

反射音を考慮した等価音源法に基づく Pressure Matching 法による 2.5 次元音場合成

鈴木 薫佳[†] 津國 和泉[†] 松橋 遼[†] 池田 雄介[†]

[†] 東京電機大

1 はじめに

高い臨場感の音空間の再現を目指し、多数のスピーカを用いた音場制御手法が研究されてきた。その一つである Pressure Matching (PM) 法では、再現領域を離散化した多数の制御点に対して、所望の音圧と一致するようにスピーカを制御する。スピーカから多数の制御点までの伝達関数を事前に測定すれば高精度に制御可能ではあるが、その測定は容易ではない。

一方、我々は等価音源法 [1] に基づいて少数の測定から広範囲の伝達関数を推定し、効率的に PM を行う手法を提案してきた [2]。これまで、スピーカからの直接音のみを考慮した場合における手法の有効性が確認された [3]。しかし、一般に、スピーカアレイ自体の反射音等、再現を行う音場には反射音が含まれる。

そこで本研究では、虚像法 [4] と等価音源を用いて、一次反射音までを含めた伝達関数をモデル化し、その伝達関数を用いた PM 法の有効性を確認する。

2 虚像法と等価音源法を用いた PM 法

2.1 一次反射音を含むスピーカ伝達関数のモデル化

虚像法と等価音源法を用いて、スピーカから制御点までの伝達関数をモデル化する。はじめに、スピーカとマイクロホンのおおよその位置は既知であるとする。周波数領域上では、一次反射音を含めた m 番目のマイクロホンに対するスピーカからの伝達関数は

$$y_m = y_m^{(0)} + \dots + y_m^{(l)} + \dots + y_m^{(L)} \quad (1)$$

となる。ここで、 $y_m^{(0)}$ は直接音、 $y_m^{(l)}$ は l 番目の壁で反射した一次反射音を表す。

等価音源法に基づき、直接音の伝達関数 $y^{(0)}$ は、スピーカの位置の周囲に配置した多数の点音源の伝達関数の線形和で表す。また l 番目の壁に反射した一次反射音 $y^{(l)}$ は、直接音位置に対して壁面に対称な位置にある虚像音源から到来することが仮定できるため、その虚像の位置に配置した多数の等価音源の伝達関数の線形和によって表す。

Pressure-matching method for 2.5D sound field synthesis with modeling reflected sounds by equivalent sources

[†] Yukika SUZUKI (18f066@ms.dendai.ac.jp)

[†] Izumi TSUNOKUNI (21udc02@ms.dendai.ac.jp)

[†] Haruka MATSUHASHI (21fmi18@ms.dendai.ac.jp)

[†] Yusuke IKEDA (yusuke.ikeda@mail.dendai.ac.jp)

Tokyo Denki University ([†])

したがって、位置を x'_m にある m 番目のマイクロホンに対する l 番目の壁からの一次反射音を含むスピーカからの伝達関数は以下ようになる。

$$y_m^{(l)} = \mathbf{z}_m^{(l)} \mathbf{w}_m^{(l)} \quad (l = 0, 2, \dots, L) \quad (2)$$

$$\mathbf{z}_m^{(l)} = [Z(x'_m, x_1^{(l)}), \dots, Z(x'_m, x_N^{(l)})] \quad (3)$$

$$\mathbf{w}_m^{(l)} = [w_1^{(l)}, \dots, w_N^{(l)}]^T \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{z}^{(l)} (\in \mathbb{C}^{1 \times N})$ はスピーカ周囲に配置された等価音源 ($n = 1, \dots, N$) から m 番目のマイクロホンまでの伝達関数ベクトルで、Green 関数を用いて解析的に求まる。 $\mathbf{w}_m^{(l)}$ は等価音源の重み係数ベクトルである。

式 (2) は、音源およびすべての反射音、すべてのマイクロホンに対して成り立つため、まとめて表現できる。したがって、全てのマイクロホン信号をベクトル化した $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_M]^T$ 、等価音源からマイクロホンまでの伝達関数をまとめた行列 $\mathbf{Z} (\in \mathbb{C}^{M \times (N \times (L+1))})$ 、そして、すべての重み係数をベクトル化した $\mathbf{w} (\in \mathbb{C}^{(N \times (L+1)) \times 1})$ を用いて $\mathbf{y} = \mathbf{Z}\mathbf{w}$ が成り立つ。

等価音源の各組に対して音源は単一であることから、重み係数ベクトル \mathbf{w} にスパース性を仮定する。よって、 \mathbf{w} は以下の最適化問題を解くことで求める。

$$\underset{\mathbf{w}}{\text{minimize}} \quad \frac{1}{2} \|\mathbf{y} - \mathbf{Z}\mathbf{w}\|_2 + \lambda \|\mathbf{w}\|_1 \quad (5)$$

ここで、 λ はペナルティパラメータ、 $\|\cdot\|$ は ℓ_1 -norm を表す。

求めた等価音源の重み係数を用いて、 s 番目 ($s = 1, \dots, S$) のスピーカから制御する音場領域内 A の任意の位置 \mathbf{x} に対する推定伝達関数 \hat{G} は

$$\hat{G}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}) = -\frac{1}{4\pi} \sum_{l=0}^L \sum_{n=1}^N w_n^{(l)} \frac{e^{-ik|\mathbf{x}-\mathbf{x}_n^{(l)}|}}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}_n^{(l)}|} \quad (\mathbf{x} \in A) \quad (6)$$

となる。ここで、 i は虚数単位、 k は波数を表す。

2.2 伝達関数モデルを用いた PM 法

制御点 \mathbf{x}_p における音圧 P は、スピーカの駆動関数 d と s 番目のスピーカ \mathbf{x}_s から制御点 \mathbf{x}_p までの伝達関数 G を使って以下のように表せる。

$$P(\mathbf{x}_p, \omega) = \sum_{s=1}^S G(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_p) d(\mathbf{x}_s, \omega) \quad (7)$$

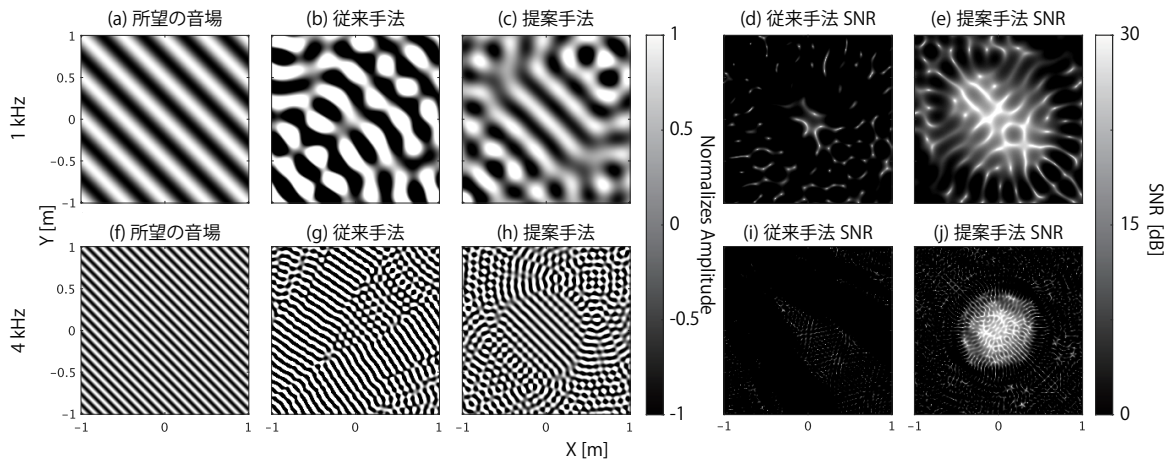


図 1: 再現波面と所望音場との SNR

ここで、従来の PM 法では伝達関数 G をすべて測定する必要があったが、提案手法では式 (6) で推定された伝達関数 \hat{G} を用いることができる。

式 (7) は、すべての制御点で成り立つため、音圧ベクトル $\mathbf{p} = [P(\mathbf{x}_p, \omega)]_{p=1, \dots, M_{pm}}$ と駆動関数ベクトル $\mathbf{d} = [d(\mathbf{x}_s, \omega)]_{s=1, \dots, S}$ と推定伝達関数行列 $\hat{\mathbf{G}} = [\hat{G}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_p)]_{p=1, \dots, M_{pm}, s=1, \dots, S}$ を用いて、 $\mathbf{p} = \hat{\mathbf{G}}\mathbf{d}$ と表すことができる。したがって、正則化最小二乗法を用いて、駆動関数ベクトル \mathbf{d} は以下で求められる。

$$\mathbf{d} = [\hat{\mathbf{G}}^H \hat{\mathbf{G}} + \rho \mathbf{I}]^{-1} \hat{\mathbf{G}}^H \mathbf{p} \quad (8)$$

ここで、 ρ は正則化パラメータ、 $[\cdot]^H$ は複素共役転置、 \mathbf{I} は単位行列を表す。

3 シミュレーション実験

3.1 実験条件

実験では、シミュレーションで求めたスピーカから測定点までの一次反射音までを含む伝達関数を用いて、制御点の伝達関数を推定した。その推定伝達関数を使い、一次反射音を考慮せずに PM を行った結果（従来法）と、一次反射音を考慮して PM をした結果（提案手法）を比較する。今回の実験では、周波数が 1-8 kHz における精度を調査した。また、PM に使用する制御点は 61×61 点、等価音源はスピーカ 1 つにつき 900 点、測定点は 18 点、スピーカ数は 96 個、スピーカ同士の間隔は 0.15[m] とした。所望の音場は図 1 の (a) と (f) に、配置図は図 2 に示す。

3.2 結果

図 1 にシミュレーション実験の結果を示す。所望の音場は、伝搬方向が (1, 1, 0) の平面波とした。図 1(a)-(e) より、1 kHz のとき再現領域中央の約 0.6 m \times 0.6 m の領域で提案手法は従来法より約 22 dB 精度が改善した。また、(f)-(j) より 4 kHz においても提案手法は、再現領域中央 0.6 m \times 0.6 m の領域で約 26dB 精度が改善した。1-8kHz においては平均約 15dB 精度が

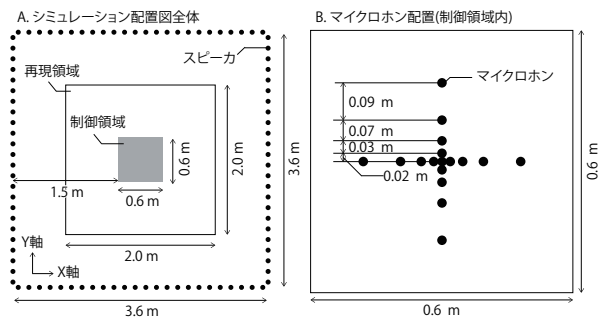


図 2: シミュレーション実験の配置図

改善した。以上より、1 次反射音を考慮した推定伝達関数の PM 法への導入が有効であることが示された。

4 まとめ

我々はこれまで、等価音源法を用いた効率的に PM を行う方法を提案してきた。実験から、1 次反射音までを考慮する提案手法が従来法より 1-8 kHz において約 15dB 精度が改善したことがわかった。今後は 1 次反射音を考慮した実測実験を行う。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 19K12049 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] G. H. Koopmann *et al.*, “A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 86, no. 6, pp. 2433-2438, 1989.
- [2] Izumi Tsunokuni *et al.*, “Pressure-matching-based 2D sound field synthesis with equivalent source array,” *Proc. ICA2019*, pp. 2701-2707, 2019.9.
- [3] 鈴木薫佳ほか, “等価音源を用いた Pressure Matching 法による 2.5 次元音場合成の実験的検討” *日本音響学会講演論文集*, 3-1P-12, 2021.9.
- [4] Izumi Tsunokuni *et al.*, “Spatial extrapolation of early room impulse responses in local area using sparse equivalent sources and image source method,” *Applied Acoustics*, vol. 179, 108027, 2021.8.