

令和元年6月14日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00280

研究課題名(和文)聴覚ディスプレイに基づくウェアラブルな音空間集音・再生システムの開発

研究課題名(英文) Development of wearable sound-space acquisition and reproduction system based on auditory display

研究代表者

渡辺 貫治 (Watanabe, Kanji)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号：20452998

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)：ビームフォーミングによって到来方向ごとの音信号を收音するシステムを構築した。また、各ビーム信号を聴覚ディスプレイによって仮想音源として提示することで音空間を再現するシステムを実現した。本システムは、直線状アレイを用いてビームを前方29方向に向けて收音を行う。また、可聴域を7帯域に分割して処理を適用する。前方のみに音源がある場合に限定されるが、任意の音空間の情報を取得し高精度に再現可能なシステムであることを、客観的・主観的評価によって示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ある音空間を任意の空間で高精度に再現可能なシステムを実現した。本システムは、聴取者にとってあたかも遠隔地の空間にいるかのような高い臨場感を与えることができるもので、バーチャルリアリティの発展やコミュニケーションシステムの高度化への貢献が期待できる。同様なシステムの例はあるものの、收音におけるアレイやビームの条件、適用帯域に関する検討はまだ不十分であるため、本研究によって得られた知見は従来のシステムにも反映され得るものであり、学術的にも意義があると考えている。

研究成果の概要(英文)：The system to acquire the sound signal for each direction of arrival by beamforming was constructed. In addition, the system that reproduce the sound space by synthesizing sound image corresponding to beam signals using the auditory display system was realized. The system consists of linear microphone arrays and beams directed forward 29 directions. The frequency range is divided into 7 bands. It is limited when the sound sources are located only forward, but objective and subjective evaluation showed that the system was able to acquire spatial information in any sound space and was effective for reproducing with high accuracy.

研究分野：音響学

キーワード：バーチャルリアリティ 音響 音場合成 臨場感 收音 マイクロホンアレイ ビームフォーミング 聴覚ディスプレイ 空間音

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

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 聴取者に実際には音源が存在しない場所から音が聞こえるように感じさせるなど、仮想的な音空間を提示するシステムは、音響バーチャルリアリティの実現において重要である。そのようなシステムを実現するために、音源と聴取者が存在する空間を一つのシステムと考え、音源を入力、鼓膜面上の音を出力とし空間中の音の伝搬を伝達関数として総合的に表現し利用する方法が知られている。特に、室内の反射・回折の影響がない場合を頭部伝達関数と呼ぶ。任意の音信号に頭部伝達関数を畳み込むことで、ある位置に音源があるときに両耳に入力される信号を模擬することができ、聴取者に仮想的な音源を知覚させることができる。

(2) 頭部伝達関数などを用いて仮想音源を提示・制御するシステムを一般に聴覚ディスプレイシステムと呼ぶ。頭部伝達関数は音源位置に対応しており、聴取者を中心とした全周方向の伝達関数が得られれば、任意の信号に畳み込むことであらゆる音源を再現可能である。さらに、多数の仮想音源を同時に提示可能であれば、音空間全体を再現することもできると考えられる。そのような考えに基づき、研究代表者は、これまでの研究において計算機の描画用プロセッサである graphics processing unit (GPU) を用いた並列処理によって、多数の音源方向に対応する頭部伝達関数を同時に処理することで、多数の仮想音源を制御する聴覚ディスプレイの実装を行った(科研費, 21700140)。

(3) ある実空間における音を別の空間で仮想的に再現するには、元の空間において空間的な情報も含めた収録が必要である。聴取者に対し様々な方向から到来し重ね合わされた音信号が両耳に入射することから、原音場において受聴点に対して方向別に収録をすることで空間的な情報を含めて音信号を得ることができると考えられる。それらの方向別の音信号を聴覚ディスプレイによって仮想音源として同時に提示することで、元の音空間を仮想的に再現可能であると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究では、音信号を到来方向別に収録するためにビームフォーミングを用いることを考えている。全周方向にわたって網羅的にビームを向けることで、空間的な情報を含んだ収録を実現する。そのような収録によって得られた各ビーム信号を仮想音源として聴覚ディスプレイによって提示することで、音空間全体を再現する。以上のことを実現可能な収録・再生システムを構築することが、本研究の大きな目的である。

(1) 本研究では、再生システムである聴覚ディスプレイは過去の検討で実装してあるため、収録システムの構築がまず必要である。具体的には、使用するマイクロホンアレイの形状、及びビームフォーミングの方法の決定、方向別収録に適したビームの配置である。

(2) 収録・再生システム全体の評価を行うことでシステムの有効性を明らかにする。伝達関数を用いたシステムであるため、原音場の伝達特性がシステムの出力において再現されているかを客観的に評価する。また、聴感による主観評価も必須である。本研究のシステムは空間的な情報を保ったまま収録・再生することであるので、まず空間的な情報、すなわち音源の方向感が再現できているかを聴取実験によって示す。また、処理を適用する帯域を制限することで、小規模なシステムが実現可能であるかも明らかにする。

### 3. 研究の方法

図1に、実装した収録・再生システムの概要を示す。本研究では、ビームフォーミングによって、ある方向に指向性を向けたときの音信号を得る。このようにして得られた信号は、その方向にある音源から到来した信号と見なすことができるため、ビームを全周方向に対し網羅的に向けて収録することで、アレイを囲む方向別の音源信号が得られることとなる。各方向の音源信号に対応する方向の空間的な情報(頭部伝達関数)を付加して全て足し合わせることで、原音場に聴取者がいるとき両耳に入射する信号を模擬できる。以上のシステムを、コンピュータシミュレーションによって実装した。

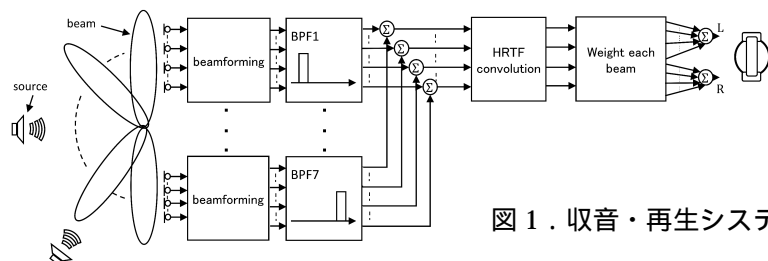


図1. 収録・再生システムの概要

(1) マイクロホンアレイは直線状として、ビームフォーミング処理は遅延和法を用いた。一般的に、低域の信号に適用するには十分な大きさのアレイが必要である。一方、マイクロホン間

隔が波長に対して大きいと空間折り返し歪みが生じる．そこで、本システムは可聴域を7分割して扱い、それぞれの帯域に対応したマイクロホンアレイを用いることとした．帯域の境界における不連続は、重み係数を算出して補正することとした．なお、直線状アレイでは前後の区別がつかないため、ビーム方向は前方のみとした．方向によらず一定のゲインで収音できるように検証した結果、ビーム方向は29方向に決定した．

(2) 音空間の再現精度を客観的に評価した．再生システムでは両耳信号を模擬するため、原音場における聴取者の両耳信号が、システムにおいて再現されているかを示すことで評価を行った．具体的には、システムの出力と原音場における頭部伝達関数の周波数特性を比較した．

(3) 音空間の再現精度を主観的に評価した．具体的には、ある音源信号に対し、システムの出力によって得られた信号を提示し知覚した仮想音源の方向を回答させた．また、総合的な評価として、音色も含めた再現精度の評価も行った．

(4) システムの小規模化を検討するため、一部の帯域に対してビームフォーミング処理を省略するように変更し、音空間の再現精度を主観的に評価した．

#### 4. 研究成果

(1) 図2は、目標とする原音場の信号(上)とシステムの出力信号(下)の周波数特性を音源方向に対してプロットしたものである(横軸:周波数,縦軸:音源方向,出力レベルの相対値を色で示す).全体的に類似した特性が得られており,本システムによって元の音空間が高精度に再現されていることが見て取れる.

(2) 図3は,システムの出力によって提示される仮想音源の方向を回答させる主観評価実験(方向定位実験)の結果である(横軸:仮想音源の方向,縦軸:被験者の知覚した方向).比較として,原音場の伝達関数を用いて仮想音源を模擬した場合の結果も示す.ただし,本システムは前後の区別ができないため,後方に知覚した場合は,前方に折り返して表示してある.各図で回答傾向が似ていることから,システムが原音場を高精度に再現できていることが主観的に示された.

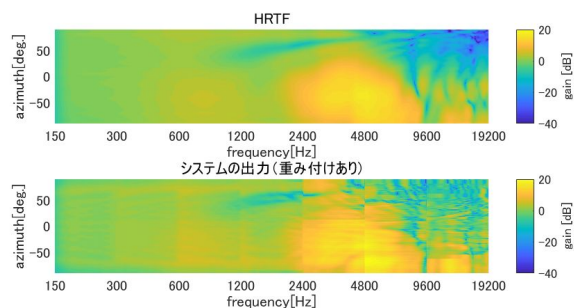


図2 システムの出力と原音場の周波数特性の比較

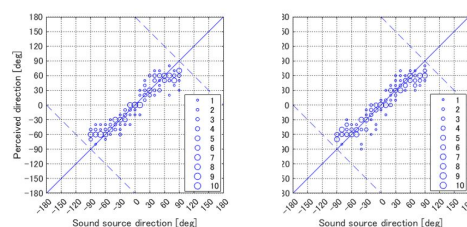


図3 方向定位実験の結果(左:原音場, 右:システムの出力)

(3) 図4は,システムの出力信号と原音場の信号を聴取させ,相違を判断させる実験を行った結果である.比較のため,帯域分割の補正を行わない(重み付けなし)場合の信号も評価した.横軸は正答回数,すなわち相違を知覚できた回数である.この数値が小さいほど原音場を再現できていると言える.縦軸は仮想音源の方向である.この結果から, $\pm 90$ 度(真横)付近は正答回数が大きく,再現精度が低い結果となっているが,統計的検定の結果 $-70$ 度 $\sim 60$ 度では原音場との相違が知覚されにくいという結果が得られた.したがって,音色も含めてシステムの出力が原音場を再現可能であることが示されたと言える.

(4) 一部の帯域に対してビームフォーミング処理を省略し,(2),(3)と同様の主観評価実験を行った.その結果,定位に関しては1.2 kHzまで処理を省略可能であることがわかった.音色も含めると600 Hzまで処理を省略可能であることがわかった.それらの結果は,システムに必要なアレイサイズが2~4 mであることを意味している.つまり,収音システムとしてウェアラブルにするには,さらに検討が必要である.一方,再生システムについては,両耳信号の再現精度が十分であることから,ヘッドホン受聴によるシステムが可能で,小規模なシステムが実現可能であると言える.

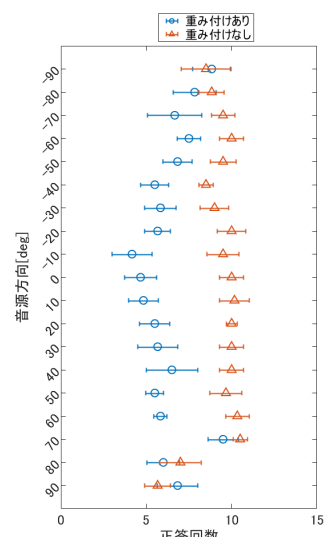


図4 音質評価の結果

以上の検討から,いくつかの制限があるものの原音場の再現を可能とする点に関しては,目

標とする収音・再生システムが実現できたと言える。今後の展望としては、収音システムに関して検討の余地があるので、例えば、ビームフォーミング処理の変更やアレイの条件（マイクロホン数や間隔）に関する検討が考えられる。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 2 件)

Watanabe Kanji, Takane Shouichi, Abe Koji, Effect of reducing data amount by reducing quantization resolution of head-related impulse responses on sound localization, Acoustical Science and Technology, 査読有, Vol.39, 2018, 316-319

DOI: <https://doi.org/10.1250/ast.39.316>

渡邊貫治, 及川祐亮, 佐藤宗純, 高根昭一, 安倍幸治, GPU を用いた複数の仮想音源を動的に提示可能な聴覚ディスプレイシステムの開発及び性能評価, 日本音響学会誌, 査読有, 71 巻, 2015, 571-579

DOI: [https://doi.org/10.20697/jasj.71.11\\_571](https://doi.org/10.20697/jasj.71.11_571)

### 〔学会発表〕(計 10 件)

渡邊貫治, 多田優希, 西口正之, 高根昭一, 安倍幸治, 音空間収音におけるビームフォーミングの適用帯域と音像定位への影響, 日本音響学会, 2019 年

加藤巧大, 西口正之, 渡邊貫治, 高根昭一, 安倍幸治, 聴覚の空間的マスキング効果を考慮した 3D 音響信号の符号化に関する基礎検討, 電子情報通信学会, 2019 年

加藤巧大, 西口正之, 高根昭一, 渡邊貫治, 安倍幸治, 3D 音響符号化のための空間的マスキング効果に関する検討, 日本音響学会, 2018 年

大野拓磨, 渡邊貫治, 西口正之, 高根昭一, 安倍幸治, ビームフォーミングを用いた空間サンプリングのためのフィルタ設計に関する検討, 日本音響学会応用音響研究会, 2018 年

加藤巧大, 西口正之, 渡邊貫治, 安倍幸治, 高根昭一, ビームフォーミングにより収音された音信号の合成における波形再現性に関する検討, 電気関係学会東北支部連合大会, 2017 年

大野拓磨, 渡邊貫治, 西口正之, 高根昭一, 安倍幸治, マイクロホンアレイを用いた方向別収音のためのフィルタ設計に関する検討, 日本音響学会, 2017 年

加藤巧大, 西口正之, 渡邊貫治, 安倍幸治, 高根昭一, ビームフォーミングにより収音された 3D 音響信号の符号化に関する研究, 日本音響学会, 2017 年

大野拓磨, 渡邊貫治, 西口正之, 高根昭一, 安倍幸治, ビームフォーミングによる空間的情報を含む収音における信号の再現性に関する一検討, 電気関係学会東北支部連合大会, 2016 年

渡邊貫治, 浅野凌也, 西口正之, 高根昭一, 安倍幸治, 両耳間差の個人化による頭部伝達関数の合成に関する一検討, 日本音響学会, 2016 年

K. Watanabe, M. Nishiguchi, S. Takane, K. Abe, Effect of individualization of interaural time/level differences with non-individualized head-related transfer functions on sound localization, 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 2016

### 〔図書〕(計 0 件)

### 〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。