

波面合成法による三次元音場再現における マイクロホン及びスピーカの指向特性による影響*

木村敏幸 (東京農工大院・工学府), 笈一彦 (中京大・情報理工)

1 はじめに

波面合成法 [1, 2, 3, 4] は原音場に配置したマイクロホンアレーで音を収録し, 再生音場に配置したスピーカアレーで収録した音をそのまま再生することで, Huygens の原理によって原音場の制御領域内の波面を再生音場の聴取領域内に忠実に再現するものである. この技術に関する理論的な検討は従来から行われてきているが [1, 3, 4], サラウンドシステム [2] のように領域の周りがマイクロホンやスピーカで囲まれた場合の検討は行われていない.

そこで, 本論文ではマイクロホンやスピーカの指向特性による影響を円形領域の場合と正方形領域の場合で検討する.

2 シミュレーション - 円形領域 -

2.1 シミュレーション環境

原音場は自由空間とした. 原音場及び再生音場を Fig. 1 に示す. 制御領域及び聴取領域は半径 $r (= 2 \text{ m})$ の円とし

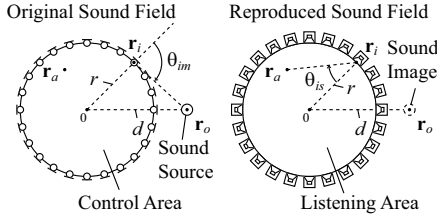


Fig. 1 Sound fields in the case of circular areas

た. 音源は 1 個とし, 円の中心から $d \text{ m}$ 離れた地点に設定した. スピーカを配置する際にはマイクロホンと同じ位置にスピーカを配置した. また, 指向性マイクロホンを制御領域の外側に, 指向性スピーカを聴取領域の内側に向けて配置した.

音源信号 $s(t)$ は周波数 f の正弦波信号 ($= \sin 2\pi f t$) とした. 制御領域内の任意の点の位置ベクトルを \mathbf{r}_a とすると, 原音場における \mathbf{r}_a での音圧 $p_o(\mathbf{r}_a, f, t)$ は以下のように表わされる.

$$p_o(\mathbf{r}_a, f, t) = \frac{1}{d_{ao}} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{d_{ao}}{c} \right) \right\} \quad (1)$$

但し, $d_{ao} (= |\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_o|)$ は音源から任意の点までの距離, \mathbf{r}_o は音源の位置ベクトル, c は音速である. 一方, i 番目のマイクロホンで収録する信号 $x_i(t)$ は以下のように表わされる.

$$x_i(t) = \frac{D_{im}}{d_{io}} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{d_{io}}{c} \right) \right\} \quad (2)$$

但し, $d_{io} (= |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_o|)$ は音源から i 番目のマイクロホンまでの距離, \mathbf{r}_i は i 番目のマイクロホンの位置ベクトル ($i = 1 \dots M$), M はマイクロホンの総数, D_{im} は i 番目のマイクロホンの指向特性を表す. 従って, 再生音場における \mathbf{r}_a での音圧 $p(\mathbf{r}_a, f, t)$ は $x_i(t)$ から以下のように算出される.

$$p(\mathbf{r}_a, f, t) = \sum_{i=1}^M \frac{D_{is} D_{im}}{d_{ai} d_{io}} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{d_{ai} + d_{io}}{c} \right) \right\} \quad (3)$$

但し, $d_{ai} (= |\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_i|)$ は i 番目のスピーカから任意の点までの距離, D_{is} は i 番目のスピーカの指向特性を表す.

パラメータ条件を Table 1 に示す. また, $\mathbf{r}_o, \mathbf{r}_a, \mathbf{r}_i$ は

Table 1 Parameters in the case of circular areas

総数 (M)	630
音源の周波数 (f)	125, 177, 250, 354, 500, 707, 1000, 1414, 2000, 2828, 4000, 5657, 8000 Hz
音源の距離 (d)	3, 10, 100 m
領域の半径 (r)	2 m
音速 (c)	340 m/s
指向特性 (D_{im}, D_{is})	無指向性, 単一指向性, 超指向性

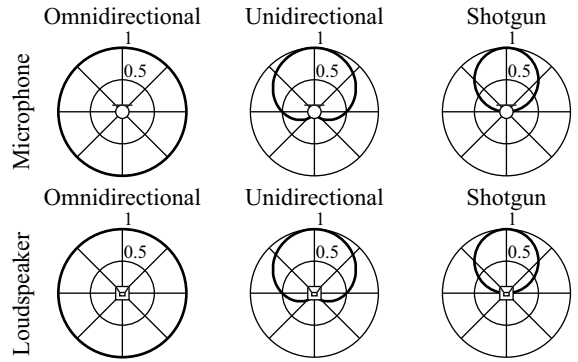


Fig. 2 Directional patterns of microphones and loudspeakers

2次元座標上で以下のように設定した.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_o &= (d \ 0)^T \\ \mathbf{r}_a &= (r_x \ r_y)^T \ (r_x^2 + r_y^2 < r^2) \\ \mathbf{r}_i &= (r \cos \frac{2\pi i}{M} \ r \sin \frac{2\pi i}{M})^T \end{aligned} \quad (4)$$

シミュレーションに用いた 3 種類のマイクロホン及びスピーカの指向特性を Fig. 2 に示す. マイクロホンの指向特性 D_{im} は以下の式によって設定した.

$$\begin{aligned} (\text{無指向性}) \quad D_{im} &= 1 \\ (\text{単一指向性}) \quad D_{im} &= \frac{1}{2}(1 + \cos \theta_{im}) \\ (\text{超指向性}) \quad D_{im} &= \begin{cases} \cos \theta_{im} & (|\theta_{im}| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta_{im}| > 90^\circ) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

但し, $\mathbf{r}_{im} (= \mathbf{r}_i)$ は i 番目のマイクロホンの指向性ベクトル, $\mathbf{r}_{oi} (= \mathbf{r}_o - \mathbf{r}_i)$ は i 番目のマイクロホン位置から音源位置までのベクトル, θ_{im} は \mathbf{r}_{im} と \mathbf{r}_{oi} がなす角度である ($\cos \theta_{im} = \frac{\mathbf{r}_{im} \cdot \mathbf{r}_{oi}}{|\mathbf{r}_{im}| |\mathbf{r}_{oi}|}$). 一方, スピーカの指向特性 D_{is} は以下の式によって設定した.

$$\begin{aligned} (\text{無指向性}) \quad D_{is} &= 1 \\ (\text{単一指向性}) \quad D_{is} &= \frac{1}{2}(1 + \cos \theta_{is}) \\ (\text{超指向性}) \quad D_{is} &= \begin{cases} \cos \theta_{is} & (|\theta_{is}| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta_{is}| > 90^\circ) \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

但し, $\mathbf{r}_{is} (= -\mathbf{r}_i)$ は i 番目のスピーカの指向性ベクトル, $\mathbf{r}_{ai} (= \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_i)$ は i 番目のスピーカ位置から任意の位置までのベクトル, θ_{is} は \mathbf{r}_{is} と \mathbf{r}_{ai} がなす角度である ($\cos \theta_{is} = \frac{\mathbf{r}_{is} \cdot \mathbf{r}_{ai}}{|\mathbf{r}_{is}| |\mathbf{r}_{ai}|}$).

*Effects of Microphone and Loudspeaker Directivity in 3D Sound Field Reproduction Based on Wave Field Synthesis. by KIMURA, Toshiyuki (Tokyo University of Agriculture and Technology), KAKEHI, Kazuhiko (Chukyo University)

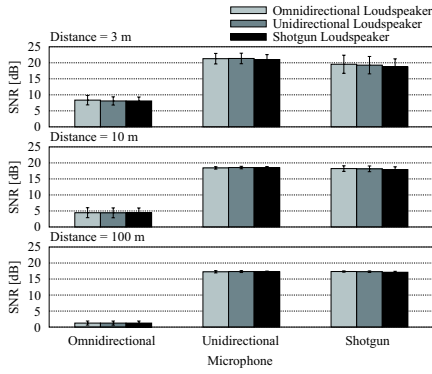


Fig. 3 SNRs in the case of circular areas

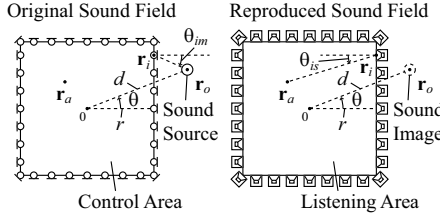


Fig. 4 Sound fields in the case of square areas

2.2 シミュレーション結果

以下の式で示される SNR によって評価を行う。

$$\text{SNR} = \frac{\sum_f \left[10 \log_{10} \frac{\sum_{\mathbf{r}_a} \{p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)\}^2}{\sum_{\mathbf{r}_a} \{p(\mathbf{r}_a, f, 0) - p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)\}^2} \right]}{F} \quad (7)$$

但し、 $F (= 13)$ は実験に用いた周波数値の総数である。マイクロホン及びスピーカの指向特性ごとの SNR の値を Fig. 3 に示す。但し、エラーバーは 95%信頼区間を表わす。無指向性マイクロホンの SNR よりも単一指向性や超指向性マイクロホンの SNR の方が有意に高い。ゆえに、単一指向性マイクロホンや超指向性マイクロホンを用いれば、波面をより忠実に合成できると考えられる。

3 シミュレーション - 正方形領域 -

3.1 シミュレーション環境

原音場は自由空間とした。原音場及び再生音場を Fig. 4 に示す。制御領域及び聴取領域は一辺 $2r (= 4 \text{ m})$ の正方形とした。音源は 1 個とし、正方形の中心から距離 $d \text{ m}$ 、方位角 θ° の地点に設定した。原音場における音圧 $p_o(\mathbf{r}_a, f, t)$ 及び再生音場における音圧 $p(\mathbf{r}_a, f, t)$ は第 2 章と同じように、(1) 式及び (3) 式によって算出した。

パラメータ条件を Table 2 に示す。また、 \mathbf{r}_o 、 \mathbf{r}_a 、 \mathbf{r}_i は 2 次元座標上で以下のように設定した。

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_o &= (d \cos \theta \quad d \sin \theta)^T \\ \mathbf{r}_a &= (r_x \quad r_y)^T \quad (|r_x|, |r_y| < r) \\ \mathbf{r}_i &= \begin{cases} \begin{pmatrix} -r + \frac{r}{100}i & -r \end{pmatrix}^T & (i = 1 \sim 200) \\ \begin{pmatrix} r & -r + \frac{r}{100}(i - 200) \end{pmatrix}^T & (i = 201 \sim 400) \\ \begin{pmatrix} r - \frac{r}{100}(i - 400) & r \end{pmatrix}^T & (i = 401 \sim 600) \\ \begin{pmatrix} -r & r - \frac{r}{100}(i - 600) \end{pmatrix}^T & (i = 601 \sim 800) \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

Table 2 Parameters in the case of square areas

総数 (M)	800
音源の周波数 (f)	125, 177, 250, 354, 500, 707, 1000, 1414, 2000, 2828, 4000, 5657, 8000 Hz
音源の距離 (d)	3, 10, 100 m
音源の方位角 (θ)	0, 45°
領域の一辺 ($2r$)	4 m
音速 (c)	340 m/s
指向特性 (D_{im}, D_{is})	無指向性, 単一指向性, 超指向性

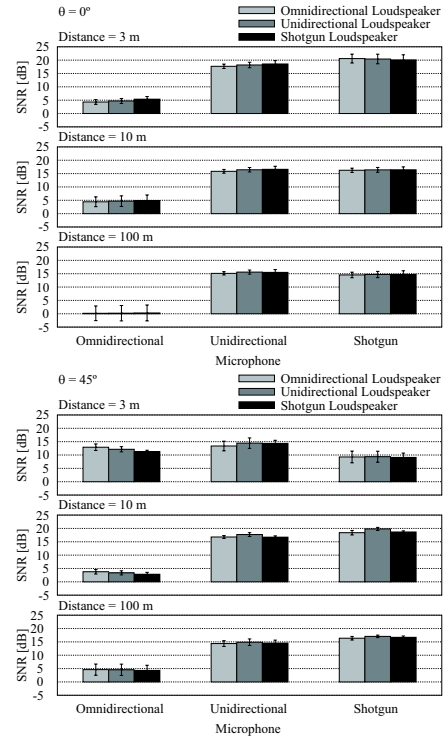


Fig. 5 SNRs in the case of square areas

マイクロホン及びスピーカの指向特性 D_{im} 、 D_{is} は (5) 式及び (6) 式によって設定した。但し、指向性ベクトル \mathbf{r}_{im} 、 \mathbf{r}_{is} は以下の式によって設定した。

$$\mathbf{r}_{im} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \delta(i-200) & -1 \end{pmatrix}^T & (i = 1 \sim 200) \\ \begin{pmatrix} 1 & \delta(i-400) \end{pmatrix}^T & (i = 201 \sim 400) \\ \begin{pmatrix} -\delta(i-600) & 1 \end{pmatrix}^T & (i = 401 \sim 600) \\ \begin{pmatrix} -1 & -\delta(i-800) \end{pmatrix}^T & (i = 601 \sim 800) \end{cases} \quad (9)$$

$$\mathbf{r}_{is} = -\mathbf{r}_{im}$$

3.2 シミュレーション結果

第 2 章と同じように、(7) 式によって示される SNR によって評価を行う。マイクロホン及びスピーカの指向特性ごとの SNR の値を Fig. 5 に示す。但し、エラーバーは 95%信頼区間を表わす。たいていの場合において、無指向性マイクロホンの SNR よりも単一指向性や超指向性マイクロホンの SNR の方が有意に高い。ゆえに、単一指向性マイクロホンや超指向性マイクロホンを用いれば、波面をより忠実に合成できると考えられる。

4 まとめ

本論文ではマイクロホンやスピーカの指向特性が波面の合成精度に及ぼす影響を検討した。円形領域と正方形領域で検討した結果、マイクロホンの指向特性を無指向性よりも単一指向性や超指向性にすれば波面がより忠実に合成されることが分かった。

今後は球や立方体に設定して、3 次元空間上でマイクロホンやスピーカにどのような指向特性を設ければよいかを検討する必要がある。

参考文献

- [1] 伊藤, “音響工学原論,” コロナ社, 1973.
- [2] M. Camras, J. Acoust. Soc. Am., 43, 1425-1431, 1968.
- [3] A. J. Berkhout et al., J. Acoust. Soc. Am., 93, 2764-2778, 1993.
- [4] 及川ら, 日本 VR 学会論文誌, 5(3), 919-926, 2000.