

## 室形状と物理モデルを用いた複合現実による音場の可視化

内田 彩芽<sup>†</sup> 大川 祐貴子<sup>†</sup> 松橋 遼<sup>†</sup> 津國 和泉<sup>†</sup> 池田 雄介<sup>†</sup> 及川 靖広<sup>††</sup>

<sup>†</sup>東京電機大 <sup>††</sup>早大理工

### 1 はじめに

音場の可視化は、音の発生源の特定など音響現象の理解を助け、騒音問題や防音対策、室内音響設計に役立つ。これまで、我々は手持ちマイクロホンと複合現実技術を用いた音響インテンシティ可視化システムを提案してきた [1, 2]。手持ちマイクロホンを用いることで、広い空間の測定が可能となったが、特に過渡的な応答を可視化する場合に、測定点毎に同期した測定が必要となるため計測時間がかかるという問題があった。

そこで、本研究では、少数の測定データから広範囲の音の伝搬の可視化を行う手法を提案する。Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) で取得した部屋の形状情報と少数測定情報を用いて、等価音源法に基づいた音場の空間補間を行い、複合現実技術によって可視化する。

### 2 提案手法

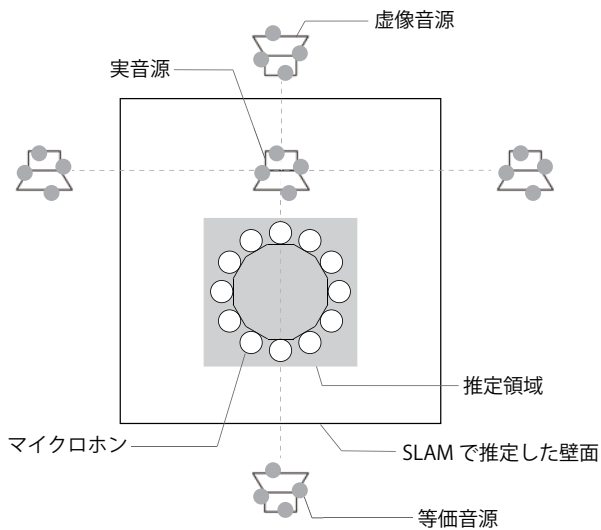


図 1: 提案手法の概念図

提案手法の概要を図 1 に示す。少数の固定マイクロホンで測定した室内インパルス応答から音場のモ

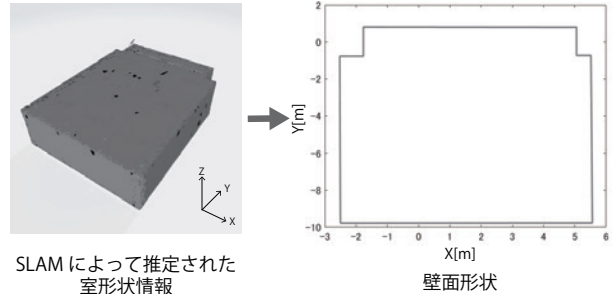


図 2: 部屋形状の抽出

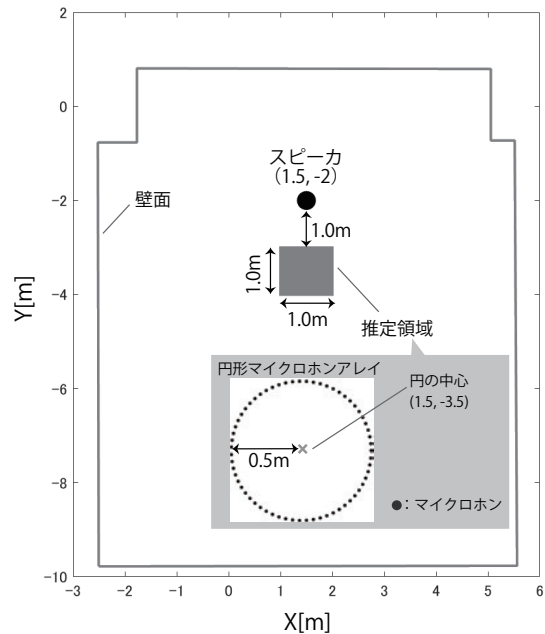


図 3: 実験配置図

デル化を行う [3]。ここでは、部屋の形状は Microsoft HoloLens2 による SLAM で推定された室形状情報を用いる。また、音源位置とマイクロホン位置は概ね既知であるとし、虚像法に基づき、反射音が壁面に対象な虚像付近から到来すると仮定する。虚像位置は Pyroomacoustics を用いて決定する [4]。等価音源法に基づき、実音源と虚像音源の周辺に等価音源を配置し、音場はそれらの線形和で表現する。したがって、マイクロホン測定信号は

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

と表せる。ここで、 $\mathbf{x}'_m$  はマイクロホン位置、 $\mathbf{x}_n$  は等価音源の位置、 $N$  は直接音と虚像に対する等価音源の総数、 $w_n$  は  $n$  番目の等価音源の重みである。また、 $D$

Visualization of sound field by Mixed Reality using room geometry and physical models

<sup>†</sup> Ayame Uchida (22fmi08@ms.dendai.ac.jp)

<sup>†</sup> Yukiko Okawa (21fmi03@ms.dendai.ac.jp)

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

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

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

<sup>††</sup> Yasuhiro Oikawa (yoikawa@waseda.jp)

Tokyo Denki University (<sup>†</sup>)

Waseda University (<sup>††</sup>)

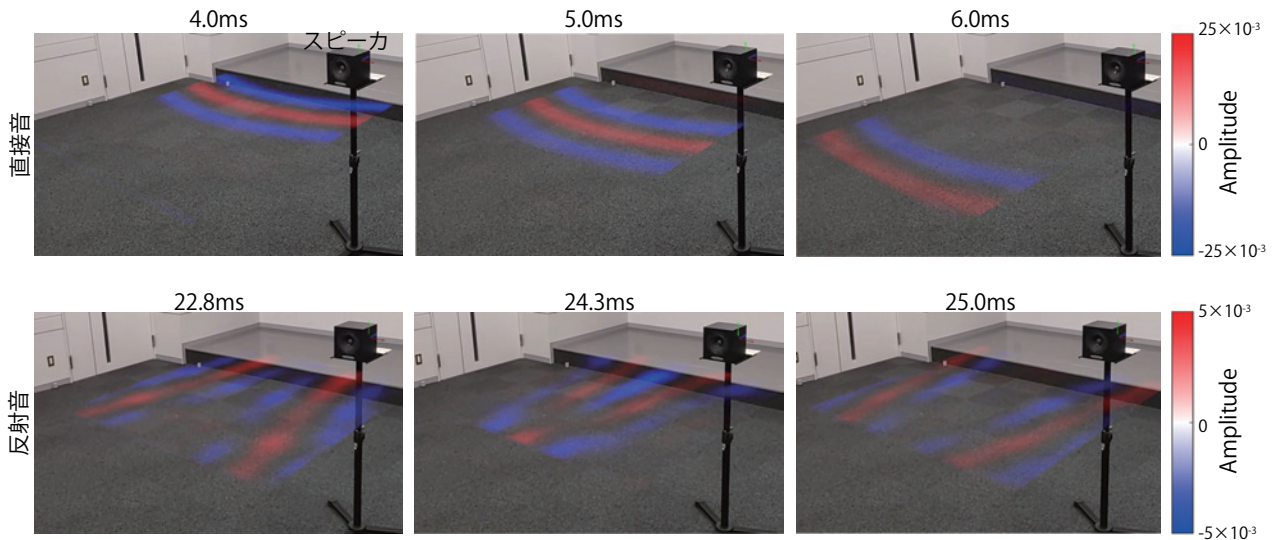


図 4: 複合現実技術を用いた室内インパルス応答の可視化のシミュレーション実験結果

は等価音源からマイクロホンまでの伝達関数を表し、Green 関数で解析的に求められる。式 (1) は全てのマイクロホンに対して成り立つため、以下の行列表現で表すことができる。

$$\mathbf{y} = \mathbf{D}\mathbf{w} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{y}$  は全マイクロホンの測定信号、 $\mathbf{D}$  は伝達関数行列、 $\mathbf{w}$  は等価音源の重み係数ベクトルである。

次に、重み係数ベクトルを求める。等価音源の総数に比べて実/虚像音源の数は極めて少ないことから、重み係数ベクトルにスパース性を仮定し、以下の最適化問題を解く。

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

ここで、 $\|\cdot\|_1$ 、 $\|\cdot\|_2$  はそれぞれ  $\ell_1$  ノルム、 $\ell_2$  ノルム、 $\epsilon$  は誤差の許容値を表す。

### 3 実験

#### 3.1 実験条件

配置したマイクロホンのシミュレーション信号からスピーカ前方  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  の範囲の 1 次反射音を含む音場を推定し、その結果を形状を測定した部屋で複合現実デバイス (Microsoft HoloLens2) を用いて可視化した。音場の推定で用いる部屋の形状は図 2 とし、実験条件を図 3 と表 1 に示す。

#### 3.2 実験結果

実験結果を図 4 に示す。HoloLens2 を用いて実空間上に推定した音場の領域と同じ場所・サイズの 3DCG 平面を用意し、音圧を各画素ごとに色に変換することで、音の波面が流れる様子をアニメーションとして可

表 1: 実験条件

グリッド間隔 [m]	0.05
グリッドの点数	$21 \times 21$
対象周波数 [kHz]	0.5–1.5
サンプリング周波数 [kHz]	4
マイクロホン数	63
等価音源の数	1000

視化した。図より、直接音がスピーカ正面方向へと伝搬していることが分かる。また、しばらくすると側壁に反射した音が横方向から左右両側から伝搬している様子も可視化によって確認できた。

### 4 おわりに

本研究では、SLAM によって推定された室形状と音場モデルを用いた複合現実による音場の可視化を提案した。実験より、シミュレーションにて室形状と少数マイクロホンを用いて推定した音場を、HoloLens2 で可視化することによって推定領域内の波面の様子を実空間上に可視化することができた。今後は、少数マイクロホンでの音場の推定領域の拡大や 3 次元音場の推定を目指す。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 22K12099 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] A. Inoue *et al.*, AST, Vol.40, No.1, pp.1–11, 2019.
- [2] Y. Kataoka *et al.*, SIGGRAPH Asia 2018 Posters, 2018.
- [3] I. Tsunokuni *et al.*, Applied Acoustics, 179, 108027, 2021.
- [4] Pyroomacoustics, <https://pyroomacoustics.readthedocs.io/>, 最終閲覧日 2023/1