

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

松本 綾太[†] 鈴木 薫佳[†] 津國 和泉[†] 池田 雄介[†]

[†]東京電機大

1 はじめに

物理的な音場再現手法の1つである Pressure Matching 法 (PM 法) [1] はスピーカから制御点までの伝達関数の多点測定が必要であり, 制御点の増加に伴い実装が困難となる. そこで, 我々は等価音源法 [2] を用いた音場のモデル化を PM 法に適用することで, 測定点数の削減を実現した [3]. 本手法では, スピーカから制御領域全体への伝達関数をモデル化するため, 制御点を自由に配置できるという特徴を持っている. 一方, 周波数に応じて再現可能な領域の広さが異なるため, 制御範囲を固定して音場再現を行った場合, 周波数によっては再現精度が極端に下がる場合がある.

そこで本研究では, 等価音源法を用いた PM 法に基づく局所音場再現における周波数と制御範囲の関係をシミュレーション実験で明らかにし, 周波数に応じて制御領域が可変な局所音場合成手法を提案する.

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

等価音源法を用いて, 二次音源から離散化した再現領域内の制御点への伝達関数のモデル化を行う. 二次音源から再現領域への伝達関数を, 二次音源の周囲にランダムに配置された点音源 (等価音源) の線形和で表現する. つまり, 周波数領域上で l 番目の二次音源から, 再現領域内の位置 \mathbf{x}_m にある m 番目のマイクロホンまでの伝達関数 $y_m^{(l)}$ は, 以下のように表せる.

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

ここで, N は二次音源ごとに配置する等価音源の数, $Z(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_n^{(l)})$ は l 番目のスピーカに対応する位置 $\mathbf{x}_n^{(l)}$ の等価音源から m 番目のマイクロホンへの伝達関数であり, 自由音場条件 Green 関数を用いることで解析的に求まる. $w_n^{(l)}$ は等価音源の重み係数である.

式 (1) は, 全てのマイクロホンに対して成り立つた

め, マイクロホン信号ベクトル $\mathbf{y}^{(l)}$ は,

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

と表せる. ここで, $\mathbf{Z}^{(l)}$ は l 番目のスピーカの等価音源からマイクロホンまでの伝達関数行列, $\mathbf{w}^{(l)}$ は等価音源の重みベクトルを表す.

また, 等価音源に対してスピーカは単一であることから, 重みベクトル $\mathbf{w}^{(l)}$ 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. 最終的に再現領域 A への推定伝達関数 \hat{Z} は, 重み係数を用いて以下で求まる.

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

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を用いた PM 法

制御領域 A 内の制御点 $\mathbf{x}_p(\omega)$ における音圧 P は, スピーカ \mathbf{x}_l から制御点 \mathbf{x}_p までの伝達関数 Z とスピーカの駆動関数 d を使って以下のように表せる.

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

従来の PM 法では, 伝達関数 Z を制御点位置で測定する必要があったが, 提案手法では式 (4) より, 推定伝達関数 \hat{Z} を用いることが出来る. つまり, 制御点の位置を推定領域内であれば自由に設定できる. ここで, ここでは, 制御点 $\mathbf{x}_p(\omega)$ は周波数 ω に応じて, 制御点の密度と範囲が異なるよう決定する.

また, 式 (5) は全ての制御点に対して成り立つ. 音圧ベクトル \mathbf{p} は, 駆動関数ベクトル \mathbf{d} と, 推定伝達関数行列 $\hat{\mathbf{Z}}$ を用いて $\mathbf{p} = \hat{\mathbf{Z}} \mathbf{d}$ と表せる. したがって, スピーカの駆動関数ベクトル \mathbf{d} は正則化最小二乗法を用いて求めることができる.

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

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.

Dynamic reproduction region of sound field considering frequency based on physical model-based pressure matching

[†] Ryota Matsumoto (19f109@ms.dendai.ac.jp)

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

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

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

Tokyo Denki University (†)

3 実験

3.1 実験条件

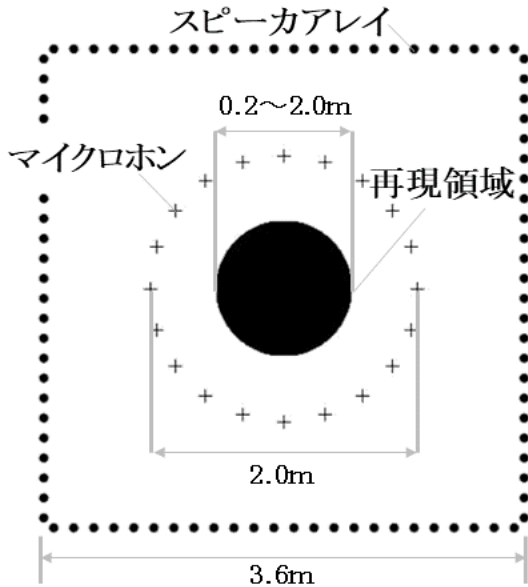


図 1: 実験条件

図 1 にシミュレーション実験の条件を示す。各周波数に適した制御領域半径を明らかにするため、まず、周波数を固定し、制御領域の半径を 0.1 m–1.0 m まで変更しながら、領域全体の SNR を算出する。算出結果から周波数ごとに指定した SNR 以上となる最大の制御領域半径を算出する。最後に、算出した周波数ごとの制御領域半径を用いた SNR の分布を算出し有効性を明らかにする。音伝搬は 3 次元、評価はスピーカアレイを含む 2 次元平面で行った。マイクロホンは半径 1 m の円状に 20 個配置した。等価音源は、各二次音源に対して周囲半径 0.06 m 内に 100 個、ランダムに配置した。制御点は再現領域内に波長の 1/8 の間隔でグリッド状に配置した。

3.2 実験結果

図 2 に SNR 15, 20, 25 dB を維持可能な制御範囲と周波数の関係を示す。周波数が高いほど、制御領域半径が小さくなるが、SNR 25 dB 基準でも頭部を取り囲むのに十分な大きさであることが分かる。

図 3,4 に SNR 25 dB を保持できる制御領域半径を用いて、周波数に応じて可変な音場制御を用いた場合と制御半径を 0.6 m に固定した時の SNR 分布の比較を示す。周波数帯域は 0.5 kHz–8 kHz (250 Hz ごと) とした。図から可変制御領域半径を用いた場合に高精度に音場合成が可能であることが分かる。

4 おわりに

本研究では、物理モデルを用いた PM 法における周波数と制御範囲による音場再現精度の関係を実験的に

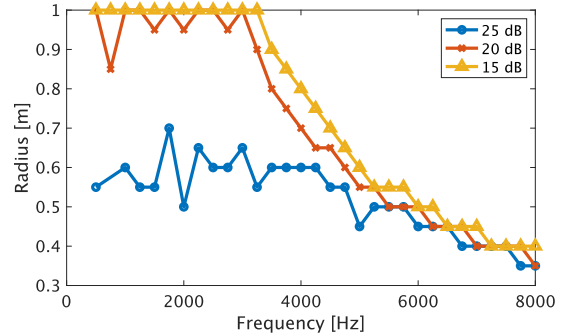


図 2: SNR を基準とした周波数ごとの制御領域の半径

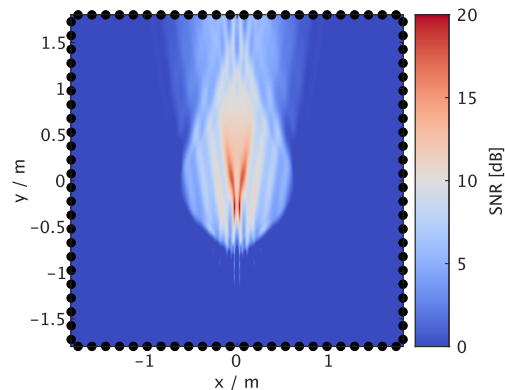


図 3: 制御領域を固定 (半径 0.6 m) にした場合の SNR

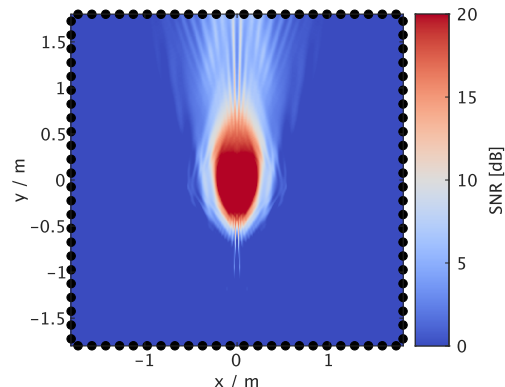


図 4: 制御領域を可変にした場合の SNR

明らかにし、その結果を用いた周波数に応じた再現領域可変型の PM 法を提案し、その有効性を確認した。

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,” JASA, vol.94, no.10, pp.2992–3000, 1993.
- [2] G. H. Koopmann, et al., “A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition,” JASA, vol. 86, no. 6, pp. 2433–2438, 1989.
- [3] Izumi Tsunokuni et al., “Pressure-matching-based 2D sound field synthesis with equivalent source array,” Proc. of the 23rd ICA, 2019.