

はじめに

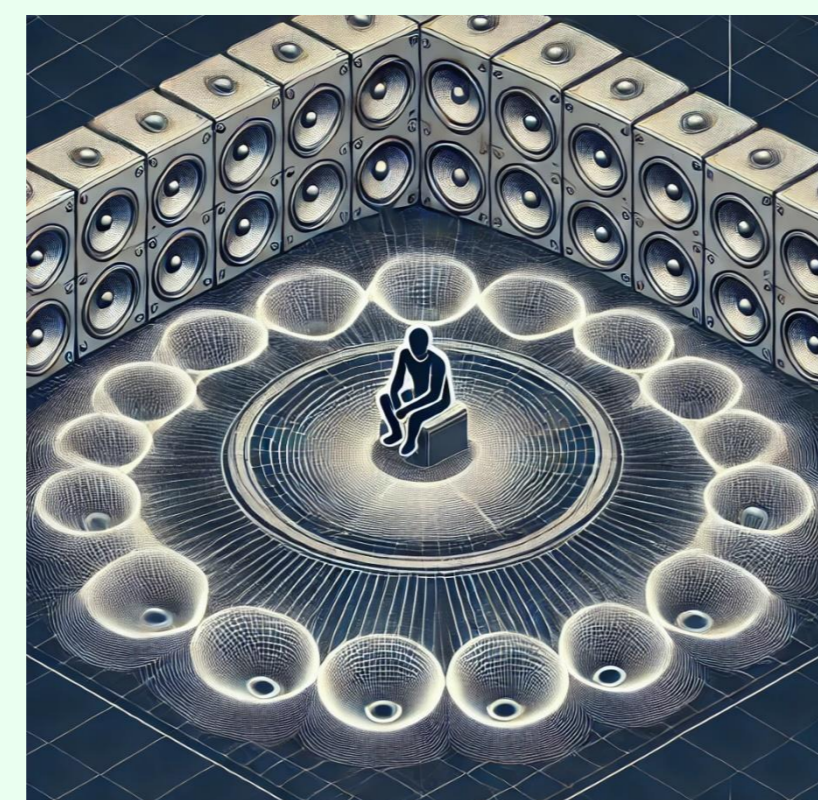
スピーカレイを用いた音場再現技術

- 再現手法:
- 多点制御法(Pressure Matching: PM)
 - 球面調和領域手法(Mode Matching: MM)
 - ...

いずれの手法も, フィルタゲインを抑圧するために Tikhonov正則化を導入することが多い.

正則化なしの手法と比べ, 音場の再現精度を一部犠牲にし, フィルタのパワーを抑圧できる: 正則化パラメータ λ が大きいほどフィルタゲインを抑圧できるが, 音場再現の精度が低くなる.

本発表は
正則化パラメータと音場再現精度の関係性について検討・調査



音場再現 by chatGPT

セオリー

Tikhonov正則化付きの音場再現コスト関数は

$$J = \|\mathbf{p} - \mathbf{G}\mathbf{d}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{d}\|_2^2$$

となり, ここで \mathbf{p} は目標関数値, \mathbf{G} は伝達行列, \mathbf{d} は求めるフィルタ, λ は正則化パラメータとなる.

正則化パラメータの決め方は最適化手法を含め多数あるが, 伝達関数自己相関行列の最大固有値の定数倍を正則化パラメータとするのは音場再現の分野において主流である.

$$\lambda = \Lambda \cdot \sigma_{\max}(\mathbf{G}^H \mathbf{G})$$

従来研究では $\Lambda = 10^{-6}$ と設定することが多い.

エリア Ω における音場再現の精度は以下のように評価できる:

$$\varepsilon = \frac{\int_{r \in \Omega} |p_r - \hat{p}_r|^2 dr}{\int_{r \in \Omega} |p_r|^2 dr}$$

p_r と \hat{p}_r はそれぞれ座標 r の所望音圧と再現音圧.

仮説

PM法の制御点やMM法の次数が十分である(空間サンプリング定理を満たす)場合, 評価エリアにおける誤差は制御点の誤差に近づき

$$\varepsilon \approx \frac{\|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}\|_2^2}{\|\mathbf{p}\|_2^2}$$

なお, $\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{G}\mathbf{d}$ は制御点における再現音圧.

正則化ありのコスト関数を考える:

$$J = \|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}\|_2^2 + \Lambda \cdot \sigma_{\max}(\mathbf{G}^H \mathbf{G}) \cdot [\mathbf{d}^H \mathbf{d}]$$

コスト関数が最小となると, 右側の第一項と第二項の影響が同程度と仮定すると, 音場の再現誤差は

$$\varepsilon \approx \frac{\Lambda \mathbf{d}^H \sigma_{\max}(\mathbf{G}^H \mathbf{G}) \mathbf{d}}{\|\mathbf{p}\|_2^2} \sim \frac{\Lambda \|\hat{\mathbf{p}}\|_2^2}{\|\mathbf{p}\|_2^2} \approx \Lambda$$

正則化パラメータの係数 Λ は音場再現誤差に影響を与えていることがわかる.

$\|\hat{\mathbf{p}}\|_2 / \|\mathbf{p}\|_2 \approx 1$ と仮定. # 厳密証明はされていない.

→これが成立しているのであれば,
許容できる再現誤差から正則化パラメータを指定することは可能?

実験

目標再現誤差を ε_{dB} とし, 正則化パラメータを

$$\lambda^{(A)} = 10^{\frac{\varepsilon_{dB}}{10}} \cdot \sigma_{\max}(\mathbf{G}^H \mathbf{G})$$

と

$$\lambda^{(B)} = 10^{\frac{\varepsilon_{dB}}{20}} \cdot \sigma_{\max}(\mathbf{G}^H \mathbf{G})$$

2種類設定した. # $\lambda^{(A)}$ は $\varepsilon \approx \Lambda$, $\lambda^{(B)}$ は $\varepsilon^2 \approx \Lambda$ と仮定している.

所望音場は500Hzの単一点音源・単一平面波・複数平面波の3種類で検証した.

PM法における検証

実験1: 直線スピーカレイ×エリア内多点音圧制御

スピーカ: 長さ3.0m直線上に180個等間隔配置
制御点: 0.2m × 0.2mエリア内に100個グリッド状配置

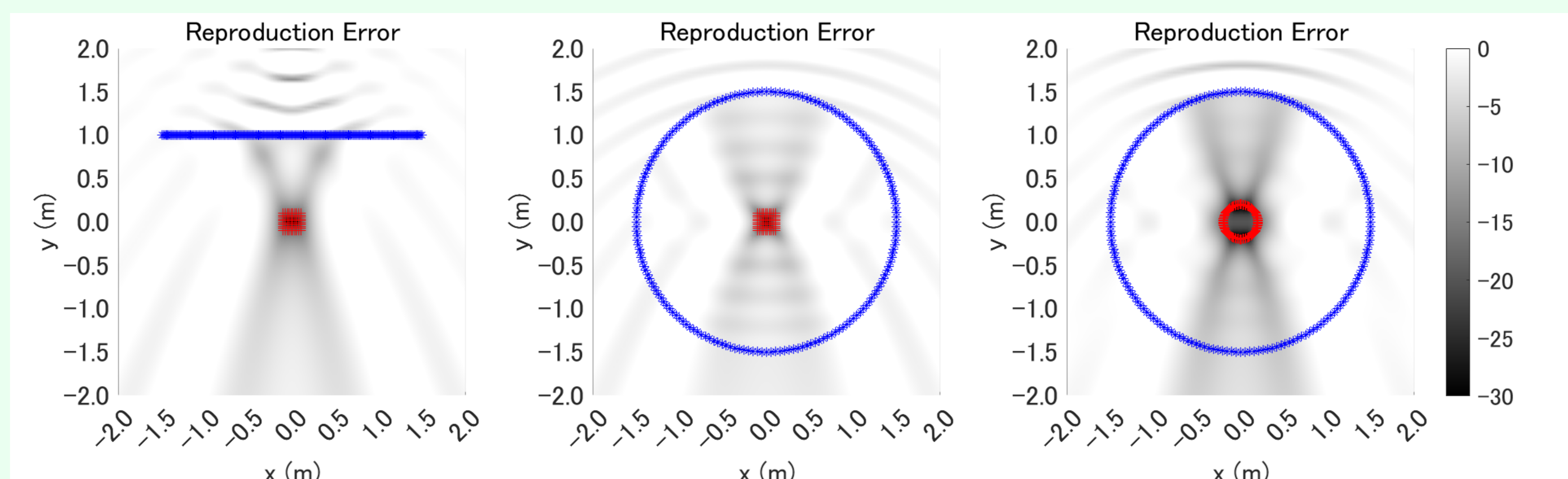
実験2: 円形スピーカレイ×エリア内多点音圧制御

スピーカ: 半径1.5m円周上に180個等角度配置
制御点: 0.2m × 0.2mエリア内に100個グリッド状配置

実験3: 円形スピーカレイ×エリア境界音圧制御

スピーカ: 半径1.5m円周上に180個等角度配置
制御点: 半径0.2m円周上に100個等角度配置

評価点は制御点と0.1m半径のエリア(グリッド点)の2種類



スピーカ・制御点配置と再現音場誤差の一例 ($\lambda^{(A)}$, 単一平面波) 左から実験1, 2, 3順

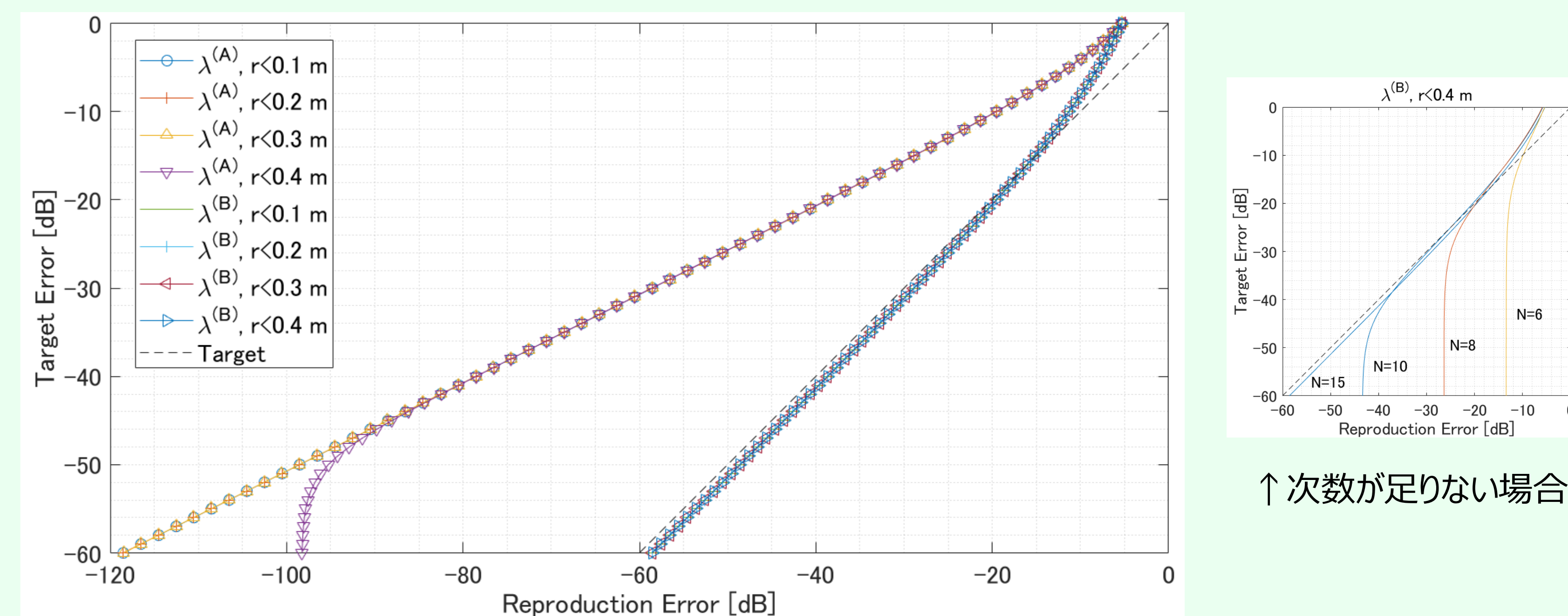
$\lambda^{(A)}$	単一点音源			単一平面波			複数平面波		
	目標誤差	-10 dB	-15 dB	-20 dB	-10 dB	-15 dB	-20 dB	-10 dB	-15 dB
実験1制御点	-17.40	-20.78	-24.36	-17.32	-20.65	-24.21	-17.27	-23.79	-29.97
実験1エリア	-19.16	-23.05	-26.58	-19.07	-22.89	-26.41	-18.37	-25.37	-31.84
実験2制御点	-13.18	-18.70	-23.33	-13.19	-18.72	-23.36	-12.53	-15.88	-20.56
実験2エリア	-14.68	-20.60	-25.49	-14.69	-20.61	-25.52	-15.79	-20.13	-24.88
実験3制御点	-14.13	-20.02	-25.95	-14.15	-20.06	-26.01	-11.66	-17.82	-23.99
実験3エリア	-13.81	-21.37	-29.10	-13.82	-21.40	-29.16	-12.12	-19.69	-27.64

$\lambda^{(B)}$	単一点音源			単一平面波			複数平面波		
	目標誤差	-10 dB	-15 dB	-20 dB	-10 dB	-15 dB	-20 dB	-10 dB	-15 dB
実験1制御点	-11.66	-14.78	-17.40	-11.64	-14.73	-17.31	-11.02	-14.10	-17.28
実験1エリア	-12.34	-15.95	-19.16	-12.31	-15.90	-19.07	-11.52	-14.89	-18.37
実験2制御点	-7.96	-10.41	-13.18	-7.96	-10.42	-13.19	-8.88	-10.81	-12.53
実験2エリア	-9.00	-11.69	-14.68	-9.00	-11.70	-14.69	-10.48	-13.23	-15.79
実験3制御点	-8.58	-11.25	-14.13	-8.59	-11.27	-14.15	-6.29	-8.79	-11.66
実験3エリア	-7.65	-10.48	-13.81	-7.65	-10.49	-13.82	-6.16	-8.86	-12.12

青: 目標誤差との差分が ± 3 dB以内
赤: 目標誤差との差分が ± 6 dB以上

MM法における検証

前述実験2,3と同様の円形スピーカレイ配置, 最大次数15次と設定. 目標誤差を-60 dBから0 dBまで設定したときの再現誤差を調べた. 図は原点を中心とした半径の異なる円形エリア内の再現誤差を示す. なお, 結果の音源種類の依存性がほとんどなかったため, 1000 Hz単一平面波の結果のみを表示する.



考察

- PM法の場合, 全実験に共通する結論は得られなかった. 直線アレイは $\lambda^{(A)}$, 円形アレイは $\lambda^{(B)}$ の結果のほうが目標誤差に近い.
- MM法の場合, $\lambda^{(B)}$ にすると概ね目標誤差に近づることができる. 正則化付きMM法は制御エリアに均一な誤差を実現できる.

まとめ

本研究は, Tikhonov正則化付き音場再現の正則化パラメータと空間平均誤差の関係性について整理し, 計算機シミュレーションにて検証を行った. 伝達関数自己相関行列の最大固有値を用いた正則化において, 正則化パラメータの係数と再現誤差が直接に関係する可能性を示した.