

3 차원 음원 위치에 대한 머리전달함수의 주성분 분석법 적용

Principal Components Analysis of Head-Related Transfer Function at 3-D Space

조현 *·박영진 †·박윤식 **
 Hyun Jo, Youngjin Park, and Youn-sik park

1. 서 론

방대한 양의 머리전달함수(Head-Related Transfer Function, HRTF)를 소수의 파라미터로 모델링하는 방법은 그 방법론에 따라 다양하다. 그 중, 주성분 분석법(Principal Components Analysis, PCA)을 이용하는 방식은 데이터베이스의 모델링뿐만 아니라 머리전달함수 맞춤화(HRTF customization)에 활용할 수 있다.

(1) 하지만, 주성분 가중치(Principal Components Weight, PCW)를 조절하여 머리전달함수 맞춤화를 수행하는 경우에는 10% 이하의 모델링 오차를 달성하기 위해서 많은 수의 주성분 가중치가 필요하다는 단점이 있었다. 그럼에도 불구하고, 소수의 주성분 가중치 만을 이용하여 중앙면(median plane) 상에서 머리전달함수 맞춤화를 수행하게 된다면, 정위감의 입장에서 큰 무리없이 자신에게 맞는 고도감을 느낄 수 있다는 연구가 진행된바 있다.(2)

주성분 가중치를 이용한 맞춤형 머리전달함수 생성과 관련한 선행연구에서는 측 수직면(sagittal plane) 상에서의 머리전달함수를 중앙면 상에서의 머리전달함수에 시간지연 값을 주어 생성해 내더라도 정위감에 큰 차이가 없다는 기존의 연구 (3) 를 이용해 측 수직면 상에서의 머리전달함수는 충분히 확장 가능한 것이라고 가정하였을 뿐, 이를 검증하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 중앙면 상에서 머리전달함수 데이터 베이스를 주성분 분석한 후, 3 차원 상으로 확장할 경우와 3 차원 전 영역에서 주성분 분석법을 직접 적용한 경우를 비교하여 선행연구에서 가정하였던 중앙면 상에서 주성분 분석된 머리전달함수가 3 차원 전 영역으로 확장 가능한 것인지 고찰해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 주성분 분석법

본 연구에서는 CIPIC 머리전달함수 데이터 베이스 (4)를 이용, 주파수 영역에서 주성분 분석법을 적용하였다.

주성분 분석법은 다음과 같은 절차로 진행된다.

먼저, CIPIC 머리전달함수의 주파수 영역 데이터가 식 1 과 같은 행렬로 존재한다고 생각한다.

$$\mathbf{X}(f, k) = 20 \log_{10} |\mathbf{H}(f, p \times d)| \quad \text{식 1}$$

여기서 f 는 이산화된 주파수를 의미하며, p 는 데이터베이스에서 사람의 수(CIPIC 머리전달함수의 경우에는 45)를, d 는 관심 각도를 의미한다. 이제, 식 2 와 같이 머리전달함수 데이터에서 경험적 평균(empirical mean) 값을 제외한 전달함수 (Directional Transfer Function, DTF)를 정의한다.

$$\mathbf{D}(f, k) = \mathbf{X}(f, k) - \underset{k=(p,d)}{\text{mean}}\{\mathbf{X}(f, k)\} \cdot \mathbf{h} \quad \text{식 2}$$

$$(\mathbf{h}[n] = 1 \text{ for all } k)$$

이제, 식 3 과 같은 공분산 행렬(covariance matrix)을 정의하고 식 4 의 고유치 문제(eigenvalue analysis)를 푼다.

$$\mathbf{C} = E\{\mathbf{D}\mathbf{D}^H\} \quad \text{식 3}$$

$$\mathbf{C}\mathbf{V} = \mathbf{V}\mathbf{D} \quad \text{식 4}$$

이때, \mathbf{V} 의 경우, 주성분 값(Principal Component, PC)이 되고, 주성분 가중치는 식 5 와 같이 정의한다.

$$\mathbf{W} = \mathbf{V}^H \mathbf{D} \quad \text{식 5}$$

주성분 값과 주성분 가중치를 이용하면 식 6 과 같이 머리전달함수를 복원할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{X}}(f, k) = \mathbf{V}\mathbf{W} + \underset{k=(p,d)}{\text{mean}}\{\mathbf{X}(f, k)\} \cdot \mathbf{h} = \mathbf{V}\mathbf{V}^H \mathbf{D} + \underset{k=(p,d)}{\text{mean}}\{\mathbf{X}(f, k)\} \cdot \mathbf{h} \quad \text{식 6}$$

2.2 중앙면 상에서 주성분 분석법 적용

중앙면 상(0 도부터 180 도까지)에서 14kHz 미만의 신호에 대해 주성분 분석법을 적용하였다. 10% 이하의 모델링 오차를 달성하기 위해서 10 개의 주성분 값이 사용되었다. 이후 중앙면 상의 주성분 값을 이용하여 3 차원 음원 위치에 대한 머리전달함수를 추

정하도록 하였다. 주성분 분석의 정확도를 표현하기 위하여 식 7 과 같은 %오차를 정의한다.

$$\%error = \frac{\|X - \hat{X}\|_F}{\|X\|_F} \times 100 \quad \text{식 7}$$

식 7 에서 $\|\cdot\|_F$ 의 의미는 Frobenius norm 을 의미한다. %오차의 결과는 그림 1.과 같다.

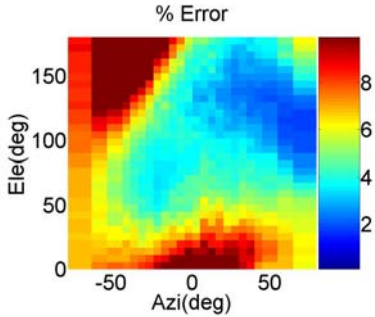


그림 1. 중앙면상에서 주성분 분석법을 적용하고 3 차원 영역으로 확장할 경우의 %오차. (왼쪽귀의 결과)

그림 1.의 결과로부터 동측위치(ipsilateral position) 중 후면의 머리전달함수 및 정면의 머리 전달함수의 %오차가 커짐을 알 수 있다. 한편, 식 6 을 활용하여 측 수직면 상의 머리전달함수 복원 시, 경험적 평균 값을 측 수직면 상의 값으로 사용할 경우, %오차가 그림 2.와 같이 줄어들 수 있음을 알 수 있다.

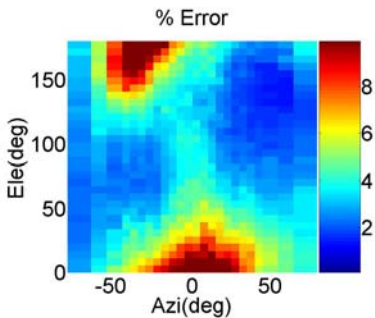


그림 2. 중앙면상에서 주성분 분석법을 적용하고 3 차원 영역으로 확장할 경우의 %오차. (왼쪽귀의 결과, 측수직면 복원시, 경험적 평균치를 측수직면머리전달함수의 평균 값으로 사용할 경우)

%오차는 상대적인 값이기 때문에 %오차가 크다고 하여 그 위치에서 머리전달함수의 패턴이 부정확하게 복원된다는 의미는 아니다. 그림 3.은 그림 2.의 결과에서 %오차의 분자 부분만을 따로 그린 것이다. 실제로 머리전달함수의 복원은 복잡한 노치패턴이 나타나는 대측위치(contralateral position)에서 부정확함을 알 수 있다.

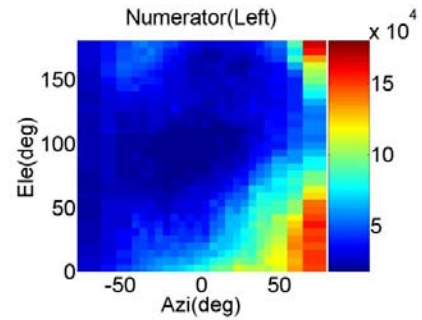


그림 3. 그림 2.의 %오차 결과 중, 분자부분.

2.3 3 차원 전 영역에서 주성분 분석법 적용

3 차원 전 영역에서 10 개의 주성분 값을 이용하여 %오차를 살펴보면 그림 2.와 유사한 결과가 나오며, 측 수직면 상으로 주성분 분석법을 확장할 경우에는 경험적 평균 값을 업데이트 해야 함을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

중앙면 상에서 주성분 분석법을 이용하여 측 수직면으로 확장하는 경우와, 3 차원 전 영역에서 주성분 분석법을 직접 적용하는 경우 %오차의 관점에서 두 방법은 동일하다. 다만, 측 수직면 상으로 확장할 경우에는 경험적 평균 값을 업데이트 해야 한다.

후 기

본 연구는 두뇌 한국 21 프로젝트 및 한국과학재단을 통해 교육과학기술부의 국가지정연구실 사업으로부터 지원받아 수행되었습니다 (R0A-2005-000-10112-0).

참 고 논 문

- (1) D. J. Kistler and F. L. Wightman, 1992, "A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction," J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 91, pp. 1637-1647.
- (2) S. Hwang, 2009, *Modeling, customization, and interpolation of head-related impulse responses based on principal components analysis*, Dissertation, KAIST
- (3) M. Morimoto, M. Itoh, and K. Iida, 2002, "3-D sound image localization by interaural differences and the median plane HRTF," Proc. Int. Conf. on Auditory Display (ICAD), Kyoto, Japan.
- (4) CIPIC HRTF database files, released 1.1, August 21, 2001, CIPIC Interface Laboratory, U. C. Davis. "http://interface.cipic.ucdavis.edu/"