

複合現実技術と手持ちマイクロホン計測を用いたインパルス応答の可視化

渡辺 靖明[†] 池田 雄介[†] 片岡 優太^{††} 及川 靖広^{††} 小坂 直敏[†]

[†]東京電機大 ^{††}早大理工

1 はじめに

直接見ることが困難な物理現象である音場の可視化は、騒音の分析や音響設計などに有用であり、これまで様々な手法が提案されてきた [1]。一方、近年急速に発達している複合現実技術 (MR) は、空間自体に CG 映像を重畳して表示可能なため、音の反射の原因である物体と測定された音データの関係を実空間上で観察することが可能となる。そこでこれまで我々は、MR と手持ちマイクロホン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 [2, 3]。このシステムでは、計測空間内で手持ちのマイクロホンを走査して計測された音響インテンシティがリアルタイムに実空間上にマッピングされ、音のエネルギーの流れを可視化する。しかし、音の反射のような複雑な音場に対しては、時間変化を含めて可視化する必要がある。

そこで、このシステムを拡張し、時間変化を含んだ音場の可視化を行うために有効な空間インパルス応答の計測/可視化を行うシステムを提案する。このシステムでは、任意の 2 次元平面に沿うように手持ちマイクロホンを走査させながら、連続的にインパルス応答を計測し、マイクロホンの移動経路と得られた録音信号からグリッド上の空間インパルス応答を推定する。さらに、推定された空間インパルス応答を MR を用いて実空間上にアニメーションとして表示する。

2 インパルス応答計測/可視化システム

2.1 概要

提案システムの概要図を図 1 に示す。スピーカから Time Stretched Pulse (TSP) 信号を繰り返し出力しながら、計測者が図 2 のように測定空間内の 2 次元平面に沿うように手持ちマイクロホンを走査して、計測を行う。計測後、マイクロホンの移動経路情報と録音信号を元に、後述の手法を用いてグリッド上の空間インパルス応答を推定する。

推定されたグリッド点上の空間インパルス応答は、

Visualization System of Impulse Responses using Mixed Reality and Hand-held Microphone

[†] Yasuaki WATANABE(yasuaki.watanabe@ms.dendai.ac.jp)

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

^{††} Yuta KATAOKA(kataoka8894@akane.waseda.jp)

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

[†] Naotoshi OSAKA(osaka@mail.dendai.ac.jp)

Tokyo Denki University ([†])

Waseda University (^{††})

2D 画像に変換され、実空間上へテクスチャとしてマッピングされる。音速のまま表示すると変化が早すぎるため、ここでは 0.3 秒毎に 2D 画像を更新し、音速の約 1/1800 倍の速度でアニメーションとして表示される。

マイクロホンの移動経路情報の取得は、マイクロホンに取り付けられた AR マーカと Microsoft HoloLens による Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) で推定された自己位置情報を組み合わせることで行う。マイクロホンの移動経路の取得方法は従来システム [3] と同様であり、HoloLens 側で AR マーカを認識し、HoloLens の空間マップに AR マーカの座標を対応付けることで、計測座標位置の推定している。

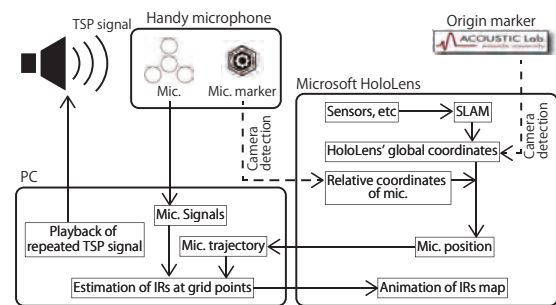


図 1: システム概要図

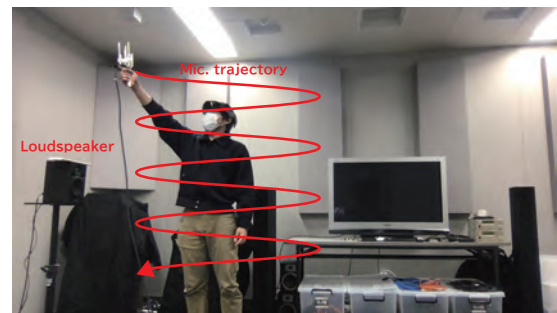


図 2: 計測風景 (赤線: マイクロホン経路)

2.2 グリッド上のインパルス応答の推定

ここでは、Fabrice らによって提案された移動しながら録音されたマイクロホン信号から、グリッド上のインパルス応答を推定する手法を基に推定処理を行う [4]。以下に簡単に説明する。

まず、順問題として、グリッド上のインパルス応答から、任意経路のインパルス応答の補間を考える。グリッド g のインパルス応答 $h(g, n)$ から任意経路のインパルス応答への補間は、以下の式で表すことがで

きる.

$$h(\mathbf{y}(n), n) = \sum_{\mathbf{g} \in G} \varphi(\mathbf{g}, \mathbf{y}(n)) h(\mathbf{g}, n) \quad (1)$$

ここで, $\mathbf{y}(n)$ は時間 n におけるマイクロホンの位置, $\varphi(\mathbf{g}, \mathbf{y}(n))$ はグリッドの点 \mathbf{g} とマイクロホン位置 $\mathbf{y}(n)$ 間の補間関数である. 測定信号を R 回繰り返すことによって式 (1) は次のような行列式で表せる.

$$\mathbf{h}_m = \mathbf{A} \mathbf{h}_g \quad (2)$$

ただし,

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_m &= [h(\mathbf{y}(1, 1), 1), \dots, h(\mathbf{y}(L, R), LR)]^T \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} \Phi_{1,1} & \cdots & \Phi_{N,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{1,R} & \cdots & \Phi_{N,R} \end{bmatrix} \\ \Phi_{u,r} &= \text{diag}(\phi(\mathbf{g}_u, \mathbf{y}(1, r)), \dots, \phi(\mathbf{g}_u, \mathbf{y}(L, r))) \\ \mathbf{h}_g &= [h(\mathbf{g}_1, 1), \dots, h(\mathbf{g}_N, L)]^T \end{aligned}$$

ここで, $u (= 1, \dots, N)$ はグリッドの各点のインデックスを表す. そして, 時間-空間周波数変換によって, 式 (2) は次のように表せる.

$$\mathbf{h}_m = \mathbf{A} (\Psi_X \otimes \Psi_Y \otimes \Psi_L) \mathbf{c} \quad (3)$$

ここで, \otimes はクロネッカー積, Ψ_L は離散時間フーリエ変換行列の逆行列, Ψ_X と Ψ_Y はそれぞれ X, Y 軸に対応するフーリエ変換行列の逆行列を表す.

目的である任意経路を移動したマイクロホンによる録音信号から, グリッド上の多点のインパルス応答を推定する逆問題を考える. 波数空間上のスパース性を用いて, 以下の最適化問題を解くことで, ベクトル \mathbf{c} を求める.

$$\begin{aligned} \underset{\mathbf{c} \in \mathbb{C}^{(L \times N)}}{\text{argmin}} \quad & \|\mathbf{c}\|_{\ell_1} \\ \text{s.t.} \quad & \|\mathbf{h}_m - \mathbf{A} (\Psi_X \otimes \Psi_Y \otimes \Psi_L) \mathbf{H} \mathbf{c}\|_{\ell_2} \leq \epsilon \quad (4) \end{aligned}$$

ここで, \mathbf{H} は, 時間空間周波数上で波動方程式を満たす解のみを通すフィルタである. また, 時間領域のスパース性を用いて解く場合は, フーリエ変換を行わずに, 時間信号のまま同様の最適化問題を解くことで求めることが可能となる.

3 実験

防音室 (暗騒音レベル 20 dB 以下) にて提案システムを用いた計測実験を行った. その他の計測条件は, 表 1 に示す.

マイクロホンの移動経路上の録音信号から 2.2 節の手法により, グリッド上のインパルス応答を推定した

表 1: 計測条件

グリッド間隔 [m]	0.1
グリッドの点数	11×10
グリッドサイズ [m]	1.0×0.9
サンプリングレート [kHz]	6
TSP 信号の長さ [ms]	0.17

結果を HoloLens を用いて可視化した様子を図 3 に示す. 2D 画像表示を滑らかにするため, 推定されたグリッドは 200×200 に再度補間を行った.

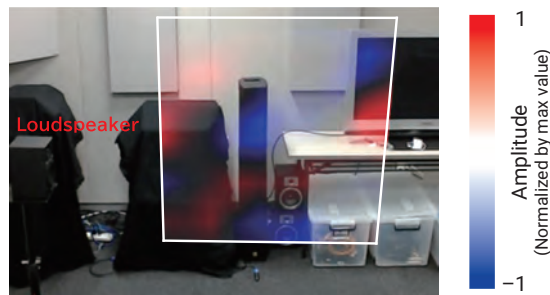


図 3: 可視化結果

図より, スピーカの正面方向へ音が伝搬している様子がわかる. また, HoloLens を用いることで実空間上に音源であるスピーカの実物とデータを同時に観測可能であることが確認できた. しかし, 推定精度が十分ではなく, 波面の形状が正確ではないことから, 推定精度の改善が必要である.

4 おわりに

手持ちマイクロホンによる動的インパルス応答計測と MR を用いた空間インパルス応答の可視化システムを提案した. 今後は, 信号処理の改善により推定精度の向上を目指す.

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] 尾本章, “音の可視化技術,” 映像情報メディア学会誌 65, pp.453-458, 2011
- [2] Atsuto Inoue, *et al.*, “Visualization system for sound field using see-through head mounted display,” *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol. 40, pp.1-11, 2019.
- [3] Yuta Kataoka, *et al.*, “Real-Time Measurement and Display System of 3D Sound Intensity Map Using Optical See-through Head Mounted Display,” *SA '18: SIGGRAPH Asia 2018 Posters.*, no.71, pp.1-2, May. 2017.
- [4] Fabrice Katzberg, *et al.*, “A Compressed Sensing Framework for Dynamic Sound-Field Measurements,” *IEEE/ACM Trans. Audio, Speech, Lang. Process.*, vol.26, no.11, pp.1962-1975, Nov. 2018.