

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18300042  
 研究課題名(和文) 人間の適応能力を考慮した頭部伝達関数の適用限界に関する研究  
 研究課題名(英文) Study on applicability of head related transfer function considering adaptive skill of human  
 研究代表者  
 伊勢 史郎 (ISE SHIRO)  
 京都大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：20211732

研究成果の概要：境界要素法によって計算された HRTF を用いて、頭部運動に対応可能な動的聴覚ディスプレイ (VAD) による定位実験、仮想空間内で動きながら会話可能な仮想聴空間システムによる評価実験を行った。さらにダミーヘッドが頭部運動に追従するテレヘッドシステムを開発し、音像定位実験を行った。その結果、人間の適応能力を考慮した場合には必ずしも個人の HRTF を利用する必要がなく、HRTF に要求される精度を低減可能であることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2007 年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2008 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学

キーワード：バーチャルリアリティ

## 1. 研究開始当初の背景

従来の 2ch ステレオ方式や 5.1ch サラウンド方式よりもリアルに音場を再現する技術は、音楽や映像コンテンツ再生だけでなくバーチャルリアリティ (VR) システム、臨場感通信システム、デジタル放送、ネットワークコンテンツなど、様々な分野から注目されている。ここで、リアルな音場を別の場所で再現するための音響的な要求としては、立体的な音響信号を忠実に再生すること、すなわち、両耳に高精度な音圧信号を与えることが必要となる。この高精度な両耳音圧信号を再現するためには頭部伝達関数 (HRTF: Head Related Transfer Function) が用いられる。HRTF はある音源位置から外耳道入り口まで

の伝達関数であり、空間的な特性を含む。HRTF は頭部や耳の形状によって決まるため、個人差が存在する。そのため、これまで HRTF を用いて立体音響再生技術を実現するには、HRTF の個人差の補正が不可欠と考えられてきた。すなわち、個々の HRTF を測定し、HRTF の基準からのずれの分を再生信号に補正する必要があると考えられてきた。しかし、音源の位置毎に HRTF が異なることも合わせると、個人毎に全ての位置の HRTF を測定し、補正することは現実的には極めて難しく、それが工学的な応用の幅を狭めている。一方、両耳への音圧信号の再現精度がある程度低くても、人間は与えられた両耳信号に適応することが近年指摘されるようになった。すな

わち、聴覚系の処理特性は不変ではなく、状況に応じてその特性が変化し、置かれている状況に適応することがわかってきた。例えば、残響のある室内に入れば、残響の中でも音声信号を聞き取れるように聴覚が適応する。また、HRTF の個人差については、他者の HRTF にある程度適応できる可能性が示されている。このような聴覚系の適応能力を積極的に利用すれば、リアルに音場を再現するために必要な両耳音圧信号の精度は従来考えられているよりも低くて済むと考えられる。しかし、両耳信号としてどの程度の精度が必要かは明らかにされていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、音源探索問題における HRTF への適応能力を、HRTF を畳み込んで再現する仮想空間とダミーヘッドを用いて再現する実空間の両面から調べることにより、精度の低い HRTF に人間が適応する能力があることを実証するとともに、その適応能力の限界を明らかにする。すなわち HRTF の精度と音源探索問題の達成能力との関係を聴取実験を行って定量的に調べ、他者の HRTF に適応するために必要な学習過程、適応の難易度に寄与する要因、適応可能な HRTF の誤差の限界を明らかにする。これらの結果に基づき、さらに音源探索課題を取り入れたネットワークゲームを構築し、音源探索タスクを効率的に実現する HRTF とそれに対応する頭部形状モデルを提案する。

## 3. 研究の方法

### □HRTF の数値計算

HRTF を正確に計測するためには、無響室内で実頭を固定した状態で、あらゆる方向に設置された音源から両耳への伝達関数を計測する必要がある。現実にはこれらの条件を満たすのは極めて困難である。そこで MRI など計測した頭部形状を境界条件として、境界要素法などの数値解析法により波動方程式を解くことで、頭部周辺の音場を数値的に求める方法が有効である。そこで数値計算により HRTF を求める方法について検討する。

### □仮想聴空間システム

音源探索問題における HRTF の有効性を評価するためのアプリケーションとして仮想空間内を移動しながら会話する状況を想定

する。すなわち、動き回ることができる仮想空間内で会話を行う状況において、相手の位置探索などを行いながら会話可能な仮想聴空間システムを開発し、3次元空間を能動的に動くことがコミュニケーションに及ぼす影響などについて調査する。

- (1) 上記、境界要素法による数値計算によって得られた他者の HRTF を用いて、仮想空間内におけるお互いの位置情報、音声入力信号をネットワーク経由で伝送し、両耳における音声信号をリアルタイムで計算し、両耳受聴可能なネットワークシステムを開発する。
- (2) このシステムを評価するために、評価グリッド法を用いて対象となるシステムの評価構造を明確にし、その評価構造に基づいて構成した尺度による段階評価及び自由記述によってシステムの特徴について検討を行った。

### □テレヘッドシステム

MRI で計測した 3次元頭部形状データから光造形法により作成したダミーヘッドと、そのダミーヘッドを受聴者の頭部運動に追従させて実空間における動的バイノーラル信号を収録できるテレヘッドを用いて、3次元音響空間の再現に必要な頭部伝達関数の誤差の限界を明らかにする。

- (1) 擬似頭及び実頭の頭部伝達関数 (HRTF) の測定結果と比較することで、境界要素法 (BEM) による HRTF シミュレーションの妥当性について検討を行った。
- (2) (1) のシミュレーションを利用して、HRTF のスペクトル特性の距離依存性に関する検討を行った。

HRTF を用いた仮想聴覚ディスプレイ (VAD) では、受聴者の頭部が回転・移動した場合に、呈示される聴覚空間も頭部運動と同方向に移動してしまうという問題があるが、ヘッドトラックを用いることで頭部運動に対応した聴覚入力を呈示可能な動的 VAD を開発し、頭部運動が許される場合に HRTF に要求される精度に関する基礎的な検討を行った。

## 4. 研究成果

### □HRTF の数値計算

境界要素法を用いて正確な HRTF シミュレ

ーションを行う上で必要なノウハウを蓄積した。また、本手法を用いた擬似頭及び実頭の HRTF の数値計算と測定結果の比較から、胴体の影響により低周波域においてスペクトル上の谷が生じることを明らかにした。また、この胴体の影響と高域のゲイン差以外については、15kHz 以下の帯域において境界要素法により HRTF を正確に算出できることを明らかにした。

先行研究において HRTF の数値シミュレーションの妥当性は 10kHz 以下で示されていたが、得られた成果は 15kHz までの HRTF の妥当性を示すと共に、胴体が HRTF スペクトルに与える影響を明らかにしたものであり、最先端の成果である。

#### □仮想聴空間システム

HRTF の客観的な評価は定位実験によって可能であるが、ヒトの適応能力を考慮する場合には、道具としての HRTF の性能評価が必要となる。そのためには HRTF を用いた道具の開発、その道具の評価方法の確立が必要となる。そこで、本研究では道具として仮想的な空間内で移動しながら音声会話が可能で仮想聴空間システムを開発した。ユーザーはヘッドセットを装着し、会話音声はヘッドセットのマイクロホンを経て、PC にデジタルデータとして送られる。さらにユーザーはキーボードの方向キーを押すことにより、画面に提示される仮想的な 3 次元空間の中を移動することができる。仮想空間の中には会話の相手がアバターとして存在し、相手との相対的な位置を視覚的に把握することが可能である。PC に入力された音声と仮想空間における自分の位置情報は TCP データとしてネットワークを介して会話の相手が用いる PC に送られる。会話の相手が操作する PC において、送られてきた音声信号と HRTF が畳み込まれ、両耳信号としてヘッドセットによって再生される。HRTF は境界要素法によって数値的に求められたものであるが、その方向は自分の頭部の位置、方向と相手の位置の相対的な関係から決められる。すなわち、受信した位置情報から相対的な音源の方向が求められ、その方向の HRTF が選択され、さらに HRTF と受信した音声信号が畳み込まれることによって、空間情報が含まれた音声信号が相手の両耳に再生されることになる。このような計算をリアルタイムに実行しながら、双方向での

通信が行われ、二名のユーザーが仮想空間を移動しながら会話が可能で仮想聴空間システムを開発し、ヒトの適応能力を評価するための道具とした。

#### (1) 評価項目の選定

仮想聴空間システム (VAS : Virtual Acoustic Space System) を用いたコミュニケーションの特徴把握に適した評価項目を決定するための予備的検討として、コミュニケーションツールに対するニーズを把握することを目的に、評価グリッド法によるインタビュー調査を行った。9 名に対するインタビューで得られた 5 つの評価構造から、仮想聴空間システムに求められる機能、性能、仕様を抽出し、28 の評価項目を選定した。

#### (2) 評価実験の手順

##### (2-a) VAS の試用

評価に先立ち、友人・知人と二人一組で設定条件を変えて試用を行った。すなわち、操作方法の確認後、VAS の特徴を生かしたコミュニケーションとして、一方の姿が見えない条件 (互いに 5 分間ずつ) で、もう一方が音声を手がかりに相手のいる場所を探し当てるゲームを行った。さらに両者が見える条件 (10 分間) で自由にコミュニケーションを行った。

##### (2-b) 評価

前項で定めた評価項目を用いた段階評価を行った。対象は、VAS の他、比較のために加えた対面会話、電話、チャットの 4 種類とした。評価対象の機能について、各評価項目を満たすか否かを選択回答する形式とした。

また、VAS の特徴 (長所・短所) について、自由記述 (箇条書き) での回答を求めた。

#### (3) 評価結果

総じて対面会話はすべての性能項目を高いレベルで満たし、VAS、電話、チャットの順で全体的に性能項目が満たされるレベルが低く評価された。VAS よりも電話の方が高い評価傾向がみられるのは、「情報を伝えられる／受けられる」など情報伝達に関わる部分、チャットの方が高い評価傾向がみられるのは、「疲れない／長く続けられる」などストレスに関わる部分であった。電話やチャットよりも VAS の方が高い評価傾向がみられるのは、「感情・周囲の環境・雰囲気共有できる／いっしょに過ごしている実感がある」

や「相手との距離感が近い／相手との距離感を調節できる」などで、共有や距離感に関わる VAS の長所がうかがえた。

自由記述によって得られた長所・短所及び試用時の感想によれば、長所としては、距離感の近さが指摘された他、動きがあることのメリットやエンターテインメント性が指摘された。短所としては、視覚情報や動きが仮想的なものに制限されていることが主に指摘された。

仮想聴空間システムは、頭部運動を行う動的 VAD やテレヘッドシステムとは位置づけが異なるが、空間移動の操作および音声発話などの能動性と空間に関する視覚・聴覚刺激が統合的に生成されることによる効果を調べることができる。評価実験の結果、空間共有という通信システムの本来の目的を達成するためには、HRTF の個人化の必要性は小さいことが示唆された。

#### □ テレヘッドシステム

(1) 実頭の 3 次元形状を MRI で計測し、光造形法によりダミーヘッドを作成した。そして、無響室内で実頭とダミーヘッドの HRTF を計測した。また、実頭の 3 次元形状から境界要素法を用いて HRTF を算出した。これら実頭とダミーヘッドの実測 HRTF と計算 HRTF を比較した結果、以下のことが明らかになった。

(1-a) HRTF の実測値にはさまざまな誤差要因が含まれる。特に、計測環境における反射と計測系の位置精度が HRTF の実測値に大きく影響する。前者は計測環境の改善により、後者は計測系の改善によって低減できる。しかし、長時間に渡る HRTF 計測中に生じる被験者頭部の動きは抑制することが困難である。

(1-b) エポキシと石膏の 2 種類の材質で作成した光造形ダミーヘッドの実測 HRTF には優位な差は無い。

(1-c) ダミーヘッドに鬘を装着した場合は、実測 HRTF には大きな変化が無い。一方、頭部固定用の顎バンドを実頭の頸部に装着した場合は、その反射の影響が側方で大きく出現し、実測 HRTF は変化する。

(1-d) HRTF の物差しとして用いられている SD 値は、必ずしも適切に HRTF の差をあらわす指標ではない。

(2) 実頭の 3 次元形状から境界要素法を用い

て HRTF を算出し、実測 HRTF と比較した結果、以下のことが明らかになった。

(2-b) 頭部形状から算出される HRTF の計算値には、肩と胴体の影響によって生じる低域周波数帯におけるスペクトルの谷が含まれないために、計算値と実測値に差異が生じる。また、HRTF の計算値では高域周波数帯におけるゲインが実測値と異なる。これらを除くと、境界要素法により 15kHz 以下の帯域における HRTF を正確に算出できる。

(2-b) 音源が頭部近傍に存在する場合には HRTF の距離依存性が強く、距離に対応した HRTF を使用するか、あるいは、頭部中心座標系ではなく耳介中心座標系に基づいて HRTF 補間を行うなど両耳の輻輳角に基づいて HRTF を選択する必要がある。一方で、音源が頭部中心より約 1m 以遠に存在する場合には HRTF の距離依存性は弱く、ある音源距離に対する HRTF で他の音源距離の音源を模擬できる。

HRTF に距離依存性があることは既知であるが、多くの音源距離に対する HRTF を正確に測定することが困難であるため、その影響は定性的にしか指摘されてこなかった。一方、数値計算を利用することで密な空間解像度で定量的な検討を行い、HRTF の距離依存性の詳細を明らかにした。また、この結果は、HRTF を用いた VAD における音源距離の正確な呈示方法に対して有益な知見を与えるものである。

(3) 頭部運動に追従する動的 VAD を開発し、実測 HRTF および計算 HRTF を用いて合成したバイノーラル信号による音像定位実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

(3-a) 被験者の頭部運動に追従した動的バイノーラル信号を呈示すれば、他人の HRTF を用いても音像は頭外定位し、定位精度も高くなる。ただし、計算 HRTF を用いた場合は、水平面に呈示した音像はやや上方に定位される。これは、計算 HRTF には肩と胴部の反射によって生じる低域周波数帯のスペクトルの谷が含まれないためである。

(3-b) 被験者の頭部運動に追従した動的バイノーラル信号を呈示すれば、イヤホンの周波数特性を補正しなくても、音像は頭外に正しく定位される。

(3-c) BEMを用いて高速にHRTFを計算するサーバと動的VADと連携させることによって、任意の位置に音源を呈示可能な汎空間動的VADを構築できる。

頭部運動に対応可能な動的聴覚ディスプレイはここ10年ほどの間に国内外の幾つかの研究グループにより開発されてきたが、開発した動的聴覚ディスプレイは、Windows OS上でソフトウェアにより実装されており、高性能な計算機を必要としない点が長所である。頭部運動に対応しないVADでは非個人のHRTFを用いた場合定位精度が大きく低下するが、本システムを用いた定位実験により、頭部運動に対応した場合には高い定位精度が達成されることが確認された。この結果は、頭部運動への追従が可能であれば、VADにおいて必ずしも個人のHRTFを利用する必要がなく、HRTFに要求される精度を低減可能であることを示すものである。

(4) ダミーヘッドが頭部運動に追従して実環境で動的バイノーラル信号を収録できるテレヘッドシステムを開発し、ダミーヘッド形状および頭部運動追従条件を変化させて音像定位実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

(4-a) 被験者の頭部運動に追従した動的バイノーラル信号を呈示すれば、縮小ダミーヘッドやステレオマイクروفオンを用いた場合でも音像は頭外に正しく定位される。

(4-b) 他人の頭部運動に追従した動的バイノーラル信号を呈示した場合、再生される音像空間はおおきく歪む。そのときに、他人の頭部運動を模擬して受聴者が受聴時に自分の頭部を運動させると、音像は頭外に正しく定位される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① 平原 達也、大谷 真、戸嶋巖樹、頭部伝達関数の計測とバイノーラル再生にかかわる諸問題、*Fundamentals Review* **2**(4), 68-85, (2009) 査読無
- ② Makoto Otani, Tatsuya Hirahara, and Shiro Ise, Numerical study on source distance dependency of head-related

transfer functions, *J. Acoust. Soc. Am.* **120**(5), 3253-3261, 2009. 査読有

- ③ Makoto Otani and Tatsuya Hirahara, Auditory artifacts due to switching head-related transfer functions of a dynamic virtual auditory display, *IEICE Trans. on Fundamentals* **E91-A**(6), 1320-1328, 2008. 査読有
- ④ 大谷 真, 平原 達也, 伊勢 史郎, 汎空間型動的聴覚ディスプレイ, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌* **12**(4), 453-460, 2007. 査読有
- ⑤ 大谷 真, 平原 達也, 伊勢 史郎, 水平面上の頭部伝達関数の距離依存性の数値的検討, *日本音響学会誌* **63**(11), 646-657, 2007. 査読有

[学会発表] (計16件)

- ① 伊勢 史郎, 音を聴くことにおける能動性の及ぼす影響に関する一考察, *日本音響学会講演論文集*, 1485-1488 (2009. 3. 17-19、東工大)
- ② 大谷 真, 平原 達也, 伊勢 史郎, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, 境界要素解析及び実測による実頭/個人擬似頭の頭部伝達関数の比較, *日本音響学会講演論文集*, 1443-1444 (2009. 3. 17-19、東工大)
- ③ 平原 達也, 大谷 真, 頭部伝達関数と音像定位を巡る諸問題, *日本音響学会2009年春期研究発表会講演論文集*, 1477-1480 (2009. 3. 17-19、東工大)
- ④ 大谷 真, 平原 達也, 伊勢 史郎, 矢入 聡, 岩谷幸雄, 戸嶋巖樹, 擬似頭の頭部伝達関数の境界要素解析と実測の比較, *日本音響学会講演論文集*, 515-516 (2008. 3. 17-19、千葉工大)
- ⑤ 平原 達也, 大谷 真, 矢入 聡, 岩谷幸雄, 戸嶋巖樹, 頭部伝達関数の陥穽, *日本音響学会2008年春期研究発表会講演論文集*, pp. 513-514 (2008. 3. 17-19、千葉工大)
- ⑥ 大谷 真, 平原 達也, 伊勢 史郎, 矢入 聡, 岩谷幸雄, 戸嶋巖樹 数値計算による擬似頭の頭部伝達関数と実測値の比較, *日本音響学会 聴覚研究会資料* Vol. 38(1), H-2008-3, pp. 13-18 (2008. 1. 23、京大)
- ⑦ 平原 達也, 大谷 真, 矢入 聡, 岩谷幸雄, 戸嶋巖樹 頭部伝達関数論考, 日

- 本音響学会聴覚研究会資料 Vol. 38(1), H-2008-4, pp. 19-24(2008. 1. 23、京大)
- ⑧ 平原 達也, 青山 裕樹, 大谷 真, 動的バイノーラル信号の音像定位におけるイヤホンの実耳応答補正の効果, 日本音響学会講演論文集, 511-512 (2008. 9. 10-12、九大)
- ⑨ 森川大輔, 平原 達也, 大谷 真, 5.1ch方式による再生音の臨場感と聴感度特性の関係, 日本音響学会 2008 年秋期研究発表会講演論文集, pp. 513-514 (2008. 9. 10-12、九大)
- ⑩ 森川大輔, 平原 達也, 大谷 真 被験者の聴感度特性と 5.1ch 方式による再生音の臨場感の関係, 電子情報通信学会 応用音響研究会資料 vol. 108, EA2008-80, pp. 91-96 (2008. 10. 23-24、富山県立大学)
- ⑪ Makoto Otani and Tatsuya Hirahara, Numerical study on source distance dependency of head-related transfer functions, *Proc. 19th International Congress on Acoustics*, PPA-05-017, Madrid (2007. 9. 2-7)
- ⑫ Tatsuya Hirahara, Hiroyuki Sagara and Makoto Otani, Sound localization with scaled dummy-heads on a TeleHead, *Proc. 19th International Congress on Acoustics*, PPA-05-013, pp. 1-4, Madrid (2007. 9. 2-7)
- ⑬ 上野 佳奈子, 伊勢 史郎, 音の定位における能動的学習の効果, 日本音響学会講演論文集, 527-528 (2007. 9. 19-21、山梨大学).
- ⑭ 土屋はるひ, 伊勢 史郎, 上野 佳奈子, 大谷真, 仮想聴空間における音の定位の学習が実空間での定位に及ぼす影響, 日本音響学会講演論文集, 523-524 (2007. 9. 19-21、山梨大学).
- ⑮ Makoto Otani and Tatsuya Hirahara, A Dynamic auditory display: its design, performance, and problems in HRTF switching, *Proc. the Japan-China Joint Conference of Acoustics 2007*, SS-1-3, Sendai (2007. 6. 4-6、東北大学)
- ⑯ 大谷 真, 平原 達也, Windows 上で動作する動的聴覚ディスプレイ, 日本音響学会 2007 年春期研究発表会講演論文集, pp. 711-712 (2007. 3. 13-15、芝浦工大)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊勢 史郎 (ISE SHIRO)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 20211732

### (2) 研究分担者

平原 達也 (HIRAHARA TATSUYA)

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号: 80395087

上野 佳奈子 (UENO KANAKO)

明治大学・理工学部・講師

研究者番号: 10313107

大谷 真 (OTANI MAKOTO)

東北大学・電気通信研究所・研究員

研究者番号: 40433198

### (3) 連携研究者

なし