모바일 기기에서 흐르는 듯한 진동 감각을 이용한 2차원 방향정보 전달

Tactile Flow: 2-D Directional Information Transfer on Mobile Device

서종만, 최승문
Jongman Seo, Seungmoon Choi

(790-784) 경북 포항시 남구 효자동 포항공과대학교 컴퓨터공학과 HVR 연구실
{cjman224, choism}@postech.ac.kr

요약

본 논문에서는 모바일 기기를 사람이 쥐었을 때 모바일 기기에 부착된 두 개의 진동자를 이용하여 1차원 상에서 한 지점에서 다른 지점으로 연속적으로 움직이는 듯한 진동 감각(이하 Tactile flow)을 구현하였다. Tactile flow는 잘 알려진 촉각적 착각 현상 중 하나인 phantom sensation의 원리를 기반으로, 두 진동의 물리적 강도를 조절하여 구현하였다. 1차원 상에서 선형으로 움직이는 1차원 Tactile flow가 효과적으로 사용자에게 전달되는지 확인하기 위해 Tactile flow의 진동 강도 조절 방식, 지속 시간 및 방향을 변화시켜가며 사용자 인지 실험을 진행하여 구현 가능성을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 네 방향의 1차원 Tactile flow를 조합하여 2차원으로 확장된 Tactile flow를 구현하였으며 인지 구분 실험을 통해 의도한 2차원의 방향정보 표현 및 전달이 가능함을 확인하였다.

Abstract

This paper investigates the feasibility of creating continuously moving vibrotactile sensations (i.e. "Tactile flow") in 1-D using two vibrotactile actuators in a mobile device. Also we found that the Tactile flow can deliver 2-D directional information by combining four 1-D Tactile flows. Tactile flow is implemented by controlling amplitudes of vibro-actuators, based on well-known tactile illusion called "phantom" sensation. We tested whether such sensation can also be elicited in a mobile device via a phychophysical experiment. Experimental conditions differed in vibration rendering method, the duration of a vibrotactile signal, and the direction of sensation movement. After that, we tested the human's discrimination ability of 2-D Tactile flows which is composed of four 1-D Tactile flows.

키워드: 햅틱스, 진동 피드백, 팬텀 센세이션, 촉각 흐름
Keyword: Haptics, Vibrotactile Feedback, Phantom sensation, Tactile flow

논문투고일자 : 2011. 08. 01 심사일자 : 2011. 08. 02 게재확정일자 : 2011. 08. 22

1. 서론

최근 들어 휴대 전화, 휴대용 게임 기기 등의 모바일 기기에 햅틱 피드백을 이용하여 직관적이고 사실적인 정보 전달로 장치와 사용자 간의 상호 작용을 돕고 있고 이에 대한 연구가 진행 중이다 [1].

하지만 제한된 공간으로 인해 일반적으로 모바일 기기에는 하나의 진동자가 포함되어 있다. 하나의 진동자로는 정보 전달량의 증가를 위해 파형의 시간적인 변화를 이용하는 방법 이외에 다른 방법을 적용하기 어렵다. 그러나 사람은 진동의 시간적인 변화에 대해 인지 능력이 뛰어나지 못하므로 [2] 풍부한 정보 전달에 한계가 있다. 2010 년 RIM 사에서 출시된 BlackBerry Storm 2 스마트 폰에서는 압전소자 기반의 진동자를 4 개 배치하여 기존의 스마트 폰에 비해 좀 더 다양한 진동 감각을 제공하려는 시도를 하였다. 이렇듯 다수의 진동자를 사용하면 진동의 공간적 표현이 가능하므로 하나의 진동자를 사용하였을 때에 비해 폭넓은 촉각 정보를 전달할 수 있으나 이를 위해 더 큰 전력소모, 공간차지, 비용 등의 부작용을 감수해야 한다.

이러한 모바일 기기 환경에서 진동을 통한 공간적인 정보 전달을 돕기 위하여 우리는 최소 숫자의 진동자를 이용하여 공간적으로 움직이는 진동 감각에 대해 연구하였다. 이를 통해 시간이 경과함에 따라 모바일 기기의 한쪽 끝에서 반대쪽 끝으로 흐름처럼 연속적으로 이동하는 듯한 진동 혹은 감각을 생성하였고 "Tactile flow"라고 명명하였다. 이 Tactile flow는 직관적으로 수용할 수 있으며 방향 정보를 포함한 많은 양의 정보를 전달할 수 있다. Tactile flow는 촉각적 착각 현상 중 하나인 phantom sensation에 그 이론적 기반을 두고 고안되었다. Phantom sensation은 피부의 인접한 두 지점에 자극을 동시에 주었을 때 두 자극을 구분하여 느끼지 않고 중간 지점에서 하나로 느끼는 현상을 말한다[3]. 이때에 진동이 있는 것으로 느껴지는 지점은 두 진동의 인지강도의 차에 따라 변화하므로 (amplitude inhibition [3]) 두 진동의 세기를 변화시켜 한 쪽 지점에서 다른 쪽 지점으로 움직이는 진동 감각을 느끼도록 할 수 있다.

본 연구에서는 피부(팔목)에 직접 진동자가 닿은 상태에서 phantom sensation을 이용하면 움직이는 진동 감각을 느낄 수 있다는 연구 결과[4]를 바탕으로, 사람이 손에 모바일 기기 등의 매개체를 쥐었을 때 1차원에서 선형적으로 움직이는 진동 감각이 느껴지는지 알아보았다. 이에 대한 검증 및 조건에 대한 진동 자극 인식의 차이 확인을 위해 세기 증가 방식, 지속 시간 및 방향 조건을 달리하여 이에 따른 시간별 인지 자극의 위치와 인지강도를 그래프로 그리도록 하여 확인해 보았다.

나아가서, 1차원 Tactile flow가 가능하면 이를 조합하여 2차원 정보를 전달할 수 있을 것이라는 가정하에 네 개의 진동자를 모바일 기기 모형의 가장 넓은 면에 직사각형 형태로 배치하여 변을 따라 움직이는 flow를 만들어 보았다. 네 변의 1차원 Tactile flow를 조합하여 한글 자음의 ‘ㄴ’ 이나 ‘ㄷ’ 과 같은 모양의 형태와 방향 정보를 동시에 전달할 수 있는지 사용자 인지 실험을 통해 알아보았다.

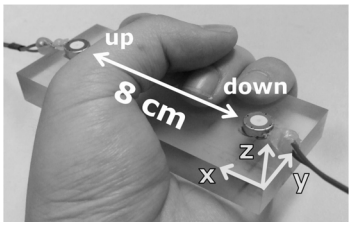
2. 1차원 Tactile flow

먼저 모바일 기기 상에서 1차원에서 선형으로 움직이는 Tactile flow를 구현해보고 이에 대한 사용자 인지 실험을 하였다. 실험의 목적은 1차원 Tactile flow의 가능성 타진 및 Tactile flow의 구현 방법에 따른 인지적인 효과가 어떻게 달라지는지 분석하는 데에 있다.

2.1 실험 설계

2.1.1 실험 장비

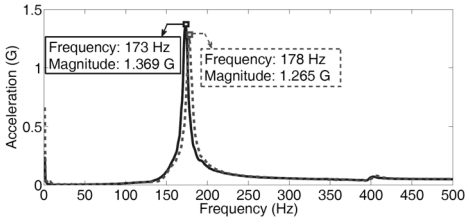
진동자는 보이스 코일 타입의 Linear Resonant Actuators (LRAs)를 사용하였다. LRA는 작고 가벼우며 비교적 빠른 응답 성능을 가지므로 2008 년 이후로 풀터치 스크린 모바일 핸드폰에 주로 사용되어 왔다. LRA의 정격 전압은 공진 주파수인 175 Hz에서 2.8 V (peak-to-peak)이다. 두 개의 LRA를 아크릴로 만든 직육면체 형태의 모바일 기기 모형(10.5 cm × 4.5 cm × 1.5 cm)의 한 쪽 면에 8 cm 간격으로 부착하였다 (그림 1).



(그림 1) 실험에 사용된 핸드폰 모형과 진동자

두 진동자는 연구실에서 주문 제작한 진동 증폭 회로와 연결하였고, 이 회로는 PC에 연결된 DAQ (National Instruments; USB-6251)와 연결되어 있어 PC에서 C++ 언어를 기반으로 작성한 프로그램을 이용해 진동 제어를 할 수 있었다. DAQ에서 진동을 재생할 때 sampling rate는 10 kHz 이었다.

LRA의 공진 주파수는 170 ~ 180 Hz로 제품에 따라 각기 다르다. 두 진동자의 정확한 공진 주파수를 알아보기 위하여 주파수 응답 특성(frequency response)을 측정하였다. 가속도계(model 5134; KISTLER)를 모바일 기기 모형의 중앙에 부착하고 모형을 손으로 쥔 후 사인파 진동을 1부터 500 Hz까지 변화시켜가며 세기를 측정하였다. LRA는 그림 1의 z축을 따라 진동하므로 이 방향에 맞추어 가속도를 측정하였다. 측정 결과 두 진동자의 공진 주파수는 173, 178 Hz로 서로 달랐다 (그림 2).



(그림 2) 두 진동자의 frequency response

두 진동의 주파수가 다르면 amplitude modulation으로 인해 두 파형이 중첩되어 그 차이의 반만큼의 주파수의 진동이 모바일 기기 모형 전체에 섞이게 된다. 낮은 주파수의 진동이 섞이는 효과를 막기 위해 두 진동의 주파수를 최대 진폭을 낼 수 있는 174 Hz로 일치시켰다.

진동자를 원하는 물리적 가속도 세기로 정확하게 재생하기 위해 두 진동자의 세기에 대한 I/O calibration을 하였다. 가속도계를 모바일 기기 모형에 부착하고 모형을 손에 쥔 뒤 입력 전압에 해당하는 가속도 값을 측정하였다. 그 다음 이를 역연산하여 20 단계의 가속도 값을 발생시키기 위한 입력 전압의 값을 선형 보간법을 통해 추정하였다.

또한 두 진동 간의 위상차가 발생하면 간섭 효과로 인해 모형 전체에 가해지는 진동의 세기가 크게 감소할 수 있다. 이를 막기 위해 두 진동의 위상차를 바꿔가며 가장 간섭이 적은(모형 전체에 가해지는 진동의 세기가 가장 큰) 조건을 찾아서 그대로 실험에 적용하였다.

2.1.2 진동 렌더링 알고리즘

1차원 Tactile flow를 구현하기 위해 두 가지 진동 렌더링 알고리즘을 사용하였다. 이는 phantom sensation을 원리로 하는 amplitude inhibition algorithm [3] 을 기반으로 한 것이다.

T 를 Tactile flow의 전체 지속 시간이라고 하고 $a_1(t)$ 와 $a_2(t)$ 를 시간 t 에서의 진동가속도 크기라고 하였을 때, 선형 증가 렌더링 방식은 한 LRA의 가속도 세기는 시간이 경과함에 따라 선형으로 증가하는 동안에 다른 LRA의 가속도 크기는 선형으로 감소하는 알고리즘을 말한다. 즉 수식으로 표현하면

$$a_1(t) = a_{\max}\frac{t}{T} \text{ and } a_2(t) = a_{\max}(1-\frac{t}{T})$$

이다. ($a_{\max}$: 최대 가속도 세기)

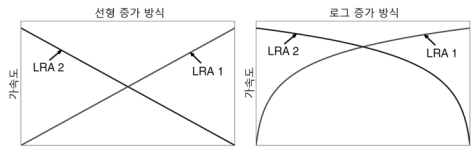
반면에 로그 증가 렌더링 방식은 로그 함수 형태로 가속도의 크기가 증감하는 알고리즘이며, 수식으로 표현하면

$$a_1(t) = a_{\max}\frac{\log(t+1)}{\log(T+1)} \quad \text{and}$$

$$a_2(t) = a_{\max}\left(1-\frac{\log(t+1)}{\log(T+1)}\right)$$

와 같다.

두 진동 렌더링 알고리즘은 그림 3 에 그래프로 표현되어 있다.



(그림 3) 실험에 적용된 두 가지 진동 세기 증가 방식

파일럿 실험을 통해 두 방식 모두 LRA 2 에서 LRA 1 으로 선형으로 연속적으로 움직이는 듯한 느낌을 전달하는 것을 확인하였다. 실험에서 a_{max}는 1.5688 G로 설정하였으며, 이 가속도 값은 2.1.1 에서 서술한 바에 따라 진동의 세기에 대한 I/O calibration 데이터를 참고하여 입력 전압으로 변환하여 진동으로 가하였다.

2.1.3 실험 진행

만 20 세에서 29 세 사이의 실험 참가자 10 명(평균 만 22.7 세, 남자 8 명, 여자 2 명)을 대상으로 실험을 하였다. 모두 오른손잡이였으며 매일 모바일 기기를 사용하고 있었다. 실험에서는 왼손에 아크릴로 만들어진 모바일 기기 모형을 쥐고 진동을 느끼도록 하였다.

실험은 세 가지 독립 변수로 구성되었다. 하나는 진동 세기 증가 방식으로, 선형 증가 렌더링 방식과 로그 증가 렌더링 방식의 두 가지를 사용하였다 (그림 3). 두 번째 변수는 Tactile flow의 지속 시간으로, 4 초와 8 초 두 가지이며, 모형에서 진동자가 8 cm 간격으로 떨어져 있으므로 각각의 지속 시간은 진동 감각이 움직이는 속도인 2 cm/s, 1 cm/s 로 대응된다. 세 번째 변수는 진동이 이동하는 방향이며 그림 1에 나타난 것과 같이 위쪽, 아래쪽으로 구분하였다.

실험은 연습 세션과 본 세션으로 나누어 진행하였다. 연습 세션에서는 세 가지 독립 변수를 조합한 8 가지의 Tactile flow 를 2 회씩 반복하여 총 16 회의 진동을 무작위 순서로 제공하였다. 본 세션에서는 연습에서 2 회씩 반복하던 것을 5 회로 늘려 총 40 회 (8×5) 의 진동을 무작위 순서로 제공하였다. 연습 세션과 본 세션은 오직 반복으로 제공하는 횟수만 달랐다.

한 trial에서(한 가지 진동이 제시되었을 때) 실험 참가자로 하여금 시간이 경과함에 따라 인지 자극의 위치와 인지강도가 변화하는 패턴을 그래프로 그리도록 하였다. Tactile flow가 한 번 제시되면 실험 참가자는 먼저 시간 경과에 따른 인지 자극의 위치를 7단계로 표현하는 그래프를 오른손으로 그리도록 하였다 (그림 4). 그래프의 x 축인 상대 시간 값이 0 인 것은 진동이 재생 시작 시점을 말하고, 상대 시간 값이 6 인 것은 진동 재생이 끝난 시점을 의미한다. Y 축은 인지 자극의 위치를 나타내며 0 과 6 의 값이 각각 위, 아래에 부착된 진동자의 위치와 대응된다. 위치에 대한 그래프를 그리고 나면 그 다음에는 시간 경과에 따른 인지강도에 대한 그래프를 그리도록 하였다. 세기에 대한 기준을 제시하기 위해 Tactile flow가 재생되기 전에 1초간 a_{max}의 세기로 기준 진동을 제시하고 1초 뒤에 Tactile flow를 재생하였다. 그래프에서 인지강도의 값이 0 인 것은 진동이 전혀 느껴지지 않았음을 의미한다.

실험 도중에 청각적인 효과를 배제하기 위하여 실험 참가자는 white noise가 재생되는 헤드폰과 귀마개를 착용하였으며, 실험은 한 명당 약 한 시간 정도 진행되었다. 실험 참가자는 원하는 때에 언제든지 쉴 수 있도록 하였다.

2.1.4 데이터 분석 방법

1차원 Tactile flow의 평가를 위해 두 가지 척도에 주목하였다. 첫 번째는 인지 자극 위치의 변화량으로 (이하 α), 시간-인지 자극 위치 그래프에서 추세선의 기울기 절댓값으로 정의하였다. α값이 클수록 진동 발생 위치가 많은 거리를 이동한 것처럼 느껴지는 것을 의미한다. 두 번째는 인지강도의 변화량으로 (이하 β), 시간-인지강도 그래프에서 인지강도의 분산으로 정의하였다. β가 낮을수록 Tactile flow가 재생되는 동안 일정한 세기로 진동이 느껴졌음을 의미한다.

2.2 실험 결과 및 분석

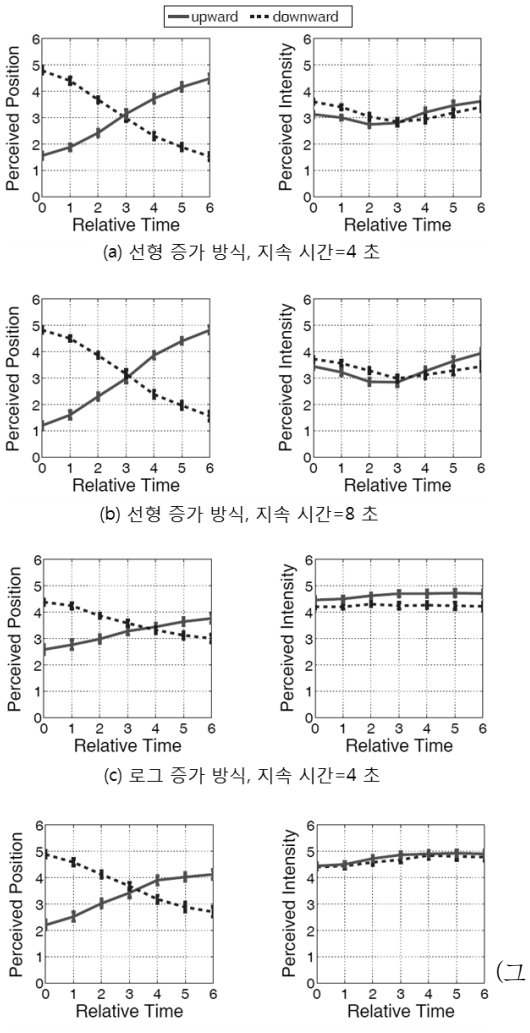
실험 참가자가 Tactile flow에 대해 작성한 그래프들을 실험 참가자와 trial에 대해 평균을 내었다. 그 결과는 그림 4 에 나타나 있다.

시간-인지 자극의 위치 그래프에서 모두 선형에 가

까운 변화가 있음을 확인할 수 있고 위치의 변화는 총 7단계(=8 cm)중에서 조건에 따라 최대 3.62단계(=4.827 cm), 최소 1.18단계(=1.573 cm)로 나타났다. 세 가지 독립 변수(진동 렌더링 방식, 진동 지속 시간, 방향)에 대해 three-way ANOVA 분석을 해 본 결과 진동 렌더링 방식과 지속 시간은 α에 대해 통계적으로 유의한 영향을 미쳤으나 (진동 렌더링 방식: $F(1,9)=116.95$, $p<0.0001$; 진동 지속 시간: $F(1,9)=5.79$, $p=0.0395$) 방향은 α에 대해 모두 유의한 영향을 미치지 않았다 ($F(1,9)=0.16$, $p=0.6974$).

방향이 유의한 영향을 미치지 않는 요소이므로 진동 렌더링 방식과 진동 지속 시간의 조합인 네 가지 조건에 대해 α의 평균값을 구하였다. 그 결과는 표 1에 나타나 있으며 선형 증가 방식이 로그 증가 방식에 비해 α값이 큰 것을 보아 진동이 더 많은 거리를 움직인 것처럼 느껴졌다는 것을 알 수 있다. 진동 지속 시간에 대해서는 느리게 움직인 진동(진동 지속 시간=8 초; 1 cm/s 에 대응됨)이 빠르게 움직인 진동(진동 지속 시간=4초; 2 cm/s 에 대응됨)보다 α값이 컸다. 즉 느리게 움직인 진동이 더 많은 거리를 움직인 것처럼 느껴졌다는 것을 의미한다.

한편 진동 세기 변화량인 β에 대한 three-way ANOVA 분석 결과 α의 분석 결과와 같이 진동 렌더링 방식과 진동 지속시간은 β에 대해 통계적으로 유의한 영향을 미쳤으나 (진동 렌더링 방식: $F(1,9)=9.03$, $p=0.0148$; 진동 지속 시간: $F(1,9)=13.53$, $p=0.0051$) 방향은 그렇지 않았다 ($F(1,9)<0.005$, $p=0.9515$). 그 결과는 역시 표 1에 정리되어 있으며, 로그 증가 방식이 선형 증가 방식에 비해 β값이 작은 것을 보아 좀 더 진동이 일정한 세기로 이동하는 것처럼 느껴졌다는 것을 알 수 있다. 진동 지속 시간에 대해서는 빠르게 움직인 진동이 느리게 움직인 진동보다 β값이 작으며, 빠르게 움직인 진동이 더 일정한 세기로 이동한 것처럼 느껴졌다는 것을 말한다. 진동의 세기 변화는 그림 4 에서 볼 수 있듯이 대부분 U 자 형태로, 중간에서 세기가 다소 감소하는 패턴이 대부분이었다.



(그림 4) 피실험자들이 응답한 Tactile flow의 시간에 따른 위치와 강도의 평균값

<표 1> 인지 자극 위치의 변화량 (α)과 인지강도의 변화량 (β)

진동 세기 증가 방식	지속시간 (초)	α의 평균	β의 평균
선형 증가 방식	4	0.558	0.512
	8	0.614	0.641
로그 증가 방식	4	0.246	0.175
	8	0.396	0.306

2.3 토의

실험을 통해 단 두 개의 진동자를 사용하여도 모바일 기기에서 사람의 손을 통해 연속적으로 움직이는 듯한 감각을 재생할 수 있음을 확인하였다. 세 가지 독립 변수 중에서 진동 렌더링 방식과 진동의 지속 시간만이 Tactile flow의 인지적 효과에 영향을 미쳤고 방향은 그렇지 않았다. 선형 증가 방식이면서 느리게 움직이는 Tactile flow가 로그 증가 방식이면서 빠르게 움직이는 Tactile flow에 비해 더 많은 이동 거리를 움직이는 듯이 느껴졌다. Tactile flow의 구현 방법을 바꾸는 것으로 움직임의 인지적 이동거리를 바꿀 수 있음을 의미하며, 1차원 벡터를 표현하는 데에 유용하게 사용될 수 있다. 세기에 대해서는, 로그 증가 방식이면서 빠르게 움직이는 Tactile flow가 선형 증가 방식이면서 느리게 움직이는 Tactile flow에 비해 일정한 세기로 움직이는 것처럼 느껴졌다. 이는 사용자에게 좀 더 자연스럽게 하나의 진동이 부드럽게 이동한다는 느낌을 주었을 것이다. 이런 trade-off는 용도에 맞게 진동을 디자인 할 때 중요하게 고려되어야 할 것이다.

실험에서 진동 지속 시간을 진동의 이동 속도가 1 cm/s 혹은 2 cm/s 에 대응되는 4 초나 8 초로 설정하였는데, 실제 응용을 고려해보면 이는 상당히 긴 시간이기 때문에 적합하지 못할 수 있다. 추가적인 파일럿 실험을 통해 4 cm/s, 8 cm/s, 10 cm/s 등의 빠른 속도로 움직이도록 재생을 해본 결과 연속적으로 움직이는 듯한 느낌을 여전히 전달하는 것을 확인하였다.

실험 뒤에 모바일 기기 모형이 아닌 팔목에 진동자를 붙이고 Tactile flow를 재생시켜 보았더니 그 세기가 상당히 약했다. 모형과 같은 매개체를 통해 손 전체로 진동 자극이 전달되기 때문에 Tactile flow의 느낌이나 강도가 증가하였으며 모형의 진동 전파 역학을 파악하면 더 정확한 원리를 파악할 수 있을 것이다.

3. 2차원 Tactile flow

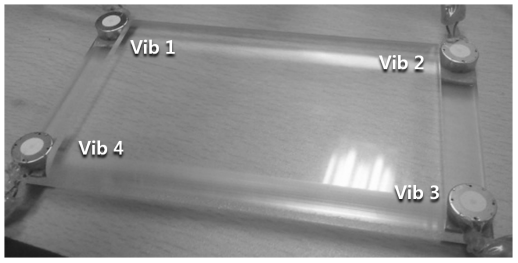
앞 장에서 1차원 Tactile flow를 구현하였고 이의 가능성을 확인하였다. 우리는 2차원으로 개념을 확장하여 1차원 Tactile flow를 조합해서 사방(四方)의 방향 전달이 가능한지 알아보았다. 또한 다른 방향의 1차원 Tactile flow를 연이어 재생시켜서 한글 자음의 'ㄴ' 이나 'ㄷ', 혹은 직사각형의 형태를 마치 획을 긋듯이 진동 자극이 움직이는 듯한 느낌을 받으며 전달할 수 있는지 살펴보았다.

실험에서는 2차원 상의 Tactile flow를 네 가지 진동자를 이용하여 설계하고, 이들의 정보 전달량이 얼마나 되는지 알아보았다.

3.1 실험 설계

3.1.1 실험 장비

2 장에서 사용한 아크릴로 만든 모바일 기기 모형은 장시간 쥐고 있으면 쉽게 피로해지는 단점이 있다. 2차원으로 Tactile flow 실험을 확장하였을 때 실험 시간이 길어질 것을 우려하여 손에 쥐어도 불편함이 없도록 모서리가 둥근 형태의 새로운 아크릴 모바일 기기 모형을 사용하였다. 크기는 11 cm × 6 cm ×1 cm 이며 진동자가 부착될 수 있는 부분을 0.5 cm 높이로 깎아서 사람이 쥐었을 때 손에 잘 닿지 않도록 제작되었다 (그림 5).



(그림 5) 2차원 Tactile flow 실험에 사용한 모바일 기기 모형

네 모서리에 각각 네 개의 진동자 (LRA)를 부착하였으며 진동자 간의 간격은 긴 변이 10 cm, 짧은 변이 5 cm 이었다(진동자 중심 기준). 네 개의 진동자의 물리적인 가속도 세기를 원하는 값과 정확히 일치시키기 위해 intensity calibration을 하였으며, 방법은 2 장에서 서술한 것과 같다. 네 개의 진동은 모두 175 Hz로 구동하였다.

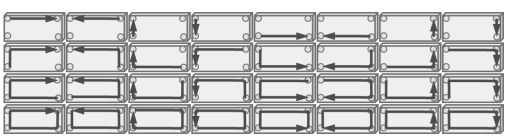
진동자들은 연구실에서 자체 제작한 진동 증폭 회로와 연결이 되어 있고, 이 회로는 다시 PC와 연결된 DAQ (NI PCI-6723; National Instruments)와 연결되어 있다. 사용한 실험 장비들의 기능 및 성능은 제 2장에서 사용한 실험 장비와 크게 다르지 않으며, 진동자 간의 간격이 10 cm 인 경우와 5 cm 인 경우 모두 2 장에서 소개했던 8 cm 진동자 간격의 1차원 Tactile flow의 느낌과 크게 다르지 않음을 간단한 파일럿 실험을 통해 확인하였다.

3.1.2 실험 자극 설계

네 개의 진동자를 직사각형 형태로 모바일 기기 모형의 넓은 면에 부착하고, 직사각형의 변을 따라 1차원 Tactile flow가 흐르도록 설계하였다. 1차원 Tactile flow의 진동 세기 증가 방식은 선형 증가 방식을 택하였고, 진동 지속 시간은 10 cm/s 로 진동이 움직이는 속도에 대응되는 길이로 하였다. 앞서 2.2에서 언급하였듯이 2 장에서는 1 cm/s, 2 cm/s 의 Tactile flow가 움직이는 속도에 대해서 실험을 하였는데, 실제 응용을 고려해보면 좀 더 빠르고 짧은 시간 안에 움직여도 인식이 가능해야 정보 전달 매개체의 가치가 있으므로 다소 높은 속도인 10 cm/s 로 정하였다.

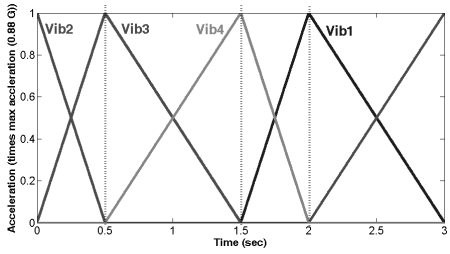
1차원 Tactile flow를 조합하여 2차원 상에서 총 32 가지의 진동 자극을 구현하였다 (그림 6).

진동 자극은 가장 처음에 재생되는 1차원 Tactile flow의 변의 위치 (윗변, 아랫변, 좌변, 우변의 4 군데), 조합된 1차원 Tactile flow의 개수 (1 개 ~ 4 개), 방향 (시계 방향, 반시계 방향)에 따라 구분할 수 있다.



(그림 6) 1차원 Tactile flow의 조합을 통한 32가지 진동 자극

1차원 Tactile flow의 속도를 10 cm/s 로 설정하였으므로 가로로 움직이는 flow는 1 초간, 세로로 움직이는 flow는 0.5 초간 재생된다. 1차원 Tactile flow의 개수가 두 개 이상 조합된 경우는 첫 번째 1차원 Tactile flow의 재생이 끝나면 연이어 두 번째 1차원 Tactile flow가 재생되는 방식이다. 따라서 1차원 Tactile flow의 개수가 네 개로 조합된 경우 총 3 초간(0.5 + 1 + 0.5 + 1 초) 진동이 재생된다 (그림 7). 그림 7 에서 0 초와 0.5 초 사이에는 선형 증가 방식을 이용하여 진동자 2에서 진동자 3으로 1차원 Tactile flow가 재생된다. 연이어 0.5 초와 1.5 초 사이에 진동자 3에서 진동자 4로 flow가 재생되며 이런 양태로 직사각형을 그리며 재생이 된다.



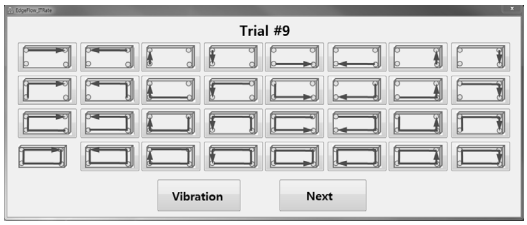
(그림 7) 그림 6의 맨 좌측 하단에 위치한 2차원 Tactile flow 진동 재생을 위한 가속도 profile

3.1.3 실험 진행 과정

실험 참가자는 앞서 언급한 32 가지의 진동 자극 중에서 하나를 느끼고 이에 해당하는 진동이 32 가지 중 어떤 것인지 맞추는 실험을 하나의 trial로 하고, 이를 반복하였다. 본 실험이 진행되기 전에 실험 참가자에게 진동 자극에 대해 익숙해지게 하기 위하여 32 가지 진동 자극을 순차적으로 2 회 이상 느낄 수 있도록 하였다. 이 때 시각적으로 진동 자극의 종류를 그림 아이콘을 통해 알려주었다.

본 실험에서는 32가지 진동 자극을 각각 5 회씩 랜덤하게 제공하여 총 160개의 trial로 실험이 구성되었다. 진동을 느끼고 응답하는 과정은 MFC로 작성한 GUI 프로그램을 통해 이루어졌다 (그림 8). 매 trial 마다 32 가지 진동 중 하나가 랜덤으로 제공되며, "Vibration" 버튼을 누르면 해당 진동을 느낄 수 있다. Vibration 버튼은 누르는 동시에 사라지며, 진동이 재생되고 나서 2 초가 지난 뒤에 다시 버튼이 나타난다. 이는 사용자에게 강제로 2 초간 휴식 시간을

갖게 하는 것으로, adaptation 효과를 줄이기 위한 것이다. 사용자는 Vibration 버튼을 원하는 만큼의



(그림 8) 실험에 사용한 MFC 기반 GUI 프로그램. 맨 좌측 하단의 그림 버튼은 사용자에 의해 클릭이 되어 버튼이 비활성화된 상태임.

을 원하는 만큼의 횟수로 클릭해 볼 수 있었다. 사용자는 진동의 종류에 대한 판단이 서면 화면에 있는 그림 버튼을 누르고 "Next" 버튼을 눌러서 다음 trial을 진행한다. 실험 도중에 피로를 느끼면 언제든지 쉴 수 있도록 하였다.

3.1.4 데이터 분석 방법

실험 참가자들의 응답 결과를 바탕으로 주어진 자극이 무엇인지 맞추는 인식률와 정보 전달량 (Estimated information transfer, IT_{est} [5])을 계산하였다. IT_{est} (bits) 는 자극이 사람에게 전달되었을 때 받아들일 수 있는 정보의 양을 비트 단위로 표현한 것이다. K 개의 자극 ($S_i, 1 \le i \le K$) 이 실험에서 주어지고 이와 일대일 대응되는 반응 ($R_j, 1 \le j \le K$) 이 있을 때, $IT_{est} = \sum_{j=1}^{K}\sum_{i=1}^{K} \frac{n_{ij}}{n} log_2\left(\frac{n_{ij} \cdot n}{n_i \cdot n_j}\right)$ 이며, 이 때 n은 모든 trial의 합, n_{ij}는 S_i와 R_j가 동시에 일어난 횟수, $n_i = \sum_{j=1}^{K} n_{ij}$ 와 $n_j = \sum_{i=1}^{K} n_{ij}$ 는 반응과 자극에 대해 합을 하여 특정 자극 혹은 반응이 일어난 횟수를 의미한다.

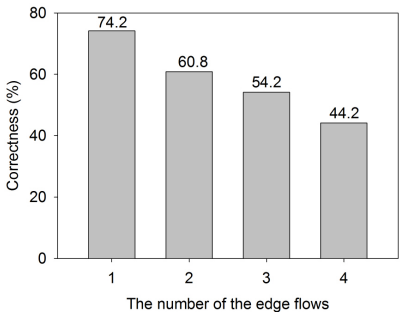
3.2 실험 결과 및 분석

IT_{est} 는 3명의 실험 참가자 별로 3.606, 3.908, 3.595 bit으로 나타났으며, 평균 3.703 bit 만큼의 정보량을 제공하는 것으로 나타났다. 평균값에 대한 2 IT_{est} 는 약 13 이었다.

32 개 각각의 진동 자극에 대한 vibration 버튼 클릭 횟수와 정답률을 살펴보았다 (그림 9). 정답률이란, 어떠한 진동 자극이 제시되었을 때 전체 응답 중에서 제시된 진동 자극으로 올바르게 응답한 경우의 비율을 말한다.

(그림 9) 각 진동 자극에 대한 평균 버튼 클릭 횟수 (왼쪽 회색 글자)와 평균 정답 (오른쪽 검정 글자)

앞서 32 개의 진동 자극을 가장 처음에 재생되는 1차원 Tactile flow의 변의 위치, 1차원 Tactile flow의 개수, 방향의 세 가지로 구분해 보았다. 세 가지 독립 변수에 대한 분석을 위해 실험 참가자에 대해 평균을 낸 데이터에서 진동 자극의 정답률과 독립 변수들 간의 분산분석을 실시하였다. three-way ANOVA 분석 결과, 1차원 Tactile flow의 개수 만이 진동 자극의 정답률에 유의한 영향을 미치고 ($F(3,6)=7.66$, $p=0.0178$), 다른 factor들은 그렇지 않았다 (flow의 시작 위치: $F(3,6)=3.23$, $p=0.1031$; flow의 개수×flow의 시작 위치: $F(9,18)=1.24$, $p=0.3309$; flow의 시작 위치×방향: $F(3,6)=1.80$, $p=0.2465$). Flow의 개수에 따른 평균 정답률은 그림 10에서와 같이 flow의 개수가 증가할수록 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

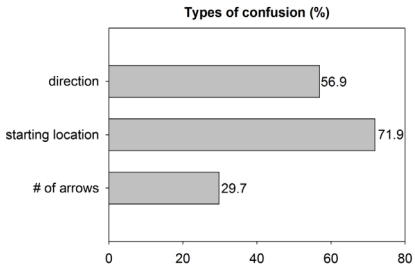


(그림 10) Flow의 개수에 따른 진동 자극에 대한 정답률

세 가지 독립 변수 중에서 혼동 원인, 즉 어떤 독립

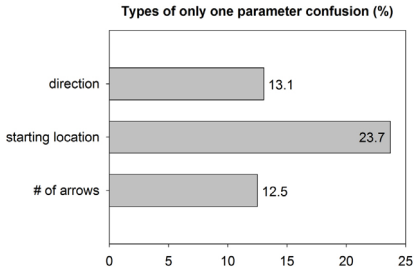
변수가 주어진 자극을 맞추는 데에 어려움을 주었는지 살펴보았다. 혼동 원인은 맞추지 못한 자극 중에서 특정 독립 변수로 인해 맞추지 못한 자극의 비율로 구하였다. 방향을 예로 들면, 전체 틀린 자극 개수 중에서 방향으로 인해 틀린 자극의 개수의 비율을 말한다. 결과는 그림 11 에 나타나 있다.

세 파라미터 중에서 flow의 시작 위치에 대한 혼동이 가장 많았고, 1차원 Tactile flow의 개수에 대한 혼동이 가장 적었다.



(그림 11) 진동 자극 구별 실패의 혼동 원인

또한 오직 한 독립 변수에 의한 혼동에 대해서 살펴보았다. 즉 맞추지 못한 자극 중에서 다른 독립 변수는 다 맞추었지만 한 자극만 맞추지 못한 경우이다. 방향을 예로 들면, 전체 틀린 자극 개수 중에서 오직 방향만 틀리고 다른 독립 변수는 다 맞은 자극의 개수의 비율을 말한다. 결과는 그림 12 에 나타나있다. 이 결과 역시 세 파라미터 중에서 flow의 시작 위치에 대한 혼동이 가장 많았다.



(그림 12) 다른 독립 변수는 맞았으나 오직 한 독립 변수에 의해 혼동이 일어난 비율

3.3 토의

2차원 상에서 1차원 Tactile flow를 조합하여 사방으로 움직이는 패턴을 만들어 본 결과, IT_{est} 가 3.703 bit 정도로 상당한 정보량을 전달할 수 있음을 확인하였다. 2010 년 Georgia Tech.에서 손목에 직접 부착하는 촉감 제시 장치에 3개의 진동 모터를 부착하고 방향이나 지속 시간을 바꾸어가며 IT_{est}를 구한 연구 [6]가 수행되었는데, 이 때의 결과가 4.28 bit 이었다. LRA에 비해 다소 강한 진동자를 피부에 직접 닿게 한 실험이었으며, 이와 비교해 보았을 때 크게 뒤처지지 않는 결과이다.

그러나 조합한 1차원 Tactile flow의 개수가 증가하여 패턴이 복잡해지면 자극을 구별해내는 능력이 상당히 낮아졌다. 대신 단순한 패턴의 진동은 구별을 잘 하는 것으로 보이며 2차원 상에서 벡터 정보를 전달할 때 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 특히 진동 네비게이션이나 핸드폰 UI 조작의 일부인 스크롤 조작 또는 화면 넘김 등에 적용될 수 있다.

세 가지 독립 변수 중에서 1차원 Tactile flow의 개수에 대한 혼동이 가장 적었는데, 개수의 변화로 인한 지속 시간의 변화에 대해 구별 능력이 높아 이런 결과가 나온 것으로 추측된다.

Tactile flow의 시작 위치에 대한 혼동이 가장 많았는데, Tactile flow의 속도가 다소 빨랐던 것이 그 원인으로 추측된다. 다른 독립 변수는 다 맞았으나 Tactile flow의 시작 위치만 틀린 비율도 가장 많았는데, 2차원 상에서 한 방향으로 회전하듯이 빠르게 flow가 재생되면 시작 위치보다는 방향에 대한 인식률이 더 높음을 의미한다. 시작 위치가 중요하지 않고 회전하는 방향이 중요한 경우에는 본 연구에서 제안하는 방법이 효과적일 수 있다.

제안한 2차원 Tactile flow의 인지 능력에 대해서는 학습 효과가 어느 정도 있을 것으로 예상된다. 실험을 디자인하는 과정에서 진동을 많이 접해본 실험 진행자와 일반 실험 참가자의 구별 능력이 달랐는데, 실험 진행자의 구별 능력이 좀 더 높았다. 간단한 파일럿 실험을 통해 2차원 Tactile flow를 많이 접할수록 정보 전달량이 늘어나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 학습 효과가 어느 정도 수렴한 단계에서 최대로 전달할 수 있는 정보 전달량이 얼마나 되는지 파악해 보는 것도 상당히 의미가 있을 것이다.

4. 결론

사용자가 모바일 기기를 쥐었을 때 모바일 기기를 통해 1차원 혹은 2차원 상에서 연속적으로 움직이는 듯한 진동 감각을 전달할 수 있음을 확인하였다. 또한 2차원 상의 Tactile flow를 이용하여 방향 정보 전달이 어느 정도 가능하다는 것을 확인하였다.

1차원 상에서 선형으로 움직이는 Tactile flow는 두 개의 진동자로 표현할 수 있었으며, 진동 렌더링 방식과 진동이 움직이는 속도에 따라 인지적인 효과가 다르게 나타났다. 이동거리가 긴 Tactile flow를 제공하기 위해서는 선형 증가 방식과 느린 진동 이동 속도가 필요하고, 일정한 세기의 부드러운 Tactile flow를 제공하기 위해서는 로그 증가 방식과 빠른 진동 이동 속도가 필요했다.

2차원 상에서 움직이는 Tactile flow는 1차원 Tactile flow를 조합하여 표현할 수 있었으며, 진동자 네 개를 이용하여 직사각형 형태로 배치하고 32 가지의 진동 패턴을 만들어 인지 실험을 진행한 결과 약 3.7 bit (13 가지) 정도의 정보 전달량을 갖고 있음을 추측할 수 있었다. 조합이 많아져서 복잡도가 증가할수록 인식률이 낮아졌다.

본 연구에서 제안한 방법을 통해서 2차원 상에서 진동을 이용하여 촉각적으로 방향 정보 및 형태 정보를 전달할 수 있으며 이는 모바일 기기의 수많은 어플리케이션에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

▌Acknowledgement

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 도약연구지원사업(No. 2010-0018454)과 기초연구실육성사업(No. 2010-0019523), 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(NIPA-2011-C1090-1111-0008)의 지원을 받아 수행된 연구임.

▌참고문헌

[1] E. Hoggan, S. A. Brewster, and J. Johnston, "Investigating the effectiveness of tactile feedback for mobile touchscreens", In Proceeding of the Annual SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1573-1582, 2008.

[2] R. T. Verrillo and G. A. Gescheider, "Perception via the sense of touch", In I.R. Summers, editor, Tactile Aids for the Hearing Impaired, pp. 1-36, 1992.

[3] D. S. Allies, "Information transmission by phantom sensations", IEEE Transactions on Man-Machine Systems, MMS-11(1), pp. 85-91, 1970.

[4] J. Cha, L. Rahal, and A. E. Saddick, "A pilot study on simulating continuous sensation with two vibrating motors", In Proceedings of the IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications, pp. 143-147, 2008.

[5] H. Z. Tan, C. M. Reed, and N. I. Durlach, "Optimum Information-Transfer Rates for Communication through Haptic and Other Sensory Modalities", IEEE Transactions on Haptics, Vol. 3, No. 2, pp. 98-108, 2010

[6] S. C. Lee and T. Starner, "BuzzWear: Alert Perception in Wearable Tactile Displays on the Wrist",In proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems (CHI 2010), pp.433-442, 2010.

▌저자소개

◆ 서 종 만

- 2009 포항공과대학교 컴퓨터공학과 학사
- 2009~ 현재 포항공과대학교 컴퓨터공학과 통합 석·박사 과정
- 관심분야 : Vibrotactile on Mobile Device

◆ 최 승 문

- 포항공과대학교 컴퓨터공학과 조교수(2005.7~), 부교수(2010.3~)
- IEEE Technical Community on Haptics 공동의장(2010.3~)
- 한국차세대컴퓨팅학회 이사, 한국로봇학회 이사 등(2009.3~)
- 햅틱스, 가상현실, HCI, 로보틱스 등