
모바일 기기 진동의 인지적 특성

Perceptual Characteristics of Mobile Device Vibrations

최승문, Seungmoon Choi
포항공과대학교 컴퓨터공학과 햅틱스 및 가상현실 연구실
choism@postech.ac.kr

요약 본 논문은 2008 한국 HCI 학회 중 개최되는 햅틱스 관련 연구 워크샵에 “모바일 기기 진동의 인지적 특성”이라는 제목으로 발표하기 위하여, 포항공과대학교 햅틱스 및 가상현실 연구실에서 수행된 모바일 기기 진동 관련 연구를 주요 결과 중심으로 요약한 것이다. 모바일 기기에서 발생하는 진동의 물리적 특성, 절대 인지 역치, 인식 강도, 인지적으로 정확한 진동 효과를 유발하기 위한 렌더링 방법 등에 대해서 간략하게 서술한다.

Abstract This paper summarizes research results on the perceptual characteristics of mobile device vibrations carried out in the Haptics and Virtual Reality Laboratory at POSTECH, as a companion paper for the presentation to be offered in the haptics workshop of Korea HCI 2008. The physical characteristics, the absolute detection thresholds, and the perceived magnitudes of mobile device vibrations are briefly summarized, followed introduction to perceptually transparent vibration rendering.

핵심어: *Vibrotactile feedback, vibration, mobile device, handheld device, physical characteristics, absolute detection threshold, perceived magnitude, perceptually transparent rendering*

1. 서론

본 논문에서는 2008 한국 HCI 학회에서 개최되는 햅틱스 관련 연구 워크샵에 발표할 내용을 간략하게 요약한다. 논문의 목표는 모바일 기기에서 발생시킬 수 있는 진동 피드백(Vibrotactile Feedback)에 대한 기본적인 지식을 전달하는데 있다. 따라서, 본 논문은 특정 연구에 관한 내용을 심도 있게 서술하는 것이 목적이 아니고, 모바일 기기 진동 피드백에 관한 연구를 개관하는 성격을 띠고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2 절에서는 모바일 기기 진동 피드백에 관한 관련 연구를 간략하게 소개한다. 이후로는 포항공과대학교 햅틱스 및 가상현실 연구실에서 주로 진행되어 온 모바일 기기 진동 피드백에 관한 다양한 물리적, 인지적 특성에 대해서 서술한다. 3 절에서는 모바일 기기에서 생성되는 진동의 물리적 특성을 주로 측정 자료를 중심으로 설명한다. 4 절에서는 모바일 기기 형태의 장치에서 발생하는 진동을 느끼기 위한 절대 감지 역치(absolute detection threshold)에 대해서 서술한다. 5 절에서는 모바일 기기 진동에서 사용자가 인식하는 진동 강도의 크기를

정신물리학적 실험을 통하여 측정한 결과를 소개한다. 6 절에서는 모바일 기기 진동의 인식 강도를 다양한 주파수와 진폭에 대해서 측정한 실험 결과를 설명한다. 7 절에서는 이러한 모바일 기기 진동의 특성을 고려하여, 인지적으로 정확한 진동 효과를 유도하기 위한 진동 렌더링 방법을 소개한다. 8 절에서 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

인간의 온 몸을 통해 촉감을 감지하며, 이러한 인간의 피부를 정보를 전달하는 매개체로 사용하려는 노력은 일찌기 1960 년부터 시작되었다 [1]. 초기에는 주로 시청각 장애우를 위한 정보전달장치로서 사용하기 위해 감각 대체 장치(Sensory Substitution Device)로 그 연구가 시작되었다 [2]. 이후로는 다양한 분야에 진동을 응용하기 위해 연구의 주제가 다양화되었다. 가상현실 연구에서는 물체와 접촉하는 것을 사용자에게 알려주기 위해 은유적으로 진동을 사용하는 예가 대표적이다 [3, 4]. 인간-컴퓨터 상호작용 분야에서는 진동에 어떤 의미를 가지는 메시지를 담아 통신 매개체로 사용하는 것에 대한 연구가 주를 이루어 왔다. 대표적으로, 시각적인



그림 1. 연구에 사용된 핸드폰.

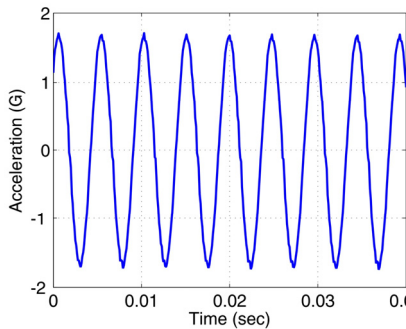


그림 2. 진동 가속도 (2.5V 구동).

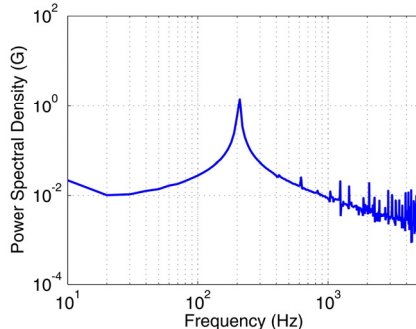


그림 3. 그림 2의 가속도 데이터의 주파수 대역 표현.

상징인 아이콘과 동일한 개념에서 출발한, 택톤(Tacton; Tactile Icon)이라 불리는 진동 패턴을 사용한 의미 전달 방법에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다 [5]. 또한, 정보 전달 양이 포화될 정도로 많은 경우에 정보 전달의 효율을 높이기 위한 수단으로 촉감을 활용하는 연구도 많은 관심을 받고 있다 [6-8]. 지면 관계상 더 자세한 관련 연구를 소개하지는 않겠으나, 이 외에도 아주 다양한 연구가 진행되고 있는 분야라고 할 수 있다. 하지만, 대부분의 연구가 진동을 이용한 다양한 응용 개발에 몰두하고 있어서, 각 응용에 사용되는 다양한 진동 구동기(Vibration Actuator)에 대해서 사용자가 진동 신호를 어떻게 인지, 처리하고 반응하는가에 대한 기본적인 데이터에 대한 연구는 거의 찾아보기 힘들다. 보다 자세한 관련 연구에 대한 내용은 근래에 발표된 리뷰 논문[1]을 참조하기 바란다.

3. 물리적 특성

이 소절에서는 그림 1에 보여진 핸드폰(LG KH-1000)을 사용하여 측정된 진동의 물리적 특성에 대해서 설명한다. 이 핸드폰은 동전 형태의 진동 모터를 수평 방향으로 내장하고 있다. 따라서, 진동은 주로 그림에 표현된 X-Y 축이 이루는 평면에서 발생하며, 수직 성분의 진동 세기는 상대적으로 매우 작다. 진동 모터는 비대칭의 질량 분포를 가진 편심자를 회전자로 사용하여 이 편심자의 회전에 의하여 진동을 생성한다. 따라서, 진동의 주파수는 회전자의 각속도에 비례하며, 또한 진동의 진폭도 정해진다. 이는 구동 전압이 정해지면 진동모터에서 생성되는 진동의 진폭과 주파수는 일정하게 정해진다는 것을 의미하며 [4], 이는 다양한 형태의 진동 패턴을 만들어내는데 한계점으로 작용한다.

그림 2는 2.5V의 인가 전압으로 핸드폰을 구동하고 이를 가속도계로 측정했을 때 얻어진 X축 방향의 진동 가속도이다. 이 데이터를 주파수 대역으로 변환하면 그림 3과 같은 결과를 얻는다. 두 그림은 핸드폰에 내장된 진동 모터에서 발생하는 진동이 정현파를 따른다는 사실을 보여준다. 다른 관련 연구에서도 진동 모터는 정현파 진동을 생성한다는 것이 보여진 바 있다 [9].

위와 같은 방법으로 다양한 구동전압에 의해 발생하는 진동의 주파수를 구하면 그림 4와 같다. 각 주요 주파수(Principal Frequency) 성분의 진폭을 가속도로 측정된 값을 그림 5에, 이를 변위로 변환한 값을 그림 6에 나타내었다. 구동전압이 1V - 5.5V로 변환에 따라 주파수는 60 Hz - 280 Hz로 변화했다. 이는 사람이 진동에 가장 민감한 주파수 대역인 250 Hz 부근을 포함한다. 진동 변위는 구동전압에 크게 관계없이 대략 8 μ m 정도였다. 그림 7에는 진동 발생 시 필요한 소비 전력을 측정하여 보여주었다. 위의 데이터를 얻기 위한 자세한 실험 방법과 신호처리 기법 등은 [10]을 참조하기 바란다.

4. 절대 감지 역치

본 절에서는 인간이 인지할 수 있는 모바일 기기 진동의 절대 감지 역치에 대해서 설명한다. 절대 감지 역치란 진동을 느낄 수 있는 최소한의 진동강도를 의미하며, 일반적으로 진동의 주파수에 따라 변화한다. 이 값은 인지적인 영점에 해당하며, 진동의 인지적 특성을 이해하는데 필요한 출발점이 된다. 본 절에서는 절대 감지 역치를 측정할 실험의 대체적인 방법론과 결과에 대해서 간략히 설명한다. 보다 자세한 내용은 [10]에 설명되어 있다.

4.1 실험 방법

본 실험에서 사용된 장비는 그림 8에 제시되어 있다. 진동을 생성하기 위해서는 소형 웨이커(Bruel & Kjaer; 모델 4810)이 사용되었다. 이 모델은 부하가 없는 경우 18 kHz의 대역에서 진동을 생성할 수 있다. 핸드폰은 웨이커에 연결되어 사용자가 손으로 쥘 수 있도록 되어 있으며, 진동의 진폭과 주파수를 측정하기 위하여 고성능 가속도계가 부착되어 있다.

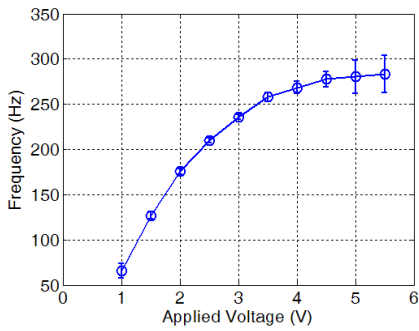


그림 4. 진동 주파수.

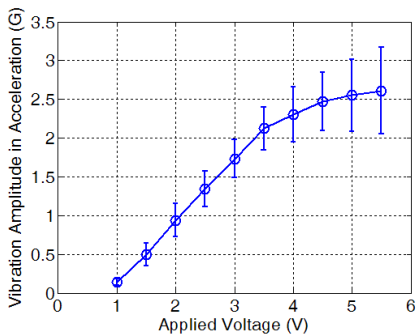


그림 5. 진동 가속도.

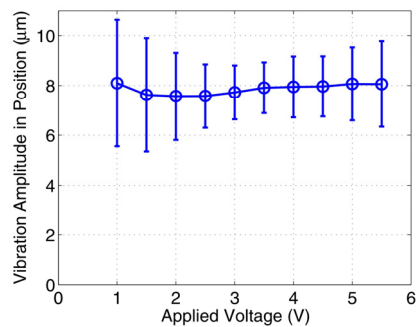


그림 6. 진동 변위.

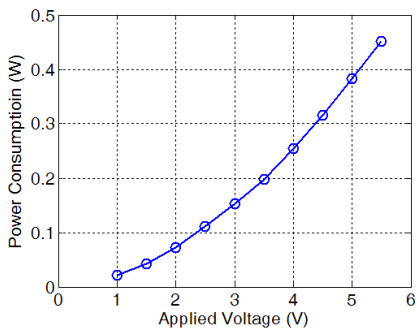


그림 7. 진동 발생 시 소비 전력.

이 실험에는 총 10 명의 피실험자(평균 나이 22.5 세)가 참여했다. 총 7 가지의 주파수(10, 20, 40, 80, 160, 320, 500 Hz)에 대하여 절대 감지 역치를 측정하였다. 실험방법은 3 구간, 강제 선택형, 적응형 계단식 방법(Three-interval, forced-choice, one-up three-down adaptive staircase method; [11] 참조)를 사용했으며, 이 방법을 사용하면 79.4%의 감지확률을 가지는 역치를 측정할 수 있다. 자세한 자극의 설계나 실험 진행방법 등은 [10]을 참고하기 바란다.

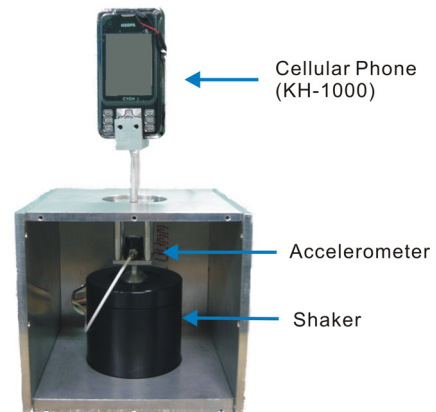


그림 8. 미니 셰이커 시스템.

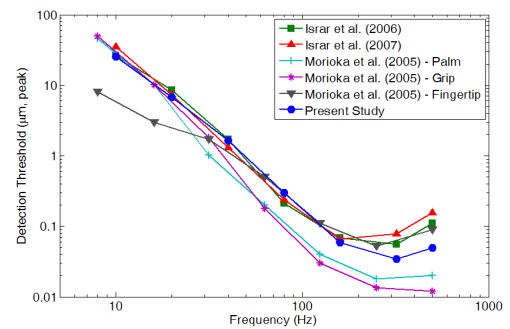


그림 9. 모바일 기기 진동의 절대감지역치.

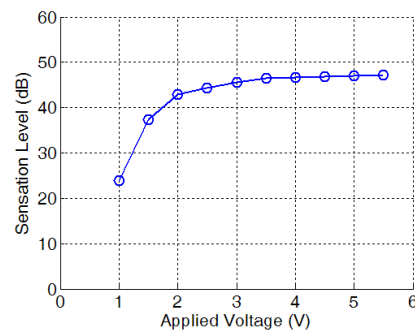


그림 10. 핸드폰 진동의 지각 레벨.

4.2 실험 결과

측정된 모바일 기기 진동의 절대 감지 역치를 그림 9 에 나타내었다. 비교를 위하여 비슷한 방법으로 측정된 다른 경우의 절대 감지 역치를 같이 표현하였다. 사각형으로 표현된 값은 연필형의 스타일러스를 손에 쥐고 있을 때 진동의 감지 역치이고 [12], 상향 삼각형은 구형의 도구를 사용했을 때의 감지 역치를 나타낸다 [13]. 십자자로 나타낸 값은 손바닥 전체에 진동이 전달되었을 경우, 별표는 원통형의 핸들을 쥐고 있을 경우, 하향 삼각형은 손가락 끝에 진동이 전달되었을 경우의 감지 역치를 각각 나타낸다 [14]. 각 실험에 사용된 여러 가지 조건을 자세히 비교하여 실험 결과를 분석할 수 있으나 제한된 지면 관계상 생략한다. 보다 자세한 내용은 [10]에 제공되어 있다.

3장에서 측정된 진동의 주파수 및 진폭과, 본 절에서 제시된 진동의 절대 감지 역치를 사용하여 다음과 같이 지각 레벨(Sensation Level)을 계산할 수 있다.

$$\text{Sensation Level} = 20 \log_{10} \frac{A_{\text{pos}}(v)}{A_L(v)} \quad (1)$$

지각 레벨은 소리 인지 분야에서 인지된 소리의 강도를 나타내기 위한 지표로 많이 사용된다. 진동을 통한 촉감 인지의 경우 지각 레벨이 인식된 진동의 강도와 선형적으로 비례한다는 보장은 없고, 일반적으로 그 비례 상수가 진동의 주파수에 따라 달라진다.

2, 3장에서 측정된 데이터를 사용해서 구동 전압에 대한 지각 레벨을 구하면 그림 10 와 같다. 구동 전압이 증가하면, 지각 레벨이 급격히 증가하다가, 그 증가 기울기가 점차 완만해져서 3.5V 이상에서는 거의 일정한 값으로 수렴하고 있음을 볼 수 있다. 이는 구동 전압을 변화시켜 핸드폰에서 나오는 진동 인식 강도를 변화시키고자 할 때는 3.5V 이하의 구동 전압을 적절히 사용해야 함을 의미한다. 실제로 지각 레벨을 사용한 인식 강도 예측이 얼마나 정확한 지는 다음 절에서 보인다.

5. 진동 모터에 의한 인지 강도

본 절에서는 핸드폰에 내장된 진동모터에서 발생하는 진동을 사용자가 느끼는 인식 크기를 측정한 실험에 대해서 간략히 기술한다. 이 실험의 주된 목적은 전 절에서 구한 지각 레벨이 실제 진동 인식 강도를 예측하는데 사용하기 적합한지 아닌지를 판단하는데 있다.

5.1 실험 방법

본 실험에서는 그림 1 에 보여진 실제 핸드폰을 사용하여 진동 인지 강도를 측정하였다. 총 10 명의 피실험자(평균 연령 25.4 세)가 실험에 참여하였다.

1 - 5.5V 사이에 0.5V 간격으로 구동 전압을 설정하고 각 구동 전압에 대해서 발생하는 진동의 인식 강도를 절대 인지 강도 추정(Absolute Magnitude Estimation)을 사용하여 측정하였다 [15]. 실험은 모두 3 개의 군으로 구성되었으며, 첫 번째 군의 측정값은 피실험자 훈련 과정의 데이터로 취급하고 최종 데이터 처리에 포함하지 않았다. 보다 자세한 실험 절차 및 데이터 처리 방법은 [10]을 참조하기 바란다.

5.2 실험 결과

본 실험에서 측정된 핸드폰 진동의 인지 강도는 그림 11 에 나와 있다. 진동의 구동 전압이 증가함에 따라 인지 강도도 증가하다가, 3.5V 이상이 되면 더 이상 인지 강도가 증가하지 않음을 보여준다. 이는 실제 인지 강도가 전 절에서 구한 지각 레벨과 매우 잘 일치함을 의미한다. 따라서, 새로운 모바일 기기에 대해서 진동 렌더링의 인지 강도 특성을 파악하기 위해서는, 시간이 많이 걸리는 정신물리학적 실험을 수행하는 것보다 진동의 물리적 특성을 측정하고 이를 3 절에서 측정된 절대 인지 역치와 비교하여 지각 레벨을 구하여 사용하는 것이 훨씬 효율적인 방법이 될 수 있다.

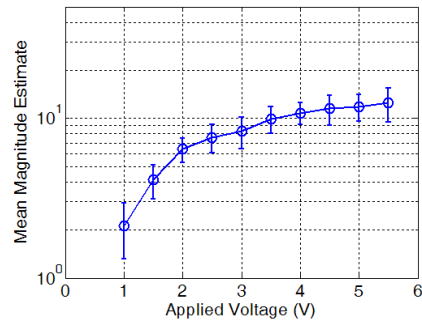


그림 11. 핸드폰 진동의 인식 강도.

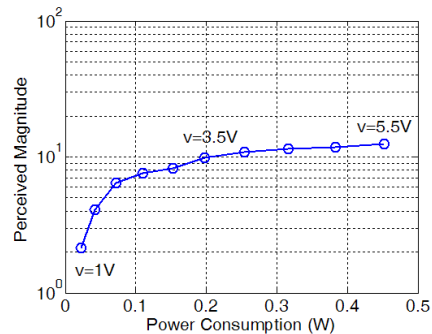


그림 12. 핸드폰 진동의 소비 전력 대

인식 강도 관계.

그림 7 의 진동 소비 전력과 그림 11 의 인지 강도를 결합하면 그림 12 의 그래프를 얻을 수 있다. 이 그래프는 구동 전압이 변할 경우 소비되는 전력의 양과 얻을 수 있는 진동 인지 강도 간의 관계를 보여주고 있다. 진동 모터는 다른 진동 구동 방식에 비하여 매우 효율적인 구동기이기는 하지만, 모바일 기기의 다른 부품과 비교해서 상대적으로 높은 소비전력을 필요로 한다 [10]. 따라서, 그림 12 와 같은 그래프는 전력 소비를 최소한으로 줄이면서 원하는 인식 강도를 취하기 위해서 필요한 정보를 보여준다.

6. 웨이커에 의한 진동 인식 강도

전 절에서는 핸드폰에 내장된 진동 모터에 의해 발생한 진동의 인식 강도를 측정하였다. 이 경우, 진동 모터의 특성 상 발생 가능한 진동의 주파수와 진폭이 서로 종속적일 수 밖에 없어, 다양한 조합에 대하여 실험이 불가능하다. 따라서, 본 절에서는 그림 8 에 보여진 소형 웨이커 시스템을 사용하여 다양한 진동에 대해서 그 인식 강도를 측정하였다.

6.1 실험 방법

모두 11 명의 피실험자(평균 연령 25.1 세)가 실험에 참여하였다. 각 피실험자는 그림 8 에 있는 웨이커 위의 핸드폰을 손으로 쥐고 발생된 진동을 느낀 후 4 절에서의 실험과 같이 절대 인지 강도 추정 방법에 따라 인식 강도를 표현하였다.

실험에는 모두 5 가지의 진동 주파수(20, 40, 80, 160, 320 Hz)가 사용되었다. 각 주파수에 대하여, 6 가지의 진폭(6, 10, 20, 30, 40, 45 dB SL)이 사용되었다. 여기서 dB SL 은 진동의 진폭이 절대 감지 역치에 비해 얼마나 큰가를 데시벨

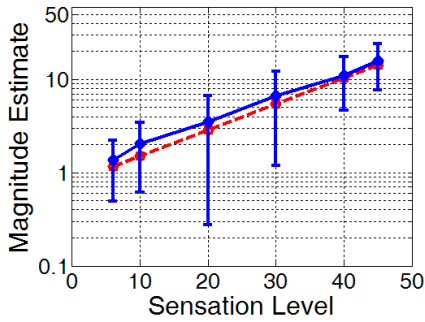


그림 13. 80Hz 에서 측정된 인식 강도(실선)과 보간치(점선).

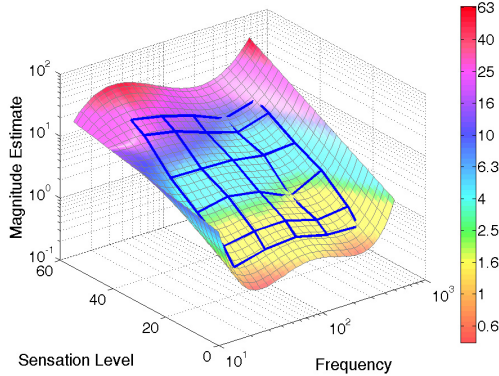


그림 14. 모바일 기기 진동 강도와 보간 모델.

표 1. 그림 14 에 나타난 인식강도 추정값의 비선형 모델 계수.

i	α_i	β_i
4	-0.0682	3.5759
3	0.5419	-27.0254
2	-1.5739	75.0109
1	1.9688	-90.4316
0	-0.8592	-90.4316

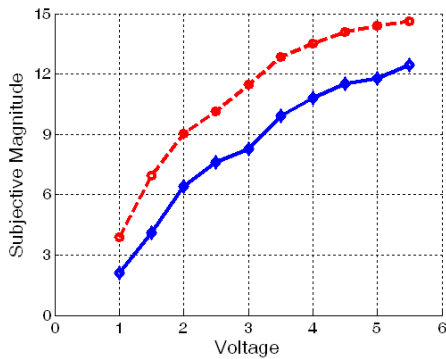


그림 15. 두 가지 방법으로 측정된 인식 강도의 비교. 파란 실선: 핸드폰 내의 진동 모터로 진동을 구동한 경우, 빨간 점선: 소형 웨이커를 사용한 경우.

단위로 표현한 값이다. SL 은 식 (1)의 지각레벨(Sensation

Level)을 의미한다. 따라서, 모두 30 가지의 실험조건을 테스트했다.

6.2 실험 결과

본 실험의 결과는 그림 13 과 그림 14 에 정리되어 있다. 그림 13 에서는 80 Hz 의 주파수의 정현파를 미니 웨이커를 통해서 생성하고, 피실험자가 이를 핸드폰을 통해서 느끼는 인식 강도를 6 가지의 진폭에 대해서 구한 것을 파란 실선의 그래프로 표현했다. 이와 같은 데이터를 각 주파수와 진폭에 대해서 3 차원 공간에 그리면 그림 14 에 보여진 굵은 파란 실선과 같다.

측정된 결과에 대해서 주파수(F)와 진폭(A)를 독립 변수로, 인지 강도(PM)을 종속 변수로 해서 함수 관계를 구해보았다. 사용된 함수 모델은 다음과 같다.

$$\log_{10} PM = A \sum_{i=0}^4 \alpha_i (\log_{10} F)^i + \sum_{i=0}^4 \beta_i (\log_{10} F)^i \quad (2)$$

각 계수의 값은 비선형 회귀 분석을 사용하여 구했으며 표 1 에 정리되어 있다. 이 때 $R^2=0.7622$ 였다. 이 모델은 그림 14 에 곡면으로 나타내져 있다. 그림 13 의 빨간 실선은 이 비선형 모델에서 추출된 값을 보여준다. 본 실험의 자세한 실험 방법과 결과는 [16]을 참조하기 바란다.

그림 15 는 5 절에서 핸드폰 내의 진동 모터에 의해 발생한 진동의 인식 강도와, 본 실험에서 소형 웨이커를 통해 발생되어 핸드폰을 통해 전달된 진동의 인식 강도를 비교한 그림이다. 두 가지의 인식 강도가 어느 정도 일정한 상수적 차이를 보이고 있기는 하지만, 대체적으로 같은 패턴을 보여주고 있다. 이 사실은, 새로운 모바일 기기에 대해서 진동의 물리적 특성만 측정할 후, 그림 14 에 보여진 진동 인식 강도 함수 모델을 사용하여 그 인식 강도를 예측해서 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 어느 정도 진동 크기의 상수적 차이는 발생할 수 있으나 진동 인식 강도의 변화량 예측에는 매우 효과적인 것으로 판단된다.

7. 인지적으로 투명한 진동 렌더링

마지막으로, 현재까지 제시된 데이터를 사용한 인지적으로 투명한 진동 렌더링(Perceptually Transparent Vibration Rendering)에 대해 간략하게 그 개념을 소개한다. 모바일 기기에 내장된 진동 모터에 전력이 공급되면, 크게 2 가지의 과정이 진행된다. 첫번째로, 물리적인 법칙을 통해 진동이 생성되어 모바일 기기를 쥐고 있는 사용자의 손에 물리적 자극이 전달된다 (진동 생성 단계). 이에 손 내부의 기계 자극 수용체가 반응하여 전기적 생체 신호를 생성하여 뇌로 전달하고 뇌에서 진동의 특성을 인지한다 (진동 인지 단계). 이 두 단계는 일반적으로 매우 복잡한 비선형 반응을 따른다. 따라서, 진동 모터를 구동하는 전압을 선형적으로 변화시킨다고 해도, 사람이 결과적으로 인지하는 진동 강도가 선형적으로 변한다는 보장이 없다.

일반적으로 그림 16 의 (a)처럼 동작하는 시스템에 대해서, 그 역함수(예: 그림 17 참조)를 사용하여 (b)처럼 알고리즘을 구성하면, 사용자의 인지 강도(y)를 직접 조정하듯이 진동

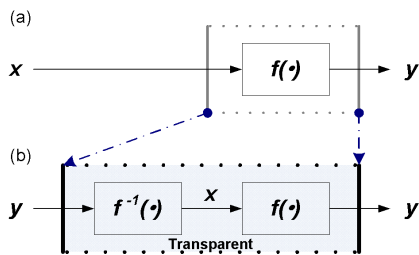


그림 16. 인지적 투명 렌더링의 개념.

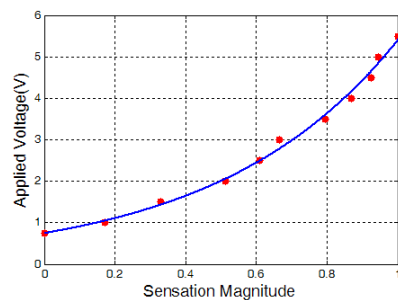


그림 17. 그림 11 에 보여진 핸드폰 진동 인식 강도의 역함수.

패턴을 구성할 수 있다. 즉, 진동 시스템의 입력(구동 전압)과 출력(사용자 인지 강도) 간의 관계를 구하여, 이 역함수를 사용하여 원 시스템 함수를 완전히 소거시키는 것이 인지적으로 투명한 진동 렌더링의 개념이다. 이는 본 논문에서 제시된 데이터를 바탕으로 이미 구현되어 있으며 [17], 현재 이 인지적 투명 렌더링의 장점을 인지적으로 증명하는 연구를 수행하고 있다.

8. 결론

본 논문에서는 핸드폰 등의 모바일 기기에서 발생하는 진동을 사용자가 어떻게 인식하는가에 관계된 여러 가지 기본적인 데이터를 제공하였다. 핸드폰 진동의 물리적인 특성으로부터, 진동 인식에 필요한 절대 감지 역치, 진동 인식의 크기를 나타내는 인식 강도 등의 다양한 자료를 바탕으로 보다 효과적인 진동 렌더링을 위한 인지적으로 투명한 진동 렌더링의 개념 등을 설명하였다. 진동 모터를 사용하는 다른 형태의 응용에서도 본 논문에서 사용된 방법론을 유사하게 적용할 수 있다.

참고문헌

[1] A. Gallace, H. Z. Tan, and C. Spence, "The Body Surface as a Communication System: The State of the Art after 50 Years," *Presence*, vol. 16, pp. 655-676, 2007.
 [2] I. R. Summers, *Tactile Aids for the Hearing Impaired*, London, England: Whurr Publishers Ltd, 1992.
 [3] J. Ryu and G. J. Kim, "Using a Vibro-Tactile Display for Enhanced Collision Perception and Presence," in *Proceedings of the ACM International Conference on Virtual*

Reality Software and Technology, 2004, pp. 89-96.

[4] R. W. Lindeman, J. N. Templeman, J. L. Sibert, and J. R. Cutler, "Handling of Virtual Contact in Immersive Virtual Environments: Beyond Visuals," *Virtual Reality*, vol. 6, pp. 130-139, 2002.
 [5] L. M. Brown, S. A. Brewster, and H. C. Purchase, "A First Investigation into the Effectiveness of Tactons," in *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems (World Haptics Conference)*, 2005, pp. 167-176.
 [6] H. A. H. C. van Veen and J. B. F. van Erp, "Tactile Information Presentation in the Cockpit," *Lecture Notes on Computer Science (Proceedings of Haptic Human-Computer Interaction)*, vol. 2058, pp. 174-181, 2000.
 [7] J. B. F. van Erp and H. A. H. C. van Veen, "A Multi-Purpose Tactile Vest for Astronauts in the International Space Station," in *Proceedings of Eurohaptics*, 2003, pp. 405-408.
 [8] S. Cardin, D. Thalman, and F. Vexo, "Wearable System for Mobility Improvement of Visually Impaired People," *The Visual Computer: International Journal of Computer Graphics*, vol. 23, pp. 109-118, 2007.
 [9] B. J. P. Mortimer, G. A. Zets, and R. W. Cholewiak, "Vibrotactile Transduction and Transducers," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 121, pp. 2970-2977, 2007.
 [10] J. Jung, J. Ryu, and S. Choi, "Physical and Perceptual Characteristics of Vibration Rendering in Mobile Devices," *Submitted to ACM Transactions on Applied Perception*.
 [11] H. Levitt, "Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 49, pp. 467-477, 1971.
 [12] A. Israr, S. Choi, and H. Z. Tan, "Detection Threshold and Mechanical Impedance of the Hand in a Pen-Hold Posture," in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2006, pp. 472-477.
 [13] A. Israr, S. Choi, and H. Z. Tan, "Mechanical Impedance of the Hand Holding a Spherical Tool at Threshold and Suprathreshold Stimulation Levels," in *Proceedings of the World Haptics Conference*, 2007, pp. 56-60.
 [14] M. Morioka and M. J. Griffin, "Thresholds for the Perception of Hand-Transmitted Vibration: Dependence on Contact Area and Contact Location," *Somatosensory and Motor Research*, vol. 22, pp. 281-297, 2005.
 [15] J. J. Zwillocki and D. A. Goodman, "Absolute Scaling of Sensory Magnitudes: A Validation," *Perception & Psychophysics*, vol. 28, pp. 28-38, 1980.
 [16] J. Ryu, J. Jung, and S. Choi, "Perceived Magnitudes of Vibrations Transmitted Through Mobile Device," in *To be presented in the International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems*, 2008.
 [17] J. Ryu, J. Jung, S. Kim, and S. Choi, "Perceptually Transparent Vibration Rendering Using a Vibration Motor for Haptic Interaction," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 2007, pp. 310-315.