

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870808

研究課題名(和文)聴覚ディスプレイにおける音像の存在感に関する研究

研究課題名(英文)Study on presence of a sound image in Virtual Auditory Display

研究代表者

矢入 聡 (YAIRI, Satoshi)

仙台高等専門学校・専攻科・准教授

研究者番号：00447187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：ヘッドフォンを用いて任意の位置にある音像を模擬する聴覚ディスプレイシステムは、通常被験者により音像をどの方向に知覚したかを調べ評価される。しかしながら、提示された音像と実スピーカや実音源との実在性の差異を正しく評価することは難しい。そこで聴覚ディスプレイを評価する新たな指標として音像の存在感に着目する。音の存在感が持つイメージを事前調査により調べたのち、SD法を用いて因子分析を行なった。また、スピーカからの提示音と、聴覚ディスプレイによる頭部伝達関数を畳み込んだヘッドフォンからの提示音をランダムに聞ける実験環境を構築し、定位方向に加え音の存在感、迫真性について評価させる実験を行った。

研究成果の概要(英文)：It is difficult to evaluate a difference between real sound source and virtual sound image only by sound localization test. In this study, we focus on sense of presence of a virtual sound image as an indicator to evaluate Virtual Auditory Display. We examined image of the word "presence of a sound source" and carried out factor analysis. Also we prepared an experimental environment that listeners listen to sounds both from real speakers and from VAD system with headphones based on HRTFs (Head-Related Transfer Functions). Listeners answered perceived direction, vraisemblance, and presence of a sound source.

研究分野：音の空間知覚及び聴覚ディスプレイ

キーワード：聴覚ディスプレイ 存在感 音像定位 頭部伝達関数 迫真性

## 1. 研究開始当初の背景

我々人間は、周囲から到来する音の方向や距離を判断できる能力を有する。これは、音源位置から耳元までの伝達特性(頭部伝達関数、**Head-Related Transfer Function: HRTF**) [1]が、音の到来する方向・位置によって変化することを利用して考えられている。**HRTF**を信号処理的に再現し音源に畳み込むことで、任意の位置にある音源を模擬することができ、これをシステム化したものを聴覚ディスプレイシステム(**Virtual Auditory Display:VAD**)という。

聴覚ディスプレイ技術の確立によって、今までに体験できなかったような臨場感のある3次元音響空間の創成が期待される。加えて、聴覚ディスプレイは、視覚障害者の訓練用システムなどへの応用も考えられ、通信分野・福祉分野における社会への貢献度は計り知れない。したがって、聴覚ディスプレイシステムの高性能化のための研究は必需であると考えられる。

音の位置を知覚する音像定位においては、聴取者の動きや音源の移動などにより生じる音信号の動的な変化が定位精度の改善に大きく寄与することが知られている[2]。このため、高精度聴覚ディスプレイの実現には、聴取者に対して相対的に動いている音の模擬が重要であると言える。音源が移動する場合には、移動方向と同方向に用いる**HRTF**を切り替えれば良い。一方、聴取者が動く場合、頭部運動によって音源の絶対位置が変化しないように制御するためには、聴覚ディスプレイ内部で聴取者と音源との相対位置に応じて、**HRTF**を頭部運動と逆方向に切り替える必要がある。これにより、定位しやすい音を作り出すことが可能である[3]。

研究代表者は、世界中にある類似の聴覚ディスプレイシステムのなかでも**HRTF**の補間が高精度で、システム遅延が**10 ms**以下と極めて短いシステムを開発することに成功した[4]。その後、聴覚ディスプレイシステムの改良に取り組んできた。平成19年度から20年度までは、高性能化を目標とした研究内容で科研費補助金(若手研究(B))の採択を受けた。

本研究計画は、聴覚ディスプレイ技術の確立のための不可避な課題として挙げられる、実音源聴取時に比べ、特に音信号の動的変化がない場合の再現精度が不十分である点に取り組み、聴覚ディスプレイシステムの実用化に向けてさらなる高性能化を目指して行うものである。

## 2. 研究の目的

### (1)音源の存在感を評価するための指標の検討

これまで、聴覚ディスプレイシステムの評価は、音像定位実験によって行われて来た。これにより、音像の定位方向を調べることは可能であるが、かろうじて方向がわかる場合

や、方向はわかるものの距離感がない場合などを正しく評価することは不可能である。これに対し、聴覚ディスプレイの進むべき方向性は、聴感上で実音源に近い聞こえ方になることであると考えられる。したがって、システムの改善点を正確に評価できる新たな指標がなければ本末転倒になりかねない。実音源聴取時には、我々は音源の存在感すら感じ取ることができる。そこで本研究では、その存在感に着目し、通常の定位実験に代わる評価指標の確立を目指す。

### (2)音源の存在感を表現するためのアルゴリズムの検討

聴覚ディスプレイにおける基本的な原理は、音源方向の**HRTF**を畳み込むことである。一方、我々は目的音とは別に背景音源を用意し、これらに音源方向以外の**HRTF**を畳み込むことにより、背景音を信号処理的に付加する手法を提案した[5]。実音源において、音源が存在する場合、少なくとも音源方向以外からの到来音は音源の存在による影響を受ける。そこでこの手法を発展させ、音源の存在感を表現するためのアルゴリズムを検討する。

## 3. 研究の方法

### (1)

・存在感の喚起に重要であると考えられる聴覚・視覚・前庭感覚・触覚のそれぞれに入力された情報がどの程度相互に影響を及ぼし合うかを解析し、知覚モデルを構築するとともに、定量評価するための形容詞対を選定する。

・「存在感」のある音源を提示可能な実音源と、現在の「存在感」を表現できていない聴覚ディスプレイシステムによる音源とを同時に切り替えながら提示できる実験系を構築し、比較聴取した際の存在感の違いについて評価実験を行う。具体的には、実音源はスピーカを30度間隔で12個用いて、聴取者の周囲を囲み、伝達関数測定時と同じ音源で遮蔽する。極端な例で比較することにより、どのような指標であれば効果的に存在感の違いを評価できるかを検討する。

### (2)

・正面方向以外の**HRTF**については、無響室にて遮蔽物を設置した状態における伝達関数を測定する。

・正面方向の**HRTF**については、従来通りの測定法で、無響室にて伝達関数を測定する。

・遮蔽物となる音源のサイズや材質、位置などを数通り変えながら、伝達関数の選定を行う。

・伝達関数の測定結果から、遮蔽物の有無による伝達関数の違いの変化を調べ、提案アルゴリズムの有効性について結論付ける。

#### 4. 研究成果

##### (1)

寺本らの臨場感に関する研究[6,7]を参考に、まずは取り扱う感性情報がどのように理解されているかを明らかにするための調査を行なった。調査は、まず事前調査を行い、その結果をもとにSD法を用いた本調査を行うこととした。得られた評定値を用いて因子分析を行った結果、存在感は第一因子：評価性因子、第二因子：迫力性因子、第三因子：知覚性因子、第四因子：空間性因子の4つの要素から構成されることがわかった。

スピーカ及び聴覚ディスプレイの音をランダムに提示し「音の存在感」において両者の差が見られるかを聴取実験により評価した。また、音の本物らしさが音の存在感に関係するのを確認するために先行研究[6,7]で用いられている迫真性についても着目した。音源によっては一部の定位の結果がほぼ同じであるのに提示方法によって存在感と迫真性の評点が異なることがわかった。このことから、定位以外の指標として存在感を用いて聴覚ディスプレイを評価できる可能性が示唆された。

しかしながら、この実験において聴覚ディスプレイに用いた頭部伝達関数はダミーヘッドのものであり、個人差を考慮すれば、聴取者本人の頭部伝達関数を用いた検証は不可欠であると考えられる。そこで、頭部伝達関数条件を変更して新たに実験を行うこととした。

実験は仙台高等専門学校9号棟の簡易無響室で行った。被験者の座る位置から約1.17mの距離で12方向にスピーカ(Eclipse TD307MK2A)を設置した。用いる頭部伝達関数は、次の手順で求めた。まず、各スピーカから最適化時間引き延ばしパルス[8]を出力し、聴取者の外耳道入口にマイクロフォン(Panasonic WM-64CT)を設置して12点からのインパルス応答を測定する。これらのインパルス応答を、聴取者の頭部中心位置におけるそれぞれのスピーカからの音圧で割ることにより12点の頭部伝達関数を求めた。また、スピーカの音が聞こえるように聴覚ディスプレイに用いるヘッドフォンには外耳道入口をふさがない形状のパーソナルフィールドスピーカ(SONY PFR-V1)を使用し、スピーカ提示時の頭部中心位置と音圧が同じになるよう調節した。

実験には仙台高等専門学校の学生15名が参加した。音源はセミの音、ホイッスルの音、キーボードの音、目覚まし時計の音の4つとし、再生時間は3sとした。

実験時の機器の接続状態を図1に示す。本実験は提示デバイス、提示位置、提示音源の選択を全てMaxプログラミングの制御で行った。各装置の詳細は以下の通りである。

- ・ PC : MacBook Air
- ・ オーディオインターフェイス : steinberg UR824

- ・ AD/DA コンバータ : behringer ADA8000×2台
- ・ 16ch パワーアンプ : Mishima Planning MP3016

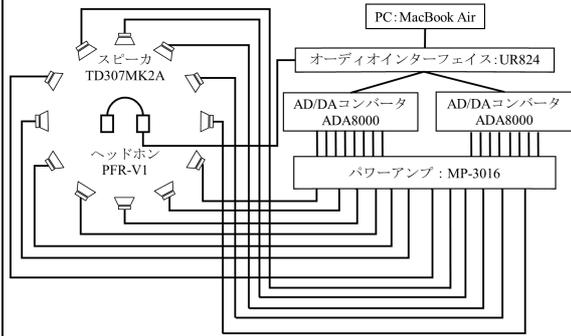


図1 実験時のシステム構成

被験者はスピーカを中心に座り、ヘッドフォンを装着してスピーカまたはヘッドフォンからランダムに提示される音を聴取し、音が再生されたと思われる方向の回答とその音の存在感、迫真性について5段階で評価した。音の存在感は被験者が回答した方向に音が実際にあると感じた度合い、音の迫真性は提示された音の本物らしさの度合いを意味していると説明した。

図2に回答した角度と提示した角度との定位誤差を音源ごと、スピーカ提示とヘッドフォン提示とに分けて平均値を求めた結果を示す。全体的にスピーカが優れるが、音源によってヘッドフォンとの差の程度が異なつた。

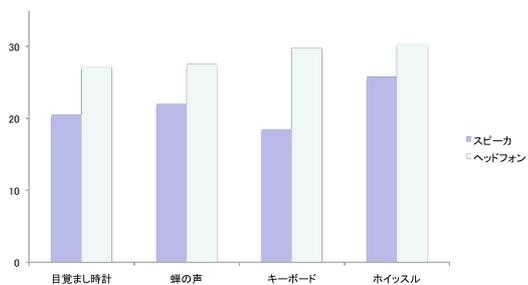


図2 平均定位誤差の比較

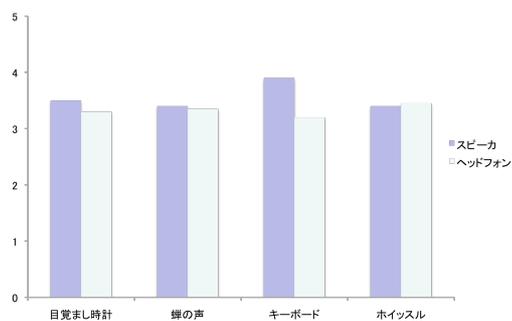


図3 存在感の評価得点の比較

図3には同様に音の存在感の評点の平均値を示す。存在感においては、音源がキーボードのときのみスピーカがヘッドフォンより有意に高い結果となった。一方、他の音源においては、定位精度に差があるにも関わらず、知覚される音の存在感がスピーカ・ヘッドフォン間でほとんど変わらないという予想外の結果となった。そもそもは、定位精度という指標でうまく区別できないときに別の指標で差別化できないかという観点から存在感を提案した。一方、これらの結果から、定位精度がそもそも異なる結果になった。提示する方向を減らすなどしてスピーカ・ヘッドフォン間の定位精度が同程度になるようにしたうえで比較する必要があると考えられる。また、音源依存性が見られたことから、他の音源でも調べていくことも興味深い。

今回の被験者は、ヘッドフォンで音楽を聴くことが圧倒的に多い世代の聴取者であり、たとえ頭内定位であっても音の存在感を違和感なく知覚していたのではないかと考えられる。別の世代、多くの聴取者で検証をする必要がある。

以上から、現在は、定位精度がほぼ同じ状況を作り出し、その際の存在感を評価する追実験を行うべく計画中であり、そこまでの内容をまとめて論文執筆する予定である。

## (2)

正面方向以外の HRTF については、無響室にて遮蔽物を設置した状態における伝達関数を測定し、正面方向の HRTF については、従来通りの測定法で、無響室にて伝達関数を測定した。遮蔽物となる音源のサイズや材質、位置などを変えながら、HRTF の選定を繰り返し行なったが、音源のサイズや位置のパラメータを変えても、測定結果に系統的な変化が見られなかった。また、これらの HRTF を畳み込んだ音を聴取しても、通常の HRTF と比べて聴取時の印象や前方の定位感にほとんど差が見られなかった。これらのことから、音源の存在感を表現するためのアルゴリズムは実現できなかった。

## <参考文献>

- [1] J. Blauert, Spatial Hearing, The MIT Press, 1983.
- [2] W. R. Thrlow, and P. S. Runge, "Effect of induced head movement in localization of direction of sound," J. Acoust. Soc. Am., vol. 42, p. 480, 1967.
- [3] Makoto Otani and Tatsuya Hirahara, "A Dynamic virtual auditory display: Its design, performance, and problems in HRTF switching", The Japan-China Joint Conference of Acoustics, 2007
- [4] 矢入聡, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, "聴覚ディスプレイ," 映像情報メディア学会誌, Vol. 61, No. 10, pp. 22-25, 2007
- [5] Satoshi Yairi, Yukio Iwaya, Maori

- Kobayashi, Makoto Otani, Yo-iti Suzuki and Takeru Chiba, "The Effects of Ambient Sounds on the Quality of 3D Virtual Sound Space," In Proceedings of The Fifth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIHMSP-2009), Sep. 12-14, 2009
- [6] 寺本渉, 吉田和博, 浅井暢子, 日高聡太, 行場次郎, 鈴木陽一, "臨場感の素朴な理解," TVRSJ, Vol. 15, No. 1, pp7-16, 2010
  - [7] 寺本渉, 吉田和博, 浅井暢子, 日高聡太, 行場次郎, 坂本 修一, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, "バーチャル・リアリティの"リアリティ", ITE Technical Report, Vol. 36, No. 12, pp37-44, 2010.
  - [8] Y. Suzuki, F. Asano, H-Y. Kim and T. Sone, "An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses", J. Acoust. Soc. Am., 97, 1119, 1995.

## 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 2 件)

- ① 矢入聡, 畠山巧幹, 岩谷幸雄, 聴覚ディスプレイにおける音像の存在感、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、HIP2016-65、2016、pp. 21-24、  
[http://i-scover.ieice.org/iscover/page/ARTICLE\\_TECH\\_84892](http://i-scover.ieice.org/iscover/page/ARTICLE_TECH_84892)
- ② 畠山巧幹, 矢入聡, 岩谷幸雄, 音像の存在感を用いた聴覚ディスプレイの評価に関する基礎的検討、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、EA2014-54、2014、pp. 67-72、  
[http://i-scover.ieice.org/iscover/page/ARTICLE\\_TECH\\_70295](http://i-scover.ieice.org/iscover/page/ARTICLE_TECH_70295)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 矢入聡, 畠山巧幹, 岩谷幸雄, 聴覚ディスプレイにおける音像の存在感、ヒューマン情報処理研究会 (HIP)、2016. 12. 20、東北大学電気通信研究所 (宮城県・仙台市)
- ② 畠山巧幹, 矢入聡, 岩谷幸雄, 音像の存在感を用いた聴覚ディスプレイの評価に関する基礎的検討、応用音響研究会、2014. 12. 12、金沢大学サテライトプラザ (石川県・金沢市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

矢入 聡 (YAIRI, Satoshi)  
仙台高等専門学校・専攻科・准教授  
研究者番号：00447187

### (4) 研究協力者

岩谷 幸雄 (IWAYA, Yukio)