

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03764

研究課題名(和文) 高臨場感音場再生システムの性能向上および福祉工学との連携に関する研究

研究課題名(英文) Improvement of the performance of sound field reproduction system and the cooperation with welfare engineering

研究代表者

尾本章(Omoto, Akira)

九州大学・芸術工学研究院・教授

研究者番号：00233619

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,290,000円

研究成果の概要(和文)：音響学の分野において、音が存在する場である音場の特徴を別の場所で精密に再生する技術は「音場再生」あるいは「音場再現」と呼ばれている。この再生技術は、何らかの物理的な原理に基づき、工学的な手法を用いて実現する手法と、芸術的な観点で所望の表現を目指すものに大別できる。本研究課題は比較的簡易な工学的な手法の開発と芸術的に優れた表現力の融合を試みながら、高性能かつ自由度の高いシステムの構築を目指すものである。また、技術的な側面のみではなく、構築したシステムを人の福祉に活用することも目標とし、一例としてコンサートホール親子室への響きの導入など、社会的に意義のある活用手法を模索することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

音場再生システムの総合的な性能を決める要因として、A)何らかの物理的な原理に基づいており、B)聴取者の存在や移動などの外乱に強く、C)残響付加などの演出導入が可能で、D)映像情報との親和性が高い、という4条件を設定した。これらの達成に向けて、実績のある技術や簡易的な手法まで、様々なものを試み、比較試聴を継続的に行なった。

結果として、物理的指標の再現性能では実績のある手法が有利であるが、他の要因に対しては鋭指向性マイクを用いた簡易的な手法が優位であることが明らかになった。また社会的な意義を高めるためのアウトリーチ的な活動を行う際には、可搬性まで考慮した頑健なシステムでの再生が特に有利である。

研究成果の概要(英文)：In the field of acoustics, the technique of precisely reproducing the characteristics of a sound field, which is the place where sound exists, at another location is called "sound field reproduction" or "sound field regeneration". This reproduction technology can be broadly classified into two types: one is based on some physical principle and realized using engineering methods, and the other aims at desired expression from an artistic point of view. This project aims to construct a system with high performance and a high degree of freedom while attempting to combine the development of relatively simple engineering methods with artistic expressiveness. We also aimed to utilize the constructed system for human welfare and sought a socially meaningful method of utilization. One example is the introduction of a reverberant environment into the parent-child room of a concert hall.

研究分野：応用音響工学

キーワード：音場再生 音響福祉工学 芸術社会学

## 1. 研究開始当初の背景

音響学の分野において、音が存在する場である「音場」の特徴を別の場所で精密に再生する技術は「音場再生」あるいは「音場再現」と呼ばれている。歴史は比較的早く、特に物理的な原理に基づいた正しい手法がいくつか提案されており、その再生精度の検証も詳細に行われている。中でも波動方程式のように音場の基礎式に基づく手法では、原理的に非常に多くのマイク・スピーカを必要とするため、その実現には自ずと限界がある。さらに限定的な空間で精度良く再現が行われるものの、音を聴く人の存在やその移動などの外乱には脆弱であり、幅広く実用的とはいえないと考えられてきた。

最近では、アンビソニックスと称される、球面調和関数展開に基づく収録・再生手法が実用に近づき、ヘッドホン受聴を含む再生までのワークフローも確立しつつある。しかし、高品質なマイクロホンアレイの稀有さに伴う表現能力の限界や、スピーカ再生を行った場合の再生領域の小ささなど、原理的な限界も大きい。このように、音場の再生は、あくまで実験的、あるいは限定的な場所で限定的な目的で用いることが多く、広く一般に浸透している状況ではなかった。

音場再生を学術的に検討する関係学会の場においては、実際的な応用よりも、信号処理の効率化や数値的な性能など、性能向上のためだけの検討（研究のための研究）が優先されることも多い。言うまでもなく、システムが社会生活においてどのように役に立つのかまで踏み込んだ複合的研究を発表する機会は極めて少ない。音場再生のような技術は、人の役に立つ方法を並行して考えることで、その総合的な性能が相乗効果的に向上すると考えているが、これが実現されているとは言えない状況である。

このような現状に対して、研究代表者は**工学的な手法の開発と芸術的な表現力の融合**を試みながら、高性能かつ自由度の高いシステムの構築を継続的に試み、騒音環境を含む各種音環境の再現や、架空の音環境の再現などを通じた芸術表現のサポートなど、幅広い活用方法を模索してきた。本研究においては、システムのさらなる性能向上を図るとともに、社会における意義を勘案しながら、真に役に立つ道具へと成長させたいと考え、研究計画を立案した。

## 2. 研究の目的

さまざまな音環境を再現・模擬できる音場再生システムの総合的な性能を向上させ、さらなる有効性を具現化することで、人間の QOL 向上へ寄与する道具へと昇華させることを大きな目的とした。二つに大別できる目的であり、それぞれの内容は以下の通りである。

- ・ **システムの総合的な性能の向上**：この課題に関しては、これまでにシステムが満たすべき要件として、A) 何らかの物理的原理に基づき、B) 外乱に対して頑健で、C) 付加的な演出を受け入れる自由度を有し、D) 映像情報との親和性が高い という四つの条件を設定し、種々の検討を行ってきた。本研究では、特に A) と C) に関して、解析的・実験的な検討を行うことで、更なる性能向上を目指すことを目的とした。なお、A) に関して、申請時には想定していなかった内容であるが、研究代表者の研究室において新しい音場解析手法の有効性と、それに伴って任意配置のマイクアレイによる音場情報収集の可能性が明らかになってきており、この内容についても積極的に取り入れて研究内容を構築した。

- ・ **有効性の具現化と QOL 向上に向けた応用**：大学院の授業や学外企業との連携などを通して、システムの実践的な適用の可能性を多くの人々の知見で積極的に探り、利用場を増やすことを試みた。実用化に向けて問題点を抽出し、改良を行うことも目的としている。

### 3. 研究の方法

上記の目的は、以下の二つのデザイン課題へと換言できる。

- ・ **工学的なデザイン課題**： これまでに設定してきた性能担保の条件のうち、特に A)と C)に関して検討を行う。本研究課題では、再生対象音場の規模感の表現を通じた正確な再現、より効果的な信号処理手法の検討などを具体的な課題と設定し、解析的ならびに実験的な手法で検討を行うこととした。ここではコンサートホールや車室内など、多くの音場を再生対象と捉えて、測定、再生を行い、その特徴の再現の度合いを検討対象とした。

これらの課題解決に向けては、研究代表者が主として大学院生、技術職員と共同で取り組んだ。ハードウェア的な取り組みとして、大型のものから小型で可搬性の高い再生システムの構築、マイクアレイの大型化等を行って検討を実施した。また信号処理などソフト的な取り組みとして、低周波数における相関低減フィルタの導入などを実施した。

あわせて、既存のマイクロホンアレイに代わって音場の情報を収集できる新しい解析的な手法の開発にも積極的に取り組んだ。再生核と呼ばれる、離散的なマイク配置間の情報を補間するために必要な関数を用いた手法であり、将来的な応用が期待できる内容である。

- ・ **社会的なデザイン課題**： 音場再生システムというリソースで実現できる音環境や臨場感が、人の福祉という観点で何が出来るのか検討を行う。システムを道具として有効に利用する方法を検討することで、**拡張的な福祉工学**の考え方を確立したいと考えている。このため芸術社会学の専門家である研究分担者との協同で実践的な検討を行った。

社会的なデザイン課題に関しては、研究分担者を中心に取り組む計画とした。具体的には大学院の授業をプラットフォームとして、音場再生システムの技術を紹介しつつ、その適用方法を学生とともに探りながら、障害者によるアート活動の支援、聴覚障害者にとって有効なコンサートについての実践的考察などを行うこととした。

### 4. 研究成果

- ・ **工学的なデザイン課題に関して**： 主な成果として、以下の項目が挙げられる。

- **可搬型再生システム (スピーカアレイ) 構築**： これまでと比較して小型で、持ち運びが比較的容易にできる 24 チャンネル再生システムを構築し、その基本的性能を検証した。また、このシステムを実際にコンサートホール親子室に持ち込み、簡易的に響きの再生を行う実験を実施し、ホール関係者などから意見聴取することができた。【→】



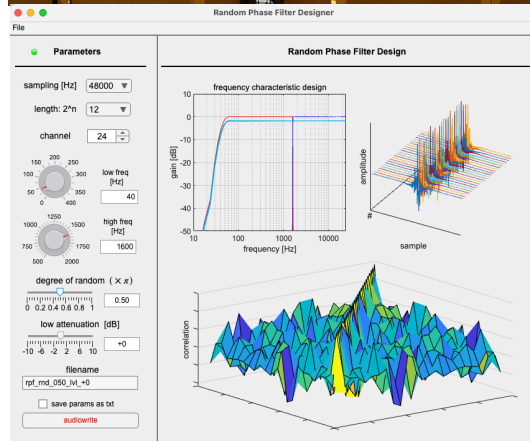
- ▶ 大規模システム（スピーカアレイ）構築：九州大学の録音スタジオ内に、21 チャンネルのスピーカを設置し、コンサートホール等で収録したインパルス応答による方向別のリバーブ（空間リバーブと称する）を常設的に体験できるシステムを構築した。基本的性能を検証するとともに、学会研究会をはじめ、オープンキャンパスなどにおける多くのデモンストレーションを通して我々の音場再現手法を体験して頂くことができた。【↑】



- ▶ 大型マイクアレイ構築：我々のシステムにおいては、24本の鋭指向性マイクを用いて方向情報を収集するが、低周波数域においてはその指向性が十分とはいえず、同位相の音が収録されてしまう短所がある。そこで、ハードウェア的対応策として、マイクアレイの規模を大きくすることを試み、ホールでの収録実験において導入を試みた。【→】



- ▶ 相関低減フィルタの開発と実装：上記と同様な効果をソフトウェア的に得るために、低域の位相のみをランダム化するフィルタを作成した。FIR フィルタとして具体化し、実際の再生において実装することを試みて、再生音場において両耳間相互相関係数を段階的に可変できる効果を確認した。フィルタ作成を容易にするために MATLAB 上のアプリとして学会研究会などで広く公開した。【→】



- ▶ 再生手法の確立：特に残響の長いコンサート

ホールなどを対象とした再現についての再生手法を提案した。具体的には次のような4段階の手順による。(1) あらかじめ測定した方向別のインパルス応答から直接音成分を除去し、空間リバーブとして24チャンネルのスピーカ出力に割り当てる。(2) この成分は、例えばDAWのサンプリングリバーブのプラグインを通して再生する。(3) 音源信号はできるだけドライなものを準備し、これを別途配置したステレオ配置のスピーカから再生する。(4) 同時にリバーブ成分を再生し、再生音場内でミキシングする。

この再生手法において、直接音成分と空間リバーブによる残響音のエネルギー比について検討したところ、再生対象の原音場における割合よりも、直接音を若干強めに設定した方が高い評価が得られることが明らかになっている。システムの高い性能を担保する条件のうちC)の付加的な演出に分類できるが、より明確な音像を伴った再生が好まれることが明らかになった。この手法を用いれば、例えばステレオにミキシングされた信号のみを伝送することで、広い音場の残響をシミュレートすることも可能になる。

どの程度正確に再現できるかについて、音響物理指標の測定によって確認を行ったが、残響時間や明瞭度などに関して、完全に丁度可知差異以下とはいかないものの、実用に耐えうる質での再現を実現できることが明らかになっている。

- ▶ 新しい音場情報収集手法の提案：音場において音圧などの物理的情報を離散的に配置したセンサーで収集し、この間を補間することで詳細な場の情報を精密に推定する手法の開発を研究室で続けている。本課題の申請時には想定していなかった内容であるが、将来的に音場再生への適用の可能性を見越して、研究の一部と捉えて継続的に検討を行なっている。主として理論的な検討と数値シミュレーションを行い、成果を別添リストで示した論文などで公表している。

・ **社会的なデザイン課題に関して：** 主な成果として、以下の項目が挙げられる。

- ▶ 民間企業・公共文化施設との協働：2021年度には、民間企業および近隣文化施設との共同事業として、遠隔地とのパフォーマンス共演のデモンストレーションを行った。この中で、必要最低限の音情報を伝送し、これに響きを付加して最低限の響きを担保するという手法を試みたが、ここに本課題で取り組んだ音場再生技術を適用した。
- ▶ 大学院の授業における取り組み：2022年度には、九州大学芸術工学府において開設のプロジェクト系科目において「聴覚障害のある人にとってのコンサートのあり方を考える」と題した課題に取り組んだ。本課題において確立した音場再生手法を参考にしつつ、音楽や音の伝え方に様々な工夫を施すことを試みた。成果発表として、イベントも開催し、その運営について一部の助成も行った。

2023年度にも継続的に同様の課題に取り組んだ。いずれにおいても、音場再生システムを体験してもらいながら、健聴者と聴覚に障害がある人での感じ方の違いやそのギャップを埋めるための方策を模索するために、システムを活用した。

上記二つの成果については、九州大学社会包摂デザイン・イニシアティブとの協働で開催し、以下において詳細を公開している。

[https://www.didi.design.kyushu-u.ac.jp/project\\_field/sal/](https://www.didi.design.kyushu-u.ac.jp/project_field/sal/)

- ▶ コンサートホール親子室への導入の試み：2023年度に、コンサートホールにおける音響測定を行った。上述の工学的デザイン課題に対応して新しいマイクアレイでインパルス応答を測定する機会を利用し、可搬型再生システムを、客席後方に設置されている親子室に持ち込み、簡易的な音場再生を試みた。【→】

通常、親子室は子供や何らかの事情でホール客席に入りにくい人のために準備される小空間であり、音響的には劣悪な環境であることが多い。ここに我々のシステムを持ち込み、隣接するホールの響きのエッセンスを再現する試みである。十分な時間をかけた実験が行えた訳ではないが、ホールの運営担当者にも試聴してもらい、ポジティブな反応を得ることができた。



本研究課題の内容、「工学的な性能を上げつつ、社会的な意義を高める」をさらに充実すべく、継続的な課題を申請し、採択された。

音場再生システムの総合的な性能向上および人の福祉への適用に関する研究：24K03222

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ryoko Hara, Takahiro Iwami, and Akira Omoto	4. 巻 43
2. 論文標題 Subjective evaluation of auralization using a directional sound source that simulates a trumpet	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 166-169
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1250/ast.43.166	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 Iwami Takahiro, Sawai Ken-ichi, Omoto Akira	4. 巻 153
2. 論文標題 Direction-of-arrival estimation in half-space from single sample array snapshot	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 3025-3035
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/10.0019550	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 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 3件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 岩見貴弘, 尾本章
2. 発表標題 2 時刻のマイクアレイ信号に基づくビームフォーミング
3. 学会等名 音響学会2022年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤真木, 岩見貴弘, 尾本章
2. 発表標題 一般的なスピーカを用いた全指向性音源構成の試み
3. 学会等名 音響学会2022年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤真木, 岩見貴弘, 尾本章
2. 発表標題 一般的なスピーカを用いた任意の指向性音源構成の試み -全指向性音源に関する検討-
3. 学会等名 音響学会2023年秋季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原 量子, 岩見 貴弘, 尾本 章
2. 発表標題 一般的なスピーカを用いた楽器の指向性模擬の試み - 複数の楽器を対象とした聴感印象の評価 -
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 尾本 章
2. 発表標題 音場の創造的再現のための録音・再生手法
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上 尚久, 岩見 貴弘, 尾本 章
2. 発表標題 周波数領域の再生核を用いた音場表現に基づくヘルムホルツ方程式の数値解法 その1 弱形式方程式の解法
3. 学会等名 日本音響学会2023年秋季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井上 尚久, 岩見 貴弘, 尾本 章
2. 発表標題 周波数領域の再生核を用いた音場表現に基づくヘルムホルツ方程式の数値解法 その2 境界積分方程式の解法
3. 学会等名 日本音響学会2023年秋季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩見 貴弘, 尾本 章
2. 発表標題 帯域制限空間の視点から見た周波数領域音場
3. 学会等名 日本音響学会2023年秋季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩見 貴弘, 尾本 章
2. 発表標題 周波数領域における一般指向性マイクのモデル化
3. 学会等名 日本音響学会2023年秋季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤 真木, 岩見 貴弘, 尾本 章
2. 発表標題 マイク指向性推定の一検討
3. 学会等名 日本音響学会2023年秋季研究発表会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Norika Miyahara, Akira Omoto
2. 発表標題 Application of sound field reproduction system to acoustic welfare engineering - Real time sound field transmission system for parent and child room in a concert hall -
3. 学会等名 Internoise2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahiro Iwami, Akira Omoto
2. 発表標題 Signal processing applications for sound field measurements using instantaneous array input
3. 学会等名 Internoise2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Maki Kato, Takahiro Iwami, Akira Omoto
2. 発表標題 A study on constructing arbitrary directivity of sound sources by fitting the spherical harmonics coefficients
3. 学会等名 Internoise2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾本章
2. 発表標題 方向別インパルス応答を用いた音場再現の試み
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩見 貴弘, 井上 尚久, 尾本 章
2. 発表標題 周波数領域の再生核を用いた音場表現に基づくビームフォーミングの設計
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 井上 尚久, 岩見 貴弘, 尾本 章
2. 発表標題 周波数領域の再生核を用いた音場表現に基づくキルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式の数値解法
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 長津結一郎・鈴木玲雄
2. 発表標題 きこえないあそび。きこえないムジカ。
3. 学会等名 報告会[Art for Well-being 表現とケアとテクノロジーのこれから] (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長津結一郎・鈴木玲雄
2. 発表標題 事例報告「きこえないあそび。きこえないムジカ。」
3. 学会等名 福祉をかえる「アート化」セミナー2024 アートはもうひとつの橋 (招待講演)
4. 発表年 2024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	長津 結一郎  (Nagatsu Yuichiro)  (00709751)	九州大学・芸術工学研究院・准教授   (17102)	

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