

최소자승법과 음향학적 모델링 기반의 적은 개수의 측정점에 대한 머리전달함수 보간 기법

Interpolation method of head-related transfer function based on the least squares method and an acoustic modeling with a small number of measurement points

이석진[†]

(Seokjin Lee^{1†})

¹경기대학교 전자공학과

(Received August 1, 2017; accepted September 28, 2017)

초 록: 본 논문에서는 머리전달함수 보간 알고리즘을 제안하며, 특히 작은 크기의 측정 데이터를 다루는 경우를 고려한다. 제안하는 알고리즘은 머리전달함수의 음향학적 모델링에 기초하며, 모델링 계수를 추정함으로써 머리전달함수를 보간한다. 이 때 측정 위치의 개수가 부족할 경우 모델링 계수를 추정하는 것은 매우 어려우며, 따라서 본 알고리즘은 벡터-기반 크기 패닝 기법을 이용하여 데이터를 확장함으로써 이러한 문제를 해결하려고 한다. 본 알고리즘은 벡터-기반 크기 패닝 기법 기반의 데이터 확장 단계와, 최소자승법 기반의 모델링 계수 추정 단계의 두 단계로 이루어져 있다. 제안하는 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 CIPIC(Center for Image Processing and Integrated Computing) 머리전달함수 데이터베이스의 측정 데이터 중 일부를 이용한 시뮬레이션을 진행하였으며, 시뮬레이션 결과 약 1.5 dB ~ 4 dB의 최소 자승 오차가 감소됨을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 3D 오디오, 머리전달함수, 바이노럴 렌더링, 벡터기반 크기 패닝

ABSTRACT: In this paper, an interpolation method of HRTF (Head-Related Transfer Function) is proposed for small-sized measurement data set, especially. The proposed algorithm is based on acoustic modeling of HRTFs, and the algorithm tries to interpolate the HRTFs via estimation the model coefficients. However, the estimation of the model coefficients is hard if there is lack of measurement points, so the algorithm solves the problem by a data augmentation using the VBAP (Vector Based Amplitude Panning). Therefore, the proposed algorithm consists of two steps, which are data augmentation step based on VBAP and model coefficients estimation step by least squares method. The proposed algorithm was evaluated by a simulation with a measured data from CIPIC (Center for Image Processing and Integrated Computing) HRTF database, and the simulation results show that the proposed algorithm reduces mean-squared error by 1.5 dB ~ 4 dB than the conventional algorithms.

Keywords: 3D audio, Head-related transfer function, Binaural rendering, Vector-based amplitude panning

PACS numbers: 43.60.Dh, 43.38.Md

1. 서 론

스테레오 시스템이 도입된 이래 발전해온 다채널 오디오 시스템은 5.1채널 서라운드 시스템^[1]이 보급

된 이후 발전을 거듭하여 최근에는 3D 오디오 시스템으로 나아가고 있다. 3D 오디오 시스템의 주요 특징은 기존의 평면 방향 음장 재현에서 벗어나 상하 방향 음장의 재현까지 이루고자 하는 것이며, 이를 위하여 상하 방향의 스피커로 구성되어 있는 스피커 시스템을 포함하거나 혹은 객체 및 썬 기반의 음원

[†]Corresponding author: Seokjin Lee (sjlee6@kgu.ac.kr)
Department of Electronic Engineering, Kyoggi University, 154-42,
Gwanggyosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon 16227, Republic of Korea
(Tel: 82-31-249-9807, Fax: 82-31-249-9807)

전달 시스템을 구성하는 등 청취자에게 실감나는 음향을 제공하기 위한 여러 장치들을 포함하고 있다.

최근 개발된 여러 3D 오디오 시스템들은 타겟 오디오 시스템 중 하나로 바이노럴 시스템, 즉 헤드폰을 이용한 음향 재생 시스템을 포함하고 있다.^[2,3] 이는 다채널 스피커 시스템들이 가정환경에서 사용되기에 매우 많은 스피커를 필요로 한다는 단점을 보완하기 위한 방안인 동시에, 개인화된 오디오 시스템을 지원하기 위한 포석이기도 하다.

헤드폰 시스템에서 음장을 재현하기 위해서는 주로 머리전달함수를 이용하여 음원을 렌더링하게 된다. 머리전달함수는 음원의 위치에서 방사된 음향신호가 양 귀에 전달될 때까지의 전달함수로 정의되는데, 이를 활용하기 위해서는 음원의 위치와 양 귀 사이의 전달함수가 미리 측정이 되어 있어야 한다. 그러나 충분히 많은 음원 위치에 대해 모든 머리전달함수를 측정하기는 실질적으로 매우 어려울 뿐만 아니라 측정 시간도 오래 걸리는 문제가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 측정된 머리전달함수를 보간하는 기법들이 연구된 바 있으며, 대표적으로 음향학적 모델링에 기초한 기법^[4,5]과 벡터기반 크기 패닝^[6]을 이용한 기법, 그리고 원형 머리 모델을 이용한 기법^[7] 등이 있다. 음향학적 모델링에 기초한 기법은 추정 과정에서 최소자승법을 이용하기 때문에 주어진 문제가 과결정(overdetermined)이어야 하며, 이를 위해서는 측정점이 매우 많아야 한다는 단점이 있다. 벡터기반 크기 패닝 기법은 다채널 스피커 시스템에서 인간의 청각 특성을 이용하여 가상 음원을 정위하기 위한 기법으로^[8], 이를 이용하여 머리전달함수를 보간하는 경우 정확성이 떨어진다는 단점이 있다.

본 논문에서는 측정점의 개수가 적어서 최소자승법을 바로 적용할 수 없는 경우에 대하여, 음향학적 모델링을 기반으로 머리전달함수를 보간하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 제안하는 알고리즘은 먼저 벡터기반 크기 패닝 기법을 이용하여 데이터의 개수를 증가시킨 후, 음향학적 모델링을 이용하여 머리전달함수를 보간하는 구조로 이루어져 있다.

II. 머리전달함수의 음향학적 모델링

2.1 음장 모델링

공간상에 음원이 존재하고 이를 포함하고 있는 표면 S 가 존재할 때, 표면 S 바깥의 위치 $\mathbf{x} = (r, \theta, \phi)$ 의 음압 $\psi(\mathbf{x}, k)$ 는 다음과 같은 헬름홀츠(Helmholtz) 방정식을 만족한다.^[4]

$$\nabla^2 \psi(\mathbf{x}, k) + k^2 \psi(\mathbf{x}, k) = 0, \tag{1}$$

여기서 파수 $k = \omega/c$ 이고, ω 는 각주파수, c 는 음파의 전달속도를 의미한다. 이때 음압 $\psi(\mathbf{x}, k)$ 가 좀머펠트(Sommerfeld) 방사 조건을 만족한다고 가정하면, 주어진 헬름홀츠 방정식의 기본해는 다음과 같은 다중극으로 주어진다.^[4]

$$\Phi_{lm}(r, \theta, \phi, k) = h_l(kr) Y_{lm}(\theta, \phi), \tag{2}$$

여기서 $h_l(kr)$ 은 구면 한켈(Hankel) 함수이며, $Y_{lm}(\theta, \phi)$ 는 다음과 같이 주어지는 구면 조화 함수이다.

$$Y_l^m(\theta, \phi) = (-1)^m \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-|m|)!}{(l+|m|)!}} \cdot P_l^{|m|}(\cos \theta) e^{im\phi} \tag{3}$$

여기서 $P_l^{|m|}(\cos \theta)$ 는 르장드르(Legendre) 다항식을 의미한다. Eq. (1)의 해는 기본해인 Eq. (2)를 이용하여 다음과 같이 기술된다.^[4]

$$\psi(\mathbf{x}, k) = \sum_{l=0}^{\infty} \left[\sum_{m=-l}^l \alpha_{lm} h_l(kr) Y_{lm}(\theta, \phi) \right]. \tag{4}$$

2.2 머리전달함수의 모델링

머리전달함수는 Fig. 1과 같이 가상음원의 위치에서 스피커를 이용하여 음향을 방사하고, 고막위치에 마이크를 설치하여 이를 측정함으로써 음원과 귀 사이의 전달함수를 측정한다. 이 경우 스피커의 위치는 매우 많고 측정위치가 한 곳이므로 Eq. (1)의 가정(음원을 모두 포함하고 있는 표면 S 바깥의 위치)을 만족하기가 어렵다.

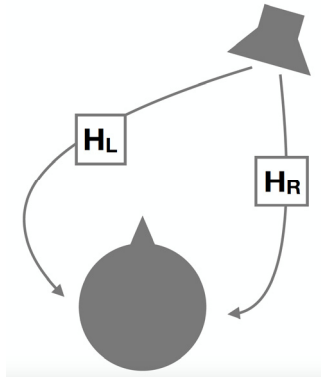


Fig. 1. Measurement of the HRTF (Head-Related Transfer Function).

위에서 분석한 다중극 해를 이용하기 위해서, 음원 (스피커)의 위치와 측정점(마이크)의 위치를 서로 바꾸어 분석해보자. 이는 음향 변수의 상호성, 즉 음압 및 입자속도 등의 음향 변수는 음원의 위치와 측정점의 위치를 서로 바꾸어도 변하지 않는다는 성질^[9]에 의해 정당화될 수 있다. 이를 이용하면, 머리전달함수는 고막 위치의 음원에 의해 발생하는 음장을 위치에 따라 측정된 것으로 가정할 수 있다. 따라서 Eq. (1)의 식을 사용할 수 있고, 이 경우 머리전달함수는 Eq. (4)와 같은 다중극의 합으로 표현될 수 있다.

Eq. (4)의 식은 무한개의 다중극으로 표현되어 있어 이를 실제 머리전달함수 보간에 바로 사용하기는 어려우므로, 무한개의 다중극 대신 $l=0, \dots, p-1$ 와 같이 제한하여 p^2 개의 다중극으로 근사하는 방법을 사용한다. 이를 이용하여 N 개의 측정점을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\psi(\mathbf{x}_n, k) = \sum_{l=0}^{p-1} \sum_{m=-l}^l \alpha_{lm} \Phi_{lm}(\mathbf{x}_n, k), \quad (5)$$

여기서 $n=0, \dots, N-1$ 이다. 각 변수들을 다음과 같이 행렬로 나타내자.

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{00}(\mathbf{x}_0, k) & \dots & \Phi_{(p-1)(p-1)}(\mathbf{x}_0, k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{00}(\mathbf{x}_{N-1}, k) & \dots & \Phi_{(p-1)(p-1)}(\mathbf{x}_{N-1}, k) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{a} = [\alpha_{00} \dots \alpha_{(p-1)(p-1)}]^T, \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\psi} = [\psi(\mathbf{x}_0, k) \dots \psi(\mathbf{x}_{N-1}, k)]^T, \quad (8)$$

여기서 Φ 는 $N \times p^2$ 크기의 행렬, \mathbf{a} 는 $p^2 \times 1$ 크기의 벡터, $\boldsymbol{\psi}$ 는 $N \times 1$ 크기의 벡터이다. 위의 행렬 및 벡터를 이용하면, Eq. (5)는 다음과 같은 행렬식으로 표현이 가능하다.

$$\Phi \mathbf{a} = \boldsymbol{\psi}. \quad (9)$$

Eq. (9)에서 기저 행렬 Φ 는 음원 및 측정점의 위치에 따라 정해지는 값이며, 따라서 모델링 계수, 즉 벡터 \mathbf{a} 만 알고 있으면 임의의 점에서의 머리전달함수를 보간할 수 있다. 또한 $N > p^2$ 인 조건에서는 벡터 \mathbf{a} 를 구하는 것이 과결정문제가 되어 최소-자승법으로 풀 수 있다.

그러나 Eq. (5)의 식은 원래 무한히 많은 개수의 다중극을 p 차 다중극으로 근사하여 모델링한 것이기 때문에, p 의 크기가 작을 경우 모델링의 정확성이 저하되는 문제가 있다. 따라서 p 의 크기는 충분히 커야 하며, 이를 최소자승법으로 풀게 될 경우 측정점의 개수 N 또한 커야한다는 문제가 있다. 따라서 적은 개수의 측정점을 통하여 머리전달함수를 보간하려 할 경우, 이는 결과물의 정확성을 심각하게 저하시키는 문제가 된다.

III. 머리전달함수 보간 기법

제안하는 머리전달함수 보간 기법의 목적은 위와 같이 다중극의 개수 p^2 보다 측정점의 개수 N 이 작은 경우에 대하여 적용하는 것이며, 벡터기반 크기 패닝을 이용한 데이터 확장, 그리고 최소자승법을 이용한 모델링 계수 추정의 2단계로 이루어져 있다.

3.1 벡터기반 크기 패닝을 이용한 데이터 확장

벡터기반 크기 패닝 기법은 Fig. 2와 같이 2개의 스피커 사이에 가상 음원을 정위하고자 하는 기법이며, 각 스피커 신호에 계수 g_1 과 g_2 을 곱하여 재생함으로써 음상을 정위한다. 2차원의 경우, 각 계수는 다음과 같이 표현된다.^[8]

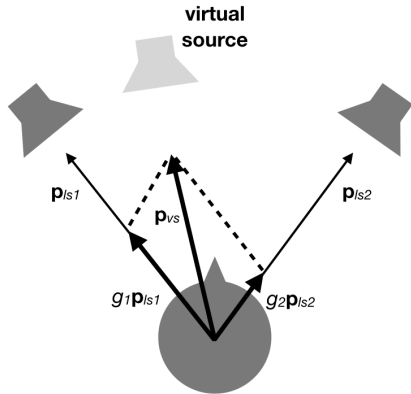


Fig. 2. An illustrative diagram for VBAP (Vector Base Amplitude Panning).

$$\mathbf{p}_{vs} = g_1 \mathbf{p}_{1s1} + g_2 \mathbf{p}_{2s2}, \quad (10)$$

여기서 $\mathbf{p}_{vs} = [p_{vs,1} \ p_{vs,2}]^T$ 는 가상 음원의 위치벡터, $\mathbf{p}_{1s1} = [p_{1s1,1} \ p_{1s1,2}]^T$ 는 첫 번째 스피커의 위치벡터, $\mathbf{p}_{2s2} = [p_{2s2,1} \ p_{2s2,2}]^T$ 는 두 번째 스피커의 위치벡터이다. 이를 행렬로 다시 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{p}_{vs}^T = \mathbf{g} \mathbf{P}_{1s12}, \quad (11)$$

여기서 $\mathbf{g} = [g_1 \ g_2]$, $\mathbf{P}_{1s12} = [\mathbf{p}_{1s1} \ \mathbf{p}_{2s2}]^T$ 이다. 따라서 각 스피커에 적용되는 계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{g} = \mathbf{p}_{vs}^T \mathbf{P}_{1s12}^{-1}. \quad (12)$$

이를 3차원 공간으로 확장하면 3개의 스피커를 이용하여 음상을 정위하게 되며, 이때 각 스피커에 적용되는 계수 벡터 $\mathbf{g} = [g_1 \ g_2 \ g_3]$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.^[8]

$$\mathbf{g} = \mathbf{p}_{vs}^T \mathbf{P}_{1s123}^{-1} = [p_{vs,1} \ p_{vs,2} \ p_{vs,3}] \begin{bmatrix} p_{1s1,1} & p_{1s1,2} & p_{1s1,3} \\ p_{2s2,1} & p_{2s2,2} & p_{2s2,3} \\ p_{3s3,1} & p_{3s3,2} & p_{3s3,3} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (13)$$

Eq. (13)의 3차원 벡터기반 크기패닝 기법을 이용하여 다음과 같이 머리전달함수를 확장한다. 확장할

위치의 3차원 위치벡터를 \mathbf{x} 라 하면, 먼저 해당 위치와 가장 가까운 머리전달함수의 측정점 3개 ($\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3$)를 선택한다. 그 후 이를 이용하여 다음과 같이 확장 계수를 계산한다.

$$\mathbf{g} = \mathbf{x}^T \mathbf{X}_{123}^{-1}, \quad (14)$$

여기서 $\mathbf{X}_{123} = [\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{x}_3]^T$ 이다. 위에서 계산된 계수를 이용하여 다음과 같이 측정값을 확장한다.

$$\psi(\mathbf{x}, k) = g_1 \psi(\mathbf{x}_1, k) + g_2 \psi(\mathbf{x}_2, k) + g_3 \psi(\mathbf{x}_3, k). \quad (15)$$

이를 통해 확장되는 값은 최소자승법을 적용하기 위한 임시값이며, 이때 확장되는 위치는 최종적으로 목표하는 위치와 반드시 같을 필요는 없으나 확장되는 데이터의 개수는 음향학적 모델링의 차수 p (Eq. (5) 참고)의 제곱보다 커야한다.

3.2 최소자승법을 이용한 보간

앞 절에서 소개한 벡터기반 크기 패닝을 이용하여 확장한 데이터의 개수가 $M (M > p^2)$ 이라고 가정하자. 이제 Eq. (9)의 벡터 \mathbf{a} 를 구하는 문제가 과결정 문제가 되었으므로, 잘 알려진 바와 같이 최소자승법을 이용하여 다음과 같이 해를 구할 수 있다.^[4]

$$\mathbf{a} = (\Phi^T \Phi + \alpha \mathbf{I})^{-1} \Phi^T \psi, \quad (16)$$

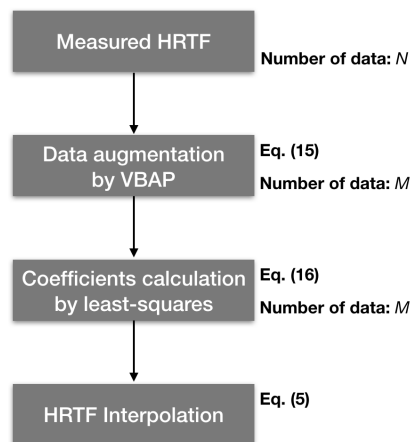


Fig. 3. An illustrative diagram for proposed algorithm.

여기서 α 는 정규화 계수이며, 본 논문에서는 다음과 같이 Reference [4]와 동일한 정규화 계수를 적용하였다.

$$\alpha = \epsilon [1 + l(l + 1)], \tag{17}$$

여기서 ϵ 는 임의의 작은 상수 값이며, l 은 Eq. (5) 등의 수식에 나타난 다중극 차수이다.

벡터 \mathbf{a} 를 구하면, Eq. (5)를 이용하여 보간할 위치의 머리전달함수를 계산할 수 있으며, 제안하는 알고리즘의 전체 구조는 Fig. 3과 같다.

IV. 시뮬레이션

본 논문에서는 제안하는 알고리즘을 검증하기 위하여 실제 측정된 머리전달함수 데이터의 일부를 이용하여 보간하는 시뮬레이션을 진행하였다. 본 시뮬레이션에서는 CIPIC HRTF(Center for Image Processing and

Integrated Computing) database^[10]의 3번 피험자의 측정 데이터를 활용하였으며, 이 중 입력 측정데이터로 사용한 위치, 패닝 기법으로 확장한 데이터 위치, 그리고 보간 목표 위치는 Table 1에 정리되어 있다.

보간에 적용된 음향학적 모델링 차수 p 는 25로 설정되었으며, 최소자승법의 정규화 계수 계산을 위한 상수 ϵ 는 $1e^{-6}$ 의 값으로 설정되었다. Table 1에 의하면 측정데이터의 개수 N 은 45이므로 p^2 에 비해 매우 작고, 확장된 데이터의 개수 M 은 800이므로 p^2 에 비해 충분히 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 각 알고리즘을 통하여 보간된 머리전달함수의 크기를 도시한 그래프이다. 실선은 CIPIC 데이터에서 얻은 실측값, 즉 정답을 나타내며, 점선은 최

Table 1. Locations of HRTF data points of measurement, augmentation, and interpolation.

Type	Azimuths (°)	Elevations (°)	Number of data
Measurement	-80, -45, -30, -15, 0, 15, 30, 45, 80 (9 points)	-45, -22.5, 0, 22.5, 45 (5 points)	45
Augmentation	-80, -65, -55, -45, -40, -35, -30, -25, -20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 55, 65, 80 (25 points)	-45, -39.38, -33.75, -28.13, -22.5, -16.88, -11.25, -5.63, 0, 5.63, 11.25, 16.88, 22.5, 28.13, 39.38, 50.63, 61.88, 73.13, 84.38, 95.63, 106.88, 118.13, 129.38, 140.63, 151.88, 163.13, 174.38, 185.63, 196.88, 208.13, 219.38, 230.63 (32 points)	800
Interpolation	-80, -65, -55, -45, -40, -35, -30, -25, -20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 55, 65, 80 (25 points)	11.25 (1 point)	25

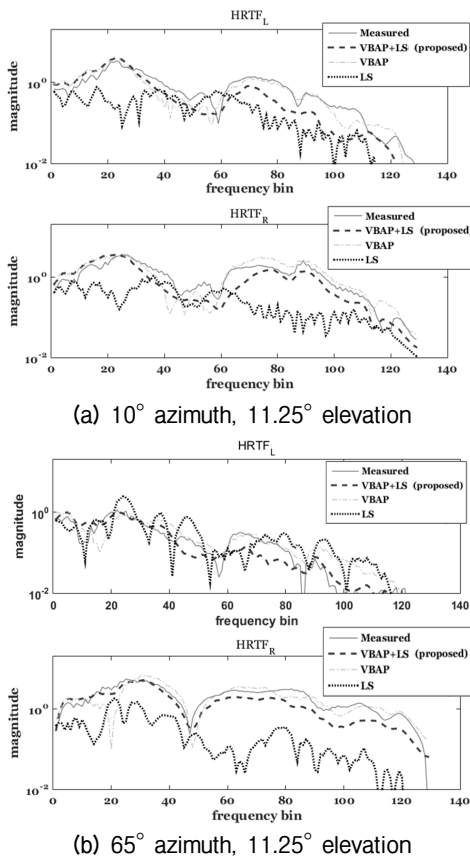


Fig. 4. Sample results of reconstructed HRTF. The graphs show the magnitude only.

Table 2. MSE (Mean Square Error) of the reconstructed HRTFs.

MSE (dB)	Proposed	VBAP	LS
Left	3.367	4.633	7.489
Right	2.849	4.519	7.065

소자승법¹⁴⁾을 사용한 경우, 쇄선은 벡터기반 크기 패닝 기법¹⁶⁾을 사용한 경우, 그리고 파선은 제안하는 알고리즘을 사용한 경우의 결과를 나타낸다.

모델링 차수의 제공(625)에 비해 측정 데이터의 개수(45)가 매우 작기 때문에 최소자승법은 적절한 계수를 찾아낼 수 없으며, 이에 따라 보간 성능이 매우 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 벡터기반 크기 패닝 기법을 적용한 알고리즘과 제안하는 알고리즘은 비교적 실측값을 잘 추정하고 있으나, 주파수 빈이 50 이하인 저주파에서 제안하는 알고리즘의 성능이 조금 더 나은 것을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 4(b)를 보면 벡터기반 크기 패닝 기법의 결과는 주파수 빈이 20인 곳에서 골짜기가 생기는 것을 확인할 수 있으나, 제안하는 알고리즘은 해당 부작용이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 스펙트럼 노치(notch)의 위치를 살펴보면 벡터기반 크기 패닝 기법을 적용한 알고리즘과 제안하는 알고리즘이 유사한 성능을 보이거나, 벡터기반 크기 패닝 기법은 노치의 형태가 비교적 뚜렷하지만 위치의 정확성이 떨어지고, 제안하는 알고리즘은 위치의 정확성은 상대적으로 높지만 형태가 뭉그러지는 특성이 있다고 볼 수 있다.

알고리즘의 성능을 비교하기 위하여 모든 보간점에 대해 평균 지승 에러를 계산하였으며, 그 결과를 Table 2에 도시하였다. Table 2의 결과를 살펴보면 제안하는 알고리즘의 추정 에러가 3.367 dB(좌측), 2.849 dB(우측)으로 기존의 벡터기반 크기 패닝 기법 및 최소자승법 기반의 기법 대비 성능이 향상된 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 적은 개수로 측정된 머리전달함수 데이터를 보간하는 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘은 음향학적 모델링을 기반으로 모델링 계수를 최소자승법으로 추정하는 방법을 사용하고

있으며, 이 때 측정점의 개수가 적을 경우 최소자승법을 사용할 수 없기 때문에 벡터기반 크기 패닝 기법을 적용하여 데이터를 확장함으로써 최소자승법을 사용할 수 있도록 하였다.

제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 CIPIC HRTF database를 이용한 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과 실제 측정값 대비 2 dB ~ 3 dB의 평균 지승 오차를 가지고 머리전달함수를 추정할 수 있었으며, 기존의 최소자승법 기반 알고리즘(약 7 dB)이나 벡터기반 크기 패닝 기법 기반의 알고리즘(약 4.5 dB) 보다 나은 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2016R1C1B1008951).

References

1. ITU-R Recommendation BS.775-3, *Multichannel Stereophonic Sound System with and without Accompanying Picture*, 2012.
2. J. Herre, J. Hilbert, A. Kuntz, and J. Plogsties, "MPEG-H audio - the new standard for universal spatial/3D audio coding," *J. Audio. Eng. Soc.* **62**, 821-830 (2015).
3. ITU-R Recommendation BS.2051, *Advanced Sound System for Programme Production*, 2014.
4. R. Duraiswaini, D. N. Zotkin, and N. A. Gumerov, "Interpolation and range extrapolation of HRTFs," *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2004 (ICASSP'04)*, 45-48 (2004).
5. D. N. Zotkin, R. Duraiswaini, and N. A. Gumerov, "Regularized HRTF fitting using spherical harmonics," *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics 2009 (WASPAA'09)*, 257-260 (2009).
6. H. Gamper, "Selection and interpolation of head-related transfer functions for rendering moving virtual sound sources," *Proc. of the 16th Int. Conference on Digital Audio Effects, DAFX-16*, (2013).
7. K. S. Lee and S. P. Lee, "HRTF Interpolation Using a

- Spherical Head Model,” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. 333-341 (2008).
8. V. Pulkki, “Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning,” J. Audio. Eng. Soc. **45**, 456-466 (1997).
 9. H. Kuttruff, *Acoustics: An Introduction* (Taylor & Francis, New York, 2007), pp. 69-74.
 10. V. R. Algazi, R. O. Duda, D. M. Thompson, and C. Avendano, “The Ctipic HRTF database,” IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics 2001 (WASPAA’01), 99-102 (2001).

저자 약력

▶ 이 석 진 (Seokjin Lee)



2006년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학
부 학사
2008년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학
부 석사
2012년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학
부 박사
2012년 3월: (주)LG전자 CTO연구소 선임
연구원
2014년 3월 ~ 현재: 경기대학교 전자공학
과 조교수