

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 25 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25282003

研究課題名(和文)音場再生における工学的手法と芸術的手法の合理的融合に関する研究

研究課題名(英文)Rational integration of engineering method and artistic manipulation for the sound field reproduction system

研究代表者

尾本章(Omoto, Akira)

九州大学・芸術工学研究科(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) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：音が生じている場所の特徴をそのまま伝えることを音場再生と呼ぶ。これには、音の物理的な特徴を工学的な手法で精密に再現する方法や、オーディオ機器での音楽聴取のように、芸術的な観点から作りこまれる方法がある。本研究は両者の融合を試みたものである。工学的、芸術的手法のいずれにも用いることができるシステムを構築して詳細な検討を行った。工学的な手法も、芸術的な手法もそれぞれ得意な領域がある。今回の条件では工学的な手法が低い周波数、芸術的な手法は高い周波数領域の性能が優れていた。そこで周波数帯域ごとに分割して処理し、再生の時に両者を再び加算する方法を提案してその有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：The sound field reproduction can be divided into two categories. The first is physically assured and engineeringly realized method, that reproduces physical characteristics such as wavefront. The second is based on artistic manipulation and examples are the music package media for two-channel stereo or multi-channel surround system. Although both methods aimed to reproduce "good" sound field, these methods have been considered being essentially different. The purpose of the current research is an integration of both methods. The system that can be used for both methods had been constructed and detailed examination had been conducted. As a results, each method had desired frequency range for precise reproduction; the low frequency for engineering method and high frequency for artistic method. The hybrid method that divide frequency, process individually, and re-integrate, was therefore proposed. The availability was verified by objective and subjective examinations.

研究分野：応用音響工学

キーワード：音場再生 境界音場制御 スピーカアレイ

1. 研究開始当初の背景

音場を他の場所で再現する手法に関しては、近年多くが提案され、関係学会でも盛んに発表が行われている。

境界音場制御や波面合成法が代表的であるが、これらは物理的な音波の支配方程式を用いた解析から得られた解を工学的に実現可能にした方法であり、いわゆる正確な手法である(以下、工学的手法と呼ぶ)。

これとは別に、5.1 や 22.2 サラウンドシステムに代表されるような録音芸術や放送において用いられる再生手法は、主として制作者や録音・ミキシングエンジニアの芸術的観点が重視される方法と考えられる(以下、芸術的手法と呼ぶ)。

これら工学的手法と芸術的手法は、これまで同じ条件での再生能力比較など、直接的な比較は行われて来なかった。お互いの性能は認識されているものの、最終的な目的の違いやコンテンツの多様性によって「違う世界のもの」という意識で区別が行われていたものと考えられる。

2. 研究の目的

工学的な音場再生手法においても、録音・再生を行うデバイスとしては通常のマイクロホンとスピーカであることが一般的である。現在のところ、全帯域で完全にフラットな周波数特性と理想的な時間応答特性を持つデバイスは存在せず、何らかの欠点を持ちながらも使われて、そこで達成しうるクオリティで終結することが多い。

この点を補うために、エンジニアが芸術的な考えに基づいて行う各種の操作を工学的に検証し、有効な意味付けを行った上で、再生システムのクオリティ向上のために合理的に用いる事はできないだろうか。これが本研究で設定する目的である。

一般的な録音と再生の現場において、ミキシングエンジニアが介入して周波数特性や遅延の状況を調整する事で、その再生クオリティが格段に向上する事は周知の事実である。

研究代表者は、これまで音場の情報をネットワークで遠隔地に伝送し、これを高臨場感に再生することを目的としたプロジェクトに参画してきた。その中で試験的に行っている音場情報伝送実験においても、単に収録した情報を伝送して物理的に正しいと思われる方法で再生するだけでなく、エンジニアによるミキシングなどの操作を導入することで、被験者の全体的な評価を大幅に向上させる事が実証された。この場合、微細な調整から思いもよらない帯域の大きな周波数特性の変更など、エンジニアは持てる経験的知識を動員して操作を行う。

これらの操作によって、高い評価を得る際に、被験者からは「臨場感が増した」という言葉がしばしば聞かれる。

この場合の「臨場感」には、本物の雰囲気を実現するという基本的な意味に加えて、視聴する者の体験に基づいた極めて主観的な判断も包含されることが推察できる。

このように主観的な判断が介在する音場再生に対しては、経験に基づく芸術的手法や演出が有効に寄与する可能性が高い。

操作者の意図に基づいた、一步進んだ臨場感を体験する事で評価が上がっているものと考えることができよう。いわゆる、超臨場感、あるいは創臨場感といわれる感覚の実現である。

本研究では、以下の概念的な式で工学的に達成できる臨場感、芸術的手法で向上できる臨場感、それに演出というそれぞれの手法に掛ける A, B, C といった「係数」を求めることが具体的な目的となる。

[臨場感]

$$= A [\text{工学的手法}] + B [\text{芸術的手法}] + C [\text{演出}]$$

3. 研究の方法

(1) 工学的な手法を実現する音場再生システムの構築

境界音場制御理論に基づく音場再生システムを検討対象とする。具体的なシステムとしては、オープンな空間にスピーカを配置し、その表面を吸音材料で覆う形式を用いる。3チャンネルのスピーカを用いた音源モジュールを任意の数だけ配置して再生を行うシステムである。なお、境界音場制御による再生のためにはあらかじめ情報収集と逆システム構築のためのマイクアレイが必要となるが、これは既存の 80 チャンネルフラーレン型マイクロホンアレイを流用することからはじめ、後に別途製作する簡易的な 24 チャンネル鋭指向性マイクロホンアレイを利用する。

(2) 芸術的観点に基づく付加操作パラメータの確立

工学的に確立した音場再生手法に対して、さらに性能を向上させるための具体的方策を検討する。以下、項目毎に詳細を示す。

① 付加操作に必要なパラメータ抽出

予備的な主観評価実験を通して操作可能なパラメータを設定し、その中から主要なものを抽出する。チャンネル毎の遅延、周波数特性を変化させるイコライジング、残響付加、チャンネル間パンポッドなどを標準的なものとしてどの程度の範囲で操作する事が妥当であるかを検証する。これらの操作は Pro Tools などの Digital Audio Workstation (DAW) と共に動作するプラグインソフトウェア上で統一的に行う。

② 録音技術者による付加操作の調査

職業として録音やマスタリングを行う音響技術者に依頼し、システムの中で自由に音場を生成してもらい、この作業の中で使われる

パラメータを抽出する。合わせて達成しうる音場の幅についても調査を行う。複数の音響技術者による調査を行い、できるだけ多くのパラメータ変更例を収集する。

③ コンテンツの違いに関する考察

音楽信号のように周波数特性などの再生性能が重視されるコンテンツと、自然音のように音像定位や音源の動きなどが重視されるコンテンツでは、付加的操作の中身も異なる事が予想される。これらのカテゴリー分けと重要なパラメータの抽出を行う。

④ 被験者による主観評価実験

工学的に生成された音場と、音響技術者が操作した音場における比較を行い、主観的な性能評価を行う。特に、被験者が感じる臨場感の程度を考慮する。臨場感の感じ方には被験者の経験に基づく多様性と、それに伴う不確かさの存在が予想される。このため、多くの被験者に対して自由記述形式のアンケートあるいは聞き取り調査を行い、共通性の高い項目、低い項目の切り分けを明確にする。

⑤ 物理的な性能測定

変更が行われた音場に生じた物理的な変化を測定によって検証する。具体的には、残響環境の変化、反射音の方向依存性の変化などの測定である。

⑥ 簡易（可搬型）システムの構築

据え置き型のシステムで様々な考察を行いつつ、持ち運びが可能な操作システムを構築する。これによって、できるだけ多くのデモンストレーションの機会を増やし、多くの意見を聴取したい。あわせてチャンネル数を減らす可能性も検討し、どの程度の操作で音響樽などの最上級モデルと互角な印象を与える事ができるのか、検証を進める。

⑦ 付加操作のマニュアル化

引き続き上記の検証を行いながら、付加操作における重要なパラメータを取りまとめ、その効果と共に整理することで、マニュアル化を目指す。

⑧ さらになる演出の可能性の検討

再生システムの VRAWS としての機能を用いて、更なる検討を行う。VRAWS は、例えば足音や衣擦れの音など、被験者・試聴者が自ら出す音に任意の残響を付加することができる。このような演出的要素が臨場感の評価にどのように影響するかを検証する。

4. 研究成果

(1) 音場再生システムの構築

① 具体的なシステム

当初の計画通りに、可搬型の音場再生シス



図 1: 構築した音場再生システム

テムを構築した。図 1 に全体の様子を示す。スピーカはスタジオなどでモニタースピーカとしての実績を有する Genelec 8020 である。スピーカ取り付けフレームには、おおよそ 2m の距離で中心を向くような曲率をもたせている。

基本的な性能測定を行い、再生システムとして十分な周波数特性を有するとともに、反射率可変の音響壁面システムとしても十分に機能することが明らかになった。当初、音源信号収録には本研究代表者が主たる共同研究者として関与する CREST「音楽を用いた創造・交活動を支援する聴空間 共有システムの開発」において導入した C80 フラレーン型マイクロホンアレイを用いた。また音場再生のためのアルゴリズムとしては境界音場制御の原理を用い、36 チャンネルスピーカと 80 チャンネルマイクアレイの間のインパルス応答を測定し、逆フィルタ行列を求めて畳み込むことで、再生信号を得た。

② 初期段階におけるシステムの活用

このシステムを音場再生・音場可変のデバイスとして認識し、性能の実践的な検証を行った。具体的には小規模なコンサートへの活用を行い、観客を取り囲む形式で設置して残響可変などを試みた。当初の想定を超えた活用の方法であるが、これらの実践を通して製作したシステムの性能の高さを確認することができた。

(2) 音場再生へのイコライジングの導入

実際に再生する音にイコライジングなどを導入することを試みた。まずは周波数特性の補償を目指すべき方向と定め、無響室で測定した応答を規範として、再生音場でこれを再現するように DAW 上のイコライザで補償する。この操作を行った際の音の印象を被験者に問うことを行った。結果は概ね以下のよう

- ・イコライジングの導入で、ネガティブな印象が生じるわけではない。
- ・印象はコンテンツにも大きく依存して、必ずしも一様な傾向が得られるわけではない。

この他、録音の専門家である東京藝術大学

亀川徹教授に来学いただき（2014年11月24日）、実際に音を聴取してもらいながら操作を加えていただくことで専門的知識の供与を得た。音源から明確な直接的な波面を感じるように、ドライソースなどを人為的にミキシングする方法などを試みたが、複数の実験者の内観報告においても必ずしも良い印象は得られなかった。

これらの初期段階での実験によって、単に周波数特性に補償ではなく、定位を含めた音場再生の総合的な性能向上が必要であることが明らかになった。特に亀川教授からの示唆にもあったが、性能評価を行う際の重要なファクターは定位であり、これが明確であるか否かは再生システムの基本的性能の重要な判断材料となる。そこで、以降特に定位性能に着目した考察を行うこととした。

(3) 鋭指向性マイクロホンアレイの導入

2015年度（平成26年度）より、科学研究費補助金 挑戦的萌芽研究「音場再生システム性能評価の一般化による臨場感向上に関する研究」（研究課題番号 26560012）も合わせて推進した。

この新しい課題においては、新しく構築するマイクロホンアレイを用いて音場再生システムの一般的な性能評価を行った。本研究課題と対を成す内容であるため、本研究課題においてもこのマイクロホンアレイを導入して、定位性能を勘案した考察を行った。新しく導入したアレイは、鋭指向性のマイク（AKG C568B）を45°間隔で、ほぼ等立体角に24本配置したものである。

このマイクアレイを用いて、本研究課題で製作したスピーカ群との組み合わせにおいて、工学的な音場再生と、芸術的な操作、あるいは定位性能向上の組み合わせを考察する。具体的には、以下の手順を行った。

- ・ 鋭指向性マイクロホンと同じ数である24台のスピーカを組み合わせたシステムを用いる。3台ずつ配置したスピーカアレイを8台用いる。
- ・ 工学的な音場再生として、引き続き境界音場制御を用いる。24本のマイクで収録した音源信号を24チャンネルのスピーカから再生するが、その際24×24の組み合わせで得られたインパルス応答から算出した逆フィルタ行列を用いることになる。
- ・ 簡易的な音場再生手法として、マイクの主軸が向いている方向に設置されたスピーカから1対1で対応させて音源信号を再生する手法を導入する。この方法には特に何の処理も必要とせず、収録した音をそのまま再生することが可能である。
- ・ あわせて、特に簡易的な音場再生においては必要に応じて周波数特性の補正も行う。

(4) 工学的な音場再生手法と簡易的な手法の融合

上記の新しい組み合わせで主として実験的な

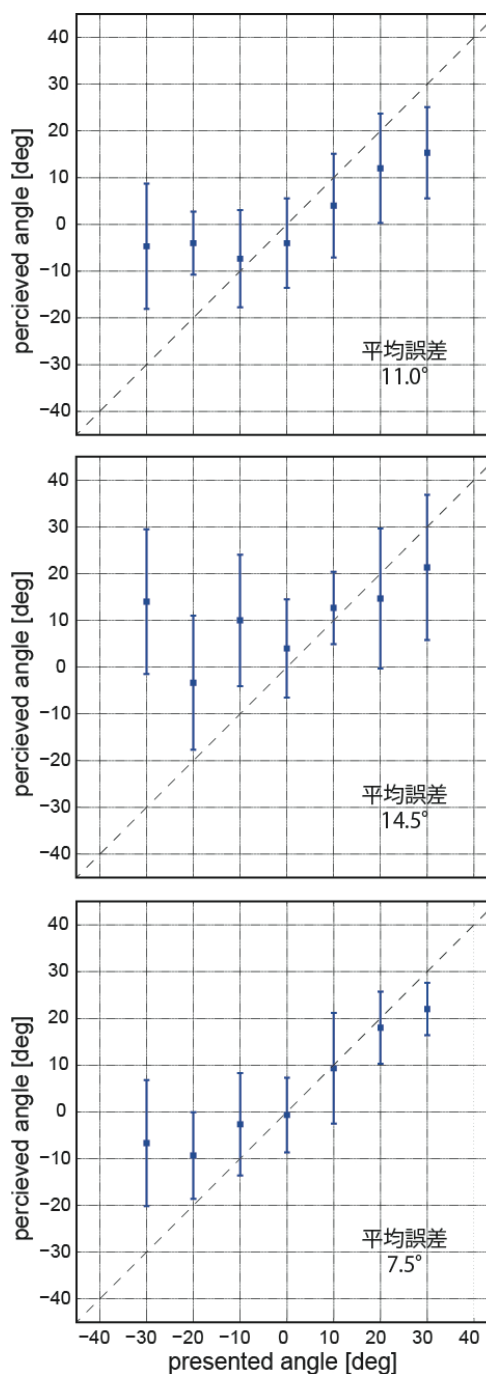


図 2: ホワイトノイズの断続音を音源とした場合の定位の主観評価実験結果（鉛直方向、横軸は提示角度、縦軸は音源位置と認識した角度）

考察を行った。結果は概ね以下のようにまとめられる。

- ・ 簡易的な音場再生と境界音場制御の再生性能を、振幅特性、ならびにダミーヘッドを用いて両耳感時間差 (ITD)、および両耳感レベル差 (ILD) を算出することで評価を行った。
- ・ 境界音場制御は、再生領域内において逆フィルタの効果によって良好な周波数特性を示すが、簡易的な手法はデバイスの再生性能やマイクロホンに同位相の音が集中することによる低域の増大などが観察さ

- れる。
- ・境界音場制御では、マイクロホンの間隔が高域の限界周波数を決める。今回用いた鋭指向性のマイクアレイではおおよそ850Hzあたりである。
 - ・この限界周波数以上においては、境界音場制御ではITD, ILDを正確に再現することができない。
 - ・一方、簡易的な音場再生手法はマイクロホンの指向性に依る方法であり、原理的に高域の性能が良好である。
 - ・ITDなどにおいても、やはり高域で境界音場制御に若干勝る性能を発揮した。

そこで、収録した音源を適切な周波数において帯域分割し、低域は境界音場制御で、高域はマイクロホンの指向性に依存した簡易的な再生手法を適用するハイブリッドな手法を提案した。当初想定した、各手法に重みを付けて加算する方法ではなく、得意な周波数帯域に分離する手法である。

結果としては総合的な性能が大幅に向上し、水平方向の定位性能のみならず、本来不得意であるはずの鉛直方向の定位に関しても若干の性能向上が観測された。

研究期間終了後も、様々なコンテンツを継続的に収録しており、再生手法の検討を続けている。今後、マイク本数の更なる増加によって分解能を向上させることや、カットオフ周波数に関する考察、またマイクロホンの基本的性能の再考などによって、さらなる性能向上が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計5件)

・ Yuto Saito, Akira Omoto, “Introduction of amplitude panning into physically assured sound field reproduction system,” Proc. RIEC International Symposium on Ultra Realistic Interactive Acoustic Communication 2016 (ISURAC 2016), Zao (Fukushima, Japan), 2016.5.20

・ 齋藤悠人, 尾本章, “3次元音場再生システムの性能向上に関する研究,” 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2016-09, キャンパスイノベーションセンター (東京), 2016.4.22

・ 石橋敬彦, 齋藤悠人, 尾本章, 河原一彦, “音場再生装置へのイコライジング操作の導入による印象変化に関する研究,” 2-P-34, 日本音響学会 2015年春季研究発表会講演論文集, 中央大学 (東京), 2015.3.17

・ Akira Omoto, Takahiro Nishiyama, and Yuki Yoshimura, “Music performance with Variable Reflection Acoustic Wall System,” PJ04-3, Proc. Forum Acusticum, Krakow (Poland), 2014.9.11

・ 吉村祐紀, 西山貴洋, 井上さやか, 尾本章, “反射率可変の音響壁面システムを用いた実験的演奏会について,” 1-Q4-9, 日本音響学会 2014年春季研究発表会講演論文集, 日本大学 (東京), 2014.3.10

[図書] (計0件)

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

亀川 徹 (KAMEKAWA, Tohru)