

## ソフトウェア仮想聴覚ディスプレイシステムの構成と応用に関する研究

東北大学電気通信研究所

岩谷幸雄

## [研究の背景・目的]

人間は、音の到来方向や距離を知覚することが可能であり、この能力を音像定位と呼ぶ。音像定位は、左右両耳へ届く音信号にたたみ込まれている頭部伝達関数（音源位置から左右両耳の鼓膜にいたる音響特性、Head Related Transfer Function: HRTF）を聴取者が経験的に取得し、音信号から聞き分けることで実現していると言われている。この原理を利用してモノラル音源に特定位置の頭部伝達関数をたたみ込んで聴取者に提示すれば、知覚される音の位置を制御することができ、このシステムを仮想聴覚ディスプレイという。本原理は、1990年代にDSPによってようやくリアルタイムシステムとして実現されるに至ったが、コスト高で汎用性に乏しく、多様なアプリケーションへの展開ができなかった。一方、近年のCPUの大幅な高速化により、汎用PCでも聴覚ディスプレイが必要なリアルタイム処理に十分な性能を有するようになった。そこで、本研究は、汎用PC上で動作するソフトウェア聴覚ディスプレイ用エンジンを開発し、アプリケーションの開発基盤整備とその応用に関する研究を行う。

## [仮想聴覚ディスプレイの原理と従来型の問題点]

自由空間上の1点から鼓膜に届く音は、原音にHRTFがたたみ込まれたものである(図1)。したがって、HRTFがたたみ込まれた音を電氣的に作り込み鼓膜上に提示・再現できれば、そのHRTFに応じた方向・距離をもった音が知覚される(図2)。これが仮想聴覚ディスプレイの原理である。さらに、実世界では静止した発音体の絶対位置は頭部運動と共に変化しないが、ヘッドホンによる聴覚ディスプレイでは聴取時の頭部運動に音像が追従してしまう。このため、位置センサをヘッドホン頭頂に取り付けるなどして頭部運動を反映させながらHRTFの切替えをするのが望ましい(頭部運動感応型)。このような、計算処理は10年前のPCで実現することは不可能であり、数百万円を超える高価なDSPボードと位置センサが必要であった。さらに、これまでの聴覚ディスプレイは単に高額なだけでなく、DSPを用いているため利用できるメモリが十分でな

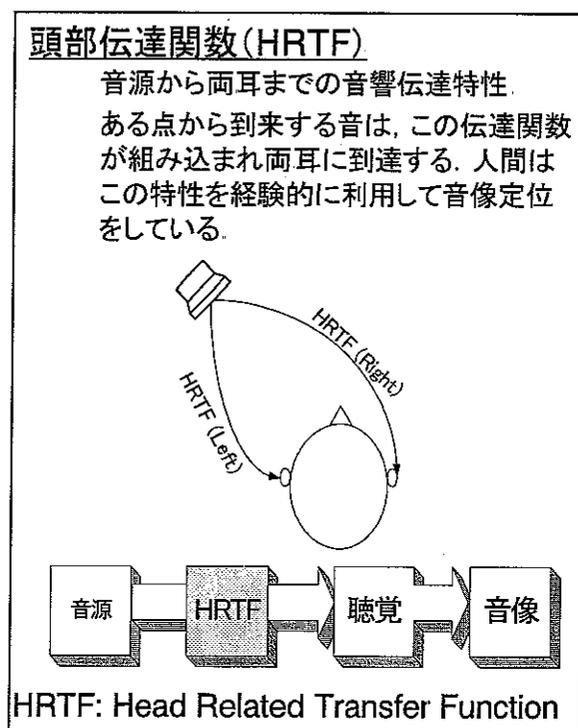


図1：頭部伝達関数と音像定位

く、位置の他に必要な効果(反射, 残響, ドップラー効果, 回折)のレンダリングが不可能であり, さらにシステムをアプリケーションに特化しなくてはならず, 聴覚ディスプレイ技術を多方面に展開することが困難であった。一方, ここ 10 年間で汎用コンピュータの計算処理の性能は 100 倍以上になり, 利用できるメモリの容量も数 GByte が簡単に使える状況になった。このため, 汎用の PC を用いて聴覚ディスプレイの計算処理が安価に十分可能な状況になってきた。そこで, 本研究では聴覚ディスプレイ技術を利用したアプリケーション開発を目指した, ソフトウェア基盤技術の構築を目指して開発を行った。

#### [構築したソフトウェアアーキテクチャ]

構築したソフトウェアアーキテクチャは, 全体が次の 4 層からなる。すなわち,

1. アプリケーション層
2. サウンドレンダリング層
3. たたみ込み層
4. ハードウェア層

である。アプリケーションは, サウンドレンダリング層に対して原音, 位置情報などの情報や反射, 残響, ドップラー効果などのパラメタをサウンドアプリケーションパラメタとして引き渡す。サウンドレンダリング層では, パラメタを解釈し, たたみ込みパラメタを下位層に渡す。このようにすることで, たたみ込み層は, 上位層に関係なくたたみ込みを行うことができる。

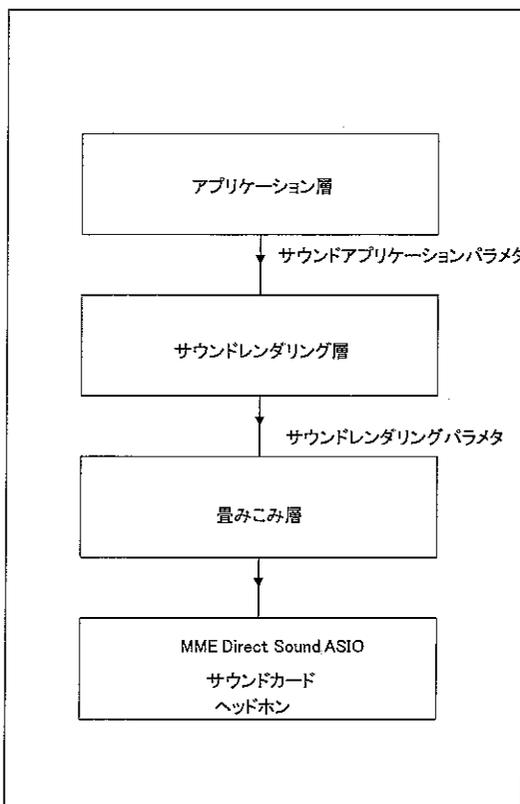


図 3 : ソフトウェアアーキテクチャ

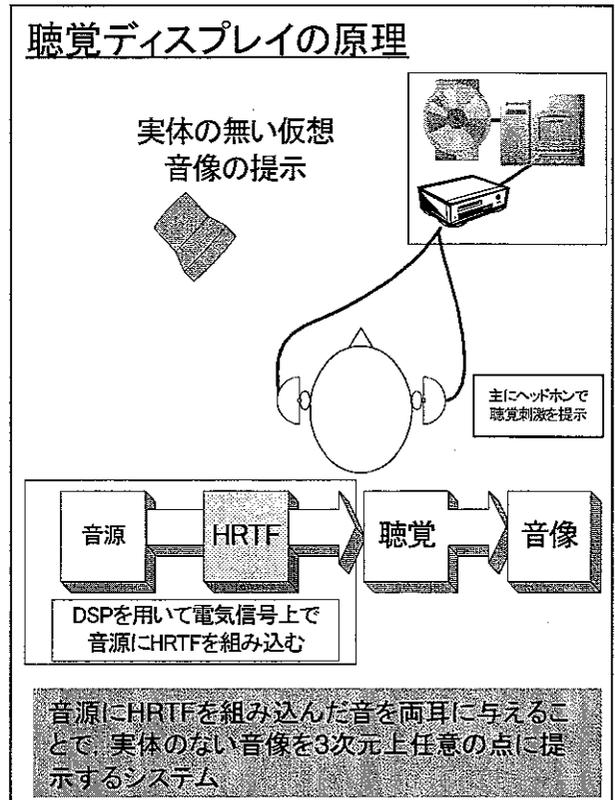


図 2 : 聴覚ディスプレイの原理

#### [聴覚ディスプレイの構成に関する課題]

聴覚ディスプレイによって聴取者が高臨場感を感じる音場を提示可能にするためには, 単にソフトウェア化を実現するだけでなく, 以下のような課題に取り組む必要がある。

- (A) 任意の位置の頭部伝達関数を補間・合成する,
- (B) 頭部伝達関数を聴取者に合わせ込む,
- (C) 頭部運動感応型聴覚ディスプレイのシステム遅延検知限
- (D) ドップラー効果や反射など, 位置情報の他の音響現象をレンダリングする
- (E) 自然な聴取状態の確立

これらの課題に関して, 研究を推進した結果, 仮想聴覚ディスプレイに関して,

1. 頭部運動感応型聴覚ディスプレイのシステム遅延の検

知限の解明(約 50ms 以下が望ましい)[1].

2. 頭部運動感応型による聴覚ディスプレイの定位精度の向上の実証(前後誤りの激減)[2-4]
  3. 定位感を基に聴覚ディスプレイの特性を聴取者に合わせ込む手法の提案(トーナメント法によるシステム特性の個人化)[5]
  4. ドップラー効果をレンダリングする新しいアルゴリズムの提案(位置情報とドップラー効果を同時にレンダリングする手法の開発)[6]
  5. 耳介開放型の聴覚ディスプレイの試作(小型平面スピーカによる開発)[7]
- などの解明・開発を行った。

#### [ソフトウェア聴覚ディスプレイの視覚障害者訓練機器への応用]

視覚障害者にとって、空間を認識するための手がかりとしての音像定位能は、ときには生死にも直結する重要な能力である。また、視覚障害者は一般の晴眼者に比べて娯楽の数が少ないのも問題点としてあげられており、QoL(Quality of Life)の向上も重要な要求である。そこで本研究では、ソフトウェア聴覚ディスプレイの応用例として、視覚障害者がゲーム感覚で楽しめる空間認識能訓練コンテンツを搭載することにより、視覚障害者向けにシステム化した [8] コンテンツは、局所的空間認識能を訓練するためのソフトウェアであり、いわば音だけで楽しめるもぐらたたきゲームである。ハンマーとヘッドホン頭頂などに位置センサをとりつけ、ハンマーの相対的な位置を計算し、提示した音(はちの羽音)の位置をハンマーが通過すれば当たりとなり加点される(図4、5参照)。この訓練システムを使って、局所的空間認識能を訓練前と訓練後で比較した結果調べた結果、有意な差が生じていることが明らかになり訓練効果が確認された [9]。

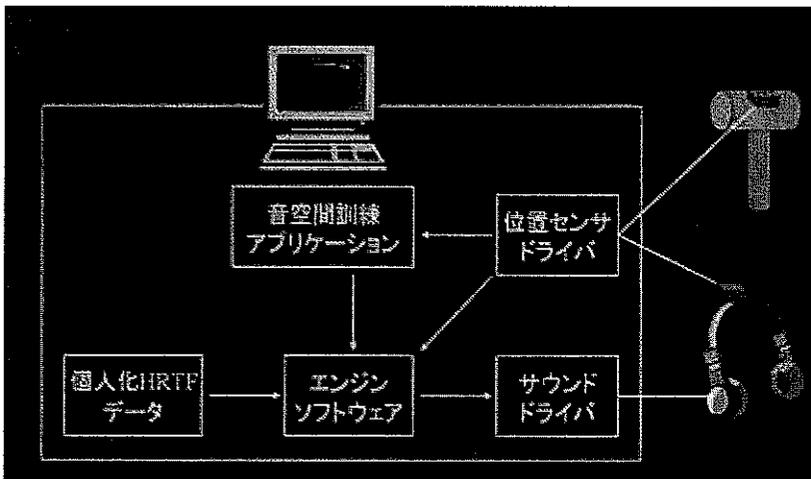


図4：局所的空間認識能訓練システム



図5：訓練システムで遊ぶ子供

レイの応用例として、視覚障害者がゲーム感覚で楽しめる空間認識能訓練コンテンツを搭載することにより、視覚障害者向けにシステム化した [8] コンテンツは、局所的空間認識能を訓練するためのソフトウェアであり、いわば音だけで楽しめるもぐらたたきゲームである。ハンマーとヘッドホン頭頂などに位置センサをとりつけ、ハンマーの相対的な位置を計算し、提示した音(はちの羽音)の位置をハンマーが通過すれば当たりとなり加点される(図4、5参照)。この訓練システムを使って、局所的空間認識能を訓練前と訓練後で比較した結果調べた結果、有意な差が生じていることが明らかになり訓練効果が確認された [9]。

#### [今後の展望]

ソフトウェアによる聴覚ディスプレイの開発基盤が構築されたことにより、この技術を利用したアプリケーションの開発の可能性が大きく広がったと言える。今後は、より多くの音響事象をレンダリングする機能を整備し、例えば、視覚障害者のための仮想街歩きコンテンツなどを作成し、メンタルマップ(心の中に描く地図)構築能力の訓練などを考えていきたい。

## [謝辞]

本研究の一部は経済産業省地域新生コンソーシアム事業により行われた。参画各社の協力を感謝申し上げます。

## [参考文献]

1. 佐々木寿幸, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, 仮想音源定位におけるシステム遅延の検知限に関する実験的検討, "日本音響学会 2003 年春季研究発表会講演論文集, pp. 531-532, 2003.
2. Yukio Iwaya, Yōiti Suzuki and Daisuke Kimura, "Effects of head movement on front-back error in sound localization", *Acoustical Science and Technology*, pp. 322-324, 2003.
3. Yukio Iwaya, Yōiti Suzuki, and Daisuke Kimura, "Effects of head movement on sound localization with real and virtual sound sources", *2002 China-Japan Joint Conference on Acoustics*, pp. 223-226, 2002.
4. Yukio Iwaya, Yōiti Suzuki, and Shouichi Takane, "Effects of listener's head movement on the accuracy of sound localization in virtual environment," *Proc. of ICA 2004*, vol II, pp 997-1000, 2004 (invited paper).
5. 岩谷幸雄, 西塔宏二, 鈴木陽一, "勝ち抜き戦方式による個人化頭部伝達関数の選択," *日本音響学会 2004 年春季研究発表会講演論文集*, pp. 559-560, 2004.
6. 豊田将志, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, "3次元音空間内におけるドップラー効果のリアルタイムレンダリングに関する考察," *日本 VR 学会第9回大会論文集*, 457-460, 2004.
7. Makoto Ohuchi, Yukio Iwaya, Yōiti Suzuki, Tetsuya Munekata, "A Game for visually impaired children with 3-D virtual auditory display", *Proc. of ICAD2003*, pp 309, 2003.
8. 渋谷亮輔, 石田泰久, 岩谷幸雄, 坂田真人, 鈴木陽一, "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," *FIT2004 情報技術レターズ*, pp 285-286, 2004.
9. 大内誠, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, 棟方哲弥, "三次元音響 VR エデュテイメントシステムによる視覚障害者の空間認識能訓練効果," *FIT2004 情報技術レターズ*, pp. 283-284, 2004.
10. 大内誠, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, 棟方哲弥, "視覚障害児のための三次元音響 VR ゲームの試作", *日本バーチャルリアリティ学会第8回大会論文集*, pp. 79-82, 2003.