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

楕円アレイを用いた内側音場再現における受聴領域の伸縮と回転

☆任 逸, 羽田 陽一

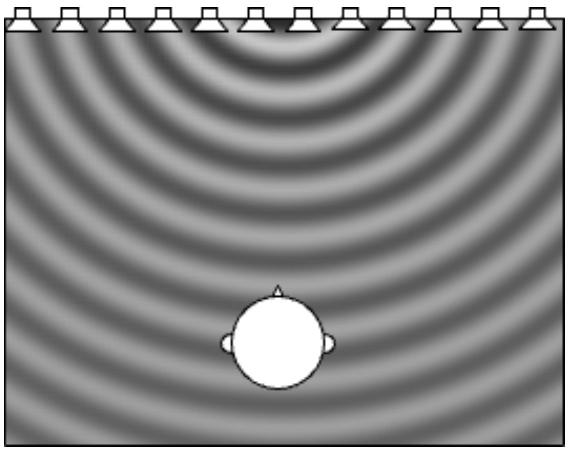
電気通信大学大学院 情報理工学研究科

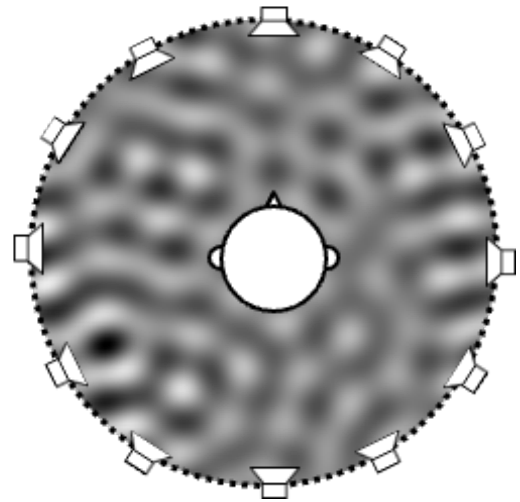
情報学専攻 羽田研究室

研究背景

音場再現

- 高臨場感再生技術・立体音響技術



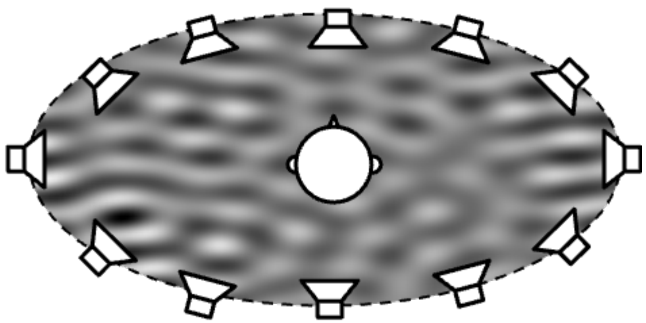


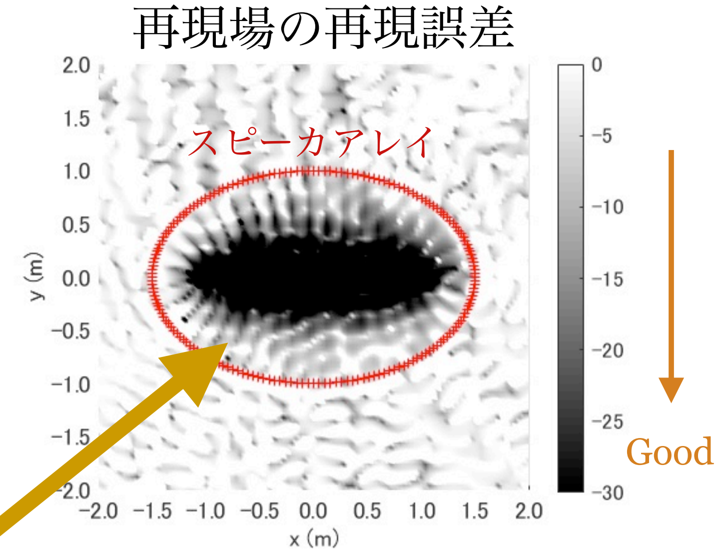
解析的（波数領域，2次元）手法では
直線と円形アレイに限られている

楕円スピーカアレイ

楕円スピーカアレイを用いた音場再現法（任＋, 2020）

- 楕円座標系×波数領域処理(Mathieu関数展開)



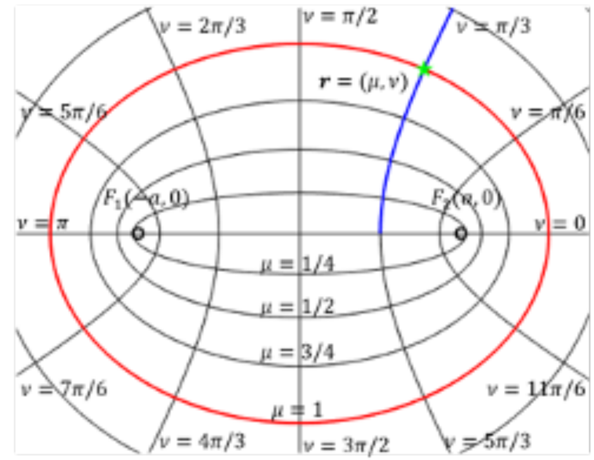


楕円形の受聴領域

Mathieu関数展開に基づく音場再現法

- 楕円座標系

$$\begin{cases} x = a\cosh u \cos v \\ y = a \sinh u \sin v \end{cases}$$



- Mathieu関数
  - Helmholtz方程式の(直交)固有関数
    - $me_n(q, v)$: Mathieu角度関数
    - $M_n^{(\zeta)}(q, u)$: Mathieu動径関数 ($\zeta \in \{1,2,3,4\}$)
  - 音場のMathieu関数展開

$$p(v, u) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\underbrace{\alpha_n^{\mathrm{i}} M_n^{(1)}(q, u) me_n(q, v)}_{\text{内部音場}} + \underbrace{\alpha_n^{\mathrm{s}} M_n^{(4)}(q, u) me_n(q, v)}_{\text{外部音場}} \right]$$

Mathieu関数展開に基づく音場再現法

波数領域Mode Matching (円形・球面アレイと同様)

- 目標1次音場展開（内部音場仮定）

$$p(v,u) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha_n M_n^{(1)}(q,u) me_n(q,v)$$

Matching

- 楕円スピーカアレイの2次音場展開

d_n: 駆動信号の展開係数

$$\hat{p}(v,u) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} -\frac{j}{4} L M_n^{(4)}(q,u_0) d_n M_n^{(1)}(q,u) me_n(q,v)$$

Mode Matching

Mathieu関数の直交性

$$\int_0^{2\pi} me_n(q,v) me_{n'}(q,-v) dv = 2\pi \delta_{nn'}$$

- 駆動信号の導出

$$d_n = \frac{4\alpha_n}{-jLM_n^{(4)}(q,u_0)}$$

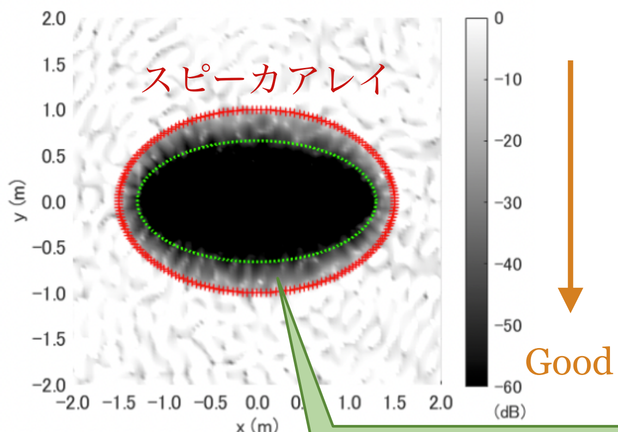
周波数領域に戻す

$$D_l = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{4\alpha_n}{-jLM_n^{(4)}(q,u_0)} me_n(q,v_l)$$

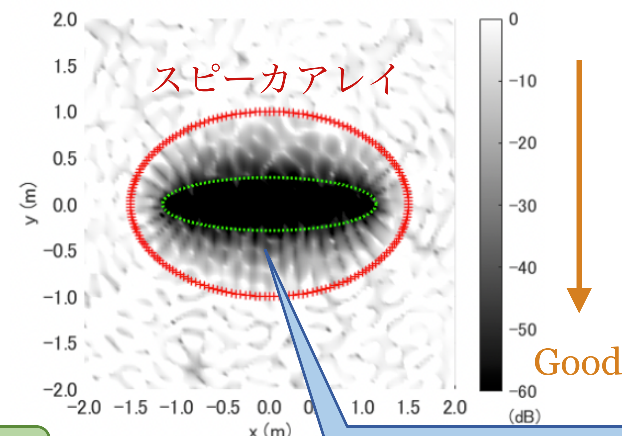
受聴領域

打切り次数によって決まる/指定できる

$$p(v,u) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha_n M_n^{(1)}(q,u) me_n(q,v) \xrightarrow[\text{で打ち切る}]{\text{最大次数N}} \sum_{n=-N}^{N} \alpha_n M_n^{(1)}(q,u) me_n(q,v)$$



受聴領域・次数大

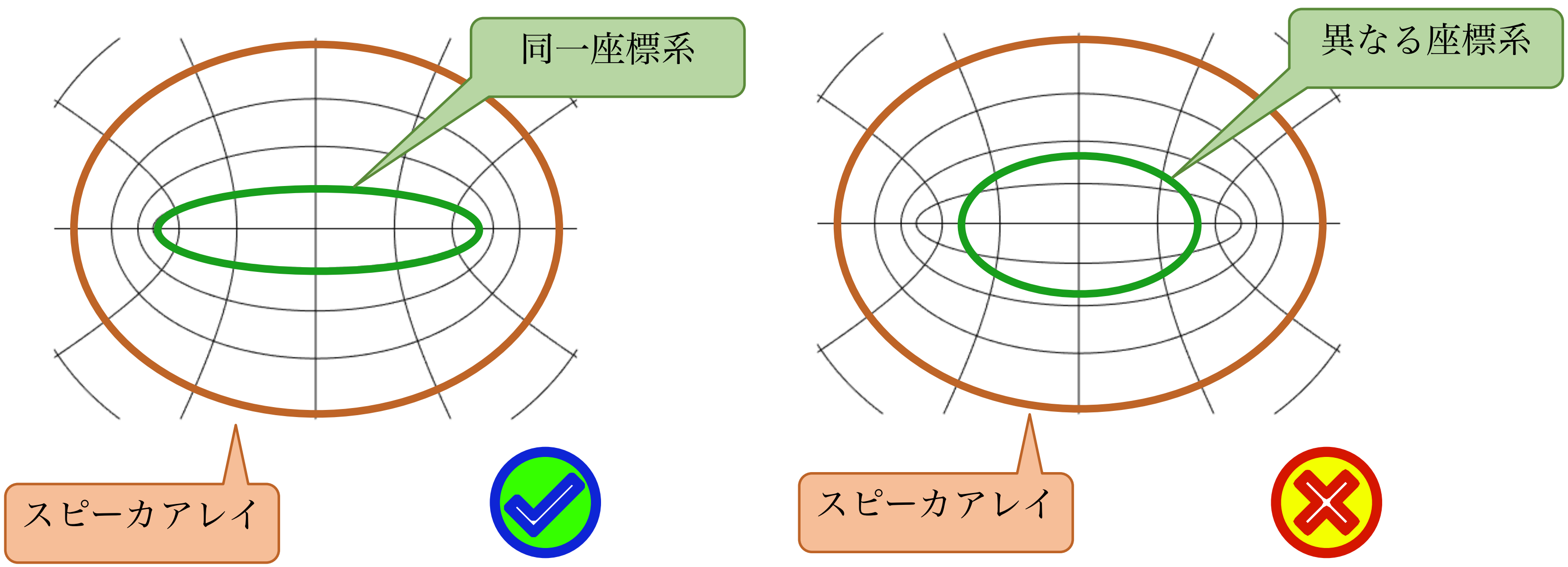


受聴領域・次数小

課題点

楕円座標系(焦点距離a)は最初に決めないといけない

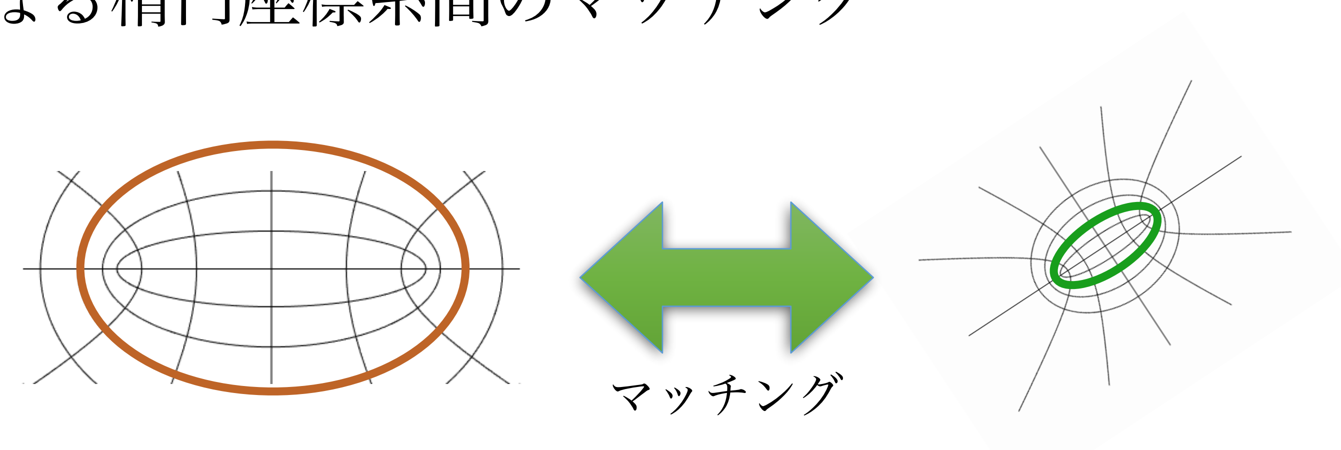
- 得られる受聴領域の形状は限られている
- 同じ座標系のマイクアレイとスピーカアレイが必要



提案

より自由に受聴エリアを作る

- 新しい座標系で受聴領域を設定
- 異なる楕円座標系間のマッチング



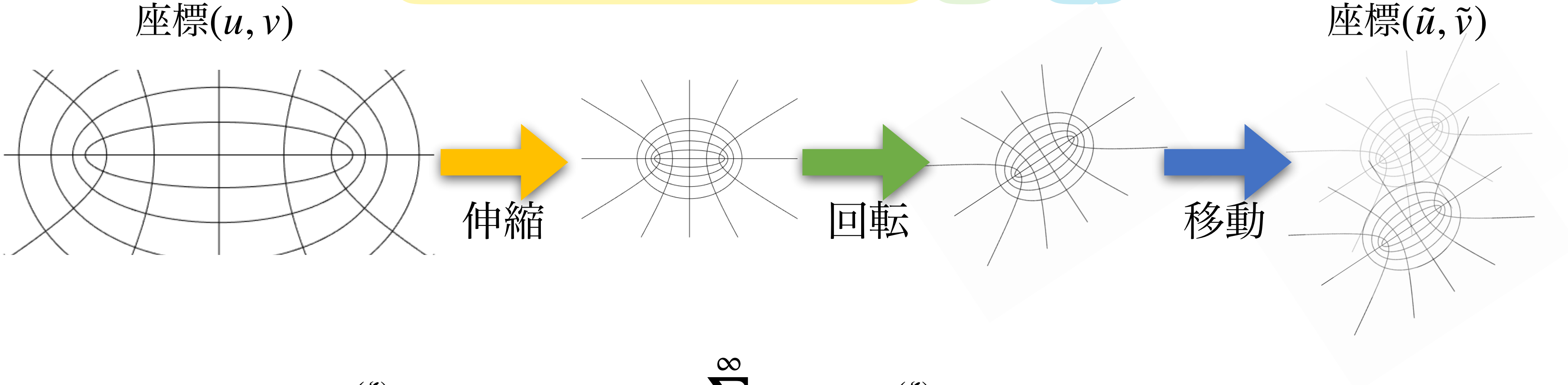
スピーカアレイ座標系　　受聴領域座標系

座標変換

Mathieu関数の加法定理

- 異なる座標系のものが同一座標系展開で表現可能

$$\tilde{a}\cosh(\tilde{u} \pm j\tilde{v}) = a\cosh(u \pm jv)e^{\pm j\vartheta} + \varrho e^{\pm j\varphi}$$



$$M_m^{(\zeta)}(\tilde{q}, \tilde{u})me_m(\tilde{q}, \tilde{v}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mathscr{A}_{n,m} M_{m+n}^{(\zeta)}(q, u)me_{m+n}(q, v)$$

計算量大

$$\mathscr{A}_{n,m} = \sum_{t=-\infty}^{\infty} (-1)^{t+n} J_{2t-n}(k\varrho)e^{j(2t-n)\varphi} \sum_{s=-\infty}^{\infty} c_{2s}^{m}(\tilde{q})c_{2(s-t)}^{m+n}(q)e^{-j(m+2s)\vartheta}$$

受聴領域の変形

- 目標受聴領域を設定

この打切り次数で
受聴領域大きさ決定

目標受聴領域座標系: 焦点距離$\tilde{a}$, $\tilde{q} = k^2\tilde{a}^2/4$, 座標$(\tilde{u}, \tilde{v})$

1次音場展開 $$p(\tilde{v}, \tilde{u}) = \sum_{m=-M}^{M} \tilde{\alpha}_m M_m^{(1)}(\tilde{q}, \tilde{u}) me_m(\tilde{q}, \tilde{v})$$

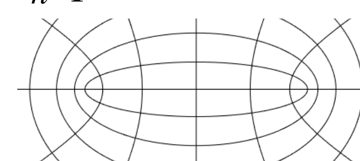
座標変換

マッチング不可

1次音場展開 $$p(v, u) = \sum_{m=-M}^{M} \tilde{\alpha}_m \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mathscr{A}_{n,m} M_{m+n}^{(1)}(q, u) me_{m+n}(q, v)$$

マッチング可能

2次音場展開 $$\hat{p}(v, u) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} -\frac{j}{4} L M_n^{(4)}(q, u_0) d_n M_n^{(1)}(q, u) me_n(q, v)$$



スピーカアレイ座標系: 焦点距離a, $q = k^2a^2/4$, 座標(u, v)

シミュレーション条件

- 楕円スピーカアレイ: 長軸1.2 m 短軸1.0 m, 180 ch
  - 楕円座標系: $a \approx 0.66$
- 1次音場: 1000 Hz円筒波
- 受聴領域の伸縮、回転(計算量の都合上移動はなし)
  - 目標楕円エリア: 長軸1.0 m 短軸0.2 m
  - 目標楕円座標系: $a \approx 0.98$
  - 回転: $\vartheta = \pi/4$
  - 必要次数

$$M = \left\lceil \frac{4\sqrt{\tilde{q}}\cosh \tilde{u}_0}{e} \right\rceil = 14 \qquad \text{(Ren+, 2022)}$$

異なる座標系

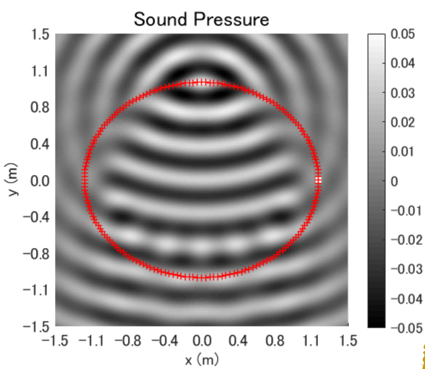
結果

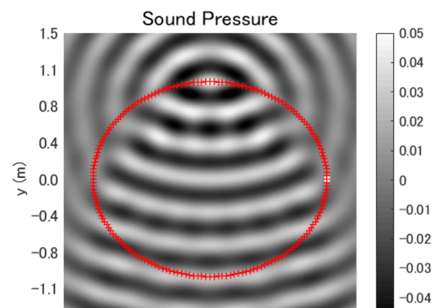
従来手法
(打切り次数14)

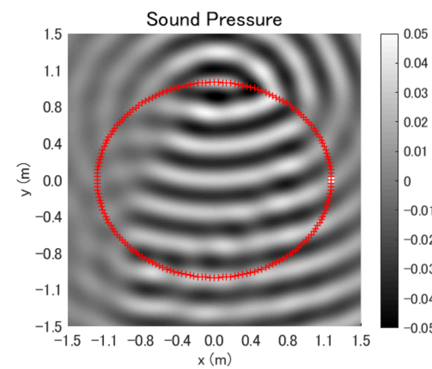
目標エリアの伸縮

伸縮+回転

再現音場
(音圧)

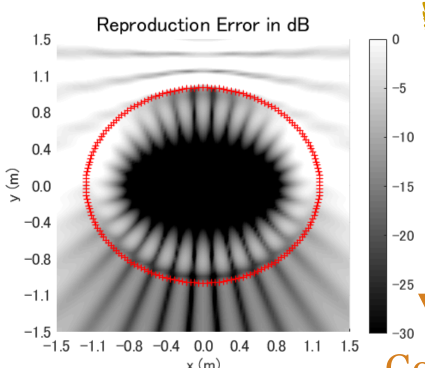




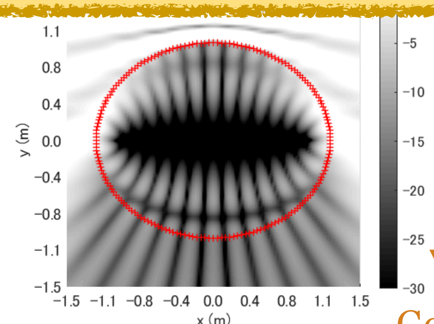


手法の有効性を確認

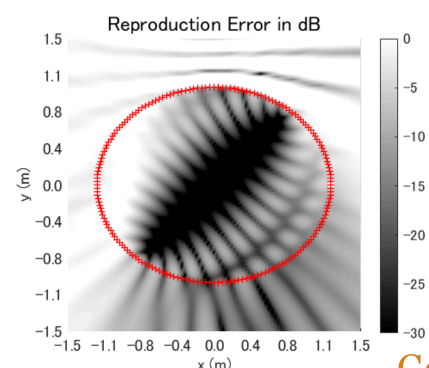
再現誤差



Good



Good

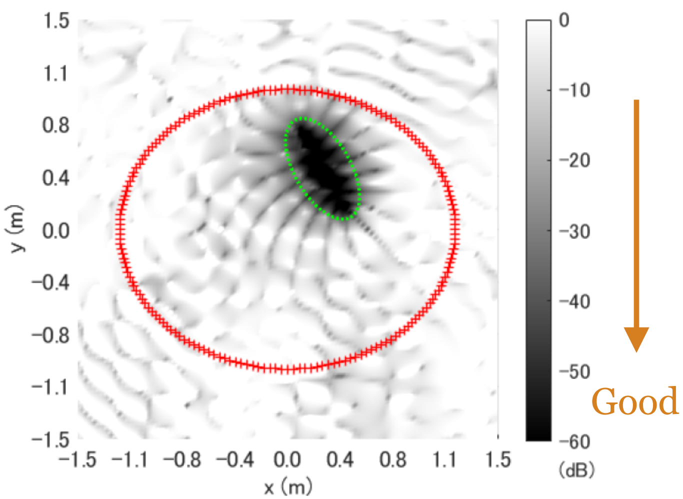


Good

追伸1

座標変換の逆パターンも確認(詳細は省略)

- 2次音場の座標系を1次音場の座標系へ変形
- 同じく加法定理を利用
- さらに複数個の1次音場を設定可能⇒マルチゾーン



受聴領域変形の例
(移動もあり)

マルチゾーンの例

追伸2

楕円の離散サンプリングについて

- 連続仮定の場合

直交性（完全性）

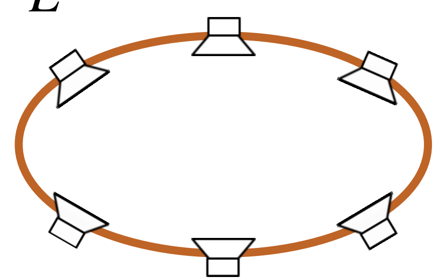
$$\int_0^{2\pi} me_n(q,v)me_{n'}(q,-v)dv = 2\pi\delta_{nn'}$$

- 離散仮定の場合

等角度配置・連続に近い場合では近似可能（実験上）

$$\sum_{l=1}^{L} me_n(q,v_l)me_{n'}(q,-v_l) \approx L\delta_{nn'} \text{ for large } L, v_l = \frac{2\pi}{L}$$

疎な配置では成り立たない



まとめ

<u>楕円スピーカアレイを用いた音場再現</u>において，楕円形の**<u>受聴領域を変形する手法を提案</u>**

- 受聴領域の伸縮・回転・移動が可能
- 異なる座標系のマイク・スピーカ間の処理が可能
- マルチゾーンの可能性も示した
- 楕円の離散サンプリングは今後の課題

ご清聴ありがとうございました

補足（追伸1）

マッチング対象について

- 1次音場の座標系を2次音場の座標系へ変形の場合
- 結果は2次音場展開の表現能力（最大次数）に影響される
  - 表現能力以上の領域拡張は不可能