

{電気・応用}音響研究会

# 波面合成法を用いた 近接三次元音場再生の理論的研究

◎木村敏幸, 山肩洋子, 勝本道哲

# 超臨場感コミュニケーション

- 立体テレビ
  - リビングで鑑賞
  - 目の前に対象物がある
- 立体遠隔通信会議
  - 同じ場所で会議
  - 目の前に相手がいる
- 波面合成法に着目



リビングで楽しむ  
立体テレビ放送

立体映像による  
コミュニケーション



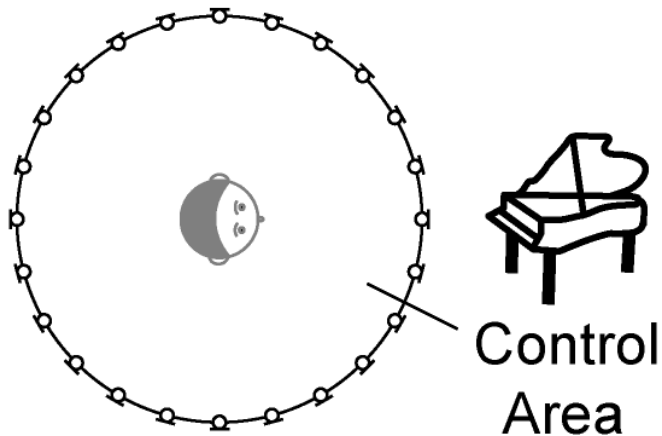
会場で作成サンプルの  
立体映像を遠隔地と共有

立体映像の将来イメージ

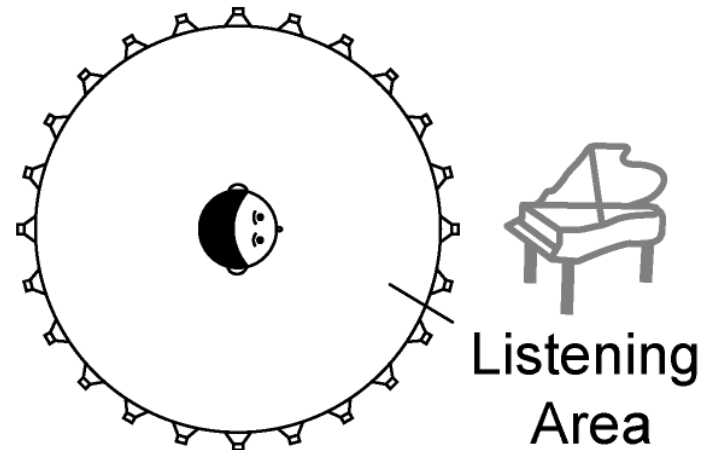
# 従来システムとの比較

- 従来システム
  - 理論的に検討されている
  - 聴取者の周りにスピーカを配置
  - 音源の周りで音が聞けない

Original Sound Field



Reproduced Sound Field



# 従来システムとの比較

- 提案システム

- 音源の周りにスピーカを配置
- 音源の周りで音が聞ける
- 理論的に検討されていない

Original Sound Field



Reproduced Sound Field



# 本報告の目的

---

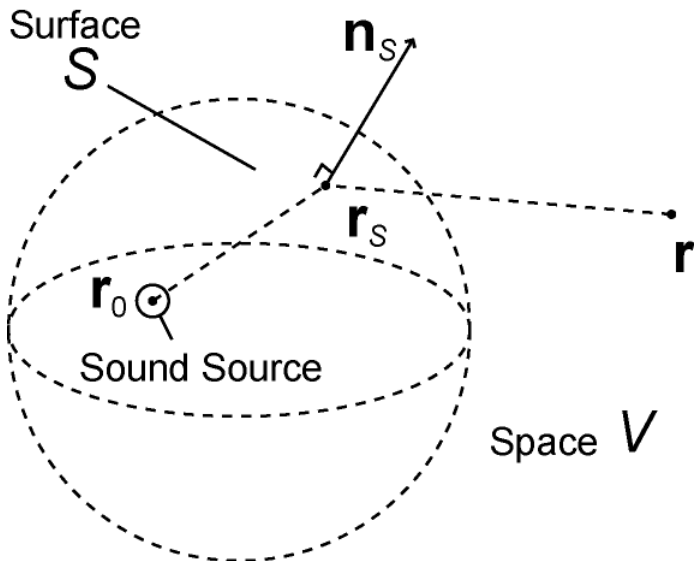
- 波面合成法による近接三次元音場再生技術の提案
  - 双極子制御手法
  - 指向点制御手法
- 提案手法の性能評価
  - 手法
    - 計算機シミュレーション
  - 評価基準
    - 平均二乗音圧(音圧分布)
    - 音響インテンシティ(音像の定位方向)

# 波面合成法

- Kirchhoff-Helmholtz積分方程式

- 連続境界面 $S$ 上で2種類の音源を再生すれば、空間 $V$ 上の音圧 $P(\mathbf{r}, \omega)$ が合成される

- 大きさ $\partial P(\mathbf{r}_s, \omega) / \partial \mathbf{n}_s$ のモノポール音源
- 大きさ $-P(\mathbf{r}_s, \omega)$ のダイポール音源



$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{4\pi} \oint_S \left\{ \frac{\partial P(\mathbf{r}_s, \omega)}{\partial \mathbf{n}_s} \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} - P(\mathbf{r}_s, \omega) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_s} \left( \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right) \right\} dS$$

$k$ : 波数

$\mathbf{r}$ : 空間 $V$ 上の点の位置ベクトル

$\mathbf{r}_s$ : 境界面 $S$ 上の点の位置ベクトル

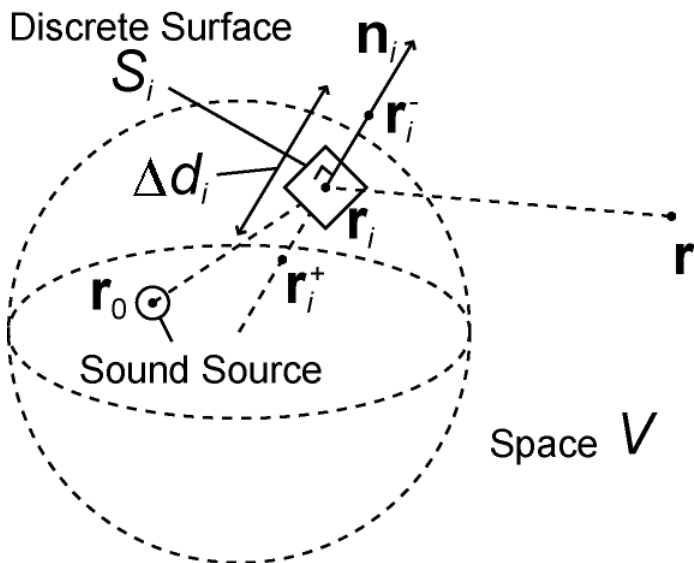
$\mathbf{n}_s$ :  $\mathbf{r}_s$ における単位法線ベクトル

# 波面合成法

- 境界面の離散化

- 境界上の $M$ 個の点 $\mathbf{r}_i$ で2種類の音源を再生すれば, 空間 $V$ 上の音圧 $P(\mathbf{r}, \omega)$ が合成される

- 大きさ $\partial P(\mathbf{r}_i, \omega) / \partial \mathbf{n}_i$ のモノポール音源
- 大きさ $-P(\mathbf{r}_i, \omega)$ のダイポール音源



$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^M \left\{ \frac{\partial P(\mathbf{r}_i, \omega)}{\partial \mathbf{n}_i} \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} - P(\mathbf{r}_i, \omega) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_i} \left( \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \right) \right\} \Delta S_i$$

$\mathbf{r}$ : 空間 $V$ 上の点の位置ベクトル

$\mathbf{r}_i$ : 境界面 $S_i$ における位置ベクトル

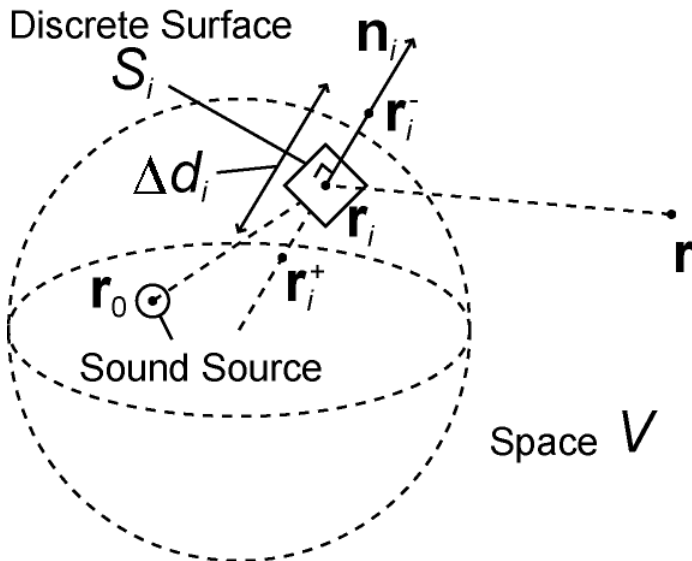
$\mathbf{n}_i$ :  $\mathbf{r}_i$ における単位法線ベクトル

# 双極子制御手法の導出

- 積分方程式に近似を導入
  - 音圧傾度を制御点近傍の音圧差分で近似
  - 音圧を制御点近傍の音圧平均で近似

$$\frac{\partial P(\mathbf{r}_i, \omega)}{\partial \mathbf{n}_i} \approx \frac{P(\mathbf{r}_i^+, \omega) - P(\mathbf{r}_i^-, \omega)}{\Delta d_i}$$

$$P(\mathbf{r}_i, \omega) \approx \frac{P(\mathbf{r}_i^+, \omega) + P(\mathbf{r}_i^-, \omega)}{2}$$





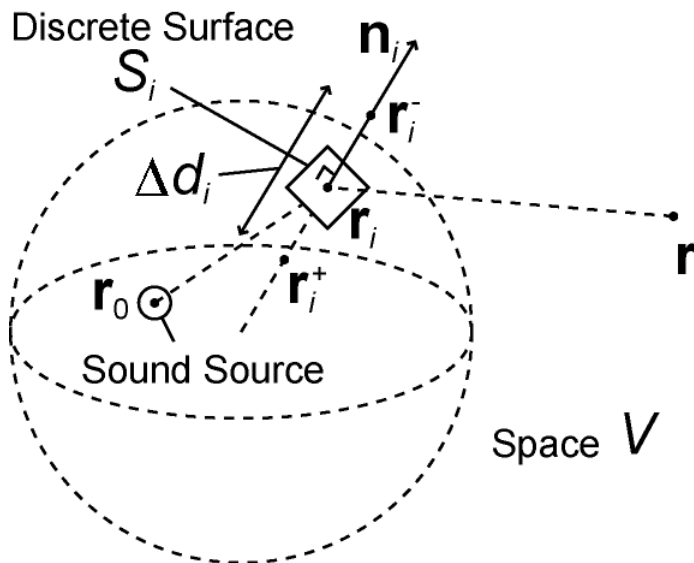


# 双極子制御手法の導出

- 双極子制御手法の公式

- $M$ 個の点 $\mathbf{r}_i$ の近傍で2種類の音源を再生すれば、空間 $V$ 上の音圧 $P(\mathbf{r}, \omega)$ が合成される

- 位置 $\mathbf{r}_i^-$ で大きさ $P(\mathbf{r}_i^+, \omega)$ のモノポール音源
- 位置 $\mathbf{r}_i^+$ で大きさ $-P(\mathbf{r}_i^-, \omega)$ のモノポール音源



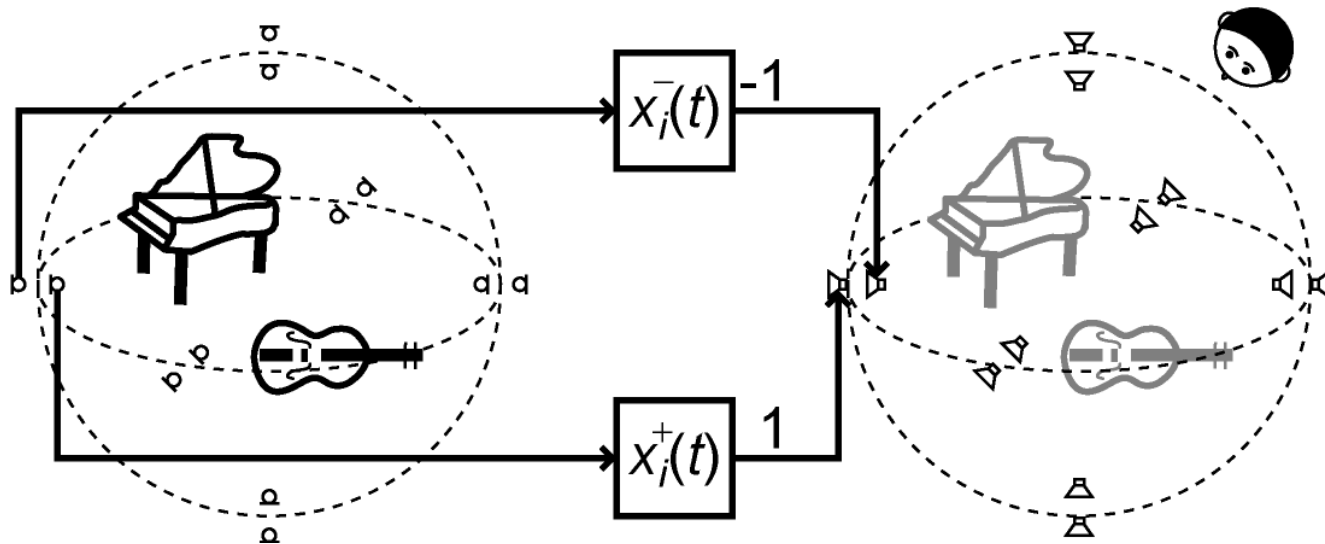
$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^M \left\{ P(\mathbf{r}_i^+, \omega) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^-|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^-|} - P(\mathbf{r}_i^-, \omega) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^+|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^+|} \right\} \frac{\Delta S_i}{\Delta d_i}$$

# 双極子制御手法

1. 境界面上のマイクロホン対で音を収録
2. 境界面上のスピーカ対で音を再生
3. アレイの外側の音場が再現
4. アレイの内側で音が鳴っているように感じる

Original Sound Field

Reproduced Sound Field

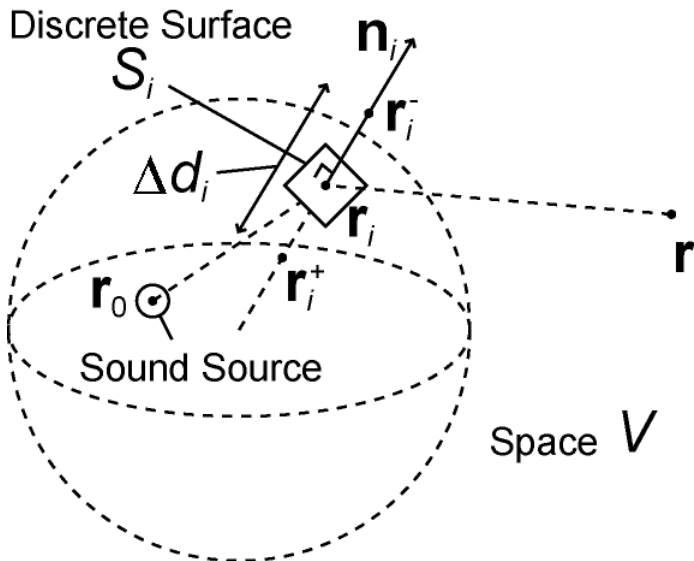




# 指向点制御手法の導出

- ダイポール音源に別の近似を導入

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_i} \left( \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \right) = -\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \left( \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} + jk \right) \cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r})$$
$$\approx -jk \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r})$$



但し,  $k \gg \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}$

$(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r})$ : ベクトル  $\mathbf{n}_i$  と  $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}$  がなす角

# 指向点制御手法の導出

- Fresnel-Kirchhoffの回折公式

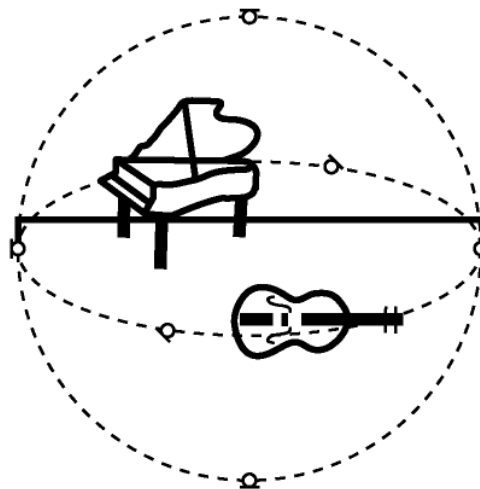
- 境界上の $M$ 個の点 $\mathbf{r}_i$ で大きさ $P(\mathbf{r}_i, \omega)$ の指向性音源を再生すれば、空間 $V$ 上の音圧 $P(\mathbf{r}, \omega)$ が合成される

$$\begin{aligned} P(\mathbf{r}, \omega) &= \frac{jk}{4\pi} \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \{\cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r}) - \cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0)\} \Delta S_i \\ &\approx \frac{jk}{4\pi} \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \{-\cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r} - \mathbf{r}_i) - 1\} \Delta S_i \\ &\approx \frac{jk}{4\pi} \sum_{i=1}^M D_i P(\mathbf{r}_i, \omega) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \Delta S_i \end{aligned}$$

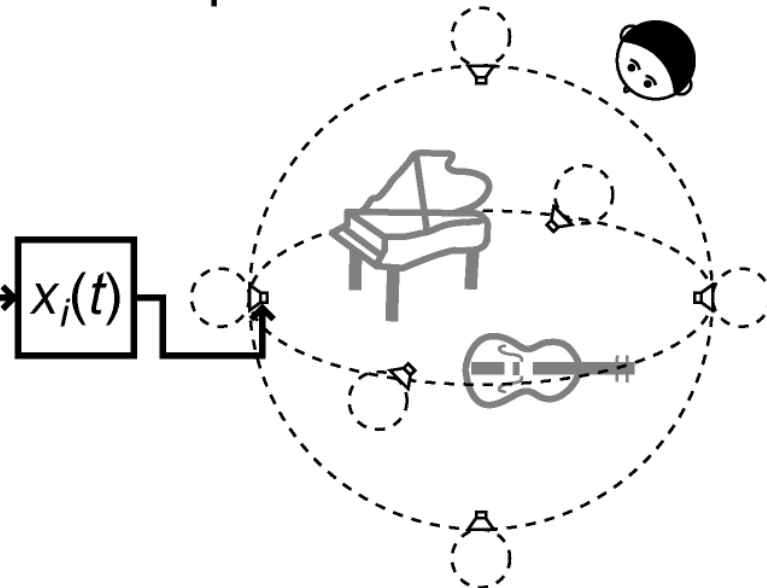
# 指向点制御手法

1. 境界面上のマイクロホンで音を収録
2. 境界面上の指向性スピーカで音を再生
3. アレイの外側の音場が再現
4. アレイの内側で音が鳴っているように感じる

Original Sound Field

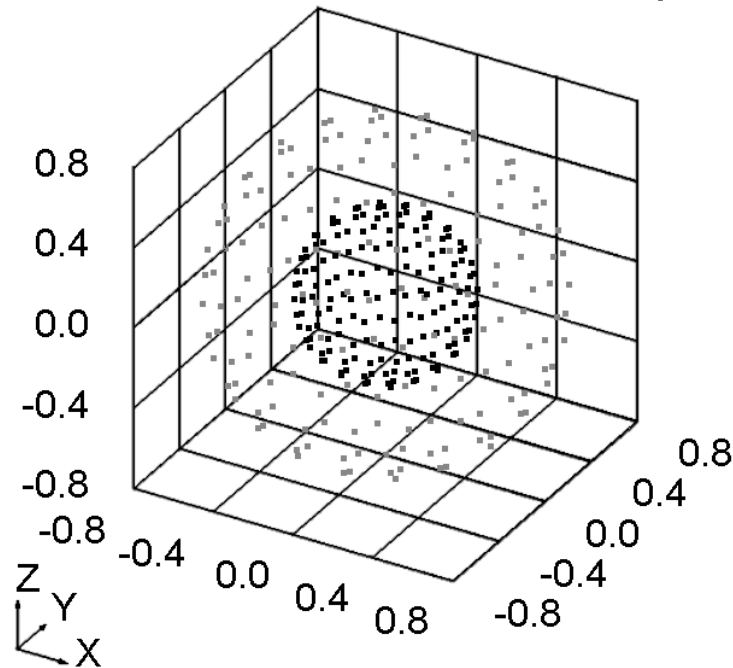


Reproduced Sound Field



# 制御・合成位置

- 制御点位置
  - 半径0.4mの球面上に162点(黒色)
- 合成点位置
  - 半径0.8mの球面上に162点(灰色)





# 音圧の合成(原音場)

---

- 音源  $s(t)$ ...振幅 $A$ , 周波数 $f$  のサイン波

$$s(t) = A \sin 2\pi ft$$

- 音圧  $p_0(\mathbf{r}, f, t)$

$$p_0(\mathbf{r}, f, t) = \frac{1}{d_0} s\left(t - \frac{d_0}{c}\right) = \frac{A}{d_0} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{d_0}{c}\right)\right\}$$

$\mathbf{r}$ : 合成点の位置ベクトル

$d_0(=|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|)$ : 音源から合成点までの距離

$\mathbf{r}_0$ : 音源の位置ベクトル

$c$ : 音速

# 音圧の合成(双極子制御)

–  $i$ 番目のマイクロホン対で収録した信号

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

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

$d_{i0}^+ (= |\mathbf{r}_i^+ - \mathbf{r}_0|)$ ,  $d_{i0}^- (= |\mathbf{r}_i^- - \mathbf{r}_0|)$ :

音源から $i$ 番目のマイクロホン対までの距離

$\mathbf{r}_i^+$ ,  $\mathbf{r}_i^-$ :  $i$ 番目のマイクロホン対の位置ベクトル

$$\mathbf{r}_i^+ = \mathbf{r}_i - \frac{\Delta d_i}{2} \mathbf{n}_i, \quad \mathbf{r}_i^- = \mathbf{r}_i + \frac{\Delta d_i}{2} \mathbf{n}_i$$

# 音圧の合成(双極子制御)

– 音圧  $p(\mathbf{r}, f, t)$

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

$M$ : スピーカ対の総数

$d_i^+ (= |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i^+|)$ ,  $d_i^- (= |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i^-|)$ :

$i$ 番目のスピーカ対から合成点までの距離

# 音圧の合成(指向点制御)

–  $i$ 番目のマイクロホンで収録した信号  $x_i(t)$

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

– 音圧  $p(\mathbf{r}, f, t)$

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

$d_{i0}(=|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|)$ : 音源からマイクロホンまでの距離

$\mathbf{r}_i$ :  $i$ 番目のマイクロホンの位置ベクトル

$M$ : スピーカの総数

$d_i(=|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|)$ : スピーカから合成点までの距離

$D_i$ :  $i$ 番目のスピーカの指向特性

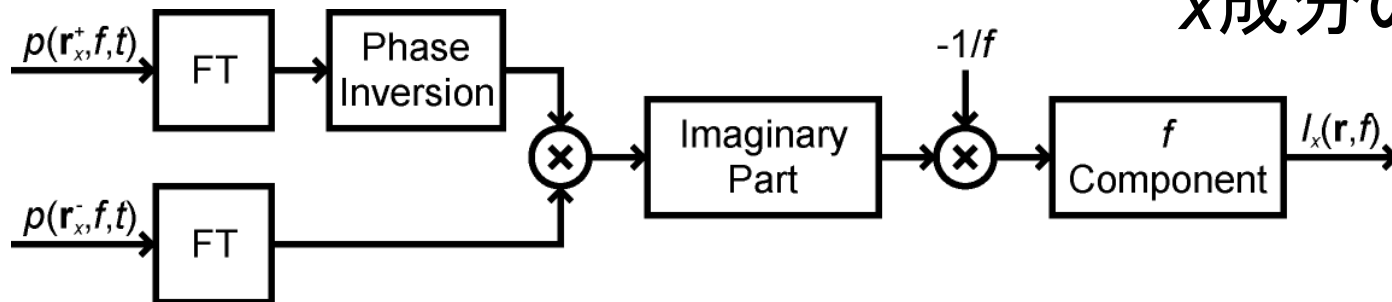
# 計算機シミュレーション条件

Source amplitude ( $A$ )	1
Source frequency ( $f$ )	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 Hz
Source position ( $\mathbf{r}_0$ )	$(0, 0, 0)^T$ $(0.3, 0, 0)^T$ $(0, 0.3, 0)^T$ $(0, 0, 0.3)^T$
Sound velocity ( $c$ )	340 m/s
Total number of control points ( $M$ )	162
Radius of control points ( $r$ )	0.4 m
Total number of synthesis points ( $N$ )	162
Radius of synthesis points ( $R$ )	0.8 m
Unit normal vector ( $\mathbf{n}_i$ )	$\mathbf{r}_i/ \mathbf{r}_i $
Neighbor distance ( $\Delta_i$ )	0.002 m
Directivity ( $D_i$ )	Omnidirectional, Unidirectional, Shotgun

# 音響インテンシティの算出

- 音響インテンシティ(ベクトル量)
  - 音圧と粒子速度の積
  - 音源探査などに利用される
- クロススペクトル法により算出

再生音場,  
x成分の場合



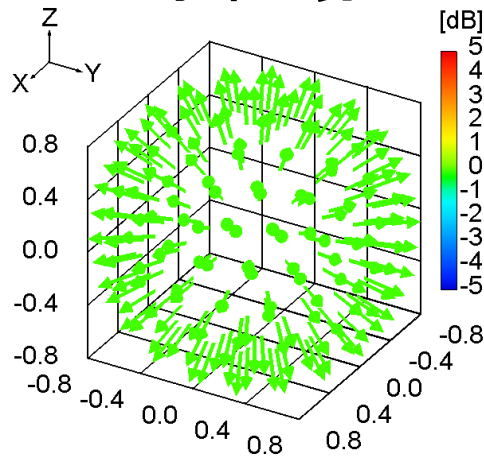
$p(\mathbf{r}_x^+, f, t), p(\mathbf{r}_x^-, f, t)$ :  $\mathbf{r}_x^+, \mathbf{r}_x^-$ における音圧

$\Delta=0.001$  m      $\mathbf{r}_x^+ = \mathbf{r} + (\Delta, 0, 0)^T$ ,      $\mathbf{r}_x^- = \mathbf{r} - (\Delta, 0, 0)^T$

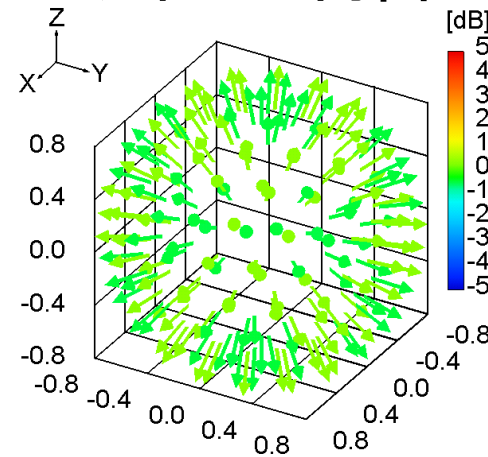
$I_x(\mathbf{r}, f)$ : x成分の音響インテンシティ

# ベクトル線図 (0, 0, 0), 1000Hz

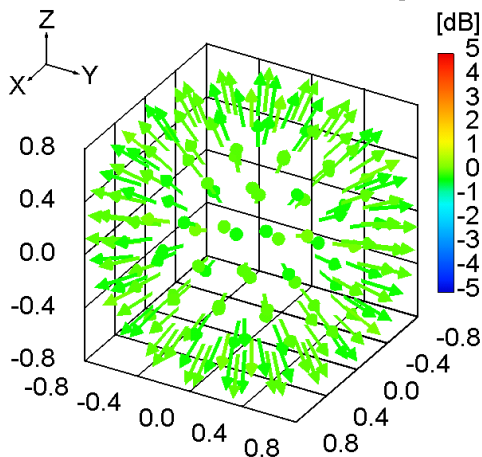
## 原音場



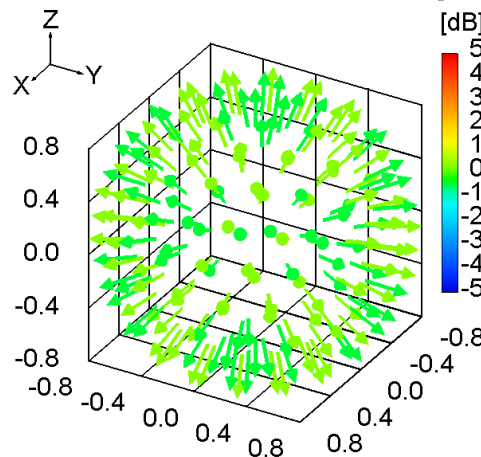
## 双極子制御



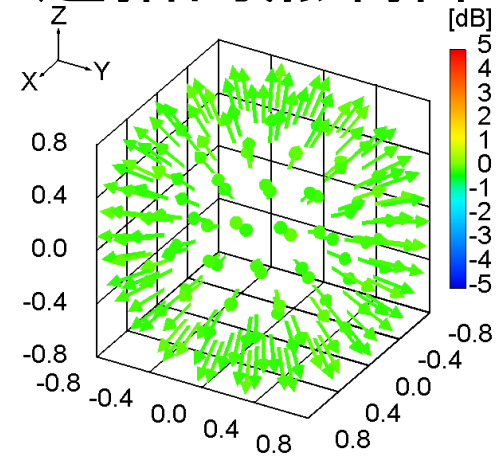
## 無指向点制御



## 単一指向点制御

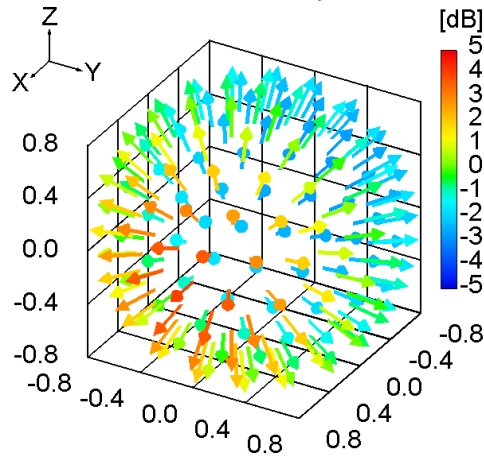


## 超指向点制御

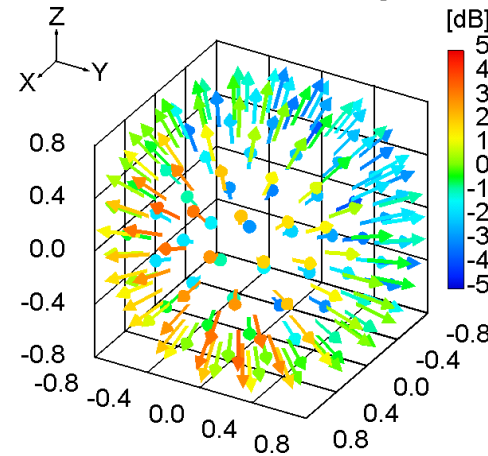


# ベクトル線図 (0.3, 0, 0), 1000Hz

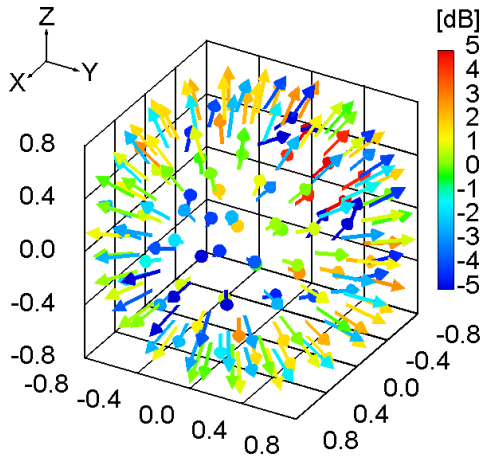
## 原音場



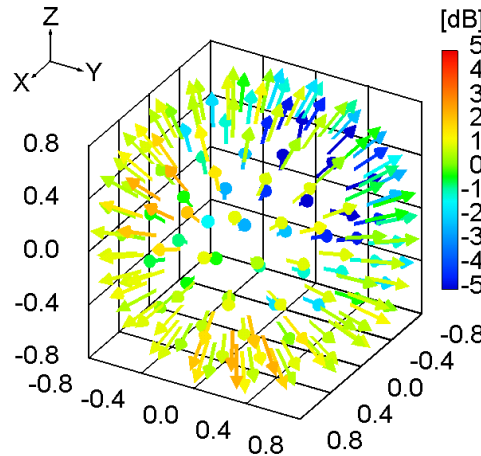
## 双極子制御



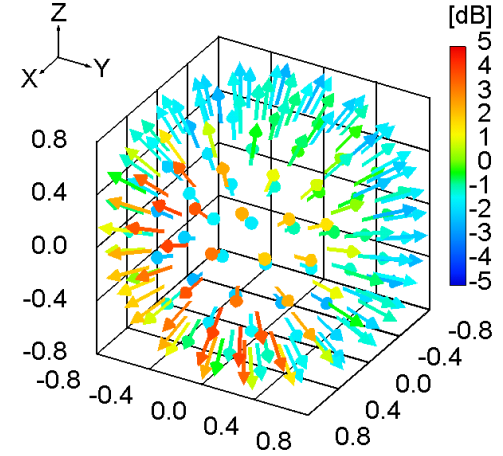
## 無指向点制御



## 単一指向点制御



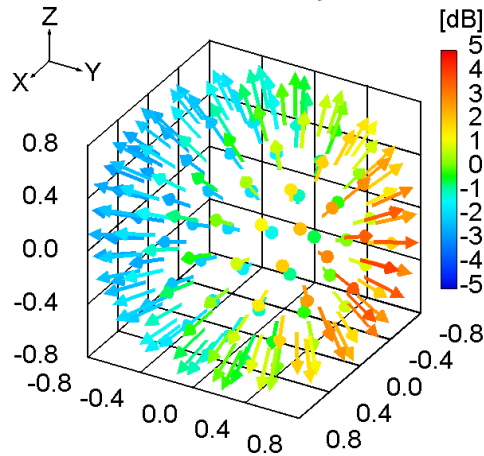
## 超指向点制御



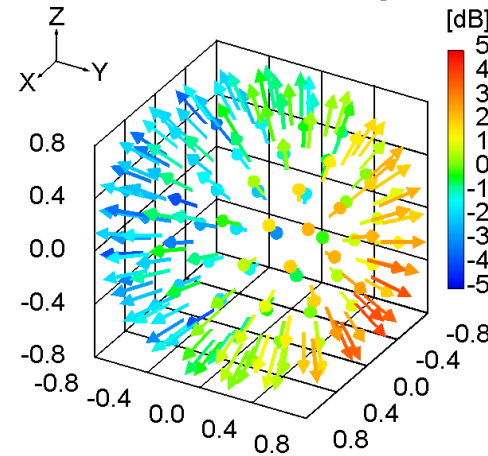


# ベクトル線図 (0, 0.3, 0), 1000Hz

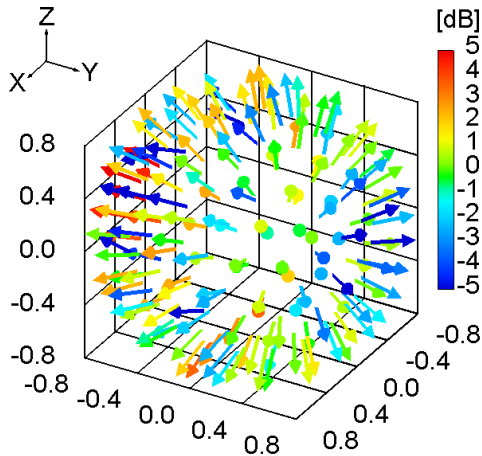
## 原音場



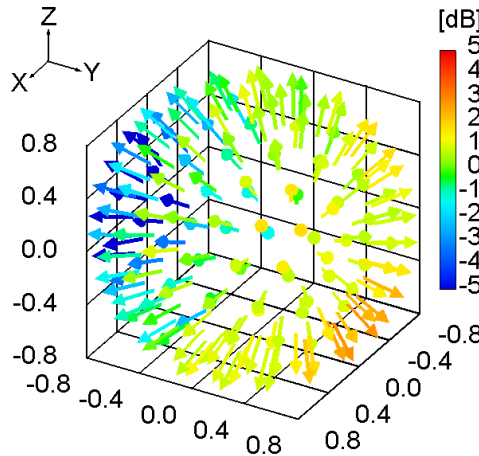
## 双極子制御



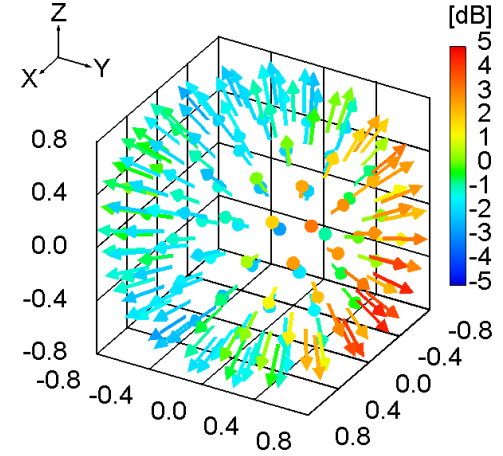
## 無指向点制御



## 単一指向点制御

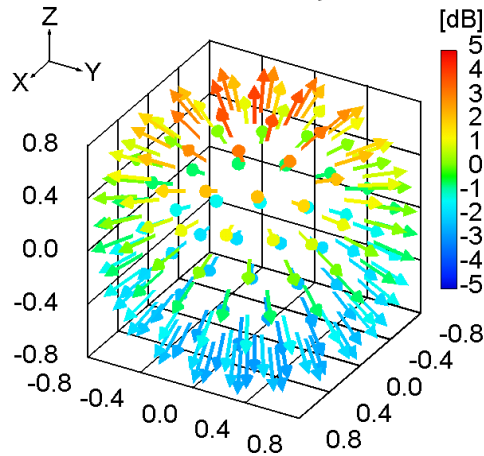


## 超指向点制御

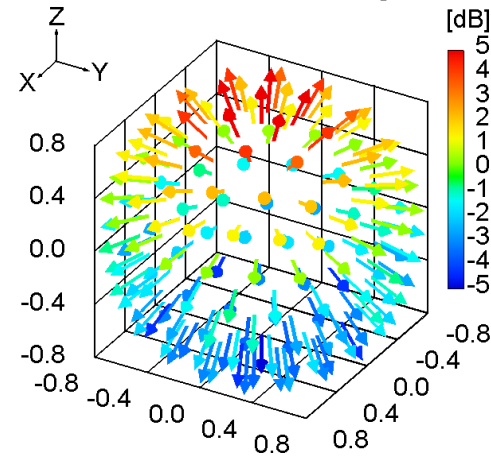


# ベクトル線図 (0, 0, 0.3), 1000Hz

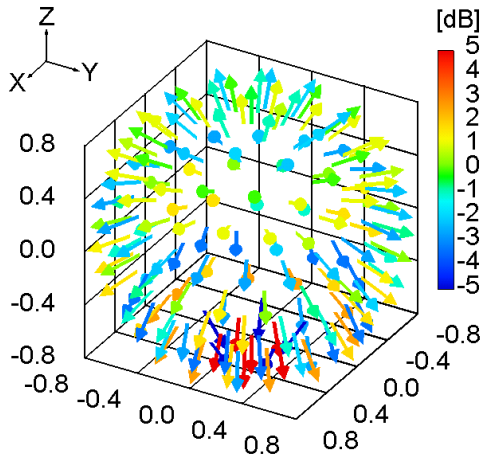
## 原音場



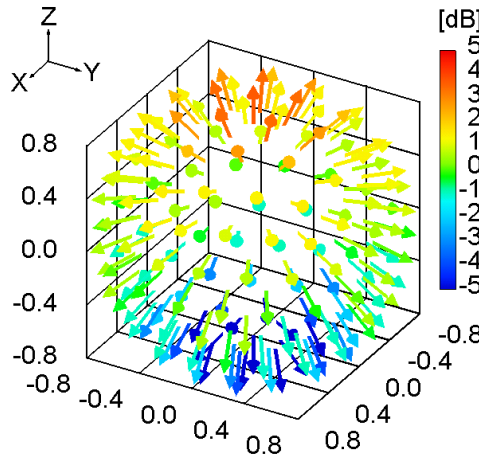
## 双極子制御



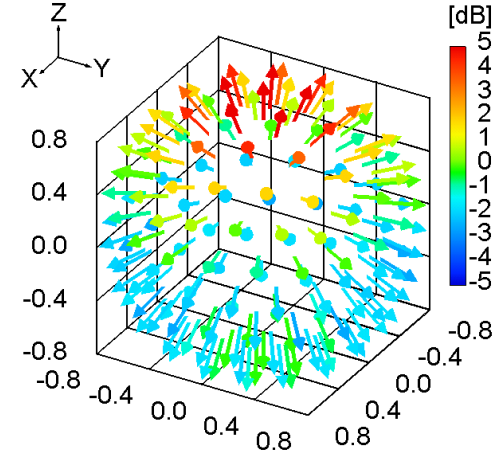
## 無指向点制御



## 単一指向点制御



## 超指向点制御



- 平均二乗音圧のSNR
  - 音圧分布の違い

$$\text{SNR}(f) = 10 \log_{10} \frac{\sum_{\mathbf{r}} \{p_0(\mathbf{r}, f)\}^2}{\sum_{\mathbf{r}} \{p(\mathbf{r}, f) - p_0(\mathbf{r}, f)\}^2}$$

$p_0(\mathbf{r}, f)$ : 原音場の平均二乗音圧

$p(\mathbf{r}, f)$ : 再生音場の平均二乗音圧

$$p_0(\mathbf{r}, f) = \sqrt{\int_0^1 \{p_0(\mathbf{r}, f, t)\}^2 dt}$$

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

# 定量評価

- インテンシティ方向誤差(IDE) $\theta(f)$ 
  - 音像の定位方向の違い

$$\theta(f) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{\mathbf{r}} \left[ \cos^{-1} \left\{ \frac{\mathbf{I}(\mathbf{r}, f) \cdot \mathbf{I}_0(\mathbf{r}, f)}{|\mathbf{I}(\mathbf{r}, f)| |\mathbf{I}_0(\mathbf{r}, f)|} \right\} \right]^2}$$

$\mathbf{I}_0(\mathbf{r}, f) = \{I_{x0}(\mathbf{r}, f), I_{y0}(\mathbf{r}, f), I_{z0}(\mathbf{r}, f)\}^T$ :  
原音場の音響インテンシティ

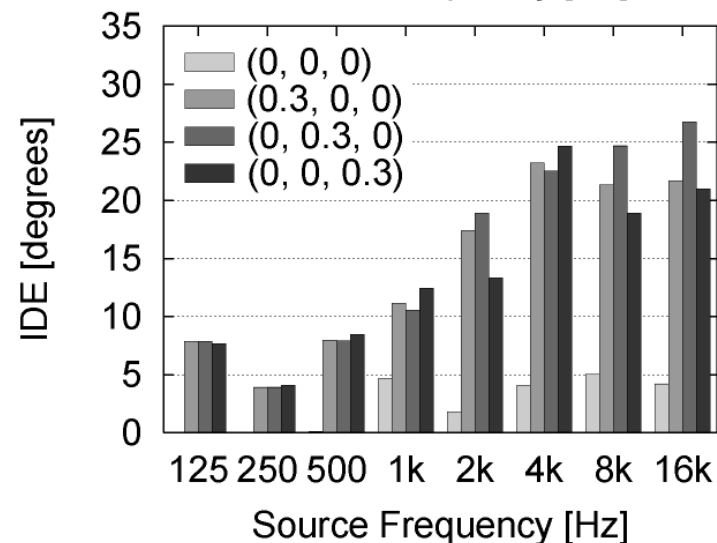
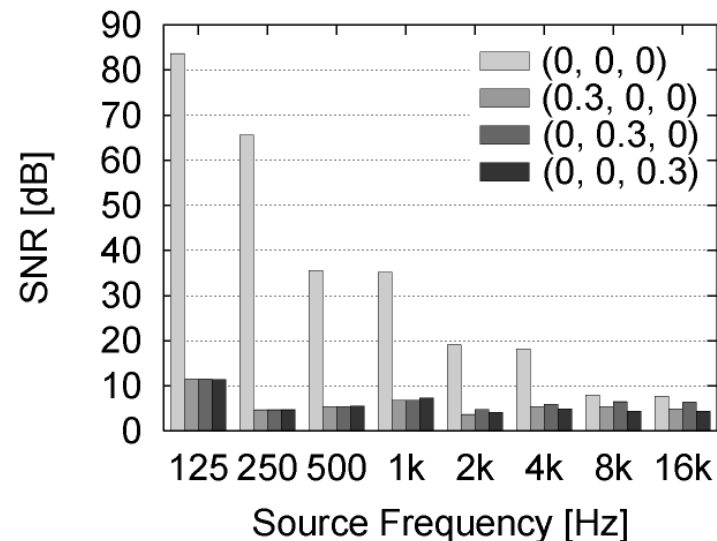
$\mathbf{I}(\mathbf{r}, f) = \{I_x(\mathbf{r}, f), I_y(\mathbf{r}, f), I_z(\mathbf{r}, f)\}^T$ :  
再生音場の音響インテンシティ

$N(=162)$ : 合成点の数

# 定量評価結果(無指向点制御)

- 平均二乗音圧のSNR
  - 全ての周波数...12dB以下 (音源が中心以外)
  - 音圧分布が再現されていない
- インテンシティ方向誤差
  - 1000Hz以下...12.5度以下
  - 音像の定位方向はある程度再現されている

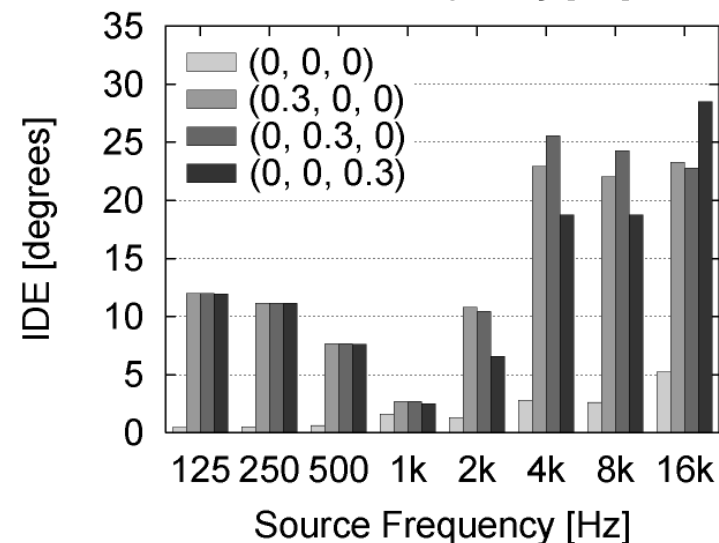
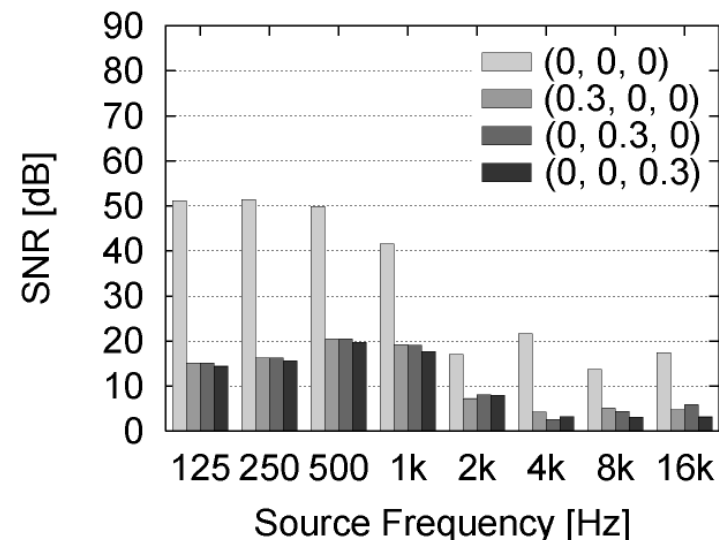
Omnidirectional Point Control



# 定量評価結果(超指向点制御)

- 平均二乗音圧のSNR
  - 1000Hz以下...14.3dB以上
  - 音圧分布はある程度再現されている
- インテンシティ方向誤差
  - 1000Hz以下...12.0度以下
  - 音像の定位方向はある程度再現されている

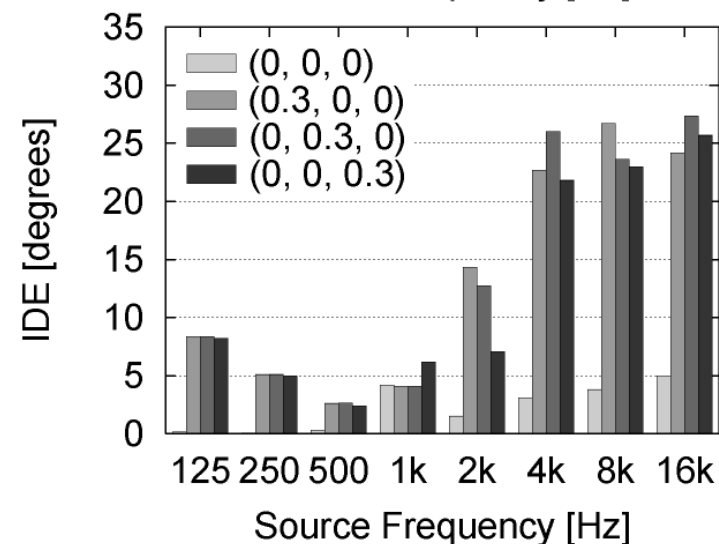
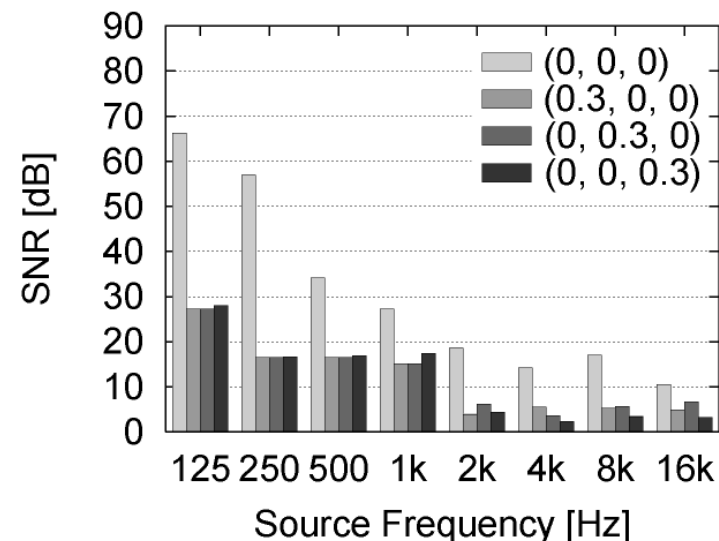
Shotgun Point Control



# 定量評価結果(単一指向点制御)

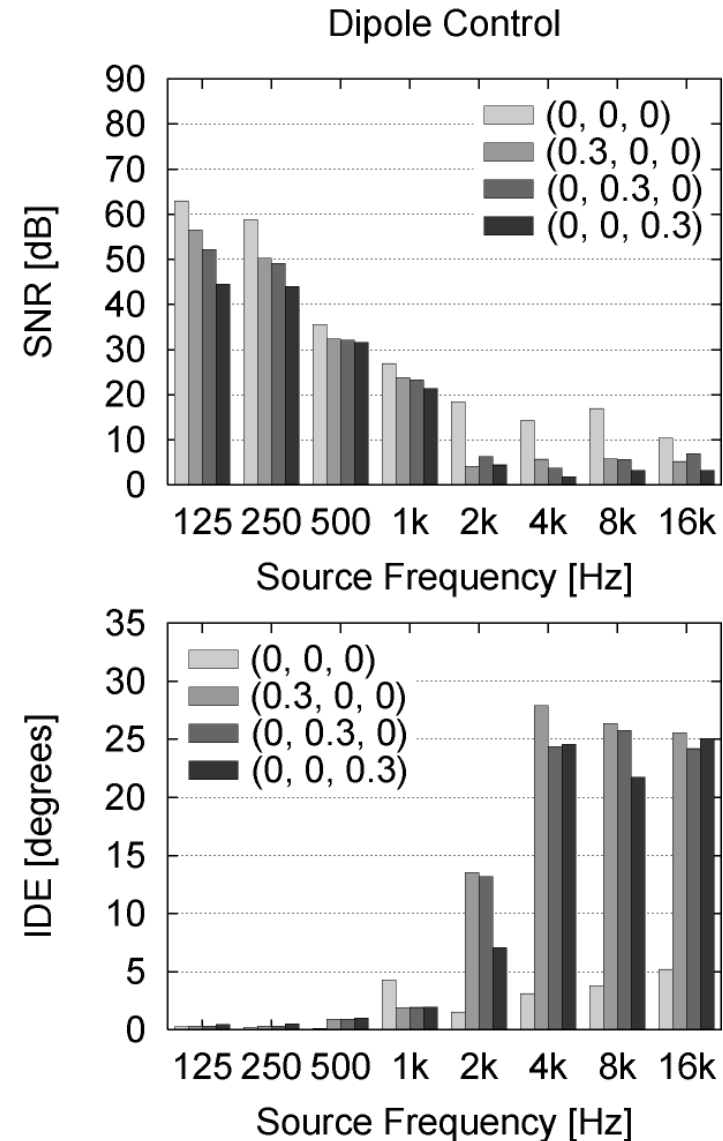
- 平均二乗音圧のSNR
  - 1000Hz以下...15.0dB以上
  - 音圧分布はある程度再現されている
- インテンシティ方向誤差
  - 1000Hz以下...8.4度以下
  - 音像の定位方向はある程度再現されている

Unidirectional Point Control



# 定量評価結果(双極子制御)

- 平均二乗音圧のSNR
  - 1000Hz以下...21.3dB以上
  - 音圧分布は十分に再現されている
- インテンシティ方向誤差
  - 1000Hz以下...4.3度以下
  - 音像の定位方向は十分に再現されている





# まとめ

---

- 波面合成法による近接三次元音場再生技術の提案
- 双極子制御手法は非常に性能が良い
- 指向点制御手法はスピーカに指向性を設ければ性能が良い
- 今後の予定
  - システムの試作
  - 実環境における性能の評価
    - 音響計測(音圧分布, 音響インテンシティ)
    - 主観評価実験(定位実験)