

청취자의 머리 크기와 거리에 따른 머리전달함수 보정 방법

명 현, 김현빈 (한국전자통신연구원 가상현실(VR) 연구개발센터)

The HRTF compensation method according to the audiences head width and distance

Hyun Myung, Hyun Bin Kim (VR R&D Center, ETRI)

요 약

본 논문은 입체 음상 정위 시스템에 있어서 청취자의 머리 크기와 음상 정위를 원하는 위치와의 거리에 따른 머리전달함수(HRTF; Head Related Transfer Function)의 보정 방법에 관한 것이다.

제안된 방법은 먼저 표준 반경에서 표준 머리 크기의 더미 헤드를 이용해 측정된 표준 머리전달함수 데이터베이스로부터 실제의 왼쪽 또는 오른쪽 귀를 기준으로 한 방위각과 고도각을 산출한다. 이렇게 산출된 방위각과 고도각을 기준으로 머리전달함수 데이터베이스의 인덱스를 보정한다. 음상 정위하고자 하는 3차원 공간상의 위치를 입력받게 되면, 입력받은 위치로부터 청취자의 왼쪽 또는 오른쪽 귀를 기준으로 한 방위각과 고도각을 산출한 후에 보정된 머리전달함수 데이터베이스로부터 머리전달함수를 가져와서 입력 모노 신호를 보정된 머리전달함수와 콘볼루션하여 입체음향을 생성하게 된다.

제안된 방법에 의해 청취자의 머리 크기 및 거리에 따라 보정된 머리전달함수를 사용함으로써 청취자에게 보다 실감나는 3차원 음상 정위 효과를 제공할 수 있다.

Keyword: 머리전달함수(HRTF), 입체 음향, 음상 정위, 개인차 보정

1. 서 론

3차원 음상 정위의 궁극적인 목적은 음상(音像)을 인위적으로 통제하는 데 있다. 음상 정위의 방법으로 가장 널리 쓰이는 방법은 머리전달함수를 측정하여 원음과 콘볼루션을 통해 좌, 우 출력을 만들어 내는 방법이다.

종래의 음상 정위 방법은 측정된 머리전달함수를 그대로 이용하면서 거리에 따른 이득 조정만을 해 왔었다. 이렇게 할 경우 음상 정위를 원하는 곳의 청취자의 머리 중심으로부터

터의 거리가 머리전달함수를 측정한 표준 반경과 일치하고, 청취자의 머리 크기가 표준 IST머리 크기와 동일하면 음상의 방향감이 일치하겠지만, 그렇지 않고 거리가 다르거나 머리의 크기 차이가 있다거나 하는 경우에는 따라서는 각도가 10도 이상 차이가 나는 잘못된 머리전달함수가 사용될 수 있다. 특히, 표준 반경보다 가까운 곳에 음상 정위를 하고자 하는 경우에는 청취자의 머리 폭이 중요한 변수가 되고, 경우에 따라서는 몇 십도 정도 방위각의 차이를 가져올 수 있다. 따라서

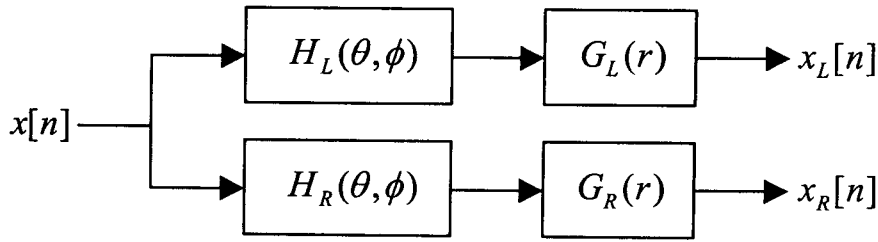


그림 1. Binaural Spatializer의 구성

이런 경우에는 거리에 따른 이득 조정만으로는 음상 정위 성능을 향상시키기 어렵다.

이상과 같은 종래 기술의 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 청취자의 머리 크기나 음원과 거리 변화를 고려하지 않고 표준 반경과 표준 머리 크기를 기준으로 작성된 표준 머리전달함수 데이터베이스를 보정하여, 머리 크기가 다르면서 일반적인 거리, 특히 표준 반경보다 가까운 곳에 위치한 청취자에게 3차원 음상의 방향감이 향상되도록 하는 입체 음향 재생방법을 제안하고자 한다.

2. 머리전달함수를 이용한 음상 정위

청취자가 지각한 음상에 대한 위치를 파악하는 것을 음상정위라 하고, 음상을 공간 상의 특정 장소에 위치시키는 기술을 음상정위기술이라 한다. 이 기술을 이용하면 고정된 특정 위치에서 소리가 지각되는 “위치음” 효과와 소리가 한 위치에서 다른 위치로 움직이는 “이동음” 효과를 생성할 수 있다. 위치음 생성은 해당 위치의 머리전달함수를 단순음과 컨볼루션 연산을 행함으로써 얻을 수 있고, 이동음 생성은 소리가 이동하는 궤적 상에 해당하는 연속적인 머리전달함수들을 단순음과 컨볼루션을 수행함으로써 얻을 수 있다.

일반적으로 음상정위의 구현은, 공간 상의 음원이 청취자의 두 귀에 이르기까지의 전달함수를 나타내는 머리전달함수에 의한 바이노럴 필터링 처리와 음원이 청취자로부터 떨어진 거리에 따른 소리세기(intensity) 변화를 시뮬레이션 하는 이득(gain) 조절 과정의 구현으로 구성된다. 그림 1은 모노 음원에 대한 2채널 입체음상정위(binaural spatialization) 과정을 나타내는 블록도이다. 그림 1에서 $x[n]$ 은 원음을 나타내고, (θ, ϕ, r) 은 각각 머리 중심

에서부터 원음까지의 방위각(azimuth), 고도각(elevation), 거리를 나타낸다. 또한 $H_L(\theta, \phi)$, $H_R(\theta, \phi)$ 는 왼쪽, 오른쪽 귀의 방위각, 고도각에 따른 HRTF를 나타내며, $G_L(r)$, $G_R(r)$ 은 거리에 따른 이득을 나타낸다. HRTF와의 컨볼루션과 이득 조절을 거쳐서 왼쪽, 오른쪽 출력인 $x_L[n]$, $x_R[n]$ 이 나오게 된다.

입력 모노 신호에 대한 바이노럴 HRTF 필터링에 있어서 음상정위 위치를 지정하는 가상음원의 위치 정보가 필요하며 가상음원의 청취자의 수평면(horizontal plane)과 정중면(median plane)에 대한 방위각과 고도각을 산정하여 이에 매핑되는 좌우 HRTF 쌍을 인덱싱하게 된다.

3. 머리전달함수의 보정

목적을 달성하기 위해 본 논문은 표준 반경에서 표준 머리 크기의 더미 헤드를 이용해 측정된 표준 머리전달함수 데이터베이스로부터 실제의 왼쪽 또는 오른쪽 귀를 기준으로 한 방위각과 고도각을 산출하고, 산출된 방위각과 고도각을 기준으로 머리전달함수 데이터베이스를 보정한다. 사용자로부터 음상 정위하고자 하는 3차원 공간상의 위치를 입력받게 되면, 입력받은 위치로부터 청취자의 왼쪽 또는 오른쪽 귀를 기준으로 한 방위각과 고도각을 산출하게 되고, 보정된 머리전달함수 데이터베이스로부터 머리전달함수를 획득하여, 입력 모노 신호를 머리전달함수와 컨볼루션하여 입체음향을 재생하게 된다.

그림 2는 보정된 표준 머리전달함수의 데이터베이스를 이용한 3차원 음향 재생방법의 실시예를 설명하고 있다.

표준 반경에서 표준 머리 크기를 가지는 더미헤드를 이용하여 측정된 표준 머리전달함수

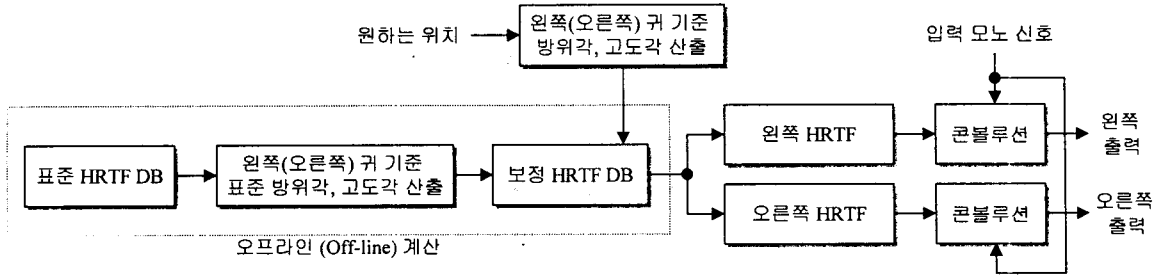


그림 2. 표준 머리전달함수의 보정을 통한 3차원 음향 재생방법의 블록다이어그램

(HRTF) 데이터베이스로부터 표준 반경과 표준 머리 크기를 이용하여, 왼쪽 또는 오른쪽 귀의 위치를 기준으로 한 표준 방위각 및 고도각을 산출하여, 머리전달함수(HRTF) 데이터베이스의 인덱스를 새롭게 재정렬하여 보정된 머리전달함수 데이터베이스를 구축한다. 머리전달함수(HRTF) 데이터베이스의 보정은 음상 정위를 수행하기 전에 오프라인으로 되어질 수 있다.

청취자의 머리를 중심이 원점에 있는 반경 a 의 구형으로 간주하면, 머리 중심을 원점으로 하고 청취자가 Y축을 바라보고 있다고 가정하였을 때, 음상 정위를 원하는 위치 (x, y) 의 Y축으로부터 시계방향으로의 각도를 방위각 θ 라고 한다. 오른쪽 귀를 기준으로 한 방위각 θ' 를 청취자 머리를 중심으로 측정된 방위각과 청취자의 머리 반경 a 및 원하는 위치와의 관계식을 구하면 다음 (1)식과 같다.

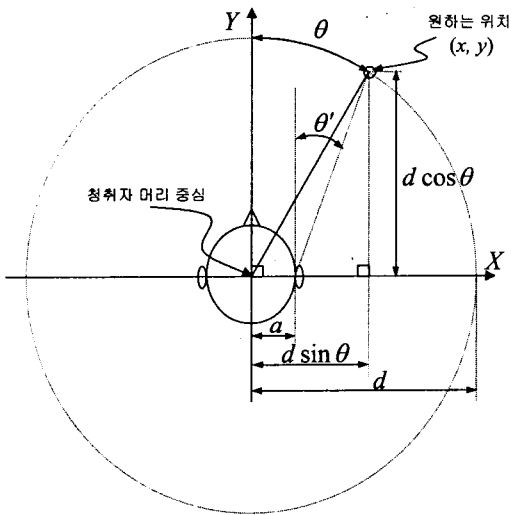


그림 3. 머리전달함수 보정을 위해 오른쪽 귀 (또는 왼쪽 귀) 기준의 방위각 산출

$$\tan \theta' = \frac{d \sin \theta - a}{d \cos \theta} = \tan \theta - \frac{a}{y} \quad (1)$$

(1)식에서 알 수 있듯이 음상정위를 원하는 위치의 Y 좌표인 y 와 청취자의 머리 반경인 a 에 따라서 머리 중심 기준 방위각 θ 와 오른쪽 귀 기준 방위각 θ' 이 달라질 수 있다.

그림 4는 3차원 직교 좌표계에서 머리전달함수 보정을 위해 오른쪽 귀 기준의 고도각 산출 방법을 설명한다.

표준 머리전달함수 데이터베이스를 이용하여 왼쪽 또는 오른쪽 귀의 위치를 기준으로 한 표준 방위각 및 고도각 산출 방법은 그림 3과 4를 참조하여 설명한다.

청취자의 머리 중심을 원점으로 하고 청취자가 Y축을 바라보고 있다고 가정하였을 때, 음상 정위를 원하는 위치 (x, y, z) 의 Y축으로부터 시계방향으로의 각도를 방위각 θ 라고 하고, X-Y 평면으로부터 Z축 방향으로의 각도를 고도각 ϕ 라고 한다. 오른쪽 귀를 기준으로 한 고도각 ϕ' 를 청취자 머리를 중심으로 측정된 고도각과 청취자의 머리 반경 a 및 원하는 위치와의 관계식을 구하면 다음 수식 2와 같다.

그림 3은 3차원 공간을 2차원 직교 좌표계인 X-Y 평면으로 투영한 평면도로서, 머리전달함수 보정을 위해 오른쪽 귀 기준의 방위각 산출 방법을 설명하고 있다.

$$\begin{aligned} \tan \phi' &= \frac{z}{\sqrt{(x-a)^2 + y^2}} \\ &= \tan \phi \cdot \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{(x-a)^2 + y^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

(2)식에서 알 수 있듯이 음상정위를 원하는

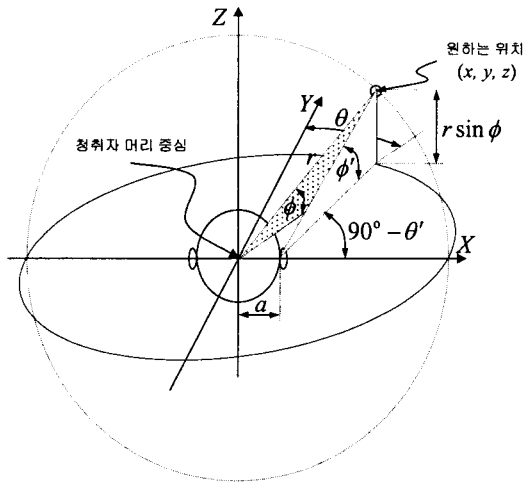


그림 4. 3차원 직교 좌표계에서 머리전달함수 보정을 위해 오른쪽 귀 (또는 왼쪽 귀) 기준의 고도각 산출 방법

위치의 X, Y 좌표인 (x, y)와 청취자의 머리 반경인 a에 따라서 머리 중심 기준 고도각 ϕ 와 오른쪽 귀 기준 고도각 ϕ' 이 달라질 수 있다.

(1)식과 (2)식을 거리인 r, 방위각인 θ , 고도각인 ϕ 를 이용하여 나타내면 (3)식과 (4)식이 유도된다.

$$\tan \theta' = \tan \theta - \frac{a}{r \cos \phi \cos \theta} \quad (3)$$

$$\tan \phi' = \frac{r \sin \phi}{\sqrt{(r \cos \phi \sin \theta - a)^2 + (r \cos \phi \cos \theta)^2}} \quad (4)$$

여기서 $A \equiv \frac{a}{r \cos \phi}$ 로 정의하면 더욱 간단한 (5)식과 (6)식이 유도된다.

$$\tan \theta' = \tan \theta - \frac{A}{\cos \theta} \quad (5)$$

$$\tan \phi' = \frac{\tan \phi}{\sqrt{(\sin \theta - A)^2 + \cos^2 \theta}} \quad (6)$$

이와 같이 (5)식과 (6)식을 이용하여 머리 전달함수(HRTF) 데이터베이스를 측정할 때, 사용된 방위각, 고도각으로부터 표준 방위각과 표준 고도각을 계산하여 머리 전달함수(HRTF) 데이터베이스를 재정렬하면 보정된 머리 전달함수(HRTF) 데이터베이스가 생성된다.

표 1은 각 고도각에 따른 방위각의 분해능

및 측정지점 수의 일 실시 예를 나타내고 있다. 일례로 청취자의 표준 머리 반경을 7.6cm로, 머리 전달함수(HRTF) 측정 표준 반경은 1.55m로 세팅한 후에 각 고도각, 방위각에 따라 보정된 고도각, 방위각을 (1)식과 (2)식을 이용하여 계산한다. 이렇게 해서 산출된 고도각, 방위각을 머리 전달함수(HRTF) 데이터베이스의 새로운 인덱스로 삼으면 보정된 머리 전달함수 데이터베이스가 생성된다.

고도각(도)	측정점 수	방위각 간격
-40	56	6.43
-30	60	6.00
-20	72	5.00
-10	72	5.00
0	72	5.00
10	72	5.00
20	72	5.00
30	60	6.00
40	56	6.43
50	45	8.00
60	36	10.00
70	24	15.00
80	12	30.00
90	1	x

표 1. 각 고도각에 따른 방위각의 분해능 및 측정지점 수의 일례

이제 실제로 음상 정위를 수행하기 위해 원하는 위치인 x, y, z가 입력되면 그림 2에서와 같이 오른쪽 귀를 기준으로 한 방위각과 고도각을 (1)식과 (2)식을 이용하여 계산한다. 방위각과 고도각이 산출되면 이제 보정된 머리 전달함수 데이터베이스에서 머리 전달함수를 얻게 된다. 오른쪽 귀를 기준으로 하였기 때문에 오른쪽 머리 전달함수를 먼저 얻고, 왼쪽 귀는 360도에서 오른쪽 귀의 방위각을 뺀 각도를 방위각으로 하여 왼쪽 머리 전달함수를 얻는다. 이렇게 해서 얻어진 머리 전달함수를 입력 모노 신호와 각각 콘볼루션한 후, 거리에 따른 소리 크기 조절을 하면, 각각 오른쪽, 왼쪽 출력이 얻어지게 된다. 거리에 따른 소리 크기 조절은 보통 거리에 반비례하는 방법을 쓰지만 일정한 비율로 감소시키는 방법을 쓰기도 한다.

그림 5는 표준 머리 전달함수 데이터베이스

와 보정된 머리전달함수 데이터베이스의 관계를 설명하기 위해서 고도각이 0도일 때에 방위각 보정의 일 실시 예를 그래프로 나타낸 도면이다. “표준(Standard)”은 $a=7.6\text{cm}$, $r=1.55\text{m}$ 로서 머리전달함수 데이터베이스를 측정된 표준 반경, 표준 머리 크기인 경우이고, “Case A”는 $a=8.0\text{cm}$, $r=0.3\text{m}$, “Case B”는 $a=7.0\text{cm}$, $r=0.2\text{m}$ 인 경우이다. 일례로서 방위각이 0도일 때 표준은 357도, Case A는 342도, Case B는 340도이다. 만일 Case B일 때 방위각이 0도로 입력되면 보정 방위각은 340도이므로, 그래프에서 수평선을 그어서 만나는 표준 방위각을 구하면 340도 정도가 되므로 원래 머리전달함수 데이터베이스에서는 340도에 해당하는 머리전달함수를 얻게 된다. 이렇게 되면 보정하지 않았을 때에는 약 20도 정도의 방위각 오차를 가지게 됨을 알 수 있다. 그러나 보정한 방법으로 했을 때는 청취자와의 거리와 머리 폭에 따라서 비교적 정확한 머리전달함수를 사용할 수 있게 된다.

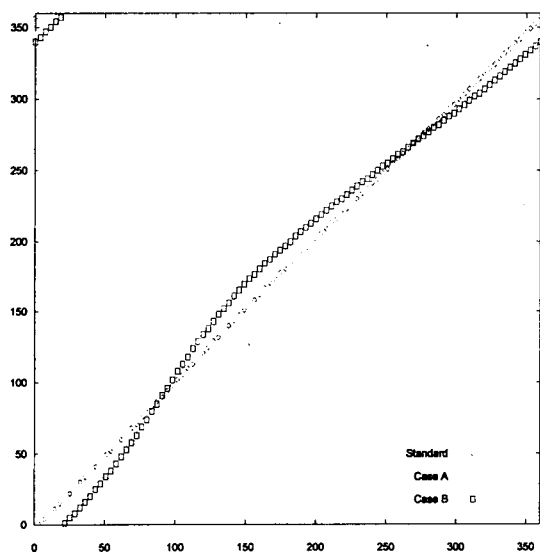


그림 5. 표준 머리전달함수 데이터베이스와 보정된 머리전달함수 데이터베이스의 관계를 설명하기 위해서 고도각이 0도일 때에 방위각 보정의 일 실시 예

4. 결론

기존의 음상 제어 방법은 표준 머리전달함수를 그대로 사용하기 때문에 청취자의 머리 크기나 거리에 따라서 개인차가 보정되지 않

고 입체음향이 생성되어서 부적절한 음상 정위 효과를 들려줄 수 밖에 없었다.

제안된 방법에 의하면 청취자의 머리 크기나 음상 정위를 원하는 위치의 거리에 따라서 기존에 구축된 표준 머리전달함수 데이터베이스를 보정함으로써, 청취자에게 더욱 실감나는 3차원 음상 정위 효과를 제공할 수 있다. 특히, 표준 머리전달함수 데이터베이스를 재활용할 수 있다는 점과 비교적 간단한 수식으로 보정이 되므로 추가적인 계산에 따른 로드가 별로 없다는 점이 장점이라고 할 수 있겠다.

참고문헌

- [1] 이희종, 서상원, 이명진, 김용완, “입체음향 기술”, 소프트웨어 기술동향, vol.2, no.2, pp.54-80, 1998.
- [2] D. R. Begault, ‘3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia,’ New York, Academic Press Inc., 1994.
- [3] 명 현, 김풍민, 김용완, 이의택, “자연스러운 이동음 입체음향 효과의 구현”, HCI 2000 학술대회, pp.174-179, 2000.
- [4] 서상원, 김재우, 이명진, 김용완, “Neumann 더미헤드를 사용한 머리전달함수(HRTF)의 측정”, 한국감성과학회 춘계학술발표회, 1998.
- [5] Hyun Myung, *et al.*, “The Development of 3D Sound Signal Editor “SoriWave” for Multimedia Contents,” AES(Audio Engineering Society) 106th Convention, 4946(P4), Munich, Germany, May 11, 1999.
- [6] 이명진, 이희종, 김현빈, “게임 S/W 개발용 입체음향 저작도구 개발에 관하여”, 한국음향학회 학술대회 논문집, 제16권 제1(s)호, pp.197-200, 1997.
- [7] 서상원, 김기홍, “입체음향 생성 저작도구 SoriWave를 위한 음상정위 인터페이스의 개발”, HCI’99 학술대회지, pp.515-519, 1999.