

# 4D 영화의 사건 강조를 위한 소리-진동 변환 방법

## Audio-Vibration Conversion Method for 4D Film Events

서종만

Jongman Seo

포항공과대학교 컴퓨터공학과  
Dept. of Computer Science and  
Engineering, POSTECH  
cjman224@postech.ac.kr

Reza Haghighi Osgouei

Reza Haghighi Osgouei

포항공과대학교 컴퓨터공학과  
Dept. of Computer Science and  
Engineering, POSTECH  
haghighi@postech.ac.kr

최승문

Seungmoon Choi

포항공과대학교 컴퓨터공학과  
Dept. of Computer Science and  
Engineering, POSTECH  
choism@postech.ac.kr

### 요약문

4D 영화에서 진동 효과는 영화에서 발생하는 총성, 충돌 등의 다양한 사건을 강조하는데 효과적으로 사용된다. 하지만 이러한 진동 효과는 대부분 수작업으로 오랜 시간을 거쳐 제작되고 있다. 본 연구는 진동 효과를 쉽고 자동으로 생성할 수 있는 방법을 인지적인 변환 과정을 고려한 소리-진동 변환 과정을 통해 제안한다. 그 결과 소리에서 받는 청각 자극과 유사한 인지적 느낌을 갖는 진동 신호를 사용자에게 전달할 수 있었다.

### 주제어

4D 영화 (4D film), 진동 렌더링 (vibrotactile rendering), 크리티컬 밴드 필터 (critical band filter), 햅틱스 (haptics)

### 1. 서론

4D 영화는 모션 효과, 진동 효과를 포함한 바람, 물, 향기 효과 등의 다양한 효과를 이용하여 몰입감을 높인다. 이 중에서 진동 효과는 모션 효과 다음으로 높은 비중을 차지하고 있다. 하지만 이러한 진동 효과는 전문가가 수작업으로 오랜 시간을 거쳐서 제작되고 있다. 4D 영화관이 전 세계적으로 계속 확장되고 홈 씨어터에도 4D를 체험할 수 있는 모션 의자가 상용화 되고 있는 시점에서 콘텐츠 제작에 인력 및 시간과 노력이 소요된다는 점이 단점으로 작용하고 있다. 영화의 소리는 음향 감독을 따로 두어 제작 단계부터 후처리 작업까지 손을 보는 만큼 많은 정보를 담고 있어서 4D 효과 제작자들은 소리 정보를 활용해서 진동 효과를 제작하곤 한다. 하지만 소리 신호를 어떠한 신호 처리 과정 없이 그대로 진동 재생 장치로 내보내는 방법이 간단하기 때문에 주로 이 방법을 사용한다. 그 결과 소리 신호의 인지적 느낌과 진동 효과 결과물의 인지적 느낌이 상이한 경우가 많아 후처리 작업을 다시 거쳐야 한다.

소리-진동 변환 과정에서 인지적인 차이가 발생하는 것을 극복하기 위한 여러 연구가 있었다. 음악을 듣는 경험을 진동으로 전달하기 위해 한 옥타브 혹은 두 옥타브만큼 주파수 영역을 낮은 주파수 영역으로 옮기는 연구가 수행되었다 [1], [2]. 또한 음악의 주파수 영역을 크게 두 개로 나누어 인지적 데이터에 기반한 소리-햅틱 간의 감각 변환을 통해 실시간으로 음악을 표현하는 진동 효과를 생성하는 알고리즘을 개발하였다 [3]. 음악에 관한 연구 외에도 게임이나 영화에서 총성 등의 사건은 강조하고 배경음악은 강조하지 않기 위해 소리의 인지적 특성 중에 거칠기와 세기를 활용한 소리-진동 변환 알고리즘을 개발하였으며 [4], 사용자가 스스로 주파수 영역을 지정하여 소리에서 진동 효과를 만들어주는 라이브러리를 제안하기도 하였다 [5]. 하지만 이러한 시도들은 음악적 경험을 살리거나 특정 사건의 발생을 강조하는데 초점이 맞추어져 있어 실제 소리 정보가 정확하게 진동으로 표현되고 있지는 않다. 주파수 영역의 이동이나 추출, 시간 축에서의 임의의 신호 가공은 시간 축에서 소리 신호의 정보를 유지하지 못하고 사건의 발생만을 알려줄 수 있다. 따라서 영화의 총성이나 폭발 등을 표현할 때 중요한 시간 축의 신호 성질을 유지하지 못한다는 한계가 있다.

본 연구에서는 시간 축에서의 소리 신호 성질을 최대한 유지하면서도 소리에서 받는 청각 자극과 유사한 인지적 느낌을 갖는 진동 신호를 생성하는 방법을 제안한다. 사람의 인지 과정에서 일종의 필터 역할을 하는 인지 필터의 모델을 세우고, 소리 신호에 역으로 이를 보상하여 변환 과정에서의 왜곡을 방지한다.

## 2. 소리-진동 변환 방법

### 2.1 소리-진동 변환 시 고려사항

쉽게 구현할 수 있고 4D 영화의 제작자들이 주로 사용하는 방법은 소리 신호를 어떠한 신호 처리 과정 없이 그대로 진동 재생 장치로 내보내는 것이다. 이 방법은 진동 재생 장치의 고유한 transfer function 이 일종의 low-pass filter 의 역할을 하여 소리 신호에서 저주파수 영역에 해당하는 신호를 진동 효과로 변환해준다. 하지만 이 방법의 문제점은 소리 신호 중에서 고주파수 영역의 신호는 진동 효과로 완전히 반영되지 못하는 것이다. 즉 변환 과정에서 시스템을 거쳐갈 때 transfer function 에 의한 신호의 손실이 일어난다. 이는 소리-진동 간의 변환 뿐만 아니라, 진동 신호가 사람의 기계적 수용체를 거쳐 인지하게 되는 변환 과정에서도 발생한다. 사람의 진동에 대한 역치를 살펴보면 주파수가 일정 수 (300 Hz) 이상으로 증가할 때 역치도 증가하여 고주파수 영역의 진동 신호는 잘 느끼지 못하게 된다. 따라서 소리 신호를 어떠한 신호 처리 과정 없이 그대로 진동 재생 장치로 내보내게 되면 크게 두 개의 시스템인 진동 재생 장치와 사람의 기계적 수용체의 시스템에 의해 신호가 왜곡되어 사람에게 전달된다고 볼 수 있다.

### 2.2 Compensator 디자인

우리는 소리 신호가 어떠한 신호 처리 과정 없이 그대로 진동 재생 장치로 내보내어 질 때 거치는 주요 두 시스템인 진동 재생 장치와 사람의 기계적 수용체 시스템의 transfer function 을 추정하고, 이를 역으로 보상하는 feed-forward compensator 를 software 형태로 구현하였다.

먼저 소리-진동 변환 과정과 진동-인지 변환 과정의 시스템을 추정하는 방법은 다음 과정을 거쳤다. 소리-진동 변환 과정의 진동 재생 장치의 transfer function ( $H_d(s)$ ) 은 pseudo-random noise 를 입력으로 가하고 nonparametric identification method [6] 를 통한 주파수 응답을 구하여 이를  $H_d(s)$ 로 추정하였다. 그림 1 에는 본 연구에서 사용한 진동 재생 장치인 linear actuator (Shadow-8 Single(T108SM), Crowson Tech.) 에 대해 추정된  $H_d(s)$ 를 나타낸다.

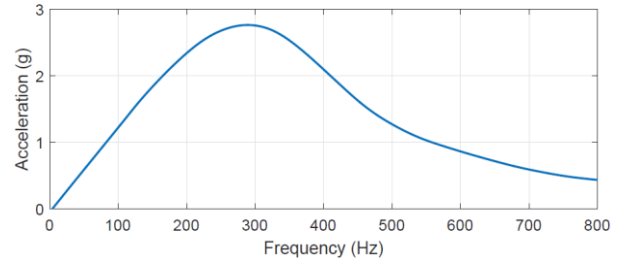


그림 1. linear actuator system 에 대해 추정된  $H_d(s)$

진동-인지 변환 과정의 사람의 기계적 수용체에 대한 transfer function ( $H_m(s)$ ) 은 크리티컬 밴드 이론 [7]에 의해 추정하였다. 이 이론은 기계적 수용체, 특히 PC 채널이 특정 주파수 영역인 “크리티컬 밴드” 내에서 필터 역할을 하고 자극의 세기를 합치는 역할을 한다는 것이다. 본 연구에서는 엉덩이 부위에 수직으로 가해지는 진동 자극에 대한 absolute threshold 를 10 명의 피실험자를 통해 구하였다. 그리고 이 역치 결과를 역수로 두고 제공한 결과를  $H_m(s)$  로 추정하였다. (그림 2)

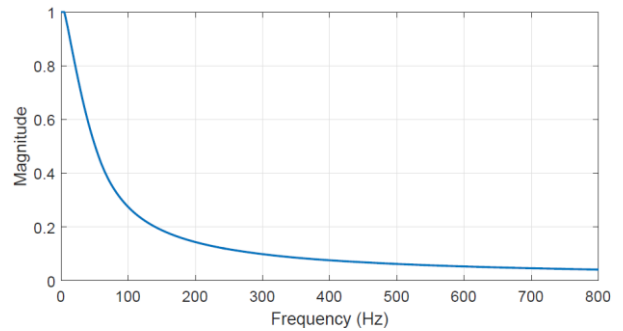


그림 2. 사람의 기계적 수용체 시스템에 대해 추정된  $H_m(s)$

이렇게 추정된 두 개의 transfer function 을 이용하여 소리 신호에 대해서 소리-진동 변환 및 진동-인지 변환 과정을 거쳐 최종적으로 사람이 어떻게 인지할 것인지를 예측해 볼 수 있었다. 그림 3 은 소리 신호가 진동 신호 및 인지적인 레벨로 변환되는 과정을 나타낸 것이다. 그림 3 의 위의 3 개 그래프는 소리-진동-인지로의 변환 단계가 비교적 잘 된 예시이며, 아래의 3 개 그래프는 소리-진동-인지로의 변환 단계에서 왜곡이 많이 발생하여 추가적인 보완이 필요한 예시이다.

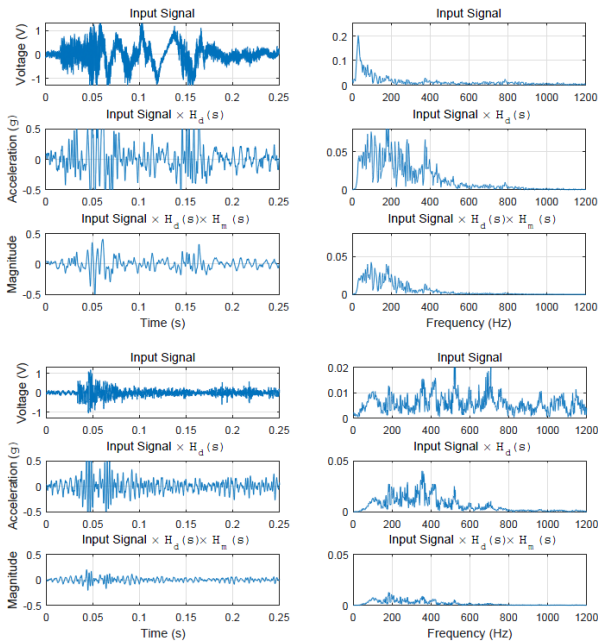


그림 3. 총성 소리가 진동 신호, 인지적인 레벨로 변환되는 과정의 예시. 위의 세 그래프는 변환이 잘 된 예시이며 아래의 세 그래프는 변환이 잘 되지 못한 예시이다.

이러한 전체적인 변환 과정을 하나의 transfer function으로 다시 표현하면  $H(s) = H_d(s) H_m(s)$  와 같고, 이는

$$H(s) = \frac{k(s + \omega_{cut1})}{(s + \omega_{cut2})^3}$$

로 추정하였다 ( $k=2.44 \times 10^6$ ,  $\omega_{cut1}=20$  rad/s,  $\omega_{cut2}=1400$  rad/s, 그림 4, 녹색 십자 선).

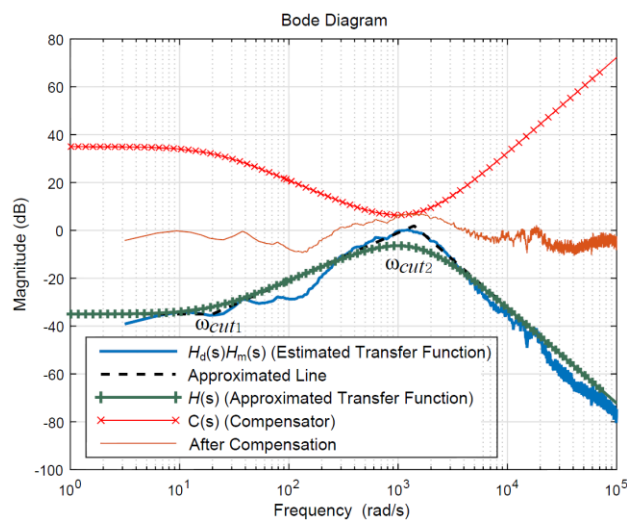


그림 4. 소리-진동 변환 과정의 인지적 차이를 보상하는 software compensator의 bode plot

이를 보상하는 compensator는  $H(s)$ 의 역수를 취하여 구하였으며

$$C(s) = \frac{c(s + \omega_{cut2})^3}{(s + \omega_{cut1})}$$

으로 추정하였다 ( $c=4.10 \times 10^{-7}$ , 그림 4, 붉은 선).

### 3. 결과

총성 소리 신호 중에서 소리 신호를 그대로 어떠한 가공 없이 진동 재생 장치로 내보냈을 때, 청각 자극의 인지적 느낌과 진동 자극의 인지적 느낌이 상이한 총성 소리 신호들을 13가지 선별하여 compensator를 적용해 보았다. 이 결과물에 대해 5명을 대상으로 소리의 인지적인 느낌이 얼마나 진동으로 잘 표현되는지에 대하여 전혀 표현되지 않음을 0으로, 완벽하게 표현함을 6으로 기준을 정하여 정도를 discrete한 숫자로 응답하는 사용자 실험을 수행하였다. 그 결과 compensator를 적용한 진동 신호가 적용하지 않은 진동 신호에 비해 1.35점 높은 4.92점의 평가를 받아 소리의 인지적인 느낌을 잘 표현한다는 결과를 얻을 수 있었다. 그림 5는 총성 소리 신호가 compensator를 적용하지 않고 그대로 진동 신호로 변환 되었을 때의 인지적으로 느껴지는 신호를 추정한 것(2 번째 녹색 선 그래프)과 compensator를 적용한 후 인지적으로 느껴지는 신호(3 번째 붉은 선 그래프)를 추정한 것을 비교한 것이다. 첫 번째 검은 선 그래프는 원래의 신호를 시간 축과 주파수 축에서 나타낸 것이며, 진동 신호로 변환하였을 때 세기가 매우 약해지고 고주파수 대역의 세기가 감소함을 확인할 수 있다. 반면, compensator를 적용한 후에는 인지 세기가 다시 강하게 느껴지고 고주파수 대역의 세기도 복원됨을 확인할 수 있다.

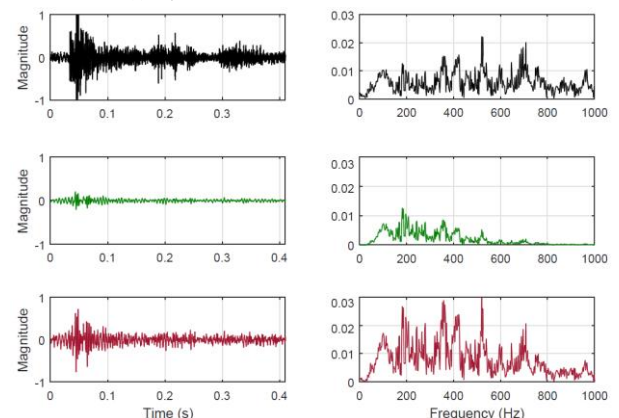


그림 5. 소리-진동 변환 결과물의 예시. 첫 번째 행은 원래 소리 신호이며, 두 번째 행은 compensator를 적용하지 않은 신호의 인지적 세기, 세 번째 행은 compensator를 적용한 후의 인지적 세기를 나타낸다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 4D 영화의 진동 효과 생성을 위한 소리-진동 변환 방법을 제시하였다. 4D 영화의 진동 효과는 시간 축에서의 소리의 성질을 유지하는 것이 중요하므로 이를 유지하면서도 소리의 인지적 느낌을 진동 효과로 그대로 복원하는 방법이 필요하다. 제시한 알고리즘은 소리 신호가 진동 재생 장치를 거쳐 사람의 인지 단계로 전달되며 일어나는 정보 변환 과정을 그대로 역으로 보상하여 변환 과정에서 발생하는 신호의 손실을 막아주었고, 사용자 평가 결과 소리의 인지적 느낌이 그대로 진동으로 복원되었음을 확인할 수 있었다. 이러한 소리-진동 변환 알고리즘은 영화 뿐 만 아니라 소리의 인지적 느낌을 그대로 진동으로 표현하려는 시도가 필요한 멀티미디어, 게임 등의 햅틱 콘텐츠 생성 분야에 다양하게 적용될 수 있다.

#### 사사의 글

본 연구는 미래창조과학부 재원으로, 한국연구재단의 과학기술-인문융합연구 (2016M3C1B6929724) 사업의 지원으로 수행되었음.

#### 참고 문헌

1. M. Karam, C. Branje, G. Nespoli, N. Thompson, F. A. Russo, and D. I. Fels, "The emoti-chair: an interactive tactile music exhibit," in Proc. of CHI Extended Abstracts. ACM, pp. 3069–3074, 2010,
2. R. Okazaki, H. Kuribayashi, and H. Kajimoto, "The effect of frequency shifting on audio-tactile conversion for enriching musical experience," in Haptic Interaction. Springer, pp. 45–51, 2015.
3. I. Hwang, H. Lee, and S. Choi, "Real-time dual-band haptic music player for mobile devices," IEEE Transactions on Haptics, vol. 3, no. 3, pp. 340–351, 2013.
4. J. Lee and S. Choi, "Real-time perception-level translation from audio signals to vibrotactile effects," in Proc. of CHI. ACM, pp. 2567–2576, 2013.
5. J.-M. Lim, J.-U. Lee, K.-U. Kyung, and J.-C. Ryou, "An audio-haptic feedbacks for enhancing user experience in mobile devices," in Proc. of ICCE. IEEE, pp. 49–50, 2013.
6. L. Ljung, System Identification: Theory for the User, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1999.
7. J. C. Makous, R. M. Friedman, and C. J. Vierck, "A critical band filter in touch," The Journal of Neuroscience, vol. 15, no. 4, pp. 2808–2818, 1995.