

境界音場制御における逆フィルタの設計指針が音場に与える影響*

☆浅井 拓朗, 高以良 光, 尾本章 (九大芸工, JST/CREST)

1 はじめに

境界音場制御 [1] などの音場再生手法においては、再生音場の特性を打ち消すための逆フィルタが再現性能やシステムの安定性を左右するため、逆フィルタの設計手法に関する研究が盛んに行われている。また、それらの研究においては、設計した逆フィルタの評価は主に波形の再現誤差や条件数などの物理指標が用いられている。しかし、音場再生においては原音場の空間的特徴の再現も重要になってくるため、上記の指標に加え、原音場の空間的特徴を表す指標を用いた評価も必要であると考えられる。そこで、本研究では、設計方法や設計時のパラメータの異なる逆フィルタを使用した際の原音場の再現性能の違いを、いくつかの代表的な室内音響物理指標を用いて評価することを試みた。

2 逆フィルタの設計手法と安定化

以下に、周波数領域での逆フィルタの設計方法、及びフィルタの安定化法について述べる。

制御点数 m 、二次音源数 n の逆システムにおいて、制御点で得られる信号ベクトル $\mathbf{Y}(\omega) = [Y_1(\omega), \dots, Y_m(\omega)]^T$ (ただし、 $[\cdot]^T$ は転置を表す) は以下のように表される。

$$\mathbf{Y}(\omega) = \mathbf{G}(\omega)\mathbf{H}(\omega)\mathbf{X}(\omega) \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{X}(\omega) = [X_1(\omega), \dots, X_m(\omega)]^T$ は再現したい音源の信号ベクトル、 $\mathbf{H}(\omega)$ は n 行 m 列の逆フィルタ、 $\mathbf{G}(\omega)$ は制御点 i 、二次音源 j 間の伝達関数 $G_{ij}(\omega)$ を要素とする、 m 行 n 列の伝達関数行列である。ここで、 $\mathbf{Y}(\omega) = \mathbf{X}(\omega)$ とするためには、逆フィルタ $\mathbf{H}(\omega)$ は、 $\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{G}(\omega)^{-1}$ となる必要がある。

$\mathbf{G}(\omega)$ のような非正方行列の逆行列を求める方法として一般的に用いられているものが、Moore-Penrose の擬似逆行列である。伝達関数 $\mathbf{G}(\omega)$ は、以下のように特異値分解できる。

$$\mathbf{G}(\omega) = \mathbf{U}(\omega)\mathbf{\Sigma}(\omega)\mathbf{V}(\omega)^H \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{U}(\omega)$ と $\mathbf{V}(\omega)$ はそれぞれ m 行 m 列、 n 行 n 列の固有ベクトル行列であり、ユニタリ行列である。また、 $[\cdot]^H$ はエルミート転置、 $\mathbf{\Sigma}(\omega)$ は特異値 $\sigma_i (i = 1, \dots, \min(m, n))$ を対角要素に持つ m 行 n 列の特異値行列である。これらの行列を用いて、Moore-Penrose の擬似逆行列は以下の様に表される。

$$\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{V}(\omega)\mathbf{\Sigma}(\omega)^{-1}\mathbf{U}(\omega)^H \quad (3)$$

ただし、 $\mathbf{\Sigma}(\omega)^{-1}$ は特異値の逆数 $1/\sigma_i$ を対角要素に持つ n 行 m 列の行列である。

この手法の問題点として、値の小さな特異値の逆数を取った場合、逆数の値が大きくなり過ぎ、その特異値に対応する雑音成分が増幅されてシステムが不安定になってしまう、ということが挙げられる。この影響を軽減する手法として、打ち切り特異値分解 (Truncated Singular Value Decomposition : TSVD) が広く用いられている。これは、特異値の逆数を大きい物から順にいくつか選び出し、その値を 0 と置き換える、という手法である。また、置き換える特異値の個数を打ち切り数と呼ぶ。また、打ち切る代わりに、ある閾値を設け、特異値の逆数がその閾値を超えた際は閾値の値と置き換える、という手法がとられることもある。

本研究では、これらの設計手法における打ち切り数や閾値、また周波数分解能を変えた際の音場の再現度の変化を、室内音響物理指標を用いて評価を行った。

3 実験手続き

3.1 音源と再生システム、及びパラメータ設定

音源は、九州大学内の録音スタジオ、及びホールにおいて、80 ch のフラール型マイクロホンで録音した Pink Swept-Sine 信号を用いた。また、境界音場制御を実現するシステムとして、96 ch の再生システム「音響樽」を用いた。使用した伝達関数長は 4096 tap, FFT 点数は 8192 tap, 設計対象周波数は 20~20000 Hz とした。

3.2 採用した設計指針

3.2.1 TSVD による設計

設計対象周波数内の全ての周波数ビンに含まれる特異値の逆数をソートし、大きいものから順に T 個を選択し、0 と置き換えて元の行列に格納することにより打ち切りを行った。その際、打ち切り数 T を $2^4, 2^5, \dots, 2^{17}$ と変化させて逆フィルタを設計した。

3.2.2 条件数の上限規定による設計

各周波数ビンごとの条件数 $cond(\omega)$ は次式で与えられる。

$$cond(\omega) = \frac{\sigma_{max}(\omega)}{\sigma_{min}(\omega)} \quad (4)$$

本実験では、各周波数ビンにおいて、特異値の最大値の $1/N$ (N は 1 以上の実数) の値を特異値の下限値と

*The effect of design method of inverse filters on objective parameters of re-produced sound field in boundary surface control. by ASAI, Takurô, TAKAIRA, Hikari, OMOTO, Akira (Faculty of Design, Kyushu University, JST/CREST)

し、それよりも小さい特異値を下限値と置き換えることで、条件数を N 以下に抑える手法を採用した。本実験では N の値を $2^1, 2^2, \dots, 2^{14}$ と変化させて逆フィルタを設計した。

3.3 異なる周波数分解能条件における比較

上記の設計指針に加え、FFT 点数を変化させた逆フィルタの設計も行った。打ち切り数 $T = 8000$ 、条件数上限 $N = 30$ のそれぞれの場合において、FFT 点数を 4096, 8192, 16384, 32768 tap に変化させて逆フィルタを設計した。

3.4 評価指標

本実験では、原音場で録音した Pink Swept-Sine 信号に設計した逆フィルタを畳み込み、システム内で再生し、制御領域内で測定を行った。その後、原音場と再生音場の物理指標値を算出し、比較を行った。今回用いた物理指標値は、残響時間 RT, 明瞭性指標 C 値と D 値, 時間重心 Ts, 側方からの到来エネルギー率の LF であり、ISO 3382 に基づきオクターブバンドごとに算出した。

4 実験結果と考察

TSVD により設計した逆フィルタを用いて録音スタジオの音場を再現した際の、C 値の再現誤差（再現音場と原音場のそれぞれで得られた指標値の差分）を Fig. 1 に示す。図より、125Hz, 1000Hz を中心周波数とする帯域においては $T = 16384$ 以上において再現誤差が 0 近辺に収束していることがわかる。また、条件数の上限規定をした逆フィルタに関しても $N = 16$ 以下において誤差が 0 近辺に収束するという結果が得られた。また、RT, D 値, Ts に関しても、 T や N の値を変化させると誤差が 0 近辺に収束する、という結果が得られた。これより、室内音響物理指標を用いて逆フィルタの評価は可能であり、指標の再現精度を基準とすることで適切なパラメータ選択ができると考えられる。

また、LF に関しては TSVD, 条件数上限規定のどちらの場合も、再現誤差が収束に向かわない帯域が多く見受けられた。LF は双指向性マイクロホンで録音したインパルス応答を用いる指標であり、再現音場の評価に用いることで音波の到来方向の再現度をみることができると考えられる。逆フィルタのパラメータを変化させても LF の値が変化しなかったことから、音波の到来方向の再現度が低い原因が別に存在する可能性が考えられる。また、今回用いた設計指針では音波の到来方向の再現度の改善が難しいと考えられる。

Fig. 2 中の赤線は、TSVD において $T = 32768, 65536, 131072$ とした際の、周波数ビンごとの打ち切

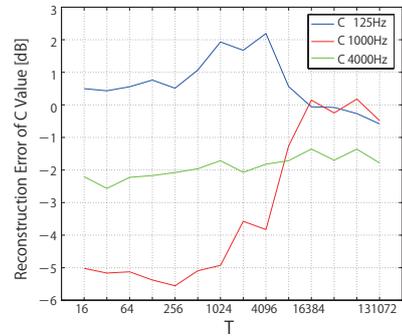


Fig. 1 Reconstruction error of C value

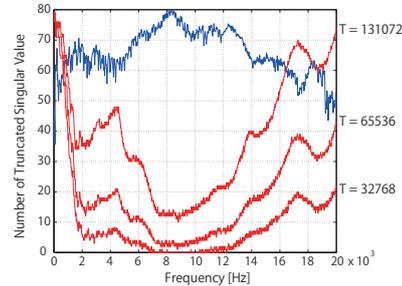


Fig. 2 Frequency response of the number of truncated singular value

られた特異値の数を表している。また、図中の青線は、制御点-二次音源間の伝達特性から一つ選び、その周波数特性のデシベル値をプロットしたものである。グラフより、周波数特性の谷となっている周波数ビンにおいて、より多くの特異値を打ち切っていることがわかる。このことから、今後、伝達特性の周波数特性を元にした逆フィルタ設計法を確立することで、効率的にロバストな逆フィルタを得ることができるのではないかと考えられる。

また、FFT 点数を変化させ、異なる周波数分解能において逆フィルタを設計したが、分解能による再現誤差の違いは見られなかった。これは、隣接する周波数ビン同士の最適な打ち切り数や条件数が似通った値であるため、分解能を荒くして広い周波数幅に同じパラメータを与えても再現誤差が変わらなかったのだと考えられる。今後、パラメータを設定するための最適な帯域幅を検討していくことで、パラメータ導出や逆フィルタ設計に要する時間の短縮につながると考えられる。

5 まとめ

逆フィルタの設計指針による影響を、室内音響物理指標を用いて評価を行った。逆フィルタの安定化に関するパラメータを適切に設定することで、無指向性の室内音響物理指標値に関しては高い再現性能を得られることがわかった。

参考文献

- [1] 伊勢史郎, “キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理,” 日本音響学会誌, Vol. 53, pp. 706-713, 1997.