

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00229

研究課題名（和文）逆フィルタを用いた音響制御における残響の影響の効果的な除去

研究課題名（英文）Effective elimination of the effect of reverberation in sound field control based on inverse filtering

研究代表者

立蔵 洋介（Tatekura, Yosuke）

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：30372519

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、室内の設備や残響の状況になるべく依存することなく音響伝達特性をコントロールする手法を構築し、誰もが等しく音場制御技術を楽しむための基盤技術の確立を目指した。まず、複数のスピーカから複数の制御点間の音響伝達特性を快適に同時測定する手法を構築した。次に、インパルス応答のモデル化に関する基礎検討を行い、伝達関数行列に内包される残響構造や位相補正に関する知見が得られた。さらに、音場制御手法の耐残響性の向上を図り、波面合成法を拡張した新しい音場の個人化手法を開発した。また、定位情報を伴うマスキングの再生手法についても一定の成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：This research project aimed to establish fundamental technologies to make it possible for everyone to enjoy sound field control, by constructing acoustic transfer characteristics control method without depending on room facilities and reverberation situation. First, comfortably simultaneous measurement method was introduced for the acoustic transfer characteristics between multiple control points and multiple loudspeakers. Next, the research representative conducted a fundamental research on the modeling of the impulse response, and obtained knowledge on the reverberation structure and phase correction included in the transfer function matrix. Furthermore, to improve the reverberation durability in the sound field control method, a new sound field personalization which extended wave field synthesis was developed. In addition, certain results were obtained on the sound reproduction method of masking including the sound localization information.

研究分野：音響情報処理

キーワード：音場制御 逆フィルタ処理 室内残響 音響伝達特性

1. 研究開始当初の背景

光は通すが音は遮断する見えない「壁」を形成することによって、音空間の個人化を図るのは人類の大きな夢である。近年では波動論に基づいた音場制御による音空間のマルチゾーン化や、超音波を搬送波としたパラメトリックスピーカなど、空間内にピンポイントな音再生エリアを生成する手法が注目されている。しかしながら、波動論に基づく音場制御では、再生する室内の残響について理論の中に考慮されることは少ないため、その適用は無残響の部屋や残響の極めて少ない室に限定されてきた。

一方、研究代表者は、逆問題の立場から室内音響伝達特性をコントロールすることにより、室内の任意位置に所望の音情報を再生する手法について研究を行ってきた。そのノウハウを用いて音場のマルチゾーン化を実現するため、平成 23-25 年度科研費若手研究(B)「スピーカアレーを用いた同一空間への複数の音場生成」において、研究代表者は複数のユーザ周辺にそれぞれ所望の音を再生する「個別音像生成」の実現に取り組んできた。その結果、主に次のような研究成果が得られた。

1. ラウドスピーカ・制御点間の室内音響伝達特性を全チャンネルで同時に測定する手法を見出し、測定時間の大幅な短縮に成功した。
2. ラウドスピーカ数が制御点数より少ない劣決定条件下での個別音像生成法を開発した。その結果、未処理の場合と比較して、各音に対する干渉(クロストーク音)が約 10~dB 抑圧された。
3. スピーカアレーと Nullspace-based sound field control (NBSFC)を統合させた単一ユーザ向け個別音像生成手法（以下、NBSFC-ISI）を開発し、これを並列化することで2ユーザ用に拡張した。

他方で、音場を逆問題として扱うがゆえの問題点も浮上してきた。研究代表者の手法では、室内音響伝達特性を相殺する逆フィルタ群で構成される逆システムの設計が必須となるが、室内の残響が長い室だと逆フィルタを十分な制御精度で設計するのは難しい。また、室内音響伝達特性は受聴位置や物体位置の変化、気温などの変化によって容易に変化するため、逆システムが常にその時点での正確な逆特性を有するとは限らない。そのため、再生音の品質劣化や、クロストーク音の抑圧が不十分であるといったことが生じた。室内残響の影響は本手法のみならず音場制御全般に渡る問題であり、これが逆システムをベースとした音場制御技術がなかなか一般に浸透しない原因であると考える。

2. 研究の目的

前述の背景およびこれまでの研究成果と問題点を基に、本研究では室内の設備や残響の状況に依存せずに音響伝達特性をコントロールする手法を構築し、どんな残響を有する部屋であっても、誰もが等しく音場制御技術を楽しむための基盤となる研究を行う。本研究では、逆フィルタは厳密に設計できることはむしろ稀であると認識しつつ、人間が音を知覚した後は信号処理ができないので聴覚心理的な特性を活用すること図り、残響の影響を実質的に無力化する。また、特別な知識がない人でも簡単に楽しくシステムのセットアップができるよう、その要となる室内伝達関数のインパルス応答を簡単に測定する方法についての研究も行う。本科研費研究期間内には以下のことを明らかにする。

- 測定における参照信号（再生音）の調整と音源分離技術を駆使することにより、各スピーカから各受音点までの室内音響伝達特性のインパルス応答を、ユーザにとって快適に全チャンネル同時測定する手法の開発を行う。
- 再生する室内の残響構造と音場の逆フィルタ処理における制御精度の関係を調査し、残響時間と制御精度の関係や逆フィルタ処理の適用限界を明らかにする。また、逆フィルタ設計に用いられる室内音響伝達特性のインパルス応答について、特に後部残響部分に関する構造のモデル化について研究する。
- いわゆるカクテルパーティ効果に着目し、クロストークが聴感上無視できないほどに生じている場合に、各再生音以外の音を再生することによってマスキングを利用したクロストーク音を実質的に目立たなくさせる手法を検討する。

3. 研究の方法

(1) インパルス応答の同時測定における快速化

研究代表者らによる、各スピーカから各受音点までの室内音響インパルス応答の同時測定法を拡張し、参照信号としてアンサンブル曲内の各楽器パートの音を用いることで、ユーザには一曲のアンサンブルが聴こえることで参照信号の快音化を試みた。楽器パート音間の周波数特性の同質性を保証するため、図1に示すように各楽器パート音を一定時間ごとにスピーカに対してローテーションさせることとした。さらに、計算アルゴリズムに改良を加え、インパルス応答の測定精度を保持しつつ、測定時間を短縮化させた。

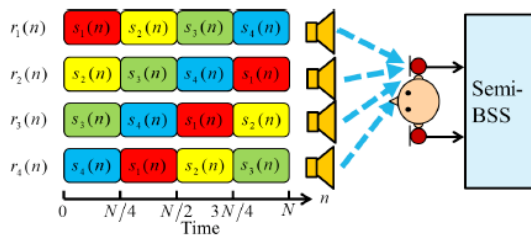


図 1 インパルス応答同時測定法の概略

- (2) 残響構造が音場制御の逆フィルタ処理に与える影響の調査

スピーカと受音点の配置位置関係は変化させず、測定場所が異なる場合での音場再現を行い、室内伝達特性の後部残響部分が逆フィルタ型音場再現に及ぼす影響について検討を行った。さらに、特異値分解した伝達関数行列の特異値およびユニタリ行列が再現音にどのような影響を与えるのか確認した。

また、スピーカと受聴点間の伝達関数は、受聴点が異なってもスピーカ位置が変動しなければ類似した包絡を持つことが知られているので、受聴点の伝達関数を用いて近傍の伝達関数を推定する方法を考案した。具体的には、受聴点とその近傍の伝達関数では、直接波の到達する時間が異なることを鑑み、直接波の到達時間差と受聴点の伝達関数を利用し、近傍の伝達関数を模擬できると考えた。直接波の到達時間差は、近傍の観測点とスピーカ間の距離と受聴点とスピーカ間の距離との差と音速を用いて算出できることから、この到達時間差を用いて受聴点のインパルス応答において位相補正を行った。

- (3) 耐残響性の高い音場制御手法の開発

残響環境下で音場制御を実現することを念頭に、既存の制御手法に対する改良を行った。ここでは、波面合成法を基盤技術として、スピーカアレー前方に焦点音源となる仮想点音源をユーザ周辺に複数形成して配置した。特に、図2のようにユーザを中心とした半円上に焦点音源を密に配置することで、音場の局所性を確保することを試みた。

- (4) マスキングの利用による定位情報の付与

逆フィルタ制御型個別音像生成において、背景に残るクロストーク音を実質的に抑圧すべく、特定のユーザのみに対してマスカを再生する手法を構築した。ここでは付加価値的な試みとして、マスカに方向情報を付与させることで、ユーザに対して定位感を伴う再生ができるようにした。通常の再生音は従来どおり逆フィルタ型音場制御をベースとし、マスカは波面合成に基づく手法で再生した。

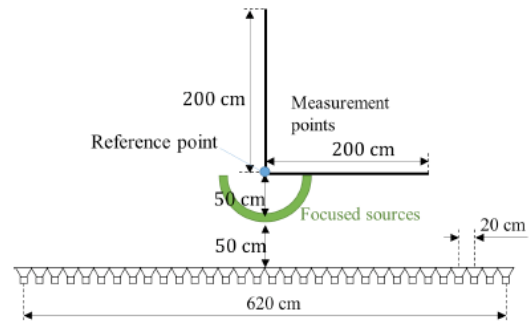


図 2 スピーカアレーによる複数焦点音源形成の概略

4. 研究成果

- (1) インパルス応答の同時測定における最適化

残響時間約 0.45 秒程度の室内において、提案手法の有効性を検証した。8 個のスピーカから受音点 4 点の間のインパルス応答を測定するにあたり、従来のスイープ波を参照信号とした手法をベースに、32 秒の楽音をローテーションせずに参照信号としたもの、提案手法において楽音の再生時間を 8, 16, 32 秒再生したものとの間の逆フィルタ処理型音場再現の精度を比較したものとその測定時間を比較したものを図 3, 4 に示す。図 3 より、ローテーションなしのものと比較すると、提案手法は音場再現の制御精度が高かった。また、提案手法（32 秒再生）と従来手法を比較すると同等の精度であるため、提案手法によって十分な精度のインパルス応答を測定できたと考えられる。また、図 4 の結果のうち、従来手法と提案手法（32 秒再生）とを比較すると、参照信号の再生時間には大きな差はないものの、演算時間の差は約 40 秒の差が生じた。しかしながら、従来手法では 20 秒以上の間、ユーザは参照信号を聞き続けなければならない、ユーザにとっては快適ではない懸念がある。これに対し、提案手法では約 30 秒間アンサンブル音楽を聞くだけでよく、ユーザにとって快適な手法であると考えられ、提案手法はユーザにとって快適な測定手法だと結論付けられる。

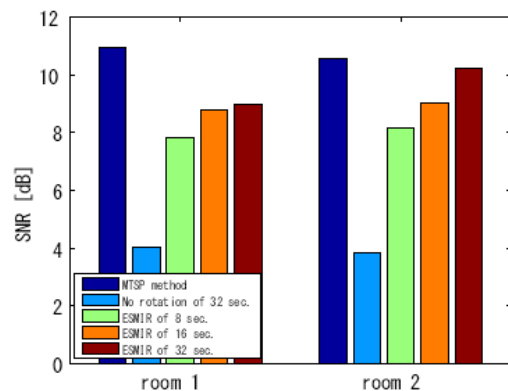


図 3 インパルス応答測定精度に付随する音場制御における逆フィルタ制御精度

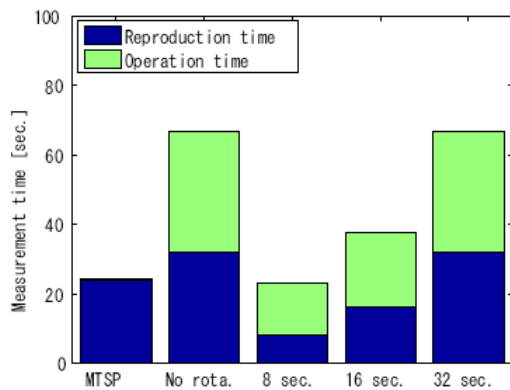


図 4 インパルス応答の実計測時間

(2) 残響構造が音場制御の逆フィルタ処理に与える影響の調査

同一室内において、スピーカ 4 つ・受音点 2 点の音響系を組み、その幾何的配置をそのままに、室内の異なる場所で各インパルス応答を測定することで、異なる後部残響特性を得た。これを特異値分解に基づく分析を行ったところ、残響の情報は伝達関数行列を構成する特異値に相当する部分ではなく、ユニタリ行列にその由来する成分が多く含まれている可能性が示唆された。次に、受音点の近傍において位相特性を調整した伝達関数の性能評価に関する再現精度の改善量を示したものを図 5 に示す。この結果より、受音点の最近傍において改善はみられなかったものの、0.05m 以上離れた点においては若干の改善がみられた。

これらのことから、インパルス応答を構成する伝達関数行列に含まれる残響の特性や、その残響構造は位相補正によって簡単なモデル化ができることが示された。しかしながら、後部残響部分の構造を精緻にモデル化するまでには至らなかった。

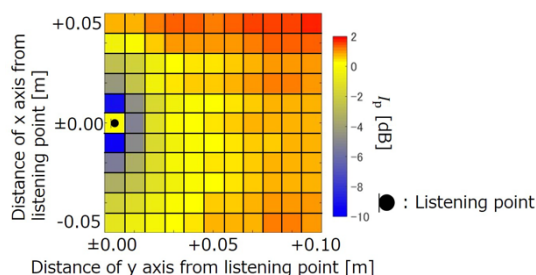


図 5 受音点のインパルス応答情報に基づいて位相補正をかけた場合の、受音点近傍の制御精度改善量

(3) 耐残響性の高い音場制御手法の開発

残響環境下における波面合成型オーディオスポットの音圧分布を抑圧性能として、数値計算で評価した。図 6, 7 にスピーカアレーに対して平行な方向における音圧分布、および、

スピーカアレーに対して鉛直方向における音圧分布を示す。図中の R は数値計算における壁面反射係数であり、1 に近づくほど残響の影響が強くなる。これらの図より、残響の影響が強くなると、抑圧性能が劣化することが確認された。しかしながら図 6 より、 $R=0.5$ 程度であれば、オーディオスポットから 100cm 離れた点で約 11dB の減衰が得られており、極端に反射の影響が強い環境でないならば、十分にオーディオスポットが形成可能と判断できる。一方で、図 7 より、150cm 程度までは残響の度合いに関わることなく、抑圧性能に顕著な劣化が見られないことが確認された。

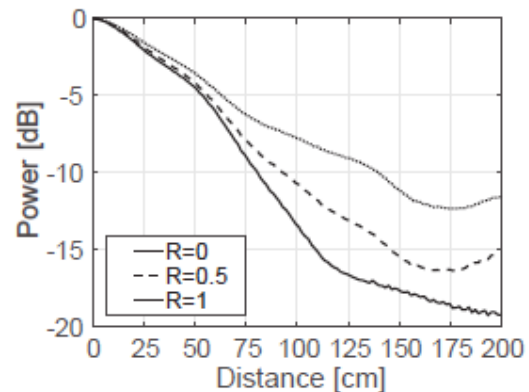


図 6 オーディオスポット中心からみたスピーカアレーと平行な方向の音圧分布

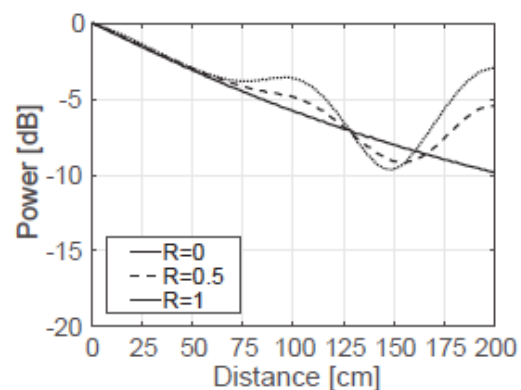


図 7 オーディオスポット中心からみたスピーカアレーと鉛直な方向の音圧分布

(4) マスキングの利用による定位情報の付与

2 ユーザに対して 7 つのスピーカで再生する逆フィルタ型個別音像生成を想定し、マスクを与える側のユーザを中心とした半円上にスピーカを等間隔に並べて、定位感を付与したマスクを再生した。図 8 にマスクのみを再生した場合における各ユーザが観測する音圧レベルを示す。制御を行わなかった場合や従来型制御においては、ユーザ間で音圧レベルに差がなかったのに対して、提案手法を活用することで特定ユーザのみにマスクが提示できていることが明らかとなった。さらに、図 9 に主観評価の低い精度結果を示す。提示角度

と回答角度が一致した正解率を見ると、制御なしでは 79%、従来法が 14%であるのに対し、提案手法では 60%であった。提示させたい方向から直接に音を再生した場合よりは劣るものの、従来法よりも 50%近く改善しており、提案手法の有効性が示された。

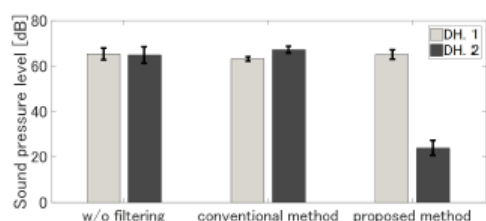


図 8 マスカのみを再現した場合の各手法における音圧レベル

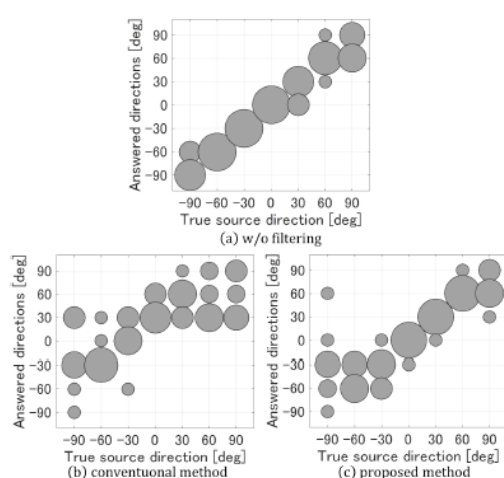


図 9 主観評価における音像定位精度結果

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 17 件)

- ① 牧野雅弘, 立蔵洋介, “特定のエリア内における受聴点移動を考慮した逆フィルタ型音場再現システム,” 電子情報通信学会総合大会, 2018 年.
- ② 蜂須賀大登, 立蔵洋介, “多点音場制御と波面合成を統合した特定エリアへの方向情報を伴う警報音の付与,” 日本音響学会春季研究発表会, 2018 年.
- ③ 牧野雅弘, 立蔵洋介, “逆フィルタ型音場再現システムにおけるプリエコー／アフターエコーの抑圧に関する検討,” 日本音響学会春季研究発表会, 2017 年.
- ④ 宮内悠樹, 立蔵洋介, “2 次統計量 ICA を用いた室内音響インパルス応答の多チャンネル同時測定,” 日本音響学会春季研究発表会, 2017 年.
- ⑤ 堀井慎平, 立蔵洋介, “NBSFC 型音場制御におけるフィルタ設計時の零空間抽出方法の検討,” 日本音響学会春季研究発表会, 2017 年.
- ⑥ 赤松秀治, 立蔵洋介, “残響環境下にお

ける波面合成型オーディオスポットライトの評価,” 日本音響学会春季研究発表会, 2017 年.

- ⑦ Y. Miyauchi and Y. Tatekura, “Utilization of optimal instrument sounds for simultaneous measurement of room impulse responses by ensemble music,” 5th ASA/ASJ Joint Meeting, 2016 年.
- ⑧ S. Horii and Y. Tatekura, “Individual sound image generation by null-space based sound field control under few loudspeakers in real environment,” 5th ASA/ASJ Joint Meeting, 2016 年.
- ⑨ S. Akamatsu and Y. Tatekura, “Audio spotlight system based on formation of multiple focused sound sources via loudspeakers,” 5th ASA/ASJ Joint Meeting, 2016 年.
- ⑩ 赤松秀治, 立蔵洋介, “焦点音源を用いたオーディオスポットライト形成における仮想音源形状の検討,” 日本音響学会秋季研究発表会, 2016 年.
- ⑪ 宮内悠樹, 立蔵洋介, “楽音を用いた室内音響インパルス応答の同時測定における音源分離性能の評価,” 日本音響学会秋季研究発表会, 2016 年.
- ⑫ 小川達也, 立蔵洋介, “室内伝達特性の後部残響成分が逆フィルタ型音場再現に及ぼす影響,” 電子情報通信学会総合大会, 2016 年.
- ⑬ 宮内悠樹, 天野丈, 立蔵洋介, “任意の楽音を用いた室内音響インパルス応答の同時測定における白色雑音の利用,” 電子情報通信学会総合大会, 2016 年.
- ⑭ 堀井慎平, 立蔵洋介, “NBSFC 型個別音像生成における制御点周辺の抑圧性能の実環境評価,” 電子情報通信学会総合大会, 2016 年.
- ⑮ 赤松秀治, 立蔵洋介, “焦点音源形成に基づく仮想線音源を用いた複数音場制御,” 日本音響学会春季研究発表会, 2016 年.
- ⑯ T. Amano, Y. Tatekura, “Multichannel Simultaneous Measurement of Room Impulse Responses Using Instrument Part Sounds of Ensemble Music,” 12th Western Pacific Acoustics Conference 2015 (WESPAC2015), doi:10.3850/978-981-09-7961-4_P11000194, 2015 年.
- ⑰ T. Amano, Y. Tatekura, “Multichannel simultaneous measurement method of room impulse responses based on ESMIR method,” Inter-Academia 2015, 2015 年.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

立蔵 洋介 (TATEKURA, Yosuke)
 静岡大学・工学部・准教授
 研究者番号: 30372519