

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04145

研究課題名（和文）人と場の相互作用を考慮した知的感性活動を支える聴空間創出基盤技術の確立

研究課題名（英文）Development of a three-dimensional auditory virtual space synthesis method for supporting intellectual and affective activities based on the interaction between humans and the environment

研究代表者

坂本 修一（Sakamoto, Shuichi）

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：60332524

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、聴覚による「場」の理解に基づき、「場」を共有する人間も考慮して知的感性活動を支え高める「場」を設計・創出することである。研究期間をとおして、「場」となる音空間の広範囲、高精度収録・再生技術の高度化、多感覚情報存在下における「場」の感性評価メカニズムの解明、「場」に存在する他者の音声やノイズによる標的音の聴こえの検証など、重要な要素技術の開発を進め、知的感性活動を支える「場」を物理的に実現し、知覚的に評価するための、基盤技術を開発することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間がバーチャル環境で協働、協奏して知的感性活動を行うような機会は増えており、本研究の成果は、そのような環境をより人間に適した形で構築するための基盤となるものである。したがって、単にアミューズメントなどのエンターテインメントの分野だけでなく、遠隔教育などの分野にも波及が期待される。また、研究を通して明らかとなった人間の知覚感性メカニズムは、工学のほか、心理学、情報学などに対しても寄与が見込める学際的な成果と考えている。

研究成果の概要（英文）：The objective of this project is to synthesize a three-dimensional environment to support human intellectual and affective activities. In this project, we focused on the effectiveness of auditory information because humans perceive the impressions and atmospheres of various environments through auditory cues. Additionally, it is important to consider the humans themselves who share the environment. Therefore, we aimed to reproduce an appropriate auditory space for these activities, taking into account the interaction between humans and the environments. Throughout the research period, we successfully developed several fundamental technologies for auditory space synthesis, including high-precision auditory space recording and reproduction techniques using distributed spherical microphone arrays, near-field head-related transfer function synthesis methods, and the perceptual mechanisms of affective multi-modal environments that incorporate audio-visual and vibration information.

研究分野：聴覚・多感覚情報システム

キーワード：バーチャルリアリティ 聴空間センシング 3次元音空間再生 臨場感通信 遠隔協働

1 研究開始当初の背景

人間が集い様々な活動を高い次元で行う際には、それを支える「場」の存在が重要となり、人間は意識的、無意識的にかかわらずこの「場」から多くの情報を得て活用している。人間が得る情報の中で、不可避的に常時 4π 空間全てのアンビエントな情報をも含む聴覚情報の役割は極めて大きい。特に雰囲気や印象を知覚するという点では、聴覚情報はこのような「場」を考える上での本質的な感覚情報である。したがって、「場」の知覚、創成において聴覚情報は重要となる。

聴覚情報による「場」の知覚に関しては、複数の音から所望の音を選択的に聴取するカクテルパーティー効果に代表されるように、同時並列的に入力される聴覚情報の知覚的なグルーピングとして理解されてきた。一方で、他者や自分自身が発出する音声も「場」を構成する要素として機能し、それによって自分自身の所作も変化することを考えると、「場」を考える上では、「場」とそこに集う人間が密結合した状態を仮定し、人間の振る舞いをも考慮することが重要となる。

しかしこれまでの研究は、単に物理的に正確な音空間の再現に終始し、そこに集う人間と「場」との相互作用は未考慮であった。したがって、様々な知的感性活動がバーチャル環境でも行われる現代においては、この人間の知的感性活動を支える「場」を、その「場」を共有する人間がどう捉えるかを聴覚的に理解し、その知見に基づいた「場」の創出理論の確立が重要であった。

2 研究の目的

このような背景に基づき我々は「聴覚情報」に着目しつつ、知的感性活動を支える「場」の知覚・認識メカニズムの理解とそれに基づいた創出法の提案を目指す。この目標に向け本研究では、聴空間としての「場」を構成する音響特徴量が、「場」そのもの、および、そこに集う他者の感性にどのような影響を及ぼすかを明らかにしたうえで、そこに集う人間も含めて「場」を聴覚的に理解、体系化し、人間の「場」の本質をつかむ能力に適した形で「場」を創出するための基盤技術を確立することを目的とした。

3 研究の方法

先にも述べたように本研究の目的は、聴覚による「場」の理解に基づき、「場」を共有する人間も考慮した、知的感性活動を支え高める「場」の設計・創出である。そこで、以下の3つのサブテーマを掲げて研究を実施した。

【聴空間としての「場」のセンシング技術、および、高精度・高感性提示手法の開発】
聴空間を操作する基盤となる技術として、実在する聴空間としての「場」を正確に取得・分析し、高精度に再現する方法を確立する。

【「場」に集う他者の認識を含めた「場」の知覚・認識モデルの構築】
人間の持つ「場」の理解・認識メカニズムを解明する。その際には、「場」に存在する他者とのコミュニケーションの様相や知覚の変容なども対象に、「場」の理解について多面的に明らかにしていく。

【「場」の知覚・認識モデルに基づく人間に適した形での「場」の設計技術の確立】
人間が「場」を評価、認識する際の適切な指標を検討し、その指標につながる聴覚情報の物理的な特性を明らかにしていく。特に「場」から想起される感性的な印象も対象として、様々な側面から人間の「場」の理解について明らかにし、設計指針へつなげていく。

4 研究成果

(1) 聴空間としての「場」のセンシング技術、および、高精度・高感性提示手法の開発

本研究の基盤となる人間が「場」を聴覚的に知覚、認識するメカニズムを明らかにするためには、音空間情報をいかに高精度にユーザに提示できるかが成功の鍵となる。本研究グループではこれまで球状マイクロホンアレイを用いた3次元音空間收音技術を開発してきた。そこで本項目では、この技術を基盤として、提示音空間の知覚的高精度化、收音領域の広領域化、および、近距離音オブジェクトの高精度化に関する研究を進めた。

提示音空間の知覚的高精度化に関しては、球状マイクロホンアレイのハードウェア性能に起因する再現上限周波数以上の周波数での音空間の再現法を検討した。これまでの方法では、球状マイクロホンアレイに設置されたマイクロホンの配置、個数に、高精度で再現できる音空間の上限周波数が依存し、上限周波数以上の周波数帯域では再現精度が低下していた。しかし、人間の音空間知覚の手がかりは周波数によって異なり、高周波数領域では両耳に入力される信号のレベル差の寄与が大きい、言い換えれば、位相情報の重要度は相対的には低くなる。このことは、条件によっては、全ての情報を物理的に厳密に再現しなくても、知覚的には高い精度で音空間の再現が可能であることを意味する。この考えを活用し、高周波数領域では限られたマイクロホンのリソースを振幅情報の再現に注力する新しいアルゴリズムの開発を行った。さらに、頭部伝達関数の細かいピークやディップではなく全方向における大局的な傾向を再現するための方法も検討した。これらを組み合わせることで、ハードウェアの性能限界以上の領域での再現音空間の知覚的高精度化が見込めることが示された。

收音領域の広領域化では、複数の球状マイクロホンアレイを組み合わせた方法を検討した。これまでの方法では、音空間情報を再現したい点に実際に球状マイクロホンアレイを設置する必要があったため、実際にその場にマイクロホンアレイをおける場面は限定的であるといった問題があった。そこで、仮想球に基づく音空間再現技術 ADVISE^[1,2]を基盤とし、複数のアレイを取得したい点の周囲に配置して、それらのアレイで収録された音から聴取者周囲の仮想球面での音情報を求め、高次アンビソニックスの技術を用いて仮想球内の音空間情報を求める方法を開発した^[3]。図1に提案法で再現された音場を示す。図からもわかるように、球状マイクロホンアレイをターゲットとなる領域の周囲に配置することで、アレイが設置されていない点でも音空間情報を精度高く再現できている。これにより、取得したい点にアレイを実際に設置しなくても音情報の再現が可能となった。

「場」に集う他者をよりリアルに再現するという観点で重要な近距離音オブジェクトの高精度化に関しては、聴取者近傍の聴空間高精度提示に重要な近距離頭部伝達関数の合成技術の開発を進めた。近距離頭部伝達関数は実際に測定することは難しいため、遠距離頭部伝達関数から合成するための方法が各種提案されている。ここで、遠距離頭部伝達関数は音源から到来する波面が平面波であることを想定するのに対し、音源が聴取者の近くに存在する場合、音源から聴取者に到来する波面を平面波として近似する事が出来なくなる。しかしこれまでの方法では、平面波としての振る舞いに基づいた形で近距離頭部伝達関数の合成法が提案されているため、合成された頭部伝達関数の精度が十分ではなかった。そこで本研究では、球面波としての波面の振る舞いを考慮した形での近距離頭部伝達関数の合成法を開発し、これまでより高精度に遠距離頭部伝達関数から近距離頭部伝達関数を合成できることを示した^[4]。

(2) 「場」に集う他者の認識を含めた「場」の知覚・認識モデルの構築

複数人が「場」を共有し、それぞれがコミュニケーションをとっている状況では、対象となる他者の声が、対象外の他者の声によってマスクされて聞こえづらくなる状況が存在する。このような状況をバーチャルで再現する場合、再現される「場」の精度によって他者の認識が困難になり、リアリティが損なわれる可能性がある。そこで、空間上の様々な位置に配置された対象となる他者から発せられる音声について、方向性マスク解除がどの程度空間的に作用するかについてを、音韻修復の現象を用いて、実験的に明らかにした。実験では断続的な音声を発生させるスピーカと、ノイズを提示するスピーカの位置をパラメトリックに変化させ、両者の角度が音韻修復に及ぼす影響を求めた^[5]。得られた知見は空間上に他者が存在する状態において、両者を空間的に区別して理解する際の基礎的な知見となっている。

(3) 「場」の知覚・認識モデルに基づく人間に適した形での「場」の設計技術の確立

「場」の理解という観点で、多感覚情報環境下での「場」の感性的理解について研究を進めた。特に、聴覚情報だけでなく、視覚情報や全身振動情報が存在するような環境での「場」の感性評価、具体的には、臨場感、迫真性の知覚について分析した。実験では、様々な「場」を多感覚情報を駆使して提示し、そのときの各感覚情報、特に聴覚情報と全身振動情報との関係について検討した。その結果、臨場感、迫真性に寄与する全身振動情報の振動レベルは、同時に提示される聴覚情報が有する物理パラメータによってある程度説明できることが明らかとなった^[6,7]。

さらに、「場」の評価、記述に関して、既存で提案されている音空間評価指標、特に音声伝達性能評価指標を、聴取点における音の到来方向パターンを考慮する形で拡張し、より詳細な分析が可能な指標として提案した^[8]。この指標を用いることで、空間的に拡がりを持つ「場」における他者をどの程度の精度で再現すれば良いかの一端を評価できるものと考えている。

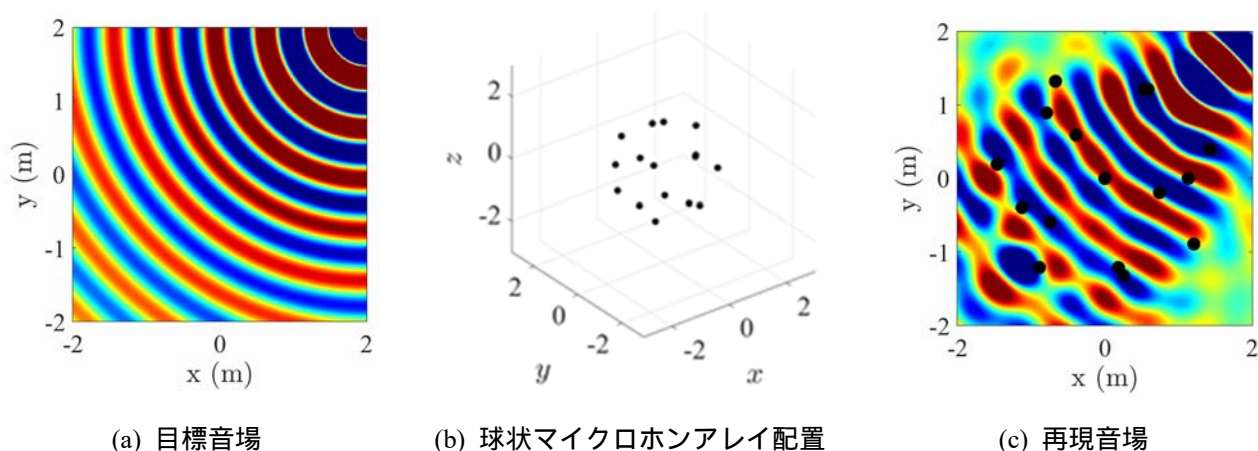


図1：提案法で再現された音場。ここでは、500 Hz 正弦波を出力する点音源が(2 m, 2 m, 0 m)に位置する音場を目標音場(a)とし、16個の球状マイクロホンアレイを周囲に配置(b)した際の状態で再現された音場(c)を示している。

<引用文献>

- [1] S. Takane, Y. Suzuki, T. Miyajima, T. Sone (2003): A new theory for high definition virtual acoustic display named ADVISE, *Acoustical Science and Technology*, 24 (5), 276–283.
- [2] J. Trevino, S. Sakamoto, Y. Suzuki (2020): Revisiting the theory of auditory displays based on the virtual sphere model, *Acoustical Science and Technology*, 41(1), 276-281.
- [3] 片田晃輔, 坂本修一 (2020): 仮想球モデルに基づく分散マイクロホンアレイを用いた音場収音法に関する一検討, *電子情報通信学会技術研究報告*, EA2020-23, 9-14.
- [4] A. Urviola, S. Sakamoto, C. D. Salvador (2022): Ear centering for accurate synthesis of near-field head-related transfer functions, *Applied Sciences*, 12(16), 8290 (13 page manuscript)
- [5] 及川隼平, 坂本修一 (2021 春): 音韻修復における音声と雑音の角度依存性, *日本音響学会講演論文集*, 1-4-4, 601-602. (日本音響学会学生優秀発表賞受賞)
- [6] S. Abe, S. Sakamoto, Z. Cui, Y. Suzuki (2022): Determination of optimal levels of whole-body vibration using audio-visual information of multimodal content, *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, 13(4), 226-238.
- [7] 阿部翔太, 山高正烈, 坂本修一, 鈴木陽一 (2023 春): 映像音響コンテンツの特徴量から合成した全身振動情報が臨場感と迫真性に与える影響, *日本音響学会講演論文集*, 3-4P-13, 549-550.
- [8] A. Campos, S. Sakamoto, C. D. Salvador (2021): Directional early-to-late energy ratios to quantify intelligibility: A case study in a large auditorium, *Proc. International Conference on Immersive and 3D Audio* (9 page manuscript)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 阿部翔太, 坂本修一, 山高正烈, 鈴木陽一, 行場次朗	4. 巻 EMM2021-89
2. 論文標題 多感覚コンテンツにおける最適振動レベルに影響を及ぼす映像および音響特徴量の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 31 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 守部颯一郎, 坂本修一	4. 巻 HIP2021-56
2. 論文標題 頭部運動が相対回転移動音の位置知覚に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 43 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 富松智志, 坂本修一, 川瀬哲明, CHAIT Maria	4. 巻 SP2021-37
2. 論文標題 聴覚的注意の空間特性の方向依存性に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 66 ~ 70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 武元航, 坂本修一	4. 巻 EA2021-26
2. 論文標題 空間関数表現に基づくバイノーラル収音再生法の実現モデルの違いが音空間再現精度に与える影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 33 ~ 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Urviola Ayrton, Sakamoto Shuichi, Salvador Cesar D.	4. 巻 12
2. 論文標題 Ear Centering for Accurate Synthesis of Near-Field Head-Related Transfer Functions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 8290 ~ 8290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app12168290	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 該当する

1. 著者名 Abe Shota, Sakamoto Shuichi, Cui Zhengile, Suzuki Yo-iti	4. 巻 13
2. 論文標題 Determination of Optimal Levels of Whole-body Vibration Using Audio-visual Information of Multimodal Content	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing	6. 最初と最後の頁 226 ~ 238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Honda Akio, Maeda Kei, Sakamoto Shuichi, Suzuki Yo-iti	4. 巻 12
2. 論文標題 Effects of Visually Induced Self-Motion on Sound Localization Accuracy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 173 ~ 173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app12010173	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 Urviola Ayrton, Sakamoto Shuichi, Salvador Cesar D.	4. 巻 -
2. 論文標題 Ear Centering for Near-Distance Head-Related Transfer Functions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. International Conference on Immersive and 3D Audio	6. 最初と最後の頁 8 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/I3DA48870.2021.9610891	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Campos Alexis, Sakamoto Shuichi, Salvador Cesar D.	4. 巻 -
2. 論文標題 Directional Early-to-Late Energy Ratios to Quantify Clarity: A Case Study in a Large Auditorium	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. International Conference on Immersive and 3D Audio	6. 最初と最後の頁 8 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/I3DA48870.2021.9610935	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 片田晃輔, 坂本修一	4. 巻 EA2020-23
2. 論文標題 仮想球モデルに基づく分散マイクロホンアレイを用いた音場収音再生法に関する一検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 9~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 阿部翔太, 坂本修一, 山高正烈, 鈴木陽一, 行場次朗
2. 発表標題 多感覚コンテンツにおける音響特徴量を用いた全身振動最適レベル決定法の検討
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 守部颯一郎, 坂本修一
2. 発表標題 頭部運動が相対回転移動する音像の位置知覚に与える影響
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富松智志, 坂本修一, 川瀬哲明
2. 発表標題 聴覚的注意の全方位における空間特性の検討
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部翔太, 坂本修一, 山高正烈, 鈴木陽一, 行場次朗
2. 発表標題 多感覚コンテンツに付加する全身振動情報の最適振動レベル決定法に関する検討
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会第26回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片田晃輔, 坂本修一
2. 発表標題 分散マイクロホンアレイのアレイ配置を考慮した仮想球モデル型広領域音場収録法の検討
3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 及川隼平, 坂本修一
2. 発表標題 音韻修復における音声と雑音の角度依存性
3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富樫凌, 坂本修一, Salvador Cesar, Trevino Jorge, 鈴木 陽一
2. 発表標題 空間方向の平滑化頭部伝達関数がSENZ I 音空間再現精度に及ぼす影響
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020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	寺本 渉 (Teramoto Wataru) (30509089)	熊本大学・大学院人文社会科学部(文)・教授 (17401)	
研究分担者	大谷 真 (Otani Makoto) (40433198)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	

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		
ペルー	Perception Research		
英国	UCL		