

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02857

研究課題名(和文) 包括的な音場可聴化システムの構築

研究課題名(英文) Development of comprehensive acoustic field auralization system

研究代表者

大谷 真 (Otani, Makoto)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40433198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,100,000円

研究成果の概要(和文)：音声や音楽などの音を介したコミュニケーションは、生活を営む上で重要な情報伝達手段の1つであり、適切に音を伝えることが可能な音環境を構築することが重要である。そのためには、音環境を形成する建築空間を、その設計段階において体験することを可能とする可聴化が有用である。本研究では、他者が発する音(他発音)だけでなく、発話者自身が聴取者となる自発音、及び、それ以外の環境音を含めて設計段階で体験できるようにする包括的な可聴化システムの構築を試みた。本課題では、他発音及び自発音を呈示可能な包括的な可聴化システムを構築することができ、可聴化システムとして十分な性能を有していることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトと環境の相互作用が生み出す現象について、これまでは実環境が大幅に単純化された実験環境でしか検討を行うことができず、体系的に検討することは困難であった。しかし、本研究で開発した包括的可聴化システムにより空間情報も含めた形でインタラクティブな聴空間を呈示することで Lombard効果や聴覚フィードバックといった知覚現象、さらには聴覚により受ける空間印象といった高次の知覚現象の詳細やメカニズムについての体系的な探究に向けて大きく貢献できた。また、本研究の成果を発展させることで、音を介したコミュニケーションのための空間の新たな設計指針の確立、ひいては人々の生活の質の向上に繋がると予想される。

研究成果の概要(英文)：Acoustical communication through speech and music is an important tool for our daily lives. Therefore, it is essential to realize acoustic environments in which we can appropriately communicate with sounds. For such purpose, auralization is an effective tool, which makes it enable for us to experience an architectural space which forms acoustic environment in its design stage. In this research, we try to realize a comprehensive auralization system that virtually presents sounds radiated from others, self-radiated sound of listener itself, and ambient sounds. As a result, we developed a comprehensive auralization system which is able to auralize non-self and self radiated sounds, except ambient sounds, and confirmed that it has a sufficient performance as an auralization system.

研究分野：建築音響学

キーワード：臨場感コミュニケーション パーチャルリアリティ 音響設計 可聴化

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

音声や音楽などの音を介したコミュニケーションは、生活を営む上で重要な情報伝達手段の1つであり、講演用・音楽用ホール、教室、オフィスなどの様々な生活空間において、適切に音を伝えることが可能な音環境を構築することは豊かな生活・社会を実現するうえで極めて重要である。

例えば、音声伝達の明瞭性については、聴取者側の観点から、音声明瞭度と対応のある音響物理指標に基づいた音響設計が行われてきた。しかし、騒音環境下において通常より発話の強度が大きくなる Lombard 効果 [1]、遅延聴覚フィードバックによる発話者の話速の低下など、周囲の音響環境が発話者の発声の仕方に影響を与えていることが分かっており、また、楽器演奏者や歌唱者自身が発した楽器音・歌声の反射音を知覚することで演奏・歌唱の仕方を調整することも知られている。このように、聴取者自身が発する「自発音」に対する環境からのフィードバックや「環境音」(ambient sound) との間の物理的/心理的な相互作用が音を介したコミュニケーションに影響を与えていることが分かっており、快適なコミュニケーションを可能とする音環境を構築するためには、他者が発する「他発音」だけでなく「自発音」と「環境音」による物理的・心理的相互作用を含めた総合的な検討を可能とするプラットフォームの構築が必要である。

計算機による数値音場シミュレーションと立体的な聴空間を提示する立体音響再生の2つの技術を組み合わせることで、任意のシミュレーション空間内の音場をその空間情報を含めてユーザに聴覚的に提示する「可聴化」の研究が行われてきた。近年の計算機及びシミュレーション技術の発展によって中～大規模音場シミュレーションが可能となっており、これまでにない高精度な可聴化を実現するための素地が整いつつある。しかし、従来の可聴化の研究のほとんどは、受聴者以外が発する音声や楽器音などの他発音を可聴化の対象としており、自発音を可聴化の対象とする研究は数例 [2,3] しか無い。また、身近に偏在し音源位置を陽に特定することが難しい環境音を可聴化の対象とした研究は申請者が過去に行ったもの [4-6] 以外に例がなく、さらに他発音・自発音・環境音のすべてを対象とした包括的な音場可聴化システムを構築した例はない。

申請者は、他発音の立体音響再生について、聴覚による空間知覚に重要な役割を果たす受聴者の頭部運動を考慮して両耳信号を再現する動的バイノーラル再生による立体音響再生システムを構築し、さらに、通常バイノーラル方式で利用されるヘッドホンではなくスピーカによりこれを実現する動的トランスオーラル再生システムを構築するなど顕著な成果を残してきた。また、これらの再生システムに時間領域有限差分法による高速な数値シミュレーションを統合することで、中規模の室内空間内の他発音を可聴化する技術を確立しつつある。

しかし、上述のように総合的な音場の評価・設計を行うためには、図1に示すように他発音だけではなく自発音及び環境音を含めた高精度可聴化を行うプラットフォームの構築が必須であり、包括的な音場可聴化システムを構築するという着想に至った。

### 2. 研究の目的

上記の背景およびこれまでの研究経過をもとに、本研究では、包括的な可聴化システムの構築を行う。研究期間内には以下の項目を実施する。

#### (1) 他発音可聴化サブシステムの構築

シミュレーション音場における仮想収録・再生のための理論を構築し、申請者が既に開発したバイノーラル合成システムをベースに他発音可聴化サブシステムを構築する。

#### (2) 自発音可聴化サブシステムの構築

自発音を収録しリアルタイムで可聴化を行う自発音可聴化サブシステムを構築する。

#### (3) 環境音可聴化サブシステムの構築

環境音の可聴化を行う環境音可聴化サブシステムを構築する。

#### (4) 包括的な音場可聴化システムの構築

上記(1)～(3)のサブシステムを統合することで包括的な音場可聴化システムを構築する。

### 3. 研究の方法

本研究では、上述(1)～(4)の4項目について研究を行い、包括的な可聴化システムを構築した。

#### (1) 他発音可聴化サブシステムの構築

シミュレーション音場における仮想収録・再生理論の検討

他発音の可聴化を行うためには、シミュレーション空間内に配置した音源から聴取者の両耳耳元までの両耳インパルス応答 (BRIR: Binaural Room Impulse Response) を算出 (仮想収録) し、これに音源信号を畳み込んでヘッドホンあるいはスピーカを用いたトランスオーラルシステムにより再生する。しかし、この場合、聴取者の頭部位置・向きに変化があった場合に再度 BRIR を算出する必要が生じるため、リアルタイム処理はほぼ不可能となる。そこで、BRIR を直接算出するのではなく、積分方程式に基づいた音場再現手法である波面合成及び球面調和関数を利用したアンビソニックスといった理論のいずれか

の手法の応用について検討し、BRIR を間接的に合成する手法の検討を行う。これらの手法を導入することで、聴空間知覚に重要な役割を果たす聴取者の頭部位置・向きの変化が許容され、高度な可聴化が可能となる。

申請者は既にフレネル-キルヒホッフ回折公式に基づいた波面合成に基づいて仮想収録を行う方法について成果を残しており、この項目の実施に目処が付いている。本申請ではその他の各種積分方程式の導入やアンビソニックスについて比較検討を行うことで、演算コスト及び性能の点から最も効率の良い手法の選定を行う。

#### 他発音可聴化サブシステムの実装・性能評価

で検討し選定した仮想収録・再生方式による他発音可聴化サブシステムの実装を行い性能を確認する。また、積分方程式の境界の離散化精度（アンビソニックスでは球面調和関数の展開次数）と BRIR の物理再現精度及び聴感との関連について調査を行い、最低限必要な離散化精度あるいは展開次数について明らかにする。

### (2) 自発音可聴化サブシステムの構築

#### 自発音可聴化手法の検討及びプロトタイプ作成

自発音としてユーザの発話を可聴化の対象としている先行研究では口元から両耳までの室内音響伝達関数である OBRIR (Oral-Binaural Room Impulse Response) の概念を導入することで、ユーザ自身の発話の可聴化を実現している。しかし、ユーザの頭部位置・向きに変化があった場合には A-1 項で述べたのと同様に計算コスト増加という問題が生じるため、OBRIR の利用は適切ではない。そこで、A-1 項で選定した理論を自発音の可聴化にも適用することにより、頭部位置・向きに容易に対応可能な手法を構築し、プロトタイプを作成する。

#### プロトタイプによる性能検証及び実時間畳込み装置による実装

他発音の可聴化では、システムの処理遅延は大きな問題とならないが、自発音可聴化においては、直接音として聴取される自らの発話と可聴化システムによって提示される室内での反射音の間の処理遅延は、音波が実際に室内で伝搬する場合の遅延量も小さくしなければならない。そこで、で作成したプロトタイプにより、演算処理速度の性能検証を行うとともに音響信号の実時間畳込み装置を導入し、これを用いた実装を行う。

#### トランスオーラル再生のためのハウリングキャンセラの構築

本申請で構築する可聴化システムの再生系として、ヘッドホンとスピーカを用いたトランスオーラル再生の 2 種類を想定している。スピーカを用いた再生系とする場合には、ユーザの発話などの自発音を収録するためのマイクロホンとスピーカの間には音響信号のループが形成されるため、音響信号の無限の増幅（ハウリング）が生じると予想される。これを未然に防ぐために自発音可聴化サブシステム用ハウリングキャンセラの実装についての検討を行う。トランスオーラル再生では複数のスピーカを用いるが、トランスオーラル再生用のフィルタにハウリングキャンセラの機能を包含させることによるハウリングキャンセラの検討を行う。

#### 自発音可聴化サブシステムの実装・性能評価

～ での検討結果に基づいて、自発音可聴化サブシステムの実装を行い、性能を確認する。

### (3) 環境音可聴化サブシステムの構築

#### 環境音可聴化手法の検討

音源位置が明確な自発音や他発音については、数値シミュレーションにより音源位置から聴取位置までのインパルス応答を算出することで音波伝搬をモデル化することができる。環境音についても音源位置が明確な場合には他発音と同じモデル化で可聴化が可能である。しかし、環境音のうち、例えば、カフェなどにおける多数の話者による音声を重ねるバブルノイズのように、明確な音源位置を想定することが困難な場合には、同様にモデル化することは難しい。そこで、音源位置の特定が難しい場合の環境音の可聴化手法について検討する。

申請者は、聴取者を取り囲むように水平面に配置した複数の仮想音源からノイズを発生させることで空調などによる環境騒音をモデル化することで可聴化を行った[4-6]。ここでは、仮想音源位置を A-1 項で選定した理論により決定される音源配置に置き換えることで、他発音及び自発音と同様のスキームで可聴化を行えるような改良モデルを構築する

#### 環境音可聴化サブシステムの実装・性能評価

で構築した環境音のモデル化手法に基づいて、環境音可聴化サブシステムの実装を行い、性能を確認する。

### (4) 包括的な音場可聴化システムの構築

#### 各可聴化サブシステムの統合

(1)～(3)で開発した各可聴化サブシステムを統合し、包括的な可聴化システムを実装する。

## 性能評価

包括的音場可聴化システムの性能評価を行う。具体的には以下の項目について評価を行い、システムの全体的な性能を確認する。

- (ア) システム全体の演算処理時間が知覚上問題とならない範囲に収まっているか
- (イ) 簡単な室環境の包括的な可聴化を行い、両耳への聴覚入力に物理的に再現されているか
- (ウ) 聴空間の知覚が適切に行えるか

## 4. 研究成果

### (1) 他発音可聴化サブシステムの構築

室内頭部インパルス応答 (BRIR: Binaural Room Impulse Response) を間接的に合成するための仮想収録・再生理論として、波面合成法 (WFS: Wave Field Synthesis) と高次アンビソニックス (HOA: Higher Order Ambisonics) の2つの理論について物理的および心理的観点から検討を行った。その結果、WFS では音場再現領域は比較的大きいものの、知覚上十分な性能を達成するためには数千～数万点の制御チャンネル数が必要であり、演算コストが極めて大きいことが明らかとなった。一方、HOA では、再現領域は小さいものの、より少数の仮想収録点・音源数で再生が可能であることが明らかとなった。本研究で構築を目指す可聴化システムでは受聴者を1人と想定しているため、演算コストの面から HOA の理論に基づく仮想収録・再生の方が適していることと考えられる。

これらの結果から、本研究での収録・再生理論として HOA を採用することとした。この方針にしたがい、HOA 理論とバイノーラル合成に基づいて、HOA により仮想収録された音場をヘッドホンにより受聴者に呈示する他発音可聴化サブシステムを構築した。

### (2) 自発音可聴化サブシステムの構築

前項での検討結果から、自発音可聴化においても HOA 理論に基づいた仮想収録・再生の方法論を導入することとし、自発音可聴化システムのプロトタイプを構築した。

自発音可聴化では、他発音可聴化の場合と異なり、システム遅延が大きな問題となる。そのため、自発音可聴化における畳み込み処理についてソフトウェアベースの畳み込みと実時間畳み込み装置による2種類の実装を行った。各々の畳み込み処理部の遅延は、ソフトウェアベースでは約 10 ms、実時間畳み込み装置ではほぼゼロであった。ソフトウェアベースでも十分な演算性能を有しているが、厳密な可聴化を行う場合には、実時間畳み込み装置を用いる必要があることが明らかとなった。

自発音可聴化において、ヘッドホンではなくスピーカを用いる場合に必要となるハウリングキャンセラの構築について検討したが、多出力-多入力システムにおけるハウリングキャン皿は技術的に実現が難しく、また、両耳での再現信号の時間構造および周波数特性が大きく変容することが判明した。したがって、本研究における再生系としてはヘッドホンに限定するものとした。

以上の検討から、ヘッドホンおよびソフトウェアベースの畳み込みを用いた自発音可聴化システムを実装した。さらに、実環境において剛球マイクロホンアレイおよび擬似頭により測定したインパルス応答を用いて自発音可聴化を行い、一定の精度で原音場が再現されていることを確認した。

### (3) 環境音可聴化サブシステムの構築

環境音の可聴化手法の構築を目標として、低次球面調和関数展開を利用して環境音のモデル化を行った。また、構築した環境音のモデル化手法に基づいて、環境音可聴化サブシステムの構築、環境音の聴取実験を行った結果、本手法により音像が広がって知覚されるものの、その空間的広がりには上限があり、環境音の可聴化手法として適用するには限界があることが明らかとなった。

### (4) 包括的な音場可聴化システムの構築

当初計画では、他発音、自発音、環境音の可聴化サブシステムの統合を実施予定であったが、これらのうち多発音、自発音の可聴化サブシステムの統合を行い、これら2点についての包括的な可聴化システムを実装した。環境音可聴化サブシステムについては、引き続き検討を行った。具体的には4方向からの到来音を方向統計学に基づいてモデル化する手法に取り組み、一定の方向性を得たが、その実装にはまだ至っておらず、可聴化システムへの統合は今後の課題である。

他発音と自発音を呈示可能な可聴化システムについて性能評価を行った。具体的には、システム全体の演算処理時間の検討を行い、他発音の呈示においては知覚上問題がないことを確認した。自発音の呈示については、ソフトウェアベースで音響信号処理部分を実装した場合には、反射音を知覚する上で無視できない遅延が生じることが確認された。このような遅延はハードウェアベースで音響信号処理を行うことで解決されるが、この場合のシステムの全体的な実装については今後の課題である。また、簡単な質環境について幾何音響シミュレーションを行った結果について可聴化を行い、前述の自発音の遅延を除いては高い精度で聴覚入力が再現されることを確認した。

## <引用文献>

- [1] E. Lombard, "Le signe de l'élévation de la voix," Annales des Maladies de l'Oreille et du Larynx. XXXVII(2), 101-9, 1911.
- [2] M. Yadav et al. "A system for simulating room acoustical environments for one's own voice," Applied Acoustics, 73, 409-414, 2012.
- [3] D. Garcia et al. "Interactive auralization of self-generated oral sounds in virtual acoustic environments for research in human echolocation," Forum Acusticum, 2014.
- [4] Y. Iwaya et al. "Consideration of effective acoustic rendering of spatialized ambient sound," Interdisciplinary Info. Sci. 18(2), 93-98, 2012
- [5] Y. Iwaya et al. "Effective rendering of ambient sounds in virtual auditory display," Proc. Inter-Noise 2012, 6084-6090, New York, 2012.
- [6] S. Yairi et al. "The effect of ambient sounds on the quality of a 3D virtual sound space," Proc. IEEE Int'l. Conf. Intelligent Info. Hiding and Multimedia Signal Processing, 1122-1125, Kyoto, 2009.

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文](計 5件)

- H. Shigetani, M. Otani, Accuracy of binaural signal in Higher-Order Ambisonics reproduction with different decoding approaches, Acoustical Science and Technology, 査読有, 40, 144-147, 2019.
- M. Otani, H. Shigetani, Reproduction accuracy of Higher-Order Ambisonics with Max-rE and/or least norm solution on decoding, Acoustical Science and Technology, 査読有, 40, 23-28, 2019.
- M. Otani, K. Yamazaki, M. Toyoda, M. Hashimoto, M. Kayama, Relation between frequency bandwidth of broadband noise and largeness of sound image, Acoustical Science and Technology, 査読有, 38, 35-37, 2017.
- M. Otani, H. Watabe, T. Tsuchiya, Y. Iwaya, Effects of spatial aliasing in sound field reproduction: Reproducibility of binaural signals, Acoustical Science and Technology, 査読有, 38, 147-153, 2017.
- M. Otani, K. Yamazaki, M. Toyoda, M. Hashimoto, M. Kayama, Largeness and shape of sound images captured by sketch-drawing experiments: Effects of bandwidth and center frequency of broadband noise, Acoustical Science and Technology, 査読有, 38, 154-160, 2017.

### [学会発表](計 25件)

- M. Otani, Higher-Order-Ambisonics-based binaural synthesis for reproduction and auralization of sound field, Seminar on the spatial aspects of hearing and their applications, Tohoku Universal Acoustical Communication Month 2018, 招待講演, Sendai, 2018.
- R. Matsuda, M. Otani, H. Okumura, Evaluation of robustness of dynamic crosstalk cancellation for binaural reproduction, Audio Engineering Society International Conference, Tokyo, 2018.
- R. Matsuda, M. Otani, H. Okumura, Optimum loudspeaker arrangement of dynamic crosstalk cancellation system for two listeners, International Congress on Sound and Vibration, 招待講演, Hiroshima, 2018.
- M. Otani, R. Matsuda, Dynamic crosstalk cancellation for spatial audio reproduction, INTER-NOISE 2017, 招待講演, Hong Kong, 2017.
- M. Otani, T. Tsuchiya, Y. Iwaya, Y. Inoguchi, Perceptual optimization of sound field reproduction and sound field rendering with software/hardware-based acoustic simulation, Join Meeting of Acoustical Society of Japan and Acoustical Society of America, 招待講演, Honolulu, 2016.
- 大谷 真, 高臨場感音響再生システムの開発と超臨場感システムへの応用, 第23回関西大学先端科学技術シンポジウム, 招待講演, 吹田, 2019.
- 泉 悠斗, 大谷 真, 球状マイクロホンアレイを用いた後期残響音の到来方向分布の分析, 日本音響学会春季研究発表会, 調布, 2019.
- 松田 遼, 大谷 真, 両耳を中心としたマルチゾーン HOA による音場再現の検討, 日本音響学会春季研究発表会, 調布, 2019.
- 藤井勇樹, 大谷 真, 音場再現における制御領域内の頭部及び胴体の存在が音場の再現精度に与える影響, 日本音響学会春季研究発表会, 調布, 2019.

- 光石将隆, 大谷 真, 球状マイクロホンアレイを用いた自発音可聴化システムの開発, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 大阪, 2018.
- 泉 悠斗, 大谷 真, 低次球面調和関数展開を用いた仮想聴空間における背景音の表現手法, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 大阪, 2018.
- 大谷 真, 高次アンビソニックスとバイノーラル合成による音場の再現及び可聴化, 日本音響学会秋季研究発表会, 招待講演, 大分, 2018.
- 重谷治樹, 大谷 真, 頭部の存在を考慮した高次アンビソニックス再生系の主観的性能評価, 日本音響学会春季研究発表会, 埼玉, 2018.
- 大谷 真, 奥村 啓, 末永 司, 土屋隆生, 動的 Virtual Ambisonics による音場再現及び可聴化システムの開発, 日本音響学会春季研究発表会, 埼玉, 2018.
- 奥村 啓, 大谷 真, 逆フィルタを用いた音場再現手法におけるスイートスポットの検討, 日本音響学会建築音響研究会, 札幌, 2018.
- 松田 遼, 大谷 真, 奥村 啓, スピーカ配置がクロストークキャンセレーションに与える影響の検討, 日本音響学会建築音響研究会, 札幌, 2018.
- 泉 悠斗, 大谷 真, 球状マイクロホンアレイを用いた後部残響音の入射指向性の分析, 電子情報通信学会応用音響研究会, 輪島, 2018.
- 重谷治樹, 大谷 真, Max-rE デコードによる高次アンビソニックス再生系における両耳信号の再現精度の数値的検討, 日本音響学会秋季研究発表会, 松山, 2017.
- 渡辺淳也, 大谷 真, 三次元積分方程式の逆問題を用いた格子点音圧からの任意の境界面音圧の推定, 日本音響学会秋季研究発表会, 松山, 2017.
- 重谷治樹, 大谷 真, 耳介を再生点とした高次アンビソニックス再生系における両耳信号の再現精度の数値的検討, 電子情報通信学会応用音響研究会, 富山, 2017
- 21 大谷 真, 山崎恒平, 豊田政弘, 無響環境における音像の大きさと形状の知覚, 日本音響学会建築音響研究会, 招待講演, 札幌, 2017
- 22 松田 遼, 大谷 真, 動的クロストークキャンセレーションによる頭部運動に頑健なバイノーラル再生システムの開発, 日本音響学会建築音響研究会, 長野, 2017
- 23 吉田千尋, 大谷 真, 高次アンビソニックス再生系における両耳間時間差の再現精度に関する数値的検討, 日本音響学会春季研究発表会, 川崎, 2017.
- 24 吉田千尋, 大谷 真, 高次アンビソニックス再生系における両耳信号の再現性に関する数値的検討, 日本音響学会秋季研究発表会, 富山, 2016.
- 25 藤井勇樹, 渡部 光, 大谷 真, 土屋隆生, 岩谷幸雄, 音場再現における境界離散化間隔が聴覚空間知覚に与える影響, 日本音響学会建築音響研究会, 吹田, 2016.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://acoust.archi.kyoto-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし