4T-01

不規則間隔音響インテンシティの空間補間を用いた複合現実による音場可視化システム

内田 彩芽 † 大川 祐貴子 † 渡辺 靖明 † 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，音の発生源の特定などの音響現象の理解を助け，騒音問題や防音対策，音響設計に役立つ．これまで，我々は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]．このシステムでは，手持ちマイクロホンで音場を走査し，複合現実デバイスを用いて実空間上に計測された音響インテンシティをリアルタイム表示可能である．しかし，手持ちマイクロホンで計測するため，データの測定間隔が不規則となり，システム上，測定間隔が規定の値以上に開くまでは計測をしないなどの工夫が必要となり，必ずしも計測が効率的ではなかった．また，手動のため，同一平面上に計測することが難しくデータが多数の平面に渡ってしまう問題点が挙げられる．加えて，従来システムの音響インテンシティ推定手法であるクロススペクトル法では，高周波数においてマイクロホン間隔による空間ナイキスト周波数の影響を受けてしまう．

そこで，本研究では，従来システムを拡張し，不規則間隔で計測した音響インテンシティ情報を空間補間し，データの見やすさに配慮して等間隔にデータを可視化するシステムを提案する．また，このシステムでは，高周波数まで正確に音響インテンシティを推定可能な PAGE 法を適用する [2]．音響インテンシティを手持ちアレイを自由に動かして計測した後，等間隔に空間補間した音響インテンシティを同一平面上に可視化する．

2 提案システム

2.1 概要

提案システムの概要を図 1 に示す．このシステムでは，複合現実デバイスである Microsoft HoloLens2 を計測者が装着し，可視化対象となる空間内を手持ち 4-ch マイクロホンアレイで走査し，音圧を計測する．計測で得られた音圧から後述の手法を用いて音響インテンシティを推定/空間補間し，等間隔に音響インテンシティを可視化する．

マイクロホンの計測位置の取得は従来システム [1] と同様であり，計測空間内の基準とする位置と手持ちマイクロホンの 2 箇所に設置された AR マーカと，Microsoft HoloLens2 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推定する．

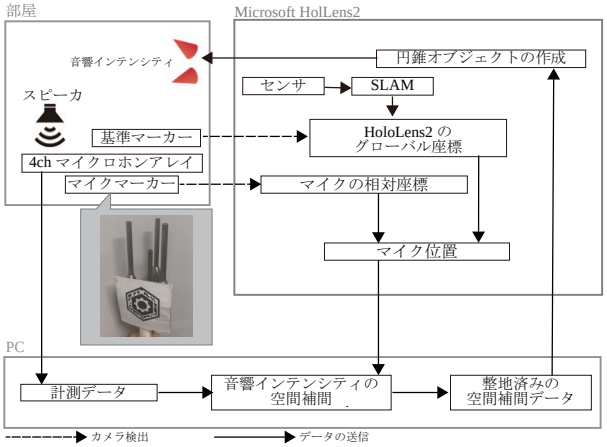


図 1: システム概要図

2.2 PAGE 法による音響インテンシティの空間補間

Tomas らは高周波数まで音響インテンシティを正確に推定可能な PAGE 法 [2] を提案しており，以下に簡単に説明する．

まず，最小二乗法に基づき，位相勾配 $\widehat{\nabla\phi}$ は，以下の式で推定することができる．

$$\widehat{\nabla\phi} = (\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\delta(\phi) \tag{1}$$

このとき，$\mathbf{X}$ は位置差分ベクトルであり，N 個のマイクロホンの位置ベクトル $\mathbf{r}_N$ を用いて以下のようにして得られる．

$$\mathbf{X} = [\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 | \mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1 | ... | \mathbf{r}_N - \mathbf{r}_{N-1}]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

また，$\delta(\phi)$ は位相差分ベクトルであり，N 個の複素音圧 p_N からそれぞれ得られる．

$$\delta(\phi) = \left[\arg\left\{\frac{p_2}{p_1}\right\}, \arg\left\{\frac{p_3}{p_1}\right\}, \ldots, \arg\left\{\frac{p_N}{p_{N-1}}\right\}\right]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

Mixed Reality Visualization System for Sound Field Using Spatial Interpolation of Irregularly-Sampled Sound Intensity Map

† Ayame UCHIDA(18fi024@ms.dendai.ac.jp)
† Yukiko Okawa(21fmi03@ms.dendai.ac.jp)
† Yasuaki WATANABE(20fmi26@ms.dendai.ac.jp)
† Yusuke IKEDA(yusuke.ikeda@mail.dendai.ac.jp)
†† Yasuhiro OIKAWA(yoikawa@waseda.jp)
Tokyo Denki University (†)
Waseda University (††)

Copyright ©2022 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

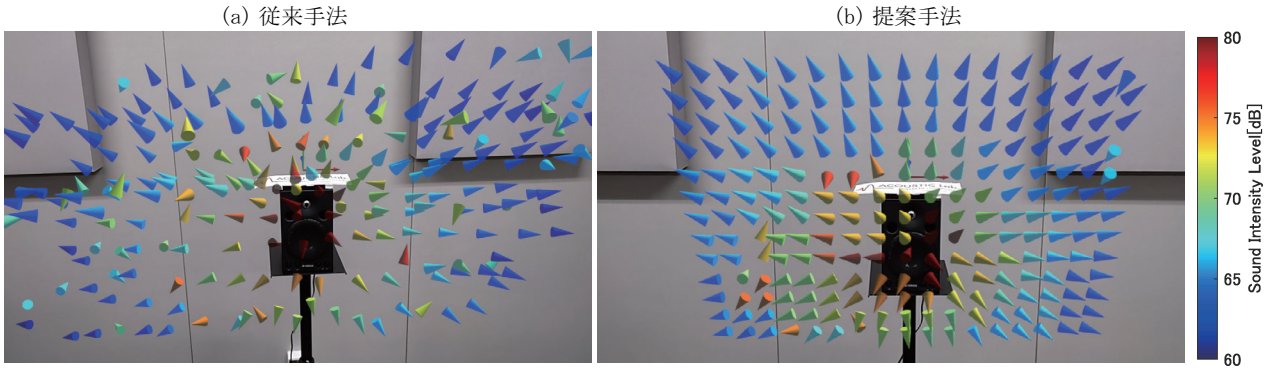


図 2: HoloLens2 を用いた可視化結果

ここで，マイクロホン間隔による空間ナイキスト周波数の影響を考慮し，位相勾配の算出時に位相アンラップを適用する．そして，式 (1) から音響インテンシティの実部であるアクティブインテンシティ$\mathbf{I}_a$を以下のようにして推定する．

$$\mathbf{I}_a = \frac{1}{\omega\rho_0} P_0^2 \widehat{\nabla\phi} \tag{4}$$

このとき，P_0 はマイクロホンアレイの中心点での振幅，ω は角周波数，ρ_0 は空気の密度である．

次に音響インテンシティの空間補間を行う [3]．まず，すべての計測点の座標を用いて Delaunay 三角形分割を行う．そして，分割された領域ごとにアクティブインテンシティ$P_0^2\widehat{\nabla\phi}$の値を最近傍補間し，空間の任意のグリッド状の音響インテンシティを補間する．

3 実験

東京電機大学防音室（暗騒音 20 dB 以下）にて，提案システムを用いた音源付近の可視化実験を行った．実験条件を表 1 に示す．対象周波数は中心周波数 1 kHz の 1 オクターブバンドとする．スピーカから白色雑音を出力しながら，測定空間内の音響インテンシティを手持ちマイクロホンで自由に測定し，補間後に等間隔グリッド状に可視化を行った．従来法で計測した音響インテンシティをその場に可視化した結果とグリッド状に空間補間して可視化した結果を図 2 に示す．

図 2(a)，(b) より，円錐オブジェクトの向きが音響インテンシティの向き、色がレベルを表している．従来手法では，計測点の位置にばらつきがあり，データの視認性が低下している．一方で，空間補間した音響インテンシティは同一平面のグリッド状に整地され，データの視認性が向上していることが分かる．

表 1: 実験条件

空気の密度 [kg/m^3]	1.293
マイクロホン間隔 [m]	0.05
サンプリング周波数 [kHz]	48
測定点数 (補間前)	221
補間グリッドの点数	17 × 13
グリッド間隔 [m]	0.05
分析サンプル数 [Sample]	4096
スピーカの出力音圧 [dB]	84
(スピーカから 1 m の距離で測定)	

4 おわりに

本研究では，不規則間隔音響インテンシティ分布に対して，データの見やすさに配慮して空間補間を行った複合現実による音場可視化システムを提案した．可視化実験によって音響インテンシティデータの視認性の向上を確認した．今後は，少数の測定点を用いた音響インテンシティマップの作成を目指す．

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] Y. Kataoka *et al.*, “Real-time measurement and display system of 3D sound intensity map using optical see-through head mounted display,” SIGGRAPH Asia 2018 Posters, 2018.
[2] Derek.C.Tomas *et al.*,“Phase and amplitude gradient method for the estimation of acoustic vector quantities”, Acoustical Society of America 137, pp.3366–3376，2015.
[3] Amidror, Isaac. “Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey.” Journal of Electronic Imaging. Vol.11, No.2, pp.157–176，2002.

Copyright ©2022 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.