

令和 5 年 6 月 2 7 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12079

研究課題名（和文）音場の逆フィルタ処理において音響伝達特性の影響はどこまで補正されるべきか？

研究課題名（英文）How extent should the influence of acoustic transfer characteristics in sound field control with inverse filtering be compensated for ?

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） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、逆システム型音場制御において、スイートスポット上で合成された音の品質に影響を与える要因や、体験者が違和感なく自然に再生音を享受できるための条件について検討を行った。体験者の頭部移動に関する影響とその補正の影響を検討したところ、本来の受聴位置から離れるに従って制御精度が悪化するが、簡易的な方法であっても移動距離に応じた補正をかけることで、制御精度の劣化を抑止できることがわかった。また、合成された音を人間に知覚させたときは、音の合成の精度以上に人間の聴覚特性の影響の方がより支配的である可能性が見出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

音場の個人化に関する近年の研究動向として、波面合成方式をベースとしているためにスピーカ数の大規模化を招いているという問題に直面している点が挙げられる。本研究が基盤とする逆システムに基づく手法では、音響伝達特性の変動に弱く、マルチモーダルな拡張現実への柔軟な展開には課題があった。本研究では、比較的少数のスピーカによって身体的に制約の少ない状態で運用可能な可搬性の高いシステムを構築するための基盤的な知見が得られた点に学術的意義や社会的意義があったと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study examined the factors affecting the sound quality synthesized on the sweet spot in the sound field control system with inverse filtering and the conditions for users to enjoy reproduced sound naturally without discomfort.

As a result of studying the influence of user head movement and its correction, it was found that the control accuracy deteriorates when the user moves away from the original listening position, but that a simple correction method based on the distance moved can also suppress the deterioration of the control accuracy.

Furthermore, it was found that the influence of human auditory characteristics may be more dominant in human perception of synthesized sounds than the accuracy of sound synthesis.

研究分野：音情報処理

キーワード：音場制御 逆システム 室内音響伝達特性 聴感の自然性

1. 研究開始当初の背景

光は通すが音は通さない見えない壁を創り出すことで、自分だけに聞こえる音を合成する「音空間の個人化」（以下、SFP: sound eld personalization）は、人類の大きな夢である。この実現のため、数十個のスピーカによって仮想的な波面を形成する波面合成法に基づくアプローチや、空間内の任意のスイートスポット位置の音圧を最大化させるアプローチなどによる音場制御技術の研究開発が盛んである。

研究代表者は、音の反射や回折などの影響を含む伝播過程の特性（音響伝達特性）を打ち消すような信号処理技術を組み合わせた逆システム型音場制御による SFP を構築している。この利点は、波面合成法ほどのスピーカ数を必要としない上、スピーカの配置に制約が少ないことである。しかしながら、逆システム制御では音響伝達特性が時々刻々と変動すると、ある時点で最適化された逆システムが有効に機能しないことがあり、再生音の品質劣化の原因となった。その一方で、逆システムを未更新のまま体験者が入れ替わったときでも、再生音に対する体験者の反応が良好な場合もあることから、逆システムによる音場制御には未解明なメカニズムも多い。

研究代表者は、10 年近く前に音場制御に基づく SFP システムを構築した。これまでに、研究代表者の所属する大学のオープンキャンパスや大学祭、高校生向け研究室見学会などの機会に研究デモンストレーションを行い、数百人以上の見学者に体験してもらっている。本来ならば体験者ごとに逆システムをカスタマイズする必要があるが、時間の制約などで困難なときには、最初にカスタマイズされたものを別の体験者にそのまま利用することもある。このとき、かねてよりの疑問は、元いた体験者用に逆システムがカスタマイズされているにもかかわらず、別の体験者も良好な反応を示すときが少なくないことであった。

数値計算によって逆システムの性能評価を行う場合、体験者ごとに逆システムが正しくカスタマイズされていないと、通常は再現精度などの評価指標が悪化する。これは、体験者ごとに頭・耳の形状や大きさ、体格が異なるため、音響伝達特性も変化することに起因する。しかしながら、この傾向は研究代表者の疑問と整合しない。このことは、逆システムでは、音響伝達特性の個人性の影響が聴感上の品質に必ずしも反映されるものではないことを示している。このような状況から、逆システムの汎化的な成分を正しく制御できていれば個人差の影響を受けにくくし、より自然な聴取ができるのではないかとこの着想を得た。

2. 研究の目的

複数のスピーカ再生を用いた逆システム型音場制御による SFP では、音の伝播過程において生じる反射や残響の影響や回折などによる周波数特性の変化を補正することで、所望の音がピンポイントに再生される。しかしながら、それがどのような機序で制御されていて、どのような操作が聴感上の品質に影響を与えるのか、その詳細はいまだ明らかにされていない。

本研究では、逆システム型音場制御において、スイートスポット上で合成された音の品質に影響を与える要因や、体験者が違和感なく自然に再生音を享受できるための条件を解明する。そのために、次のことを明らかにする。

- ・ 逆システム設計の観点からの室内音響伝達特性の構造分析
- ・ 多くの被験者が高品質であると知覚できる汎化性能の高い逆システム設計手法の構築
- ・ 人間が逆システムを経た音を違和感なく自然なものとして聴取するための条件解明

3. 研究の方法

研究代表者が取り組む逆システム型音場制御に基づく SFP では、どのような操作を行えば体験者にとって再現音の品質が保持されていると知覚されつつ、自然性を付与できるのかが未解明であった。そこで本研究では、スイートスポット上で合成された音に対する聴感上の品質に影響を与える要因を解明し、体験者が違和感なく自然な聴感で再生音を聴取できるための条件を明らかにするため、下記の方法により検討を行った。

(1) 体験者の頭部移動の影響とその補正

逆システム型音場制御では、体験者の頭部が移動すると、制御点である耳の位置のずれに繋がり、その

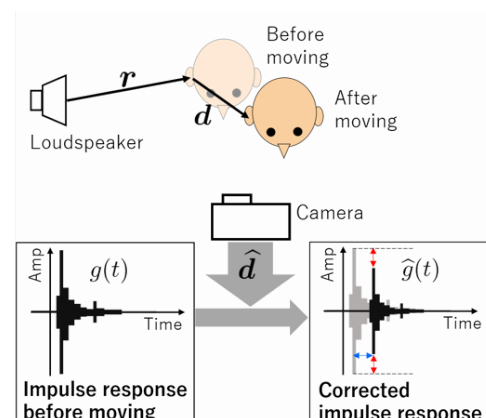


図 1 カメラによる頭部位置の計測とインパルス応答補正の概要

結果として再生音の再現精度が低下する。これは、耳の位置が変化すると、室内音響伝達特性のインパルス応答が当初の測定時と比べて信号に内包される情報とのミスマッチが起こるからである。そこで、図1に示すように、頭部移動前に測定されたインパルス応答を用いて頭部移動後のインパルス応答を模擬し、逆フィルタの再設計をすることで、インパルス応答を再測定することなく再現精度の向上を図る。本研究では、体験者の近傍に設置されたカメラによって耳の位置の変位を計測し、インパルス応答の補正を行った。ここでは、体験者の実頭ではなく、ダミーヘッドを用いて計測した。

(2) 蓄積されたインパルス応答データを用いた汎化逆フィルタ設計手法の構築

逆フィルタに汎化性を持たせるため、従来は逆フィルタ設計時に行列に対する打ち切り特異値分解を用いる方法やTikonovの正則化法などが適用されてきた。これらの正則化手法は数学的な安定性に寄与する方法ではあるが、受聴位置の変動や体験者間の身体性の違いといった物理的な影響が直接的に考慮されたものではないため、身体性に応じた正則化度合いの調整が困難である。



図2 汎化逆フィルタの設計方針

そこで、図2のような概念で、可能な限り同条件で配置されたスピーカと受聴位置で多数の体験者によるインパルス応答を測定し、それらを利用した逆フィルタ設計手法について検討を行った。具体的には、最急降下法の考え方に基づき、身体異なる複数の体験者ごとに測定された各インパルス応答の組み合わせに対して生じる誤差を最小化させるように逆フィルタを更新学習させる。今回は26人のユーザそれぞれでインパルス応答を計測した。

(3) 残響時間の変動に対する逆システム型音場制御の頑健性

音場制御システムを構築する室内の残響時間のみをシミュレーション上で変化させたときの制御精度の変化を調査することで、残響時間が逆システム型音場制御の制御精度や聴感上の印象にどれほど支配的であるのかを調査する。これは、いかなる残響時間の室内に対しても、頑健性に優れた逆フィルタの構築に不可欠な知見となる。具体的には、広さ20m×7m×3.2mの室内を想定し、スピーカ4つで体験者1名の両耳部分を制御することを想定し、残響時間を0.6秒から1.0秒まで変動させて数値計算を行った。

(4) 合成された音を知覚させたときの体験者間の個人差の影響調査

複数の音波が合成されて知覚された音を体験者がどのように感じるのか、その個人差について調査する実験を行った。本来であれば、逆システム型音場制御のシステムを組んで評価すべきところであるが、コロナ禍のためにあまり再生システム運営のための人手を割けなかった。そこで、骨伝導イヤホンを用いてアクティブノイズコントロールを行った際に、体験者が自ら骨伝導音の振幅特性や位相特性を調整させて外部ノイズを最小化させたときの振幅・位相特性の傾向について調査した。普通のイヤホンやヘッドホンではなく、骨伝導イヤホンを用いた理由は、外耳道入口が塞がれるのを避けたためである。

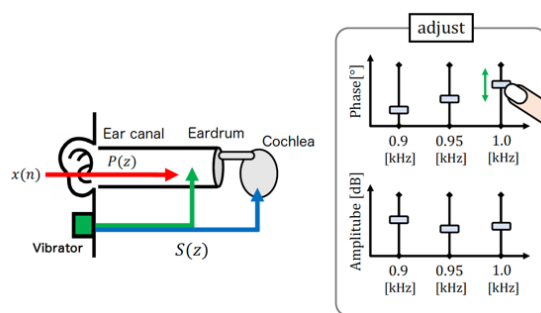


図3 骨伝導イヤホンによるアクティブノイズコントロール

4. 研究成果

(1) 体験者の頭部移動の影響とその補正

図4左にダミーヘッドの移動距離と再現精度としてSNRを計算したときの関係を示す。青色がインパルス応答の補正を行わない場合で、赤色が補正を行った場合である。これより、移動距離に応じてSNRが減少していることがわかる。一方で、補正の有無について比較をすると、ダミーヘッドが後方に20cm以上移動した場合は補正によって2dB程度の改善が見られた。この傾向は、前方や右側に動かした場合も同様の傾向であった。

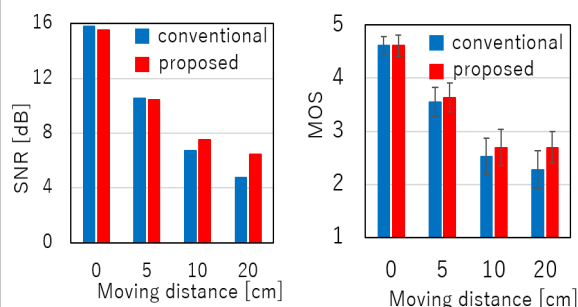


図4 ダミーヘッドの移動と音質の変化

次に、図4右にダミーヘッドの移動距離と体験者による音質の5段階評価結果(MOS値)の関係を示す。ここで、エラーバーは95%信頼区間を表す。ダミーヘッドが後方に移動した場合、全ての移動距離においてインパルス応答の補正を行うことでMOS値の改善がみられた。

これらの結果を鑑みると、インパルス応答の補正を行うことで、受聴位置に変動が生じた場合でも、変動に応じた補正を行うことが有効であると考えられる。また、この補正方法は移動距離に応じてインパルス応答の波形はそのままに遅延(逆遅延)の操作を行っているだけであり、残響構造の補正までは行われていない。これらをまとめると、逆システムにおけるインパルス応答では、直接音の到来時間が支配的であり、残響構造が与える影響については、補正が不十分であっても、聴感上においては致命的な音質劣化には至らないことが考察される。

(2) 蓄積されたインパルス応答データを用いた汎化逆フィルタ設計手法の構築

図5に、提案する汎化逆フィルタの性能評価結果を示す。従来法とは、インパルス応答測定時と音場制御実行時において受聴位置の変動がないことを前提に、逆フィルタを補正していない場合を指し、提案法とは、多数のユーザによって測定されたインパルス応答を用いて汎化させた場合を指す。また、横軸の「一致」とは、インパルス応答測定時と逆システムによる音再生時に受聴位置が同じ場所であることを表し、「不一致」は受聴位置が同一ではない場合を表す。この結果より、受聴位置が一致している場合は信号の再現精度(SNR)が大きく劣化していることがわかる。一方、受聴位置が不一致である場合は、提案法を用いることでSNRが向上した。ただし、一致の場合における劣化量と比較すると、不一致における改善量はかなり小さく、SNRの値としても十分なものではなかった。この理由として、汎化設計手法におけるパラメータチューニングが不十分であることが挙げられる。ただし、再現音に対する主観評価が十分に検討されていないことから、今後、この観点からの評価が行う必要がある。

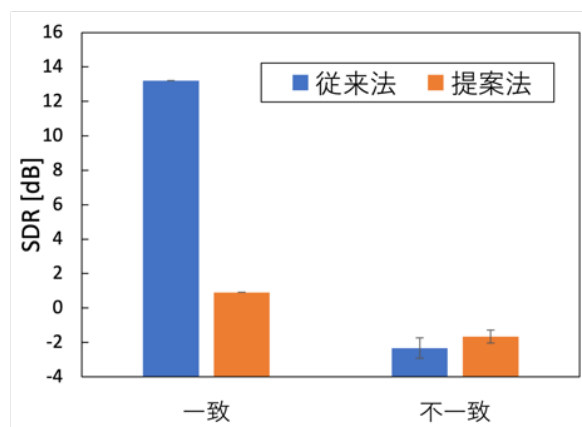


図5 汎化逆フィルタの性能評価

(3) 残響時間の変動に対する逆システム型音場制御の頑健性

図6に、逆フィルタ設計時の残響時間を基準として、音場制御を行うときの残響時間の基準からの時間差を横軸、それに伴う制御精度の低下量を縦軸としたときの結果を示す。これより、残響時間が0.6秒として設計された逆フィルタを用いて音場制御を行った場合、時間差が0.2秒より小さいときは、制御精度の低下量は非線形であったが、時間差が0.2秒を超えると低下量は線形に近づいていることがわかった。一方、残響時間が1.0秒の逆フィルタを用いた場合、時間差が0.15秒より小さいときは、他の場合と比べて線形性が強かった。これらより、残響時間を1.0秒で設計した逆フィルタを用いた方が制御精度の低下が緩やかであると判断できる。このことから、未知の残響時間の室内に対して制御精度が眼瞼となる逆フィルタを設計するためには、逆フィルタ設計時の残響時間を長めに設定することが有効であることが示唆された。

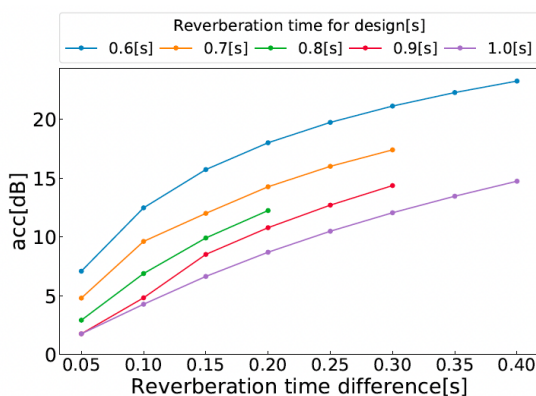


図6 逆フィルタ設計時の残響時間を基準とした再生室内の残響時間との差と制御精度の低下量の関係

(4) 合成された音を知覚させたときの体験者間の個人差の影響調査

図7に、周波数帯域900Hzから1000Hzまでで骨伝導イヤホンによってアクティブノイズコントロールしたときの、被験者10名に外部ノイズの消去量を5段階評価させた結果を示す。図中のsubjectは各被験者を示し、degは被験者ごとに振幅・位相特性を調整した際に最適であったパラメータを示す。この結果より、全ての被験者において優れたノイズ抑制効果が示されていた。一方で、各被験者のパラメータを比較すると、被験者に適したパラメータにばらつきが生じていた。このことから、外部ノイズに対して骨伝導イヤホンによる再生信号を用いて干渉させる合成音を知覚させる場合、再生信号の振幅・位相特性は個人の知覚特性に強く依存する傾向があることが示唆された。

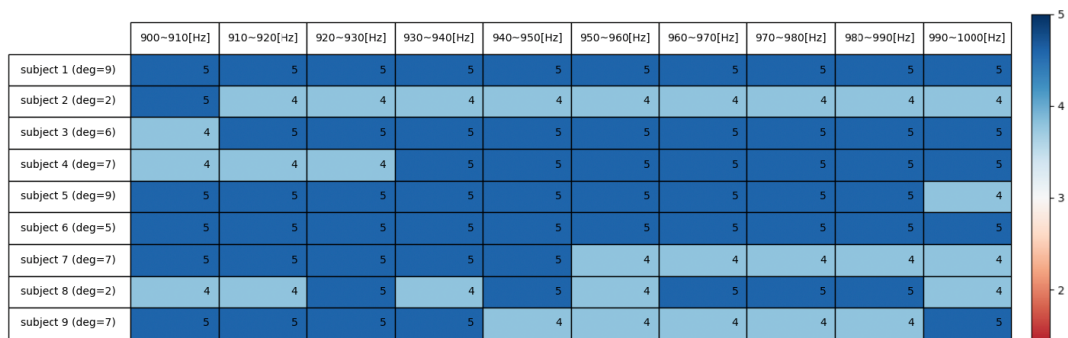


図 7 外部ノイズ信号の抑制効果の結果.

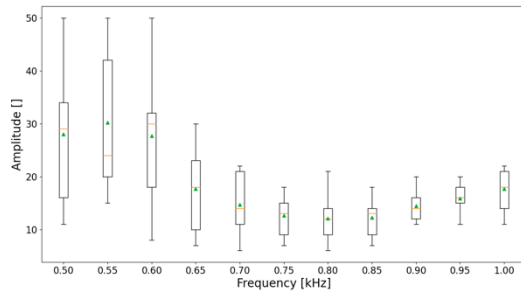


図 8 被験者 9 名が調整した振幅値

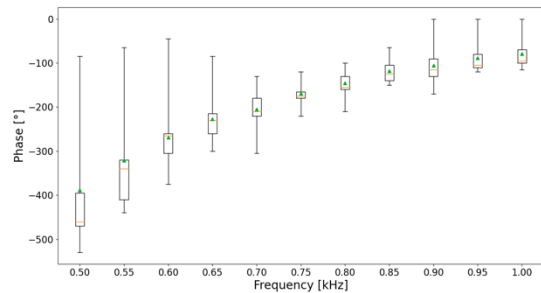


図 9 被験者 9 名が調整した位相値

前述の傾向を確認すべく、周波数帯域 500Hz から 1000Hz において、被験者が実際に調整した振幅値と位相値をそれぞれ図 8, 図 9 に示す. これらの結果より、周波数が低くなるほど分散が大きくなる傾向が示された. この傾向が図 6 における被験者間でのパラメータのばらつきに関連していることが考えられる.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 酒井賢人, 立蔵洋介
2. 発表標題 骨伝導イヤホンを用いたアクティブノイズコントロールによるフィードバック制御の検討
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 関根海渡, 竹内太法, 立蔵洋介
2. 発表標題 パラメトリックスピーカを用いた逆フィルタ型音場制御
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井賢人, 竹内太法, 立蔵洋介
2. 発表標題 逆システム型音場制御の残響成分の変動に対する頑健性の調査
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 望月海渡, 竹内太法, 立蔵洋介
2. 発表標題 複数ユーザを対象とした逆フィルタ型音場制御への画像情報の活用
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 望月海渡, 竹内太法, 立蔵洋介
2. 発表標題 画像情報の活用による受聴者の頭部移動を考慮した逆フィルタ型音場制御
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

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