

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

小畑 悠矢[†] 鈴木 薫佳[†] 津國 和泉[†] 池田 雄介[†]

[†] 東京電機大

1 はじめに

多数のスピーカを用いて没入感の高い音場を作る音場再現手法が数多く研究されている。Pressure Matching(PM) 法は、スピーカから再現領域を離散化した制御点までの伝達関数に基づき、制御点の音圧を所望の音圧と一致させる手法である [1]。これまで我々は、壁面からの一次反射音を考慮して等価音源法 [2] を用いた効率的な PM 法を提案し、水平面上の高精度な音場再現を実現してきた [3]。一方、より没入感の高い音場再現を目的として、仰角方向も考慮した 3 次元音場再現を実現するには、高さ方向に多数のスピーカが必要となり、実装がより困難になるという問題があった。

そこで、本研究では 3 次元音場再現における高さ方向のスピーカアレイの低減を目的とした、床面からの反射音を利用した PM 法に基づいた音場再現手法を提案する。

2 提案手法

2.1 スピーカから制御点までの伝達関数のモデル化

虚像法 [4] と等価音源法を用いて、床面からの一次反射音を含む、スピーカからマイクロホンまでの伝達関数をモデル化する。スピーカとマイクロホンのおおよその位置関係を既知とし、虚像法に基づき実スピーカと床面で面对称になる位置に一次反射音を表す虚像音源を考える。そして各スピーカとその虚像音源の周囲に仮想的な点音源 (等価音源) を配置する。等価音源法により、 l 番目のスピーカから $\mathbf{x}_m$ に位置するマイクロホンまでの伝達関数は等価音源の線形和で以下のように表せる。

$$y^{(l)}(\mathbf{x}_m) = \sum_{r=0}^1 \sum_{q=1}^Q Z(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}_q^{(l,r)}) w_q^{(l,r)} \quad (1)$$

ここで、 $r = 0$ は直接音、 $r = 1$ は一次反射音を示しており、 $\mathbf{x}_q^{(l,r)}$ は l 番目のスピーカの周囲に配置した等価音源 ($q = 1, 2, \dots, Q$) の各位置座標を表す。 Z は

各等価音源からマイクロホンの位置 $\mathbf{x}_m$ までの伝達関数であり、Green 関数を用いて解析的に求まる。 $w_q^{(l,r)}$ は各等価音源の重みを表す。

式 (1) はすべてのマイクロホンの位置 $\mathbf{x}_m$ ($m = 1, 2, \dots, M$) で成立するので、 l 番目のスピーカからのマイクロホン信号ベクトルは $\mathbf{y}^{(l)} = \mathbf{Z}^{(l)} \mathbf{w}^{(l)}$ と表せる。ここで、 $\mathbf{Z}^{(l)}$ は伝達関数行列、 $\mathbf{w}^{(l)}$ は等価音源に対する重み係数ベクトルである。多数の等価音源に対してスピーカは単一なので、重み係数 $\mathbf{w}^{(l)}$ にスパース性を仮定する。したがって、 $\mathbf{w}^{(l)}$ は次の最適化問題を解いて導出する。

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

ここで、 λ はペナルティパラメータ、 $\|\cdot\|_2$ は ℓ_2 ノルム、 $\|\cdot\|_1$ は ℓ_1 ノルムを表す。

次に、式 (2) で導出した等価音源の重みを用いて、 l 番目のスピーカから制御領域 A 内の任意の位置 $\mathbf{x}$ までの推定伝達関数は次のように表せる。

$$\hat{G}(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \sum_{r=0}^1 \sum_{q=1}^Q w_q^{(r)} \frac{e^{-ik|\mathbf{x} - \mathbf{x}_q^{(r)}|}}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_q^{(r)}|} \quad (\mathbf{x} \in A) \quad (3)$$

ここで、 i は虚数単位、 k は波数を表す。

2.2 PM 法による駆動関数の導出

制御領域 A 内の制御点 $\mathbf{x}_p$ における音圧 P は、スピーカ位置 $\mathbf{x}_l$ ($l = 1, 2, \dots, L$) から制御点 $\mathbf{x}_p$ までの推定伝達関数 $\hat{G}$ とスピーカの駆動関数 d を用いて次のように表せる。

$$P(\mathbf{x}_p) = \sum_{l=1}^L \hat{G}(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_p) d(\mathbf{x}_l) \quad (4)$$

これは、すべての制御点に対して成立するため、 $\mathbf{p} = \hat{\mathbf{G}} \mathbf{d}$ と表せる。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 $\mathbf{d}$ は次のように導出される。

$$\mathbf{d} = [\hat{\mathbf{G}}^H \hat{\mathbf{G}} + \rho \mathbf{I}]^{-1} \hat{\mathbf{G}}^H \mathbf{p} \quad (5)$$

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

複数の円形スピーカアレイを用いて、スピーカの存在しない方向からの平面波の再現に対して、床面の反

Basic study on 3D sound field reproduction using reflected sounds based on pressure-matching with equivalent sources

[†] Yuya Obata (19fi032@ms.dendai.ac.jp)

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

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

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

Tokyo Denki University ([†])

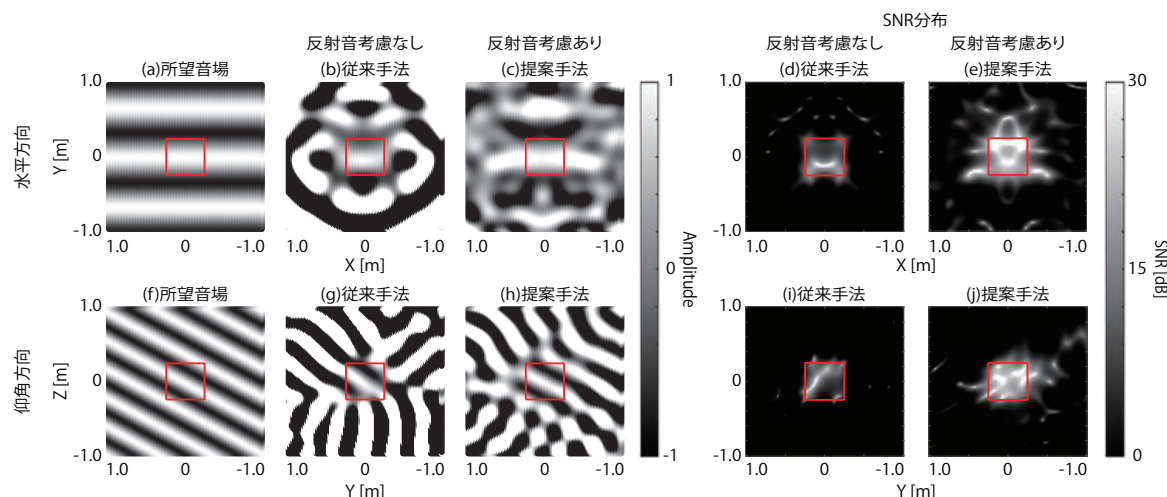


図 1: 反射音の考慮の有無による水平面と正中面の再現音場と SNR の比較 (赤枠: 再現領域)

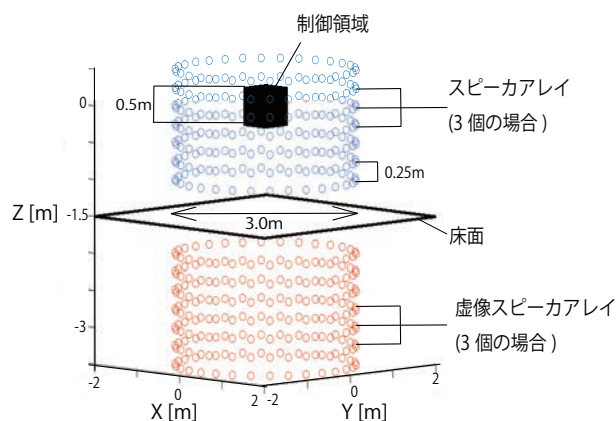


図 2: 実験配置図

射音を考慮した提案手法と、考慮していない従来手法の再現精度の比較を、Sound Field Synthesis Toolbox for MATLAB (SFS Toolbox ver.2.5.0)[5]を用いて行う。所望音場は、周波数 1kHz で仰角方向 60° から到来する平面波とし、図 1(a), (f) に示す。

実験配置図を図 2 に示す。直径 0.5m の 64-ch 球形マイクロホンアレイで測定し、スピーカから $31 \times 31 \times 31$ 点の制御点に対する伝達関数を推定した。等価音源の数は、スピーカ毎に 200 個配置し、制御領域の大きさは一辺 0.5m の立方体とする。スピーカは、直径 3.0m の水平の円形スピーカアレイ毎に 30 個配置し、従来手法では高さ方向に 7、提案手法では 3 つ配置した。また、スピーカアレイの高さ方向の間隔は 0.25m とする。

3.2 結果

再現結果を図 1 に示す。図 1(b)–(e), (g)–(j) より、従来手法と提案手法の水平方向及び仰角方向の制御領域全体の SNR を比較したところ、水平方向においては約 12 dB、仰角方向においては約 11 dB 改善したこ

とがわかった。したがって、反射音を考慮した提案手法により水平面、正中面の両方で再現精度が向上することが明らかとなった。また、従来手法ではスピーカアレイを 7 本用いたのに対し、提案手法では 3 本のスピーカアレイで高い精度で音場を再現できたことから、反射音を考慮することでより効率的に音場再現が可能であることが示された。

4 おわりに

本研究では、等価音源を用いた PM 法を 3 次元に拡張し、床面からの反射音を利用した音場再現手法を提案した。実験から、反射音を利用することでスピーカがない仰角方向においても、スピーカアレイ数を抑えて音場再現が可能であることが示された。今後はより高周波数の音場の再現を検討する。

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] M. Miyoshi and Y. Kaneda, “Inverse control of room acoustics using multiple loudspeakers and/or microphones,” IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Tokyo, Japan, pp. 917–920, 1986.
- [2] E. Fernandez-Grande, A. Xenaki, and P. Gerstoft, “A sparse equivalent source method for near-field acoustic holography,” The Journal of the Acoustical Society of America, vol.141, no.1, pp.532–542, 2017.
- [3] 鈴木薫佳ほか, “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,” 情報処理学会第 84 回全国大会, 2022.
- [4] Allen, J. B. and Berkley, D. A., “Image method for efficiently simulating small-room acoustics,” The Journal of the Acoustical Society of America, 65(4), pp. 943–950, 1979.
- [5] H. Wierstorf, S. Spors, “Sound Field Synthesis Toolbox,” in Proc. of 132nd Convention of the Audio Engineering Society, Apr. 2012.