

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K00212

研究課題名（和文）耳介メガネを用いた正中面音像定位の技能獲得システムに関する研究

研究課題名（英文）a new method of ability improvement for sound localization in the median plane.

研究代表者

渡辺 祐子（Watanabe, Yuko）

東京電機大学・システムデザイン工学部・講師

研究者番号：20287444

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では3Dオーディオ再生技術において正中面内の音像定位を向上させる手段として、受聴者の耳介に拡張アダプターを装着することで受聴者側で物理的な音響伝送系の特性補正をする方法論の妥当性検証と、耳介アダプターの提案を目的としている。検証実験の結果、1) 耳介によって反射し、外耳道に入射する反射成分は耳介の上部付近、耳たぶの形状変化により顕著に変化すること、2) 耳介を曲げたり回転させたりすると特に上部方向から外耳道に入射する音波による反射成分（鏡面反射量）が影響をうける3) 耳たぶに耳介アダプタを装着すると正中面の定位性能が向上する被験者いること、が確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、汎用化が進む個人化3Dオーディオ技術においては、ユーザー個人の耳介形状を3Dスキャナにより採取し3次元音場再現システムをアプリ上で構築する手法が主流であるが、本研究は耳介形状そのものの形状を拡張アダプタを用いて変形することでシステムの伝達関数を変化させる手法を開発することを目的とした。研究の結果、アダプタを装着することの有効性は示唆されたので、1) スピーカ再生（ヘッドホン再生の場合は聴取者の耳介形状は再生系に影響しないので）において再生システムのプレフィルタを受聴者個人に応じてカスタマイズせずに良好な3Dオーディオが実現できることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to verify the validity of a methodology for correcting the characteristics of the physical sound transmission system at the listener's side by attaching an extension adapter to the listener's auricle as a means of improving the sound image localization in the midplane in 3D audio playback technology, and to propose an auricular adapter. The results of the verification experiments showed that: 1) the reflection component reflected by the auricle and entering the ear canal changes significantly with changes in the shape of the earlobe near the top of the auricle; 2) bending or rotating the auricle affects the reflection component (specular reflection) of sound waves entering the ear canal, especially from the upper direction; and 3) the auricle is not affected when the auricle adapter is attached to the earlobe. (3) The median plane localization performance is improved when the auricular adaptor is attached to the earlobe.

研究分野：音響工学

キーワード：バイノーラル音響処理 耳介形状の特徴量 3Dオーディオ 音像定位能力

1. 研究開始当初の背景

超臨場感音響を実現するための3次元音場再現システムには、大別するとバイノーラル・トランスオーラル再生方式など聴取者の耳元音圧を制御する手法と、境界音場制御の原理、波面合成(WFS)、アンビソニックスなど空間を制御する方式が存在しており、いずれの手法においても、水平面内における左右方向の音像制御については良好な音像定位を提供するためのシステム設計手法が確立し実用化が進められていたが、ヒトを正面から見て左右対称に分断する正中面内の音像制御については、まだまだ問題が多かった。

そこでバイノーラル方式では正中面の音像定位の支配的要因となる人の耳介形状やその特徴量を統計的に分析し、上下方向定位に適している(有効な特性を有する)耳介を選定する研究や、耳介形状に起因して生じる音源と耳(外耳道入り口、あるいは鼓膜上)の音響伝達特性(これを頭部伝達関数: HRTF と呼ぶ)の個人別特徴量(周波数成分におけるピークやノッチ)の分析から正中面定位を実現するための音響特性を抽出する研究などが行われていた。

これらの方法は、ヒトの音像定位における方向情報をシステムの特性として、その特性を個別に付加した処理音源を提示することで3次元空間を実現する場合には有効な手法であるが、被験者個々人に応じて特性を変更するようなインタラクティブな仕組みが必要となる。

そこで、音源を最適に処理することで正中面定位を実現するのではなく、メガネのようなアダプターを用いて音源を実際に聴取している受聴者の耳介の形状を変化させることで正中面定位を実現させれば、インタラクティブに個人の特性に合わせるシステム設計が不要になり、汎用性も上がると考え、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

ヒトの音像定位能力は、特に仰角方向において個人差があるが、訓練を重ねることで技能として獲得できる能力であると考えられる。そこで本研究では無響室における実音源、ならびに聴覚ディスプレイにより生成される3次元的な仮想音響空間内の音源、両者に対する音像定位について仰角方向知覚技能の獲得メカニズムを検証する。また定位知覚の技能を獲得させる手法として耳介拡張アダプタ(耳介メガネ)を提案する。これにより正中面内の音像定位に重要な役割を果たす耳介の一部分の形状を変化させ、耳介形状に起因する方向特徴量である頭部伝達関数(HRTF)の特徴量(ピーク・ノッチ)を強調することで、音像定位能力を定常的に良好に保つ技能獲得システムの開発を目指す。

3. 研究の方法

課題(1): 耳介メガネ(耳介拡張アダプター)の有効性の検証

研究代表者らが実施した先行研究により「耳介上部の縦幅(長さ)」や「下部と耳の傾き」に特徴がないと方向知覚ができない傾向を見出した。また音像定位と3次元形状特徴量の関係分析より、実音源の位置が正中面内で変化する場合、特に耳介上部と耳たぶ付近への反射が顕著に変化し、音像定位能力が低い受聴者の耳介ではこの現象が見られなかった。この結果から良好な音像定位を提供しうる耳介メガネは耳介上部を拡張するか、耳たぶ付近を拡張し傾きを増加させるアダプターが有効であると考えられる。そこでそれらの部位に装着する耳介メガネを作成し、装着することによって実環境において方向知覚能力が向上するか心理実験により検証することで、耳介メガネの有効性を明らかにする。

また耳介の3D形状分析は、画像処理における形状分析の手法である鏡面反射特徴量を用いて実施する。

課題(2): 音像定位能力と各種耳介物理量の関係性の解明

研究代表者らが実施した先行研究により、正中面の音像定位能力が低い受聴者は、受聴者自身の耳介形状によって決定される物理的な空間音響特性(HRTF)に方向別に特徴的な情報を持たないことが示唆された。そこで、耳介形状やそれらから算出可能なHRTFなど物理的な特徴量から受聴者の定位能力の推定が可能であるか、さらに定位能力が低い受聴者に対して、課題1にて開発した耳介メガネを提供する、あるいは方向別に特量的な変化を有するHRTFを3次元音場再現システムを通して提供すると方向知覚の技能獲得できるか、心理実験を通して解明する。

4. 研究成果: 耳介形状の3次元的特徴量、抽出方法の検証

まず無響室において耳介拡張アダプターの有無と正中面音像定位能力の聴取実験により観測した。拡張アダプターの設置部位は、先行研究の結果から耳たぶ付近を拡張するような形状(図2)を採用し、図1に示すような実験システムにより定位データを採取した。また頭部を動かした場合の定位能力についても合わせて測定した。

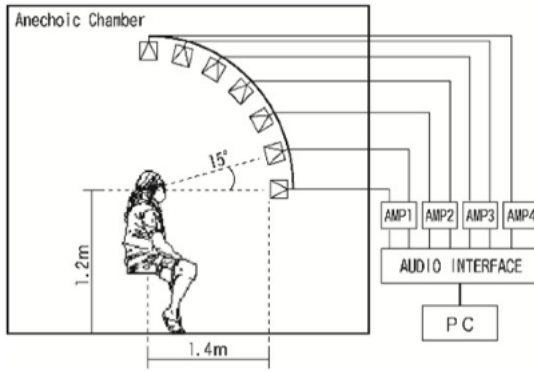


図1 実験システム

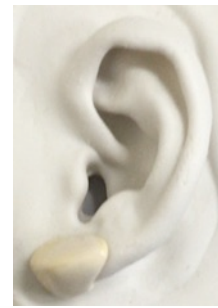


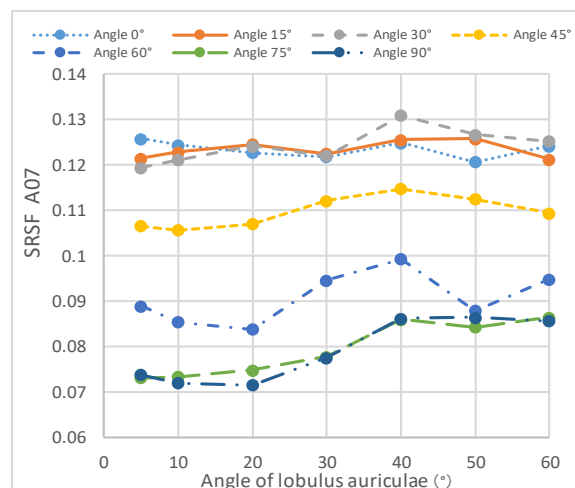
図2 耳介拡張アダプターの例

表1: アダプタの有無、頭部移動の有無と音像定位性能の実験結果

Subject No.	Experiment 1						Experiment 2				Group No.
	Without adaptor①		With adaptor②		Diff. (②-①)		RMS error③		Diff. (③-①)		
	RMS error	SD error	RMS error	SD error	RMS error	SD error	No movement	Movement	No movement	Movement	
S01	10.8	5.4	7.8	5.4	-3.0	0.0					G2
S02	16.9	6.8	15.7	5.4	-1.2	-1.3					G1
S03	16.0	2.8	16.9	4.7	0.9	1.9	8.6	5.6	-7.4	-10.4	G4
S04	12.1	3.4	13.7	4.1	1.6	0.8					G4
S05	9.0	5.0	13.6	4.5	4.5	-0.5					G3
S06	9.5	2.9	10.3	3.5	0.8	0.6	9.4	10.7	-0.1	1.2	G4
S07	8.7	3.1	12.9	4.3	4.2	1.2					G4
S08	16.5	5.2	19.6	4.5	3.1	-0.7					G3
S09	23.5	8.2	19.4	10.0	-4.1	1.8					G2
S10	21.0	4.3	15.4	4.8	-5.5	0.5	15.2	10.5	-5.7	-10.5	G2
S11	9.4	5.0	7.7	3.7	-1.7	-1.4					G1
S12	5.6	3.6	5.4	4.5	-0.1	0.9	5.9	5.2	0.3	-0.4	G2
S13	21.1	4.8	17.5	3.5	-3.6	-1.3					G1
S14	7.7	5.3	7.8	4.8	0.1	-0.5	11.9	6.0	4.2	-1.7	G3
S15	5.6	3.8	4.8	2.8	-0.8	-1.0	4.1	12.6	-1.5	7.0	G1
S16	13.2	5.7	10.8	5.0	-2.4	-0.7					G1

表1は、実験1におけるアダプタの有無によるRMS誤差とSD誤差、およびアダプタの有無によるRMS誤差とSD誤差の差である。グループ分類は、G1はRMS誤差とSD誤差が減少した5名の被験者であり、音像定位能力の向上を示している。G2、G3、G4は、表1の左欄が示すように、それぞれ、RMS誤差のみが減少した被験者4名、SD誤差のみが減少した被験者3名、両方が増加した被験者4名とした。アダプター装着によって定位性能のRMSエラーが改善した被験者は9名であったが、改善がみられなかった被験者は4名であった。このように、アダプターは音像定位能力に影響を与えたが、すべての被験者に対して効果があったわけではないことが確認された。

次に各グループから代表サンプル1~2名ずつ、計6名の被験者を選んだ。このサンプル被験者には、実験1で音像定位能力が低い人、高い人を含まれる。選択した被験者の耳介レプリカモデルを3Dスキャナーでデータ化した。その耳介データにルートラインを引き、ルートラインに垂直な線を引いた。その線を中心にして回転させた音源方向別の鏡面反射特徴量(SRSF)を算出した[4]。6名の被験者の耳介モデルを用いてA07部位のSRSFの結果が下図である。その中で特徴量の平均値の最大最適角度は約40°であったが、個人のそれは約30°であった。そこで、耳介の開店角度は35°を選択し次の聴感実験を実施した。



鏡面反射特徴量(SRSF)を用いて折り曲げ部を耳介の下側の根元線に当て、耳介部分を回転させた。回転角度は35°、耳小骨部を曲げることの効果を分析した。

またこの6人の耳介の折り曲げ部を耳介の下側の根元線に当て、耳介部分を回転させた。回転角度は35°。耳小骨部を曲げることの効果を分析した。

森川ら[2]は、頭部運動が水平・垂直方向の音像定位能力を向上させることを示したが、音像定位能力が低い人[3]に対する頭部運動の効果に関する研究は少ない。しかし、音像定位能力の低い人に対する頭部運動の効果に関する研究はほとんどない。(1)耳小骨の角度を変化させる、

(2)頭部を動かさない、動かす、という2つの条件で音像定位テスト(実験2)を行い、実験1の結果と比較した。被験者6名は、頭部を動かさない条件と、頭部を水平に動かした条件とを順に行った。実験2は実験1と同じである。

その結果、RMS誤差の平均値が高かった被験者では、耳介の角度変化と頭部の動きが重要な役割を果たしていた。実験1で使用したアダプターはRMS誤差を悪化させ、耳小骨の角度変化はRMS誤差を改善または同等にした。その結果、6人の被験者のRMSエラーの平均は約10ポイント以下にまで低下した。

結果として、受聴者の耳介に拡張アダプターを装着する、あるいは耳介の向きを回転させると正中面の音像の定位能力に改善が見られることがわかった。ただし全受聴者に対してこの方法が一般化できるか?またアダプタを装着したことによって、音響伝達系において生じている物理変化量と定位能力の検証を進める必要がある[5]。

【引用文献】

- [1] H. Takemoto, et al., “Mechanism for Generating Peaks and Notches of Head-related Transfer Functions in the Median Plane,” *Journal of Acoustical Society of America* 132(6), pp. 3832–3841 (2012).
- [2] 森川大輔他、“頭部回転運動を許した水平面音像定位実験中の被験者の頭部運動,” *IEICE transactions on information and systems D* J96-D, 3, pp. 636– 643 (2013).
- [3] 船橋他、耳介形状と正中面上の音像定位の個人差に関する研究, 電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report : 信学技報 110 (171), 43–46, 2010–08
- [4] 阿部 拓馬, 渡邊祐子, 柴田滝也、“音源方向に依存した3次元耳介形状の特徴量抽出と視覚化に関する研究”, 日本音響学会春季研究発表会、3–2–4, pp113–114, 2014
- [5] T. Shibata, Y. Watanabe, and A. Michishita, Analysis of Sound Localization on Median Plane by using Specular Reflection Shape Features. AES, Conference e-Brief in the International Conference on Spatial Reproduction – Aesthetics and Science(国際学会), 2018

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tatsuya Shibata, Yuko Watanabe, and Akito Michishita
2. 発表標題 Analysis of Sound Localization on Median Plane by using Specular Reflection Shape Features
3. 学会等名 AES International Conference on Spatial Reproduction (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊祐子
2. 発表標題 共在感の実現を目指した音場共有システムの開発
3. 学会等名 日本音響学会2019年春季研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Shibata, Yuko Watanabe, and Akito Michishita
2. 発表標題 Analysis of Sound Localization on Median Plane by using Specular Reflection Shape Features
3. 学会等名 AES, Conference e-Brief in the International Conference on Spatial Reproduction - Aesthetics and Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	伊勢 史郎 (ISE Shiro) (20211732)	東京電機大学・システムデザイン工学部・教授 (32657)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	柴田 滝也 (Shibata Tatsuya) (30349807)	東京電機大学・システムデザイン工学部・教授 (32657)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関