



(b) 페널티 기반 알고리즘, $P_1 \rightarrow P_2$.



(c) 지형 보상 알고리즘, $P_2 \rightarrow P_1$.



(d) 페널티 기반 알고리즘 $P_2 \rightarrow P_1$.

그림 3.3 사람의 손에 전달된 탐침 끝의 궤적과 계산된 힘

되었다. 하지만 지형 보상 알고리즘에 대한 d' 가 페널티 기반 알고리즘에 대한 d' 보다 항상 크거나 같게 나와 제안한 알고리즘이 보다 강력하다는 것을 의미하였다.

선 굵기를 하는 동안 기록한 햅틱 인터페이스 장치의 탐침 끝의 궤적과 알고리즘에 의해 계산된 힘을 그림 3.3에서 볼 수 있다. 페널티 기반 알고리즘의 경우(그림 3.3(a), 3.3(c)) 탐침 끝의 궤적은 가상 표면의 높이를 왜곡하는 현상을 보였으나 지형 보상 알고리즘(그림 3.3(c) 3.3(d))은 탐침 끝의 궤적과 가상 표면의 높이가 평행하게 나타났다. 그림 3.3(a)와 3.3(b)는 S1 사용자가 M1 표면 모델이 $P_1 \rightarrow P_2$ 일 때 왼쪽에서 오른쪽으로 선을 그은 자료를 보여준다. 각 그림의 위 부분에서 파란색 실선은 가상 표면의 정의된 높이이고 빨간색 파선은 탐침 끝의 궤적이며 녹색 점선은 지형 보상 알고리즘에 의해 보상된 표면의 높이를 나타낸다. 각 그림의 아래 부분은

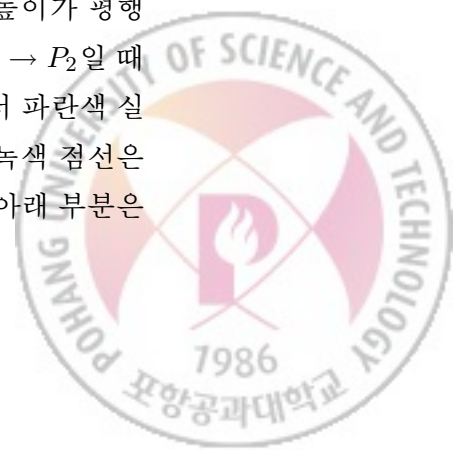


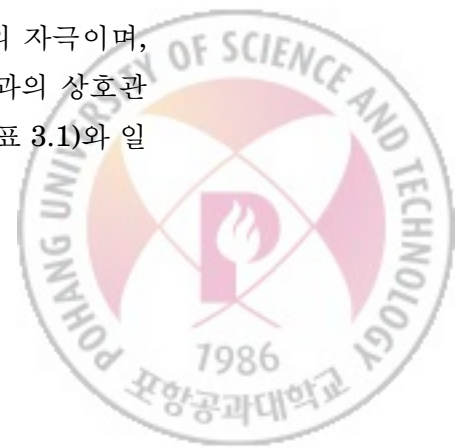
표 3.2 사용자에게 전달된 힘과 두 표면의 높이 차이 Δp_z

표면 모델	알고리즘	$P_1 \rightarrow P_2$		$P_2 \rightarrow P_1$	
		힘 (N)	Δp_z (mm)	힘 (N)	Δp_z (mm)
M1	표면 보상	2.77	2.06	1.75	-1.51
	페널티 기반	2.10	-0.73	2.67	1.45
M2	표면 보상	2.68	1.61	1.82	-1.32
	페널티 기반	2.88	-0.80	3.17	0.95
M3	표면 보상	2.61	2.00	1.79	-1.85
	페널티 기반	2.67	0.97	2.16	-1.26

알고리즘에 의해 계산된 힘을 보인다. 그림 3.3(a)에서 볼 수 있듯이 표면 보상 알고리즘은 탐침 끝의 궤적이 가상 표면의 높이와 평행하도록 렌더링하여 사용자에게 올바른 정보를 제공하였다. 그러나 그림 3.3(b)의 페널티 기반 알고리즘은 탐침 끝의 궤적이 가상 물체의 높이와 반대가 되도록 렌더링하여 사용자에게 왜곡된 정보를 제공하였다. 그림 3.3(c)과 3.3(d)는 피실험자가 $P_2 \rightarrow P_1$ 환경에서 왼쪽에서 오른쪽으로 선을 그었을 때의 자료이며 $P_1 \rightarrow P_2$ 인 경우와 비슷한 결과를 확인할 수 있다.

표 3.2은 2.1.6과에서 설명한 방법으로 평균 힘과 평균 전달 높이를 구한 후 각 조건에 대하여 피실험자들의 평균 힘과 평균 전달 높이를 다시 평균 한 결과를 정리하였다. $P_1 \rightarrow P_2$ 인 경우에는 Δh 가 3.0 mm이고 $P_2 \rightarrow P_1$ 인 경우에는 Δh 가 -3.0 mm이다. 페널티 기반 알고리즘이 렌더링 된 환경에서 조건 M1과 M2의 경우 Δh 가 3.0 mm일 때 음수, -3.0 mm일 때 양수를 기록하여 의도된 높이 차이와 반대되는 결과를 보였다. 지형 보상 알고리즘의 경우에는 3.0 mm일 때 양수, -3.0 mm일 때 음수가 나와 가상 모델과 일관된 정보를 전달하였음을 알 수 있다. 조건 M3의 경우 두 알고리즘 모두 가상 모델의 속성과 일관된 높이 변화를 보였지만 지형 보상 알고리즘이 원래 의도된 높이인 ± 3.0 mm에 가까웠다.

표에 나타난 피실험자에게 전달된 힘과 높이 차이는 지각적인 차원의 자극이며, 이를 인지하여 나타난 결과가 d' 이므로 표 3.2과 그림 3.2에 나타난 결과의 상호관련성은 타당하다. 이 모든 결과는 힘유지 이론에 기반하여 예상한 결과(표 3.1)와 일치하여 힘유지 이론의 타당성을 재입증한다.



지형 보상 알고리즘의 경우 각 조건에서 $\pm 3.0 \text{ mm}$ 에 미치지 못하였다. 지형 보상 알고리즘이 위치 정보를 입력으로 받아 힘을 출력으로 하는 임피던스 타입의 햅틱 인터페이스 장치를 목적으로 개발된 알고리즘이므로 정확한 위치 제어를 하지 못하기 때문이다. 그러나 이는 표면 보상 알고리즘 자체의 문제라기 보다는 임피던스 타입의 햅틱 인터페이스 장치의 한계로 보아야 한다. 실제로 같은 강도와 서로 다른 높이를 갖는 표면에 대하여 선긋기 실험을 하고 평균 높이 차이를 구해 보아도 가상 물체의 원래 높이보다 작은 값이 나타났다. 이는 사람이 가상의 벽에 손을 그을 때 표면의 모양을 바로 따라가지 못하고 손 뿐만 아니라 팔 전체가 움직여야 하므로 사람의 팔 운동에 대한 역학이 영향을 미친 것으로 풀이된다.



제 4 장

표면의 법선을 고려한 지형 보상 알고리즘

앞 장에서는 변화 구간 부분에서 힘의 방향이 근처의 표면과 동일한 경우를 고찰하였는데 이는 탐침 끝의 움직임이 제공하는 운동 단서(Kinesthetic Cue)만의 효과를 보기 위한 것이었다. 본 장에서는 힘의 방향을 가상 표면의 지형을 고려하여 변화시킬 때 기존의 페널티 기반 알고리즘이 갖는 문제점을 지적하고 지형 보상 알고리즘과 비교 분석한다. 또한 지형의 법선에 따른 힘의 방향 변화가 표면의 높이 차이를 인식하는데 어떤 영향을 미치는지를 실험을 통해 알아본다.

본 논문에서 가상 표면은 암시적 모델(Implicit Model)로 정의되었으며 기울기에 기반하여 표면 접촉 점을 찾는 방법을 사용하였다 [13].

표면의 법선을 고려한 지형 보상 알고리즘을 정리하기 위하여 다음의 몇가지 표현을 정의한다. HIP는 햅틱 인터페이스 점(Haptic Interface Point), SCP는 표면 접촉 점(Surface Contact Point), CSP는 지형 보상 알고리즘에 의해 보상된 표면 점(Compensated Surface Point)을 의미하며 $HIP(n) = HIP(x(n), y(n), z(n))$, $SCP(n) = SCP(x(n), y(n), z(n))$, $CSP(n) = CSP(x(n), y(n), z(n))$ 이다. 그림 4.1는 변화 구간에 대하여 선을 그었을 때 각 점의 위치에 대한 한 예를 나타낸다.



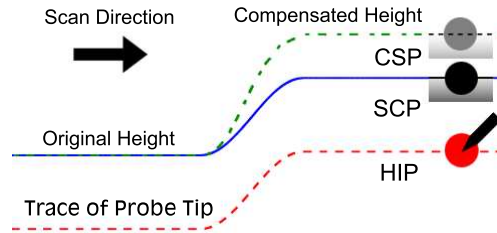


그림 4.1 HIP와 SCP와 CSP.

(1) 보상할 높이 구하기

$$\Delta h_c(n) = \begin{cases} 0 & \text{if } k(n) = k(n-1) \\ f_z(n-1) \left(\frac{1}{k(n)} - \frac{1}{k(n-1)} \right) & \text{if } k(n) \neq k(n-1) \end{cases} .$$

(2) 보상된 위치 구하기

$$S_h(n) = S_h(n-1) + \Delta h_c(n) .$$

$$CSP(n) = SCP(n) + S_h(n) \frac{\overrightarrow{SCP(n) - HIP(n)}}{\|SCP(n) - HIP(n)\|} . \quad (4.1)$$

(3) 사용자에게 전달할 힘 계산하기

$$f(n) = k(n) (CSP(n) - HIP(n)) . \quad (4.2)$$

높이를 보상하는 방향이 표면의 법선 방향이 아닌 이유는 표면의 법선 방향으로 보상할 경우 보상되는 위치의 궤적이 조밀한 부분과 듚성듬성한 부분이 관통 벡터(Penetration Vector, $\overrightarrow{SCP(n) - HIP(n)}$)의 방향으로 할 때보다 그 정도가 심해져 불연속적인 위차가 렌더링될 수 있기 때문이다.

제 1 절 표면 법선 렌더링의 영향

3 장에서는 운동 단서만이 제공되었을 때의 사람의 인지능력을 분석하기 위하여 힘의 방향이 고정되고 힘의 세기만 변하는 환경을 관찰하였다. 그러나 지형의 법선에 따라 힘의 방향이 바뀌는 것은 현실에서는 자연적이고 필연적인 현상이므로 본 절



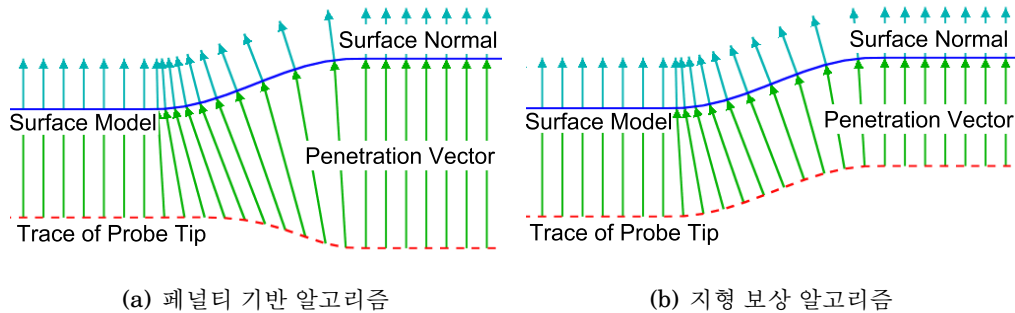


그림 4.2 표면의 높이가 변하는 부분 근처에서 렌더링 되는 힘의 방향

에서는 이러한 감각 단서가 사람이 햅틱적 경계를 인지하는데 미치는 영향을 살펴본다.

먼저 강도가 일정한 환경에서 사람의 손이 움직이는 방향과 손에 전달되는 힘의 방향의 관계를 살펴보자. 3 장의 그림 2.1에서 표면의 강도가 일정하다고 가정하면 사람이 왼쪽에서 오른쪽으로 선을 그으면 사람 손의 위치는 사람에게 가까운 방향으로 이동할 것이다. 이 때 표면의 높이가 변하는 부분에서의 힘의 방향은 x 축에 대하여 투영시키면 오른쪽에서 왼쪽을 향하게 되는데, 이는 사람 손의 운동 방향과 반대가 되므로 움직임을 방해하는 역할을 하고, 경사가 급한 경우 손과 충돌하여 손의 움직임을 멈추게 한다. 사람이 오른쪽에서 왼쪽으로 선을 그으면 사람 손의 위치는 사람에게 먼 방향으로 이동하고, 힘의 방향은 사람 손의 운동 방향과 같아 움직임을 가속하는 역할을 한다.

그림 4.2는 일정한 강도를 갖는 두 평면에 대해 일정한 힘으로 선을 그었을 때의 탐침 끝의 위치, 힘의 방향, 표면의 법선을 시뮬레이션(Simulation)한 결과를 나타낸다. 파란 실선은 가상 표면 모델이고 이 선의 아래쪽은 물체의 내부이다. 빨간 점선은 탐침 끝의 궤적이고 파란 실선과 빨간 점선 이에 있는 녹색의 가느다란 실선은 렌더링 되는 힘의 방향이다. 표면 모델의 위에 있는 하늘색 가는 실선은 표면의 법선을 나타낸다. 시뮬레이션 환경은 햅틱적 경계의 폭이 4 mm, 높이가 1 mm였고, 왼쪽이 0.7, 오른쪽이 0.4 N/mm의 강도를 갖는 표면 구성이었다. 시뮬레이션을 하는 동안 사람의 힘은 1.5 N으로 일정하다고 가정하였다.



그림 4.2(a)은 페널티 기반 알고리즘을 사용하여 계산한 결과를 보여준다. 표면의 높이는 앞 장에서 살펴본 바와 같이 역전이 되었고, 힘의 방향은 표면의 법선과 일관되었다. 이러한 환경에서 사람이 왼쪽에서 오른쪽으로 선을 그으면 손의 위치는 내려가는데 표면으로부터 사용자에게 전달되는 힘은 움직임을 방해한다. 또한 오른쪽에서 왼쪽으로 선을 그으면 손의 위치는 올라가는데 힘의 방향은 움직임을 도와 가속을 시킨다. 힘의 방향은 표면의 모양과 일관되기 때문에 사용자에게 올바른 정보를 제공하지만 손의 움직임은 표면의 모양과 반대되기 때문에 정보를 왜곡시키는 것이다. 이는 앞에서 그림 2.1을 들어 설명한 표면의 강도가 일정한 가상 환경이나, 또는 현실에서도 일어나지 않는 현상이다.

이와 같은 손의 움직임과(운동 단서) 손에 전달되는 힘의 방향(측면 힘 단서)의 비일관성은 사용자가 가상 환경을 인지하는 것을 애매모호하게 만들 수 있다. 또한 사용자가 가하는 접촉 힘이 매 시도마다 같지 않으므로 힘이 약할 때는 역전 현상이 일어나지 않아 두 단서가 일관될 것이고, 힘이 센 경우에는 두 단서가 비일관되기 때문에 사용자는 시도 때마다 다른 정보를 전달받을 수 있다는 단점이 있다. 더욱이 사람마다 가하는 접촉힘 또한 같지 않기 때문에 결국 사람마다, 사람이 시도하는 시기마다 같은 표면의 모양을 다르게 인지할 수 있는 것이다. 이는 햅틱 렌더링이 지양해야 할 요소임이 명백하다.

본 논문에서 제안하는 지형 보상 알고리즘은 페널티 기반 알고리즘과 달리 표면의 모양을 가상의 표면 모양과 일관되게 렌더링하므로 시뮬레이션 결과 그림 4.2(b)이 나왔으며, 표면이 일정한 경우와 같이 일관된 두 단서를 제공할 것임을 알 수 있다.

제 2 절 실험: 표면 법선 렌더링의 영향

본 절에서의 실험은 두 가지의 차이점을 살펴 본다. 첫째, 표면의 법선 방향으로 힘을 변화하여 측면 힘 단서가 제공된 환경과 힘이 고정된 환경에서 같은 알고리즘이 사용되었을 때의 차이를 비교하여 표면 법선 렌더링의 효과를 분석한다. 둘째로 표면의 법선 방향이 고려된 페널티 기반 알고리즘이 렌더링 되었을 때 앞 절에서 지적한 단서들의 비일관성이 높이 차이 인지에 미치는 영향을 알아본다.



2.1 방법

실험 방법은 3.2 절에서와 비슷하며 공통된 부분에 대해서는 간략히 설명한다.

2.1.1 사용 장비

3.2 절과 같이 센서블(Sensable)사의 팬텀 프리미엄 1.0A (PHANTOM Premium 1.0A) 모델을 사용하였다.

2.1.2 피실험자

총 7명의 피실험자(S1-S7)가 참여하였다. S1-S6은 남성이고 S7만 여성이었다. S1-S3는 햅틱 장치를 매우 자주 사용하는 피실험자였고, 나머지 사람은 햅틱 장치를 처음 사용해 보는 사람들이었다. S1은 양손잡이였고, S3과 S7은 왼손잡이였으며 다른 사람들은 모두 오른손잡이였으며 실험을 하는 동안 모두 오른손을 사용하였다. 나이는 20세부터 25세에 분포하였으며 평균 22.7세였다.

2.1.3 실험 조건

표면의 법선 방향으로 힘의 방향을 변화시키는 것이 사용자가 표면의 높이가 변하는 부분을 인식하는데 도움이 되는지를 보기 위하여 운동 단서를 최소화하는 실험 조건을 설정하였다. 3.2 절에서는 임계값(≈ 0.66 mm) [10]보다 훨씬 큰 3 mm를 사용하였고 표면의 법선을 렌더링하지 않은 환경에서도 지형 보상 알고리즘이 피실험자에게 표면의 높이가 변하는 부분을 올바르게 인지하도록 충분한 운동 단서를 제공한다的事实을 확인하였다. 따라서 표면의 높이 차이를 사람이 인지할 수 있는 임계값 근처의 값을 사용함으로써 운동 단서의 제공을 최소화하였다. 표 4.1은 임계값 근처의 높이를 선정하여 고른 표면 모델을 보인다. 이 때 앞 장에서와 마찬가지로 표면 P_1 이 단단하고 낮은 표면이고, P_2 가 무르고 높은 표면으로 정의하였다.

각 표면의 높이가 변하는 부분을 다음의 4가지 방법으로 렌더링하였다. 계산하는 힘의 방향이 일정한 페널티 기반 알고리즘(P), 법선을 고려한 페널티 기반 알고리즘(P+N), 계산하는 힘의 방향이 일정한 지형 보상 알고리즘(T), 법선을 고려한 표면 보상 알고리즘(T+N)이 실험에 사용된 환경이다. 따라서 실험 조건은 총 $3 \times 4 = 12$ (표면 모델 \times 렌더링 방법)이다.

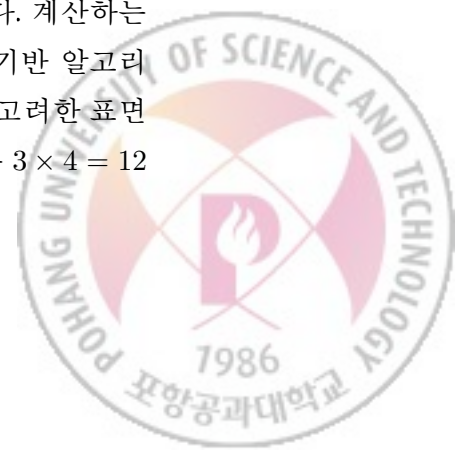


표 4.1 실험에 사용된 표면 모델.

표면 모델	$k_1(N/mm)$	$k_2(N/mm)$	$\Delta h(mm)$
M1	0.7	0.4	0.6
M2	0.7	0.4	0.8
M3	0.7	0.4	1.0

2.1.4 실험 진행

이 실험 역시 1-간격 2-대안 강제 선택 개념(1-interval 2-alternative forced-choice paradigm)을 사용하여 피실험자의 서로 다른 두 표면의 높이 차이에 대한 민감도(Sensitivity)를 측정하였다. 실험의 각 시도 때 P_1 은 무작위로 왼쪽(이 경우 P_2 는 오른쪽) 또는 오른쪽(P_2 는 왼쪽)에 배치되었으며 본 논문에서는 이를 $P_1 \rightarrow P_2$, $P_2 \rightarrow P_1$ 으로 표기한다. 피실험자들은 앞에 있는 가상의 벽을 왼쪽에서 오른쪽으로 선을 한 번 긋고 왼쪽과 오른쪽 벽들 중 어느 벽이 자신과 더 가까이 있는지를 키보드를 사용하여 대답하였다. 각 피실험자는 하나의 조건에 대하여 100 번의 선 긋기를 하였다. 실험 조건이 총 12개 이므로 1200 번의 선 긋기를 하였다.

하나의 조건을 완료하는데 짧으면 5 분 길면 15 분 정도 걸려 평균 10 분정도 걸렸다. 조건이 끝난 후 5분의 휴식시간 후에 다른 조건을 실행하였다. 각 피실험자는 하루에 6 개의 조건씩 이틀에 걸쳐 실험에 참여하였다. 실험하기에 앞서 훈련 과정을 거쳤으며 방법은 지난 장에서와 동일하다. 실험이 진행되는 동안 피실험자의 대답에 대한 정답 여부는 알려주지 않았다.

2.1.5 실험 분석

각 피실험자와 각 조건에 대하여 민감도 지수(Sensitivity Index) d' 를 계산하였다. 또한 피실험자에게 실제로 전달되는 높이를 알아보기 위하여 선을 긋는 동안 탐침 끝의 위치를 기록한 자료를 이용하였다. 피실험자들이 각 조건에서 선을 그었을 때 탐침 끝의 높이 차이의 평균은 3.2 절에서와 같은 방법으로 계산하였다.



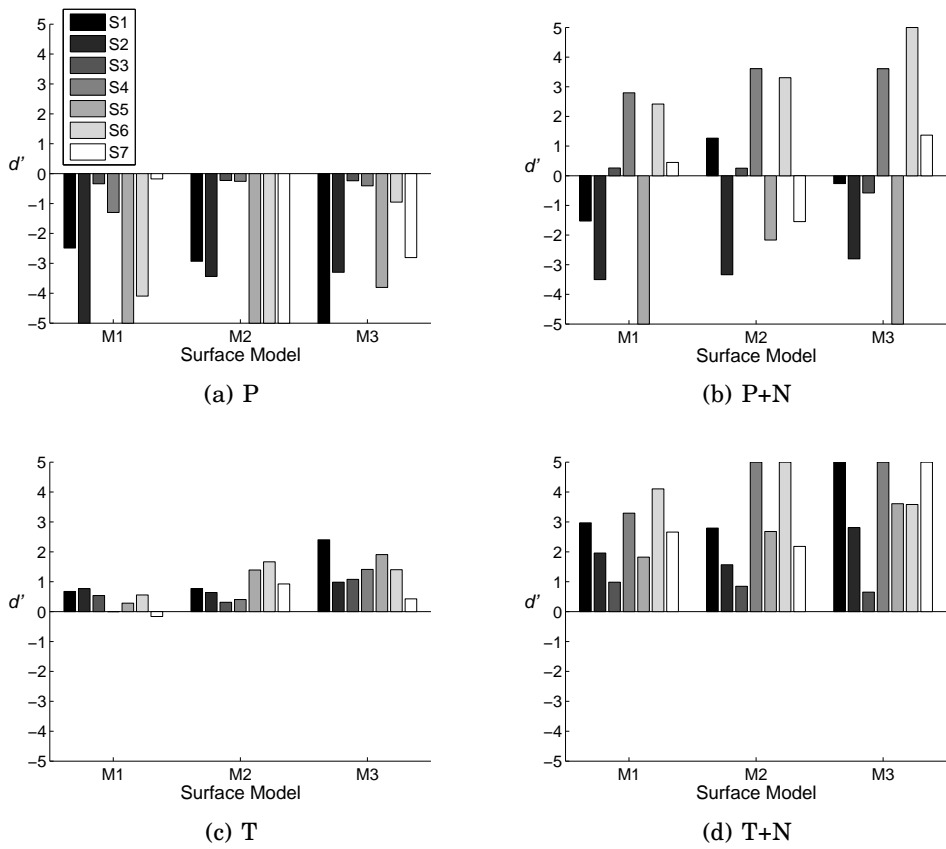


그림 4.3 각 조건에 대한 민감도 지수 d'



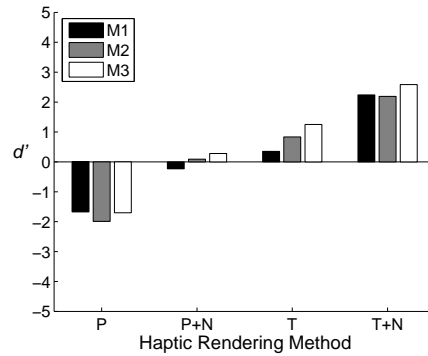
그림 4.4 각 조건에 대한 평균 민감도 지수 d' .

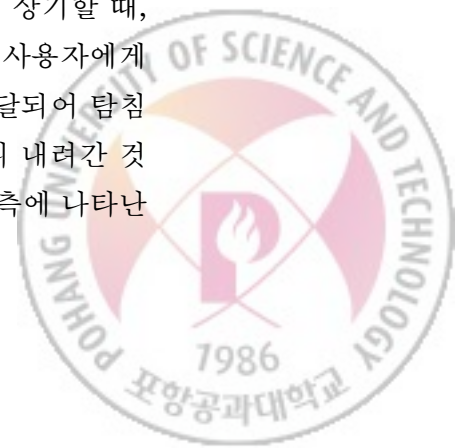
표 4.2 사용자에게 전달된 높이 차이

표면 모델	$\Delta p_z(mm)$							
	$P_1 \rightarrow P_2$				$P_2 \rightarrow P_1$			
	P	P+N	T	T+N	P	P+N	T	T+N
M1	-0.71	-0.52	0.20	0.17	0.54	0.54	-0.43	-0.38
M2	-1.03	-0.44	0.31	0.49	0.99	0.71	-0.48	-0.52
M3	-0.67	-0.21	0.35	0.59	0.74	0.51	-0.62	-0.54

2.2 결과

그림 4.3는 각 피실험자의 민감도 지수 d' 를 보여준다. 각 부분 그림 4.3(a)–4.3(d)는 각 렌더링 방법에 대하여 피실험자들의 민감도 지수를 구분하여 나타낸다. 민감도 지수가 ∞ 이면 5.0, $-\infty$ 이면 -5.0으로 잘라 나타내었다. 각 렌더링 방법에 대하여 피실험자들의 평균 민감도 지수는 그림 4.4에 나타내었다. 이때 민감도 지수는 혼동 행렬을 조건별로 모든 실험자들의 반응을 합한 다음에 구하는 방법을 이용하였다.

사용자에게 전달된 높이 차이 Δp_z 는 각 실험 조건에 대하여 $P_1 \rightarrow P_2$ 일 때와 $P_2 \rightarrow P_1$ 일 때로 나뉘어 표 4.2에 정리하였다. P_2 가 더 높은 표면임을 상기할 때, $P_1 \rightarrow P_2$ 일때 높이 차이 Δh 는 0보다 크다. 따라서 표의 좌측에 나타난 사용자에게 전달된 높이 차이 Δp_z 가 0보다 큰 것은 가상 표면의 정보가 올바르게 전달되어 탐침 끝이 올라간 것을 의미하고 음수인 것은 가상 표면의 지형 모양과 달리 내려간 것을 의미한다. $P_2 \rightarrow P_1$ 일 때의 높이 차이 Δh 는 0보다 작으므로, 표의 우측에 나타난



Δp_z 가 음수인 경우는 표면의 모양과 일관되게 움직인 것이고 양수인 경우는 왜곡된 정보가 전달된 것이다. 페널티 기반 알고리즘의 경우 모든 조건에서 지형의 모양과 반대의 값이 나왔지만 지형 보상 알고리즘은 올바른 값이 나왔음을 확인할 수 있다.

표면의 법선을 고려하여 페널티 기반 알고리즘으로 렌더링한 경우(그림 4.3(a))의 민감도 지수는 모든 피실험자가 모든 조건에서 큰 음수값 또는 0에 가까운 값을 기록하였다. 큰 음수값은 피실험자가 표면이 높아지는 경우와 낮아지는 경우를 구분을 하지만 높아지는 경우에는 낮아진다고 느끼고 낮아지는 경우엔 높아진다고 느끼는 것을 의미한다. 또, 0에 가까운 값은 사용자가 두 경우의 높이 차이가 인지하지 못한다는 것을 의미한다. 이러한 경향은 그림 4.4에서도 명백히 나타난다. 표 4.2에 이 조건에 해당하는 전달되는 높이 Δp_z 를 보면 가상 표면의 높이 차이 Δh 와 반대되는 부호를 가지는 것을 확인할 수 있으며 이는 민감도 지수가 음수로 나타난 것과 관계가 있다.

표면의 법선이 렌더링된 환경에서 페널티 기반 알고리즘을 사용한 경우 (그림 4.3(b))에는 피실험자에 따라 결과가 큰 차이를 보였다. 특히 피실험자 S4와 S6만이 모든 표면의 높이가 변하는 부분에 대해서 높은 양수 값의 민감도 지수를 나타내어 원래 표면의 높이 변화를 인지하였고 실험자 S2와 S5만이 항상 큰 음수의 민감도 지수를 기록하여 원래 표면의 높이 차이와 반대로 인지하는 것으로 확인된다. 표 4.2에서 이 조건에 해당하는 Δp_z 의 값이 항상 표면의 높이 차이와 반대이다. 그럼에도 불구하고 피실험자 S4와 S6은 높이 차이를 올바르게 인지하였는데 이는 힘의 방향 변화가 전달하는 측면 힘 단서에 더 의존한 것으로 볼 수 있다. S2와 S5는 탐침 끝의 궤적이 제공하는 운동 단서에 더 의존한 것으로 풀이된다. 본 장의 1 절에서 언급하였듯이 표면의 법선에 따른 힘의 변화는 가상의 표면이 가진 정보와 일관된 정보를 제공하지만 탐침 끝의 궤적은 왜곡된 정보를 제공하여 피실험자가 올바른 인지를 하는 것을 방해하기 때문에 피실험자에 따라 더 잘 느껴지는 단서에 의존한 결과로 풀이된다. 또한 표면 모델 M1에서 M3로 갈수록 표면의 높이가 변하는 부분의 높이가 커지기 때문에 민감도 지수가 상승할 것으로 기대되는데 비하여, 피실험자 S1, S3, S7의 경우 이와 상관 없이 민감도 지수가 양수와 음수를 번갈아 기록했다. 이 또한 앞에서 언급하였듯이 같은 사용자라 하더라도 힘의 세기에 따라 표면으로부터 제공 받는 두 단서가 일관된 정보를 제공할 수도 있고 아닐 수도 있기 때문에



나타난 현상으로 보인다.

표면의 법선이 렌더링 되지 않은 환경에서 지형 보상 알고리즘에 의해 힘이 계산 되었을 때(그림 4.3(c)), 모든 d' 가 양수이거나 0에 가까운 것을 확인할 수 있다. 변화 구간의 높이 차이 자체가 운동 단서만으로 인지할 수 있는 임계값에 가까운 값들이기 때문에 M2의 일부 피실험자와 M3를 제외하고 예상대로 높은 민감도 지수를 보이는 못하였으며 이는 그림 4.4에서도 확인할 수 있다. 표면 모델 M1에 대한 피실험자의 평균 민감도 지수의 정확한 수치는 0.3526이고 표면 모델 M3는 1.2509이다. 민감도 지수 d' 가 1인 것은 피실험자가 75%의 확률로 정답을 맞춘다는 것이므로 표면의 높이가 변하는 부분 M1은 피실험자들이 잘 구분하지 못한다고 해석할 수 있다. 표 4.2에 나타난 Δp_z 는 가상 표면의 높이 정보와 일관되지만 작은 차이를 나타내 사용자가 인지하기에는 충분하지 못한 자극을 전달했다는 사실을 확인할 수 있다.

표면의 법선이 렌더링 된 환경에서 지형 보상 알고리즘을 사용하였을 때(T+N, 그림 4.3(d))의 민감도 지수는 모든 피실험자와 모든 환경에 대하여 큰 양수값을 기록하였다. 흥미로운 사실은 표 4.2에서 확인할 수 있듯이 조건 T일 때와 T+N일 때의 Δp_z 값이 큰 차이가 나지 않고 오히려 T+N일 때 절대값이 작은 경우가 있음에도 불구하고 T+N 민감도 지수가 매우 큰 차이로 높다는 것이다. 이는 사용자에게 전달되는 운동 단서가 비슷할 때 힘의 방향이 변하는 감각 단서가 표면의 높이가 변하여 제공된 측면 힘 단서가 햅틱적 경계를 인지하는데 큰 도움을 준다는 사실을 보여 준다.

표 4.2에 나타난 Δp_z 는 모델된 표면의 높이 차이보다 전체적으로 작은 값을 보였는데 이는 3.2 절에서 이미 설명하였듯이 표면 보상 알고리즘과 햅틱 인터페이스 장치가 탐침 끝의 위치를 제어하는 것이 아니라 힘을 제어하기 때문이다. 또한 임계값(0.66 mm)은 사용자에게 전달되는 높이의 차이 Δp_z 에 대한 값이 아니라 가상의 두 표면의 높이 차이 Δh 인 것임에 주의하기 바란다.



제 5 장

표면보상으로 인한 문제점과 그 해결

지형 보상 알고리즘은 사용자에게 가상 물체가 가진 강도와 지형의 모양을 왜곡 없이 동시에 전달하기 위하여 표면의 높이 정보를 수정하여 힘을 계산한다. 이번 햅틱 갱신 시간 n 과 이전 갱신 시간 $n-1$ 동안 사람에게 전달될 높이 차이 Δp_z (식 2.4)를 힘 유지 이론을 이용하여 계산한 후 이 값이 원래의 높이 차이 Δh 보다 작으면 커지도록, 반대로 크면 작아지도록 원래의 높이를 변화시킨다(식 3.1). 앞 장들의 실험에서 이러한 방법이 높이 차이를 올바르게 전달한다는 것이 증명 되었다.

앞서 제안한 알고리즘이 하나의 변화 구간과 한번 선을 긋는 탐구 과정(Exploratory Procedure)에 대해 설계되었다면, 본 장에서 소개하는 알고리즘은 다수의 변화 구간과 다양한 탐구 과정을 지원하여 보다 일반적인 환경에서의 렌더링을 목표로 한다. 이러한 표면 보상 알고리즘의 확장은 다음과 같은 도전 과제를 갖는다.

- 다수의 변화 구간의 지원 → 오차 누적
- 다양한 탐구 과정의 지원 → 비일관적인 높이 정보 전달

이번 장에서는 기본 표면 보상 알고리즘이 일반적인 환경에서 사용될 때 발생하는 문제에 대한 상황을 살펴보고 이에 대한 원인을 분석 및 해결 방법을 제시한다.



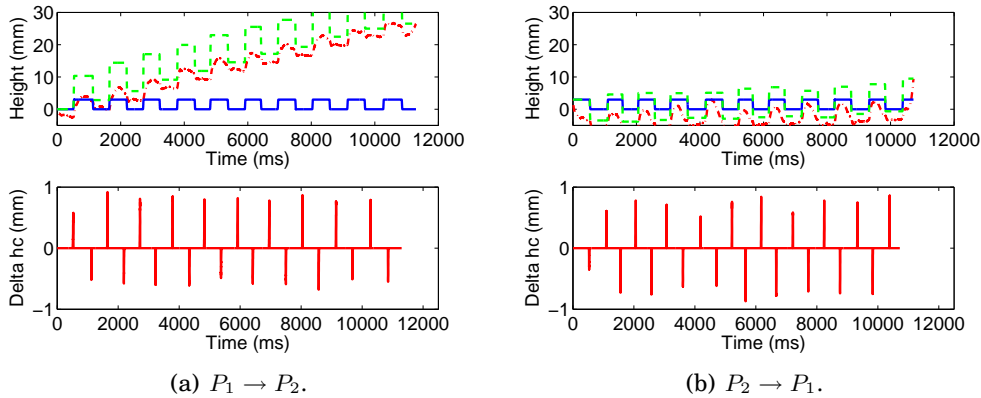


그림 5.1 두 표면의 경계에서 왕복하며 선을 긋는 경우

또한 제시한 방법이 타당성을 얻기 위한 실험을 수행하고, 확장된 알고리즘의 성능을 검증하기 위한 실험에 대한 결과를 각각 보고한다.

제 1 절 지형의 확장

본 절에서는 상호 작용을 하는 가상의 표면이 하나의 변화 구간이 아닌 다수의 변화 구간을 갖는 지형을 대상으로 한다. 이러한 환경은 선을 그을 때 시간이 지남에 따라 강도, 높이, 너비, 폭이 다양한 구간을 경험하는 것을 말하는데, 이에 앞서 성질이 같은 다수의 변화 구간을 경험하는 것에 초점을 두어 설명을 시작한다. 이는 하나의 변화 구간을 왕복하여 선을 긋는 문제와 동일하다.

낮고 단단한 왼쪽 표면과 높고 무른 오른쪽 표면으로 구성된 가상 물체에 대하여 왼쪽에서 오른쪽으로 선을 그은 뒤 접촉을 해제하지 않고 다시 오른쪽에서 왼쪽으로 선을 긋는 것을 생각해 보자. 이 때 사용자에게 전달되어야 하는 왼쪽 표면의 높이는 사용자가 표면에 접촉을 시작했을 때의 높이와 같아야 한다. 그러나 지형 보상 알고리즘을 사용하여 두 표면의 경계 부분에서 이러한 왕복 선긋기 반복했을 때 높이가 원래대로 되돌아 오지 않는다는 사실을 발견하였다.

하나의 변화 구간에 대하여 왕복 선긋기를 반복했을 때 발생하는 문제를 그림 5.1에서 보인다. k_1 은 0.9 N/mm이고 k_2 는 0.3 N/mm, Δh 는 3 mm로 P_2 가 높으며 변화 구간의 너비 W 는 4 mm였다. 그림 상단그래프의 파란 실선은 가상의 표면이



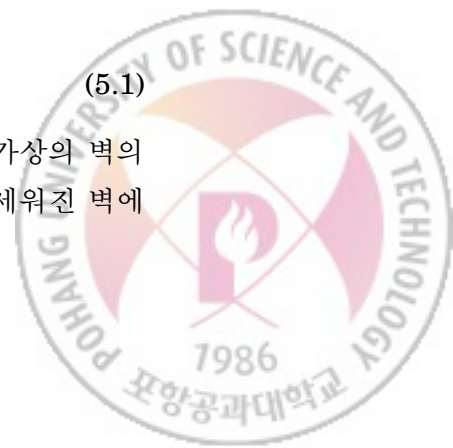
고 빨간 파선은 탐침 끝의 위치이며 녹색 점선은 사용자에게 전달되는 높이이다. 그림 하단 그래프는 지형 보상 알고리즘이 보상하는 높이 Δh_c 를 나타내는데, 4 mm에 대하여 선을 긋기 때문에 시간의 구간이 짧아 마치 임펄스(Impulse) 신호인 것처럼 나타났다. 그림 5.2(a)에서는 보상하는 높이의 한쌍을 확대하여 표현하며 임펄스 신호가 아닌 것을 보인다. 그림 5.1(a)은 오른쪽의 표면이 왼쪽의 표면 보다 높은 경우($P_1 \rightarrow P_2$)의 햅틱 경계에서 선을 반복해서 긋는 경우 표면의 높이는 원래대로 되돌아 가지 않고 반복 횟수가 거듭될 수록 표면의 높이가 계속 올라가는 것을 확인할 수 있다.

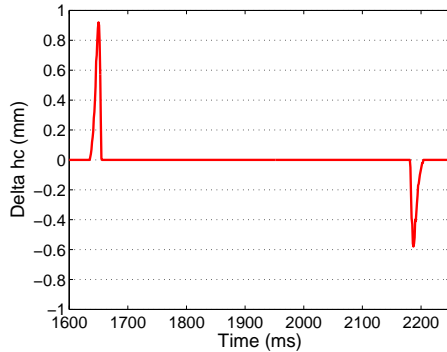
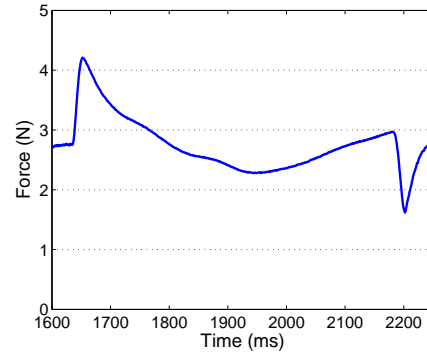
그림 5.1(b)는 왼쪽이 오른쪽보다 높은 경우($P_2 \rightarrow P_1$)의 자료를 나타내는데 가상 표면의 높이가 유지되는 것처럼 보이지만 하나의 왕복 단위로 나누어 그 사이의 변화를 보면 표면이 올라가기도 하고 내려가기도 하는 것을 볼 수 있다. 실제로 이러한 표면의 배치에 대하여 선긋기를 계속하였을 때 표면이 계속 올라가는 경우도 있는 반면 선을 긋는 방법에 따라 계속 내려가는 경우도 관찰 할 수 있었다.

이러한 문제가 발생하는 이유는 지형 보상 알고리즘이 왼쪽에서 오른쪽으로 갈 때 보상해 주는 높이와 오른쪽에서 왼쪽으로 갈 때 보상해 주는 높이가 차이가 나기 때문이다. 두 표면이 P_1 이 왼쪽, P_2 가 오른쪽에 배치해 있다고 가정하자. 만약 왼쪽에서 오른쪽으로 갈 때 보상되어 올라가는 표면의 높이 $\Delta h_{cP_1 \rightarrow P_2}$ 가 오른쪽에서 왼쪽으로 갈 때 보상되어 내려가는 표면의 높이 $\Delta h_{cP_1 \leftarrow P_2}$ 보다 크다면($|\Delta h_{cP_1 \rightarrow P_2}| > |\Delta h_{cP_1 \leftarrow P_2}|$) 표면은 결과적으로 두 높이의 차이만큼 올라가게 되며 반복될 수록 표면은 올라간다. 만약 반대의 경우($|\Delta h_{cP_1 \rightarrow P_2}| < |\Delta h_{cP_1 \leftarrow P_2}|$)라면 표면은 계속 내려가게 된다. 그림 5.2는 그림 5.1(a)의 1600 ms–2200 ms의 구간에서의 보상하는 높이 Δh_c 와 사용자에게 전달되는 힘에 대한 그림으로 보상 되는 높이와 힘 모두에게서 비대칭성을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 비대칭으로 인하여 발생하는 높이의 차이를 지형 보상 알고리즘에서의 오차로 정의하고 P_l 은 왼쪽 표면 P_r 은 오른쪽 표면으로 표현할 때 다음과 같이 정의된다.

$$error = |\Delta h_{c,P_l \rightarrow P_r}| - |\Delta h_{c,P_l \leftarrow P_r}| \quad (5.1)$$

이와 같은 오차가 발생하는 이유는 사람의 손과 팔이 선을 그을 때 가상의 벽의 높이 변화를 빠르게 따라가지 못하기 때문이다. $P_1 \rightarrow P_2$ 인 수직으로 세워진 벽에



(a) 한 쌍의 Δh_c .

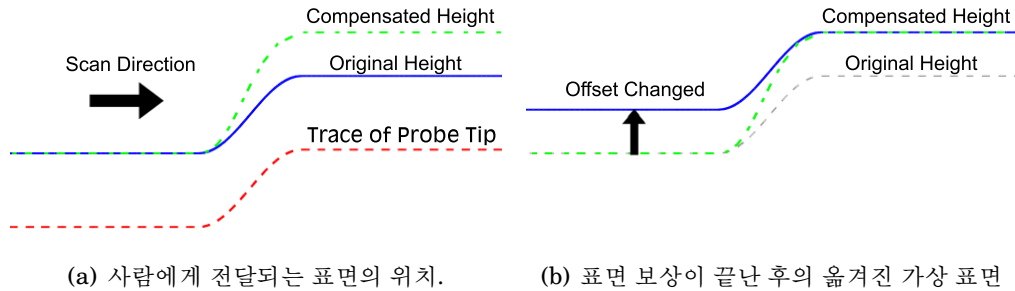
(b) 한 쌍의 사용자에게 전달되는 힘

그림 5.2 오차 누적의 원인

대하여 선을 긋는 경우를 생각해 보자. 왼쪽에서 오른쪽으로 팔을 움직일 때 표면이 사람에게 갑자기 가까워지면 사람의 손은 선을 그어오던 높이에 머무르고 있기 때문에 관통 깊이가 커지게 되어 순간적으로 큰 힘이 발생한다. 오른쪽에서 왼쪽으로 움직이는 경우에는 표면이 사람으로부터 갑자기 멀어지고 사람의 손은 역시 그어오던 높이에 머무르고 있기 때문에 관통 깊이가 작아지고 순간적으로 작은 힘이 발생하게 된다. 이러한 현상은 그림 5.2(b)에서 확인할 수 있다. 이러한 힘의 비대칭은 식 3.3에 사용되어 그림 5.2(a)에서 보이는 Δh_c 의 비대칭으로 연결되고 식 5.1에 의해 오차는 $error > 0$ 이 된다.

또한 재미있는 사실은 그림 5.1(a)과 그림 5.1(b)에서 보이듯이 단지 두 표면의 배치를 바꾸었을 뿐인데 발생하는 오차의 양상이 다르다는 점이다. 이는 사람이 수직으로 세워진 벽에 대하여 팔을 수평방향으로 몸의 중심부에서 바깥쪽으로 움직일 때와 몸의 바깥쪽에서 중심으로 움직일 때가 다르기 때문이다. 잠시 본 논문을 놓고 허공에 벽이 있다고 생각하고 왼쪽에서 오른쪽으로 오른쪽에서 왼쪽으로 선을 그어 보라. 안쪽에서 바깥쪽으로 손이 움직일 때 몸으로부터 약간 멀어지는 움직임이 편하다는 것을 느낄 수 있을 것이다. 두 표면이 $P_1 \rightarrow P_2$ 로 배치되었을 때 오른손으로 왼쪽에서 오른쪽으로 선을 긋게 되면 표면 P_2 (사람에게 가까운 표면)에서 사람의 손은 사람으로부터 멀어지게 되므로 관통 깊이가 커져 상대적으로 큰 힘이 렌더링 된다. 만약 오른쪽에서 왼쪽으로 움직이면 표면 P_1 (사람에게 먼 표면)에서 사람의 손





(a) 사람에게 전달되는 표면의 위치.

(b) 표면 보상이 끝난 후의 옮겨진 가상 표면

그림 5.3 표면의 보상에 따른 가상 표면의 높이

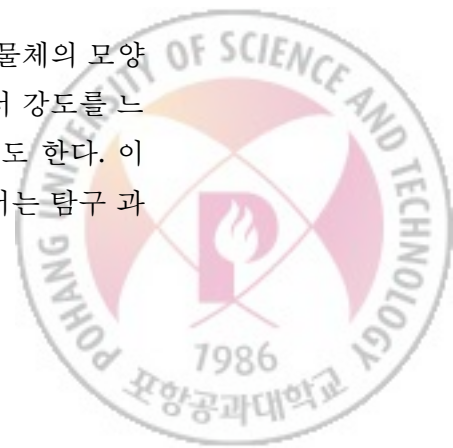
은 사람에게 가까운 쪽으로 이동하므로 관통 깊이가 얇아 상대적으로 작은 힘이 렌더링 될 것이다. 이 현상 역시 $error > 0$ 인 오차를 발생시킨다.

사람의 손이 가상의 벽의 높이를 재빨리 따라가지 못해서 생기는 힘의 비대칭과 사람의 손이 좌우로 움직일 때의 패턴이 달라서 생기는 힘의 비대칭은 동시에 일어나게 된다. 그림 5.1(a)의 $P_2 \rightarrow P_1$ 에서는 두 비대칭 모두 0보다 큰 오차를 발생시키고 두 오차가 합쳐져 더 큰 오차가 발생한다. 그러나 $P_2 \rightarrow P_1$ 인 경우는 첫번째 현상에 의하여 $error < 0$ 인 오차가 생기고 두번째 현상에 의해 $error > 0$ 인 오차가 생기므로 두 오차간에 상쇄가 일어나 그림 5.1(b)와 같이 표면의 높이가 좁은 쪽으로 오르기도 하고 내리기도 하는 것이다. 그러나 선을 그을 때의 힘의 변화, 선 굵기 방식 등에 따라 두 현상간에 발생하는 오차의 상대적인 크기가 달라져 표면이 계속 올라가기도 하고 내려가는 현상이 발생하기도 한다.

이와 같이 다수의 지형에 대하여 선을 그을 때 오차가 누적되는 현상은 다수의 구간들이 같은 성질을 갖을 때 뿐만 아니라, 다수의 구간들이 서로 다른 성질을 갖을 때에도 오차가 누적되는 정도의 차이가 다를 뿐인 공통적인 현상이다.

제 2 절 탐구 과정의 확장

물체가 갖는 속성들을 알기 위하여 사람이 항상 선을 긋는 것은 아니다. 물체의 모양을 알기 위해서 선을 긋기도 하고, 표면을 떼었다 눌렀다하거나 톡톡쳐서 강도를 느끼기도 하고, 양끝을 잡아 늘리기도 하고 줄이기도 하여 신축성을 보기도 한다. 이렇게 사람이 물체의 속성을 알기 위하여 물체를 다루는 행위를 햅틱에서는 탐구 과



정(Exploratory Procedure)이라고 표현한다. 하나의 변화 구간을 갖는 가상 표면에 대하여 선을 긋는 것과 톡톡 치는 탐구 과정이 병행되는 경우에 발생하는 문제를 그림 5.3를 보며 살펴보자.

그림 5.3(a)은 두 개의 서로 다른 강도와 높이를 갖는 가상 표면에 선을 그을 때 가상 표면 모델(파란 실선), 탐침 끝의 궤적(빨간 점선), 그리고 사람에게 전달되는 보상된 높이(녹색 파선)를 보이며 파란색 실선의 아래쪽이 가상 표면의 내부이다. 이 그림은 왼쪽 표면의 강도 0.7 N/mm , 오른쪽은 0.4 N/mm 이고 두 표면의 높이차이는 3 mm , 두 표면의 경계 부분의 너비는 4 mm 인 환경에서 사람의 접촉 힘이 2.0 N 으로 일정하다고 가정하고 시뮬레이션을 통해 얻은 결과이다. 여기서 사람이 접촉을 유지하고 있는 동안은 힘 유지 이론에 의해 계산되어 누적된 보상 높이 S_h (식 3.7)가 원래의 표면 높이에 더해져서 사람은 원래의 표면이 아닌 녹색 파선으로 표현된 높이를 느끼게 된다. 그러나 여기서 주의할 것은 원래 표면이 녹색 파선으로 표현된 표면으로 변하게 되는 것이 아니라는 점이다. 즉 녹색 파선으로 표현된 위치에 표면이 생성되는 것이 아니다. 지형 보상 알고리즘은 사람의 힘을 이용하여 매 햅틱 갱신 루프마다 높이를 보상하는 적응적인 특성을 지니며 사람마다 사람이 시도하는 시기마다 접촉힘은 다르기 때문에 절대 고정될 수 없다.

그림 5.3(b)은 원래 가상 표면의 위치(회색 점선)와 선을 긋는 과정이 끝난 후의 가상 표면 모델(파란 실선)을 보여준다. 일반적인 환경에서는 HIP가 원래 표면의 외부에 있을 때는 SCP를 구하지 않기 때문에 접촉이 해제되는 경우 다시 접촉을 하기 위해서는 HIP가 원래 가상 표면의 내부에 위치해야 한다. 이 때 만약 S_h 가 0이 아니면 식 4.1에 의해 보상된 위치 CSP를 구하게 되고, 식 4.2에 의해 갑자기 큰 힘을 렌더링 하게 되어 불안정한 상태가 될 수 있다. 따라서 S_h 가 접촉이 해제될 때 0으로 초기화된다고 가정하자. 왼쪽에서 오른쪽으로 선을 긋는 과정이 끝난 후 표면에서 손을 떼 다음 오른쪽 표면에 다시 접촉하는 경우에 표면에서 손을 떼었을 때의 위치(파란 실선)와 다시 접촉 했을 때의 위치(회색 실선)가 다르게 되므로 같은 표면의 높이를 다르게 전달하는 문제가 발생하게 된다.

만약 보상된 높이 S_h 가 접촉이 해제되더라도 유지가 되고 HIP가 가상 표면의 외부에 존재하더라도 SCP를 구할 수 있다고 가정하자. 그러면 위의 문제는 해결이 된다. 그러나 왼쪽에서 오른쪽으로 선을 긋는 과정이 끝난 후 표면에서 손을 떼어 왼



쪽 표면에 접촉을 하면 보상된 높이가 유지되기 때문에 파란 실선의 위치에서 다시 접촉을 하게 되는데 선을 그을 때는 회색 점선이 위치한 원래의 높이에서 시작을 하였으므로 같은 표면을 사용자에게 다르게 전달하는 문제가 발생한다. 이 경우 보상된 높이가 유지되다가 점점 원래의 높이로 복원이 된다면 문제는 해결되는데 자세한 내용은 3에서 설명한다.

제 3 절 높이 복원 방법

앞에서 살펴 본 문제들이 발생하는 근본적인 원인은 가상의 표면이 갖는 높이와 보상된 표면의 높이가 다르기 때문이다. 이를 위하여 손이 움직임에 대한 감지 해상도(Sensing Resolution)가 상대적으로 낮다는 사실을 이용하여 사람이 인지하지 못하는 범위 내에서 보상된 표면을 원래의 높이로 되돌리는 방법을 이용한다. 식은 다음과 같다.

$$S_h(n) = \begin{cases} 0 & \text{if } |S_h(n-1)| < |slope \cdot d_{xy}| \\ S_h(n-1) - slope \cdot d_{xy} & \text{if } S_h > 0 \\ S_h(n-1) + slope \cdot d_{xy} & \text{if } S_h < 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

위 식의 $S_h(n)$ 은 3.7에서 소개한 누적 보상 높이이고 $slope$ 는 원래의 높이로 복원하기 위한 기울기로 항상 양수인 값으로 정의된다. d_{xy} 는 xy 평면에서 움직인 탐침 끝의 이동 거리로 역시 항상 양수이다. 한 햅틱 주기 동안 xy 평면에서 움직인 거리에 기울기를 곱해주면 해당 햅틱 루프에서 복원할 높이가 나오며 이를 누적 보상 높이에서 제거한 후 사용자에게 전달하는 것이다. 이 과정은 매 햅틱 갱신 주기 때마다 일어나는 것으로 한 번의 햅틱 주기만에 바로 복원되지 않음에 유의하라.

이 식이 지형 보상 알고리즘에 적용되면 사용자에게 전달해야할 높이 차이보다 작은 차이가 전달된다. 만약 두 표면의 경계 부분의 높이가 충분히 크다면 큰 상관 없겠지만 임계값에 가까운 높이를 가진 표면에 대해서는 사용자가 높이 차이를 제대로 인지하지 못하도록 방해할 수 있다. 그러나 이전 장에서 높이 차이가 작더라도 표면의 법선 방향으로 힘의 방향이 바뀌어 측면 힘 단서가 제공되면 사용자가 높이 차이를 인지하는데 무리가 없음이 확인되었기 때문에 문제가 되지 않는다.

다음은 식 5.2의 높이 복원 과정이 적용된 표면 보상 알고리즘이다.



(1) 보상할 높이 구하기

$$\Delta h_c(n) = \begin{cases} 0 & \text{if } k(n) = k(n-1) \\ f_z(n-1) \left(\frac{1}{k(n)} - \frac{1}{k(n-1)} \right) & \text{if } k(n) \neq k(n-1) \end{cases} .$$

(2) 보상된 위치 구하기

$$S_h(n) = S_h(n-1) + \Delta h_c(n) .$$

$$CSP(n) = SCP(n) + S_h(n) \frac{\overrightarrow{SCP(n) - HIP(n)}}{\|SCP(n) - HIP(n)\|} .$$

(3) 기울기 적용

$$S_h(n) = \begin{cases} 0 & \text{if } |S_h(n-1)| < |slope \cdot d_{xy}| \\ S_h(n-1) - slope \cdot d_{xy} & \text{if } S_h > 0 \\ S_h(n-1) + slope \cdot d_{xy} & \text{if } S_h < 0 \end{cases} .$$

(4) 사용자에게 전달할 힘 계산하기

$$f(n) = k(n) (CSP(n) - HIP(n)) .$$

위에서 보듯이 보상된 표면을 복원할 높이는 *slope*에 의해 결정되며 이전에 이에 대한 임계값을 찾은 연구가 없었다. 따라서 신뢰적인 임계값을 찾기 위하여 정신물리학 실험을 실행하였다.

제 4 절 실험: 기울기에 대한 절대 임계값 측정

본 절에서는 사람이 표면에 선을 그을 때 느낄 수 있는 *slope*의 절대 임계값(Absolute Threshold)을 알아내기 위한 정신물리학 실험에 대한 방법 및 결과를 보고한다. 찾아낸 임계값은 식 5.2에 적용되어 표면 보상 알고리즘이 갖는 문제점을 극복하기 위해 사용된다.

4.1 방법

본 실험은 이전 장들의 실험과 비교하여 다소 비슷한 환경이지만 실험 설계와 분석이 다르므로 자세히 설명한다.





그림 5.4 실험 중인 피실험자.

4.1.1 장비

가상 환경의 정보를 사용자에게 전달하는 햅틱 인터페이스 장비로 그림 5.4에 나타난 센서블(Sensable)사의 팬텀 프리미엄 1.0A (PHANToM Premium 1.0A) 모델을 사용하였다.

4.1.2 피실험자

총 10명의 피실험자(S1-S10)가 참여하였다. S1-S5는 여성이고 나머지 S6-S10는 남성이었다. 피실험자 중 S3는 왼손잡이이고 다른 피실험자는 모두 오른손잡이였으며 실험을 하는 동안 모두 오른손을 사용하였고 손이나 팔과 관련된 질병이 모두 없다고 대답하였다. 실험에 참여하기 전에 햅틱 인터페이스 장치를 다루어 본 경험이 있는 피실험자는 S1, S3, S5, S7 이었는데, 이 중 S5를 제외하면 3.2 절이나 4.2 절의 실험 중 하나에 참여하여 한 번씩 사용한 적이 있다. 이들을 제외한 나머지 피실험자는 모두 본 실험에서 햅틱 장치를 처음 사용해보았다. 피실험자의 연령은 만 20세부터 만 25세까지 분포되어 있었으며 평균 21.9세였다.

4.1.3 자극

피실험자들은 균일한 강도와 높이를 갖는 수직으로 세워진 가상 표면을 마주하고 햅틱 장치를 이용하여 선을 그었다. 실험을 하는 동안 좌우의 움직임이 가능하였고 상하로 움직이는 것을 막아 xz 평면에서만 움직임이 가능하도록 하였다. 햅틱 렌더



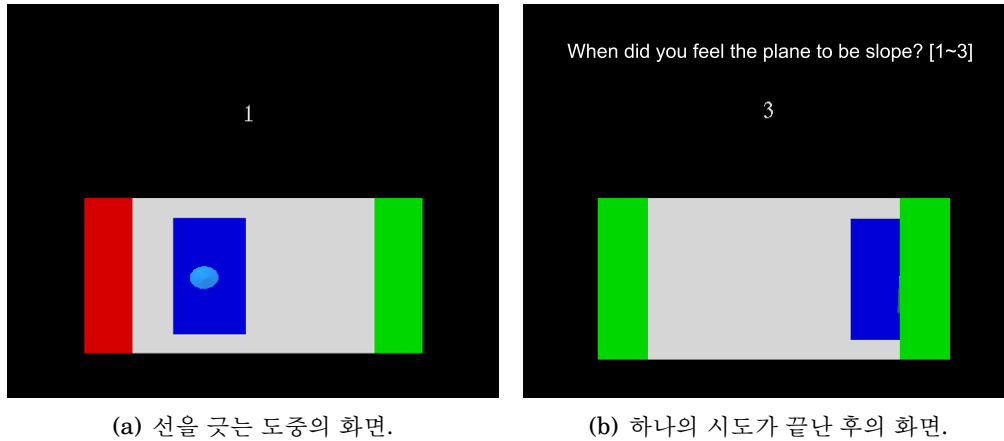


그림 5.5 실험 진행 화면.

링의 갱신 주기는 모든 실험에서 항상 1 kHz로 고정되었다.

그림 5.5은 실험할 때 보이는 화면의 모습을 나타내는데 왼쪽과 오른쪽에 있는 두 개의 녹색 박스는 선 긋기의 시작과 끝을 알리는 역할을 한다. 파란색 원뿔모양의 객체는 햅틱 탐침 끝의 위치를 나타내며 피실험자에게 손의 공간적인 위치 정보를 제공한다. 두 개의 녹색 박스 사이에 있는 파란 박스는 선을 그을 때 마다 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이게 되는데 피실험자는 이 파란 박스를 따라 선을 긋도록 설계되었다. 이 실험은 세 번의 선 긋기가 하나의 시도(Trial)로 간주되는데 이 때 몇 번째의 선긋기를 나타내는 지를 화면에 숫자(1 ~ 3)로 표시하였다. 그림에 있는 문구는 하나의 시도가 끝난 후 피실험자의 대답이 필요할 때 화면에 나타난다.

4.1.4 실험 조건

표 5.1는 실험 조건에 따라 서로 다른 인자 값들을 보인다. 표면의 왼쪽에서 오른쪽으로 변하는 경사의 방향에 따라 위→아래 또는 아래→위로 구분하였고, 강도는 0.9, 0.3 N/mm 로 매우 단단한 표면과 매우 무른 표면을 사용하였다. 표면의 경사가 변하는 구간의 너비가 비교적 넓은 경우(100 mm)와 좁은 경우(20 mm)를 사용하였고, 손의 이동 속도를 빠른 경우(100 mm/s)와 느린 경우(20 mm/s)로 나누어 실험의 조건을 구성하였다.



표 5.1 실험에 사용된 조건.

실험 조건	경사의 방향	강도 (N/mm)	너비 (mm)	속도 (mm/s)
C1	아래→위	0.9	100	100
C2				20
C3			20	100
C4				20
C5		0.3	100	100
C6				20
C7			20	100
C8				20
C9	위→아래	0.9	100	100
C10				20
C11			20	100
C12				20
C13		0.3	100	100
C14				20
C15			20	100
C16				20

경사의 방향을 고려한 이유는 그 방향에 따라 사람이 인지하는 임계값에 차이가 있을 수 있기 때문이다. 표면의 경계선이 명확하게 렌더링 되는 경우와 아닌 경우 임계값에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 표면의 강도를 조절하였다. 표면의 변화가 오래 일어나는 경우와 짧게 일어나는 경우 또한 임계값에 영향을 미친다고 예상하여 선을 긋는 너비를 넓은 경우와 좁은 경우로 구분하였다. 식 5.2에서 볼 수 있듯이 경사값과 단위 시간 동안 손의 이동거리 d_{xy} 가 곱해진 값만큼 높이 복원에 이용되기 때문에 손의 속도가 빠른 경우와 느린 경우로 구분하여 제어하도록 하였다.

4.1.5 실험 진행

기울기의 절대 임계값(Absolute Threshold)을 측정하기 위하여 3 간격 강제 선택: 1-업 3-다운의 적응적인 계단 방법(3 Interval Forced Choice One-up Three-down Adaptive Staircase Procedure)를 사용하였다 [14]. 이 방법은 기존의 임계값을 찾는 방법들과 비교하여 매우 효율적이라는 평가를 받고 있다.

3 간격 강제 선택(3 Interval Force Choice)은 세 번의 간격 중 한 번만 자극이 주



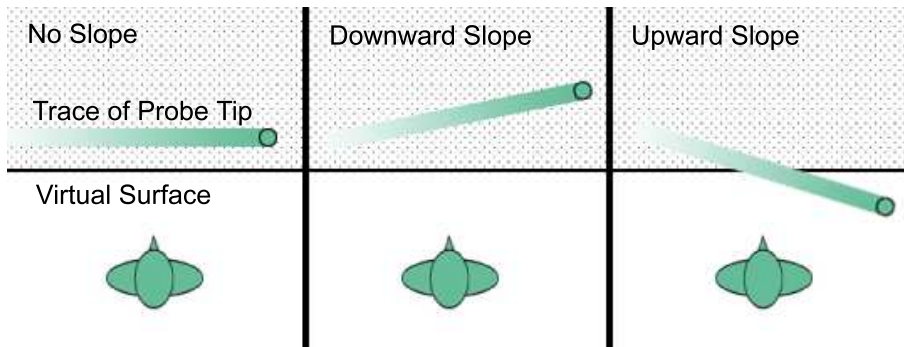


그림 5.6 실험에 주어진 경사에 따른 탐침 끝의 경로.

어지며 피실험자는 이 중 하나를 선택해야만 한다는 것을 의미한다. 본 실험의 한 시도(Trial)가 3 번의 선 굵기로 이루어진 이유는 이 때문이며 세 번 중 두 번은 경사가 없는($slope = 0$) 표면이 사용자에게 전달되고 나머지 한번은 경사가 있는($slope \neq 0$) 표면이 전달된다. 그림 5.6의 첫 번째 그림이 경사가 없는 경우로 하나의 시도에서 두 번 피실험자에게 전달되며 두 번째 경우는 경사가 내려가는 경우, 세 번째 경우는 경사가 올라오는 경우로 하나의 시도에서 둘 중 한 경우가 렌더링되었다. 경사가 있는 표면이 나타나는 차례는 무작위로 선정되었다. 표면에 경사가 존재한다는 것은 식 5.2에서 $slope \neq 0$ 인 것을 의미하는 것이며, 표면 자체가 기울어져 있다는 것이 아님에 주의하라.

1-업 3-다운이란 하나의 시도 때 피실험자가 자극이 몇 번째에 있었는지를 맞추지 못하면 다음 시도 때 자극의 세기가 1 dB 크기만큼 커지고, 연속으로 3 번을 맞추면 다음 시도 때 자극의 세기가 1 dB 만큼 작아지는 것을 의미한다. 이는 사용자가 자극을 잘 찾지 못하면 센 자극을 주어 보다 잘 찾게 하고, 잘 찾으면 약한 자극을 주어 잘 못찾게 함으로써 주어진 자극이 임계값 근처에 수렴하도록 하기 위한 것이다. 이 때 세 번을 연속으로 맞추어야 하는 것은 사이코메트릭 함수(Psychometric Function)의 79.4%에 해당하는 값을 찾기 위함이다 [15]. 실험이 끝나는 조건은 자극 세기의 역전(Reversal)이 12 번 발생하는 것이다. 여기서 역전이란 자극이 세지다가 약해지거나, 약해지다가 세지는 경우로 정의된다.

피실험자는 하나의 시도 때 세 번의 선 굵기를 하며 하나의 시도가 끝난 후 몇 번째 선 굵기 때 경사가 느껴졌는지를 키보드를 통하여 입력하였다. 선을 굵기 위해서



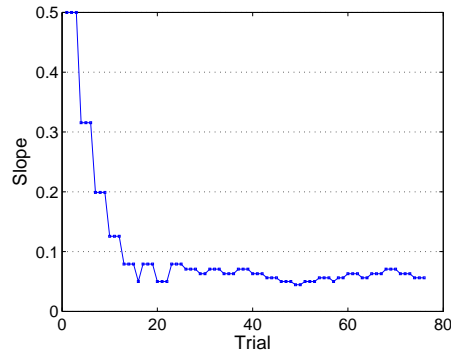


그림 5.7 C1 조건에서 S6에게 전달한 자극의 변화

는 화면 왼쪽에 있는 녹색 박스와 접촉하여 시작을 알리고 가상의 벽과 접촉하였다. 키보드의 스페이스바(Space Bar)나 숫자패드의 ‘.’을 누르면 파란 박스가 이동하며 피실험자는 파란 박스의 속도에 맞추어 손이 따라가도록 하였다. 선을 그은 후 오른쪽 녹색 박스와 접촉하면 하나의 선 굵기가 완료되는데 만약 피실험자가 선을 긋는 속도가 파란 박스의 속도에 비하여 너무 느리거나 빠른 경우는 예외처리를 하였으며 화면에는 다시 선을 그으라는 문구가 표시되고 피실험자는 선을 다시 긋게 되었다.

하나의 실험 조건당 5-15분이 소요되었으며 16 개의 조건이었으므로 한 명의 피실험자는 사흘에 나누어 하루에 5-6 개의 조건을 진행하였다. 특히 첫 날의 경우에는 파란색 박스를 따라가는 것에 집중하다가 표면의 높이 변화를 잘 느끼지 못하는 경우가 발생하지 않도록 하기 위해 표면의 너비 W 와 제어하는 속도 V 의 조합으로 이루어진 4가지 경우에 대하여 20분 정도 훈련하는 시간을 가졌다.

4.1.6 실험 분석

그림 5.7은 C1 조건에서 S6 피실험자의 자극에 대한 반응과 그에 따른 자극 세기(Stimulus Intensity)의 변화를 나타낸다. 임계값은 그림에 나타난 12 개의 역전점을 6 개의 쌍으로 묶어 각각의 평균을 구하고 이 6개의 추정값들을 다시 평균하여 하나의 조건에 대한 임계값을 계산하였다. 이 때 사용한 평균은 모두 기하평균(Geometric Mean)이다. 이와 같은 방식으로 모든 실험자(S1-S10)와 모든 조



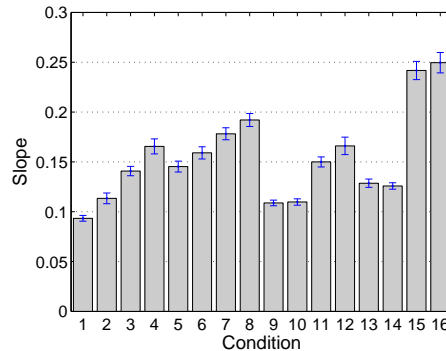


그림 5.8 측정된 임계값

건(C1-C16)에 대하여 행하여 각 경우의 임계값을 구하였다.

본 실험의 목적은 다양한 환경에서 선을 그을 때 사람이 인지하는 기울기의 임계값의 최저치를 찾아 지형 보상 알고리즘에 적용하는 것이다. 실험 조건을 결정짓는 요소인 기울기 방향, 표면의 강도, 선을 긋는 너비, 선을 긋는 속도 등이 임계값과 어떠한 상관 관계를 갖으며 유의한지 아닌지는 본 실험에서 관심을 갖는 대상이 아님을 밝히며 이에 대한 연구는 차후의 과제로 남긴다.

4.2 결과

그림 5.6은 각 조건에 대한 피실험자들의 임계값의 평균값을 나타낸다. 표 5.2는 이 평균값과 피실험자들의 임계값 중 최저값과 최고값을 기록하였다. C1이 가장 작은 임계값을 기록하였고 이 때의 평균 임계값은 0.09이며 가장 민감한 피실험자가 기록한 값은 0.05였다. 6 절에서 이 두 값이 적용되었을 때의 지형 보상 알고리즘의 성능을 비교하였다.

제 5 절 확장된 지형 보상 알고리즘

높이 복원 과정이 올바르게 동작하게 되면 가상 물체가 가진 원래의 높이에 대해 선을 긋거나 접촉했다 떼었다를 반복하게 되므로 2 절에서 지적하였던 표면의 탐사 과정에 따라 같은 표면을 다르게 렌더링하는 문제가 해결된다. 물론 보상이 일어난 직후 접촉을 해제하여 매우 가까운 거리의 표면에 다시 접촉한다면 원래의 높이로 충분

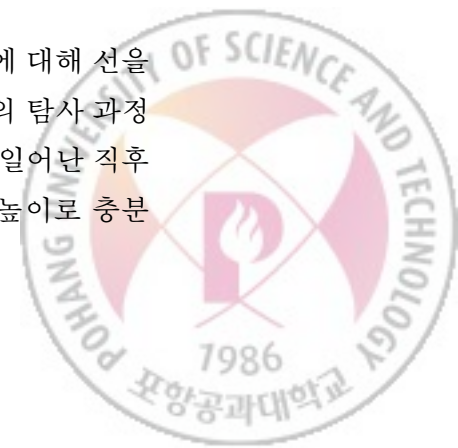


표 5.2 조건에 따른 평균 입계값

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Mean	0.09	0.11	0.14	0.17	0.15	0.16	0.18	0.19
Min	0.05	0.05	0.08	0.07	0.10	0.08	0.10	0.12
Max	0.15	0.21	0.21	0.34	0.28	0.26	0.31	0.31
	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
Mean	0.11	0.11	0.15	0.17	0.13	0.13	0.24	0.25
Min	0.07	0.07	0.08	0.05	0.06	0.08	0.11	0.10
Max	0.15	0.16	0.26	0.35	0.21	0.18	0.41	0.42

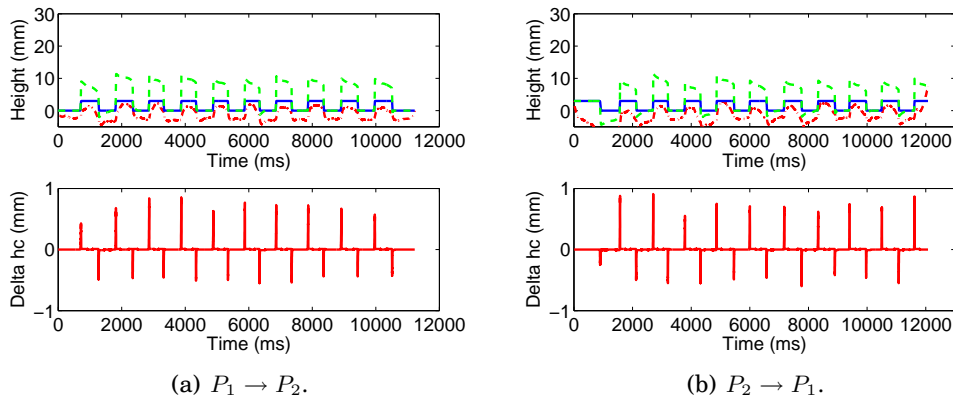


그림 5.9 확장된 방법으로 두 표면의 경계에서 왕복하며 선을 긋는 경우

히 복원되지 못하겠지만 접촉을 해제한 곳과 접촉을 다시 시작한 곳이 매우 가까운 거리에 있기 때문에 높이 차이가 크지 않은 것이 자연스럽다. 만약 원래의 높이로 바로 복원이 된다면 이는 곧 접촉 해제가 보상 표면 높이를 0으로 만드는 것과 같아 본 장의 2 절에서 이미 지적한 문제가 발생하게 되고 따라서 사용자는 갑작스러운 높이 차이로 인하여 부자연스러운 정보를 받게 된다.

그림 5.1에서 사용하였던 표면들($k_1 = 0.9$, $k_2 = 0.3$, $\Delta h = 3$ mm, $W = 4$ mm)을 높이 복원이 적용된 표면 보상 알고리즘($slope = 0.05$)으로 렌더링하여 왕복 선긋기를 반복하였을 때 보상된 표면 높이와 탐침 끝의 궤적을 그림 5.9에서 보인다. 이 때 0.09가 아닌 0.05를 사용한 이유는 단위 시간당 복원되는 높이가 작더라도 문제가 해결되는지에 대한 여부를 살파기 위해서이다. 파란 실선은 가상 표면의 높이, 빨간



파선은 탐침 끝의 위치, 녹색 점선은 보상된 표면 높이의 변화를 나타내는데, 보상된 표면 높이를 살펴보면 올라갔다 내려오거나 내려갔다 올라옴으로써 원래의 높이로 되돌아가는 것을 관찰할 수 있다. 그림의 아래 패널은 매 햅틱 갱신 주기 때의 보상할 높이 차이를 나타내는데, 그림 5.1에서와 달리 강도와 높이가 변하는 구간이 아니더라도 높이의 보상이 이루어지는 것을 알 수 있다. 이는 높이 복원이 적용이 되었기 때문이며, 변화 구간에 대하여 왕복 선긋기로 인하여 오차가 발생하였더라도 햅틱 갱신 주기 동안 계속 원래의 높이로 복원을 하여 오차가 누적되지 않도록 한다. 따라서 1 절에서 지적하였던 오차 누적으로 인한 표면 높이의 지속적인 증가나 감소 현상이 나타나지 않게 된다. 또한 수정되기 전의 지형 보상 알고리즘은 표면의 구성이 다를 때($P_1 \rightarrow P_2, P_2 \rightarrow P_1$) 오차 누적 양상이 서로 다르게 나타나게 하였으나 확장된 알고리즘은 표면의 구성과 상관없이 오차 누적 현상이 모두 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

제 6 절 실험: 확장된 지형 보상 알고리즘의 성능

본 절에서는 높이 복원 과정이 적용된 지형 보상 알고리즘이 사용자에게 표면의 높이 차이를 올바르게 전달하는지를 검증하기 위한 실험을 소개한다. 확장된 방법이 오차 누적 현상을 해결했다 하더라도 사용자에게 전달하는 높이 정보에 영향을 미쳐 사용자가 높이 차이를 인지하는 것에 방해가 된다면 표면 보상 알고리즘의 원래 목적에서 벗어나기 때문이다. 본 실험에서는 두 개의 서로 다른 강도와 높이를 갖는 표면에 대하여 확장된 지형 보상 알고리즘이 사람의 높이 차이 인지에 어떤 영향을 미치는지를 알아본다.

6.1 방법

사용한 장비, 실험 진행 및 분석 방법은 3 장, 4 장의 실험과 동일하다. 앞장과 동일한 부분의 설명은 생략한다.

6.1.1 피실험자

총 6명의 피실험자(S1-S6)가 참여하였다. S1-S4은 남성이고 S5-S6은 여성이었다. S1은 햅틱 장치를 매우 자주 사용하는 피실험자였고, S5는 이전 실험에 참가하여 사



표 5.3 실험에 사용된 표면 모델.

조건	<i>slope</i>	<i>W</i>
C1	0.05	2
C2	0.05	4
C3	0.10	2
C4	0.10	4

용해본 경험이 있었으며 나머지 사람은 햅틱 장치를 처음 사용해 보는 사람들이었다. S2은 양손잡이였고 다른 사람들은 모두 오른손잡이였으며 실험을 하는 동안 모두 오른손을 사용하였다. 나이는 18세부터 25세에 분포하였으며 평균 22.3세였다.

6.1.2 실험 조건

표 5.3은 실험에 사용된 조건을 나타낸다. *slope*는 지형 보상 알고리즘의 높이 복원에 사용한 기울기 값을 의미하고 *W*는 두 표면 경계의 너비를 나타낸다. 두 표면의 높이 차이 $\Delta h = h_2 - h_1$ 는 각각 0.6, 0.8, 1.0 mm의 세 경우로 위의 조건 4개에 대하여 각각 적용되었다. 두 표면의 강도는 P_1 이 0.7 N/mm, P_2 가 0.4 N/mm 였으며 모든 조건에서 표면의 법선이 렌더링 되었다.

본 실험에서 사용된 표면 모델의 높이는 사람이 인지할 수 있는 높이 차이의 임계값과 비슷한 값이며 4.2 절에서 법선이 렌더링되면 충분히 인지할 수 있다는 결론을 얻은 값이기도 하다. 특히 조건 C2와 C4의 환경은 4.2 절에서 사용한 표면 모델과 동일하게 설정하여($W=4$) 높이 복원이 적용된 지형 보상 알고리즘으로 렌더링하였을 때와 그렇지 않을 때의 민감도 지수 d' 를 비교함으로써 높이 복원이 사람의 높이 구분 능력에 미치는 영향을 분석하였다.

높이 복원에 사용한 기울기 값은 $slope = 0.05$ 와 $slope = 0.10$ 을 사용하였는데 기울기 0.10은 5.4 절에서 측정한 조건별 평균 임계값 중 최저값(0.09)보다 조금 큰 값이고, 기울기 0.05는 피실험자들의 임계값 중 최저값이다(표 5.2 참조). 각 기울기 값이 적용된 환경에서 왼쪽과 오른쪽 표면에서의 탐침 끝의 높이 차이를(3.2 절 참조) 구하고 비교함으로써 기울기 값이 사용자에게 전달하는 높이 차이에 미치는 영향을 알아 보았다. 또한 이렇게 구한 높이 차이가 사용자의 높이 차이 인지에 어떠한 영



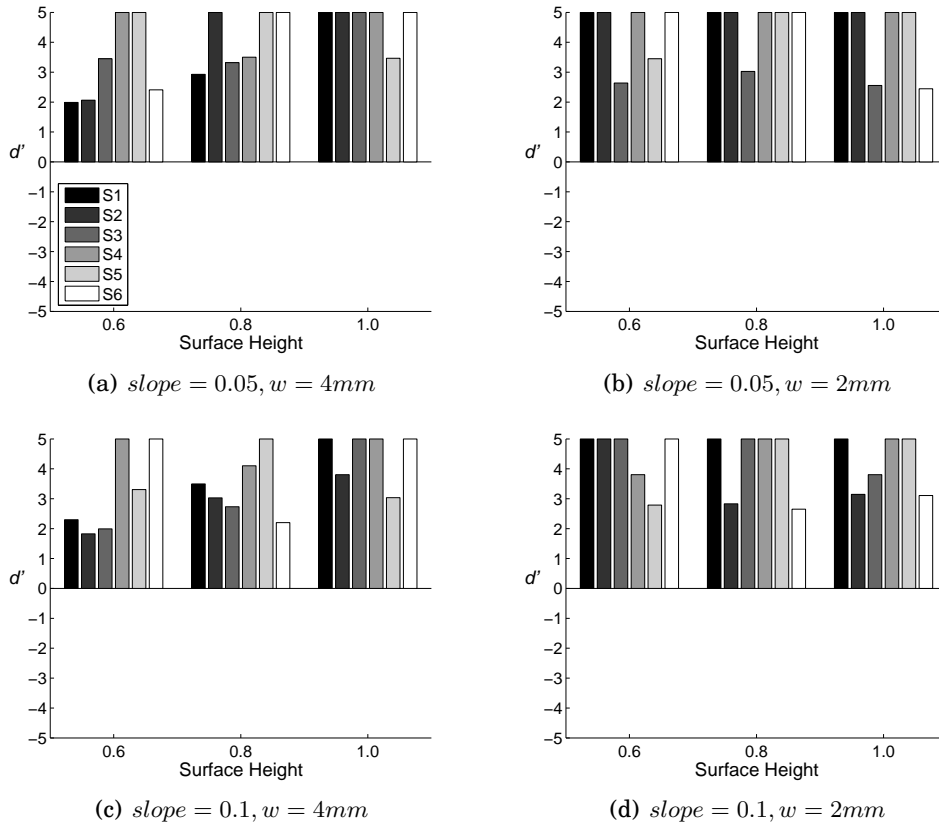


그림 5.10 조건에 따른 피실험자의 민감도 지수 d'

향을 미치는지를 민감도 지수 d' 과 비교함으로써 분석하였다.

6.2 결과

그림 5.10은 각 조건에 대하여 측정된 피실험자의 민감도 지수 d' 를 보이고 그림 5.11는 각 피실험자의 혼동 행렬을 모두 합산하여 구한 민감도 지수를 나타낸다. d' 의 값이 1을 넘으면 두 자극의 차이를 구분한다고 알려져 있는데 대부분의 d' 가 2를 넘었다는 사실은 주목할 만하다. 그림 5.11에서 C2을 제외한 모든 조건에서 높이가 커질수록 평균 민감도 지수가 높아지는 양상을 보였지만 d' 이 워낙 크기 때문에 이들의 차이가 의미하는 바는 무시할만 하다. 기울기의 값이 임계값 근처일 때(C1, C2)와 임계값보다 훨씬 작은 값일 때(C3, C4) 사용자가 높이 차이를 구분하



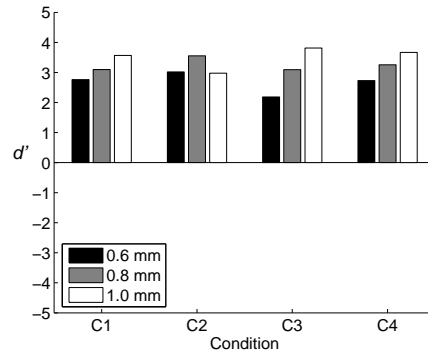
그림 5.11 각 조건에 대한 평균 민감도 지수 d' .

표 5.4 높이 복원 여부에 따른 민감도 지수

$\Delta h(mm)$	$slope = 0$	$slope = 0.05$	$slope = 0.1$
0.6	2.24	2.76	2.19
0.8	2.19	3.10	3.09
1.0	2.59	3.57	3.81

는 능력은 큰 차이를 보이지 않았다. 표면의 높이가 변하는 부분의 너비가 2 mm일 때(C2, C4) 매우 짧은 구간에서 강도와 높이의 변화가 일어났음에도 불구하고 4 mm일 때(C1, C3)와 비교했을 때 d' 값이 비슷하였으며 역시 잘 구분하는 것으로 나타났다.

조건 C1과 C3의 표면 모델은 4.2 절의 실험에서 사용한 표면 모델과 동일하므로 높이 복원이 적용되기 전의 지형 보상 알고리즘과 적용된 후의 알고리즘을 비교할 수 있는데, 이에 대한 민감도 지수를 표 5.4에서 비교하였다. 비록 높이 복원이 적용되었을 때($slope = 0$)와 되지 않았을 때($slope \neq 0$)의 참여한 피실험자들이 다르지만 모두 높이 차이를 매우 잘 구분하는 것으로 나타나 높이 복원 방법이 지형 보상 알고리즘에 적용되더라도 사용자에게 올바른 정보를 제공하는 것을 확인할 수 있다.

표 5.5는 각 조건에서 사용자에게 전달된 높이 차이를 나타낸다. 왼쪽은 표면이 $P_1 \rightarrow P_2$ 로 배치되어 올라가는 경우의 높이 차이를, 오른쪽은 $P_2 \rightarrow P_1$ 으로 배치되어 내려가는 경우의 높이 차이를 나타낸다. 모든 조건에서 높이가 반전이 되는 경우



표 5.5 사용자에게 전달된 높이 차이

Edge Δh	$\Delta p_z(mm)$							
	$P_1 \rightarrow P_2$				$P_2 \rightarrow P_1$			
	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
0.6	0.22	0.54	0.04	0.30	-0.30	-0.25	-0.08	-0.08
0.8	0.79	0.72	0.24	0.68	-0.32	-0.32	-0.14	-0.11
1.0	1.00	0.79	0.59	0.92	-0.51	-0.49	-0.26	-0.24

없이 표면 모델의 정보를 일관되게 전달하는 것을 확인할 수 있다. C1과 C2는 C3와 C4일 때보다 실제 모델의 차이에 가까운 값들이 나왔다. 이는 *slope*의 값이 더 작기 때문에 높이 복원이 천천히 되어 보상된 위치가 유지되는 시간이 길기 때문이다. 그러나 이러한 차이에도 불구하고 C3와 C4의 경우에 피실험자들의 민감도 지수를 보면 C1이나 C2의 민감도 지수와 큰 차이 없이 높은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이 사실을 통하여 아주 작은 표면의 높이 차이가 전달되는 환경에서 표면의 법선이 렌더링되는 것이 높이 차이를 인지하는데 큰 도움이 된다는 사실을 다시 확인할 수 있다.



제 6 장

지형 보상 알고리즘의 구현

균일하지 않은 강도를 갖는 표면에서 지형 보상 알고리즘을 사용하면 사용자는 원래의 가상 표면이 아닌 보상된 위치에 존재하는 표면과 상호 작용을 하게 된다. 보상된 표면의 위치(Compensated Surface Point, CSP)는 식 4.1에서 볼 수 있듯이 표면 접촉 점(Surface Contact Point, SCP)을 알아야 구할 수 있으며 표면 접촉 점은 햅틱 인터페이스 점(Haptic Interface Point, HIP)이 가상 물체의 내부에 존재해야 구할 수 있다. 따라서 지형 보상 알고리즘의 충돌 탐지(Collision Detection)는 이 세 점의 상대적인 위치를 모두 고려해야 한다.

그림 6.1은 HIP, SCP, CSP의 가능한 모든 상대적인 위치를 나타낸다. 이 때 보상된 표면의 높이는 식 4.1에서 보이듯이 매 햅틱 갱신 주기 때마다 적응적으로 달라지는 위치이기 때문에 항상 정해져 있는 값이 아님을 상기하라.

설명상의 편의를 위하여 CSP에 있는 표면의 내부를 CSP의 아래라고 정의하고 외부를 CSP의 위라고 정의할 때, 지형 보상 알고리즘이 렌더링되는 환경에서 충돌이 일어난 경우는 HIP가 CSP의 아래에 존재할 때이며 경우 (1),(2),(3)이 이에 해당한다. 경우 (1)과 (2)는 HIP가 가상 표면의 내부에 있다는 조건을 만족하여 CSP를 구할 수 있지만 경우(3)은 가상 모델의 외부에 존재하기 때문에 SCP를 구할 수 없고 따라서 CSP를 구할 수 없게 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 이전틱의 위치인



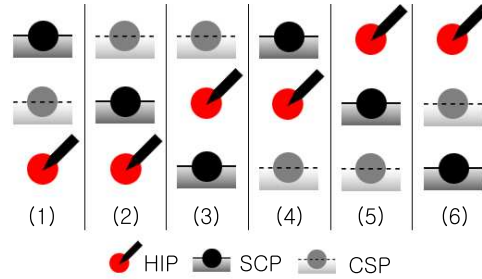


그림 6.1 충돌 탐지시 고려해야 하는 모든 상황

$HIP(n-1)$ 과 $HIP(n)$ 를 잇는 벡터(Vector)와 가상 표면이 접촉하는 점을 ‘임시적 SCP’ SCP_{tmp} 로 정의하고 CSP를 다음과 같이 구한 후 식 4.2를 이용하여 사용자에게 전달할 힘을 계산한다.

$$CSP(n) = SCP(n) + S_h(n) \frac{\overrightarrow{HIP(n) - SCP_{tmp}(n)}}{\|HIP(n) - SCP_{tmp}(n)\|}. \quad (6.1)$$

경우 (4),(5),(6)은 HIP가 CSP의 위에 존재하여 접촉이 일어나지 않을 때의 세 점의 위치를 보인다. (5)와 (6)의 경우 HIP는 가상 표면의 외부에 존재하기 때문에 SCP와 CSP를 구하지 않고 힘을 렌더링 하지 않는다. 그러나 (4)의 경우에는 HIP가 가상 표면의 내부에 있기 때문에 SCP를 구하고 식 4.1과 식 4.2에 의해 힘을 렌더링 하게 된다. 이때의 HIP와 CSP의 상대적인 위치에 의해 힘의 방향이 물체의 외부에서 내부로 향하게 되어 표면으로부터 밖으로 밀어내는 힘이 아닌 안으로 당기는 힘이 렌더링 된다. 이 문제는 비교적 해결하기 쉬운데, HIP가 가상 물체의 내부에 존재하더라도 HIP가 CSP의 위에 있는 경우에는 힘을 렌더링하지 않으면 된다.

다음은 그림 6.1에 나타난 각 경우를 구분하고 그 경우에 해당하는 힘을 렌더링하는 알고리즘이다.



표 6.1 지형 보상 알고리즘.

```

if  $HIP(n)$  is outside of a virtual model
  if  $\overrightarrow{HIP(n) - HIP(n-1)}$  collides with the virtual model
    get  $SCP_{tmp}(n)$  using  $HIP(n)$ . (Eqn. 3.3)
    get  $S_h(n)$ . (Eqn. 3.7)
    restore height. (Eqn. 5.2)
    get CSP (Eqn. 6.1)
    if  $S_h < 0$ 
       $force = \vec{0}$  // case (5)
    else
      if  $\|\overrightarrow{CSP(n) - SCP_{tmp}(n)}\| > \|\overrightarrow{HIP(n) - SCP_{tmp}(n)}\|$ 
        generate force (Eqn. 4.2) // case (3)
      else
         $force = \vec{0}$  // case (6)
    else
       $force = \vec{0}$  // case (5), (6)
  else
    get  $SCP_{tmp}(n)$  using  $HIP(n)$ . (Eqn. 3.3)
    get  $S_h(n)$ . (Eqn. 3.7)
    restore height. (Eqn. 5.2)
    get CSP (Eqn. 4.1)
    if  $\overrightarrow{CSP(n) - HIP(n)} \cdot \overrightarrow{SCP(n) - HIP(n)} < 0$ 
       $force = \vec{0}$  // case (4)
    else
      generate force (Eqn. 4.2) // case (1), (2)

```



제 7 장

결론

지금까지 표면의 강도가 균일하지 않은 환경에서 가상 물체의 표면 모양을 사용자에게 올바르게 전달하기 위하여 힘유지 이론에 기반한 지형 보상 알고리즘을 소개하고 실험을 통해 검증하였다. 표면 보상 알고리즘은 계산이 매우 효율적이고 어느 환경과 조건에서도 가상 표면이 가진 속성을 사용자에게 올바르게 전달하는 특징을 갖고 있다. 특히 지형의 법선이 표현된 환경에서 기존 알고리즘은 사용자에게 따라, 사용자가 시도한 시기에 따라 같은 표면을 다르게 전달하는 문제점을 보였지만 지형 보상 알고리즘은 이에 무관하게 일관되게 올바른 정보를 제공하였다.

지형 보상 알고리즘이 보상하는 높이가 가상 물체가 가진 높이와 차이가 나는 것이 원인이 되어 같은 표면을 탐사 과정에 따라 다르게 렌더링하는 문제와 표면의 높이가 변하는 부분에 대한 오차가 누적되는 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위해 사람의 기울기에 대한 임계값을 실험을 통해 찾아내고 그 값을 이용하여 높이를 복원하는 과정을 지형 보상 알고리즘에 추가하였다. 확장된 알고리즘이 가상 물체가 가진 속성을 일관되게 전달하는지를 정신물리학적 실험을 통하여 분석하였고 그 결과 아주 작은 높이 차이를 가진 두 표면에 대해서도 사용자가 올바르게 인지하도록 정보를 전달함이 검증되었다.

제안한 알고리즘은 가상 물체가 아닌 보상된 표면과 상호 작용하도록 고안이 되



었기 때문에 충돌 처리 과정의 수정이 필요하다. HIP와 SCP, 그리고 CSP의 세 점의 상대적인 위치를 고려하여 지형 보상 알고리즘을 위한 충돌 처리 방법을 설계하였다.

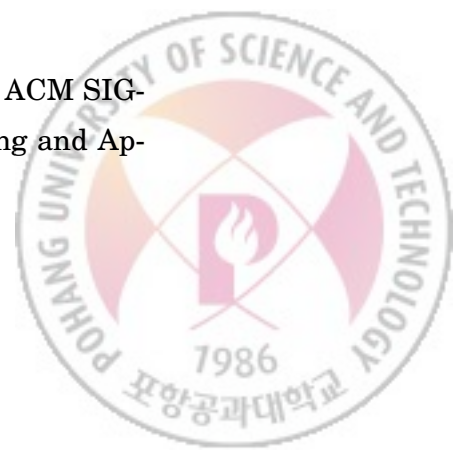
현실에서 물체가 가진 속성들이 서로 보완되거나 상쇄되어 사용자에게 전달하는 정보가 원래의 그것과 다를 수 있다. 강도와 높이의 상충하는 두 속성을 서로에 무관하게 렌더링 하는 것은 현실과 다를 수 있지만 지형 보상 알고리즘의 목적 자체는 높은 현실성이 아니라 보다 정확한 정보 전달임을 유의해야 한다. 따라서 현실에서의 물체의 강도와 높이에 관한 연구 및 비교는 본 논문에서 다루지 않았다.

차후의 과제는 크게 두 개로 요약된다. 첫째로 제안한 알고리즘이 보다 일반적인 가상 표면에서 갖는 성능과 효율성을 살펴보기 위하여 강도와 높이가 다양하게 배치된 환경에서 사용자의 인지 능력을 살펴볼 것이다. 둘째로 하나의 가상 물체뿐만 아니라 여러 가상 물체에 대하여 지형 보상 알고리즘을 적용하기 위해서는 HIP가 가상 표면의 외부에 있더라도 SCP를 찾을 수 있어야 하며 각 객체에 대한 누적 표면 높이를 유지해야만 한다. 이를 위한 자료구조와 알고리즘에 대한 연구를 하도록 하겠다.



참고 문헌

- [1] Otaduy, M.A., Lin, M.C.: Introduction to haptic rendering. In: ACM SIGGRAPH Course Notes on Recent Advances in Haptic Rendering & Applications. (2005) A3–A33
- [2] Brooks, T.L.: Telerobotic response requirements. In: Proceedings of IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics. (1990) 113–120
- [3] Taylor II, R.M., Robinett, W., Chi, V.L., Brooks, Jr., F.P., Wright, W.V., Williams, R.S., Snyder, E.J.: The nanomanipulator: A virtual-reality interface for a scanning tunneling microscope. In: Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. (1993) 127–134
- [4] Maciejewski, R., Choi, S., Ebert, D.S., Tan, H.Z.: Multi-modal perceptualization of volumetric data and its application to molecular docking. In: Proceedings of the World Haptics Conference. (2005) 511–514
- [5] Otaduy, M.A., Lin, M.C.: Introduction to haptic rendering. In: ACM SIGGRAPH Course Notes on Recent Advances in Haptic Rendering and Applications. (2005) A3–A33



- [6] Iwata, H., Noma, H.: Volume haptization. In: Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium. (1993) 16–23
- [7] Avila, R.S., Sobierajski, L.M.: A haptic interaction method for volume visualization. In: Proceedings of the ACM Conference on Visualization. (1996) 197–204
- [8] Lundin, K., Ynnerman, A., Gudmundsson, B.: Proxy-based haptic feedback from volumetric density data. In: Proceedings of Eurohaptics. (2002) 104–109
- [9] Ikits, M., Brederson, J.D., Hansen, C.D., Johnson, C.R.: A constraint-based technique for haptic volume exploration. In: Proceedings of the IEEE Visualization Conference. (2003) 263–269
- [10] Choi, S., Walker, L., Tan, H.Z., Crittenden, S., Reifenberger, R.: Force constancy and its effect on haptic perception of virtual surfaces. *ACM Transactions on Applied Perception* **2**(2) (2005)
- [11] Lederman, S.J., Klatzky, R.L.: Hand movement: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology* **19** (1987) 342–368
- [12] Macmillan, N.A., Creelman, C.D.: *Detection Theory: A User's Guide*. Second edn. Lawrence Erlbaum Associates (1994)
- [13] Salisbury, J.K., Srinivasan, M.A.: Phantom-based haptic interaction with virtual objects. *IEEE Computer Graphics and Applications* **17**(5) (1997) 6–10
- [14] Brisben, A.J., Hsiao, S.S., Johnson, K.O.: Detection of vibration transmitted through an object grasped in the hand. *Journal of Neurophysiology* **81**(4) (1999) 1548–1558
- [15] Levitt, H.: Transformed up-down methods in psychoacoustics. *Journal of the Acoustical Society of America* **49**(2) (1971) 467–477



요약문

힘 유지 이론에 기반한 비균일 강도를 지닌 표면의 모양에 대한 햅틱화

데이터 인지화의 분야에서 가상의 모델이 가진 속성을 사용자에게 정확하게 전달하는 것은 매우 중요한 일이다. 널리 사용되는 페널티 기반 알고리즘이 표면의 강도가 균일하지 않은 환경에서 표면의 높이를 사용자에게 올바르게 전달하지 못하며 이는 힘유지 이론에 의하여 설명된다. 힘유지 이론이란 사용자가 가상의 물체의 모양을 인지하기 위하여 접촉할 때 일정한 힘을 유지한다는 이론이다. 본 논문에서는 이 이론에 기반하여 지적된 문제를 극복하는 표면 보상 알고리즘을 소개한다. 표면 보상 알고리즘은 계산이 매우 효율적이고 어느 조건에서도 가상 표면이 가진 속성을 사용자에게 올바르게 전달하는 특징을 갖는다. 특히 지형의 법선이 표현된 환경에서 기존 알고리즘은 경우에 따라 같은 표면을 다르게 전달하는 문제점을 보였지만 표면 보상 알고리즘은 이에 무관하게 일관된 정보를 제공하였다. 표면 보상 알고리즘이 보상하는 높이와 가상 물체가 가진 높이간의 차이가 원인이 되어 같은 표면을 탐사 과정에 따라 다르게 렌더링하는 문제와 표면의 높이가 변하는 부분에 대하여 오차가 누적되는 문제가 발견되었다. 이를 해결하기 위해 사람의 인지적 특성을 이용하여 높이를 복원하는 과정이 표면 보상 알고리즘에 추가되었고 정신 물리학적 실험을 통하여 확장된 표면 보상 알고리즘이 여전히 가상 물체가 가진 속성을 일관되게 전달하는 것을 검증하였다. 제안한 알고리즘이 보다 일반적인 가상 환경에서의 성능과 효용성 여부를 살펴보기 위해서는 강도와 높이가 다양하게 배치된 환경에서 사용자의 인지 능력을 살펴보아야 하는데 이는 차후의 과제로 남긴다.



감 사 의 글

포항공과대학교에서의 2년은 그 어느때보다 저를 겸손한 사람으로 지내게 하는 시간이었습니다. 나라의 수재들만 간다는 학교에 입학하였다는 자부심은 잠깐, 같은 수업을 듣고 같은 문제를 고민하는 동안 다른 포스테키안들의 사고와 태도를 보며 너무나도 작은 저를 알게 되었습니다. 그들은 사소한 문제도 꼼꼼히 사고하였고, 어떠한 문제에도 피하지 않고 도전하였으며, 논리적이고 합리적인 사고로 일을 진행하는 사람들이었습니다. 이들과 교우하며 보낸 지난 2년은 처음에는 힘들었지만 그들의 존재가 자극이 되고 동기가 되어 제 사고 방식과 삶의 태도를 바꾸기에 충분한 시간이었습니다. 아직은 그들에게서 배워야 할 것이 너무나도 많지만 먼저 이렇게 떠나게 되어 아쉬움의 말을 남깁니다.

먼저 이와 같은 포항공과대학교에서 가르침을 받고 인간 관계를 맺게 해 줄 기회를 주신 김정현 교수님께 먼저 감사의 말씀을 올립니다. 제가 많이 모자람에도 끝까지 용기를 잃지 않게 해주시고 믿어주시고 포기하지 않으시고 꼼꼼하게 저를 살펴 주셔서 감사드립니다.

학업적으로 저에게 헵틱스에 대한 기본 개념과 응용을 꼼꼼히 가르쳐 주시고, 연구적으로 연구가 나아가야 할 방향에 대한 지침을 내려주시고, 인간적으로 연애 문제, 건강 문제를 챙겨주신 스승이시자 지도자이시자 가족이 되어 주셨던 최승문 교수님께 진심으로 감사드립니다. 교수님의 가르침은 바다와 같은데 제가 담아갈 수 있는 가르침은 두손으로 겨우 떠받들 정도여서 아쉽고 죄송스럽습니다.

아무런 관련 배경 지식이 없어 걱정했던 그래픽스에 대하여 명료한 가르침을 주셨던 이승용 교수님께 감사드립니다. 논문에 대해 주신 날카로운 지적들과 조언들도 논문을 완성하는데 크나 큰 도움이 되었습니다.

지난 시간동안 많은 도움과 가르침을 주시고 지금은 각자의 길에 최선을 다하고



감사의 글

계신 진석이 형, 상윤이 형, 남규 형, 진욱이 형, 광훈이 형께도 감사드립니다. 두 달 남짓이었지만 대학원 생활에 적응하는 법을 친절히 가르쳐 주셨던 보현이 형께 감사하고 건이 형과 선명이 누나께도 감사의 말씀 드립니다. 항상 친형처럼 챙겨 주시고 대학원 생활의 방향을 잡아주셨던 재인, 성길, 석희, 종현이 형께도 너무 감사합니다. 같이 고생하였던 동기들 성훈 형, 재훈, 용진이에게도 옆에서 뒤쳐지지 않게 잘 이끌고 와주어서 고맙다는 말 전합니다. 연구실 후배인 인, 채현, 갑종, 인욱이도 동기처럼 편하고 친하게 지내주어서 너무 고맙습니다.

그리고 그 누구보다 저를 낳아주셔서 여기 있게 해 주신 저의 모든 것, 저의 부모님께 감사 말씀 올립니다. 항상 믿고 자식의 안녕을 기도해 주신 덕분에 이렇게 몸과 마음이 건강할 수 있었습니다. 그리고 긴 기간동안 힘든 시간 같이 견뎌온 여자친구 진아에게도 고맙다는 말 전합니다.

저는 많은 애정과 가르침을 받고 포항공과대학교의 석사로서 졸업합니다. 그 명성에 어긋나지 않게 여기서 배운 그 모든 것들을 절대 헛되지 않고 더욱 발전하는 제가 되는 것을 약속드리겠습니다. 다시 한번 포항공대에서의 모든 인연께 감사드리며 감사의 말을 마칩니다.



Curriculum Vitae

Name : Jaeyoung Cheon

Education

2001.3–2005.2 : B.S. in 정보통신공학부, 성균관대학교

2005.3–2007.2 : M.S. in 전자컴퓨터공학부 (컴퓨터공학 가상현실 전공), 포항공과대학교

Thesis Title :

힘 유지 이론에 기반한 비균일 강도를 지닌 표면의 모양에 대한 햅틱화(Haptizing a Surface Height Change with Varying Stiffness Based on Force Constancy)

Advisor: Prof. 최승문



Publications

1. 천재영, 최승문, 김정현, "비균일 강도를 가진 물체 표면의 인지적으로 정확한 햅틱 렌더링", 한국 HCI2006 학술대회 논문집, pp. 203 - 209, 2006.
2. Jane Hwang, Jaehoon Jung, Sunghoon Yim, Jaeyoung Cheon, Sungkil Lee, Seungmoon Choi, and Gerard J. Kim, "Requirements, Implementation and Applications of Hand-held Virtual Reality", *International Journal of Virtual Reality*, pp.59-66, Vol.5. No.2, 2006.
3. Jaeyoung Cheon, Seungmoon Choi, "Perceptualizing a "Haptic Edge" with Varying Stiffness Based on Force Constancy," in *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4282, pp. 392 - 405, Springer (Presented in the 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT)), 2006
4. Jaeyoung Cheon, Seungmoon Choi, "Haptizing a Surface Height Change with Varying Stiffness Based on Force Constancy: Effect of Surface Normals," *To be presented in the World Haptics Conference*, 2007

