

EA研究会

異なる放射特性を持つ球形スピーカ
による再生音場の数値解析
～音源探査による演奏者の音像の
大きさと形の推定～

木村敏幸, 山肩洋子, 勝本道哲(NICT)

超臨場感構築基盤技術の研究開発

- 何を目指すのか？
 - あたかもその場にいるかのような自然でリアルなコミュニケーション
 - 電子ホログラフィ
 - 映像・音響統合化技術
- どんな特徴か？
 - 近接した周りの位置でテレビやコンサートを鑑賞

リビングで楽しむ
立体テレビ放送



3Dビジュアル・ディスプレイ

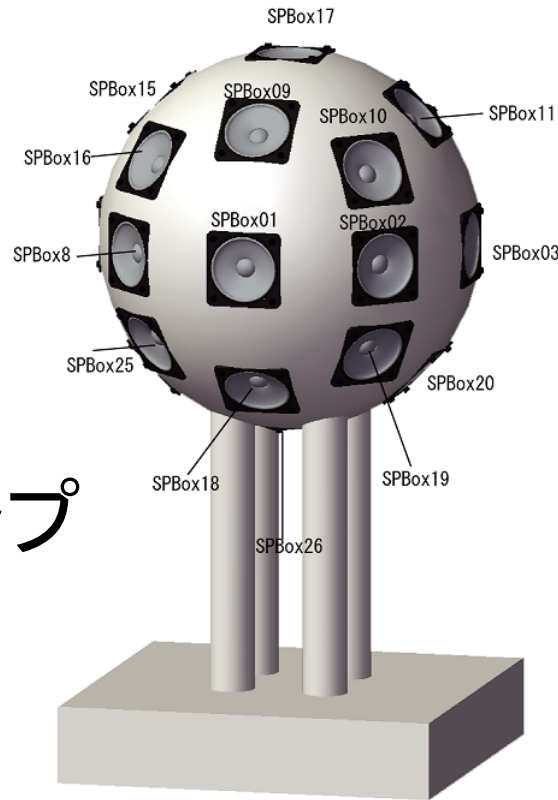
リビングで楽しむ
立体コンサート



3Dオーディオ・ディスプレイ

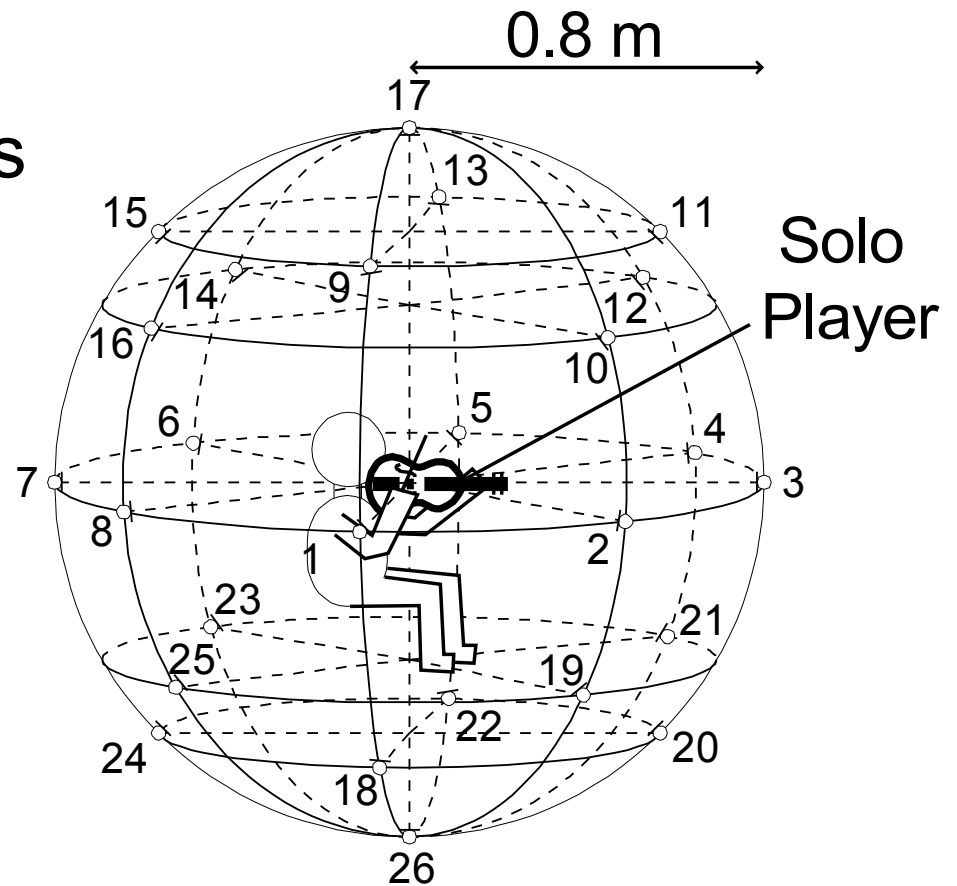
異なる放射指向性を持つ球形スピーカ

- スピーカユニット26個
 - Aurasound: NSW1-205-8A相当品
 - 大きさ...1インチ
- エンクロージャ
 - 直径...17 cm
 - ABS樹脂製
- 26 chパワーアンプ
 - 特注品
- 再生装置
 - Digidesign: Pro Tools HD



コンテンツの収録

- 収録部屋
 - 残響時間...180 ms
- 演奏者
 - 尺八奏者1名
 - アコギ奏者2名
- マイクロホン
 - DPA: 4060
 - 半径...0.8 m
 - 各演奏者の周りに26個ずつ



球形スピーカによる三重奏の表現

- デモ展示(NAB Show, CEATEC JAPAN)
 - スピーカに演奏者がいるような音響表現
 - スピーカの間立つと, 演奏者の間にいるような音響表現

本報告の目的

- 球形スピーカによって再生される放射音場を計算機シミュレーションで数値的に解析
- ところで, 1人の演奏者が発する音源の数は1個だけではない
 - 楽器の発音源
 - 弦自身の発振, 共鳴胴からの放射など(弦楽器)
 - 演奏者の発音源
 - 衣擦れの音, 足を踏み鳴らす音など
- 演奏時にはさまざまな場所で複数の音源が音を鳴らしている

本報告の目的

- 球形スピーカによって再生された際、複数音源がどこにあるかを推定

- 演奏者が出す音像の大きさや形の変化が評価できるのでは？



- 音源探査技術を用いて複数の点音源の位置を推定

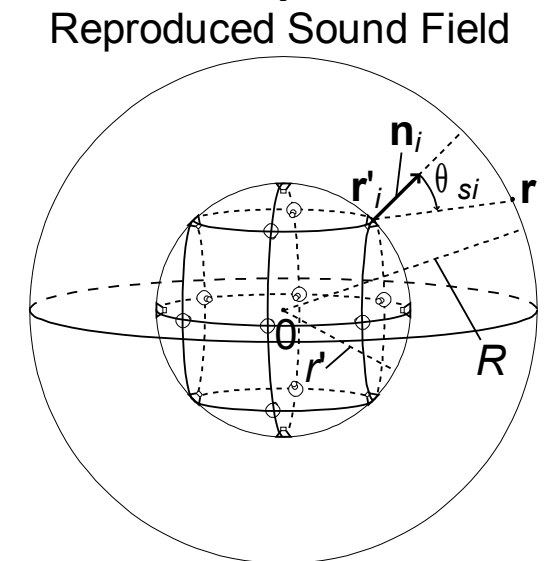
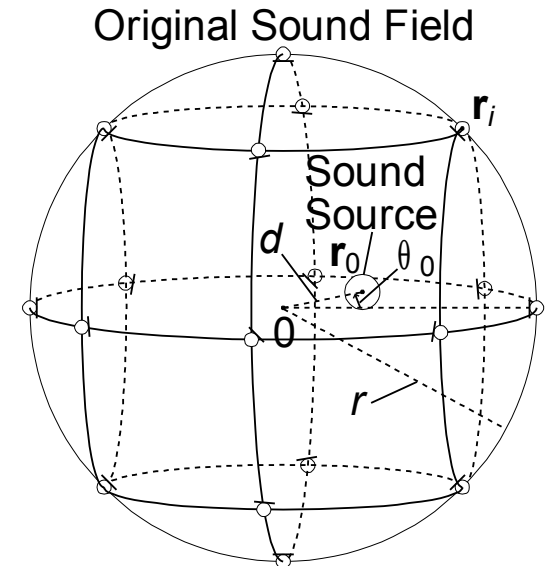
- 球形スピーカによる演奏者の音像の大きさと形の変化を評価

シミュレーション環境

- $M(=26)$ 個のマイクロホン
 - \mathbf{r}_i : 半径 $r(=0.8\text{ m})$ の球面上
- $M(=26)$ 個のスピーカユニット
 - \mathbf{r}'_i : 半径 $r'(=0.085\text{ m})$ の球面上

$$\mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} r \cos \theta_i \cos \phi_i \\ r \sin \theta_i \cos \phi_i \\ r \sin \phi_i \end{pmatrix} \quad \mathbf{r}'_i = \begin{pmatrix} r' \cos \theta_i \cos \phi_i \\ r' \sin \theta_i \cos \phi_i \\ r' \sin \phi_i \end{pmatrix}$$

- $N(=162)$ 点の観測点
 - \mathbf{r} : 半径 $R(=1\text{ m})$ の球面上



マイクロホン, スピーカユニットの角度

i	$\theta_i [^\circ]$	$\phi_i [^\circ]$	i	$\theta_i [^\circ]$	$\phi_i [^\circ]$	i	$\theta_i [^\circ]$	$\phi_i [^\circ]$
1	0	0	9	0	45	18	0	-45
2	45	0	10	45	30	19	45	-30
3	90	0	11	90	45	20	90	-45
4	135	0	12	135	30	21	135	-30
5	180	0	13	180	45	22	180	-45
6	-135	0	14	-135	30	23	-135	-30
7	-90	0	15	-90	45	24	-90	-45
8	-45	0	16	-45	30	25	-45	-30
			17	--	90	26	--	-90

マイクロホンで収録する信号の合成

- 音源信号 $s(t)$
 - 振幅 A , 周波数 f の正弦波

- 収録信号 $x_i(t)$

$$x_i(t) = \frac{1}{d_{i0}} s\left(t - \frac{d_{i0}}{c}\right) = \frac{A}{d_{i0}} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{d_{i0}}{c}\right)\right\}$$

- d_{i0} ($=|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|$): 音源からマイクロホンまでの距離
- \mathbf{r}_i : マイクロホンの位置ベクトル
- \mathbf{r}_0 : 音源の位置ベクトル
- c : 音速

観測点における音圧の合成

- 観測点 \mathbf{r} における音圧 $p(\mathbf{r}, f, t)$

$$\begin{aligned} p(\mathbf{r}, f, t) &= \sum_{i=1}^M \frac{D_{si}}{d_i} x_i \left(t - \frac{d_i}{c} \right) \\ &= \sum_{i=1}^M \frac{D_{si} A}{d_i d_{i0}} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{d_i + d_{i0}}{c} \right) \right\} \end{aligned}$$

- M : スピーカユニットの総数
- $d_i (= |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_i|)$: スピーカユニット-観測点間距離
- \mathbf{r}'_i : スピーカユニットの位置ベクトル
- D_{si} : スピーカユニットの放射指向特性

音響インテンシティの算出

- 音響インテンシティベクトルの方向
 - 単一音源の到来方向に相当

$$\mathbf{l}(\mathbf{r}, f) = \{l_x(\mathbf{r}, f), l_y(\mathbf{r}, f), l_z(\mathbf{r}, f)\}^T$$

- クロススペクトル法により算出
 - 6点の音圧から3方向を算出

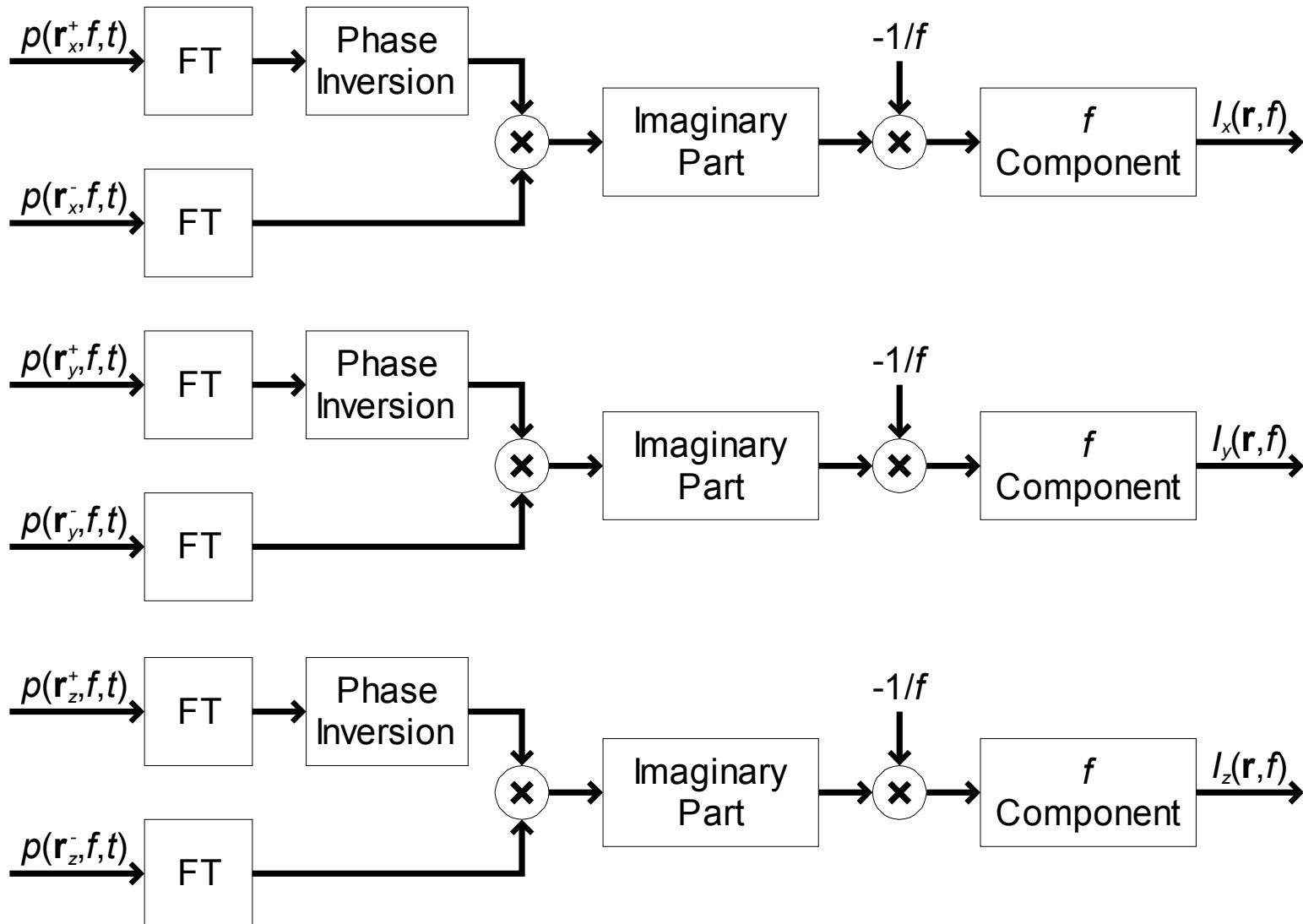
- 音圧: $p(\mathbf{r}_x^+, f, t)$, $p(\mathbf{r}_x^-, f, t)$, $p(\mathbf{r}_y^+, f, t)$, $p(\mathbf{r}_y^-, f, t)$,
 $p(\mathbf{r}_z^+, f, t)$, $p(\mathbf{r}_z^-, f, t)$,

$$\mathbf{r}_x^\pm = \mathbf{r} \pm (\Delta, 0, 0)^T$$

$$\mathbf{r}_y^\pm = \mathbf{r} \pm (0, \Delta, 0)^T \quad \Delta = 0.001 \text{ m}$$

$$\mathbf{r}_z^\pm = \mathbf{r} \pm (0, 0, \Delta)^T$$

音響インテンシティ算出のブロック図



パラメータ条件

音源振幅(A)	1
音源周波数(f)	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 Hz
音源位置(\mathbf{r}_0)	$(d\cos\theta_0, d\sin\theta_0, 0)^T$
音源距離(d)	0, 0.2, 0.4, 0.6 m
音源方位角(θ_0)	0, 45°
音速(c)	340 m/s
スピーカユニットの 法線ベクトル(\mathbf{n}_i)	$\mathbf{r}'_i / \mathbf{r}'_i $
スピーカユニットの 放射指向特性(D_{si})	Omnidirectional, Decay 6 dB, Decay 12 dB, Real

スピーカユニットの放射指向特性

(Omnidirectional) $D_{si} = 1$

反対方向の減衰なし

(Decay 6 dB) $D_{si} = \frac{3 + \cos \theta_{si}}{4}$

反対方向が6 dB減衰

(Decay 12 dB) $D_{si} = \frac{5 + 3\cos \theta_{si}}{8}$

反対方向が12 dB減衰

(Real) $D_{si} = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & (f = 125, 250, 500) \\ \frac{3 + \cos \theta_{si}}{4} & (f = 1000, 2000) \\ \frac{5 + 3\cos \theta_{si}}{8} & (f = 4000, 8000, 16000) \end{array} \right\}$

$$\cos \theta_{si} = \frac{\mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}'_i)}{|\mathbf{n}_i| |\mathbf{r} - \mathbf{r}'_i|}$$

音像位置の推定

- 推定した音像位置 \mathbf{r}_E

$$\mathbf{r}_E = \frac{1}{FN} \sum_f \sum_{j=1}^N \left\{ \mathbf{r}_j + \frac{\mathbf{l}(\mathbf{r}_j, f)}{p(\mathbf{r}_j, f)} \right\}$$

– $N(=162)$, $F(=8)$: 観測点, 周波数条件の数

– \mathbf{r}_j : j 番目の観測点の位置ベクトル

– $\mathbf{l}(\mathbf{r}_j, f)$: \mathbf{r}_j における音響インテンシティ

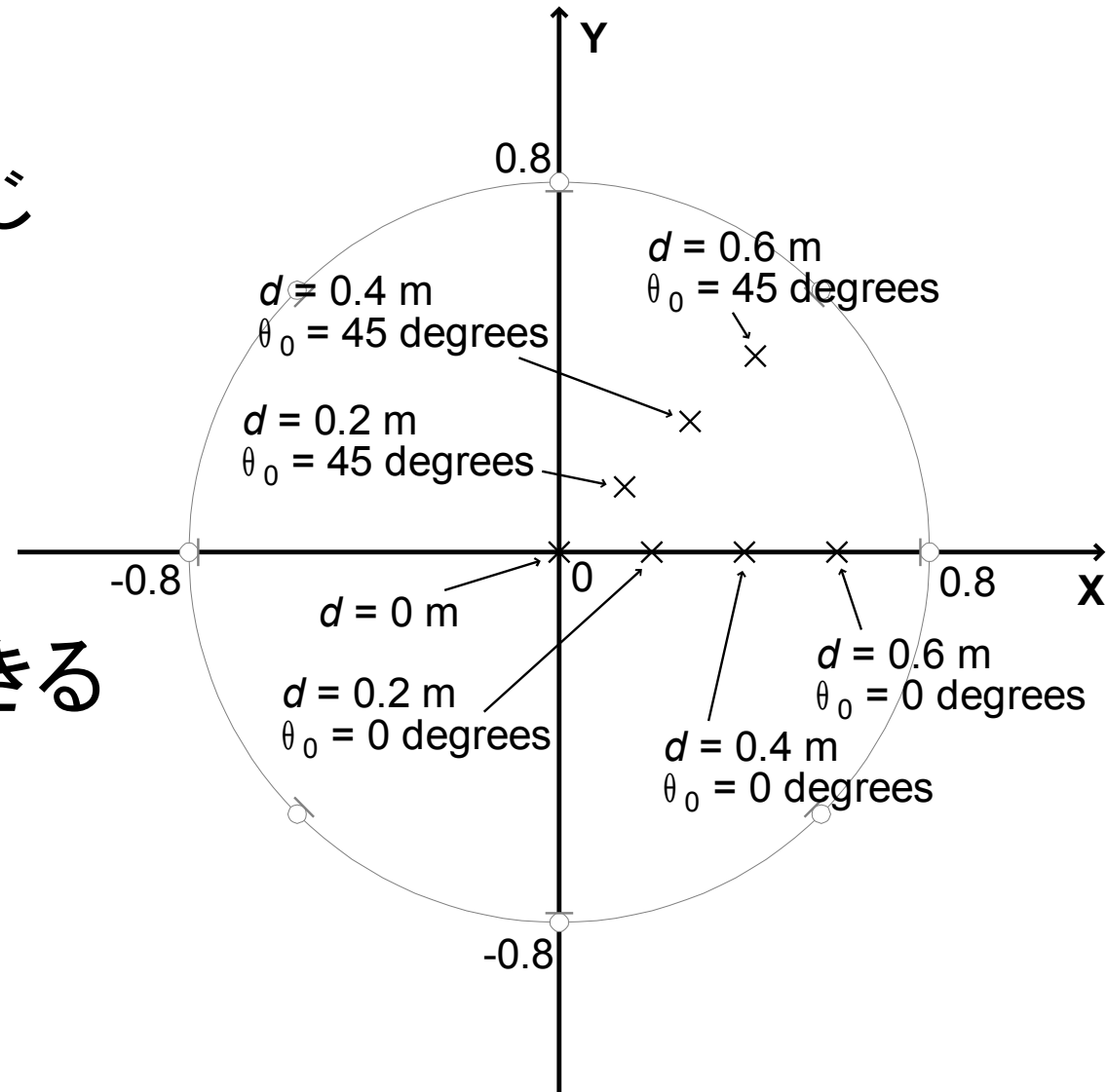
– $p(\mathbf{r}_j, f)$: \mathbf{r}_j における平均二乗音圧

$$p(\mathbf{r}_j, f) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{ p(\mathbf{r}_j, f, t) \}^2 dt}$$

– T : 周期

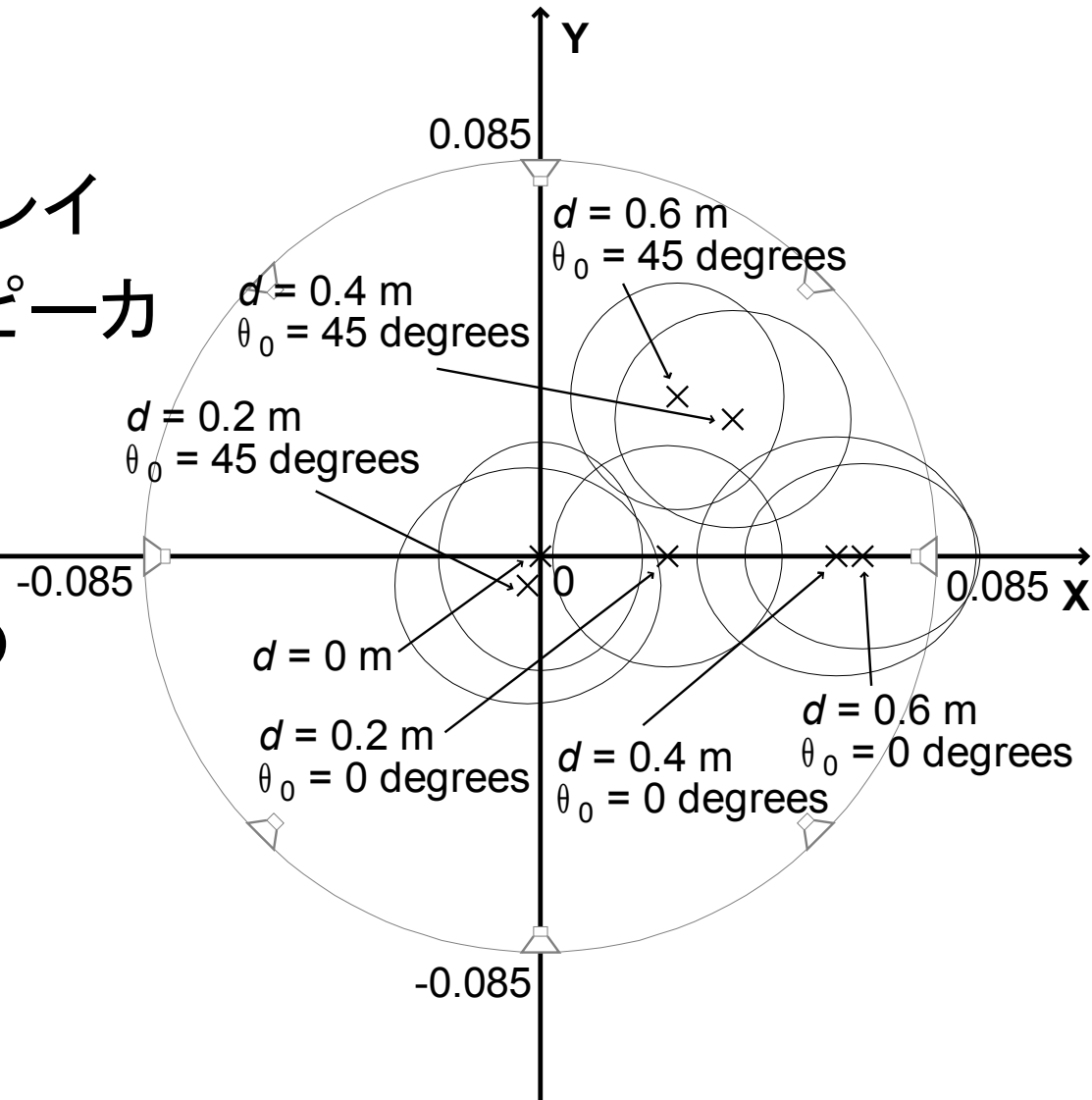
推定した音源位置(音源直接探査)

- 推定位置
 - 入力位置と同じ
- ↓
- 今回用いた手法は位置を正確に推定できる



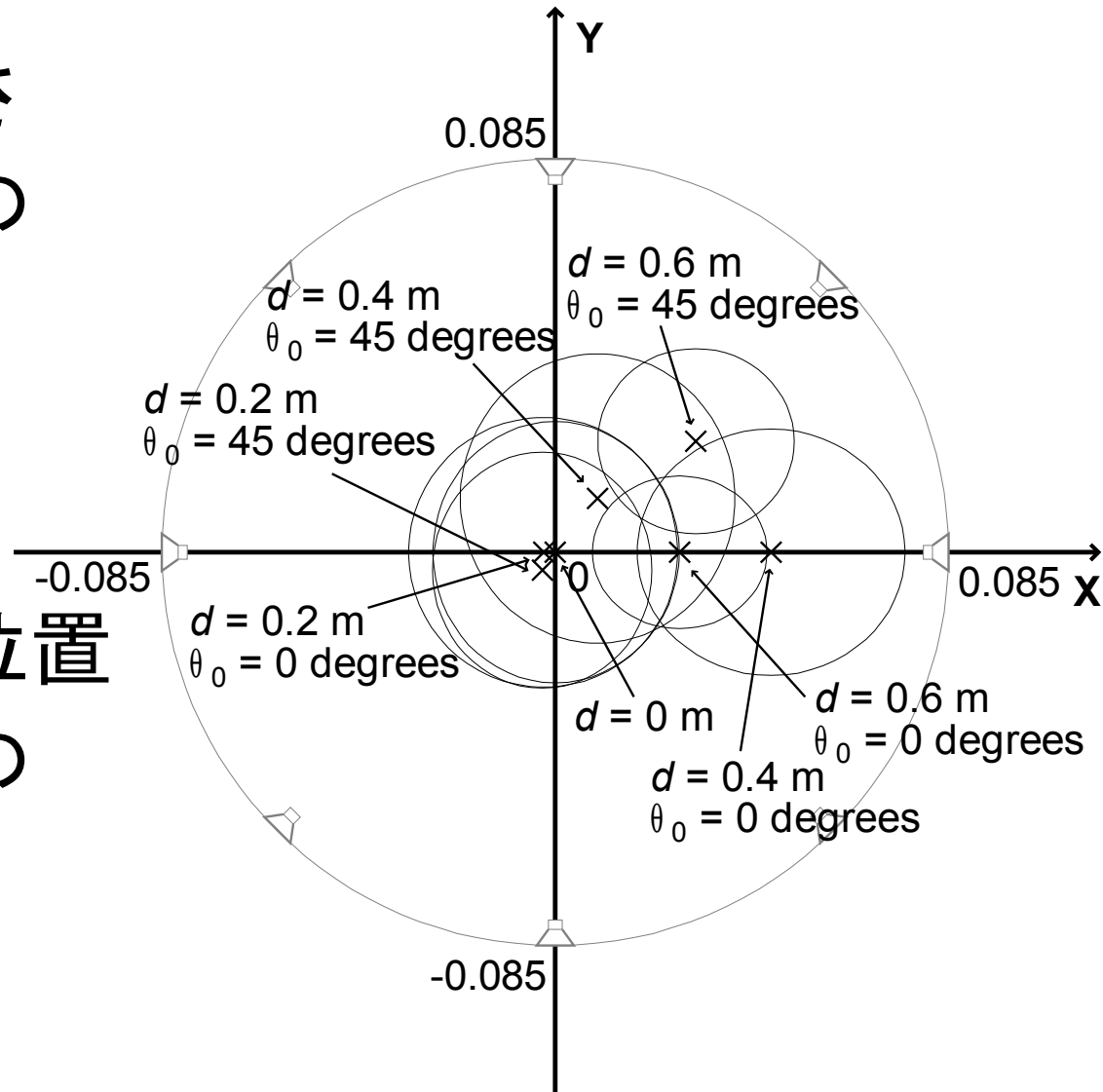
推定した音像位置(Real)

- 不動点
 - マイクロホンアレイ
 - 中心が球形スピーカ
 - 中心と対応
- 全体的な大きさ
 - 球形スピーカの大きさに縮小
- 個々の大きさ
 - 非常に大きい



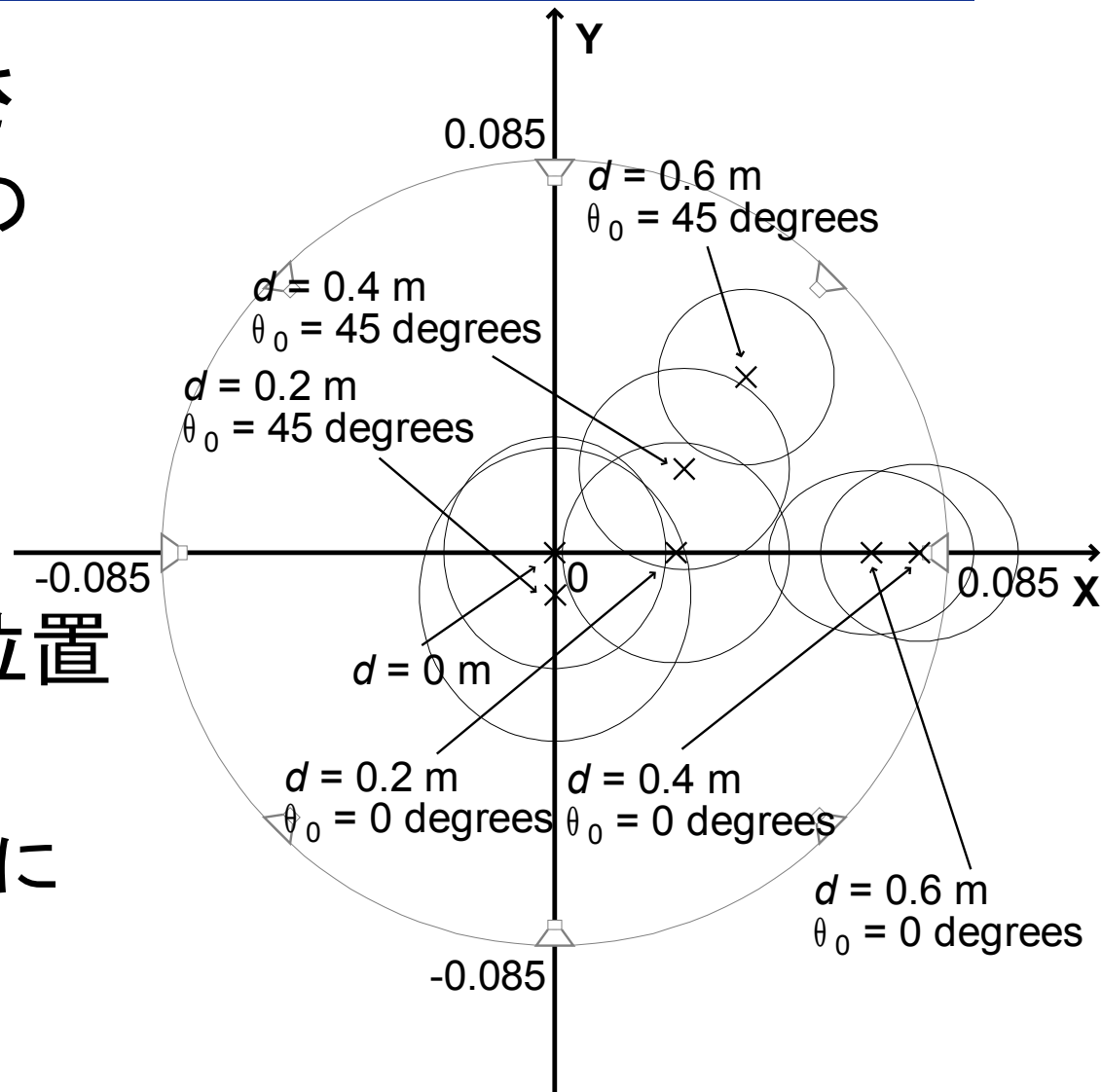
推定した音像位置(Omnidirectional)

- 全体的な大きさ
 - 球形スピーカの大きさに縮小
- 個々の大きさ
 - 非常に大きい
- 推定した音像位置
 - 球形スピーカの中心に集中



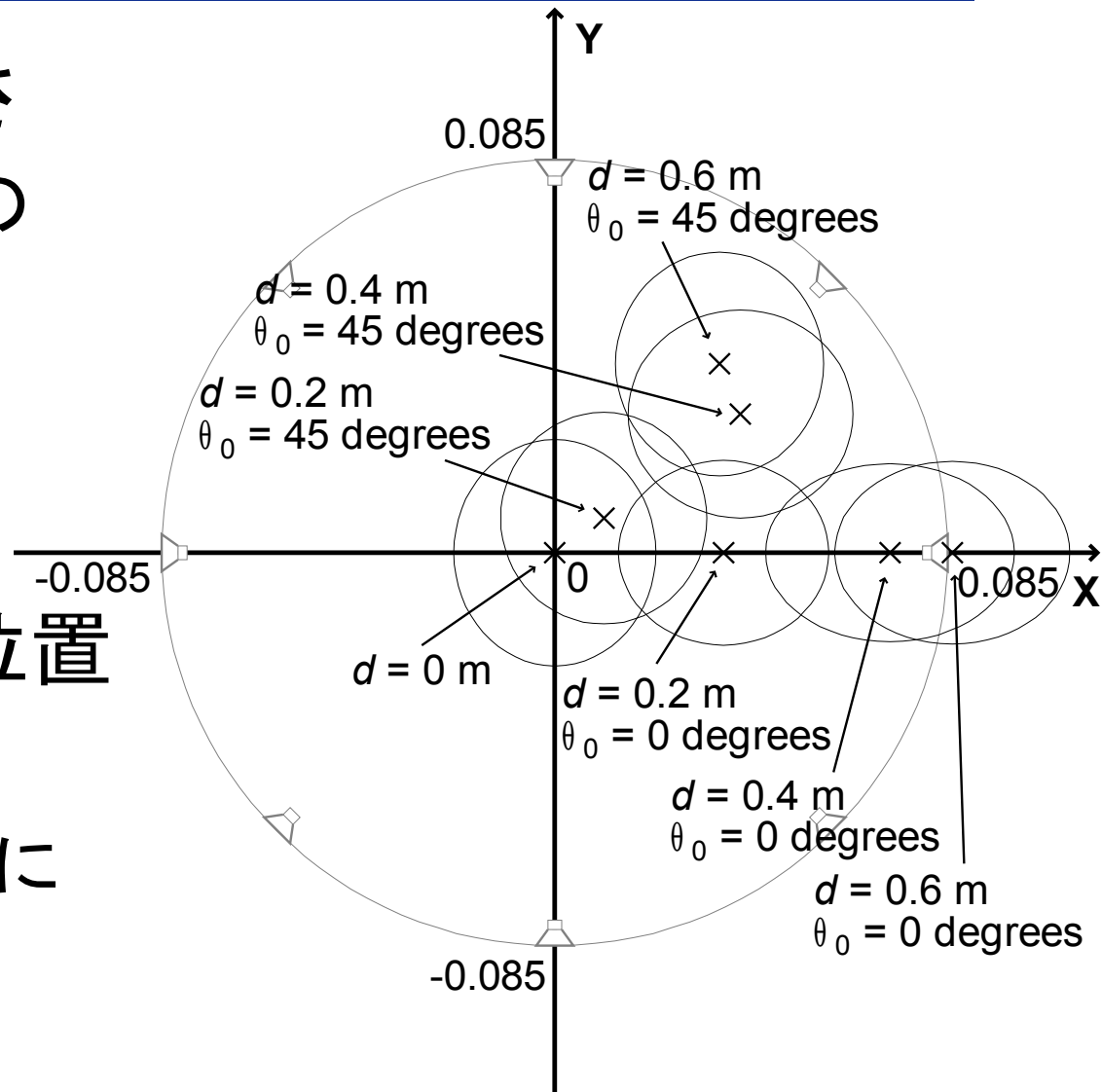
推定した音像位置(Decay 6 dB)

- 全体的な大きさ
 - 球形スピーカの大きさに縮小
- 個々の大きさ
 - 非常に大きい
- 推定した音像位置
 - 入力の距離, 方位角の関係に少し相似



推定した音像位置(Decay 12 dB)

- 全体的な大きさ
 - 球形スピーカの大きさに縮小
- 個々の大きさ
 - 非常に大きい
- 推定した音像位置
 - 入力の距離, 方位角の関係にかなり相似



まとめ

- 球形スピーカで再生される放射音場を計算機シミュレーションで数値的に解析
- 音源探査技術で複数の点音源の位置を推定し, 演奏者の音像の大きさと形を評価
 - 全体的な大きさは球形スピーカに縮小
 - 個々の点音源の大きさは非常に大きくなる
 - スピーカユニットの放射指向特性をより鋭くすれば, 音像の形は正しく保持される
- 今後の課題
 - 点音源が放射指向特性を持つ場合の検討