

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：50102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04069

研究課題名（和文）真に臨場感を有したVRサウンドを実現するための移動音における方向知覚の解明

研究課題名（英文）Research on directional perception in moving sound to achieve truly realistic VR sound

研究代表者

工藤 彰洋（Akihiro, Kudo）

苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・准教授

研究者番号：80455097

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高臨場感VRサウンドを実現するために、移動音の最適な移動角度と速度の法則を見いだし、本人以外の音響伝達特性を用いたことによる移動音の定位誤差を減らすことを目的としている。実験結果から、移動角度を 36.5° 以上とすることで移動の方向を知覚できることが明らかになった。また、音像定位実験では、移動角度を 60° に固定し、移動速度を $16^\circ/\text{s}$ から $32^\circ/\text{s}$ とすることで、移動音の音像定位が明確になることから、高臨場感VRサウンドが実現できることを結論づける。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、メタバース等と呼ばれる仮想空間の構築と実現が、様々な目的で、急速に進められている。この際に課題となるのは、仮想空間において、人間に適切な視覚と聴覚の情報を与えることである。もし、これが適切でない場合、ユーザーが仮想空間での視覚刺激と聴覚刺激を適切に活用できないことから、仮想空間での体験の価値が大幅に低下することが懸念される。一方、本研究では、仮想空間で移動音を実現する際に、ユーザーが移動音の位置を正しく知覚するための条件を提示している。このことから、本研究で示した移動角度と移動速度を用いることで、仮想空間で体感する聴覚的な事象がより明確になることが期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to find the optimal movement angle and movement speed of moving sound to achieve highly realistic VR sound, and to reduce localization errors of moving sound caused by acoustic transmission characteristics other than the person himself/herself. Experimental results showed that the direction of movement can be perceived when the movement angle is set to 36.5° or higher. In addition, the sound image localization experiment concludes that a constant movement angle of 60° and a movement speed of $16^\circ/\text{s}$ to $32^\circ/\text{s}$ will clarify the sound image localization of the moving sound, thus realizing a highly realistic VR sound.

研究分野：音響工学

キーワード：バーチャルサウンド 音像定位 移動音 移動速度 移動角度 頭部伝達関数 HRTF

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ヘッドホン再生で、あたかも空間中に音が存在しているように感じられるバーチャルサウンド再生技術は、遠隔地間であるにも関わらず、同じ空間で会話しているように感じさせる次世代の通信に必須の技術である。この技術の実用化を目指して、種々の研究が行なわれてきた（例えば、[1]-[2]）。バーチャルサウンドを万人が使えるようにするためには、人間が音の方向や距離を知覚するための音の定位の手がかりを明らかにする必要がある。そして、この手がかりを発見することが、この分野の学術研究の中心的な課題であった。

他方で、電子デバイスの技術の進展によって、ここ数年で、VR（バーチャルリアリティ）を気軽に体験できる、VRゴーグルが安価に販売されるようになった。すなわち、VRの進展に対するユーザーの期待が高まるなか、前述した、音の定位の手がかりを発見し、実装することが、これまで以上に重要になりつつある状況であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、移動音の最適な移動角度の探索により、移動角度と移動速度が聴覚に与える法則を見出し、他人の音響伝達特性による移動音の定位誤差を低減することで、高臨場感VRサウンドを実現することである。

3. 研究の方法

本研究では、移動角度と移動速度を決定するために、大きく分けて、2種類の音響心理実験を実施した。ひとつは、移動音における移動の向きを知覚しやすさを評価する音響心理実験（移動方向知覚実験）である。もうひとつは、移動音の音像定位を評価する音響心理実験（移動音像定位実験）である。いずれの実験においても、被験者から等距離の円運動による移動音を想定している。

（1）移動方向知覚実験

移動方向知覚実験では、移動開始角度 θ [°]を 0° （真正面）、 45° （右前）、 90° （真右）とし、移動速度 v [°/s]は被験者が移動に追従できることを考慮して、 $v = 8^\circ/s$ で一定とした。移動角度 $\Delta\theta$ は、研究代表者らの過去の研究結果にもとづいて[3]-[4]、 $\theta = 0^\circ$ 場合で $\Delta\theta = 0.2^\circ \sim 10^\circ$ とし、 $\theta = 45^\circ$ の場合で $\Delta\theta = 1^\circ \sim 50^\circ$ とし、 $\theta = 90^\circ$ の場合で $\Delta\theta = 5^\circ \sim 70^\circ$ とした。合計で9名の被験者が実験に参加した。この実験では、被験者に水平面上で移動するバーチャルサウンドがヘッドホンを介して提示される。被験者のタスクは、種々の移動角度の移動音に対して、移動の向きを時計回りか、反時計回りで回答することである。実験は、適応法と呼ばれる手法で進められ、被験者の回答が正解だった場合は、移動角度を減少させて試行を継続し、回答が不正解であった場合は、移動角度を増加させて試行を継続する。最終的に、閾値付近で試行を停止し、移動角度の閾値を決定する。

（2）移動音像定位実験

0° （真正面）から 90° （真右）までの音の方向を回答する方向定位実験と、 0° から 180° （真後ろ）までの音の前後方向を回答する前後定位実験に分けて実施した。移動速度 v [°/s]は、静止音 $0, 16, 32, 64, 128^\circ/s$ を採用し、移動方向知覚実験の結果にもとづいて、移動角度は 60° で一定とした。また、実験では、被験者本人の頭部伝達関数（HRTF）だけでなく、他人のHRTFも用いて実

験を行なった。合計で9名の被験者が実験に参加した（移動方向知覚実験の被験者と同一ではない）。方向定位実験における被験者のタスクは、ヘッドホンを通じて再生されたバーチャルサウンドの移動音が0°から90°のうちで、どの方位でなり終わったかを10°の間隔で回答することである。回答の結果から、所望の方位と知覚した方位の差（定位誤差）から、平均定位誤差を算出することで、移動音の定位を評価する。

一方、前後定位実験における被験者のタスクは、ヘッドホンを通じて再生されたバーチャルサウンドの移動音が前後のうち、どちらで鳴り終わったかを回答することである。回答の結果から、前後定位を誤った回数を求めることで、前後定位の誤り率を算出して、移動音の定位を評価する。

4. 研究成果

移動方向知覚実験の結果から、移動開始角度 $\theta = 0^\circ$ のときの移動角度の閾値は 3° で、 $\theta = 45^\circ$ での移動角度の閾値は 14° で、 $\theta = 90^\circ$ での移動角度の閾値は 36° となった。これらの結果から、移動角度を 36° 程度とすることで、移動音の移動の向きが知覚できることを明らかにした。

移動音像定位実験における方向定位実験の結果について分散分析を行なった。その結果、被験者本人と他人の HRTF の使用に関わらず、有意水準5%で有意差がみられた。この結果は、定位誤差が移動速度とともに変化することを支持しており、移動速度の上昇により、定位誤差が増加すると考えられる。結果から、本研究の条件下では、 $16^\circ/\text{s}$ での移動速度が、最も定位しやすい条件であることが明らかとなった。

次に、前後定位実験の結果について分散分析を行なった。その結果、移動音が鳴り終わった方位が側方付近（ 80° と 100° ）での結果では、被験者本人と他人のどちらの HRTF を用いた場合でも、有意水準 5%で有意差はみられなかった。この結果は、定位の前後誤り率が移動速度に依存しないことを支持している。そもそも、側方での最小弁別可能角度が大きいことが知られており、音像の前後の区別が難しいことが予想され、本人の HRTF であっても定位が正しく出来ていなかったことが推察される。一方、側方以外の方位では、被験者本人と他人のどちらの HRTF を用いた場合でも、有意水準 5%で有意差がみられたことから、結果は、定位の前後誤り率が移動速度に依存することを支持している。特に、他人の HRTF を用いた場合、移動速度が $16^\circ/\text{s} \sim 32^\circ/\text{s}$ において、定位の前後誤り率が減少し、それ以下と以上での移動速度では定位の前後誤り率が増加したことから、移動速度 - 定位の前後誤り率特性はV字型で変動することが明らかとなった。

本研究の成果として、リスナーから等距離で円運動する移動音では、移動角度を 36° 程度、移動速度 $16^\circ/\text{s}$ から $32^\circ/\text{s}$ 程度とすることで、移動音の定位が容易となることを結論づける。

<引用文献>

[1] M. Itoh, K. Iida, and M. Morimoto, "Individual differences in directional bands," *Applied Acoustics*, 68, 909-915 (2007).

[2] 武居周, 工藤彰洋, "並列有限要素法に基づく1億自由度超の波動音響解析," 日本シミュレーション学会論文誌, Vol. 12, No. 2, pp. 76-84, 2020.

【日本シミュレーション学会賞（論文賞）受賞】

[3] 工藤彰洋, 牧下涼亮, 武居周: 移動音の方向を知覚するために必要な移動角度の推定, 音講論集, 3-S3-19 (2020).

[4] 小竹一輝, 工藤彰洋, 武居周: 移動音の方向を知覚するために必要な移動角度の推定—恒常法による再検討—, 音講論集, 3-1P-8 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 瀧澤 哲、工藤 彰洋、武居 周	4. 巻 14
2. 論文標題 移動音の移動方向知覚に関する研究 - 適応法による検討 -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 71-77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11308/tjsst.14.71	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 工藤 彰洋、下川原 綾汰、武居 周	4. 巻 76
2. 論文標題 種々の移動速度における移動音停止方位の定位精度	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本音響学会誌	6. 最初と最後の頁 547 ~ 553
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20697/jasj.76.10_547	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 武居 周, 工藤 彰洋	4. 巻 12
2. 論文標題 並列有限要素法に基づく1億自由度超の波動音響解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本シミュレーション学会論文誌	6. 最初と最後の頁 76-84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11308/tjsst.12.76	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小竹一輝、工藤彰洋、武居周
2. 発表標題 移動音の方向を知覚するために必要な移動角度の推定
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 工藤彰洋、牧下涼亮、武居周
2. 発表標題 移動音の方向を知覚するために必要な移動角度の推定
3. 学会等名 日本音響学会2020年秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 工藤彰洋, 岩崎絢斗
2. 発表標題 頭部形状の左右の非対称性と仰角方向の定位精度との関係について
3. 学会等名 応用音響研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuya Shimizu, Akihiro Kudo, Amane Takei
2. 発表標題 Localization accuracy of moving sound with non-individualized HRTFs
3. 学会等名 The 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下川原綾汰, 工藤彰洋, 武居周
2. 発表標題 頭外音像定位試験の試行回数による定位精度の安定性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告応用音響
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下川原綾汰, 工藤彰洋, 武居周
2. 発表標題 ヘッドホンを用いたバーチャルサウンドにおける音像の移動速度が定位誤差と前後誤知覚率に与える影響に関する検討
3. 学会等名 2019年音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2019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	武居 周 (Amane Takei) (40598348)	宮崎大学・工学部・准教授 (17601)	

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
---------	---------