

複合現実技術を用いたインタラクティブ3次元音場可視化システム

内田 彩芽[†] 津國 和泉[†] 池田 雄介[†] 及川 靖広^{††}

[†]東京電機大 ^{††}早大理工

1 はじめに

音場の可視化は音響現象の理解を助け、室内音響設計などに役立つ。近年の複合現実技術 (MR) の発展に伴い、我々は MR を用いた 3 次元音場の可視化を提案してきた [1]。しかし、膨大な音場データを一度に観察することが困難である。一般に、多量のデータの把握には、データやグラフを切り替えながらの観測が容易となるインターフェイスが重要である。

そこで本研究では、3次元に広く分布し、かつ時間変化する音場データを把握するインターフェイスとして、MR を用いたインタラクティブに操作可能な音場可視化システムを提案する。測定した少数マイクロホン信号からモデル化された音場に対し、Microsoft HoloLens2 を用いて可視化領域を自由に変更しながら音波面の動画像を実空間上に表示する。

2 提案手法

2.1 物理モデルを用いた音場の推定

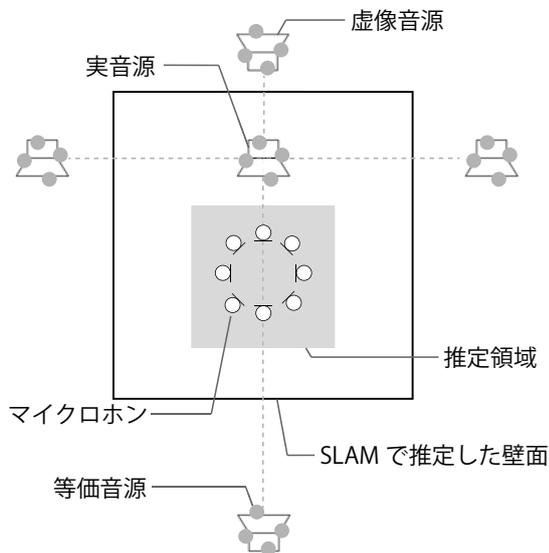


図 1: 音場のモデル化の概念図

音場を可視化するには、可視化対象の音場データを取得する必要がある。一般にマイクロホンで取得で

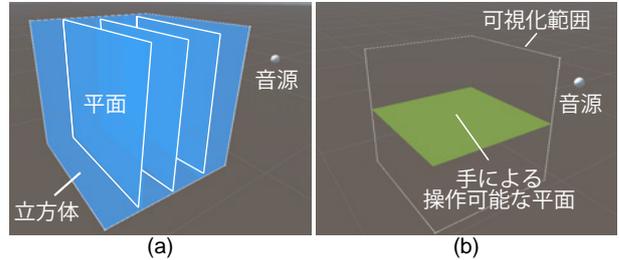


図 2: 可視化オブジェクトの配置

きる情報は 1 点の情報のため可視化する多点の情報を得るには非常に多くの測定が必要になる。そこで、SLAM によって推定された室形状情報に基づき、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デル化を行い、可視化に必要な 3 次元音場情報を効率的に推定する [2]。

モデル化手法の概要を図 1 に示す。音源位置とマイクロホン位置は概ね既知であるとし、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。等価音源法 [3] に基づき、実音源と虚像音源の周辺に N 個の等価音源を配置し、音場をそれらの線形和で表現する。したがって、 M 個のマイクロホン測定信号は以下の行列で表すことができる。

$$\mathbf{y} = \mathbf{D}\mathbf{w} \quad (1)$$

ただし、

$$\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_M]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}_1) & \cdots & D(\mathbf{x}'_1, \mathbf{x}_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D(\mathbf{x}'_M, \mathbf{x}_1) & \cdots & D(\mathbf{x}'_M, \mathbf{x}_N) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_N]^T \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{y} は全マイクロホンの測定信号、 \mathbf{w} はすべての等価音源の重み係数ベクトル、 \mathbf{x}'_m はマイクロホン位置、 \mathbf{x}_n は等価音源の位置である。また、 \mathbf{D} は等価音源からマイクロホンまでの伝達関数行列を表し、Green 関数で解析的に求められる。

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。

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}}{\text{minimize}} \|\mathbf{w}\|_1 \\ & \text{subject to } \|\mathbf{y} - \mathbf{D}\mathbf{w}\|_2 \leq \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

Interactive visualization system of 3D sound field using Mixed Reality

[†] Ayame Uchida (22fmi08@ms.dendai.ac.jp)

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

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

^{††} Yasuhiro Oikawa (yoikawa@waseda.jp)

Tokyo Denki University ([†])

Waseda University (^{††})

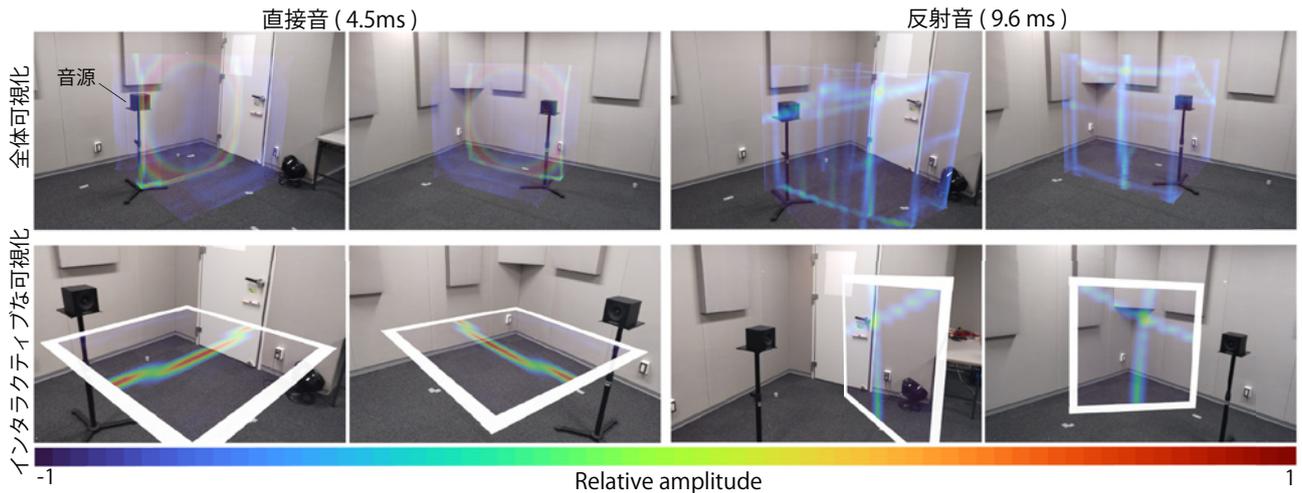


図 3: 複合現実技術を用いた 3 次元音場の可視化実験結果

ここで, $\|\cdot\|_1$, $\|\cdot\|_2$ はそれぞれ l_1 ノルム, l_2 ノルム, ϵ は誤差の許容値を表す.

2.2 MR によるインタラクティブな音場可視化

Microsoft HoloLens2 による音場の可視化を行うためのアプリケーションを Mixed Reality Toolkit (MRTK) を用いて実装する. 今回は, 2つの可視化方法を用意する. 1つ目は, 音場の全体の流れを観察できるように可視化範囲を固定して可視化する. 図 2(a) のように可視化範囲内に可視化範囲と同じ大きさの立方体オブジェクトと 3つの平面オブジェクトを用いる. 2つ目は可視化領域の位置を手の操作で自由に変更しながら可視化する. 図 2(b) のように可視化範囲内に手で位置操作が可能な単一平面オブジェクトのみを用いる. 推定した 3次元音場全体の振幅をカラーマップに変換し, 配置したオブジェクトにその位置の適する振幅カラーマップをテクスチャとして張り付ける. そして, カラーマップを更新し, 時間変化する音の伝搬をアニメーションとして表現する. 表示速度は, 音速の約 2×10^{-4} 倍とする.

また, MRTK に搭載されている手にアタッチ可能なハンドメニュー機能を用いて, 可視化操作メニューを実装する. このメニューでは, 可視化アニメーションの再生や一時停止, 可視化パターンの変更を行うことができる. アニメーションを停止した状態でも, 手動操作による可視化領域の自由な位置変更が可能である.

3 実験

Microsoft HoloLens2 を用いたシミュレーションデータによる 3次元音場の可視化実験を行った. 可視化する音場の範囲は, スピーカ前方 1 m の 1 m^3 とし, 60-ch 円筒型マイクロホンアレイ (底面の直径 0.5 m, 高さ 0.4 m) を用いて 1次反射音を含む室内インパルス応答を推定した. シミュレーション条件を表 1 に示す.

表 1: シミュレーション条件

グリッド間隔 [m]	0.05
音場データの解像度	$21 \times 21 \times 21$
対象周波数 [kHz]	0.5–4.0
サンプリング周波数 [kHz]	48
等価音源の数	1000

実験結果を図 3 に示す. 図より, 全体可視化では, 直接音や反射音の到来方向など, 推定した音場の大きな流れが確認できる. しかし, 特に反射音が重なって到来してくる場面では, 視認性が低下してしまうことが分かった. 一方で, インタラクティブな可視化では, 表示する音場が一平面に限定されることで, 特に反射音の可視化において, 特定の反射音を見ることができる位置に移動して観察可能である. しかし, 平面オブジェクトの位置移動操作を行うことにより, 可視化に適切な位置を見つけるために時間がかかる課題がある.

4 おわりに

本研究では, 複合現実技術によるインタラクティブ 3次元音場可視化システムを提案した. MR による可視化実験により, 音場の全体の流れと, より情報を限定した可視化を実現することができた. 今後は, より広範囲の音場の推定及び可視化を目指す.

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. Uchida *et al.*, Proc. of InterNoise2023, 2023.
- [2] I. Tsunokuni *et al.*, Applied Acoustics, 179, 108027, 2021.
- [3] Efrén Fernandez-Grand *et al.*, The Journal of ASA, 141(1):532–542, 2017.