

## 反射音到来時間を用いた等価音源法による 室内インパルス応答の空間補間

松橋 遼<sup>†</sup> 鈴木 薫佳<sup>†</sup> 津國 和泉<sup>†</sup> 池田 雄介<sup>†</sup>

<sup>†</sup>東京電機大

### 1 はじめに

多点の室内インパルス応答 (RIR) 測定の効率化を目的として、物理モデルによる RIR の空間補間が研究されてきた [1, 2]. 我々はこれまでスパース等価音源法と虚像法を用いた手法を提案し、高い周波数まで補間可能なことを示した [3]. しかし、反射音次数が増加すると基底の数が増加し、最適化問題が解きにくくなるため、推定精度が低下するという課題があった. そこで、本研究では反射音到来時間に基づき RIR 信号を時間領域で分解し、分解した成分ごとに周波数領域で物理モデルを用い RIR を補間する手法を提案する.

### 2 提案手法

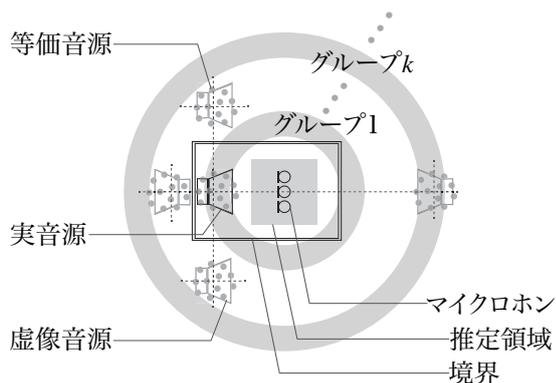


図 1: 提案手法概要図

提案手法の概要を図 1 に示す。少数のマイクロホンによる初期 RIR から、マイクロホン周辺領域の初期 RIR を推定する。実音源の位置と部屋の形状が概ね既知であると仮定し、虚像法に基づいて推定したい反射音次数まで虚像音源を配置する。次に、マイクロホンアレイの中心から虚像音源までの距離を用いて、実音源と虚像音源をグループ化する。各グループの音源/虚像音源から各マイクロホンまでの到来時間を算出し、到来時間に応じた時間領域での窓掛けを用いて RIR 信号を分解する。分解後は周波数領域上で処理を行う。

$m$  番目のマイクロホンの RIR 信号は、以下のよう  
に各グループの音源/反射音からの伝達関数の線形和

で表現できる。

$$y_m = y_m^{(1)} + \dots + y_m^{(k)} + \dots + y_m^{(K)} \quad (1)$$

ここで、 $y_m^{(k)}$  はグループ  $k$  に含まれる音源/反射音からマイクロホンまでの伝達関数を表す。この各グループの伝達関数を等価音源法 [1] を用いてモデル化する。各グループに含まれる音源位置に仮想的な音源 (等価音源) を配置する。位置  $\mathbf{x}_n^{(k,g)}$  の等価音源から位置  $\mathbf{x}'$  のマイクロホンまでの自由空間上における伝達関数  $D$  と等価音源にかかる重み  $w_n$  を用いて、グループ  $k$  の伝達関数は、以下のように表せる。

$$y_m^{(k)} = \sum_{g=1}^{G_k} \sum_{n=1}^N D(\mathbf{x}', \mathbf{x}_n^{(k,g)}) w_n^{(k,g)} \quad (2)$$

$G_k$  は  $k$  番目のグループに含まれる音源の総数、 $N$  は音源一つあたりに配置される等価音源の総数を表す。式 (2) がすべてのマイクロホンで成り立つため、

$$\mathbf{y}^{(k)} = \mathbf{D}^{(k)} \mathbf{w}^{(k)}, \quad (3)$$

となる。ここで、 $\mathbf{y}^{(k)}$  は  $k$  番目のグループの伝達関数ベクトル、 $\mathbf{D}$  は等価音源の伝達関数行列であり Green 関数で求める。 $\mathbf{w}^{(k)}$  は重みベクトルで未知数である。そこで、以下の最適化問題で重みベクトルを求める。

$$\underset{\mathbf{w}}{\text{minimize}} \frac{1}{2} \|\mathbf{y}^{(k)} - \mathbf{D}^{(k)} \mathbf{w}^{(k)}\|_2 + \lambda_k \|\mathbf{w}^{(k)}\|_1 \quad (4)$$

$\|\cdot\|_2$  は  $l_2$  ノルム、 $\|\cdot\|_1$  は  $l_1$  ノルム、 $\lambda_k$  はペナルティパラメータを示す。

以上から、求めた重みベクトルを用いて推定領域内の任意の点  $\mathbf{x}$  における伝達関数は以下のように表現でき、逆 Fourier 変換によって推定 RIR を取得できる。

$$y(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^{G_k} \sum_{n=1}^N D(\mathbf{x}, \mathbf{x}_n^{(k,g)}) w_n^{(k,g)} \quad (5)$$

### 3 実験

#### 3.1 実験条件

虚像法による音場シミュレーションを用いて、提案手法と従来手法の補間精度を比較する。比較対象とする従来手法ではモデル化に用いる RIR 信号を分解せずに等価音源を用いて補間する [3]. 実験では、RIR が含む最大反射音次数を 1-3 まで順に増加させて補間

Spatial Interpolation of Room Impulse Responses by Equivalent Source Method Using Arrival Time of Reflected Sound

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

<sup>†</sup> Yukika SUZUKI(18fi066@ms.dendai.ac.jp)

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

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

Tokyo Denki University (<sup>†</sup>)

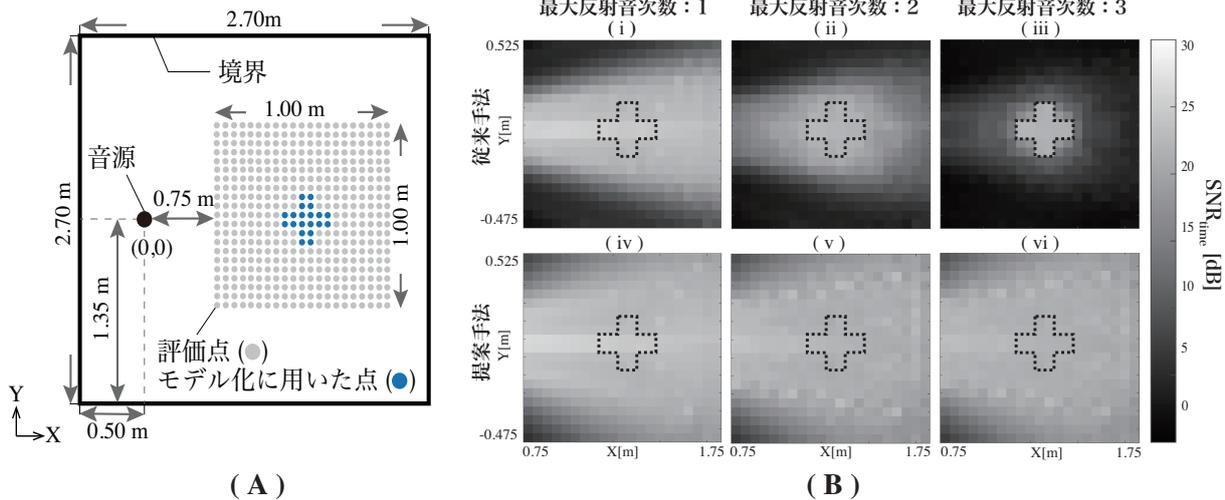


図 2: 配置図 (A) と時間領域における評価領域の SNR 分布 (B)

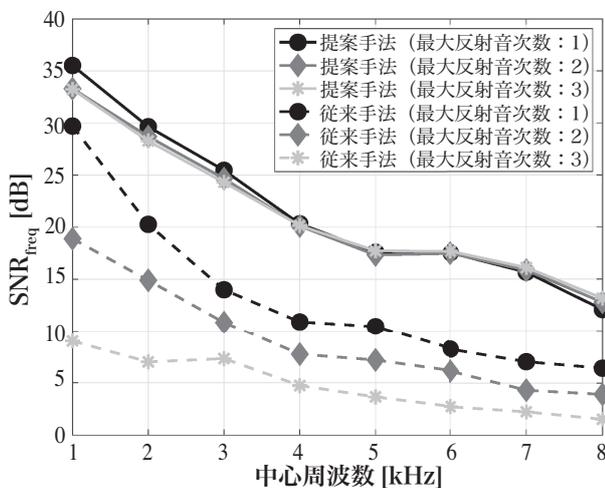


図 3: 周波数帯域ごとの平均 SNR の比較

表 1: 実験条件

サンプリング周波数 [kHz]	48.0
対象周波数 [kHz]	0.5 – 8.5
境界の反射係数	1.0
音源 1 つあたりの等価音源数 [個]	400
実験回数	20

精度の比較を行った。実験条件を表 1 に示す。モデル化に用いた信号にはランダムノイズを付加した (SNR 30 dB)。虚像音源のグループ化はマイクロホンアレイ中心から 1 m おきに行った。評価は以下の時間領域 SNR<sub>time</sub> と周波数領域 SNR<sub>freq</sub> を用いた。

$$\text{SNR}_{\text{freq}} = \frac{\sum_{\omega=\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \sum_{e=0}^E |y_e(\omega, e)|^2}{\sum_{\omega=\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \sum_{e=0}^E |y_e(\omega, e) - \hat{y}_e(\omega, e)|^2} \quad (6)$$

$$\text{SNR}_{\text{time}} = \frac{\sum_{t=0}^T |y(t)|^2}{\sum_{t=0}^T |y(t) - \hat{y}(t)|^2} \quad (7)$$

ここで、 $y$  は真値、 $\hat{y}$  は推定値を表す。 $T$  は信号長、 $\omega$  は中心周波数、 $E$  は評価点数を表す。

### 3.2 結果

図 2(i)–(iii) から、従来手法では最大反射音次数が増加するにつれて、補間可能な領域が狭くなることが分かる。一方、(iv)–(vi) より、提案手法は最大反射音次数が増加しても推定領域の広さが変わらず、SNR 約 25 dB で補間可能であることがわかった。図 3 より、提案手法によって、3 kHz までの周波数において最大反射音次数が 3 のときに約 25 dB、2 のときに約 20 dB、1 のときに約 10 dB 程度補間精度が改善した。また、4 kHz 以上の周波数においてどの反射音次数でも 10 dB 以上精度が改善した。

### 4 おわりに

本研究では、虚像法に基づいた反射音到来時間を用いて RIR 信号をグループ化し、グループごとに等価音源法を用いて音場補間する手法を提案した。実験から、従来手法よりも補間精度が SNR 25dB 程度向上し、広範囲で補間可能となった。今後は、虚像音源のグループ化手法について検討する。

**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] F. Grande, *et al.*, “A sparse equivalent source method for near-field acoustic holography,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 141:542-542, 01,2017.
- [2] A. Moiola, *et al.*, “Plane wave approximation of homogeneous helmholtz solutions,” *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, 62:809-837,10, 2011.
- [3] I. Tsunokuni, *et al.*, “Extrapolation of Spatial Transfer Functions for Primary Reflections with Equivalent Sources,” 2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2020, pp. 34-38GCCE50665.2020.