

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11872

研究課題名（和文）残響・騒音環境下におけるスピーカ音響特性測定の高品質化の研究

研究課題名（英文）Improvement of the measurement quality of loudspeaker characteristics under reverberant/noisy conditions

研究代表者

金田 豊（Kaneda, Yutaka）

東京電機大学・工学部・研究員

研究者番号：20328511

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：小規模な無響室内においてスピーカのインパルス応答測定を行う場合、低周波域の壁反射音の影響が無視できない。基本的な対策は、反射音が到来する時刻までの直接音部分を切り出すことである。しかし、低周波域ではスピーカの応答が遅延するため、低周波域の応答の一部が切り捨てられて誤差が発生する。本研究では、近接測定によりスピーカの群遅延特性を測定し、その逆フィルタで低周波域の遅延を補正した後、切り出しを行う方法を提案し、反射音の影響を大幅に低減できることを示した。また、加えて、雑音低減効果を持つ測定法や、少数の計測からその周辺の初期インパルス応答を推定する手法の改善とその音場制御への応用を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

音響インパルス応答は、さまざまな音響特性量が導出できる基本特性量であるため、その高品質な計測は大変重要である。しかし、音場には雑音や反射音が存在し、品質劣化要因となる。本研究で提案した反射音、雑音の軽減方法は、無響室に限らず一般室にも拡張可能と考えられ、これらの問題に対する改善策を与えたものと考えられる。また、音場制御等において多数のインパルス応答が必要となるが、本研究が提案した推定方法は効果的と考えられる。

研究成果の概要（英文）：Low-frequency reflective sounds degrade the measurement results of the impulse response of a loudspeaker in a small-scale anechoic room. A basic countermeasure entails cutting out the direct sound before the arrival time of the reflective sounds. However, since the response of a loudspeaker is delayed in the low frequency range, part of the response in the low frequency range is truncated, resulting in measurement errors. In this research, we propose a method of obtaining the group delay of a loudspeaker from near-field measurements, correcting the delay in the low-frequency range by using an inverse filter, and extracting the direct sound. We confirm that the proposed method can greatly reduce the effect of reflective sounds. Moreover, we propose a measurement method with noise reduction and improve the estimation method for early impulse responses around a microphone array from a small number of measurements to investigate its potential application to sound field control.

研究分野：音響信号処理

キーワード：スピーカ特性 インパルス応答 反射音低減 群遅延 逆フィルタ 無響室 等価音源モデル 虚像法

1. 研究開始当初の背景

(1) 音響インパルス応答は、音響機器の周波数特性を始めとした、さまざまな音響特性量が導出できる基本特性量である。したがって、インパルス応答の高品質な計測は大変重要である。しかし、音場には室反射音や雑音が存在し、品質劣化要因となる。この問題に対して、様々な改善方法が提案されてきたが、反射音の低減方法に関しては、反射音の低減に伴う目的特性の劣化が問題であった。

(2) 雑音の低減方法に関しては、雑音低減量の周波数依存性が問題であった。

(3) 音場の空間的な特性を把握や音場制御においては、多数個所のインパルス応答が必要であるが、計測に長時間が必要となる問題があった。

2. 研究の目的

(1) 反射音の影響を軽減するインパルス応答測定方法の開発。

(2) 周波数依存性のない雑音抑圧を行うインパルス応答測定方法の確立。

(3) 到来時間に基づいた反射音グループ化を用いた少数のインパルス応答から多数個所のインパルス応答を推定する手法の確立。

3. 研究の方法

(1) 反射音の影響を軽減する方法として、インパルス応答の直接音部分の切り出しが有効である。その際、直接音の低周波成分の遅延を補正することで、切り出しによる直接音部分の劣化を軽減する手法を検討する。

(2) 雑音低減に関しては、これまで研究を進めてきた BMN 信号測定法の理論整備を行う。

(3) 予測される反射音到来時間の近い反射音をグループ化し、グループごとに音波の物理モデルを用いて音場をモデル化する手法を検討する。

4. 研究成果

(1) 音響インパルス応答に含まれる反射音の影響軽減

① はじめに

スピーカなど、音響機器の特性は、最初にインパルス応答を測定して、インパルス応答から計算によって求めることが一般的である。通常の実験室でインパルス応答を測定する場合、室内の騒音や反射音により測定品質が劣化する。そこで、インパルス応答の測定は、反射音や雑音が小さい無響室や無響箱で行われる。しかし、無響室においても、壁面などからの若干の反射音が存在し、測定結果に影響を及ぼす場合がある。この影響は、吸音くさびが小さく、また、壁面からの距離を十分に大きく取れない小規模の無響室において、より大きくなる。

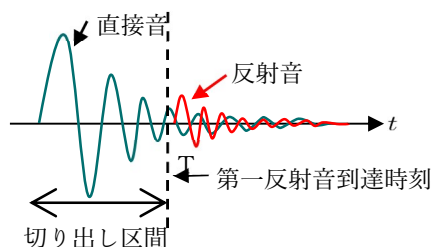


図1 反射音の重畳と切り出しのモデル図。

② 従来技術の問題点

反射音の影響を除去する従来の代表的手法は、切り出し法である。図1は、反射音が重畳したインパルス応答のモデルである。所望の音響機器のインパルス応答は直接音であり、反射音は品質劣化要因である。スピーカ・マイクロホン配置と、壁（および床・天井）までの距離が分かれば、第一反射音が到達する時刻は計算によって求めることができる。

切り出し法は、第一反射音到達時刻までのインパルス応答を切り出す方法である。切り出し法を用いることで、反射音を含まない直接音成分を得ることができる。しかし、直接音成分が第一反射音到達時間以降も持続していると、それを切り捨てることになり、誤差要因となる。

図2は、無響室で測定したスピーカ (BOSE 101MM) のインパルス応答のスペクトログラムである。この時の第一反射音到来時刻は 6ms (図の黒破線) であった。図より、200Hz 以上の周波数では、スピーカの応答は 6ms 以内でほぼ収束しており、6ms で切り出しても直接音の大半のエネルギーが含まれていることが分かる。

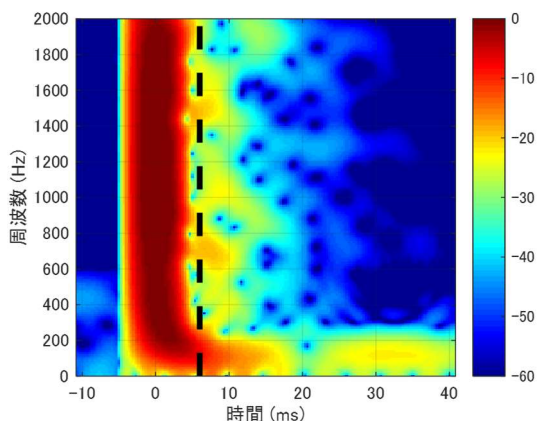


図2 標準条件(1m)で測定したスピーカのインパルス応答のスペクトログラム。黒破線は切り出し時刻。

これに対して、200Hz 以下の低周波数では応答の立ち上がりが遅延しており、応答全体も 6ms を超えて継続している。したがって、6ms で切り出した場合には直接音のエネルギーの一部が失われて、測定誤差が発生する可能性がある。

③ 問題の解決方法（群遅延逆フィルタ）

スピーカの群遅延特性は、その周波数成分のエネルギーの遅れを表している。そこで、群遅延逆フィルタを用いて、低周波域の遅れを補正し、その後切り出しを行うことを考えた。スピーカを近接位置（5cm）で測定した結果は、低周波域では、標準位置（1m）での測定結果を近似することが知られている。そこで、近接測定で得られた群遅延特性に基づいて、群遅延逆フィルタを構成した。

図 3 に近接位置で測定した群遅延を示す。100Hz では、約 7ms の遅延を持っており、図 2 に示される低周波数成分の遅れに対応している。この群遅延特性において 500Hz 以上は群遅延を一定（0ms）として、振幅特性が全周波数で一定の群遅延逆フィルタを計算した。

標準条件で測定したインパルス応答（図 2）に対して、群遅延逆フィルタで低域の遅れを補正したもののスペクトログラムを図 4 に示す。図 2 と図 4 を比較すると、群遅延逆フィルタをかけた図 4 では、200Hz 以下の低周波域の立ち上がりの遅れが補正されており、6ms（図の黒破線）で切り出しても、直接音のエネルギーが失われる割合が大幅に減少するため、切り出しによる誤差の軽減が期待される。

④ 有効性の確認

提案手法の有効性を確認するために、a) インパルス応答全体、b) インパルス応答を 6ms で切り出したもの、c) 群遅延逆フィルタで遅延補正後に 6ms で切り出したもの、それぞれから計算した周波数応答を求め、図 5 に示した。図より、インパルス応答全体より計算した周波数応答（青）は、100Hz 付近で反射音の影響により、大きな凹凸ができています。またこれを 6ms で切り出した周波数応答（緑）は、反射音が除去されて特性の凹凸は無くなっているが、直接音成分を切り捨てた影響で、100Hz 付近の応答レベルが低下している。これに対して、群遅延補正後に切り出しを行う提案法の結果（赤）では、反射音の影響である凹凸も消えており、また 100Hz 付近の応答レベルも低下していない。

この図 5c) の特性が、正しいかどうかを確認するために、反射物の無い屋外で測定を行った。測定は、地上にスピーカ・マイクロホンを設置して行った。この場合、地面からの反射音は、直接音と短い時間差で到来するため、低周波数域の特性には影響を与えず、低周波数域では測定の正解とみなすことができる。

図 6 に、屋外測定の結果と、無響室測定に提案法で求めた結果を示す。両者は 1dB 以内の差で一致しており、提案法の有効性が確認できた。

以上述べたように、測定したインパルス応答に群遅延逆フィルタをかけて低周波域の遅延を補正した後切り出すことで、低域特性の劣化無く、反射音の影響を軽減できることが確認できた。

(2) 雑音の影響を軽減するインパルス応答測定法

一般に室内騒音は低周波成分が大きく、測定結果に対する SN 比が低周波域で劣化する。この問題を改善するインパルス応答測定信号として、ESS 信号などが提案されてきたが、周波数帯域ごとのインパルス応答ピーク値対雑音レベルは、変動が大きいケースが見られた。この問題に対して筆者らは、実験室の雑音と伝達関数を予備測定することにより、周波数によらず一定の雑音レベルを持つインパルス応答を得る測定信号(BMN 信号)を提案した。本研究では、その理論的裏付けを補強し、学術論文を作成した。

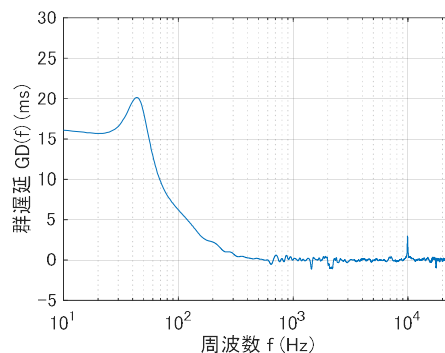


図 3 スピーカの群遅延特性 $GD(f)$ 。

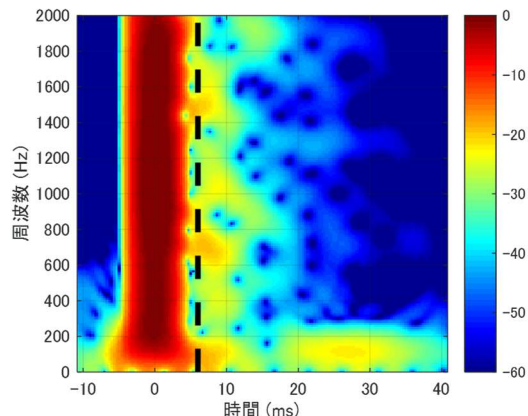


図 4 測定したインパルス応答に群遅延逆フィルタをたたみ込んだ結果のスペクトログラム。黒破線は切り出し時刻。

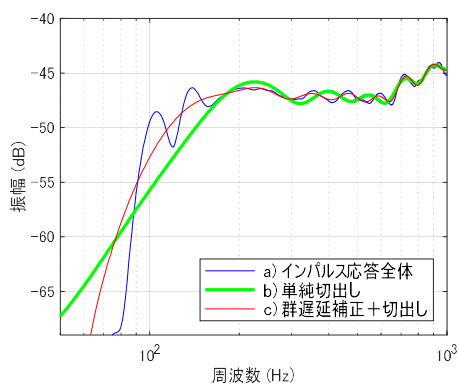


図 5 a) インパルス応答全体、b) 6ms で切り出したもの、c) 群遅延逆フィルタ適用後、6ms で切り出したもの、それぞれから計算した周波数応答。

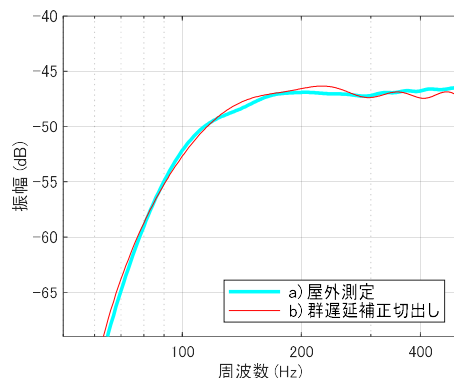


図 6 a) 屋外で測定したインパルス応答、b) 群遅延逆フィルタ適用後 6ms で切り出したもの、それぞれから計算した周波数応答。

(3) 少数のインパルス応答からマイクロホン周辺の多数のインパルス応答を推定する方法

① はじめに

音は空間を広く伝搬し、何度も反射を繰り返して計測点まで到来するため、位置によって室内インパルス応答が大きく異なる。特に、音場の制御や可視化など、音の空間情報が重要となる場合、多箇所点の室内インパルス応答の計測が必要となるが、マイクロホンを測定点ごとに設置しなおして繰り返し計測する必要があり、計測の長時間化が課題となっていた。

② 従来技術の問題点

近年、平面波分解法や等価音源法を代表とした、音波の物理モデルに基づいた少ない計測データから室内インパルス応答を補間する手法が注目されている。しかし、従来技術では、推定精度が充分ではなく、また、内挿法に重点が置かれているため、マイクロホンを空間に広く設置する必要があるなどの課題があった。一方、部屋形状と音波の物理モデルを用いて、局所的に配置されたマイクロホンから室内インパルス応答の外挿を試みる研究も行われてきたが、反射音の数が増えるにつれて、問題の規模が大きくなりすぎるため、推定精度が低下するという課題があった。

③ 問題の解決方法（時間領域での信号分解を用いた音場のモデル化）

室内インパルス応答の空間補間の精度向上を目的として、時間領域分割を用いた音波の物理モデルに基づく室内インパルス応答の推定を行う。まず、事前に計測されたおおよその部屋の形状情報とマイクロホン配置に基づいて、反射音の到来時間を予測する。予測到来時間の近い反射音をグループ化し、グループごとに時間領域で分解する。その後、分割した信号ごとに周波数領域上で、音波の物理モデルを用いた表現行列を用いて室内インパルス応答をモデル化する。時間分割を行うことで、問題が分割され、個々の表現行列のサイズが小さくなるため、室内インパルス応答の推定精度の向上が見込める。

④ 有効性の確認

提案手法の有効性を確認するため、シミュレーション実験によって(a)推定精度の評価 (b) 可視化への応用 (c) 音場再現への応用を実施した。以下に順に説明する。

(a) 推定精度の評価

図7に推定精度の比較結果を示す。上図は、時間分割を使わずにモデル化した場合で、下図は提案手法である。提案によって、SNRで約20dBの改善が見られ、推定可能な範囲も大きく広がっており、提案手法の有効性が確認できた。特に推定された室内インパルス応答波形のノイズが大きく低減しており、提案手法が有効であることが確認できた。

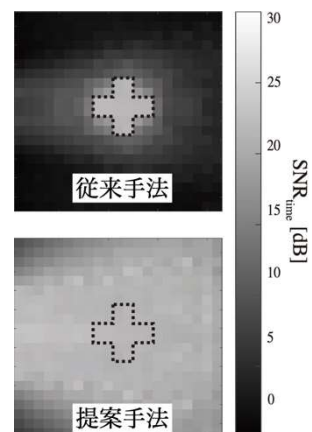


図7 推定精度の例

(b) 可視化への応用

図8は可視化の比較結果である。従来手法では、音源付近に大きなエイリアシングが生じているのが確認されるが、提案手法ではエイリアシングが大きく低減している。また、本来であれば、異なる位置から生じた反射の波面が、従来手法では、直接音と誤認されて波面が形成されているが、こちらも提案手法によって大きく改善が見られ、提案手法によってより高い精度での音場の可視化が可能であることが確認された。

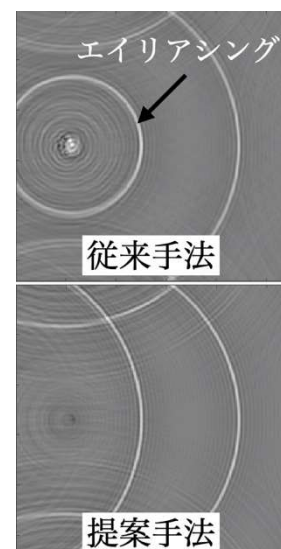


図8 可視化例

(c) 音場再現への応用

音場再現や音場制御技術において、スピーカから制御領域へのインパルス応答の計測は重要である。物理モデルを用いた音場推定手法を音場再現に適用した。一般には計測が問題となり、実装が困難な Pressure Matching 法を音場のモデル化によって、制御領域を自由に制御可能となる。特に反射音も含めたモデル化によって反射音の影響を考慮した音場再現が可能となり、反射音が積極的に利用可能な状況下では、スピーカが存在視角度からの波面に対して約10dBの音場再現精度の改善がみられ、スピーカ数が限定された条件下でもより広範囲の到来方向に対して波面を合成可能であることが、シミュレーション実験によって明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakahara Yuki, Iiyama Yohei, Ikeda Yusuke, Kaneda Yutaka	4. 巻 70
2. 論文標題 Shortest Impulse Response Measurement Signal That Realizes Constant Normalized Noise Power in All Frequency Bands	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Audio Engineering Society	6. 最初と最後の頁 24 ~ 35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.17743/jaes.2021.0048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 樋口 達也、金田 豊、陶山 健仁
2. 発表標題 小規模無響室における反射音の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 応用音響研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Haruka MATSUHASHI, Izumi TSUNOKUNI, Yusuke IKEDA
2. 発表標題 Sound Field Visualization based on Sparse Equivalent Source Method using Image Sources Grouped by Arrival Time
3. 学会等名 24th International Congress on Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Haruka MATSUHASHI, Izumi TSUNOKUNI, Yusuke IKEDA
2. 発表標題 Spatial Interpolation of Early Room Impulse Responses Using Equivalent Source Method Based on Grouped Image Sources
3. 学会等名 InterNoise 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小畑悠矢, 鈴木薫佳, 津國和泉, 池田雄介
2. 発表標題 等価音源法を用いた Pressure Matching 法に基づく 反射音を利用した 3 次元音場再現の基礎的検討
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本綾太, 鈴木薫佳, 津國和泉, 池田雄介
2. 発表標題 物理モデルを用いた Pressure Matching 法における 周波数に応じた音場再現領域の可変
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木薫佳, 松橋遼, 津國和泉, 池田雄介
2. 発表標題 物理モデルを用いた Pressure Matching 法に基づいた 動的 2.5 次元局所音場再現
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小高 綾也、金田 豊、陶山 健仁
2. 発表標題 無響室で測定したインパルス応答に含まれる反射音低減手法
3. 学会等名 電子情報通信学会 東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西村 英樹、金田 豊、陶山 健仁
2. 発表標題 残差パワーを最小化する直線回帰区間に基づく残響時間測定
3. 学会等名 電子情報通信学会 東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Haruka Matsuhashi, Izumi Tsunokuni, Yusuke Ikeda
2. 発表標題 Comparison of Estimation Methods of Room Impulse Responses in Local Region Using Small Number of Microphones
3. 学会等名 Porc. of InterNoise 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Haruka Matsuhashi, Izumi Tsunokuni, Yusuke Ikeda, Naotoshi Osaka
2. 発表標題 Numerical Simulation of Room Transfer Function Extrapolation using the Equivalent Source Method
3. 学会等名 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruka Matsuhashi, Izumi Tsunokuni, Yusuke Ikeda, Naotoshi Osaka
2. 発表標題 Extrapolation of Spatial Transfer Functions for Primary Reflections with Equivalent Sources
3. 学会等名 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (国際学会)
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
研究 分担 者	池田 雄介 (Ikeda Yusuke) (80466333)	東京電機大学・未来科学部・教授 (32657)	

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