

LK-015

# 小型平面スピーカを用いた複合現実感聴覚ディスプレイの開発 Development of auditory display system with flat panel speaker for mixed reality

渋谷 亮輔<sup>†</sup> 石田 泰久<sup>‡</sup> 岩谷 幸雄<sup>†</sup> 坂田 真人<sup>‡</sup> 鈴木 陽一<sup>†</sup>  
Ryousuke Shibuya Yasuhisa Ishida Yukio Iwaya Masato Sakata Yōiti Suzuki

## 1. はじめに

音の到来方向・距離などの3次元仮想音響情報を提示するためのシステムは、仮想聴覚ディスプレイ (VAD) と呼ばれ、通常頭部伝達関数を音源にたたみ込む手法で実現される。このときトランスジューサは、スピーカやヘッドホンなどで構成され、それぞれトランスオーラル、バイノーラル再生と呼ばれる [1,2]。また、実世界に近い臨場感を与える VAD には、「聴取者の移動に音像が追従可能である」ことが重要であるとされている [3]。しかしながら、この点についてトランスオーラル再生では、聴取位置を検出したとしても位置に応じてクロストークキャンセラを精度よく切り替え頭部伝達関数合成法を実現するのは非常に困難である。理論的に聴取者の移動が可能な波面合成に基づく手法 [4,5] も提案されているもののスピーカの数が多くなるなどシステム規模が甚大になり、現在のところ非現実的である。一方、ヘッドホンを用いたバイノーラル再生系では、聴取位置が変化してもカプセルと鼓膜 (あるいは外耳道入口) の関係が固定されているため制御系を組みやすく、聴取者の移動を考慮する場合にはバイノーラル再生系が多く用いられる。

しかし、バイノーラル再生系では、現実の音がカプセルにより遮断されるため、仮想現実感の分野で近年唱えられているような複合現実感 [6] を達成するのは物理的に不可能であり、これを実現した VAD は現存しない。さらに、バイノーラル再生では外耳道入口から外を見込んだ音響インピーダンスが装着によって変化しないとみなせるヘッドホン (FEC ヘッドホン) でなければ、厳密な伝達関数の再現は難しいという報告もあり [7]、カプセル型の限界が伺える。

そこで本論文では、指向性が強くクロストーク成分の小さい小型平面スピーカを耳介上部に固定し、トランスオーラル再生系を組むことで、「頭部回転運動感応型」、「複合現実感型」、「完全 FEC 型」、「ソフトウェアによるウェアラブル型」の全てを満たす VAD を作成したので報告する。

## 2. システム開発

### 2.1 システム構成

今回作成したヘルメット型聴覚ディスプレイの構成を図 1 に示す。小型平面スピーカモジュール、モーションセンサ、ノート PC などで構成される。以下では、各モジュールの詳細を述べる。

### 2.2 トランスジューサ

今回用いたトランスジューサは、FPS 社の平面スピーカモジュール FPS0204M7 である。このモジュールは、2×4 の面状磁石セルからなるもので、初めから平面波と

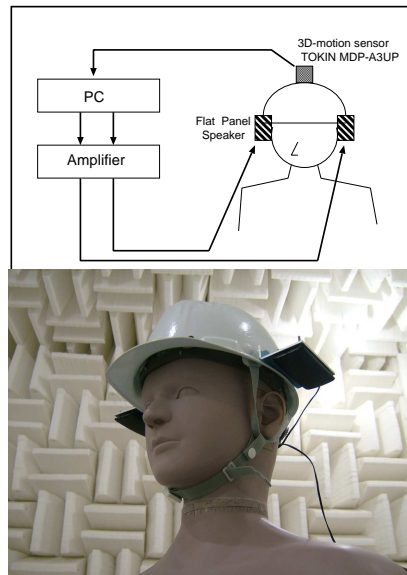


図 1: ヘルメット型聴覚ディスプレイ構成図 (上) と装着図 (下)

してエネルギーが放射される。このため、音響パワーの伝搬拡散がコーン型スピーカよりも小さいことが期待でき、耳介上部に固定しても反対側耳介へのクロストーク成分が小さいと考えた。これを図 1 に示すように耳介の上部にくるようにヘルメットに固定し、伝達特性を測定した。測定した伝達特性  $h_{RR}, h_{RL}, h_{LR}, h_{RR}$  は、 $h_{xy}$  と表した時、 $x$  側トランスジューサからブロックされた  $y$  側外耳道入口までのインパルス応答を示す。

$h_{RR}$  と  $h_{RL}$  の周波数特性を図 2 に示す。図 2 より、各周波数において、クロストーク成分がおおむね 40dB 以下になっており十分小さいことが分かり、FPS の利点を示している。

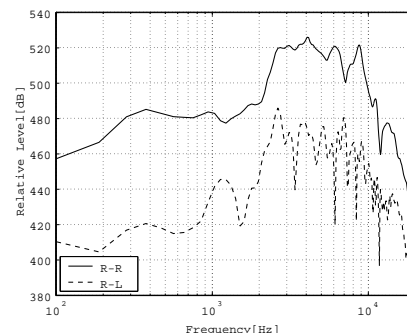


図 2: ヘルメット型聴覚ディスプレイに設置した FPS の周波数特性, R-R: 右 FPS から右耳への周波数伝達特性, R-L: 右 FPS から左耳への周波数伝達特性

<sup>†</sup>東北大学電気通信研究所 / 大学院情報科学研究科

<sup>‡</sup>秋田大学大学院工学資源研究科

## 2.3 フィルタ設計

上記4つの特性を用いて、合成したい所望の頭部伝達関数を示すインパルス応答  $H_L, H_R$  を左右両耳に実現するには、通常のトランスオーラル再生系と同様次の式を満たす  $F_L$  と  $F_R$  をそれぞれ左右の出力にたたみ込めばよい。

$$\begin{bmatrix} h_{RR} & h_{LR} \\ h_{RL} & h_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_R \cdot S \\ F_L \cdot S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_R \cdot S \\ H_L \cdot S \end{bmatrix} \quad (1)$$

つまり本システムは、いわばトランスオーラル再生系の信号処理とヘッドホン型の装着形態によるハイブリッド型になると言える。

## 2.4 頭部回転検知

聴取者の頭部回転にシステムが追従しない場合、本システムではバイノーラル再生系と同様、音像が頭部運動に伴って動いてしまい一カ所に留まることができない。そこで、ヘルメット頭頂に3自由度モーションセンサ(NEC TOKIN, MDP-A3UP)を取り付け、頭部回転に応じて合成する頭部伝達関数を切り替えた。

## 2.5 たたみ込みエンジン

頭部伝達関数を合成するためのフィルタをたたみ込みエンジンとして、本システムは通常用いられるようなDSPではなく、NASAで開発したPCのローカルCPUを用いるソフトウェアエンジンSLABを用いた[8]。用いたノートPCのスペックは、PentiumIII 650MHz、メモリ256MBである。

## 3. 複合現実感型 VAD を用いた定位実験

### 3.1 実験方法

今回作成したヘルメット型聴覚ディスプレイの精度評価を、従来のヘッドホン(Sennheiser HDA200)を用いた聴覚ディスプレイとの方向定位精度比較により行なった。ステレオ音源は式(1)による  $F_R, F_L$  を各タイプ毎に求め、ピンクノイズを畳み込み、立上り、下がりには50msのレイズドコサイン窓のエンベロープをかけたものとした。ここでヘッドホン型ではクロストークがないことから、式(1)における  $h_{RL}, h_{LR}$  はゼロとした。音源の標準化周波数は44.1kHzであり、提示音圧は仮想音源が正面の場合のピンクノイズを外耳道入口で60dBAとなるよう調節した。 $H_R, H_L$  はSLABに組み込まれていたHRTFの時間特性であるHRIR(Head Related Impulse Response)を用いた。実験は防音室内で行ない、被験者は正常な聴力を有する成人男性7名、HRTFにより与えられる水平面のある方向より仮想音源を4秒間提示し、その方向をPC画面のGUIの対応する部分にチェックすることで回答させる。頭部運動は許可した。試行回数は各提示方向の合計が各被験者120試行行ない、仮想音源提示方向は真正面を含む、 $30^\circ$  間隔、12方向をランダムに提示した。また、判断の精度は $10^\circ$ とした。

### 3.2 実験結果

実験結果を複合現実感型、ヘッドホン型に分けて図3に示す。両者とも良好な定位結果が得られている。各場合について、音像の方向定位誤差を検定した結果、優位な差は見られなかった。したがって複合現実感型聴覚ディスプレイでは、ヘッドホンを用いた場合と同等の定位精度が得られると考えられる。

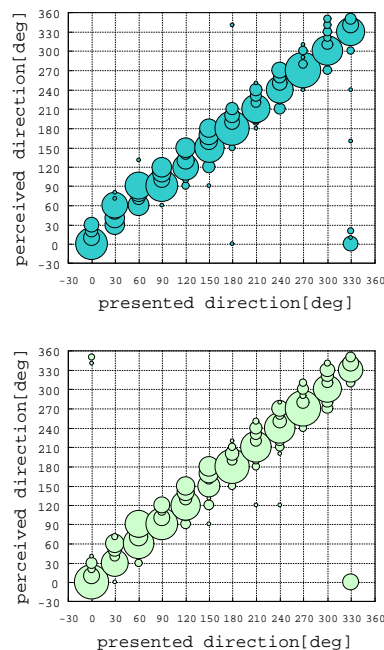


図3: 各聴覚ディスプレイによる方向定位結果, 上: 複合現実感型, 下: ヘッドホン型

## 4. まとめ

小型平面スピーカモジュールを利用したトランスオーラル再生により、世界で初めての複合現実感型聴覚ディスプレイを開発した。本システムは、頭部回転運動感応型、ノートPCのローカルCPUをエンジンに用いたウェアラブル型という特徴を持つ。さらに、耳介が完全に自由になっているため、完全なるFECヘッドホンとしても機能する。今後は、FEC特性を利用した厳密音場再生の可能性を目指す。

## 謝辞

本研究の一部は、東北大学電気通信研究所通研共同プロジェクト(H15-A12)により行われた。

## 参考文献

- [1] 水野耕他, “頭部近接スピーカ(ニアホン)による音像制御手法(3),”音講論, 591-592, (2001年10月)。
- [2] 飯田一博他, “ステレオインサイドホンによる3次元音像定位,”音講論, 645-646, (2001年3月)。
- [3] R.D.Sorkin, *et al*, “An Exploratory Study on the Use of Movement-Related Cues in an Auditory Head-Up Display,” *Human Factors*, Vol.31, No.2, pp.161-166, 1989.
- [4] 高根昭一他, “仮想球モデル聴覚ディスプレイシステム(ADVISE)の基礎的実時間システムの開発,”信学技報, EA-50, 2000.
- [5] 伊勢史郎, “キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理,”音響学会誌, Vol.53, No.(9), pp.706-713, 1997.
- [6] “「複合現実感」特集号,”日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, 1999.
- [7] Henrik Møller, “Fundamentals of Binaural Technology,” *App. Acoust.*, 36, pp.171-218, 1992.
- [8] Miller, J.D., *et al*, “Recent Developments in SLAB: A Software-Based System For Interactive Spatial Sound Synthesis,” *ICAD 2002*, pp.403-408, Kyoto, Japan.