

## 音源の指向性を考慮した等価音源法に基づく 少数マイクロホンによる音場の可視化

津國 和泉<sup>†</sup> 松橋 遼<sup>†</sup> 池田 雄介<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>東京電機大

### 1 はじめに

音場の可視化は、目に見えない音の伝搬の直感的な理解に役立つ。詳細な音場の可視化方法として、音の伝搬特性を示す室内インパルス応答 (RIR) を用いた方法がある。多点で測定された RIR の空間分布を時間発展させ波面を可視化できる。しかし、可視化に十分な RIR の多点測定には大規模なマイクロホンアレイが必要となるという問題がある。そこで、我々は少数マイクロホンで効率的に多点の RIR を推定する手法を提案してきた [1]。しかし、音源が指向性を持つ場合、音源の向きに対して垂直な方向に推定誤差が大きくなる問題があった。

本研究では、より高精度な音場可視化を目指して、音源の指向性の事前モデル化を用いた RIR 空間補間について、特に音源の位置誤差を含む場合の検討を行う。

### 2 提案手法

提案手法では、指向性を持つ音源のモデル化を事前に行い、その事前音源モデルを利用して RIR (音場) をモデル化する。また、マイクロホン、音源、壁面等のおおよその位置関係は既知であると仮定する。

#### 2.1 音源の事前モデル化

音源の放射特性 (指向性) をモデル化するため、無響室等の反射の影響を無視出来る環境で音源の事前モデル化を行う。図 1(a) に概念図を示す。

等価音源法 [2] に基づき、音源から放射される指向性を含んだ音場は、音源の付近にランダムに配置した等価音源の線形和で表現可能であると考えられる。したがって、音源を取り囲む閉曲面上に配置したマイクロホン信号と等価音源には以下の関係式が成り立つ。

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{w} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{d} \in \mathbb{C}^{M_{\text{src}} \times 1}$  は、直接音のみを含む  $M_{\text{src}}$  個のマイクロホン信号ベクトル、 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M_{\text{src}} \times N_{\text{src}}}$  は  $N_{\text{src}}$  個の等価音源からマイクロホンまでの伝達関数行列、 $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{N_{\text{src}} \times 1}$  は、等価音源の重み係数ベクトルを表す。

Sound Field Visualization considering Sound Source Directivity based on Equivalent Source Method by a Small Number of Microphones

<sup>†</sup> Izumi TSUNOKUNI(21udc02@ms.dendai.ac.jp)

<sup>†</sup> Haruka MATSUHASHI(21fmi18@ms.dendai.ac.jp)

<sup>†</sup> Yusuke IKEDA(yusuke.ikeda@mail.dendai.ac.jp)

Tokyo Denki University (<sup>†</sup>)

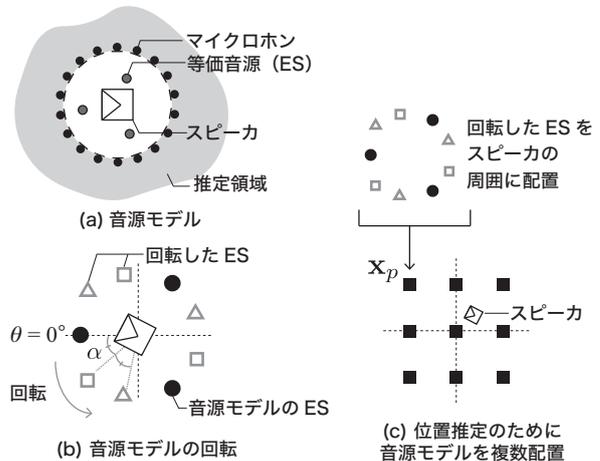


図 1: 提案手法の概念図

等価音源の伝達関数は、自由音場における点音源の伝達関数であり、解析的に求まる。したがって、未知数である重み  $\mathbf{w}$  を求めるために、実在する音源が一つであることから等価音源の空間スパース性を利用し、式 (2) の最適化問題によって重み係数ベクトルを決定する。  $\|\cdot\|_1$ ,  $\epsilon$  は  $\ell_1$  ノルムと誤差の許容値を示す。

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{w}\|_1 \\ & \text{subject to} \quad \|\mathbf{d} - \mathbf{G}\mathbf{w}\|_2 \leq \epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

#### 2.2 室内インパルス応答のモデル化 (音場モデル)

音源モデルとなる等価音源を用いて、少数のマイクロホンを用いた音場のモデル化を提案する。まず、直接音を考える。直接音をモデル化する際に実際の音源の向きと位置は正確には未知であるため、音源モデルを利用して音源の向きと位置を推定する。

はじめに音源向きを推定するために、図 1(b) に示すように音源モデルの等価音源の向きを  $\theta = 0^\circ$  とし、それらを回転させた複数の等価音源の組み合わせを考える。角度  $\theta = \pm\alpha$  ずつ回転させた音源モデルの等価音源から  $M$  本のマイクロホンへの伝達関数行列を  $\mathbf{G}^{(\theta)} \in \mathbb{C}^{M \times N_{\text{src}}}$  とすると、音源向きを推定するための等価音源の伝達関数行列は以下ようになる。

$$\mathbf{D}_{\text{rot}} = [\mathbf{G}^{(-c\alpha)}\mathbf{w}, \dots, \mathbf{G}^{(c\alpha)}\mathbf{w}] \quad (c = 1, \dots, C). \quad (3)$$

その後、音源位置を推定するため、図 1(c) のように回転させた等価音源の組を、おおよその音源位置の周

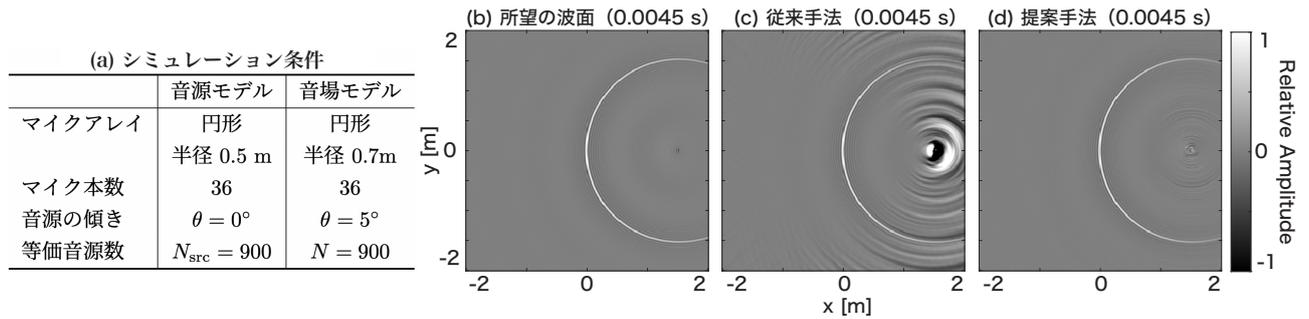


図 2: シミュレーション条件と可視化結果

囲  $\mathbf{x}_p$  に  $P$  個配置する．式 (3) から，音源位置推定のための等価音源の伝達関数行列は以下のように表せる．

$$\mathbf{D}_{\text{pos}} = [\mathbf{D}_{\text{rot}}(\mathbf{x}_1)\mathbf{w}, \dots, \mathbf{D}_{\text{rot}}(\mathbf{x}_P)\mathbf{w}] \quad (p = 1, \dots, P) \quad (4)$$

したがって，直接音  $\mathbf{y}_{\text{dir}}$  は，音源向きと位置推定用の等価音源の伝達関数  $\mathbf{D}_{\text{dir}} = [\mathbf{D}_{\text{rot}}, \mathbf{D}_{\text{pos}}] (\in \mathbb{C}^{M \times (C' \times P)}, C' = 2C \times 1)$  とその重みベクトル  $\mathbf{u}_{\text{dir}} (\in \mathbb{C}^{(C' \times P) \times 1})$  を用いて，以下のように表せる．

$$\mathbf{y}_{\text{dir}} = \mathbf{D}_{\text{dir}}\mathbf{u}_{\text{dir}} \quad (5)$$

また，虚像法を用いて，各壁面に対する虚像の周囲にランダムに配置した等価音源の線形和で反射音を表現する．したがって，マイク信号に含まれる一次反射音は以下の式で表される．

$$\mathbf{y}_{\text{ref}} = \mathbf{D}_{\text{ref}}\mathbf{u}_{\text{ref}} \quad (6)$$

$\mathbf{D}_{\text{ref}} (\in \mathbb{C}^{M \times (I \times N)})$  は  $I$  個の虚像周囲の  $N$  個の等価音源からマイクロホンの伝達関数行列を表す．

式 (5), (6) より， $\mathbf{D} = [\mathbf{D}_{\text{dir}}, \mathbf{D}_{\text{ref}}]$ ， $\mathbf{u} = [\mathbf{u}_{\text{dir}}^T, \mathbf{u}_{\text{ref}}^T]^T$  とおくと，マイクロホンで得られる測定信号  $\mathbf{y} = \mathbf{y}_{\text{dir}} + \mathbf{y}_{\text{ref}}$  は下記のようになる．

$$\mathbf{y} = \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (7)$$

$\mathbf{u}$  は直接音と反射音を表現するためのすべての等価音源の伝達関数行列  $\mathbf{D} \in \mathbb{C}^{M \times N'}$  に対する係数ベクトルである．ただし， $N' = (C' \times P) + (N \times I)$  である．ここで，音源の向きはいずれか一方向で，各壁面に対して存在する虚像は一つであるため，直接音および反射音の等価音源に対して空間スパース性を仮定し，以下の最適化問題を解く． $\gamma$  は許容誤差を示す．

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{u}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{u}\|_1 \\ & \text{subject to} \quad \|\mathbf{y} - \mathbf{D}\mathbf{u}\|_2 \leq \gamma \end{aligned} \quad (8)$$

したがって，式 (8) によって得られた等価音源の重み  $\mathbf{u}$  を利用し，任意の点で伝達関数の推定が可能となり，逆フーリエ変換によって時間領域に変換することで RIR の可視化が可能となる．

### 3 シミュレーション実験

虚像法を用いて単一指向性を持つ音源から放射される一次反射音までを含む音場をシミュレーションし，提案手法によって推定した RIR を用いて波面を可視化する．シミュレーション実験では，音源モデルを利用しない従来手法 [1] と音源モデルを導入した提案手法を比較する．音源は  $(1.51, 0.01)$  に配置するが， $(1.5, 0)$  に配置されていると想定して位置誤差を含めてモデル化を行う．マイクロホンアレイは原点を中心に設置し，測定信号には振幅が  $\text{SNR} = 30$  dB，位相がランダムとなるノイズを付加した．実験条件は，図 2(a) に示す．

図 2(b)-(d) に，36 点の測定データから 90601 点の RIR を推定し，可視化した結果を示す．従来手法では音源の指向性が十分にモデル化できていないため，Y 軸方向に大きなエイリアシングが生じている．一方で，提案手法では所望の波面と近い可視化結果が得られた．また，マイクロホンアレイを中心に  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  の平均 SNR は，従来手法が約  $-9$  dB，提案手法が約  $10$  dB であり，提案手法によって約  $19$  dB 改善した．

### 4 結論

本研究では，事前音源モデルを導入した音場モデル化手法に基づいた音場の可視化を提案した．今後は，等価音源の配置やマイクロホンアレイの形状による推定精度への影響を調べる．

**謝辞** 本研究は東京電機大学総合研究所研究 Q21DS-01 の助成を受けたものです．

### 参考文献

- [1] I. 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, p. 108027, 2021.
- [2] 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.