

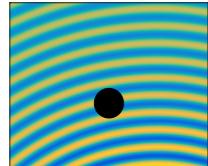
角度スペクトルから円調和展開への解析的音場変換

○岡本拓磨 (情報通信研究機構)

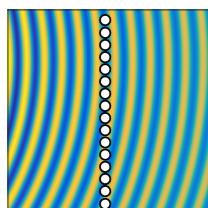
1. 研究背景と目的

■ 解析的音場収録・再現

<収録: マイクロホンアレイ>

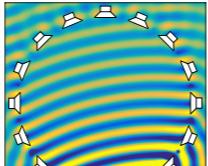


球状・円状

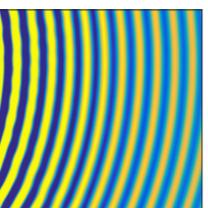


平面・直線

<再現: スピーカアレイ>



球状・円状



平面・直線

球面・円筒調和展開

Higher order Ambisonics (HOA)

本発表

J. Ahrens et al. 2012.

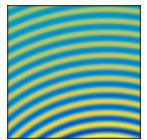
Wave field synthesis (WFS)
Spectral division method (SDM)

角度スペクトル

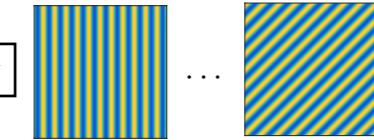
2. 解析的音場変換

■ 角度スペクトルによる音場表現

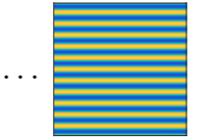
$$P(x, y, \omega) \simeq \frac{1}{2\pi} \int_{-k}^k \tilde{P}(k_x, \omega) e^{-j\sqrt{k^2 - k_x^2}y} e^{-jk_x x} dk_x$$



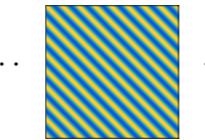
音場



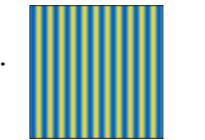
$\tilde{P}(k_x = -k)$
 $\phi_k = \pi$



$\tilde{P}(k_x = -k/2)$
 $\phi_k = 3\pi/4$



$\tilde{P}(k_x = 0)$
 $\phi_k = \pi/2$



$\tilde{P}(k_x = k/2)$
 $\phi_k = \pi/4$

$\tilde{P}(k_x = k)$
 $\phi_k = 0$

音場は平面波と対応する角度スペクトルから構成される(=分解できる)

■ 平面波の円調和展開表現

$$e^{-jkr \cos(\phi - \phi_k)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} (-j)^m J_m(kr) e^{jm(\phi - \phi_k)}$$

■ 角度スペクトルから円調和展開への解析的音場変換

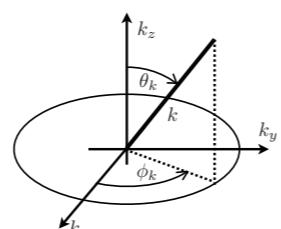
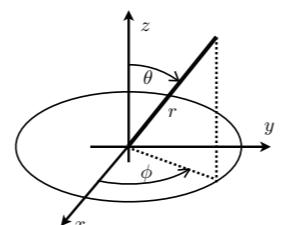
- 円筒座標系への座標変換 ($[x, y] \rightarrow [r, \phi]$, $k_x \rightarrow k \cos(\phi_k)$)

$$P(r, \phi, \omega) = \frac{k}{2\pi} \int_0^\pi \tilde{P}(\phi_k, \omega) e^{-jkr \cos(\phi - \phi_k)} \sin(\phi_k) d\phi_k$$

- 2次元音場の解析的音場変換

$$\hat{P}_{2D,m}(r, \omega) = \frac{k(-j)^m J_m(kr)}{2\pi} \int_0^\pi \tilde{P}(\phi_k, \omega) \sin(\phi_k) e^{-jm\phi_k} d\phi_k$$

空間逆フーリエ変換



3. 2.5次元音場再現

■ 連続直線受音による収録音場 (空間フーリエ変換)

$$\tilde{P}(\phi_k, \omega) = \tilde{P}(k_x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x, 0, \omega) e^{jk_x x} dx = \int_{-\infty}^{\infty} P(x, 0, \omega) e^{jk \cos(\phi_k) x} dx$$

■ 2.5次元HOA (J. Ahrens et al. 2008.)

$$\check{D}_{2.5D,m}(r = 0, r_0, \omega) = \frac{1}{2\pi r_0} \cdot \frac{\check{P}_{|m|}^m(\omega)}{-jkh_{|m|}^{(2)}(kr_0)Y_{|m|}^m(\pi/2, 0)^*}$$

$\tilde{P}(k_x, \omega)$ を掛けて
-kからkまで積分

$$\text{平面波合成: } \check{P}_{|m|}^m(\phi_k, \omega) = 4\pi(-j)^{|m|} Y_{|m|}^m(\pi/2, \phi_k)^*$$

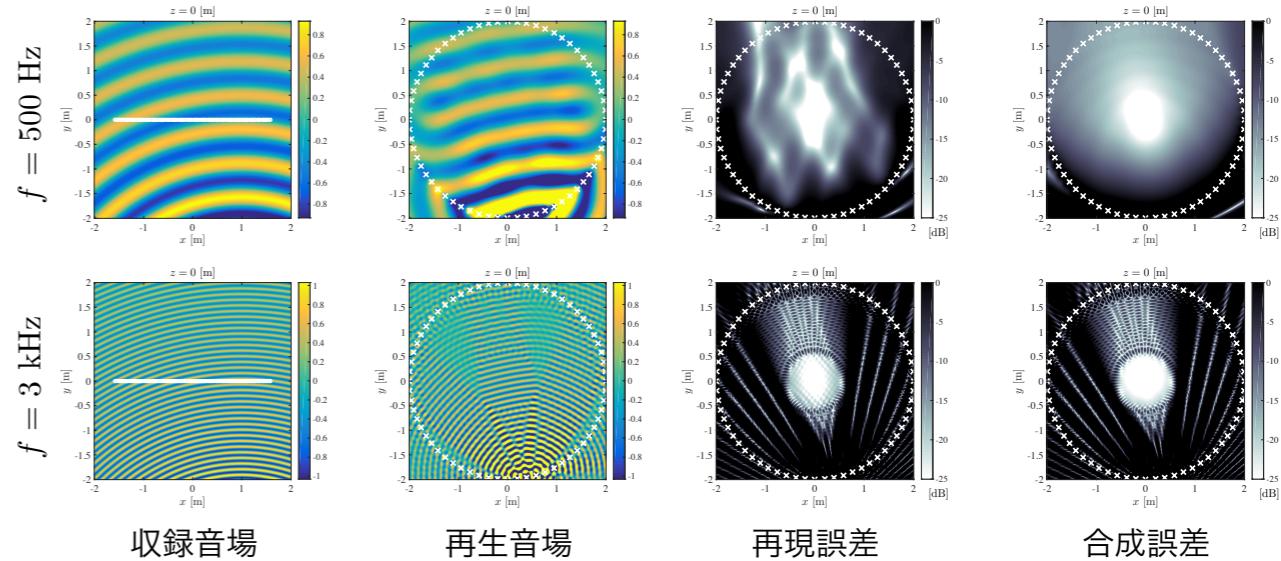
$$\text{球面波合成: } \check{P}_{|m|}^m(r_s, \omega) = -jkh_{|m|}^{(2)}(kr_s)Y_{|m|}^m(\theta_s, \phi_s)^*$$

■ 解析的音場変換の2.5次元駆動関数

$$\check{D}_{2.5D,m}(r_0, \omega) = \frac{(-j)^{|m|-1}}{\pi r_0 h_{|m|}^{(2)}(kr_0)} \int_0^\pi \tilde{P}(\phi_k, \omega) \sin(\phi_k) e^{-jm\phi_k} d\phi_k$$

4. 計算機シミュレーション

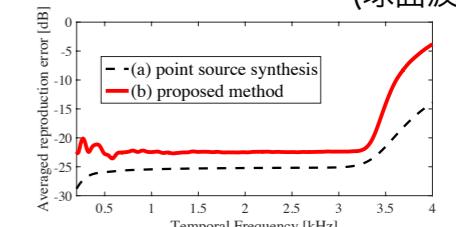
■ 音場収録・再現 ($L_{\text{mic}} = L_{\text{sp}} = 64$ ch, $\Delta x = 0.05$ m, $r_0 = 2.0$ m, $\mathbf{x}_s = [1, -5, 0]^T$)



合成誤差
(球面波合成)

■ 平均再現誤差 ($r \leq 0.5$ m)

$$E(\mathbf{r}, \omega) = 10 \log_{10} \frac{|P_{\text{org}}(\mathbf{r}, \omega) - P_{\text{syn}}(\mathbf{r}, \omega)|^2}{|P_{\text{org}}(\mathbf{r}, \omega)|^2}$$



本研究の一部はJSPS科研費15K21674の助成を受けたものである