

논문 2010-47SP-5-5

다채널 포맷 변환과 공간적인 입체 음향 정보의 효과적인 유지에 대한 연구

(A Study on Multichannel Format Conversion and Representation of Spatial Sound Information)

전 세 운*, 박 영 철**, 윤 대 희***

(Se-Woon Jeon, Young-Cheol Park, and Dae-Hee Youn)

요 약

본 논문에서는 다채널 스피커를 사용하는 서로 다른 포맷의 채널 환경에서 입체 음향 신호의 공간 정보를 효과적인 유지할 수 있는 다채널 포맷 변환 알고리즘을 제안한다. 이를 위하여 다채널 오디오 신호에 대한 공간 정보 분석 및 음원 분리 기술과, 다채널 신호의 재합성 및 공간 정보 재현 기술을 적용하였다. 입체 음향 신호의 공간 정보를 유지하기 위하여 음원의 방향 감을 생성하는 페닝 개인 정보를 추정하고, 이를 이용하여 방향성을 가지는 음원과 각 채널의 잔향을 분리하는 음원 분리 알고리즘을 제안하였다. 또한 변환하고자 하는 다채널 포맷에서 음원의 방향성을 유지하고 입체 음향 정보를 충실히 재현하기 위하여, 채널 포맷에 따른 후처리 기술을 적용한 다채널 재합성 알고리즘을 제안하였다. 기존의 다채널 포맷 변환 기술에서는 음원 분리 및 재합성 과정에서 음원의 에너지 비율 및 방향 정보를 유지하지 못하는 문제점이 발견되었으나, 제안된 방법을 사용함으로써 입체 음향의 공간적 특성을 다채널 변환 과정에서 강건하게 유지할 수 있었다.

Abstract

In this study, the algorithms for multichannel format conversion and robust representation of spatial sound information are proposed. In the spatial analysis, the directional information of sound source is estimated and sound sources are separated from stereo signal. In the spatial resynthesis, the multichannel matrixing with spatial repanning and post-scaling method are applied to represent a spatial sound. The conventional method about channel format conversion has the problem that the energy of sound source and the spatial information are not preserved in the desired channel format. Because the proposed method is designed in consideration of the target multichannel format and its resynthesized signal, the robust representation of spatial sound can be achieved in the multichannel format conversion.

Keywords : 다채널, 입체 음향, 음원 분리, 공간 정보, 업믹스

I. 서 론

입체 음향 효과를 생성하기 위한 오디오 엔지니어들의 노력은 렌더링 알고리즘을 개선하거나 다양한 스피

커 배치를 사용하여 소기의 목적을 달성할 수 있었다. 이로 인해 다채널(multichannel) 오디오 재생 시스템은 그 수와 배치가 매우 다양해졌다. 하지만 여전히 대부분의 음악 콘텐츠는 스테레오(stereo)로 녹음, 합성되고 있으며 기존의 오디오 신호도 대부분 스테레오로 존재하기 때문에, 이러한 대다수의 2 채널 오디오 신호를 임의의 다채널 배치에서 재생하기 위한 업믹스(Upmix) 기술이 연구되어왔다^[1~4]. 또한 최근에는 다양해진 다채널 포맷에 대해서, 다채널 신호를 채널의 수와 배치가

* 학생회원, *** 평생회원, 연세대학교 전기전자공학부 (School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

** 정회원, 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부 (Computer and Telecommunications Engineering Division, Yonsei University)

접수일자: 2010년7월5일, 수정완료일: 2010년8월13일

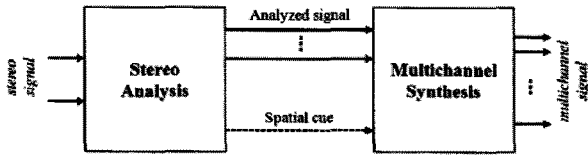


그림 1. 다채널 포맷 변환을 위한 신호 분석 및 재합성 과정; 스테레오 신호의 다채널 신호로의 변환
 Fig. 1. Blockdiagram of multichannel format conversion; stereo to multichannel.

다른 또 다른 다채널 신호로 변환하기 위한 채널 포맷 변환(channel format conversion) 기술이나, 채널 수를 줄이기 위한 다운믹스(Downmix) 알고리즘이 연구되고 있다^[5~6].

입체 음향 오디오 시스템에서 채널 변환 기술은 크게 두 가지 과정으로 이루어져 있다^[7]. 그림 1에는 이러한 음원 분석(spatial analysis) 및 재합성(spatial resynthesis) 기술이 나타나있는데, 첫 번째는 입력 신호의 공간 정보(spatial cue)를 분석하고 신호에 포함된 음원을 분리(sound source separation)하는 과정이다. 분석된 공간 정보는 음향 공간에서 음원이 가지는 방향 정보에 해당하는 것으로, 이후 새로운 오디오 채널 포맷에서 음원의 공간 정보를 재생하는데 사용된다. 두 번째는 다채널 포맷에 적합하도록 분리된 음원을 재합성하고 입력 신호가 가지고 있던 공간 정보를 재현하는 과정이다. 새로운 채널 포맷을 활용함으로써 보다 효과적인 음향 효과를 기대할 수 있지만, 음원이 가지는 공간 정보의 왜곡을 최소화 하는 것이 채널 포맷 변환 과정의 중요한 목적이다. 따라서 본 연구에서는 원래의 채널 신호가 가지는 공간 정보, 즉 음원의 방향 정보와 에너지 정보를 변환된 채널 신호에서도 강건하게 유지할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

입력 신호의 채널은 가장 범용적으로 사용되고 있는 2 채널의 스테레오 신호를 가정하였다. 그리고 출력 신호는 ITU 3/2의 5 채널 포맷을 목표로 하여 스테레오 신호를 다채널로 변환하는 업믹스 알고리즘을 기본 구조로 하고 있다^[8]. 먼저 입력 스테레오에 대한 주파수 도메인에서의 신호 모델을 다음과 같이 가정한다.

$$\begin{aligned} X_L &= a_L S + N_L \\ X_R &= a_R S + N_R \end{aligned} \quad (1)$$

좌우 두 채널에는 페닝 게인(panning gain) a_L 과 a_R 에 의해 방향성을 가지는 음원 S 와 잔향 성분에 해당하는 N_L, N_R 이 섞여 있다. 그리고 페닝 게인은 다음과

같은 에너지 정규화(energy normalization)를 위한 관계를 갖는다.

$$a_L^2 + a_R^2 = 1. \quad (2)$$

페닝 알고리즘은 기본적인 레벨 페닝(amplitude panning) 방법을 가정하고 있으며, 페닝 게인의 계산은 탄젠트 법칙(tangent law)에 기반하고 있는 Vector Base Amplitude Panning(VBAP) 방법에 따라 적용하였다^[9]. VBAP 알고리즘은 III장 1절에서 임의의 배치를 갖는 다채널 신호를 만들 때, 음원이 방향성을 갖도록 렌더링하는 과정에서 다시 사용한다. 수식 (1)과 같은 2 채널 신호 모델은 다양한 채널 변환 연구에서 공통적으로 가정하고 있으며, 본 연구에서도 위 신호 모델에 대해서 Short Time Fourier Transform(STFT)에 의해 얻어진 주파수 신호를 청각적 특성에 기반한 서브 밴드(Critical band) 단위로 나누어 입력 신호를 분석하였다^[10].

앞선 연구에서는 기존의 알고리즘이 가지고 있는 채널 포맷 변환 과정에서의 공간 정보의 왜곡을 분석하고 이를 줄일 수 있는 개선 방안을 제시하였다^[11]. 본 연구에서는 이를 기반으로 하여 먼저, 공간 정보를 얻기 위한 새로운 신호 분석 알고리즘을 제안하고, 채널 합성 과정에서 보다 정확한 방향감 재현을 위한 새로운 다채널 음원 페닝 알고리즘을 제안하였다. 그리고 음원의 에너지 정보를 효과적으로 유지할 수 있는 후처리 기술을 추가로 제안하였다. 제안된 알고리즘들은 다양한 채널 포맷 변환 과정에서도 이용될 수 있는 호환성을 가지고 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 스테레오 신호에 대한 공간 정보의 분석과 음원 분리에 대한 알고리즘이 II장에 소개되어 있고, III장에서 ITU 3/2 채널 배치에 대한 다채널 신호 합성과 공간 정보의 재현 알고리즘을 설명한다. IV장에서는 제안된 다채널 음원 페닝 알고리즘과 채널 포맷 변환 기술의 성능을 기존의 기술과 비교하고, V장에서 결론을 맺는다.

II. 공간 정보의 분석과 음원 분리

1. 스테레오 신호 분석 알고리즘

가. 페닝 게인 추정

두 채널에 공통적으로 존재하는 음원 소스는 페닝 게인의 레벨 차이에 의해서 방향감을 가진다^[9]. 따라서 페

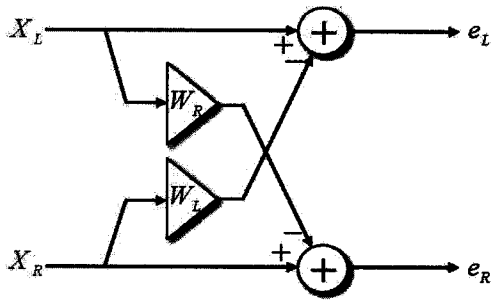


그림 2. 스테레오 채널 간의 상호 교차 추정 방법
Fig. 2. Cross-channel estimation of stereo signal.

닝 계인의 추정을 통해서 음원의 평면상의 방향각도 (azimuth)를 추정할 수 있다. 그리고 이러한 음원의 방향 정보는 변환된 다채널 포맷에서 음원의 공간적 특성을 유지하기 위한 중요한 정보로 사용된다.

스테레오 신호에 레벨 차이를 가지는 음원이 유일하게 공통적으로 존재한다면, 좌우 채널의 상호 상관도 (cross-correlation coefficient)는 1 값을 갖게 된다. 하지만 잔향 성분이나 기타 다른 음원이 각 채널에 독립적으로 존재하는 경우에는 스테레오의 상호 상관도의 크기는 1보다 작은 값을 갖게 된다. 따라서 이러한 특성을 이용하여, 스테레오 신호의 각 채널의 상호 상관도를 떨어뜨리는 잔향 성분을 추출하는 알고리즘이 그림 2에 나타나 있다. 교차 필터의 계수 W_L 과 W_R 는 두 채널 사이의 공통적인 성분을 제거하고, 나머지 상관도가 적은 성분만을 남긴다. W_L 과 W_R 는 적응형 알고리즘(adaptive algorithm)을 통해서 업데이트할 수 있는데, 최소자승(Least-Squares, LS) 최적화 해법에 의해 수식 (1)로부터 계산할 수 있는 최적값은 다음과 같다^[12].

$$\begin{aligned} W_L^o &= \frac{a_L a_R \hat{P}_S}{a_R^2 \hat{P}_S + \hat{P}_N} = \frac{a_L a_R}{a_R^2 + \hat{P}_N / \hat{P}_S} \\ W_R^o &= \frac{a_L a_R \hat{P}_S}{a_L^2 \hat{P}_S + \hat{P}_N} = \frac{a_L a_R}{a_L^2 + \hat{P}_N / \hat{P}_S} \end{aligned} \quad (3)$$

\hat{P}_S 와 \hat{P}_N 은 각각 음원과 잔향 성분의 추정된 파워를 나타내며 좌우 채널의 잔향 성분의 파워는 같다고 가정한다. 본 연구에서는 위 수식으로부터 방향성을 갖는 음원의 좌우 채널에 곱해진 패닝 계인을 추정하기 위하여, 필터 계수로부터 새로운 변수 κ 를 정의한다. κ 는 최적 필터 계수 W_L^o 과 W_R^o 에 대해서 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\kappa = \frac{1}{W_L^o} - \frac{1}{W_R^o} = \frac{a_R^2 - a_L^2}{a_L a_R}. \quad (4)$$

앞서 정의된 패닝 알고리즘으로부터 각 채널의 패닝 계인은 수식 (2)와 같은 관계를 가지므로, 이를 통하여 다음과 같이 위 수식으로부터 패닝 계인 값을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{a}_L &= \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\kappa}{2} \frac{1}{\sqrt{4 + \kappa^2}}} \\ \hat{a}_R &= \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{\kappa}{2} \frac{1}{\sqrt{4 + \kappa^2}}} \end{aligned} \quad (5)$$

그리고 추정된 패닝 계인으로부터 패닝 알고리즘으로 가정된 다음과 같은 탄젠트 법칙에 의해서 평면 공간 상의 방향 각도(θ)로 얻을 수 있다.

$$\frac{a_L - a_R}{a_L + a_R} = \frac{\tan \theta}{\tan 30^\circ}. \quad (6)$$

추정된 패닝 각도 θ 는 스테레오 채널의 배치에 의한 사이 공간 범위(좌30°~우30°)에서 음원이 가지는 방향 정보에 해당한다. 그리고 음원의 방향은 변환된 다채널 포맷에서도 그대로 유지되어야 하는 공간 정보(spatial information)에 해당한다. 따라서 이 정보는 변환된 다채널 포맷에서 해당 음원의 방향감 재현과 다채널 신호의 재합성을 위한 정보로서 합성단에 전달되어 사용된다.

나. 음원 분리 알고리즘

스테레오 신호에 포함된 방향감을 가지는 음원과 배경음 또는 공간적 특성을 나타내는 잔향 성분을 분리하는 것은 전체 채널 변환 성능에 영향을 미칠 수 있는 중요한 음원 분석 과정이다. 왜냐하면 패닝 계인이 곱해진 음원의 방향감이나 잔향 성분의 공간적 특성을 임의의 채널 포맷에서도 유지 및 재현시키는 것이 채널 변환 알고리즘의 성능을 평가하는 중요한 요소이기 때문이다.

수식 (1)의 신호 모델을 기반으로, 스테레오 채널에서의 음원 분리는 다음과 같이 이루어진다. 먼저, 기존의 채널 변환 기술에 사용된 음원 분리 알고리즘은 방향감을 가지는 음원 분리(primary source separation)와 잔향 성분 추출(ambient extraction) 기술로 구분할 수 있다. 전자는 수식 (1)에서 패닝 계인에 의해 각 채널에

공통적으로 포함된 음원 S 를 분리하고 이를 새로운 채널 포맷에서 같은 방향감을 재현하는 기술이다. 후자는 주로 업믹스 기술에서 사용되는 기술로서 각 채널의 잔향 성분 N_L, N_R 을 추출하여 후방 또는 전체 써라운드 사운드를 풍부하게 만드는데 사용된다. 이후에는 방향성을 가지는 음원과 잔향 성분을 음원 분리 알고리즘을 이용하여 동시에 분리하는 기술이 연구되었고, 다중 스피커 어레이(multiple-loudspeaker array)에서 Wave Field Synthesis (WFS) 기술을 통해 음장감을 재현하는데 사용되었다^[3].

Faller에 의해 제안된 스테레오 모델에 대한 음원 분리 알고리즘은 합성된 음원들에 대해서 독립적인 (independent) 특성을 가정하여, 최소자승 해법에 의한 최적 계수를 계산함으로써 다음과 같이 음원들을 동시에 분리한다.

$$\begin{bmatrix} \hat{S} \\ \hat{N}_L \\ \hat{N}_R \end{bmatrix} = \mathbf{W} \cdot \begin{bmatrix} X_L \\ X_R \end{bmatrix}, \quad (7)$$

where $\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 \\ w_3 & w_4 \\ w_5 & w_6 \end{bmatrix}$.

위 수식에서 \mathbf{W} 는 S 와 N_L, N_R 를 분리하기 위한 음원 분리 계수로 구성된 행렬에 해당하고, 각 계수는 다음과 같이 추정된 패닝 계인과 음원의 파워 정보에 의해 얻어진다.

$$\begin{aligned} w_1 &= \frac{\hat{a}_L}{(\hat{a}_L^2 + \hat{a}_R^2) + \hat{P}_N / \hat{P}_S} \\ w_2 &= \frac{\hat{a}_R}{(\hat{a}_L^2 + \hat{a}_R^2) + \hat{P}_N / \hat{P}_S} \\ w_3 &= \frac{\hat{a}_R^2 + \hat{P}_N / \hat{P}_S}{(\hat{a}_L^2 + \hat{a}_R^2) + \hat{P}_N / \hat{P}_S} \\ w_4 &= \frac{-\hat{a}_L \hat{a}_R}{(\hat{a}_L^2 + \hat{a}_R^2) + \hat{P}_N / \hat{P}_S} \\ w_5 &= \frac{-\hat{a}_L \hat{a}_R}{(\hat{a}_L^2 + \hat{a}_R^2) + \hat{P}_N / \hat{P}_S} \end{aligned} \quad (8)$$

\hat{P}_S 와 \hat{P}_N 은 패닝 계인과 함께 스테레오 신호로부터 추정된 음원의 파워 크기이며, 이러한 추정은 모든 음원의 독립적인 특성이 이상적으로 유지된 경우에 정확하게 추정할 수 있다. 하지만 일반적으로 실제 음원의

특성은 이상적인 독립성을 갖기 어렵고, 또한 시간 변화에 따라 그 특성이 계속해서 변화한다. 게다가 위의 계수값은 음원의 공간적인 특성, 즉 음원의 방향감을 결정하는 패닝 계인뿐만 아니라 시간의 변화와 주파수적 분포에 따라 달라질 수 있는 음원의 에너지 정보에 의해서도 영향을 받게 된다^[11]. 예를 들어 음원 S 의 방향감을 만드는 패닝 계인 a_L 과 a_R 가 일정하더라도, 즉 S 의 방향이 고정된 경우, 음원 에너지와 잔향 성분의 에너지 비율(Primary to Ambient energy Ratio, PAR)이 변화하는 경우에는 음원 분리 계수값이 달라지게 되고, 이로 인하여 음원 분리 성능은 영향을 받게 된다. 음원 분리 성능의 변화는 채널 변환과 같은 과정에서 음원의 공간 정보 유지에 영향을 주게 되고, 이는 변환된 채널 환경에서 공간적 특성의 유지(spatial fidelity) 성능을 떨어뜨리는 요인이 된다^[14]. 따라서 본 논문에서는 이러한 스테레오 신호에 대한 음원 분리 기술을 기반으로 하되, 음원의 방향성 유지와 입체 음향 정보의 충실한 재현에 있어서, 보다 강건한 음원 분리 알고리즘을 제안한다.

신호의 합성 모델을 효과적으로 표현하기 위해서 수식 (1)은 행렬식을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}, \text{ where } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_L & 1 & 0 \\ a_R & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

$\mathbf{X} = [X_L X_R]^T$ 는 (2x1)의 크기를 갖는 스테레오 신호를 나타내고, (2x3) 크기의 \mathbf{A} 는 믹싱 행렬(mixing matrix)을, 그리고 $\mathbf{S} = [S N_L N_R]^T$ 는 패닝 소스와 각 채널의 잔향 성분에 해당하는 (3x1) 크기의 음원 행렬을 나타낸다. \mathbf{A} 의 성분인 a_L 과 a_R 은 수식 (1)의 스테레오 신호 모델에서 적용된 \mathbf{S} 에 대한 패닝 계인에 해당한다.

스테레오 신호로부터 \mathbf{S} 의 성분에 해당하는 각각의 음원을 분리하기 위해서는 \mathbf{A} 에 대한 역행렬(inverse matrix)을 구해야 한다. 하지만 \mathbf{A} 의 행과 열의 크기가 같지 않으므로 역행렬을 직접 구할 수 없다. 특히 수식 (9)의 일반적인 스테레오 모델은 믹싱 행렬의 행의 길이가 열의 길이보다 크기 때문에, 수식 (9)는 *under-etermined* 혹은 *degenerate* 경우에 해당한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 일반적인 신호 모델에 대해서 음원을 분리하기 위하여, 최소자승 해법에 의한 최적화 방

법인 수도역행렬(pseudoinverse matrix) 방법을 이용하였다^[12]. 합성된 음원의 수가 합성된 신호의 채널 수 보다 많은 믹싱 행렬 A 에 대한 수도역행렬은 $A^+ = A^H(A^H A)^{-1}$ 와 같이 구해질 수 있다. A 의 성분은 모두 양의 실수값을 가지므로, 허미션 행렬(hermitian matrix, H)은 전치 행렬(transpose matrix, T)을 사용하여 $A^+ = A^T(A^T A)^{-1}$ 으로 얻을 수 있다.

$$A^+ = \frac{1}{a_L^2 + a_R^2 + 1} \begin{bmatrix} a_L & a_R \\ a_R^2 + 1 - a_L a_R & \\ -a_L a_R & a_L^2 + 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

음원 분리를 위한 수도역행렬을 이용하여 방향성을 가지는 음원과 각 채널의 잔향 성분을 다음과 같이 분리할 수 있다.

$$\hat{S} = A^+ X \quad (11)$$

under-determined 경우에 해당하는 일반적인 스테레오 모델은 위의 음원 분리 알고리즘을 적용하더라도 완벽하게 음원을 분리할 수 없다. 때문에 분리된 \hat{S} 의 음원에는 분리하고자 하는 음원에 원치 않는 다른 음원들이 간섭(interference) 혹은 잡음의 형태로 포함된다. 이는 Fallers의 음원 분리 방법이나, 다른 음원 분리 알고리즘(Blind source separation)에서도 나타나는 문제점이다. 음원 분리 알고리즘에서는 간섭을 최소화하면서 분리하고자 하는 음원의 상대적인 크기를 최대화함으로써 성능을 평가할 수 있었다. 하지만 본 연구와 같은 입체 음향 신호처리에서는 음원 분리 성능의 극대화보다 공간적인 정보의 유지가 우선해야 한다. 따라서 제안된 음원 분리 알고리즘의 장점은 이전 방법과 달리, 음원의 에너지 정보에 영향 받지 않고 공간상에서의 방향 정보만을 반영하여 음원을 분리할 수 있다는 점이다.

III. 다채널 신호 합성과 공간 정보의 유지

채널 포맷의 변환은 다양한 스피커 환경에서도 입체 음향 효과의 공간적 특성의 열하를 피하면서, 동시에 새로운 스피커 배치의 효과를 극대화 할 수 있는 성능을 갖추어야 한다. 이를 위해 음원의 방향 정보가 정확하게 재현 되어야 하며, 음원의 에너지 정보 또한 효과적으로 유지되어야 한다. 이전 장에서는 다채널 변환 기술의 첫 번째 단계로 스테레오 신호로부터 음원의 공

간 정보를 분석하고 음원 성분을 분리하는 알고리즘을 소개하였다. 이번 장에서는 이전 단계에서 분석된 공간 정보와 분리된 음원을 적절히 합성하여, 변환하고자 하는 채널 포맷에서 효과적으로 재현하는 알고리즘을 소개한다. 변환하고자 하는 다채널 포맷은 가장 범용적으로 사용되는 ITU 3/2 채널을 사용하였으며, 입체 음향 정보의 효과적인 유지 및 확장된 스피커 채널 환경에서의 음향 효과의 재현을 위한 알고리즘을 제안하였다.

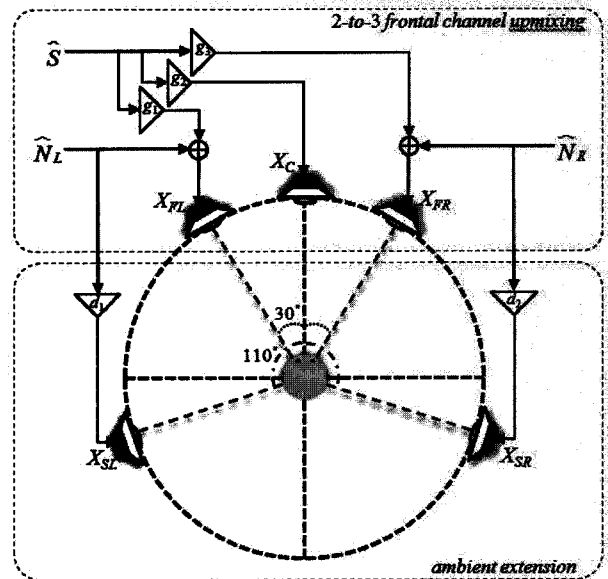


그림 3. ITU 3/2 채널 포맷에서의 전방 채널 합성과 후방 써라운드 채널 생성 알고리즘

Fig. 3. A Scheme of spatial resynthesis algorithm in the ITU 3/2 channel format: 2-to-3 frontal channel upmixing and ambient extension.

1. 전방 채널의 합성과 음원 렌더링

ITU 3/2 스피커 포맷은 그림 3과 같이, 평면 공간(median plane)에서 전방에 FL, C, FR의 세 채널과 후방에 SL, SR의 두 채널을 갖는 배치이다^[8]. 전방에서의 방향감을 향상시키기 위해서 일반적인 스테레오 배치(좌30°, 우30°)에 대해서 청취자의 정면(0°)에 C 채널이 추가된 형태를 갖는다. 그리고 후방 채널은 약 110°의 각도에 위치하여 청취자를 둘러싸는 써라운드 음향 효과를 향상시키는 역할을 하고 있다.

스테레오 신호를 그림 3과 같은 다채널 포맷에서 재생할 때 가장 큰 차이는 전방 스피커 개수의 증가이다. 추가된 C 채널은 스테레오 신호에서 페닝 알고리즘을 적용할 때는 고려하지 않은 채널이므로 세 개의 스피커를 이용한 새로운 페닝 알고리즘을 적용하여야 한다.

입의 배치의 다채널 스피커 환경에서의 패닝 알고리즘은 두 쌍의 스피커 쌍(pair-wise)을 묶어 스피커 배치에 따른 벡터 기반으로 패닝 계인을 계산하는 VBAP 방법이 일반적이다^[9]. VBAP 방법은 기존의 레벨 패닝 방법들이 대부분 대칭의 스테레오 환경에서 적용 가능했던 한계를 벗어나 다양한 스피커 배치와 또 3차원의 고도(elevation)에 대한 패닝 계산도 쉽게 가능해졌다는 점에서 의미가 있다. 이 외에도 Ambisonics에서의 음원 렌더링 방법은 다수의 스피커에서 패닝 각도에 따라 동시에 양의 값 혹은 음의 값을 가지는 패닝 계인을 사용함으로써 보다 향상된 방향감을 재생할 수 있지만, precedence 효과에 의해서 pair-wise 방법에 비해 스위트스팟(sweet-spot)이 상대적으로 작고, 음색의 열하를 어느 정도 감수해야하는 단점이 있다. 반면에 레벨 패닝 방법은 스피커로부터 먼 방향을 패닝할수록 음원의 크기가 넓어져 방향감의 정확도가 떨어지는(directional spreading) 단점을 가지고 있지만 Ambisonics 방법에 비해 스위트스팟의 제약이 상대적으로 적고 계산량이 적은 장점을 가지고 있다^[15].

본 연구에서는 기본적으로 VBAP 방법에 의한 전방 세 채널에서의 패닝 계인을 이용하여, 증가된 전방 스피커 환경에서의 음원의 방향감을 재현하였다. 그리고 업믹스 스피커 환경에서 센터 채널의 추가로 인해 directional spreading이 불연속적으로 변하는 문제를 해결하기 위하여 pair-wise가 아닌 세 채널의 쌍을 이용하는 평면 공간의 패닝 방법을 제안하였다.

음원 분리 알고리즘에 의해서 분리된 방향감을 가지는 음원과 각 채널의 잔향 성분은 다음과 같은 재합성 알고리즘에 의해서 스테레오에서의 공간적 특징을 유지한다.

$$\begin{bmatrix} \widehat{X}_{FL} \\ \widehat{X}_C \\ \widehat{X}_{FR} \end{bmatrix} = \mathbf{G}_f \cdot \widehat{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} g_1 & 1 & 0 \\ g_2 & 0 & 0 \\ g_3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{N}_L \\ \widehat{N}_R \end{bmatrix}. \quad (12)$$

수식 (11)에서 분리된 음원들은 전방 채널에 대한 합성 행렬 \mathbf{G}_f 에 의해서 전방 세 채널로 합성된다. 이때 음원 $\widehat{\mathbf{S}}$ 에 대한 세 채널에서의 패닝 계인은 수식 (6)에서 스테레오 음원 분석 과정에서 얻은 공간 정보, 즉 음원의 방향 정보를 이용하여 계산된다. VBAP 방법으로 계산한 스테레오 포맷의 두 채널과 ITU 3/2 포맷의 전방 세 채널에 대한 패닝 계인이 그림 4-(가)(나)에 표현되어 있다^[9]. 세 채널에 대한 VBAP 패닝 계인은 C 채널

을 기준으로 L과 C 또는 C와 R의 스피커 쌍으로 묶어 패닝 계인이 계산된 것을 알 수 있다. 하지만 이와 같은 스피커 쌍을 이용한 레벨 패닝 방법은 C 채널을 기준으로 좌우 두 채널 가운데 한가지만을 이용함으로써, 정면에서 불연속적인 느낌을 줄 수 있고, 실제 지각적으로 정면 혹은 측면 스피커 쪽으로 음원의 방향감이 물리는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 전방 세 채널의 스피커 쌍을 모두 이용하면서 VBAP와 같은 간단한 연산량으로 계산이 가능한 다채널 스피커 쌍을 이용한 패닝 방법을 적용하였다^[13].

VBAP 방법에 의한 패닝 계인은 한 쌍의 스피커 벡터 행렬과 가상 음원의 벡터에 의해서 계산된다. 즉, 각 스피커 벡터의 상대적인 크기 조절을 통해서 가상 음원 벡터의 방향을 원하는 방향으로 조절하는 것이다. 따라서 C 채널 스피커 벡터를 추가하는 경우, 실제로는 다양한 패닝 계인값을 통해서 원하는 가상 음원 벡터의 방향감을 만들 수 있다.

$$\mathbf{P}^T = \mathbf{g}\mathbf{L}_{123}, \text{ where } \mathbf{P} = g_1\mathbf{l}_1 + g_2\mathbf{l}_2 + g_3\mathbf{l}_3. \quad (13)$$

하지만 기존의 VBAP 방법에서 x-y 평면 상의 한 쌍의 스피커 벡터 행렬은 (2x2)의 크기를 가지므로 역행렬을 계산할 수 있는 반면, 세 스피커에 대한 벡터 행렬 \mathbf{L}_{123} 은 역행렬을 계산하기 어렵다. 따라서 이에 대한 최적값을 얻기 위하여, 최소자승 해법의 최적화 방법에 의한 수도역행렬을 적용하여 다음과 같이 세 채널의 스피커 쌍에 대한 패닝 계인을 계산하였다.

$$\mathbf{g} = \mathbf{P}^T \mathbf{L}_{123}^+ = [p_1 \ p_2] \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \\ l_{31} & l_{32} \end{bmatrix}^+. \quad (14)$$

위의 패닝 계인의 정규화 된 결과는 그림 4-(다)에 나타나 있다. 제안된 세 채널 스피커 쌍을 이용한 패닝 계인의 특징은 정면(0°)에서는 C 채널의 계인이 가장 크며 좌우의 방향을 패닝할 경우에도, 세 채널을 모두 이용하여 방향감을 만들고 있는 것이다. 하지만 이와 같이 수도역행렬을 이용한 최적값의 결과는 측면으로 치우친 방향을 패닝할 때, 반대 쪽 스피커의 패닝 계인이 음(-)의 값을 가짐으로 인해 위상(phase)의 변화를 일으킬 수 있는 문제점을 가지고 있다. 벡터 기반의 레벨 패닝 방법에서 부호는 x-y 공간상에서 벡터의 방향(direction)을 의미하므로 음의 값에 의한 신호의 위상 변화는 음색의 변화를 야기할 수 있다. 따라서 이에 대

한 해결책으로 C 채널 게인 조절 함수(Center channel gain control function)를 적용함으로써 이러한 음의 값의 패닝 게인 문제를 해결하였다^[13].

C 채널 게인 조절 함수는 위의 수식 (14)에서 계산된 세 채널 스피커 쌍에 대한 벡터 기반의 패닝 게인 값을 계산할 때, 스피커 벡터 행렬에 대해 다음과 같이 적용된다.

$$L_{123}' = W(\theta)L_{123},$$

$$\text{where } W(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \delta(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

C 채널에 곱해진 게인 조절 값 δ 는 패닝 각도(θ)에 따라 0에서 1사이에 정의된 값으로, 청각적 모델을 기반으로하여 다양한 방법으로 정의할 수 있다^[13]. 본 연구에서는 측면에서의 C 채널 게인을 줄이기 위하여,

다음과 같은 패닝 각도에 따른 C 채널 게인 조절 함수를 사용하여 전방 세 채널에 대한 패닝 게인을 계산하였다.

$$\delta(\theta) = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi\theta}{N-1} \right) \right),$$

$$\text{where } \theta = [0, 60], N = 61. \quad (16)$$

θ 는 패닝 각도로 -30부터 30의 값을 가지며, 1도 간격에 대해 N 값은 61을 갖는다. 이러한 게인 조절 함수를 수식 (15)에 적용하여 얻은 채널 벡터 행렬을 수식 (14)에 적용함으로써, 세 채널의 파워의 합이 1을 갖도록 $g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 = 1$ 와 같이 정규화된 결과가 그림 4-(라)에 나타나 있다.

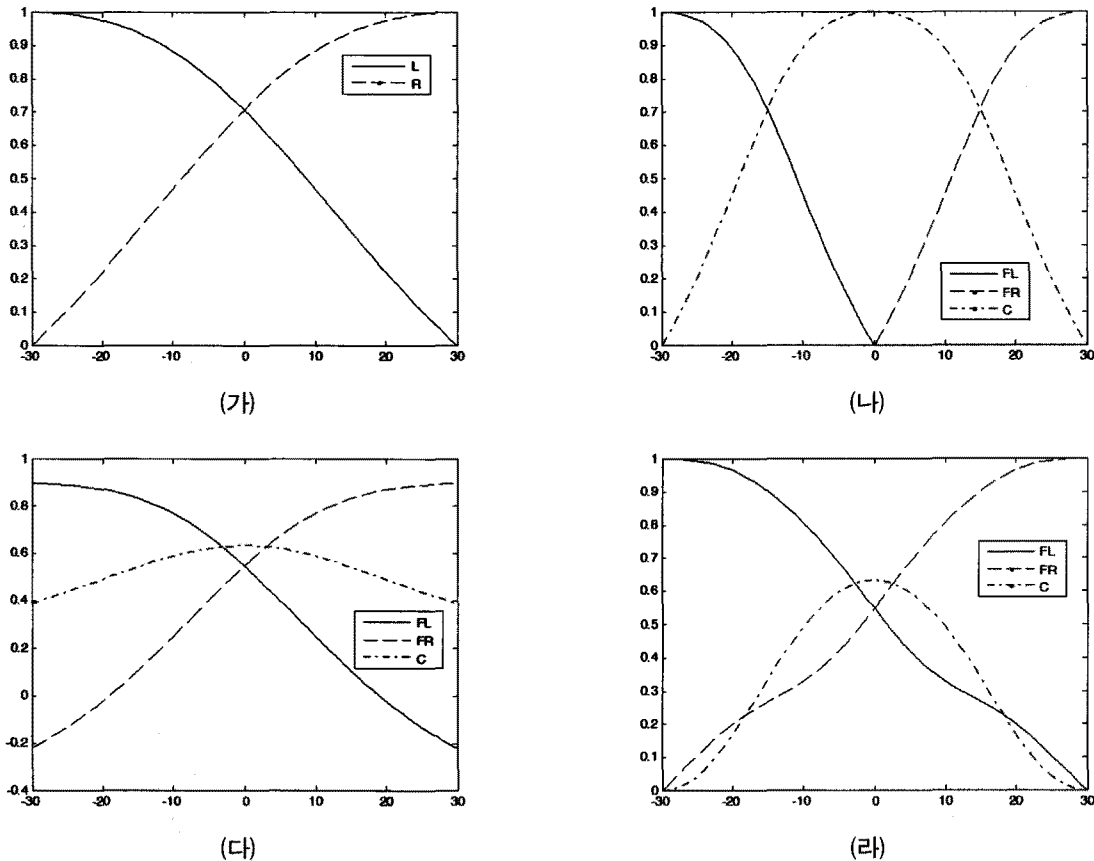


그림 4. 전방 좌30°~우30° 공간에서의 벡터 기반의 레벨 패닝 방법(VBAP)에 의한 패닝 게인; (가) 두 채널에서의 VBAP 패닝 게인, (나) 세 채널에서의 VBAP 패닝 게인, (다) 제안된 세 채널 스피커 쌍을 이용한 패닝 게인, (라) 센터 채널 게인 조절 함수와 정규화가 적용된 제안된 세 채널 스피커 쌍을 이용한 패닝 게인

Fig. 4. Vector based amplitude panning gain in the frontal stage(L30°~R30°); (가) 2-ch panning gain by VBAP, (나) 3-ch panning gain by VBAP, (다) 3-ch pair-wise panning gain by proposed VBAP, (라) 3-ch pair-wise panning gain with a normalization by proposed VBAP.

2. 음원 에너지의 유지를 위한 후처리 알고리즘

기존의 채널 변환 기술에서 음원 분리 알고리즘을 사용한 방법에서는 분리된 음원의 에너지(P_S)를 추정한 에너지값(\hat{P}_S)으로 보상해주는 방법(post-scaling)을 적용하고 있다^[3].

$$\hat{S}' = \frac{\sqrt{\hat{P}_S}}{\sqrt{P_S}} \hat{S}. \tag{17}$$

마찬가지로 잔향 성분에 대해서도 위와 같은 방법으로 에너지를 보상한다. 음원의 에너지 추정 방법은 음원들이 서로 독립적인 특성을 갖는다는 가정 하에서 다양한 방법을 사용할 수 있다^[1, 3, 16~17]. 하지만 분리된 음원에 포함된 원치 않는 다른 음원 성분들의 존재로 인하여 위 방법의 결과로 분리된 음원에 포함된 실제 분리하고자 하는 음원의 에너지는 오히려 감소하게 된다. 이러한 음원의 에너지 감소 문제는 변환된 채널 환경에서 음원의 공간적 거리감을 증가시킬 수 있고, 스피커 배치에 따라 방향감에도 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 채널 포맷과 음원의 합성 결과에 기반한 음원 에너지 보상 알고리즘을 제안한다.

그림 3에 나타난 스피커 채널 포맷에 대해서 다채널 합성 알고리즘을 적용하여 전방 세 개의 스피커 출력용 수식 (12)과 같이 얻을 수 있었다. 합성 행렬 G_f 는 세 채널에 대한 패닝 계인을 성분으로 정의된다. 이러한 합성 알고리즘에 대해 스테레오로부터 분리된 음원 대신 원래의 음원 성분 벡터 S 를 이용하여 수식적으로 다음과 같이 레퍼런스 출력 신호를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_{FL} \\ X_C \\ X_{FR} \end{bmatrix} = G_f \begin{bmatrix} S \\ N_L \\ N_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & 1 & 0 \\ g_2 & 0 & 0 \\ g_3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \\ N_L \\ N_R \end{bmatrix}. \tag{18}$$

앞서 추정된 음원의 파워와 위 수식으로부터 전방 세 채널의 출력 신호의 레퍼런스 파워, P_{X_C} , $P_{X_{FR}}$ 을 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 다채널 $P_{X_{FL}}$ 포맷에 대한 출력 신호의 파워는 수식 (12)의 다채널 합성으로 얻은 신호의 에너지를 보상하는데 다음과 같이 사용한다.

$$\hat{X}_{FL}' = \frac{\sqrt{P_{X_{FL}}}}{\sqrt{P_{\hat{X}_{FL}}}} \hat{X}_{FL}. \tag{19}$$

\hat{X}_{FL} 에 적용된 에너지 보상 방법과 같이, \hat{X}_C , \hat{X}_{FR} 의 에너지도 조절한다. 이러한 에너지 보상 방법은 다채널 출력 신호를 고려함으로써, 분리된 음원에 적용하는 기존의 에너지 보상 방법이 음원 합성 과정에서 가질 수 있는 공간적 정보를 왜곡하는 문제를 개선해주는 장점을 가지고 있다.

3. 써라운드 채널의 생성과 제어

ITU 3/2 스피커 배치와 같은 다채널 포맷의 장점 가운데 하나인 써라운드 효과를 생성하기 위하여 후방 채널 SL, SR 신호를 생성한다. 이전 장에서 제안한 음원 분리 알고리즘은 방향감을 가지는 음원과 잔향 성분을 동시에 분리하고 있다. 방향감을 가지는 음원은 스테레오 신호에서의 공간감을 유지하기 위하여 전방 스피커를 이용하여 다시 방향감을 생성한 반면, 잔향 성분은 배경음 혹은 후기 잔향 성분에 해당하는 것으로 후방 채널을 통해 재생될 수 있다. 그림 3에는 이처럼 분리한 잔향 성분을 이용하여 적절한 레벨 조절을 통하여 후방 채널의 출력으로 내보내는 과정이 나타나있다. 후방 채널의 레벨값은 입력 스테레오 신호의 두 채널 신호 간의 상호 상관도를 이용하여 조절한다.

$$d_1 \approx d_2 = 1 - |\Phi_{LR}|. \tag{20}$$

각 주파수 서브 밴드 단위로 계산된 상호 상관도 Φ_{LR} 은 절대값을 취하여, 0부터 1 사이의 값에 대하여, 좌우 후방 채널의 세기 d_1 과 d_2 에 적용된다. 잔향 성분의 레벨 조절이 필요한 이유는 스테레오 음원의 특성에 따라 써라운드 효과음의 세기(loudness)를 달리해줘야 하기 때문이다. 예를 들어 무대 공연이 녹음된 음악에서 박수 소리가 상대적으로 큰 경우나, 영화 사운드 트랙에서 배경 효과음이 강조된 경우가 이에 해당한다. 이러한 특성을 가지는 신호의 경우, 다채널 포맷에서 후방에 배치된 스피커의 출력을 동적으로 변화시킴으로써 써라운드 효과를 향상시킬 수 있다.

IV. 실험

1. 다채널을 이용한 벡터 기반의 패닝 방법 실험

III장 1절에서 적용한 세 채널 스피커 쌍을 이용한 패닝 방법을 기존의 VBAP 방법과 비교하였다. 스피커의 배치는 좌(30°), 우(30°), 정면(0°) 각도로 청취자를 중심

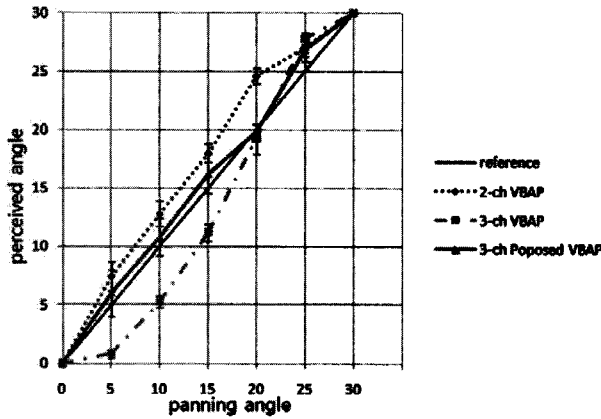


그림 5. 벡터 기반의 패닝 알고리즘 비교 청취 실험
Fig. 5. Subjective test results for vector based amplitude panning algorithms.

으로 150cm 반지름의 동심원 상에 위치하였다. 패닝에는 핑크 노이즈(pink noise) 신호가 사용되었으며, 정면을 기준으로 좌측 공간(0°~좌30°)에서 5도 간격으로 즉, 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30° 방향으로 패닝하였다. 우측 공간(0°~좌30°)은 좌측 공간의 대칭이므로 실험에서 생략되었다. 청취 실험의 경험을 가진 총 5명의 오디오 엔지니어가 참여하였으며, 실험은 위의 방향으로 패닝된 신호에 대해 인지되는 각도를 1도 단위로 묻는 방법을 사용하였다. 실험 결과가 그림 5에 나타나 있다.

실험 결과, 그림 4-(가)와 같은 좌우 2 채널을 이용한 패닝 방법의 경우(2-ch VBAP), 전체적으로 패닝한 각도보다 측면 방향으로 치우쳐 인지되는 경향을 보였다. 반면 그림 4-(나)와 같은 3 채널을 이용한 패닝 방법의 경우(3-ch VBAP), 0°에서 약 20°까지는 정면으로 치우치고 그보다 바깥 방향에 대해서는 측면으로 치우치는 경향을 보였다. 이러한 2 채널과 3 채널 VBAP 결과에 있어서 차이는 채널 변환 과정에서 방향 정보의 왜곡을 만들게 된다. 제안된 3 채널을 이용한 패닝 방법의 경우(3-ch Proposed VBAP), 패닝 각도와 인지 각도가 가장 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이또한 스테레오에서 가졌던 2 채널 VBAP의 패닝 각도와 일치하지 않기 때문에 어느 정도 방향 정보에 오차가 생길 수 있음을 알 수 있다.

2. 다채널 포맷 변환 알고리즘의 청취 실험

본 연구에서 제안된 스테레오 신호를 ITU 3/2 채널 포맷으로 변환하는 알고리즘을 이전 방법^[3]과 청취 실험

표 1. 다채널 포맷 변환 알고리즘의 청취 실험에 사용된 스테레오 신호

Table 1. Stereo samples for the performance evaluation of multichannel format conversion.

| 인덱스 | 장르 | 특징 |
|--------|-----|----------------------|
| movie1 | OST | 액션, 효과음에 의한 동적인 장면 |
| movie2 | OST | 애니메이션, 움직임을 가진 객체 등장 |
| music1 | 재즈 | 다양한 악기와 보컬의 화음 |
| music2 | 팝 | 보컬을 중심으로 빠른 리듬 진행 |

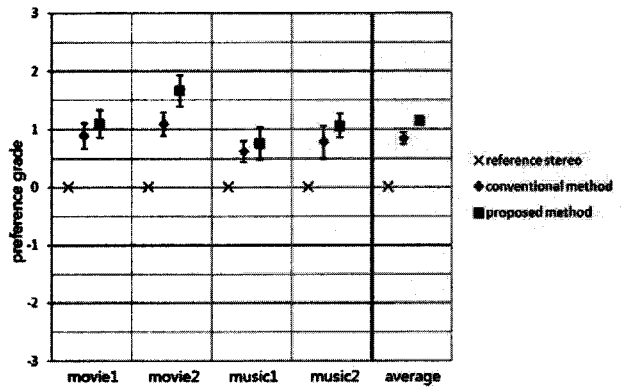


그림 6. 다채널 포맷 변환 알고리즘의 청취 실험 결과; 레퍼런스 스테레오 대비 기존 알고리즘^[3]과 제안된 알고리즘

Fig. 6. Subjective test results for multichannel format conversion algorithms; preference grading of reference stereo, conventional method and proposed method.

험을 통해 비교하였다. 입력 신호인 스테레오 신호는 표 1에 나온 것처럼, 20~30초의 길이를 갖는 영화 사운드 트랙(OST)과 음악 신호가 사용되었으며, 이들 입력 신호를 기준으로 변환된 다채널 신호를 비교함으로써 성능을 평가하였다. 비교 방법을 신호의 방향성이 잘 유지되었는가(spatial fidelity)와 다채널로 변환된 신호의 전체적인 음질(overall sound quality)에 대해서 레퍼런스 스테레오 신호 대해 상대적으로 비교하여 -3.0~3.0점의 상대적인 선호도 점수(preference grade)를 주도록 하였다^[18]. 청취 실험 결과는 그림 6에 나타나 있다.

청취 실험 결과, 제안된 채널 변환 알고리즘이 이전 방법에 비해 좋은 점수를 얻었다. 특히, movie2와 같이 움직임이 많고 다양한 방향감을 갖는 음원이 자주 등장하는 영화 OST 신호에 대해서 좋은 점수를 받았다. 영화 OST가 음악 신호에 비해 상대적으로 점수가 높은 이유는, 스테레오에서 느낄 수 없었던 써라운드 효

과가 후방 채널의 사용으로 증가하여 음장감이 확대되었기 때문이다. 영화와 달리 음악 신호의 경우, 음원들의 움직임이나 방향감의 변화가 거의 없었기 때문에 주로 전체적인 음질에 의한 평가가 반영되었다. 음악의 경우에도 제안된 알고리즘이 상대적으로 스테레오에 가까운 공간감을 유지하였으며 음질의 열화 또한 적게 나타났다.

V. 결 론

본 연구에서는 다채널 포맷 변환 과정에서 필요한 음원 분석 알고리즘과 다채널 신호의 재합성 알고리즘을 제안하고 있다. 기존의 방법은 음원의 분리 성능에 최적화되어 설계되었기 때문에 변환된 다채널 신호가 입력 신호와 공간 정보 유지 측면에 있어서 오차가 발생하는 문제점을 가지고 있었다. 반면, 제안된 알고리즘은 음원의 방향감과 에너지 정보를 변환하고자 하는 다채널 포맷에서도 효과적으로 유지를 목표로 하였다. 새로운 음원 분석 기술과 음원 분리 방법이 스테레오 신호의 분석을 위해 적용되었으며, ITU 3/2 채널을 생성하는데 있어서 음원의 에너지 비율을 유지하기 위한 후처리 기술이 적용되었다. 제안된 채널 포맷 변환 기술을 사용함으로써 기존의 기술에 비해 공간적 특성의 유지와 전체적인 음질 측면에서 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 앞으로 본 연구를 토대로 하여, 스테레오뿐만 아니라 다양한 채널 포맷의 신호를 또다른 다채널 포맷의 신호로 변환하는 기술에 대해 지속적으로 연구할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] R. Irwan and Ronald M. Aarts, "Two-to-five channel sound processing," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 50, no. 11, pp. 914-926, Nov. 2002.
- [2] C. Avendano and J.-M. Jot, "A frequency-domain approach to multichannel upmix," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 52, no. 7/8, pp. 740-749, July/August 2004.
- [3] C. Faller, "Multiple-loudspeaker playback of stereo signals," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 54, no. 11, pp. 1051-1064, Nov. 2006.
- [4] J. Usher and J. Benesty, "Enhancement of spatial sound quality: A new reverberation-extraction audio upmixer," *IEEE Trans. on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 15, no. 7, pp. 2141-2150, Sept. 2007.
- [5] Michael M. Goodwin and J.-M. Jot, "Multi-channel surround format conversion and generalized upmix," in *Proc. AES 30th Int. Conf.*, SaariselkAa, March 2007, paper 30.
- [6] M.R. Bai and Geng-Yu Shih, "Upmixing and Downmixing Two-channel Stereo Audio for Consumer Electronics," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, vol. 53, no. 3, pp. 1011-1019, Aug. 2007.
- [7] J. Breebaart and E. Schuijers, "Phantom Materialization: A Novel Method to Enhance Stereo Audio Reproduction on Headphones," *IEEE Trans. on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 15, no. 8, pp. 1503-1511, Nov. 2008.
- [8] ITU-R. Recommendation BS.775-1, Multichannel stereophonic sound systems with and without accompanying picture. International Telecommunications Union Radiocommunication Assembly, 1994.
- [9] V. Pulkki, "Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 45, no. 6, pp. 456-466, June 1997.
- [10] J. Blauert, *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. Cambridge, MA: MIT Press, 1997.
- [11] S.-W. Jeon, Y.-C. Park, S.-P. Lee, and D.-H. Youn, "Robust representation of spatial sound in stereo-to-multichannel upmix," *AES 128th Conv.*, London, May 2010.
- [12] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [13] 전세운, 박영철, 이석필, 윤대희, "방향 정보에 따른 가변적인 채널 게인 제어를 통한 다채널 벡터 기반의 사운드 패닝 기술에 관한 연구," 한국통신학회 2010년도 하계종합학술발표회 논문집, 2010.
- [14] F. Rumsey, "Spatial quality evaluation for reproduced sound: Terminology, meaning, and a scene-based paradigm," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 50, no. 9, pp. 651-666 Sept. 2002.
- [15] V. Pulkki, "Spatial sound generation and perception by amplitude panning techniques," PhD thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2001.
- [16] Michael M. Goodwin and J.-M. Jot, "Primary-ambient signal decomposition and vector-based localization for spatial audio coding and enhancement," *IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, vol. 1, pp.

I-9-I-12, April 2007.

- [17] J. Merimaa, Michael M. Goodwin, and J.-M. Jot, "Correlation-based ambient extraction from stereo recordings," AES 123rd Conv., New York, 2007.
- [18] ITU-R BS.562.3, "Subjective assessment of sound quality", International Telecommunications Union, Geneva, Switzerland, 1990.

저 자 소 개



전 세 운(학생회원)-교신저자
2007년 연세대학교 전기전자
공학과 학사 졸업.
2007년~현재 연세대학교 전기
전자공학과 석박통합과정.
<주관심분야 : 디지털 신호처리,
오디오 신호처리, 3D 오디오>



박 영 철(정회원)
1986년 연세대학교 전자공학과
학사 졸업.
1988년 연세대학교 전자공학과
석사 졸업.
1993년 연세대학교 전자공학과
박사 졸업.
현재 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수
<주관심분야 : 디지털 신호처리, 오디오 신호처
리, 음성 신호처리, 적응 신호처리>



윤 대 희(평생회원)
1977년 연세대학교 전자공학과
학사 졸업.
1979년 Kansas State University
석사 졸업.
1982년 Kansas State University
박사 졸업.

현재 연세대학교 전기전자공학과 교수
<주관심분야 : 디지털 신호처리, 적응 신호처리,
음성 신호처리, 오디오 신호처리>