国立大学法人
電気通信大学
Unique & Exciting Campus

剛楕円スピーカアレイを用いた焦点音源生成についての検討

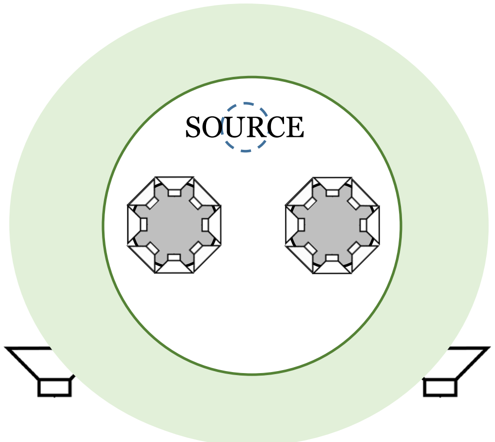
☆任 逸, 羽田 陽一
電気通信大学大学院 情報理工学研究科
情報学専攻 羽田研究室
博士後期課程2年

研究背景

- 焦点音源(仮想音源)生成
  - スピーカが存在しない場所に放射音源を作る技術.
  - 指向性を加えることで人の声，楽器音なども忠実に再現可能.
  - 立体映像技術に合わせて，立体テレビやバーチャルコンサートなどのアプリケーションの実現が予想される.

先行研究

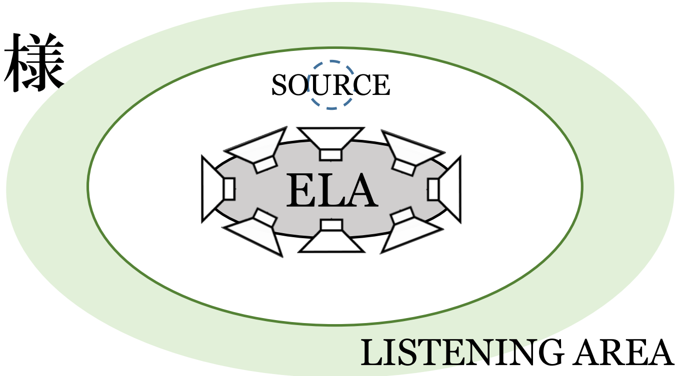
- 直線スピーカアレイ(LLA)を用いた手法
  - 波面合成法など.
  - 先行研究は数多くあるが，LLAの特性上，受聴領域が三角形領域に限られている.
- 円形スピーカアレイ(CLA)を用いた手法
  - 仮想音源(焦点音源)を生成することが可能. (任ら, 2018春)
- 2つの円形スピーカアレイ(2CLA)を用いた手法
  - 低域では仮想音源(焦点音源)を生成することが可能.
  - CLAより放射効率が良い. (任, 羽田, 2018秋&2019春)



これまでの結果を踏まえて，2CLAの**非対称性に注目し，楕円スピーカアレイ(ELA)について検討する.**

概要

・問題設定：CLAや2CLAの先行研究と同様
  ・2次元音場；理論値数値計算.
  ・スピーカアレイは剛体仮定.（無限長楕円筒）
  ・受聴領域は焦点音源の外部領域



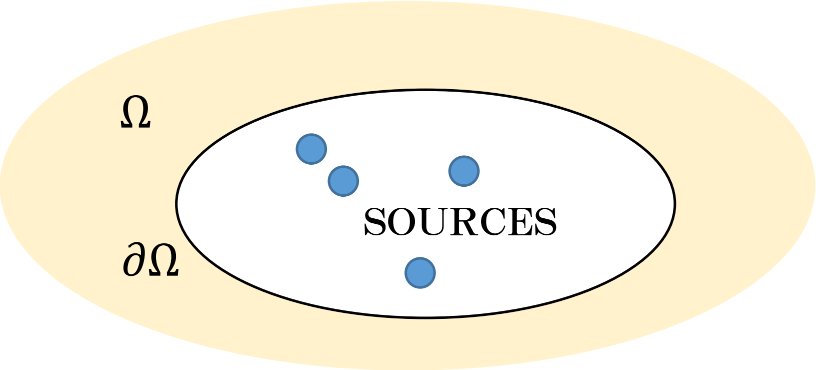
・再現手法：Mathieu関数展開に基づくモードマッチング法（音場再現）
  ・CLAを用いた円調和展開に基づくモードマッチング法と似ている
  ・ELAの内側音場再現では報告済み. (任, 羽田, 2019秋&2020春)
  ・同じ手法でELAの外側音場を再現.

・本研究の目的：剛楕円アレイで焦点音源生成を試みる；楕円形状と性能の関係性について調査.

Mathieu関数展開に基づくMode Matching法

ELA外側音場再現の場合

再現場：放射場



展開式（入射場の項が0）

$$p(\mu,\nu)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}\alpha_n M_n^{(4)}(q,\mu)me_n(q,\nu)$$

$\partial\Omega(\mu=\mu_0)$上の連続中空楕円音源による再生場は

$M_n^{(4)}(q,\mu)$: 第4種Mathieu動径関数
$me_n(q,\nu)$: Mathieu角度関数

$$\hat{p}(\mu,\nu)=\int_0^{2\pi}G(\mu,\nu|\mu_0,\nu_l)D(\nu_l)\mu_0 d\nu_l$$

$$\hat{p}(\mu,\nu)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}\underbrace{\boxed{-\frac{u_0}{M_n^{(4)\prime}(q,\mu_0)}}}_{\beta_n}d_n M_n^{(4)}(q,\mu)me_n(q,\nu)$$

Mathieu関数展開に基づくMode Matching法

$p(\mu,\nu)$と$\hat{p}(\mu,\nu)$を一致させ，Mathieu関数の直交性により

$$d_n = \alpha_n/\beta_n$$

*実際フィルタゲインを抑圧するため，ここはTikhonov正則化付きの最小二乗法でd_nを求める.

周波数領域駆動信号

$$D(\nu_l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n me_n(q,\nu_l)$$

・剛楕円上に離散配置の$\mathcal{L}$個の音源

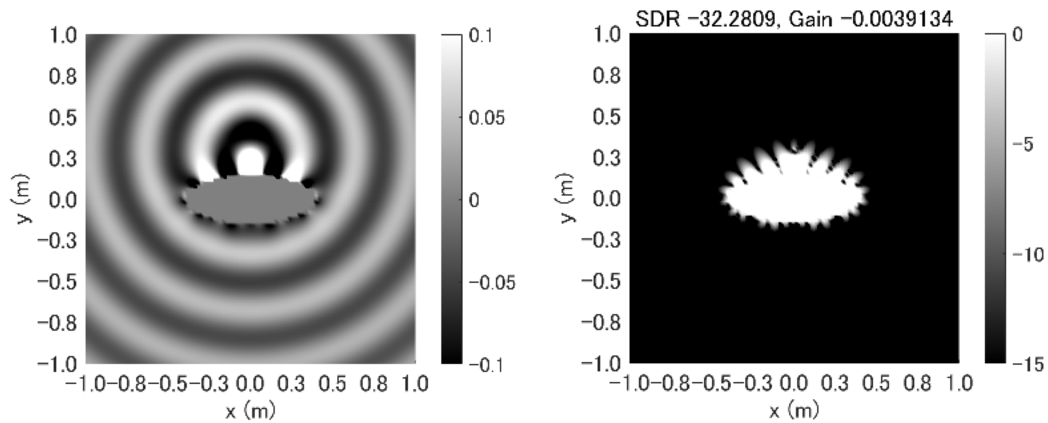
$$\hat{p}(\mu,\nu) = \sum_{l=1}^{\mathcal{L}} G(\mu,\nu|\mu_0,\nu_l)D(\nu_l)$$

$$\hat{p}(\mu,\nu) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underbrace{\boxed{-\frac{\mathcal{L}}{2\pi M_n^{(4)\prime}(q,\mu_0)}}}_{\beta_n'} d_n M_n^{(4)}(q,\mu) me_n(q,\nu)$$

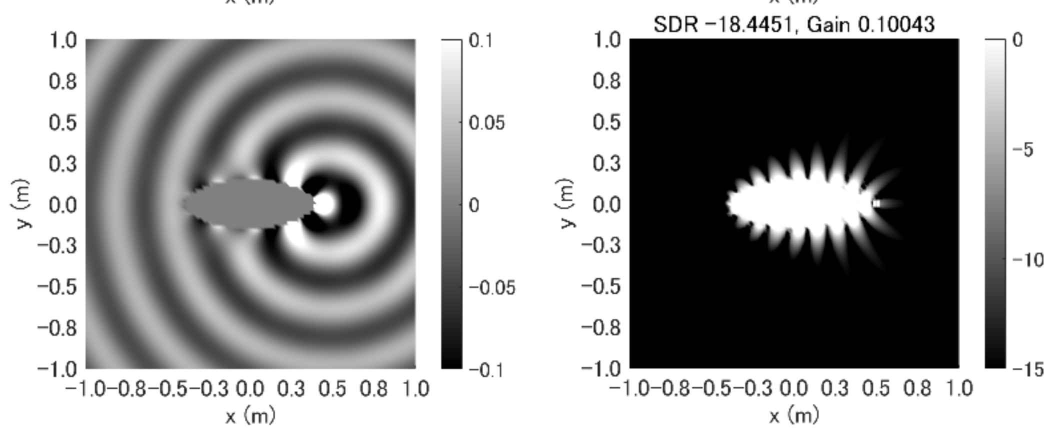
シミュレーション

- 単一周波数シミュレーション
  - $\mathcal{L} = 30$, 長軸0.4 m, 短軸0.15 m, 1000 Hz

音源位置(0, 0.3 m)
左:波面
右:誤差



音源位置(0.5 m, 0)
左:波面
右:誤差



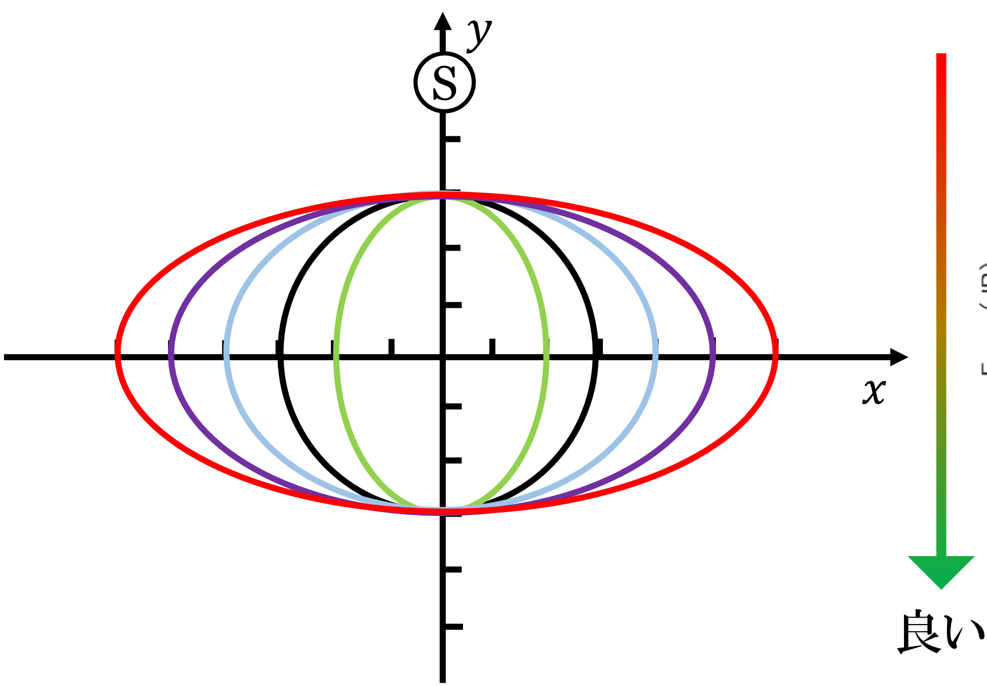
シミュレーション

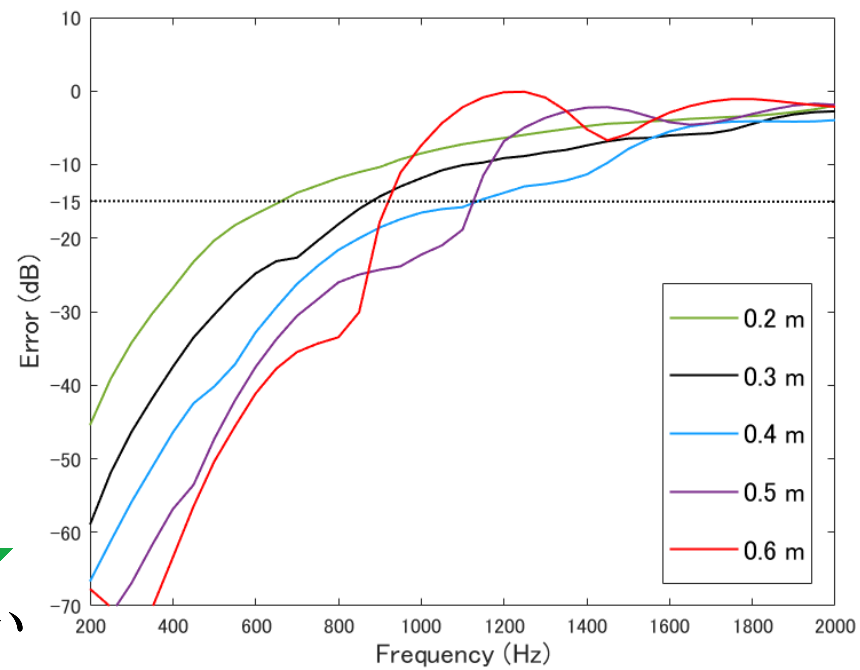
- 帯域シミュレーション条件
  - 周波数帯域：200 Hz~2000 Hz
    - 高域はスピーカ数やフィルタゲインの制限で再現不可
  - スピーカ数$L = 30$
  - 所望音源(0, 0.5 m)
    - デカルト座標系y軸上の一箇所のみ
  - 最大フィルタゲインを0 dB以下になるように，正則化付きの最小二乗法でフィルタを求める

- 楕円の形状と再現性能の関係性について調査
  1. x軸上の軸長の変化による影響
  2. y軸上の軸長の変化による影響
  3. 円周の長さが一定である場合，扁平率による影響
  4. 面積が一定である場合，扁平率による影響

シミュレーション

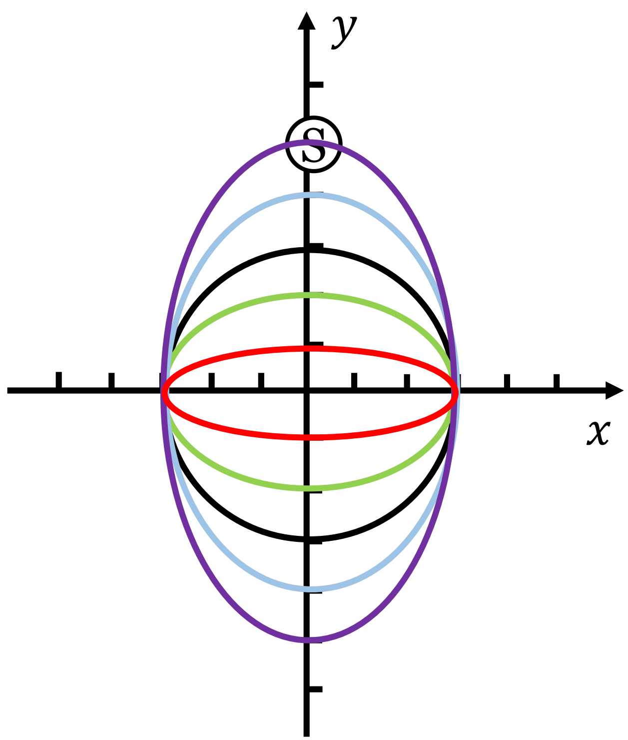
1. x軸上の軸長の変化による影響
   - x軸方向軸長0.2~0.6 m, y軸方向軸長0.3 m
   - 黒がCLA

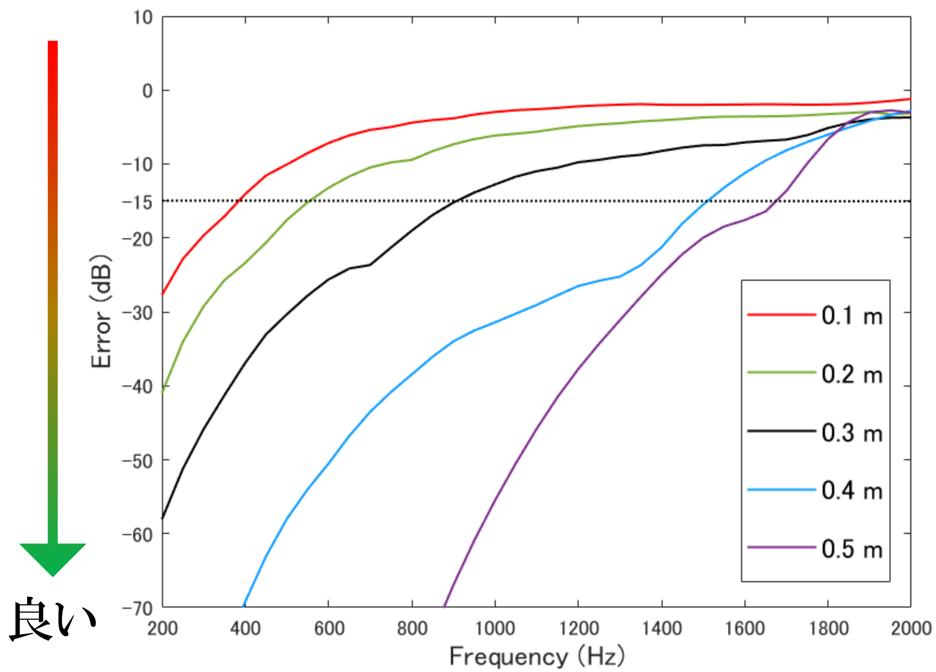




シミュレーション

2. y軸上の軸長の変化による影響
   - x軸方向軸長0.3 m, y軸方向軸長0.1~0.5 m
   - 黒がCLA

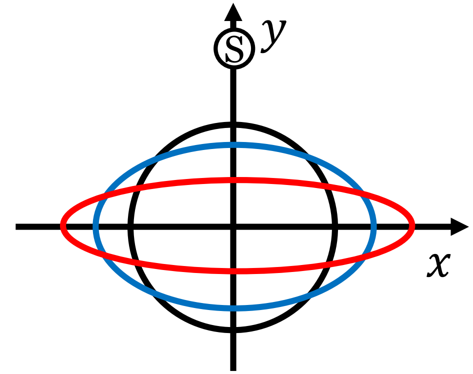


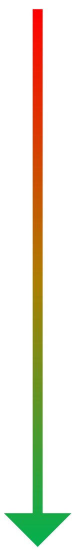


シミュレーション

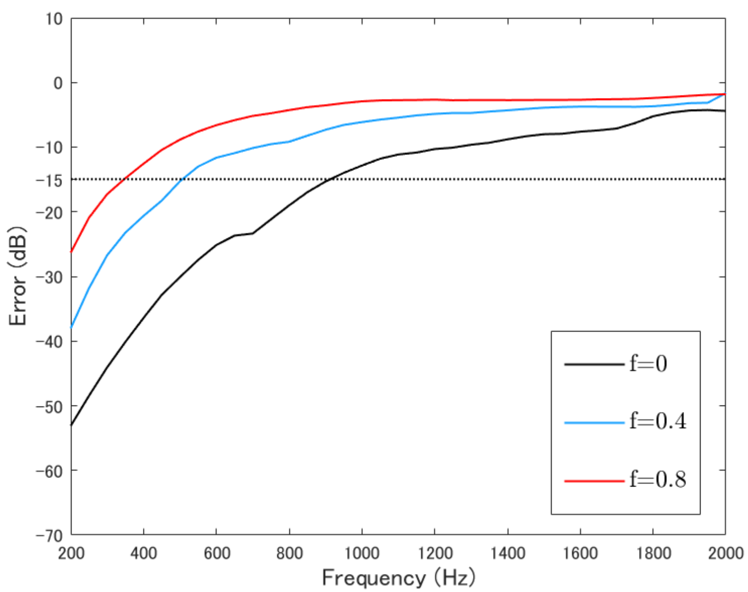
3&4. 扁平率による影響

① CLA: 半径0.3 m (扁平率0).
② ELA_1: 扁平率0.4.
③ ELA_2: 扁平率0.8.

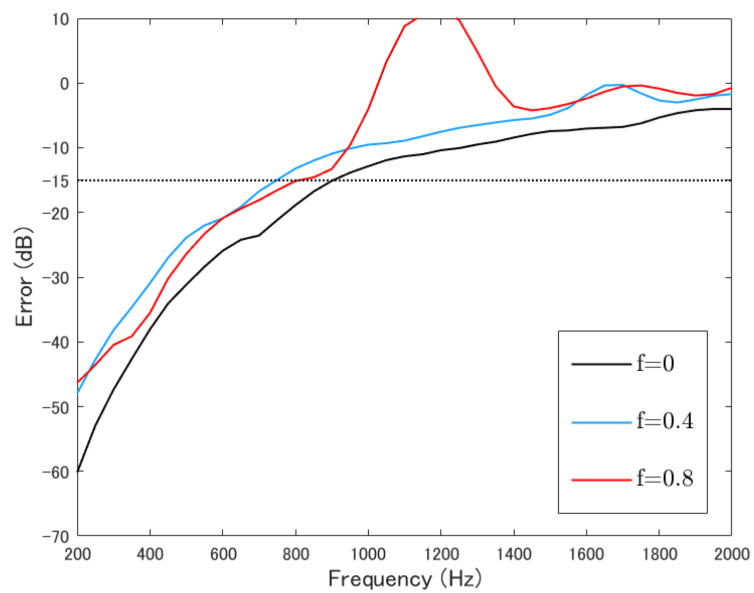




良い



円周の長さが一致



面積が一致

まとめ

- 剛楕円スピーカアレイを用いて焦点音源を生成することが可能.
- **スピーカが音源に近づくほど**, 同一フィルタゲインでの**再現性能**(すなわち放射効率)**がよくなる**傾向がある.
- **片方の軸長を固定した場合, もう片方の軸長が長くなるほど再現性能がよくなる**傾向がわかった. ただし, ブロードサイド方向の軸長が長くなることによって, 再現可能な最大周波数が低くなる可能性もある.
- **円周の長さが一定であるとき**(等距離サンプリングとみなす場合, スピーカ間隔が一定となる), **扁平率が低いほど再現性能がよくなる**傾向がわかった.
- **面積が一定であるとき,** 低域において, **扁平率による性能差は小さい**であることがわかった.

補足：焦点音源の展開係数

Green関数・円筒波伝達関数

$$G(\mu,\nu|\mu',\nu') = -\frac{j}{4}\sum_{n=-\infty}^{\infty} M_n^{(1)}(q,\mu_<)M_n^{(4)}(q,\mu_>)me_n(q,-\nu')me_n(q,\nu)$$

焦点音源の展開係数：

$$p(\mu,\nu) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha_n M_n^{(4)}(q,\mu)me_n(q,\nu) = G(\mu,\nu|\mu',\nu')$$

$$\alpha_n = -\frac{j}{4}M_n^{(1)}(q,\mu')me_n(q,-\nu')$$

*$\mu > \mu'$

TOKYO

補足:剛楕円の伝達関数

・Neumann境界条件(音響的にRigid)

散乱係数

$$\gamma_n^{\mathrm{sca}} = -\frac{M_n^{(1)'}(q,\mu_0)}{M_n^{(4)'}(q,\mu_0)}\gamma_n^{\mathrm{inc}}$$

剛体楕円の方程式:$\mu = \mu_0$

・Wronskian

$$\mathcal{W}\left\{M_n^{(1)}, M_n^{(4)}\right\} = -2j/\pi$$

・剛楕円伝達関数

$$G(\mu,\nu|\mu_0,\nu_0) = -\frac{1}{2\pi}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\frac{M_n^{(4)}(q,\mu)}{M_n^{(4)'}(q,\mu_0)} me_n(q,-\nu_0) me_n(q,\nu)$$