

長岡技術科学大学大学院
工学研究科修士論文

題 目

インパルス応答の補間技術を用いた
多点制御法によるエリア再生に関する
研究

指導教員

杉田 泰則 准教授

著 者

工学専攻

電気電子情報工学分野

19104591 高橋圭汰

令和 7 年 2 月 7 日

目次

第 1 章	初めに	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	2
第 2 章	エリア再生シミュレーション	3
2.1	多点制御法	3
2.1.1	多点制御フィルタ	3
2.2	FDTD 法	4
2.2.1	音場の離散化	4
2.2.2	方程式と離散化	5
第 3 章	インパルス応答補間技術	8
3.1	等価音源法 (TESM)	8
3.1.1	音響モデル	8
3.1.2	TESM における音圧の表現	9
3.1.3	TESM の数学的定式化	10
3.2	TESM における重みの推定	10
3.2.1	逆問題	10
3.2.2	最適化アルゴリズム	11
第 4 章	実験	12
4.1	実験内容	12
4.2	制御点数における影響	12
4.2.1	制御点配置	12
4.2.2	条件	13
4.2.3	結果	13

4.3	補間を用いたエリア再生	14
4.3.1	学習位置と補間位置の条件	14
4.3.2	結果	15
4.3.3	学習位置の変更	16
4.3.4	結果	18
4.3.5	スピーカと制御点の距離の変更	20
4.3.6	結果	21
4.3.7	仮想音源の半径の変更	23
4.3.8	結果	23
4.3.9	インパルス応答精度の確認	24
第 5 章	終わりに	28
5.1	まとめ	28
5.2	今後の展望	28
謝辞		30
参考文献		31

第 1 章

初めに

1.1 研究背景

エリア再生技術は、特定の地域やエリアにおける音響環境を再現・改善するための手法で、自動運転の車内で座席ごとの音楽やアナウンス、博物館や美術館での展示物の案内に利用することができる。人々が音をどのように認識し、どのように空間内で音の反響や広がりを感じるかという音響特性を再現することは、音響設計やエンターテインメント、さらには人間の快適な生活空間の提供にも直結する重要な要素となっている。エリア再生の基本的な考え方は、音源から放射される音が空間内の異なる位置でどのように伝播し、反響するかを分析し、それに基づいて音響効果を最適化することである。これにより、リスニングエリア全体で均等な音質を確保することが可能となり、音楽や声などの音の鮮明さやバランスを向上させることができる。エリア再生は、特に大規模な音響システムにおいて、複雑な音響現象を精密に制御する必要があるため、非常に高度な技術を要します。音の伝播の仕方を数値的にモデル化することで、音源の位置やリスナーの位置、音の反射や拡散をシミュレーションし、それに基づいた制御を行う手法が一般的である。このような技術の進歩は、特に建築音響や音響エンジニアリングの分野で活用されている。

エリア再生の手法の中で、複数のスピーカを用いるものは様々ある。ビームフォーミング [1,2] と呼ばれる複数のスピーカーを使って音波を特定の方向に集中的に放射する技術がある。音源からの信号を各スピーカーで異なるタイミングで出力させることによって、音の指向性を制御する。音を特定の方向に集中させるため、音の広がりには制限があり、他のエリアで音が不均一になる可能性がある。境界音場制御 [3] と呼ばれる手法では、音響空間内の壁や天井、床といった境界面の反射を利用して、音の指向性を制御する。しかし、音響空間の反射面に依存するため、空間の形状や表面の材質によって音の反射が予想しない結果を生むことがある。SDM[4] と呼ばれる手法

では、音源とリスナーを空間的に分割し、各スピーカから放出される音波の強度や位相を調整することで、音場を最適化する。SDM を効果的に実行するために広いエリアでのスピーカ配置が必要となり、技術的な制約が存在する。

これらの複数スピーカを用いた手法に対して、多点制御法 [5,6] ではスピーカの配置にあまり依存せず、空間内の任意の位置で音響を最適化するため、広い空間や複雑な形状の部屋でも高い柔軟性を発揮する。またエリア全体の音響特性を精密に測定し、応答制御点と抑圧制御点の伝達関数に基づいて、逆フィルタを計算することで音を最適化する。これにより特定のエリアでの再生を可能とする。また複数のエリア再生で異なる音を再生するには、応答エリアでの音が抑圧エリアへ漏れ出さないことが必要である。そのため、多点制御法は指向性の調整や複数のエリア再生において非常に効果的であるが、うまく分離するためには多くの制御点が増えるという問題 [6] がある。これは、実機でのエリア再生を行う際に、伝達関数を求めるために各スピーカから制御点までのインパルス応答を測定しないと行けず [7]、測定するために多くの時間と労力を必要とする。

1.2 研究目的

本論文では、多点制御法に必要なインパルス応答の一部を補間 [8] することによって、測定するインパルス応答を減らした時のエリア再生の精度をシミュレーションを用いて、評価することを目的とする。また、測定すべき場所の優位性についての解析も行う。

1.3 本論文の構成

本論文は第2章にてエリア再生に使用する手法である多点制御法とシミュレーション方法について述べる。3章では、2章で説明したエリア再生手法に、今回使用するインパルス応答補間の手法について述べる。4章ではエリア再生を行う際のシミュレーションの条件と3章の手法を使用する条件と結果を述べる。5章では本論文の結果を述べる。

第 2 章

エリア再生シミュレーション

2.1 多点制御法

エリア再生の技術の一つである多点制御法は、複数のスピーカを用いて音圧を制御して特定のエリアで音を最適化する技術である。スピーカから制御点上の伝達関数を使用し、音圧を逆フィルタ処理を行うことによってコントロールを行うことができる。

2.1.1 多点制御フィルタ

スピーカ M 個を使用し、 N 点の数の制御点までの音圧を制御する際の各スピーカのフィルタ特性について説明する。 m 番目のスピーカから n 番目の制御点までの伝達関数を $G_{mn}(\omega)$ とすると、全体の伝達関数 $G(\omega)$ は

$$G(\omega) = \begin{bmatrix} G_{11}(\omega) & \cdots & G_{M1}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{1N}(\omega) & \cdots & G_{MN}(\omega) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

となる。各制御点での制御特性を $P_n(\omega)$ とすると、全体の制御特性は $P(\omega)$ は

$$P(\omega) = [P_1(\omega) \quad P_2(\omega) \quad \cdots \quad P_N(\omega)]^T \quad (2.2)$$

となる。制御点上で音を再生したい場所を応答制御点、音の再生を抑制したい場所を抑圧制御点として配置した際、応答制御点上の制御特性を 1、抑圧制御点上の制御特性を 0 とすることにより、応答制御点上での音の再生が可能になる。

$$P_n(\omega) = \begin{cases} 1, & n \text{ が応答制御点} \\ 0, & n \text{ が抑圧制御点} \end{cases} \quad (2.3)$$

式 (2.1), (2.2) および (2.3) によって各スピーカのフィルタ特性 $W_m(\omega)$ は

$$W = G^{-1}P \quad (2.4)$$

式 (2.4) が成り立つためには、伝達関数 \mathbf{G} の逆行列 \mathbf{G}^{-1} が存在しないといけない。今回はスピーカ \mathbf{M} と制御点数 N が異なる実験を行うため、 \mathbf{G} の逆行列が求められないため、最小二乗法を用いた近似解を求める方法が採用する。このとき、一般化逆行列を利用した式は以下のようになる [9]。

$$\mathbf{W} = (\mathbf{G}^H \mathbf{G} + \delta(\omega) \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^H \mathbf{P} \quad (2.5)$$

ここで、 \mathbf{G}^H は伝達関数 \mathbf{G} の共役複素転置、 \mathbf{I} は単位行列、 δ は正則化パラメータ (数値的不安定性を緩和するための小さな正の値) である。式 (2.5) を用いることで、スピーカ数と制御点数が異なる場合でもフィルタ特性を求めることができる。正則化パラメータ δ は周波数ごとに適切な値を選択する必要があるが、本論文では、すべての周波数で一定の値 $\delta(\omega)=0.003$ を使用することで、最適な性能を確保している [6]。

2.2 FDTD 法

今回のエリア再生のシミュレーションには FDTD 法を用いる。FDTD 法 (Finite difference time domain)[10,11] とは Yee によって電磁界解析 [12] に初めて使用され、空間と時間を格子点で離散化し、偏微分方程式の微分を差分に置き換えて解く手法として、音響シミュレーションにおいても広く使用されている [13]。

2.2.1 音場の離散化

まず初めに、音場をどのように離散化するかを説明する。Fig.2.1 の (a) では、離散化する前の 2 次元音場である。(b) では音場を直交格子によって離散化したものである。それぞれの直交格子によって交わっている交点の部分を格子点とする。 Δt の間隔で格子点上における音圧や速度成分を更新することが、基本的な考え方である。基本的な直交格子ではなく、スタガード格子 (Staggered grid) と呼ばれるものがあり、Fig2.2 のように丸の位置では音圧、矢印の向きには x, y 方向の速度成分とし、音圧と速度成分を異なる位置に配置することで、計算の安定性が向上することができる。また、一つの音圧と隣接するそれぞれの方向の速度成分をまとめてセルと呼ぶ。

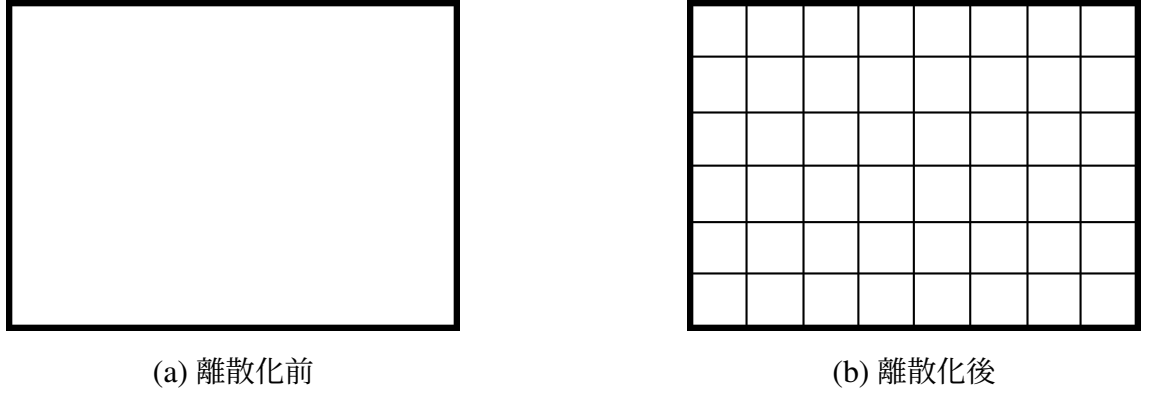


Fig. 2.1: Image of discretized sound field

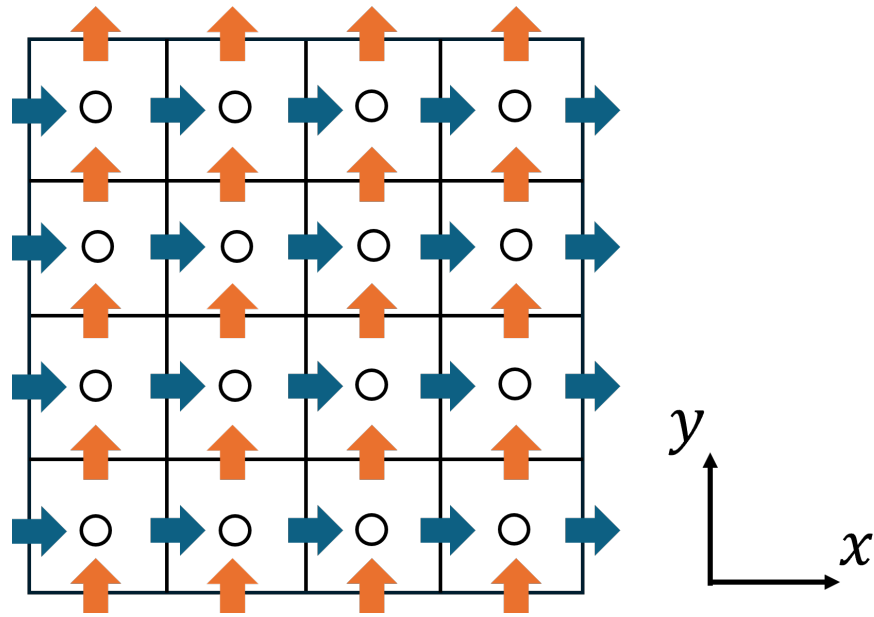


Fig. 2.2: Staggered grid

2.2.2 方程式と離散化

空気中における音波は x, y, z 方向の運動方程式 (式 (2.6)) と、連続の式 (2.7) を満たす。

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial y} + \rho \frac{\partial u_y}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} + \rho \frac{\partial u_z}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \kappa \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.7)$$

p は音圧、 u_x, u_y, u_z は各方向における速度成分、 ρ は密度、 κ は体積弾性率である。

式 (2.6) の x 方向の運動方程式について、速度成分と音圧の空間微分項を中心差分で近似を行うと、

$$\frac{p(i+1) - p(i)}{\Delta x} + \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} = 0 \quad (2.8)$$

となる。 i はセル番号である。この時の $\frac{p(i+1)-p(i)}{\Delta x}$ は Fig.2.2 の $u_x(i+1)$ の位置の差分値である (Fig.2.3)。

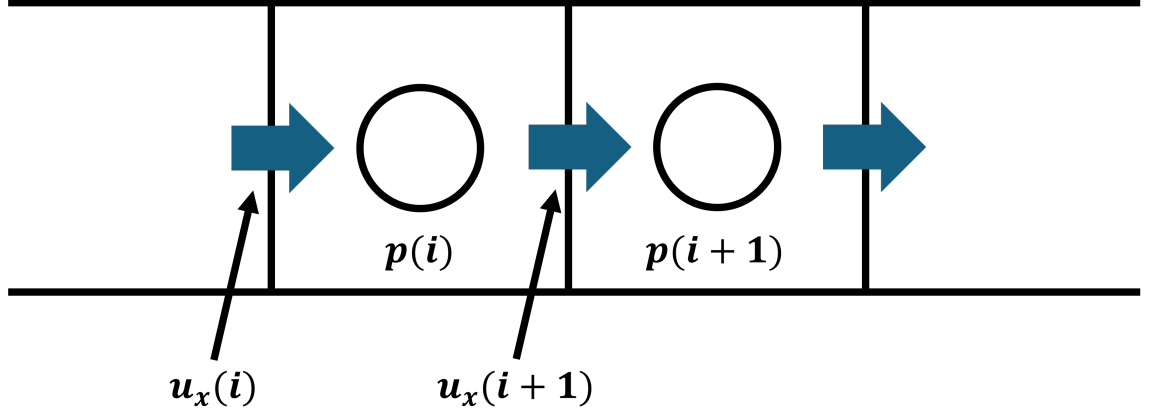


Fig. 2.3: spatial derivative term

式 (2.8) を速度成分の時間微分項の差分化を行うと、

$$\frac{p^n(i+1) - p^n(i)}{\Delta x} + \rho \frac{u_x^{n+1}(i+1) - u_x^n(i+1)}{\Delta t} = 0 \quad (2.9)$$

となり、式 (2.9) に Δt を掛け変形を行うと、

$$u_x^{n+1}(i+1) = u_x^n(i+1) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} [p^n(i+1) - p^n(i)] \quad (2.10)$$

となる。式 (2.10) より、既知の速度成分や音圧によって Δt 後の速度成分を求めることができる。連続の式も同様にすると、

$$p^{n+1}(i) = p^n(i) - \frac{\Delta t \kappa}{\Delta x} [u_x^{n+1}(i+1) - u_x^{n+1}(i)] \quad (2.11)$$

となる。式 (2.10) をもとに 3 次元に拡張すると、 x, y, z 方向の運動方程式は、

$$u_x^{n+1}(i+1, j, k) = u_x^n(i+1, j, k) - \frac{\Delta t}{\Delta x \rho} [p^n(i+1, j, k) - p^n(i, j, k)] \quad (2.12)$$

$$u_y^{n+1}(i, j+1, k) = u_y^n(i, j+1, k) - \frac{\Delta t}{\Delta y \rho} [p^n(i, j+1, k) - p^n(i, j, k)] \quad (2.13)$$

$$u_z^{n+1}(i, j, k+1) = u_z^n(i, j, k+1) - \frac{\Delta t}{\Delta z \rho} [p^n(i, j, k+1) - p^n(i, j, k)] \quad (2.14)$$

と求まる。連続の式も同様に行うと、

$$\begin{aligned} p^{n+1}(i, j, k) = p^n(i, j, k) - & \left[\frac{\Delta t \kappa}{\Delta x} \left(u_x^{n+1}(i+1, j, k) - u_x^{n+1}(i, j, k) \right) \right. \\ & + \frac{\Delta t \kappa}{\Delta y} \left(u_y^{n+1}(i, j+1, k) - u_y^{n+1}(i, j, k) \right) \\ & \left. + \frac{\Delta t \kappa}{\Delta z} \left(u_z^{n+1}(i, j, k+1) - u_z^{n+1}(i, j, k) \right) \right] \end{aligned} \quad (2.15)$$

と求まる。このとき、 n は時間方向のインデックス、 i, j, k は x, y, z 方向それぞれのインデックスを意味する。これにより、差分式を用いて更新を行うことで任意のセルの音圧の観測が行える。

第3章

インパルス応答補間技術

3.1 等価音源法 (TESM)

本研究では、インパルス応答補間技術として時間領域等価音源法 (Time-domain Equivalent Source Method, TESM) を採用する。TESM は、音場の時間領域におけるモデル化を行い、少ない測定点から精度の高い音場推定を可能にする手法である。TESM の基盤となる等価音源法 (ESM) [14,15] は、空間内の音場を仮想的な点音源の重ね合わせとして表現する手法である。ESM は周波数領域での解析が主流であったが、TESM[7] では時間領域での解析を行う点が異なる。本章では、TESM のモデル、数式について説明する。

3.1.1 音響モデル

TESM でのインパルス応答の音響モデルを Fig.3.1 に示す。これは部屋の上から見た断面図である。円状に配置された緑の丸は、仮想音源であり球面波を生成する。橙色の四角は補間したい位置、水色の三角は補間したい位置を求めるための学習用位置、 d は仮想音源と観測点との距離、 S は音源である。

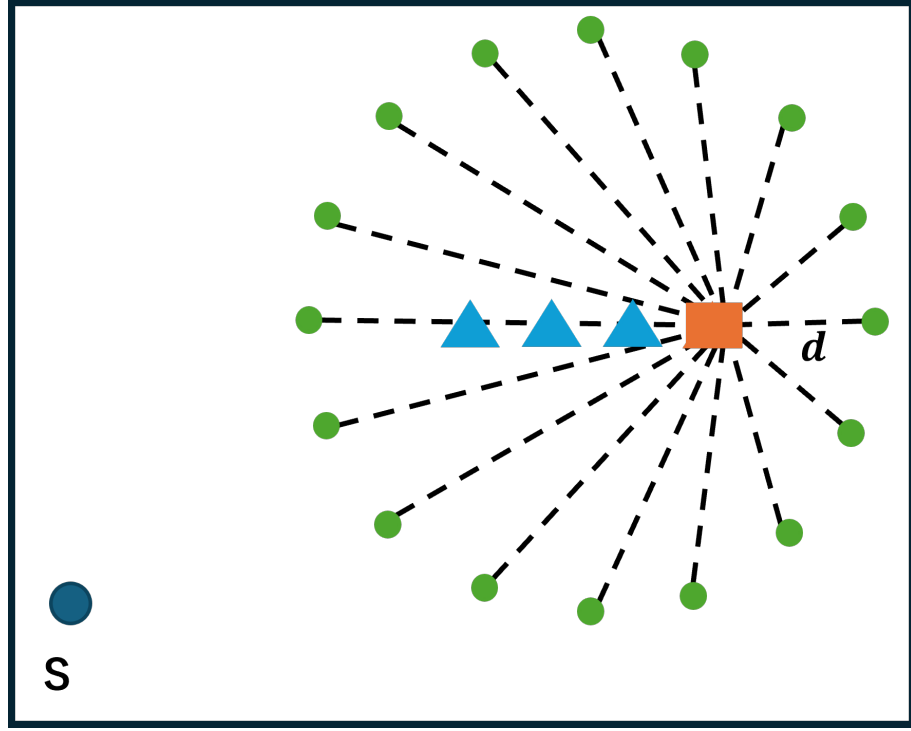


Fig. 3.1: Spherical wave model used for TESM

3.1.2 TESM における音圧の表現

自由空間内で三次元座標の観測点 x での音圧は、

$$\phi_l(x, t) = \frac{1}{4\pi d_l} \delta\left(t - \frac{d_l}{c}\right) \quad (3.1)$$

となる。ここで、 $\phi_l(x, t)$ は時間 t における位置 x での音圧応答であり、 $d_l = \|x - x_l\|$ は音源の位置 x_l から観測点 x までの距離である。 c は音速、 $\delta\left(t - \frac{d_l}{c}\right)$ は音波が距離 d_l を音速 c で伝搬することを示すディラックデルタ関数である。この式は、点音源が発した音波が球面波として伝搬し、距離に応じて減衰することを示している。

TESM では、音場を複数の等価音源の重ね合わせとして表現する。これにより、音圧は式 (3.2) のようになる。

$$p(x, n) \approx \sum_{l=0}^{N_w-1} \delta(n) * \phi_{l,m}(n) * w_l(n) \quad (3.2)$$

ここで、 $p(x, n)$ は時刻 n における観測点 x での音圧を示す。 $w_l(n)$ は等価音源に適用される重み信号で、最適化によって決定されるパラメータである。記号*は畳み込み演算である。式 (3.2) を実際の音源信号 $s(n)$ では式 (3.3) のようになる。

$$p(x, n) \approx \sum_{l=0}^{N_w-1} s(n) * \phi_{l,m}(n) * w_l(n) \quad (3.3)$$

TESM では、適切な重み $w_l(n)$ を求めることで、測定点以外の位置での音圧を推定する。

3.1.3 TESSM の数学的定式化

TESM の数式モデルを行列形式で表現すると、次のようになる。

$$\mathbf{P} = D_t(\mathbf{W}) \quad (3.4)$$

ここで、 \mathbf{P} は時間長 N_t の学習に使用する位置の数 N_m における音圧信号を格納する行列である。 \mathbf{W} は等価音源の重み行列であり、 N_t は時間長、 N_w は等価音源の数である。それぞれの等価音源に適用される時間領域の重み信号を含む。したがって、 \mathbf{W} の各列は、1 つの等価音源に対する時間領域の重み信号を示し、 N_w 列すべてで全体の音場を表現することになる。線形演算子 $D_t : \mathbb{R}^{N_t \times N_w} \rightarrow \mathbb{R}^{N_t \times N_m}$ は TESSM の数学的な処理として、等価音源の重み \mathbf{W} を用いて、各測定点における音圧 \mathbf{P} を計算する操作を意味する。

3.2 TESSM における重みの推定

TESM では、測定されたインパルス応答 P を用いて、各等価音源の重み W を求める。これは逆問題として定式化され最適化アルゴリズムによって求められる。重みの推定式を導出し、最適化手法について述べる。

3.2.1 逆問題

式 (3.5) での式をもとに、測定値 P から未知の重み W を推定する必要がある。この問題は最小二乗法を用いて解かれ、以下の式 (3.5) のようになる。

$$\mathbf{W}^* = \frac{1}{2} \|D(\mathbf{W}) - \hat{\mathbf{P}}\|_F^2 \quad (3.5)$$

ここで $D(\mathbf{W})$ は音響モデル、 $\hat{\mathbf{P}}$ は測定値、 $\|\cdot\|_F$ はフロベニウスノルムを表し、行列全要素の二乗和の平方根を計算する。最小二乗方程式だけでは適切な解を得られない可能性がある。そのため、 L_1 ノルム正則化を適用することで以下のような式を得ることができる。

$$\mathbf{W}_1^* = \frac{1}{2} \|D(\mathbf{W}) - \hat{\mathbf{P}}\|_F^2 + \lambda \|\text{vec}(\mathbf{W})\|_1 \quad (3.6)$$

ここで、 λ は正則化パラメータであり、適切に選択することで、重み行列 \mathbf{W} の多くの要素がゼロに近づくため、モデルの複雑さが低減される。

3.2.2 最適化アルゴリズム

最適化アルゴリズムに、FBS(Forward-Backward Splitting) を用いる。この手法は、2つの処理を順番に交互に実行し、繰り返すことで最適な重み行列 \mathbf{W} を求める。

まず、現在の重み行列 \mathbf{W}_k に対して、目的関数 $f(\mathbf{W})$ の勾配を計算し、勾配方向にわずかに移動することで誤差を減らす。これを前進ステップと呼ぶ。更新式は以下のようになる。

$$\mathbf{W}_g^{k+1} = \mathbf{W}^k - \gamma \nabla f(\mathbf{W}^k) \quad (3.7)$$

ここで、 \mathbf{W}^k は k 回目の更新時点での重み行列、 γ はステップサイズ、 \mathbf{W}^{k+1} は前進ステップによって更新された重み行列の一時的な値である。

次に、更新された重み行列 \mathbf{W}^{k+1} に対して、閾値処理を行う。この処理を後退ステップと呼ぶ。以下の式のようにになる。

$$\mathbf{W}^{k+1} = \text{prox}_{\lambda \|\mathbf{W}\|_1}(\mathbf{W}_{\text{gd}}^k) \quad (3.8)$$

\mathbf{W} の値が λ より小さい場合は 0、それ以外では λ を引く、足す処理である。FBS は、先ほどの 2 つのステップを交互に繰り返すことで \mathbf{W}^k と \mathbf{W}^{k+1} の差が小さくなり、条件を満たすことで収束する。

第 4 章

実験

4.1 実験内容

本論文では、音響数値シミュレーションを用いて、制御点数とインパルス応答を補間する数におけるエリア再生試験を行った。まず、多点制御法のエリア再生における制御点の影響を制御点数を変化させながら確認を行い、制御点数と補間する数を変化させながら、真値のインパルス応答と補間技術によって推定されたインパルス応答によるエリア再生への影響の確認を行っていく。インパルス応答はサンプリング周波数 48kHz の 1024 サンプルを使用した。

4.2 制御点数における影響

初めに、多点制御法の制御点数におけるエリア再生の影響の確認を行う。

4.2.1 制御点配置

1 辺の長さが 3m の立方体とし、高さ 1.5m の位置にスピーカと制御点の配置を示す (Fig.4.1)。スピーカはスピーカ間隔が 0.08m、スピーカ長が 1.2m、スピーカアレーの中心が横軸の 1.5m の位置になるように 16 個配置。今回は左側に黒丸の応答制御点を置いて応答エリア、右側に白丸の抑圧制御点を置いて制御エリアを作る。応答制御点はスピーカアレーの中心から左に 1m、前に 1m の位置 ($x = 1.0, y = 1.0, z = 1.0$)、抑圧制御点はスピーカアレーの中心から前に 0.25m の位置を基準に抑圧制御点間隔を 0.1m とし、前に 1.5m、右側に 1.5m の L 字型に配置した。L 字配置の一番前の位置を番号 1 とし順番に番号をふり、一番右の位置を番号 29 とする。

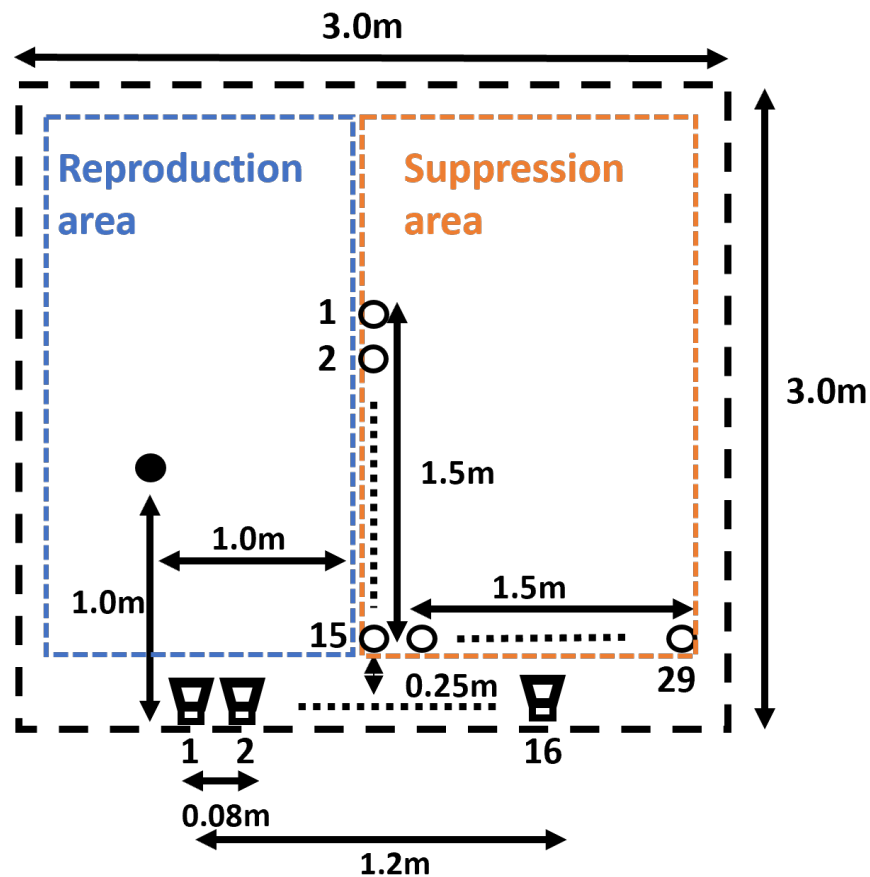


Fig. 4.1: Placement of control points

4.2.2 条件

制御点数におけるエリア再生の影響を見るため、抑圧制御点の数を減らしていき、音圧マップの確認を行う。今回は Fig4.1 の抑圧制御点 29 点、29 点の配置から 1 つずつ間隔を削除した抑圧制御点 15 点、3 つずつ間隔を削除した抑圧制御点 8 点の 3 つの配置条件とし、スピーカ 16 個からホワイトノイズを再生した。

4.2.3 結果

制御点数を変化させたと際の応答制御点を 0dB とした相対音圧マップの結果を Fig.4.2 に示す。これは高さ 1.5m の位置の断面図である。黒い丸が応答制御点、黒いバツが抑圧制御点であり、色が暗くなっているほど音が小さく、明るいほど音が大きいということを示している。制御点数が一番少ない 8 点の場合、抑圧制御点の間から音が漏れているのが確認できた。

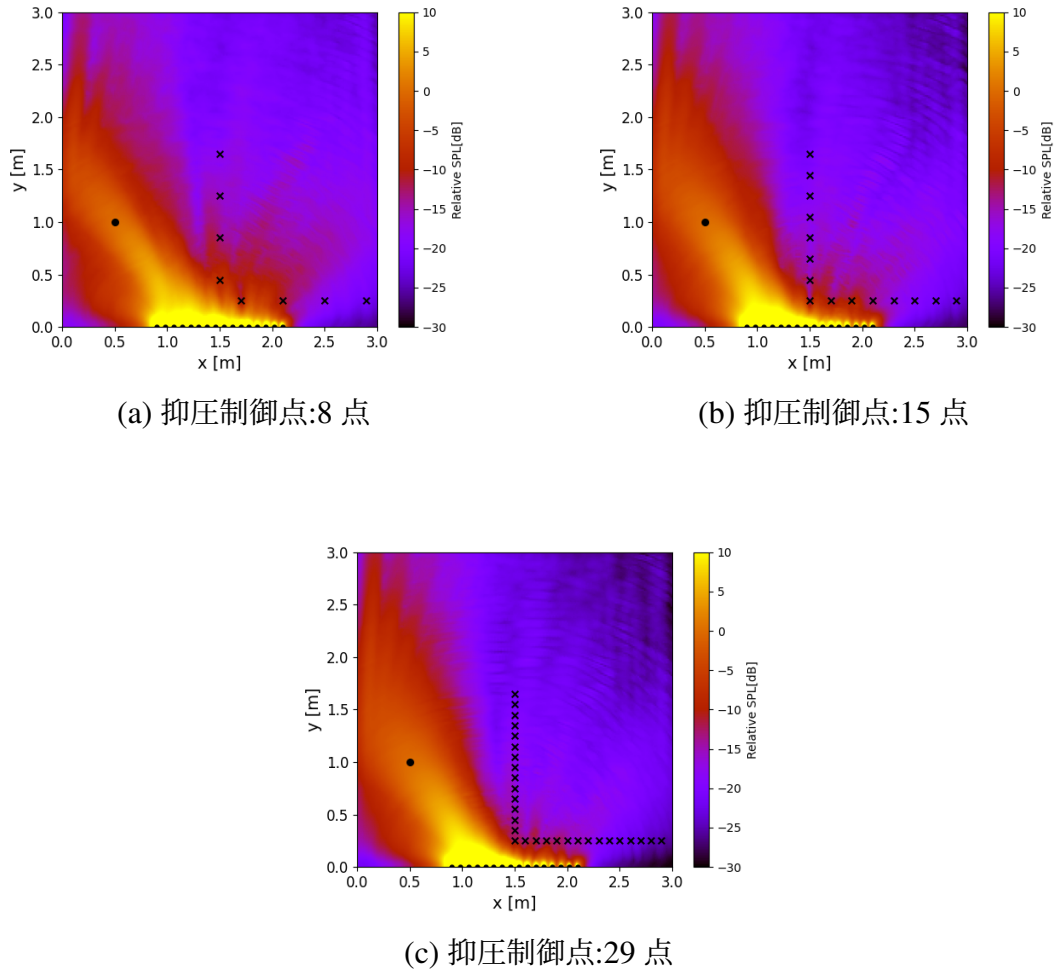


Fig. 4.2: Area regeneration in number of suppression control points

4.3 補間を用いたエリア再生

本研究では、制御する数を減らして、補間技術で推定したインパルス応答で制御する位置を補うことによるエリア再生の精度を確認する。

4.3.1 学習位置と補間位置の条件

Fig.4.2 より、抑圧制御点が 8 点の場合、制御点同士の間から音の漏れが確認できたため、抑圧制御点が 8 点の配置を用いて制御点同士の間の位置を補間技術によって補っていくことにする。その際の学習位置と補間する場所を Fig.4.3 に示す。白丸を学習位置、緑丸を補間する位置を示す。補間場所は、Fig.4.3(a) の番号の両側の 2 つを学習位置とし学習位置の間に 1 点、3 点の 2 つの場合条件で補間を行う。前章で述べた、

用いる補間技術は Fig.3.1 で示していたように仮想音源を配置し、仮想音源と学習位置の距離を用いることで補間を行う。今回の仮想音源の半径を Table.4.1 に示す。仮想音源の中心は補間場所番号の学習位置間の真ん中とし、仮想音源数は 700 とした。

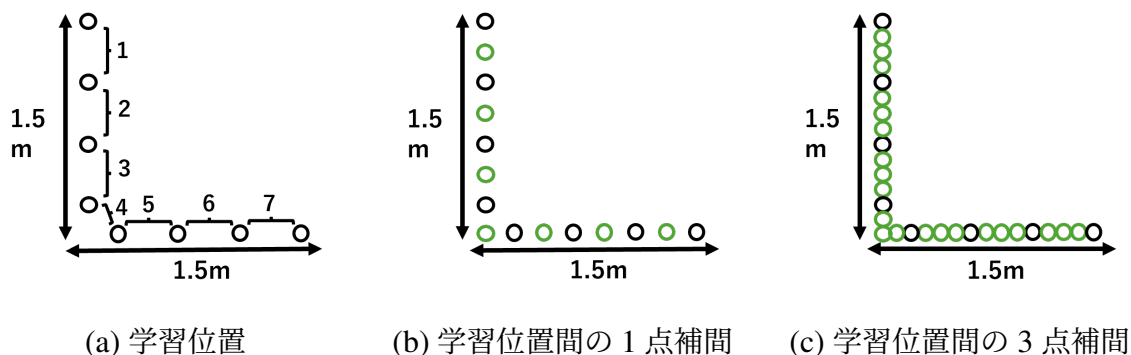


Fig. 4.3: Learning position and interpolation position

Table. 4.1: Radius of virtual sound source

補間場所	1	2	3	4	5	6	7
仮想音源の半径 [m]	0.5	0.5	0.5	0.25	0.25	0.25	0.25

4.3.2 結果

Fig.4.3 の配置によるエリア再生の音圧マップを Fig.4.4 に示す。緑のバツの部分 が補間によって補った抑圧制御点である。(a) の抑圧制御点が 8 点の場合のエリア再生より、(b) の制御点の間を 1 点ずつ補間したものと (c) の制御点の間を 3 点ずつ補間したもののほうが抑圧エリアの音の漏れの広がり が抑えられていることがわかった。Table.4.2 に抑圧制御点数と補間数を変化させたときのそれぞれの抑圧エリア全体の平均音圧を示す。(b),(c) の両方とも Fig.4.2 の (b),(c) と同じような精度にはならず、抑圧制御点を配置している L 字の角 ([1.5,0.25,1.5]m) の付近の音漏れの可能性があることがわかった。

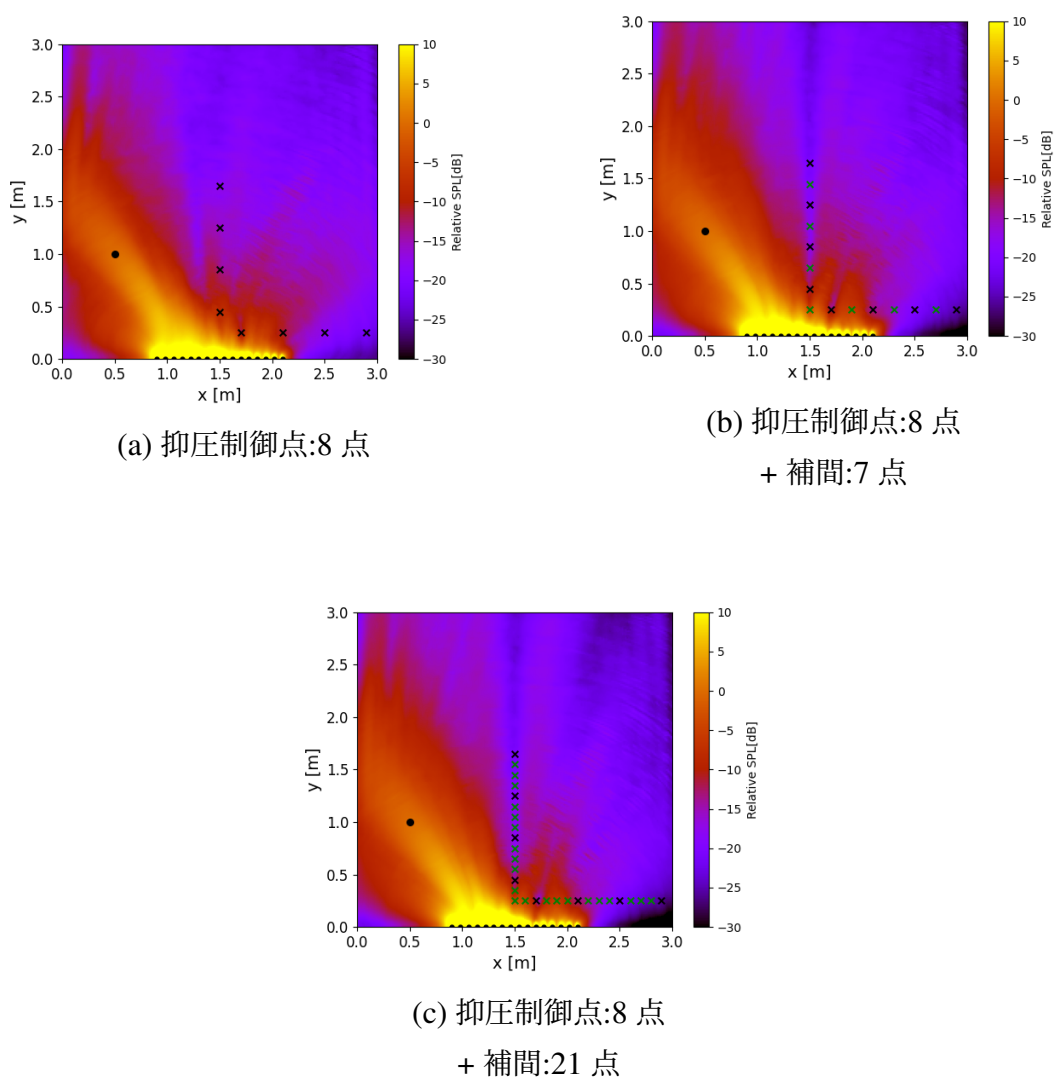


Fig. 4.4: Relative sound pressure level results using interpolated points

Table. 4.2: Average relative sound pressure

制御点数	29 点	15 点	8 点	8 点 + 補間:7 点	8 点 + 補間:21 点
平均相対音圧 [dB]	-22.08	-20.16	-18.12	-18.63	-19.67

4.3.3 学習位置の変更

Fig.4.4 より、L 字配置の角付近での抑圧エリアでの音の漏れの可能性が確認できた。これは L 字配置の角に真値のインパルス応答ではなく補間によって推定したインパルス応答を使用したため、角の抑圧制御がうまくできずに音が漏れたことが考えられる。

そのため、L字の角に真値 (学習位置) を配置したエリア再生を考える。応答制御点と抑圧制御点の配置を Fig.4.5 に示す。またその際の学習位置と補間する場所を Fig.4.6 に示す。Fig.4.5 の抑圧制御点の距離が 1.5m から 1.2m に減少している理由としては、角に学習位置を使用しているため間を学習位置の間を 3 間補間した際の間隔を 0.1m にするためである。そのため、抑圧制御点の数は 29 点から 25 点に変更した。今回の仮想音源の半径を Table.4.3 に示す。

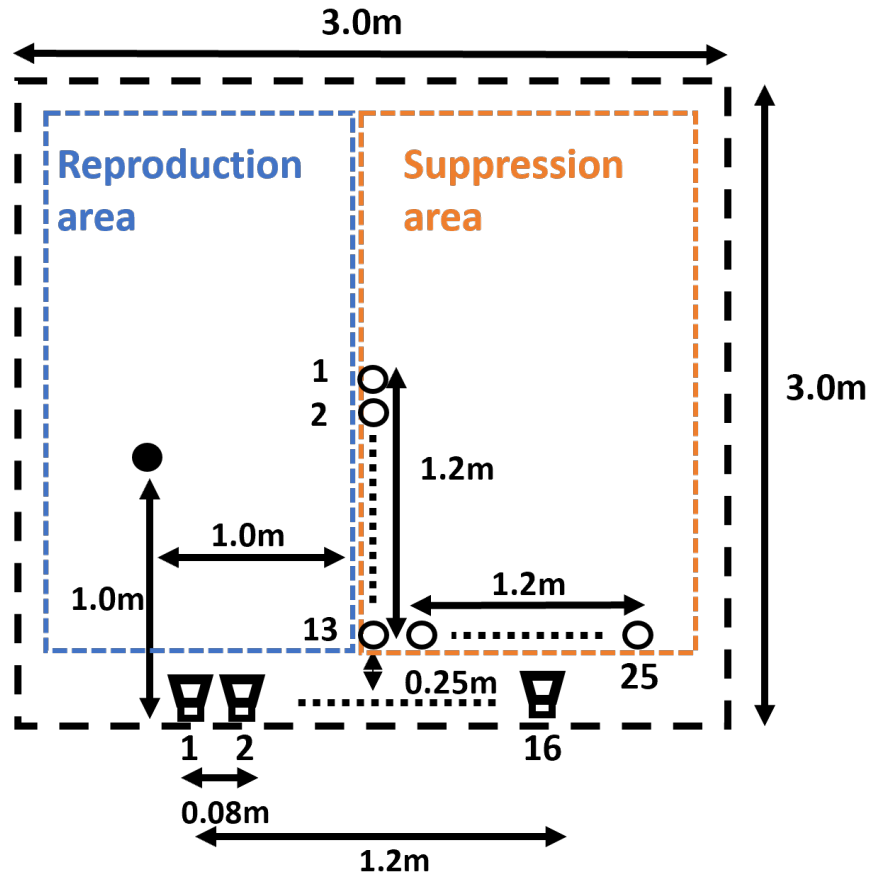


Fig.4.5: Placement of control points

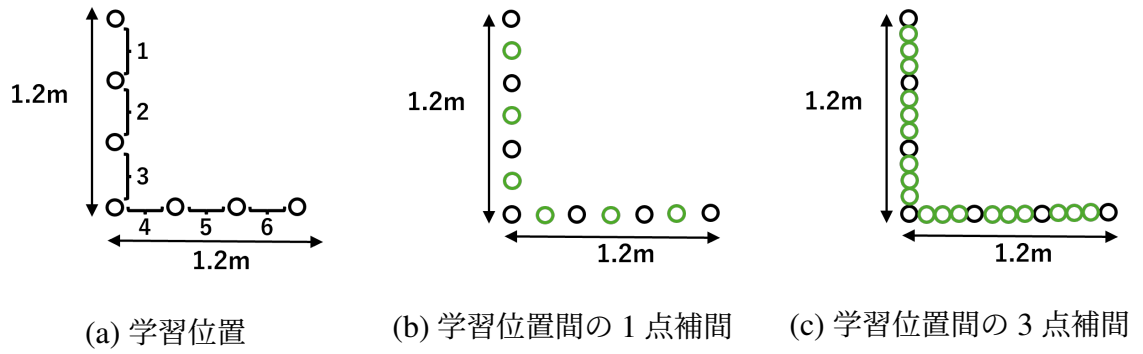


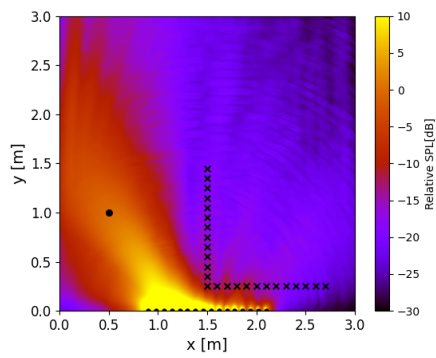
Fig. 4.6: Learning position and interpolation position

Table. 4.3: Radius of virtual sound source

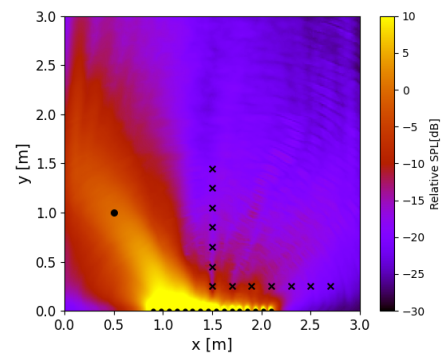
補間場所	1	2	3	4	5	6
仮想音源の半径 [m]	0.5	0.5	0.4	0.25	0.25	0.25

4.3.4 結果

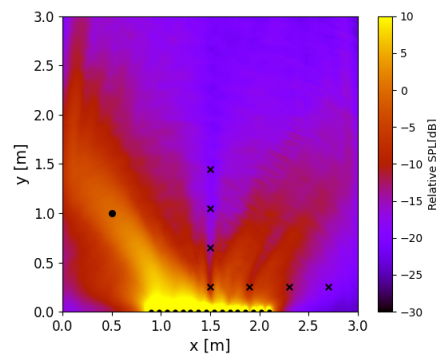
Fig.4.5 の配置における制御点を減らしていった際と Fig.4.6 の制御点を 7 点にし補間で補っていった際の音圧マップを Fig.4.7 に示す。(a),(b),(c) のように抑圧制御点を減らしていくと、Fig.4.2 のように音が漏れている。(d),(e) では抑圧制御点を 7 点とし、補間を追加したときの結果を示している。(e) の制御点の間に 1 点補間を追加したとき、(b) の抑圧制御点 13 点より抑圧エリアへ音が漏れており、遠い場所で y 軸 1.5m あたりまで影響を及ぼしている。(d) の 3 点補間を追加した場合、1 点補間より制御はできているが Fig.4.4 での 3 点補間の実験結果と同様に L 字の角付近での音の漏れが確認できる。Table.4.4 にそれぞれの抑圧エリア全体の平均音圧を示す。この結果からも補間で制御点数をそろえた時、精度は同じにはならなかった。



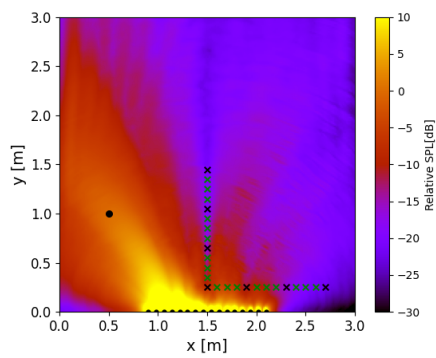
(a) 抑圧制御点:25 点



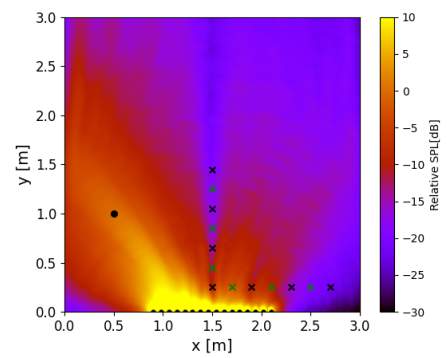
(b) 抑圧制御点:13 点



(c) 抑圧制御点:7 点



(d) 抑圧制御点:7 点 + 補間:18 点



(e) 抑圧制御点:7 点 + 補間:6 点

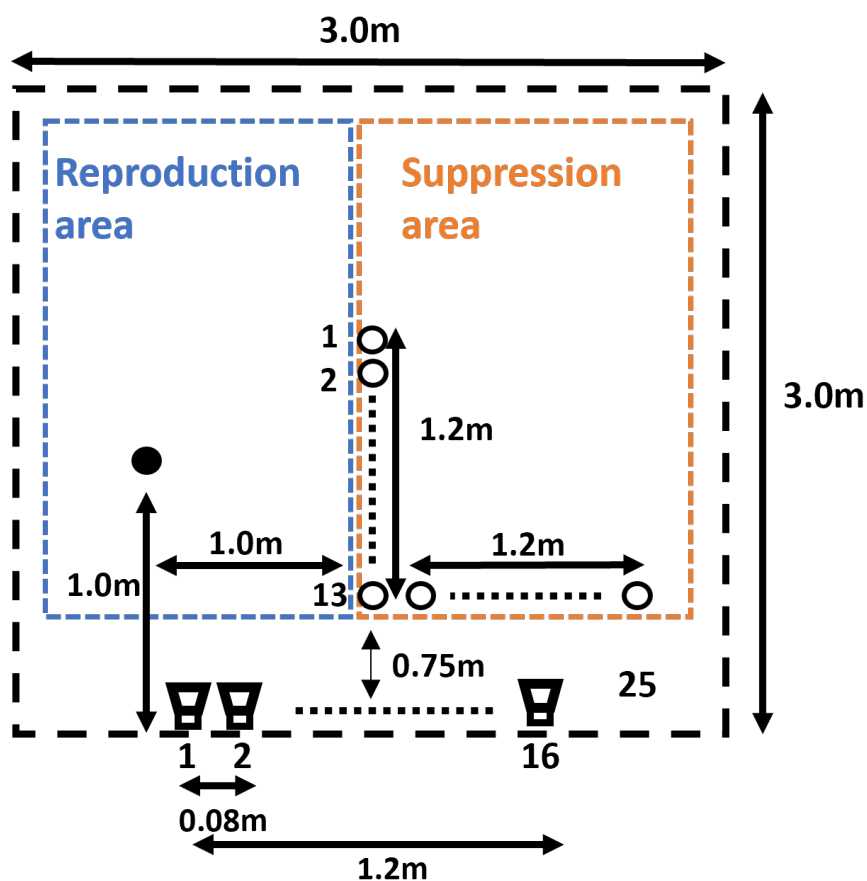
Fig. 4.7: Relative sound pressure level results using interpolated points

Table. 4.4: Average relative sound pressure

制御点数	25 点	13 点	7 点	7 点 + 補間:6 点	7 点 + 補間:18 点
平均相対音圧 [dB]	-22.10	-20.42	-15.95	-16.71	-18.33

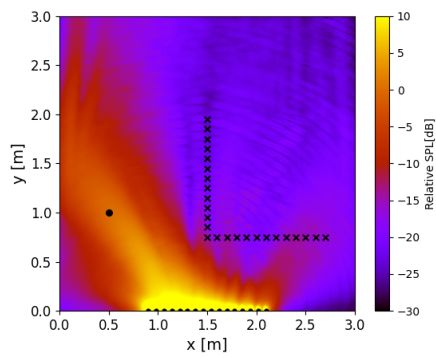
4.3.5 スピーカと制御点の距離の変更

4.3.2,4.3.4 で学習位置を変化させて補間を行っても、L 字付近での音の漏れが確認できた。これはスピーカと制御点との距離が近いと、補間する際に仮想音源の半径が狭くなってしまい補間精度に影響が出るためだと考えられる。そこで次の実験ではスピーカと抑圧制御点との距離を伸ばしてエリア再生を行う。Fig.4.8 に制御点の配置を示す。Fig.4.5 との変更点は抑圧制御点の L 字配置を y 軸方面に 0.5m 移動し、スピーカと制御点の距離を 0.75m とした。補間場所は Fig.4.6、仮想音源の半径は Table.4.3 と同じ条件で行った。

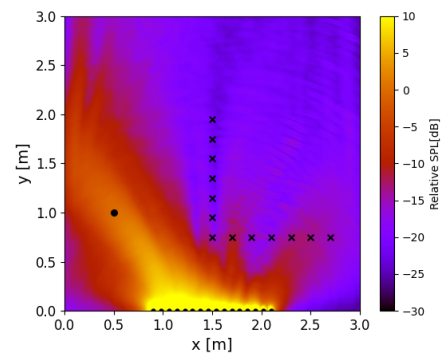
**Fig. 4.8:** Placement of control points

4.3.6 結果

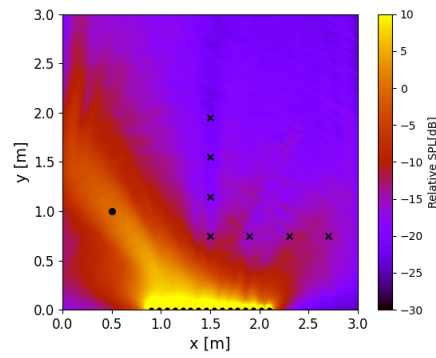
スピーカと制御点の距離を 0.75m に伸ばした際の音圧マップを Fig.4.9 に、それぞれの抑圧エリア全体の平均音圧を Table4.5 に示す。Fig.4.7 と比べると補間込みの抑圧制御点での抑圧エリアへの音の漏れが軽減され、真値を使用したときと同様な抑圧エリアを作ることができた。



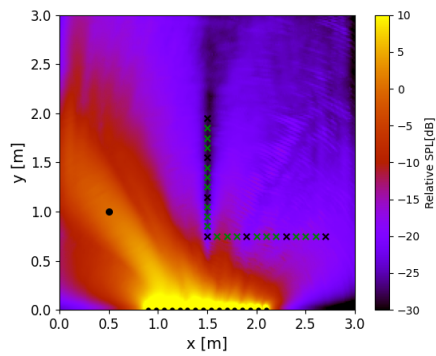
(a) 抑圧制御点:25 点



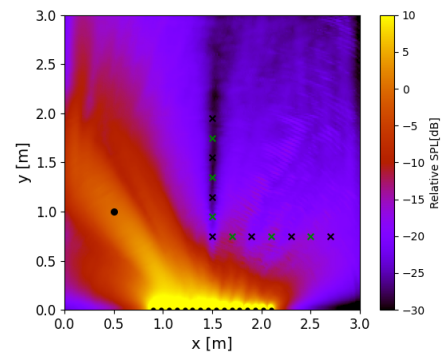
(b) 抑圧制御点:13 点



(c) 抑圧制御点:7 点



(d) 抑圧制御点:7 点 + 補間:18 点



(e) 抑圧制御点:7 点 + 補間:6 点

Fig. 4.9: Relative sound pressure level results using interpolated points

Table. 4.5: Average relative sound pressure

制御点数	25 点	13 点	7 点	7 点 + 補間:6 点	7 点 + 補間:18 点
平均相対音圧 [dB]	-21.55	-19.74	-18.84	-21.66	-22.46

4.3.7 仮想音源の半径の変更

4.3.6 の結果より、距離を伸ばすことで補間込みでも真値と同様な抑圧エリアを作ることができた。しかし Fig.4.9 の (d),(e) をみると抑圧制御点の L 字配置の縦軸が真値より抑圧しており、色がかなり暗くなっている。これは、補間したインパルス応答が実際の緑のバツと違う場所の位置を制御したことが考えられる。さらに真値と同様な精度に近づけるために仮想音源の半径を広げることで、補間の精度に影響があるかを確認する。抑圧制御点は Fig.4.8、補間場所は Fig.4.6 と同じ配置で仮想音源の半径を Table4.6 のように広げた条件で行った。

Table. 4.6: Radius of virtual sound source

補間場所	1	2	3	4	5	6
仮想音源の半径 [m]	0.8	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6

4.3.8 結果

仮想音源の半径を広げた際の音圧マップを Fig.4.10 に、それぞれの抑圧エリア全体の平均相対音圧レベルを Table4.7 に示す。今回は補間に用いる仮想音源の半径を広げたため、補間込みの音圧マップの結果を示している。Table4.7 では 4.3.6 の仮想音源の半径が狭い場合と同様な値が得られた。しかし Fig.4.10 では、Fig.4.9(d),(e) と比較すると今回の方が抑圧制御点の L 字配置の縦軸は真値に近い結果になっていることが確認できた。

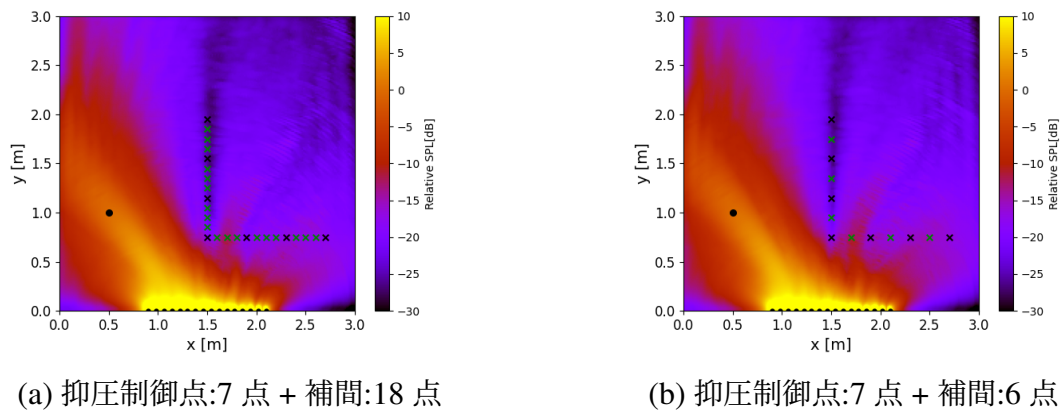


Fig. 4.10: Relative sound pressure level results using interpolated points

Table. 4.7: Average relative sound pressure

制御点数	7点 + 補間:6点	7点 + 補間:18点
平均相対音圧 [dB]	-21.20	-22.27

4.3.9 インパルス応答精度の確認

スピーカと仮想音源の距離と、仮想音源の半径におけるインパルス応答の精度の確認を行うため、スピーカ全体の4.3.3,4.3.5,4.3.7の条件で3点補間した場所で、実際のインパルス応答と補間したインパルス応答の二乗平均平方根誤差 (RMSE) を Fig.4.11 に示す。横軸が補間位置、縦軸が RMSE で緑が 4.3.3、青が 4.3.5、橙色が 4.3.7 の条件を示している。二乗平均平方根誤差をとっているため、値が 0 に近づくほど補間したインパルス応答が実際のインパルス応答と外形が似ていることになる。この結果より、距離を伸ばし仮想音源の半径を広く設定することで、インパルス応答の精度がよくなっていることがわかった。一番左に配置したスピーカと補間位置番号 15 の実際のインパルス応答と補間したインパルス応答の比較を Fig.4.12 に示す。実線が実際のインパルス応答、点線が補間したインパルス応答である。インパルス応答の比較からも補間精度がよくなっていることがわかる。

Fig.4.11 より、仮想音源の半径が同じ条件でスピーカと制御点の距離が 0.25m、0.75m の 2 つを比較すると、0.75m の方が補間の精度が低いことが確認できる。これは距離を増やしたことで補間で使用する学習位置の 2 点のインパルス応答に差がでなかったことが考えられる。0.75m の 2 つで仮想音源の半径を伸ばした方が精度が高い

のは、仮想音源の半径が広がることで半径が狭い時より多くの仮想音源で重みをもったことが考えられる。

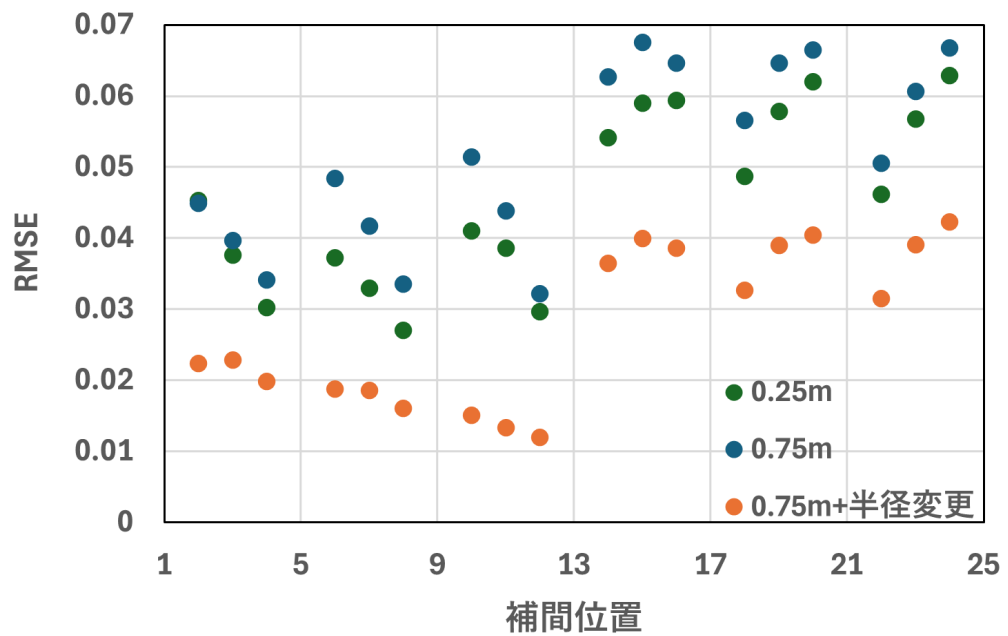
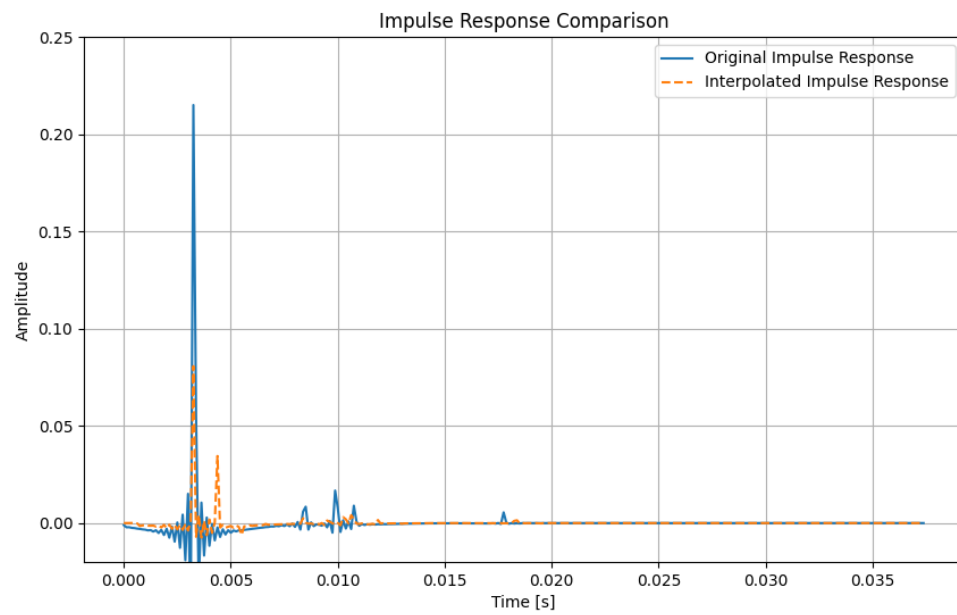
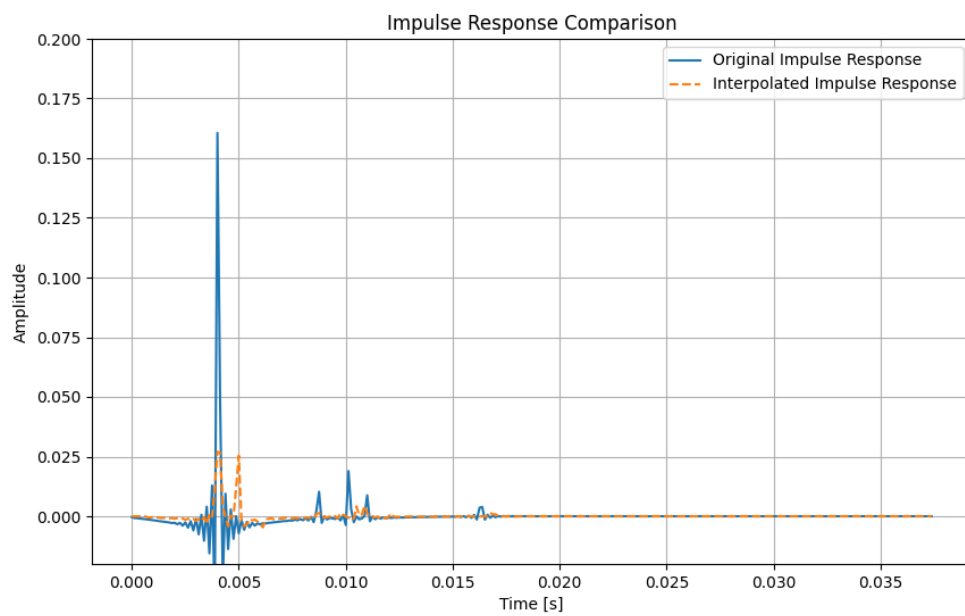


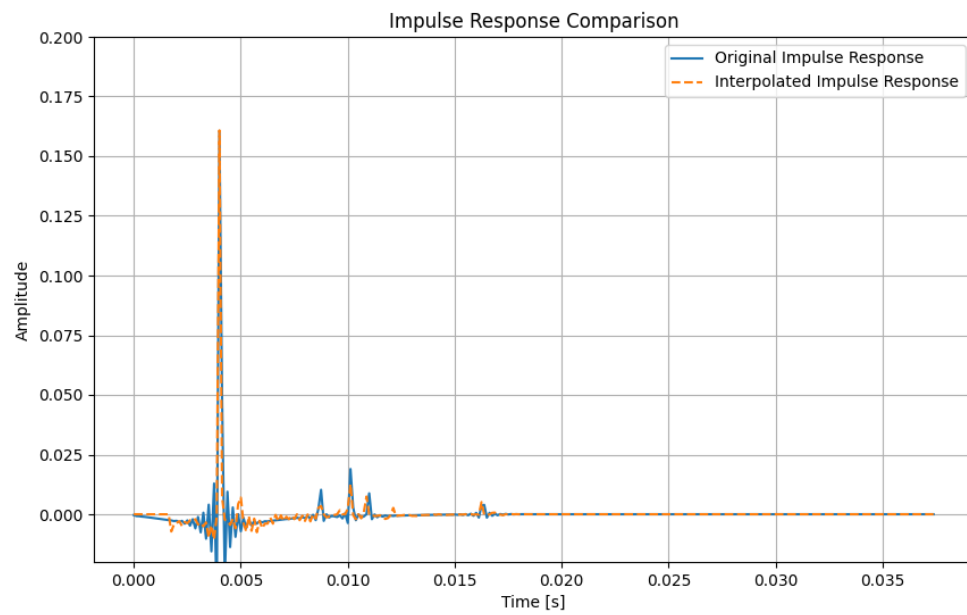
Fig. 4.11: Root Mean Squared Error of impulse response



(a) 0.25m



(b) 0.75m



(c) 0.75m + 半径変更

Fig. 4.12: Impulse response comparison

第 5 章

終わりに

5.1 まとめ

本研究では、多点制御法を用いたエリア再生技術において、必要なインパルス応答の一部を補間技術 (TESM) を用いて、測定するインパルス応答を減らした際のエリア再生の精度と補間位置の優位性についてシミュレーションで評価を行った。

今回は制御点数を変化させた場合のエリア再生の特性を調査し、制御点の減少に伴い、抑圧制御点間からの音の漏れが多かった時の制御点数を使用して、制御点間のインパルス応答を補間することでエリア再生の改善を試みた。その結果、補間によって音の漏れを一定程度抑制できることが確認されたが、L 字型の抑圧制御点の角付近では音が漏れる現象が発生した。これは、補間による推定誤差による影響と考えられる。さらに、学習位置の変更やスピーカと制御点の距離を調整し、補間精度への影響を調査した。補間位置の変更では L 字型の抑圧制御点の角付近での音が漏れる現象の明確な低減効果は確認できなかった。しかしスピーカと制御点の距離を延ばすことで、補間精度が向上し、より精度の高いエリア再生が可能であることが分かった。これは、仮想音源の範囲が広がったことによって補間対象の位置でのインパルス応答を求める際に、より多くの仮想音源に影響が出たことが考えられる。また、補間で使用する学習位置のインパルス応答に差が出たことも補間精度向上の要因だと考える。補間点の配置を工夫することで、L 字配置の抑圧制御点周辺の音の漏れを軽減できる可能性が示唆された。

5.2 今後の展望

今回は、多点制御法におけるインパルス応答の測定点を削減し、補間技術を適用した際のエリア再生の精度についてシミュレーションを用いて評価した。しかし、実際

の応用に向けてはさらなる検討が必要である。今後の課題として、最適な学習点・補間点の選定、実機による検証があげられる。まず、補間精度の向上には最適な学習点や補間点の選定が不可欠である。本研究では補間点の両側に配置した測定点を基に、TESMによる補間を行った。結果、L字配置の横軸でのインパルス応答補間精度が悪かった。これはスピーカと補間に使用する二つの測定点の距離があまり変わらないことが考えられるため、さらに多くの測定点を使用するか、補間位置に応じた測定点の最適配置を行うことで、測定点を減らしながら高精度なエリア再生を実現できる可能性がある。また、今回はシミュレーションでの解析だったため、実環境での有効性の検証が必要である。補間誤差における被験者への音の伝わり方などを確認することで、補間技術の実環境での適用可能性を明らかにすることができる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導・ご支援をいただきました。まず初めに、本研究に対するご指導、ご助言をいただいた杉田泰則准教授に心から感謝を申し上げます。また、本論文の審査にあたり圓道知博教授、南部功夫准教授から貴重なご助言をいただきました。ここに感謝いたします。最後に、学業に専念できるよう支援していただいた家族に心から感謝しています。本研究が行えたのは、関わってくださったすべてのの方々のおかげです。御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 越川 常治, ”ビームフォーミングの主要なアルゴリズムと方式例について : 直線配列センサによる音源方向検出,” 日本音響学会誌, 45 巻, 10 号, pp.815-822, 1989 年.
- [2] M.M. Boone, W.H. Cho, and J.G. Ih, “Design of a highly directional endfire loudspeaker array,” J. Audio Eng. Soc., vol.57, no.5, pp.309 – 325, 2009
- [3] 伊勢史郎, ”キルフホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理,” 日本音響学会誌, 53 巻, 9 号, pp.706-713, 1997 年.
- [4] J. Ahrens and S. Spors, ”Sound field reproduction using planar and linear arrays of loudspeakers,” IEEE Trans, vol.18, no.8, pp.2038 – 2050, 2010.
- [5] O.Kirkeby, P.Nelson, F.Orduna-Bustamante, and H.Hamada, “Local sound field reproduction using digital signal processing,” J. Acoust. Soc. Am., vol.100, no.3, pp.1584-1593, Nov. 1996
- [6] 安枝和哉, 新城大輔, 片岡章俊, ”直線スピーカアレーを用いた多点制御法による複数エリア再生,” 電子情報通信学会論文誌, J103-A 巻, 1 号, pp.9-16, 2020 年.
- [7] Niccolò Antonello, Enzo De Sena, Marc Moonen, Patrick A. Naylor, Toon van Waterschoot, ”Room Impulse Response Interpolation Using a Sparse Spatio-Temporal Representation of the Sound Field,” IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol.25, no. 10, pp.1929 - 1941, 2017.
- [8] 羽入敏樹, ”室内音響におけるインパルス応答測定と評価,” 日本音響学会誌, 76 巻, 3 号, pp.156-163, 2020 年.

- [9] H. Tokuno, O. Kirkeby, P.A. Nelson, and H. Hamada, "Inverse filter of sound reproduction system using regularization," IEICE Trans, Fundamentals., vol.E80-A, no.5, pp.809-820, 1997.
- [10] 一般社団法人 日本建築学会, "初めての音響数値シミュレーション プログラミングガイド," コロナ社, 2012 年.
- [11] 一般社団法人 日本建築学会, "音環境の数値シミュレーション -波動音響解析の技法と応用-, " 丸善出版株式会社, 2021 年.
- [12] 橋本 修, "実践 FDTD 法時間領域差分法," 森北出版株式会社, 2006 年.
- [13] 坂本慎一, 園田有児, 橘秀樹, "2 次元音場の波動的解析 その 1 -差分法によるインパルス応答の推定-, " 日本音響学会講演論文集, pp.829-830, 1994 年.
- [14] E. Fernandez-Grande, "Sound field reconstruction using a spherical microphone array," J. Acoust. Soc. Amer., vol. 139, no. 3, pp.1168-1178, 2016.
- [15] E. Fernandez-Grande and A. Xenaki, "Compressive sensing with a spherical microphone array," J. Acoust. Soc. Amer., vol. 139, no. 2, pp. EL45 – EL49, 2016.