

機械学習による等価音源分布からの壁面の音響インピーダンス推定の検討

大川 祐貴子[†] 松橋 遼[†] 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

音場シミュレーションは建築音響設計や音響現象の理解に役立つが、現場に即した音場シミュレーションを実施するには境界条件である壁面の音響インピーダンス（吸音率）を知る必要がある。音響インピーダンス計測は、壁面付近で計測するため、室形状によっては計測が困難となる。そこで、近年、数値シミュレーションと実測を併用して音響インピーダンスを推定する研究が行われている。Navaらは、室内のランダムな位置で測定された多くのデータから境界要素法を用いて音響インピーダンスを推定している [1]。また、Foyらは、インパルス応答を入力データとして機械学習を行い、平均吸音率を推定する手法を提案しており、実測データを用いた実験では、既存の手法と同程度の精度を得ている [2]。

そこで、本研究では、計測コストの削減と推定精度の改善を目的とし、少数の室内インパルス応答（RIR）データから等価音源を用いた音場の推定を行い、擬似的に増やしたマイクロホン情報を学習データとして、機械学習による吸音率の推定手法の検討を行う。

2 提案手法

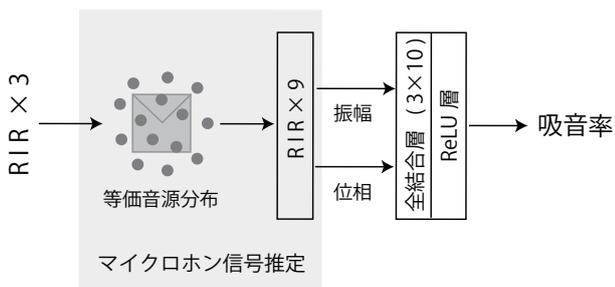


図 1: 提案手法の概要図

提案手法の概要図を図 1 に示す。本研究では、部屋の形状と音源位置は概ね既知であるとする。まず、入力データは、少数マイクロホンで計測された RIR 信

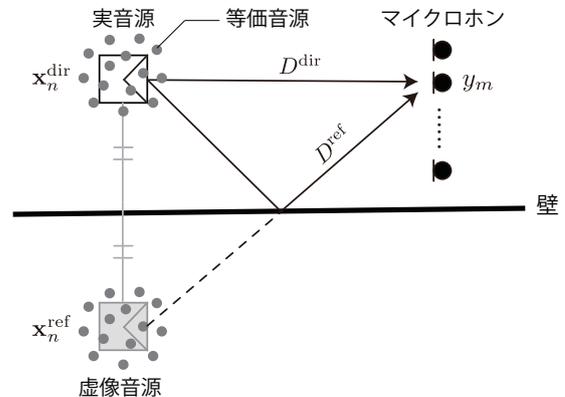


図 2: 等価音源法と虚像法による特徴量抽出の概要

号を用いる。実際に多くの境界条件で学習データを作成するのは困難なため、境界要素法による数値シミュレーションによって学習データの RIR 信号を作成する。

次に、この RIR 信号を等価音源法と虚像法を用いて、等価音源の線形和に変換する。変換手法を以下で説明する。等価音源法 [3] は、波動方程式を満たす解である点音源（等価音源）の線形和で実音場を表現する手法である。本研究では反射音に対する等価音源の配置を決定するために虚像法を用いる [4]。これは、音源位置に対して壁面に対称な位置に虚像音源を想定し、その周辺に基底となる等価音源を配置する。

実音源と虚像の位置に配置した等価音源の伝達関数を用いて、位置 \mathbf{x}'_m にある m 番目のマイクロホンで計測した伝達関数は

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

となる。ここで、 D^{dir} , w_n^{dir} はそれぞれ位置 $\mathbf{x}_n^{\text{dir}}$ にある直接音を表す n 番目の等価音源の伝達関数とそれにかかる重み係数、同様に、 D^{ref} , w_n^{ref} は位置 $\mathbf{x}_n^{\text{ref}}$ にある反射音を表す等価音源の伝達関数とその重みを表す。

等価音源の伝達関数は Green 関数を用いて求めることができるが、その重み係数は未知である。そこで、等価音源の空間的なスパース性を利用した最適化問題を解くことで、等価音源の重み係数を求める。求めた

Acoustic impedance estimation from equivalent source distribution using machine learning

[†] Yukiko OKAWA(21fmi03@ms.dendai.ac.jp)
[†] Haruka MATSUHASHI(21fmi18@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 (^{††})

等価音源を用いて任意の位置 \mathbf{x} の伝達関数 \hat{G} は

$$\hat{G}(\mathbf{x}) = -\frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{2N} w_n \frac{e^{-ik|\mathbf{x}-\mathbf{x}_n|}}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}_n|} \quad (2)$$

と表せる. ここで, \mathbf{x}_n は等価音源の位置, w_n は対応する等価音源の重み係数, i は虚数単位, k は波数を表す. したがって, 等価音源を用いて擬似的に配置されたマイクロホンの伝達関数を推定することが可能となる.

3 シミュレーション実験

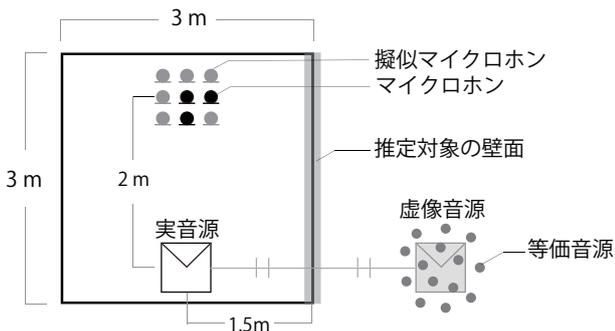


図 3: 実験における配置

教師あり学習に用いた NN は, 3 層の全結合層で構成され, 層のサイズはそれぞれ 10 とした. アクティベーションには ReLU 層を用いる. 評価は 5 分割交差検証で行う. 3 つのマイクロホンから 9 つのマイクロホンの信号を等価音源分布を用いて推定した. 推定された 9 つのマイクロホン信号の振幅と位相を学習データとして用いる.

3.1 実験条件

実験条件を図 3 に示す. 2 次元の閉空間 (3 m × 3 m) とし, うち 1 面の壁面の吸音率のみを推定する.

表 1: 学習データのシミュレーション条件

周波数 [Hz]	500
音速 [m/s]	340
グリッドの間隔 [m]	0.05
学習に用いた吸音率	0.2–0.8 (0.01 ごと)

シミュレーション条件を表 1 に示す. 本実験では, 推定対象以外の壁面は完全吸音とする. 機械学習に用いる等価音源は, 推定対象の壁面と面対称な位置の虚像位置に配置した. マイクロホンは図 3 のように 0.2 m 間隔に 3 本配置した. 擬似マイクロホンも同様に 0.2 m 間隔とした. また, マイクロホン信号にはガウスノイズ (SNR 30 dB) を付加し, 50 回分の RIR データを用いた. また, 従来手法として同じ NN を用いて学習データに 100 回分の RIR 信号自体を利用して学習したモデルと比較する.

3.2 実験結果

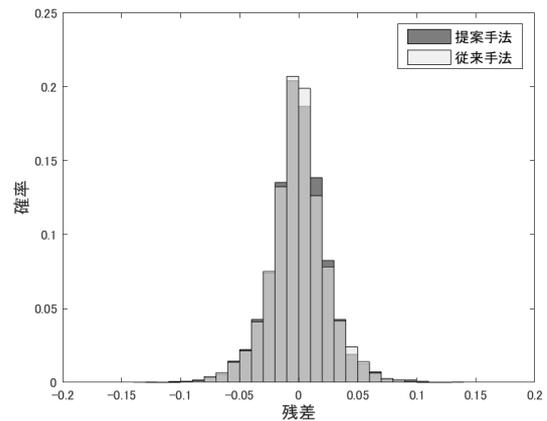


図 4: 推定結果の残差のヒストグラム

図 4 に推定結果のヒストグラムを示す. 二乗平均平方根誤差 (RMSE) は, 提案手法と従来手法で, それぞれ 0.023 と 0.027 であった. 擬似マイクロホン信号を利用することで, RMSE に若干の改善が見られた. また, 図から, 分布に大きな差異は見られなかった. また, 等価音源の位置と重み係数を学習データに利用した場合は RMSE は 0.094 となり, 推定精度が悪化したため, 擬似マイクロホンの利用が有効であると考えられる.

4 おわりに

等価音源を学習データとし, 機械学習を用いて吸音率を推定する手法を提案した. 今後は, 擬似マイクロホンの数, 測定位置の誤差, 境界条件の数や実測による検討を行いつつ, 推定精度の向上を目指す.

謝辞 本研究の一部は科研費 19K12049 の助成を受けたものです.

参考文献

- [1] Gabriel Pablo Nava, *et al.*, “On the in situ estimation of surface acoustic impedance in interiors of arbitrary shape by acoustical inverse methods,” *Acoustical Science and Technology*, Vol. 3, pp.100–109, 2009.
- [2] Cédric Foy, *et al.*, “Mean absorption estimation from room impulse responses using virtually supervised learning,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 40, pp.1286–1299, 2021.
- [3] G. H. Koopmann, *et al.*, “A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 86, no. 5, pp. 2433–2438, 1989.
- [4] I. Tsunokuni, *et al.*, “Extrapolation of Spatial Transfer Functions for Primary Reflections with Equivalent Sources,” *2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 34–38, 2020.