

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

鈴木 薫佳[†] 松橋 遼[†] 津國 和泉[†] 池田 雄介[†]

[†] 東京電機大

1 はじめに

これまで、高い臨場感の実現を目指し、多チャンネルスピーカを用いた音場再現手法が数多く研究されてきた。代表的な手法の一つである Pressure Matching (PM) 法 [1] は、二次音源 (スピーカ) から再現領域を離散化した制御点への伝達関数を用いて、制御点で所望の音圧となるよう音場を制御する。しかし PM 法では多点の伝達関数測定に大規模なマイクロホンアレイが必要となり、実装は容易でない。

我々はこれまで、少数の測定点からモデル化した伝達関数を用いて、効率的な局所音場再現手法を提案してきた [2]。これまで、スピーカアレイ中心の局所領域においてのみ手法の有効性が確認されてきた [3]。そこで本研究では、より広範囲の音場再現を目的として、頭部の位置に合わせて再現領域を動的に移動することを想定し、スピーカアレイ中心から離れた領域における音場の再現精度を評価し、その結果を報告する。

2 等価音源法を用いた PM 法

2.1 二次音源から制御点までの伝達関数のモデル化

等価音源法 [4] を用いて、二次音源から再現領域を離散化した制御点までの伝達関数をモデル化する。はじめに、二次音源とマイクロホンのおおよその位置は既知であるとする。等価音源法に基づき、スピーカからの伝達関数を二次音源の位置の周囲に配置した多数の等価音源と呼ばれる仮想的な点音源の線形和によって表現する。そのため、周波数領域上では、再現領域内の位置 \mathbf{x}_m にある m 番目のマイクロホンに対する l 番の二次音源からの伝達関数 $y_m^{(l)}$ は

$$y_m^{(l)}(\mathbf{x}_m) = \sum_{n=1}^N Z(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_n^{(l)}) w_n^{(l)} \quad (1)$$

と表せる。ここで、 N は二次音源ごとに配置する等価音源数、 $Z(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_n^{(l)})$ は l 番目のスピーカ周囲の位置 $\mathbf{x}_n^{(l)}$ の等価音源から m 番目のマイクロホンへの伝達関数で、自由音場条件 Green 関数を用いて解析的に求まる。 $w_n^{(l)}$ は等価音源の重み係数である。

Dynamic 2.5D local sound field reproduction based on the pressure matching using physical model

[†] Yukika SUZUKI (22fmi26@ms.dendai.ac.jp)

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

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

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

Tokyo Denki University ([†])

式 (1) は、全てのマイクロホン位置 $\mathbf{x}_m (m = 1, \dots, M)$ に対して成り立つため、マイクロホン信号ベクトル $\mathbf{y}^{(l)} (= [y^{(l)}(\mathbf{x}_m')]_{m=1, \dots, M})$ は

$$\mathbf{y}^{(l)} = \mathbf{Z}^{(l)} \mathbf{w}^{(l)} \quad (2)$$

と表せる。 $\mathbf{Z}^{(l)} (= [Z(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_n^{(l)})]_{m=1, \dots, M, n=1, \dots, N})$ は等価音源からマイクロホンまでの伝達関数行列、 $\mathbf{w}^{(l)} (= [w_n^{(l)}]_{n=1, \dots, N})$ は重みベクトルである。 N 個の等価音源に対して二次音源は単一であることから、 $\mathbf{w}^{(l)}$ にスパース性を仮定する。したがって、重みベクトルは以下の最適化問題を解くことで求まる。

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}^{(l)}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{w}^{(l)}\|_1 \\ & \text{subject to} \quad \|\mathbf{y}^{(l)} - \mathbf{Z}^{(l)} \mathbf{w}^{(l)}\|_2 \leq \epsilon \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\|\cdot\|_1$ は ℓ_1 -norm、 $\|\cdot\|_2$ は ℓ_2 -norm、 ϵ は許容誤差を表す。よって、 l 番目のスピーカから再現領域の任意の位置 \mathbf{x} までの推定伝達関数 $\hat{Z}^{(l)}$ は、式 (3) より得られる重み係数 $w_n^{(l)}$ を用いて以下の式で与えられる。

$$\hat{Z}(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N w_n^{(l)} \frac{e^{-ik|\mathbf{x} - \mathbf{x}_n^{(l)}|}}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_n^{(l)}|} \quad (4)$$

ここで、 i は虚数単位、 k は波数を示す。

2.2 モデル化した伝達関数の PM 法への適用

制御点 \mathbf{x}_p における音圧 P は、 l 個の二次音源の駆動関数 d と、 l 番目の二次音源 \mathbf{x}_l から制御点 \mathbf{x}_p までの伝達関数 Z を使って以下のように表せる。

$$P(\mathbf{x}_p, \omega) = \sum_{l=1}^L Z(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_p) d(\mathbf{x}_l) \quad (5)$$

ここで、従来の PM 法では伝達関数 Z を全て測定する必要があったが、提案手法では式 (4) によって得られる推定伝達関数 \hat{Z} を用いることが出来る。よって、制御点の位置は測定位置に制限されることなく、自由に移動することが可能となる。式 (5) は、全ての制御点で成り立つため、音圧ベクトル $\mathbf{p} = [P(\mathbf{x}_p)]_{p=1, \dots, P}$ と駆動関数ベクトル $\mathbf{d} = [d(\mathbf{x}_l)]_{l=1, \dots, L}$ と推定伝達関数行列 $\hat{\mathbf{Z}} = [\hat{Z}(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_p)]_{p=1, \dots, P, l=1, \dots, L}$ を用いて、 $\mathbf{p} = \hat{\mathbf{Z}} \mathbf{d}$ と表すことができる。そのため、正規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。

$$\mathbf{d} = [\hat{\mathbf{Z}}^H \hat{\mathbf{Z}} + \rho \mathbf{I}]^{-1} \hat{\mathbf{Z}}^H \mathbf{p} \quad (6)$$

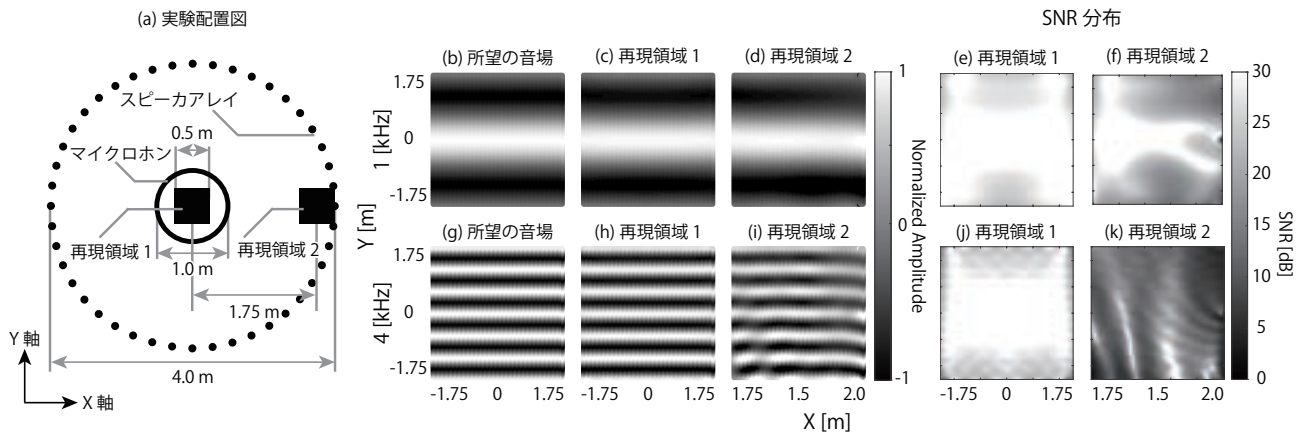


図 1: 中心領域と中心外領域における再現音場と SNR の比較

ここで、 ρ は正規化パラメータ、 $[\cdot]^H$ 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

実験の配置図を図 1(a) に示す。マイクロホンはスピーカアレイの中心に対して円形に 30 点配置した。推定伝達関数を用いて頭部の移動に合わせて動的な再現領域の変更を想定し、アレイ中心の音場再現領域 1 と中心から外れた再現領域 2 における再現精度を比較する。周波数は 1–4 kHz とし、各二次音源から 61×61 点の制御点に対する伝達関数を推定した。また、二次音源数は 50 個、等価音源は二次音源ごとに 900 個、二次音源同士の間隔は 0.25m とした。図 1(b)(g) に伝搬方向が $(0, 1, 0)$ の平面波である所望音場を示す。

3.2 結果

図 1 と図 2 にシミュレーション実験結果を示す。図 1(a)–(e), (g)–(h) より、どちらの周波数においても再現領域 1 と比べて、再現領域 2 での音場再現精度が低下していることが分かる。しかし、図 2 より、1 kHz においては中心外でも SNR は領域全体で約 20dB となっており、十分な精度で再現できている。4 kHz においては、再現領域 2 における領域全体での SNR は 11 dB であり、中心から外れた再現領域では、高周波数での制御がより困難となることがわかった。一方で、波面としては多少の乱れはあるが、おおよそ所望の音場に近い波面が形成されているため、聴感上での評価も必要であると考えられる。

4 おわりに

本研究では、物理モデルを用いた PM 法におけるスピーカアレイ中心外での再現精度を評価した。実験から再現領域 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ の場合において、中心外領域でも 1 kHz では SNR 20 dB、4 kHz では 11 dB の精度で音場を再現することがわかった。今後は位置に

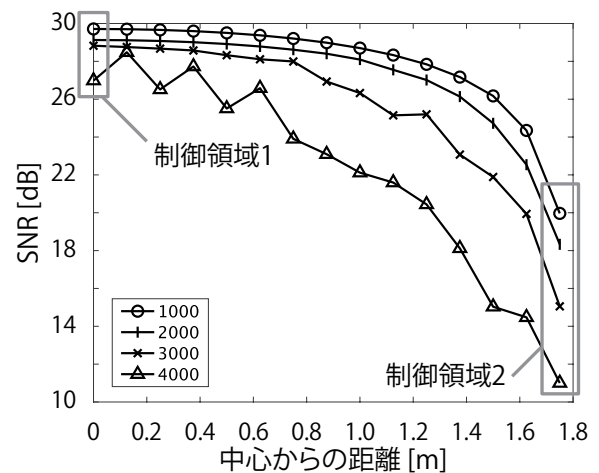


図 2: 制御領域の位置と SNR との関係図

応じた制御範囲の変更など、高周波数での再現精度の改善が必要であると考えられる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 20K11872 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Ole Kirkeby, Philip A. Nelson, “Reproduction of plane wave sound fields,” *Acoustical Society of America*, vol.94, no.10, pp.2992–3000, 1993.
- [2] Izumi Tsunokuni, Kurokawa Kakeru and Yusuke Ikeda, “Pressure-matching-based 2D sound field synthesis with equivalent source array,” *Proc. ICA2019*, pp. 2701–2707, 2019.9.
- [3] Yukika Suzuki, Haruka Matsuhashi, Izumi Tsunokuni, and Yusuke Ikeda, “Sound Field Reproduction Based on Pressure Matching with Transfer Functions Modeled by Equivalent Sources and Image Sources,” *Proc. of InterNoise 2022* (2022.8).
- [4] 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.