

耳介構造微細表現に基づく HRIRのFDTD計算による音像定位特性

九頭龍 雄一郎[†]

西方 敦博[‡]

概要

聴覚のバーチャルリアリティーを実現する手法として、ヘッドフォン呈示によるバイノーラル方式があり、我々はその中でもHRIRを用いるバイノーラル方式において、FDTD法による伝搬シミュレーションで各個人のHRIRを得る手法を研究してきた。そこで本研究では聴取者の耳介構造を詳細に表現するために、球座標と変数変換を用いてFDTD法による解析を行った。そして本手法による音像定位特性を、デカルト座標で解析したものと実音源呈示とで比較を行うため、被験者4名で聴取実験を行った。その結果、耳介構造微細表現による定位精度の改善が見られた。

Sound Localization Characteristics by Using HRIR Calculated by FDTD Method Based on the Detailed Expression of Pinna Structure

Yuichiro KUZURYU[†]

Atsuhiko NISHIKATA[‡]

Abstract

The use of binaural system with headphones is one of the effective methods that can produce auditory virtual reality. We have been studying the method to calculate personal HRIRs by means of numerical simulation based on FDTD method. In this report, the spherical coordinate system as well as the variable transformation was used in the FDTD analysis, so that the pinna structure of listener's head could be modeled in detail. Sound image localization characteristics of our method was compared with Cartesian mesh analysis and the real sound source presentation, by using four subjects. The improvement of test score was seen for the detailed modeling of pinna structure.

1 はじめに

近年の情報技術の発展に伴い、通信への様々なバーチャルリアリティー技術の利用が現実的となって来た。聴覚による仮想音源定位はホームシアター等にも応用されるバーチャルリアリティーの代表的なものの一つであり、その中でもヘッドフォンを

[†]東京工業大学大学院 理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

[‡]東京工業大学 教育工学開発センター
The Center for Research and Development of Educational Technology(CRADLE),
Tokyo Institute of Technology

用いたバイノーラル方式は立体的な仮想音源定位の配置が容易に実現可能であり、来るべきウェアラブルミュージックの社会に重要な技術であるといえる。しかし、ユーザ本人の頭部インパルス応答 (HRIR=Head-Related Impulse Response) を用いなければ正確な仮想音源定位は得られにくいということも確認されている [1]、したがって HRIR の取得方法が音源定位の精度の良し悪しを大きく左右することになる。我々は音場の相反性を用いた数値シミュレーションによって HRIR を得る方法を検討してきた [2]。特に音源定位に重要な役割を持つとされる複雑な耳介の構造を詳細にモデル化することを考え、球座標及び放射方向の変数変換を導入した音波伝搬シミュレーションを考案、実現した [3]。本報告では数値シミュレーションによって得られた HRIR の音源定位特性を聴取実験によって評価し、耳介構造を詳細にモデル化する事と音源定位特性の改善度合との関係を明らかにすることを目標としている。

2 HRIR の取得

被験者固有の HRIR を数値シミュレーションにより得る事を目的とする。

そのために、まず被験者の頭部形状から頭部モデルを作成する。そしてその頭部モデルを中心に置いた仮想空間内で時間領域差分法 (FDTD 法=Finite Difference Time Domain Method) により音波伝搬のシミュレーションを行い、音場の相反性を利用して HRIR を取得する。

2.1 頭部モデルの作成

被験者の耳介および頭部の形状を光学 3 次元スキャナ (MINOLTA, vivid 700) で 20 数方向から読み取り、データをマッチングし張り合わせる事により 3D の頭部データ (図 1) を作成する。次にその頭部データをシミュレーション上の離散間隔に応じて全ての部分を剛体 (粒子速度の法線成分がゼロ) としてモデル化し頭部モデルとする。

2.2 シミュレーションフォーマット (離散間隔)

音源定位に重要な役割を果たす耳介をより忠実にモデル化しつつ計算量を節約するために、離散間

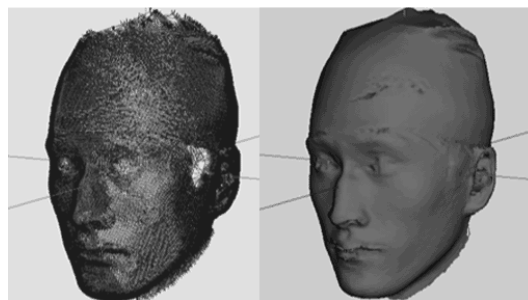


図 1: 3D スキャナによる頭部形状の読み込み

(左: メッシュ, 右: ポリゴン)
隔が耳介付近で細かく、頭部遠方で粗くなるようなフォーマットを考案した。

座標系は頭部中心に原点を持つ球座標を用い、放射方向の離散間隔が耳介付近で 1mm と細かく遠方で 7.5mm と粗くなるような微分可能な関数 $r(\xi)$ で動径方向に変数変換を施した。図 2 に $r(\xi)$ と $\frac{dr(\xi)}{d\xi}$ (つまり離散間隔) のグラフを示す。このとき、最大離散間隔の 7.5mm は人間の可聴帯域の上限を約 20kHz として、可聴帯域内の音波が伝搬可能になるようナイキスト条件より算出した。

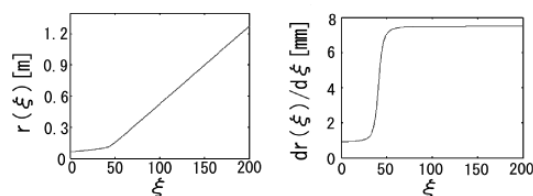


図 2: 放射方向の変数変換

ここで、上記のように耳介構造の微細表現を考慮し球座標および変数変換を用いたものを、 (ξ, θ, ϕ) に等間隔な Spherical モデル (図 3) と呼ぶことにする。一方、これと比較するために耳介構造微細表現を考慮しないフォーマットとして単にデカルト座標で離散間隔を 7.5mm 一定にしたものを、 (x, y, z) に等間隔な Descartes モデル (図 4) と呼ぶ。

2.3 FDTD 伝搬シミュレーション

一般に音圧 p と粒子速度 \vec{u} に関する方程式は式 1,2 である。

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p \quad (1)$$

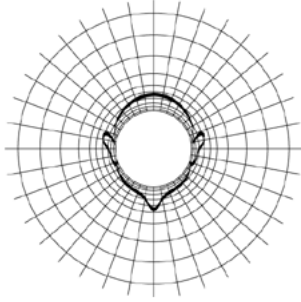


図 3: 離散間隔模式図 (Spherical モデル)

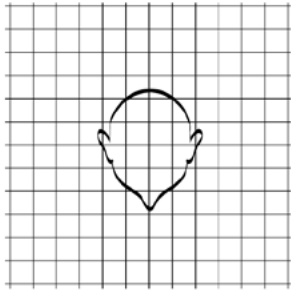


図 4: 離散間隔模式図 (Descartes モデル)

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -K \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \quad (2)$$

ここで ρ は空気の密度、 K は体積弾性率である。
式 1,2 に距離関数 $r(\xi)$ を考慮すると、

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \left\{ \frac{1}{r'(\xi)} \frac{\partial p}{\partial \xi} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \left\{ \frac{1}{r(\xi)} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right\} \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_\phi}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \left\{ \frac{1}{r(\xi) \sin \theta} \frac{\partial p}{\partial \phi} \right\} \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -K \left\{ \frac{1}{r(\xi)^2} \frac{1}{r'(\xi)} \frac{\partial r(\xi)^2 u_r}{\partial \xi} + \frac{1}{r(\xi) \sin \theta} \frac{\partial \sin \theta u_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r(\xi) \sin \theta} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} \right\} \quad (6)$$

と書き直すことができ、実際の数値シミュレーションでは式 3~6 を差分方程式に直して用いる。また、解析空間を含む面には Mur の一次吸収境界条件を適用した。

2.4 励振パルス

励振にはガウシアンパルスを用いた。式 7 が時間 t に対する振幅を与える式である。 τ_g はパルスの持続時間を決める係数であり、計算では可聴周波数範囲をカバーするために $\tau_g = 0.13[\text{ms}]$ とした。

$$g(t) = \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\tau_g} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

2.5 音場の相反性

音場の相反性とは、「ある空間に存在する点 P からパルスを励振し点 Q における音圧変化を測定した結果と、その逆に点 Q で励振し点 P において測定した結果とが同じである。」という原理の事である。

ここではシミュレーションにその音場の相反性を利用し、外耳道入り口からパルス励振を行い様々な方向で測定することにより複数の方向と距離における音源位置に対応する HRIR を左右耳各 1 回の計算により得た。

また図 5 に Spherical モデルを用いた場合の音波伝搬シミュレーションの波面伝搬の様子を、図 6 に取得した HRIR の一例を、それぞれ示す。

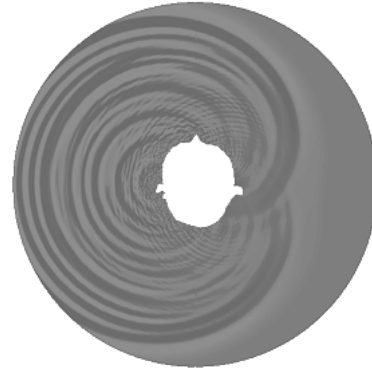


図 5: 音波伝搬の様子 (Spherical モデル)

3 聴取実験

音源定位の精度を調べるために、被験者による聴取実験を行った。前述の 2 通りのモデルによる仮想音源に加え、実音源による呈示もあわせて行った。具体的には、被験者 4 名に対し
3(音源提示パターン) × 3(音源配置パターン)

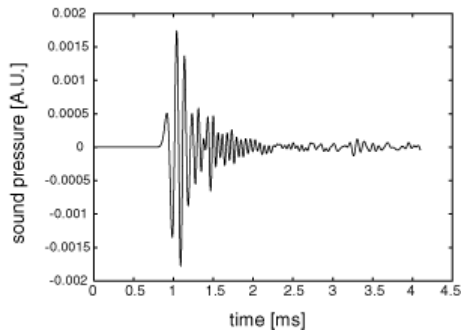


図 6: HRIR の一例
で各人につき 9 通りの実験を行った。

(音源提示パターン)

- 1/f 雑音をスピーカ (8cm 口径フルレンジ) で提示 (実音源) — (Real)
- 1/f 雑音とシミュレーションで得た HRIR との畳み込み処理を行ったソースをヘッドホンで提示 (仮想音源)
ただし仮想音源はシミュレーションに用いるモデルによって 2 通りが存在する。

- Spherical モデル — (Spherical)
- Descartes モデル — (Descartes)

(音源配置パターン)

以下に示す 3 通りの面上にそれぞれ頭部を中心とした半径 1m の円を考え、その円上に等間隔に音源を配置した。(実音源では実際にスピーカを配置し、仮想音源では図 7,8,9 のような音源配置を想定しシミュレーションによって HRIR を取得した。)

- 音源配置 1(図 7) - x, y 平面
- 音源配置 2(図 8) - x, z 平面
- 音源配置 3(図 9) - y, z 平面

このように複数配置した実音源および仮想音源から 1 秒ごとに 3 回ランダムな方向から音響信号の呈示を行ない、被験者に 3 回目の音の到来方向を図示によりアナログで回答させた。実音源では頭部を動かすことが音像定位の手がかりになるので [4, pp. 220–221]、被験者には実験中に頭部を動かさない様に指示した。

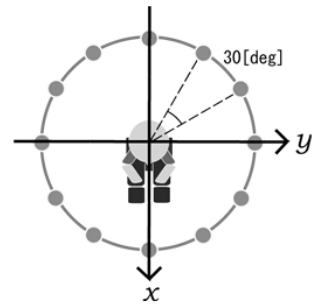


図 7: 音源配置 1

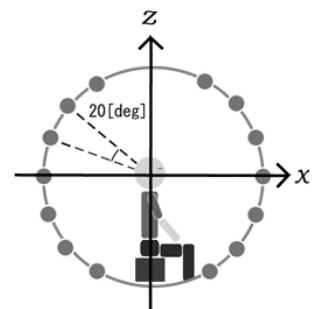


図 8: 音源配置 2

4 実験結果および考察

4.1 誤差分布

被験者 4 名に対し聴取実験を行った結果を、音源提示方向に対する被験者の回答方向の誤差の絶対値の分布で図 10~18 に示す。横軸が誤差の絶対値 [deg]、縦軸は問題数全体に対して誤差がその範囲内に収まった割合 [%] である。

これらのグラフを概観するとほとんど全てにおいて誤差の絶対値が 0deg 付近に分布しており、被験者がほぼ正常な音像定位を知覚していたことが確認できる。

まず各音源配置における Real の結果 (図 10,13,16) を見てみると、誤差の絶対値が 0deg 付近に非常に多

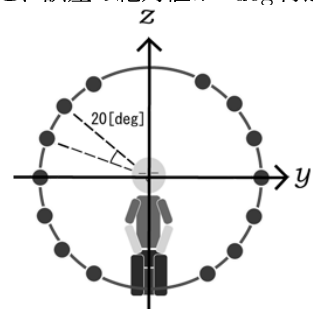


図 9: 音源配置 3

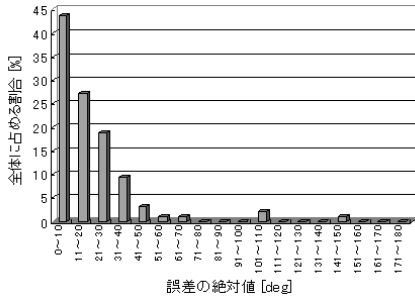


図 10: 誤差分布 (音源配置 1-Real)

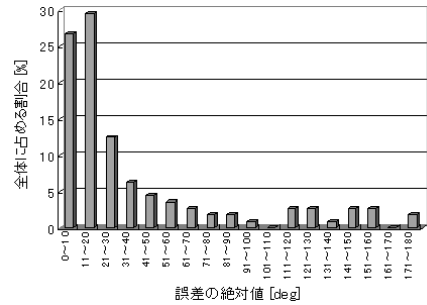


図 13: 誤差分布 (音源配置 2-Real)

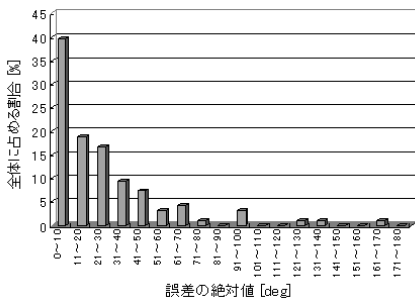


図 11: 誤差分布 (音源配置 1-Spherical)

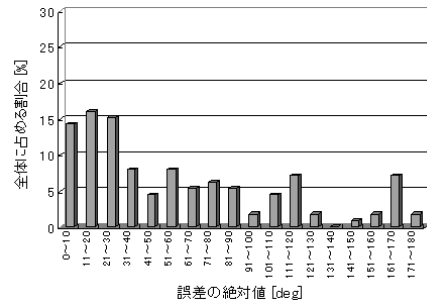


図 14: 誤差分布 (音源配置 2-Spherical)

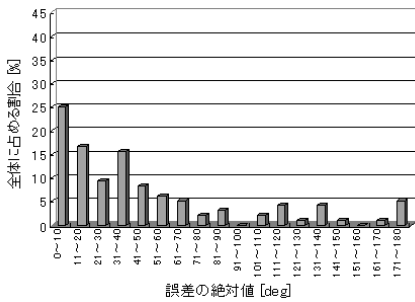


図 12: 誤差分布 (音源配置 1-Descartes) 分布していることがわかるが音源配置 2 で比較的誤差の大きいところにも分布が見られる。これは前後方向の角度知覚は比較的困難であるという事実と合致する [4, pp. 246-247]。また Spherical 同士 (図 11,14,17) や Descartes 同士 (図 12,15,18) で比較を行うと仮想音源にも同様の傾向が見られることがわかる。

同じ音源配置に関して実音源と仮想音源で比較すると、どの配置においても仮想音源は実音源に比べ分布が広くつまり誤差が大きくなっていることが確認できる。また仮想音源同士の Spherical と Descartes を比較をすると図 11 と図 12 や図 14 と図 15 では Descartes で比較的分布が広がっているように見えるが、これらの分布のグラフだけでは定

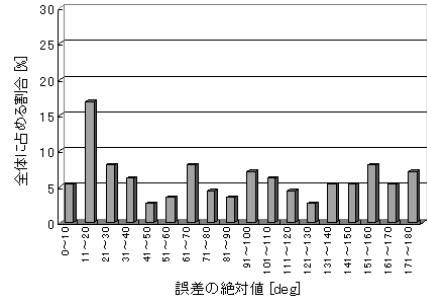


図 15: 誤差分布 (音源配置 2-Descartes) 量的に判定できない。そこで次に正答率を定義し比較を行った。

4.2 正答率

分布の広がりやを定量的に評価する指標として、ここでは「音源提示方向と被験者の回答方向の誤差の絶対値が 45deg 以内なら正解」という基準を用いてそれぞれの正答率を出した。その結果が表 1 である。

先ほど触れたように人間の聴覚による方向認知は水平方向 (x,y 平面) が比較的正確で正中面上 (x,z 平面) が不正確であるとされるが、実験結果における正答率の高さは、おおむね音源配置 1(x,y) → 3(y,z)

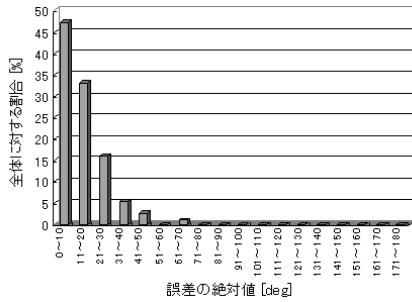


図 16: 誤差分布 (音源配置 3-Real)

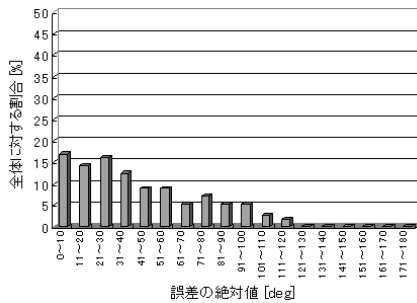


図 17: 誤差分布 (音源配置 3-Spherical)

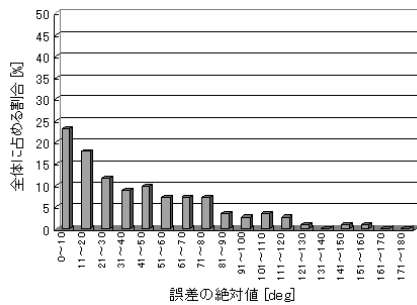


図 18: 誤差分布 (音源配置 3-Descartes)

表 1: 各パターンの正答率 [%](被験者 4 名)

	音源配置 1	音源配置 2	音源配置 3
Real	94.8	73.2	97.3
Spherical	83.3	51.8	61.6
Descartes	61.5	32.1	59.8

→ 2(x,z) の順になっており事実との合致が見られ実験結果の妥当性がうかがえる。さらに正答率を音源提示のパターンごとで比較すると、**Real > Spherical > Descartes** の順になっており、Spherical と Descartes の比較により耳介構造微細表現によって仮想音像定位の精度が高くなったことが示され、本

手法の有用性が示唆された。また実音源と Spherical の正答率比較を各音源配置ごとに行うと、比較的定位が簡単である水平方向 (音源配置 1) 以外は実音源に正答率にして 20%以上離されており、大きく及ばない。しかし、音源配置 1 および 2 においては Descartes に対して Spherical の正答率が向上しており、耳介構造の詳細なモデル化の効果が確認できた。

5 むすび

耳介構造を微細に表現したモデルを用いた FDTD 計算による HRIR 取得法について述べ、聴取実験によって音像定位特性を検証した。今後の課題は被験者数を増やしさらに詳細な解析を行うこと、また角度方向への変数変換の適用を行うなど、さらに精度の高い音像定位を与える HRIR を得るためのモデル作成手法の検討である。

参考文献

- [1] 廣瀬 通孝”バーチャル・リアリティ”産業図書株式会社 (1993)
- [2] 佐々木 知徳, 西方 敦博, 清水 康敬 ”1998 年 信学総体 D-15-55”
- [3] 九頭龍 雄一郎, 西方 敦博 ”2002 年 信学総体 A-16-3”
- [4] B.C.J. ムーア ”聴覚心理学概論” 誠信書房 (1994)