

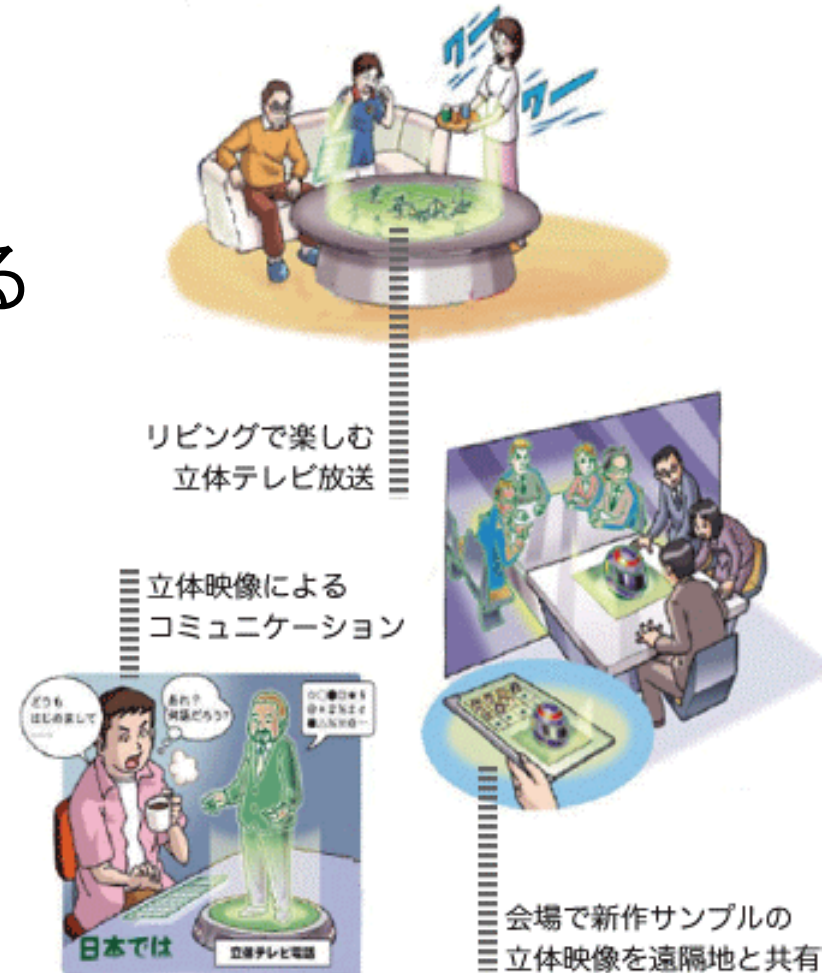
日本音響学会2008年春季研究発表会

# 波面合成法を用いた 近接三次元音場再生の数値解析

◎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



立体映像の将来イメージ

# 本報告の目的

---

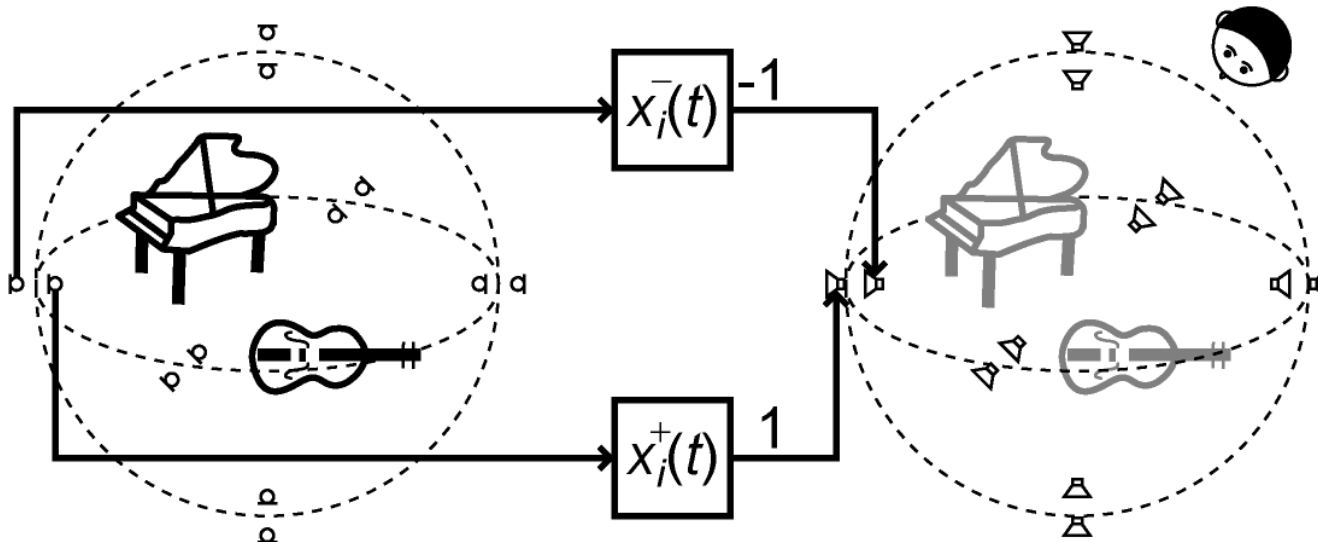
- 波面合成法による近接三次元音場再生技術の提案
  - 双極子制御手法
  - 指向点制御手法
    - 詳細は4月の電気音響研究会にて発表
- 提案手法の性能評価
  - 手法
    - 計算機シミュレーション
  - 評価基準
    - 平均二乗音圧(音圧分布)
    - 音響インテンシティ(音像の定位方向)

# 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

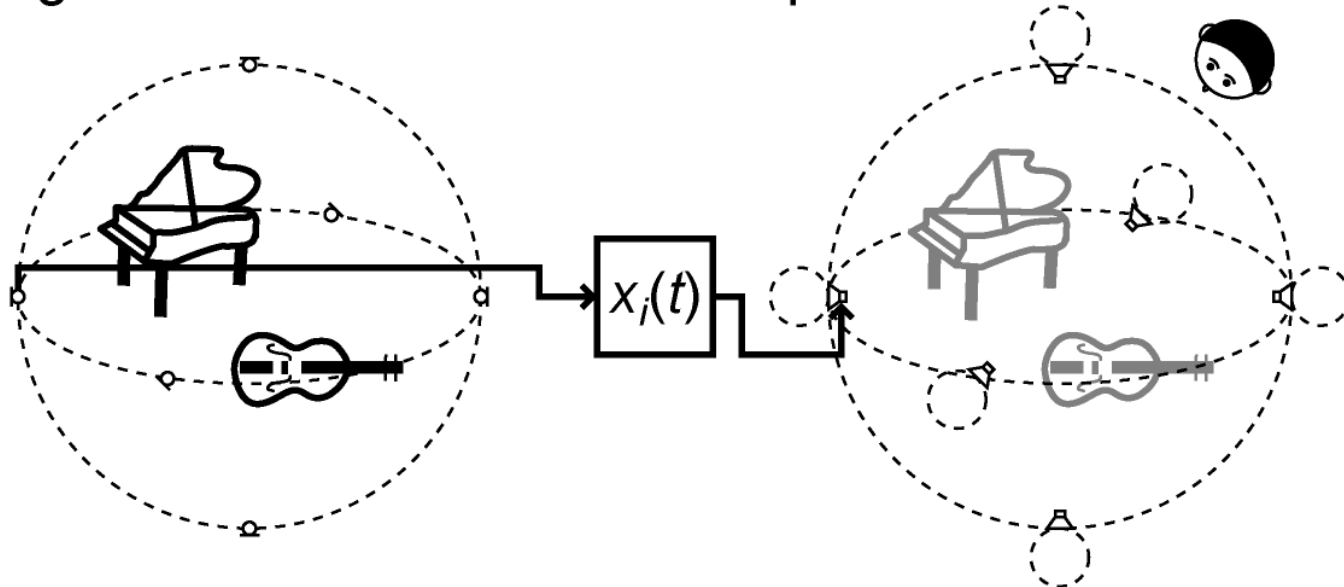


# 指向点制御手法

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

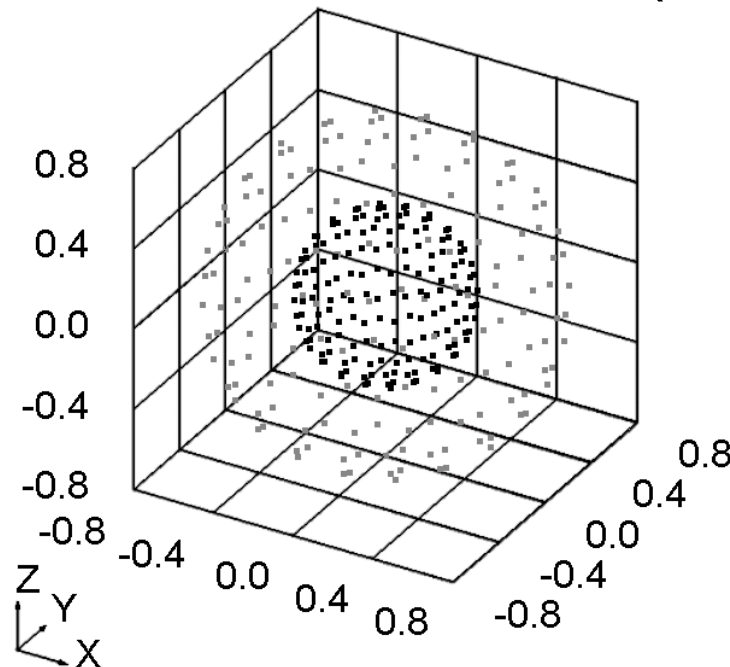
Original Sound Field

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

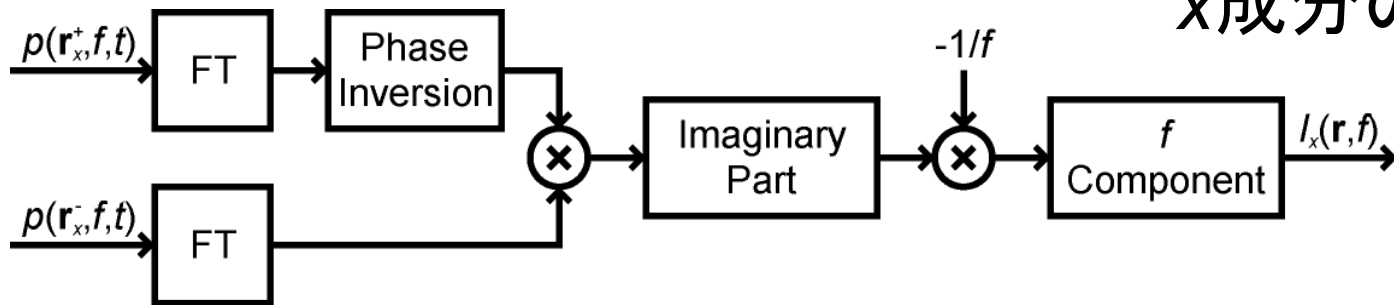
# 計算機シミュレーション条件

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



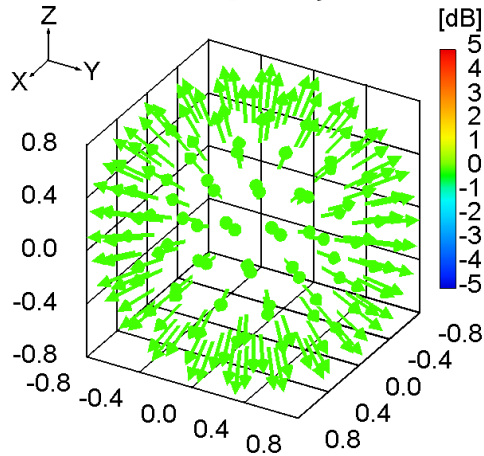
$p(\mathbf{r}_x^+, f, t), p(\mathbf{r}_x^-, f, t)$ :  $\mathbf{r}_x^+, \mathbf{r}_x^-$ における音圧

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

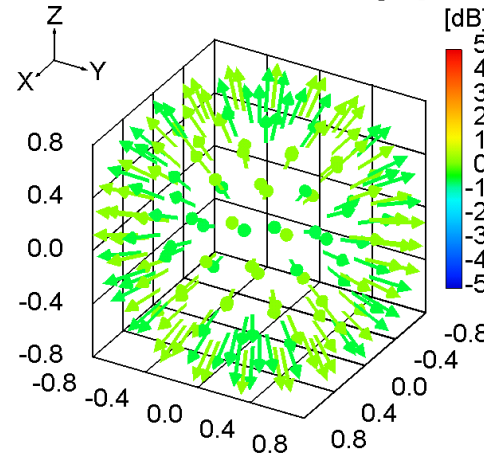
$I_x(\mathbf{r}, f)$ : x成分の音響インテンシティ

# ベクトル線図 (0, 0, 0), 1000Hz

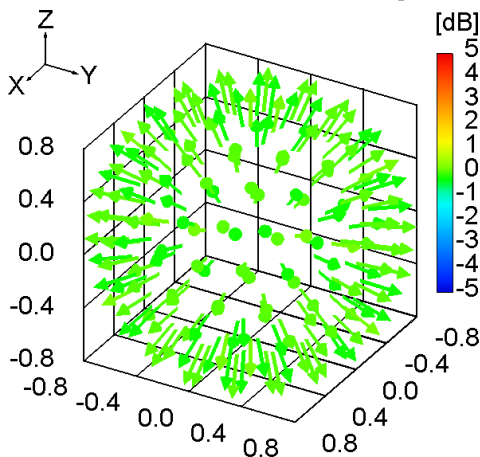
## 原音場



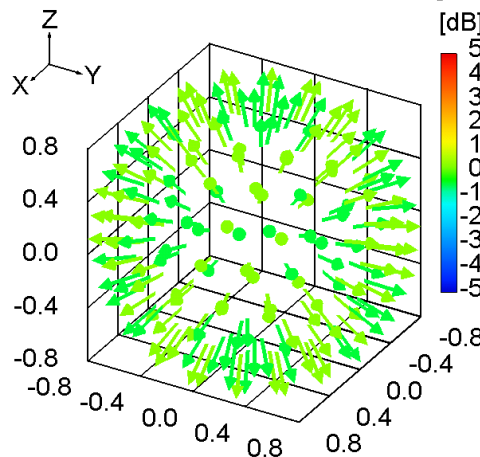
## 双極子制御



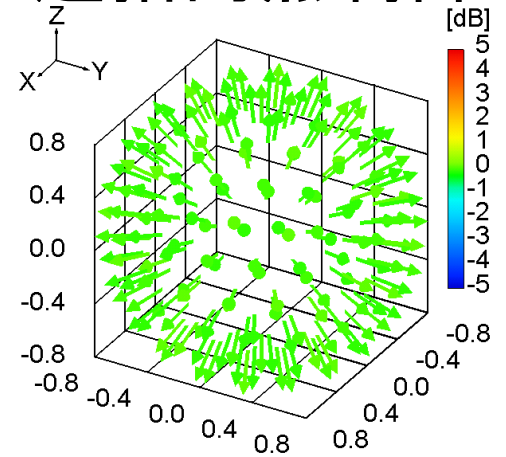
## 無指向点制御



## 単一指向点制御

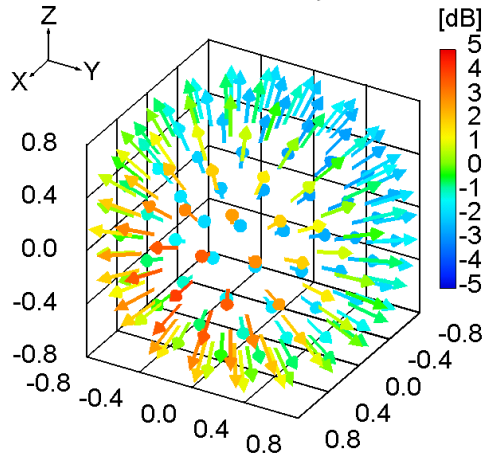


## 超指向点制御

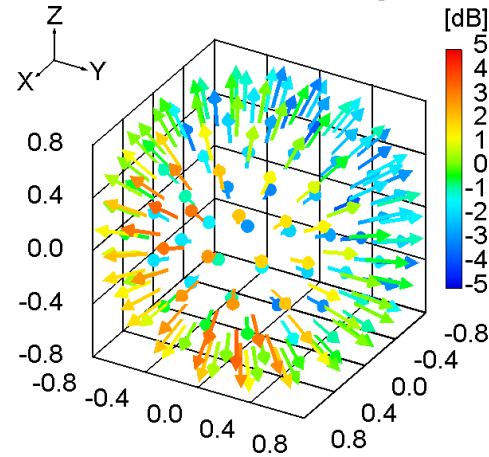


# ベクトル線図 (0.3, 0, 0), 1000Hz

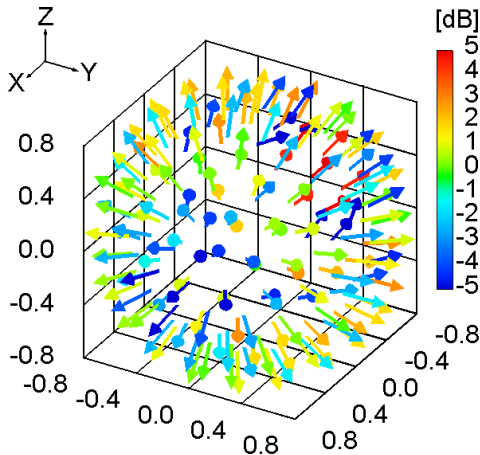
## 原音場



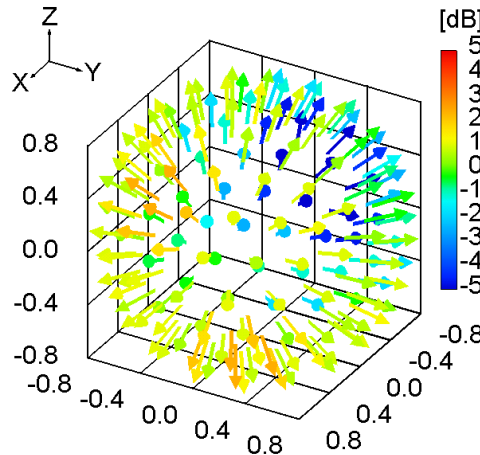
## 双極子制御



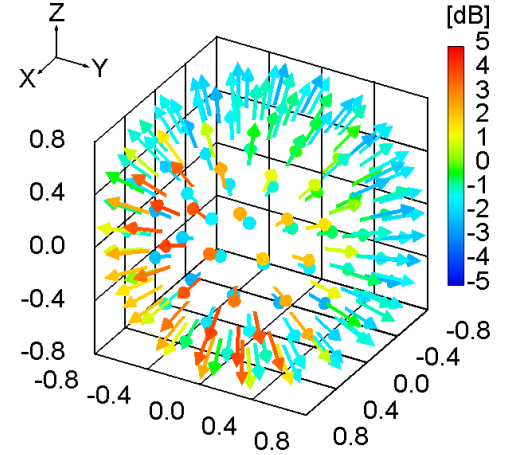
## 無指向点制御



## 単一指向点制御

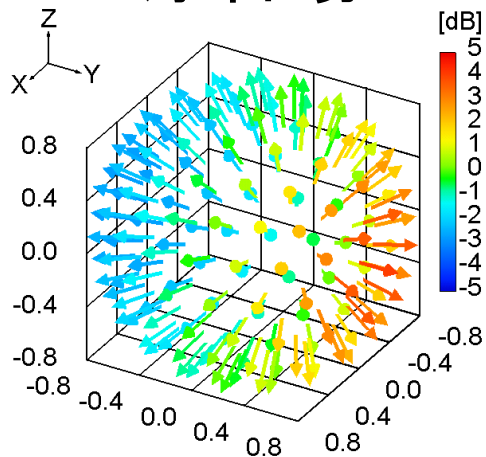


## 超指向点制御

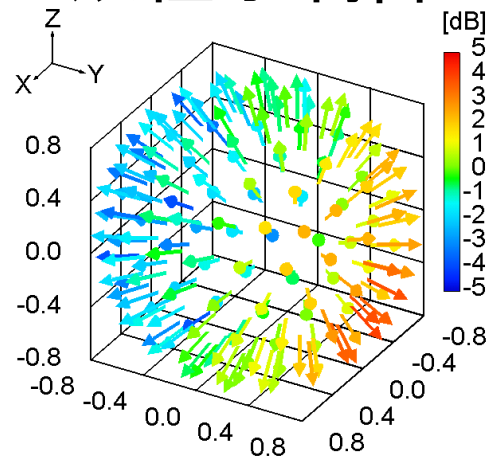


# ベクトル線図 (0, 0.3, 0), 1000Hz

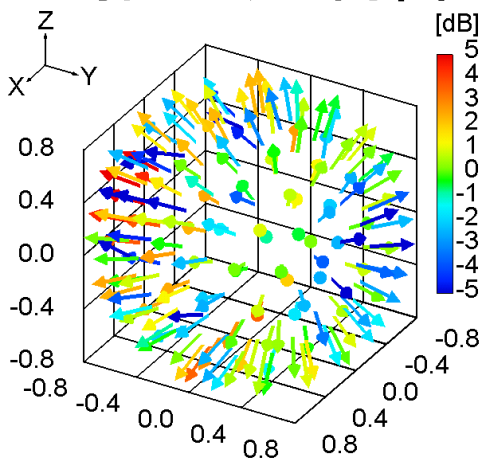
## 原音場



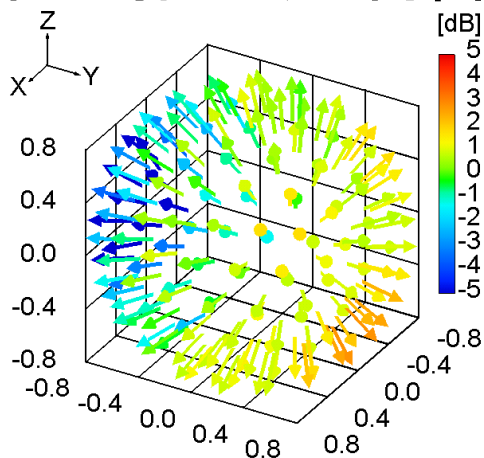
## 双極子制御



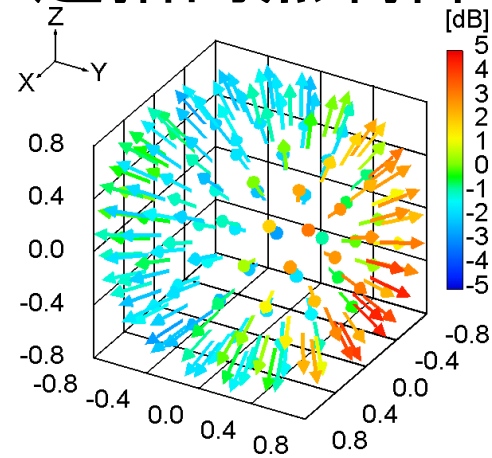
## 無指向点制御



## 単一指向点制御

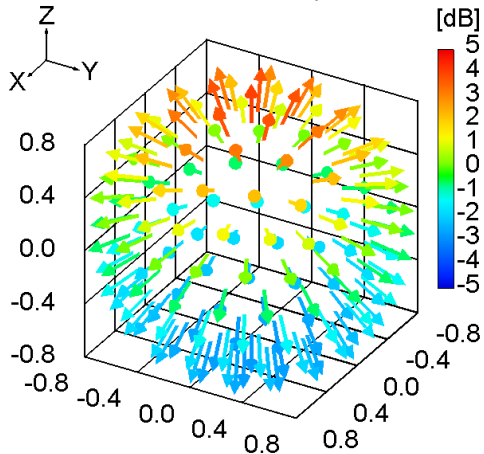


## 超指向点制御

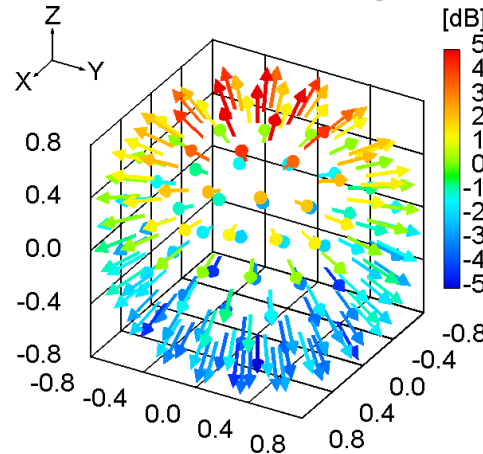


# ベクトル線図 (0, 0, 0.3), 1000Hz

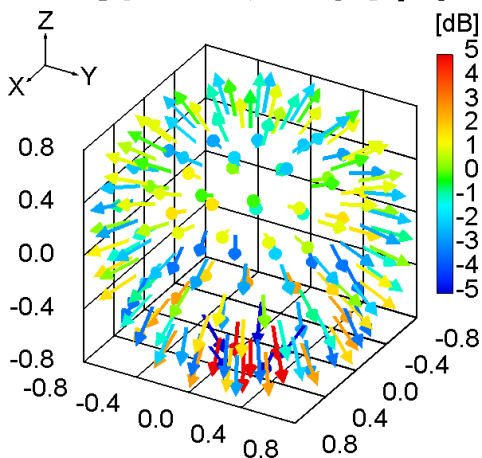
## 原音場



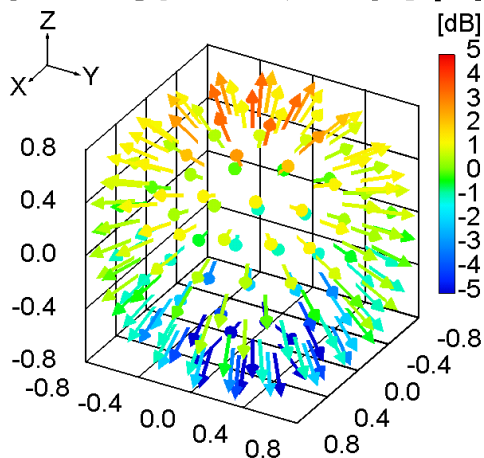
## 双極子制御



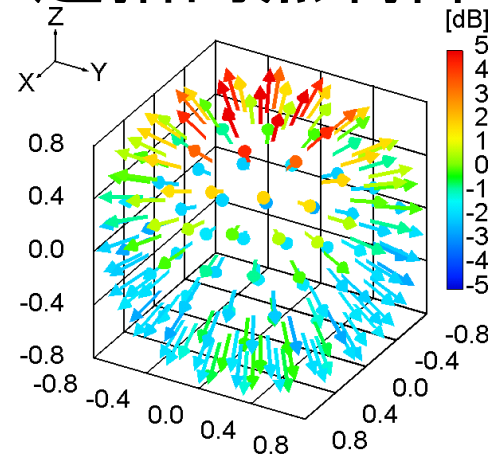
## 無指向点制御



## 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

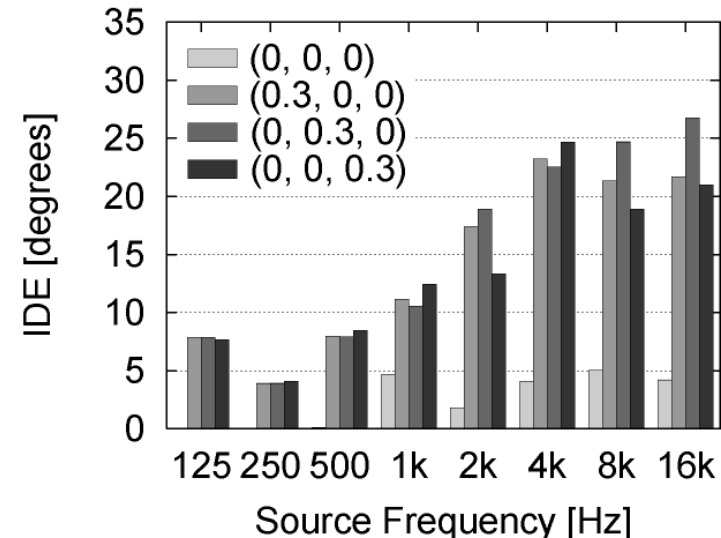
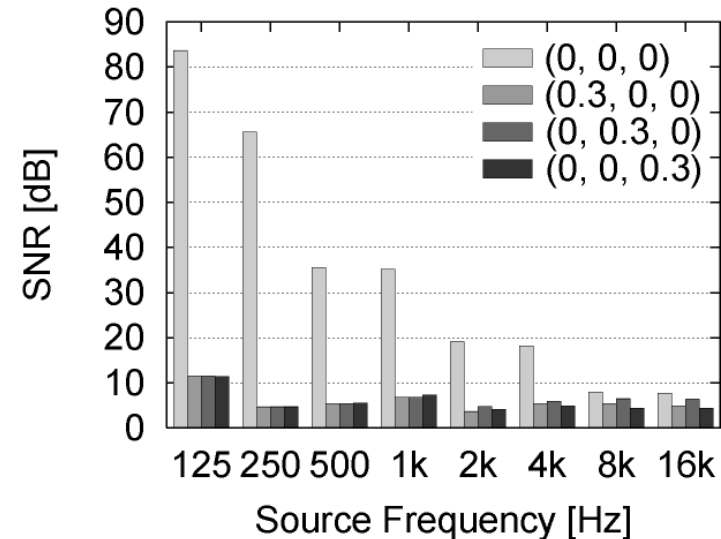
$\mathbf{I}(\mathbf{r}, f) = \{I_x(\mathbf{r}, f), I_y(\mathbf{r}, f), I_z(\mathbf{r}, f)\}^T$ :  
再生音場の音響インテンシティ

$N(=162)$ : 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

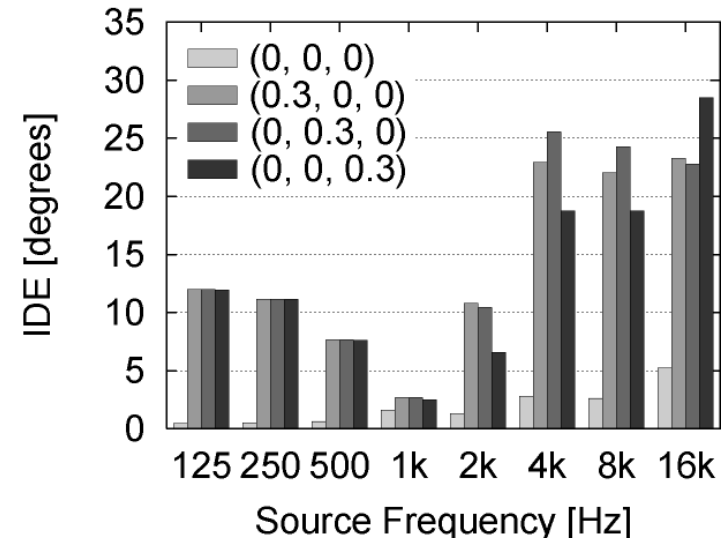
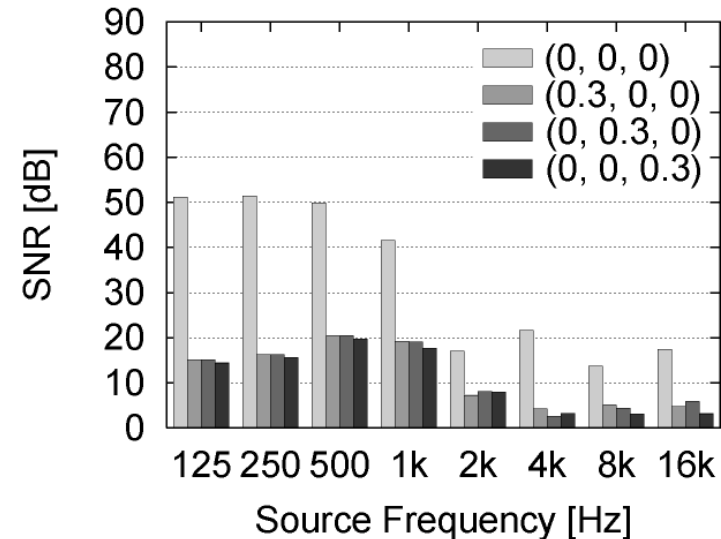
Omnidirectional Point Control



# 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

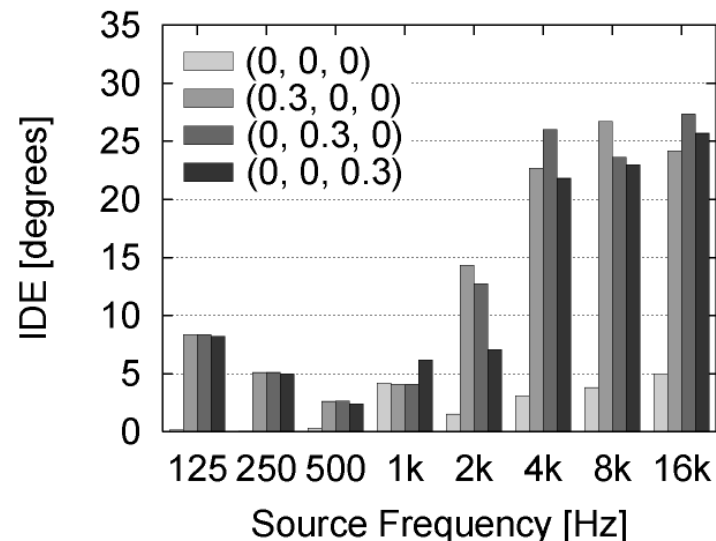
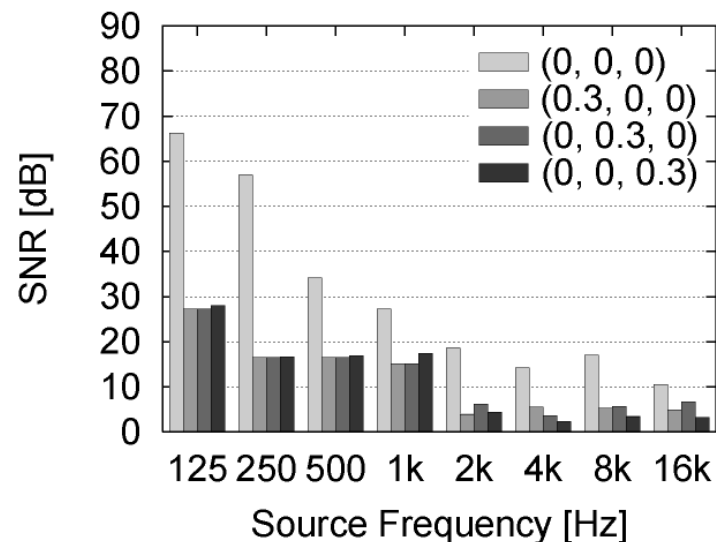
Shotgun Point Control



# 定量評価結果(単一指向点制御)

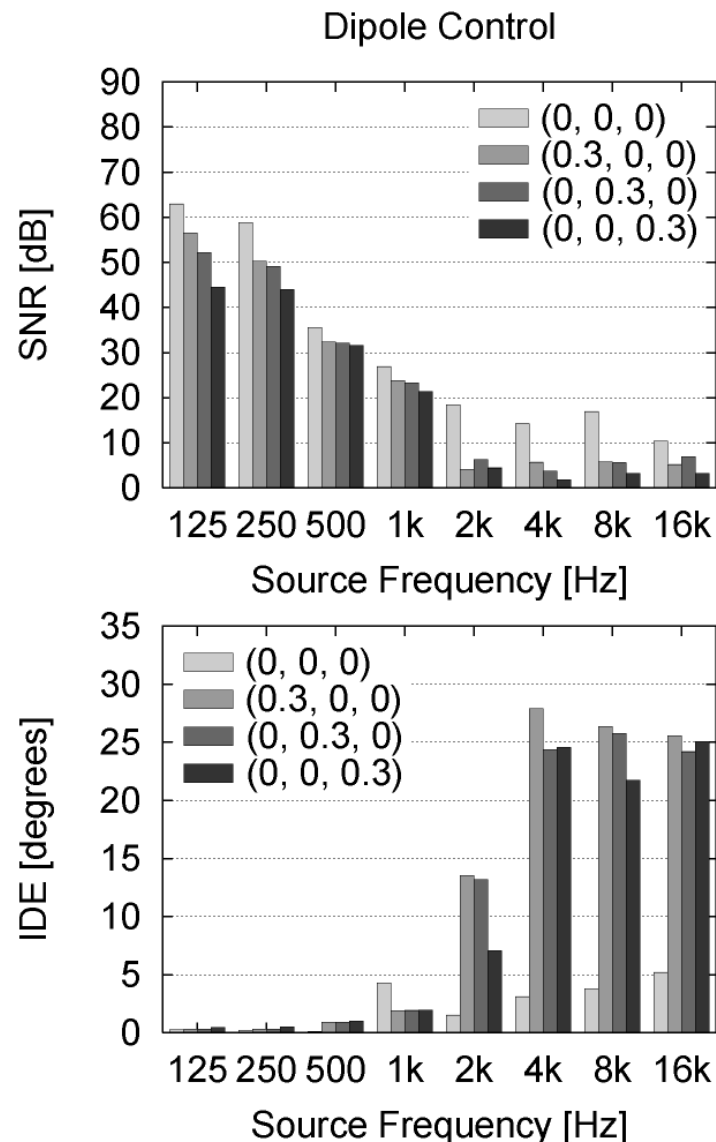
- 平均二乗音圧のSNR
  - 1000Hz以下...15.0dB以上
  - 音圧分布はある程度再現されている
- インテンシティ方向誤差
  - 1000Hz以下...8.4度以下
  - 音像の定位方向はある程度再現されている

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)