

指向性マイクロホンを用いた波面合成法の理論的検討*

木村敏幸 (名大・情報科学), 箕一彦 (中京大・情報科学),

武田一哉 (名大・情報科学), 板倉文忠 (名城大・理工)

1 はじめに

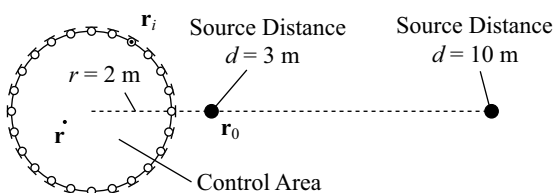
Camras によって提案された波面合成法 [1] は, Huygens の原理に基づいて対象領域内の波面を別の再生領域内に合成する立体音場再生技術である. しかし, この方法で波面を忠実に合成しようとする場合の条件は十分に検討されているとは言えない. 本報告では計算機シミュレーションによって波面がどの程度忠実に合成されるかをいくつかの現実的条件の下で検討する.

2 波面合成実験

2.1 実験環境

実験における原音場及び再生音場を Fig. 1 に示す. 原音

Original Sound Field



Reproduced Sound Field

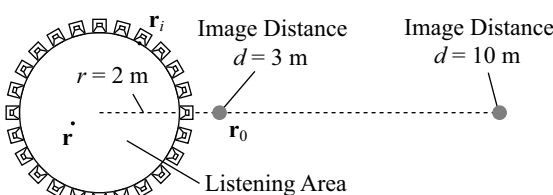


Fig. 1 想定した実験環境

場は自由空間とし, 対象領域は半径 2 m の円内とした. 音源は 1 個とし, 円の中心から 3 m と 10 m の地点の 2 種類を設定した. マイクロホンは半径 2 m の円上に均等に配置した. 一方, 再生音場においてマイクロホンと同じ位置にスピーカを配置した.

音源信号 $s_0(t)$ は周波数 f の正弦波信号 $s_0(t) = \sin 2\pi f t$ とした. 制御領域内の任意の点の位置ベクトルを \mathbf{r} とすると, 原音場における \mathbf{r} での音圧 $p_0(\mathbf{r}, t)$ は以下のように表わされる.

$$p_0(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}{c} \right) \right] \quad (1)$$

但し, \mathbf{r}_0 は音源の位置ベクトル, c は音速である. 一方, 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.

$$x_i(t) = \frac{D_i}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|} \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}{c} \right) \right] \quad (2)$$

但し, \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_i は i 番目のマイクロホンの指向特性を表わす. 従って, 再生音場における \mathbf{r} での音圧

Table 1 実験条件

M (マイクロホン数)	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 16, 20, 24, 27, 32, 36, 45, 54, 64, 72, 90, 108, 128, 160, 180, 216, 256, 300, 360, 432, 512
f	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz
d, r, c	3 or 10 m, 2 m, 340 m/s
D_i	無指向性, 単一指向性, 超指向性

$p(\mathbf{r}, t)$ は $x_i(t)$ から以下のように算出される.

$$p(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=1}^M \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|} x_i \left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|}{c} \right) \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1}^M \frac{D_i}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|} \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| + |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}{c} \right) \right]$$

実験に使用した条件を Table 1 に示す. また, 本実験では $\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}$ は以下のように設定した.

$$\mathbf{r}_0 = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ or } \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} 2 \cos \frac{2\pi i}{M} \\ 2 \sin \frac{2\pi i}{M} \end{pmatrix}, \mathbf{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (x^2 + y^2 < 2^2) \quad (4)$$

実験に用いた D_i は以下の式によって表わされる.

$$D_i = 1 \quad (\text{無指向性}) \quad (5)$$

$$D_i = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_i| |\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|} \right) \quad (\text{単一指向性}) \quad (6)$$

$$D_i = \begin{cases} \frac{\mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_i| |\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|} & (\mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i) \geq 0) \\ 0 & (\mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i) < 0) \end{cases} \quad (\text{超指向性}) \quad (7)$$

2.2 実験結果及び考察

合成された波面の評価は以下に示すような SNR を算出することによって行った.

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{\mathbf{r}} \{p_0(\mathbf{r}, t)\}^2}{\sum_{\mathbf{r}} \{p(\mathbf{r}, t) - p_0(\mathbf{r}, t)\}^2} \quad (8)$$

但し, $\mathbf{r} = (x, y)^T$ は $x^2 + y^2 < 1$ の範囲とした. 音源の周波数 f 及びマイクロホンの数 M ごとに SNR を算出した結果を Figs. 2-3 に示す. これらの図より, 周波数 f が 2 倍になると, SNR が一定になり始めるマイクロホンの数 M も 2 倍になっていることが分かる. 従って, M が以下のような条件を満たせば, 波面が忠実に合成されると考えられる.

$$M \geq 0.064 f \left(= \frac{256}{4000} f \right) \quad (9)$$

また, マイクロホンの間隔を Δ とすると, $\Delta = 2\pi r/M$ であり, 波長を λ とすると, $f = c/\lambda$ であることから, (9) 式から以下の関係式が導かれる.

$$\Delta \leq \frac{2\pi r}{0.064 c} \lambda \approx 0.57 \lambda \quad (10)$$

ゆえに, 波面を忠実に合成するためにはマイクロホン及びスピーカ間の間隔を波長の 1/2 以下にすることが必要であるとえられる.

また, マイクロホンの指向特性による影響を考察するため, $M=512$ における SNR の値を音源の周波数全体で平均化したものを Fig. 4 に示す. 但し, エラーバーは 95% 信

* Theoretical Study of Wave Field Synthesis Using Directional Microphones. by T. Kimura (Nagoya Univ.), K. Kakehi (Chukyo Univ.), K. Takeda (Nagoya Univ.), and F. Itakura (Meijo Univ.)

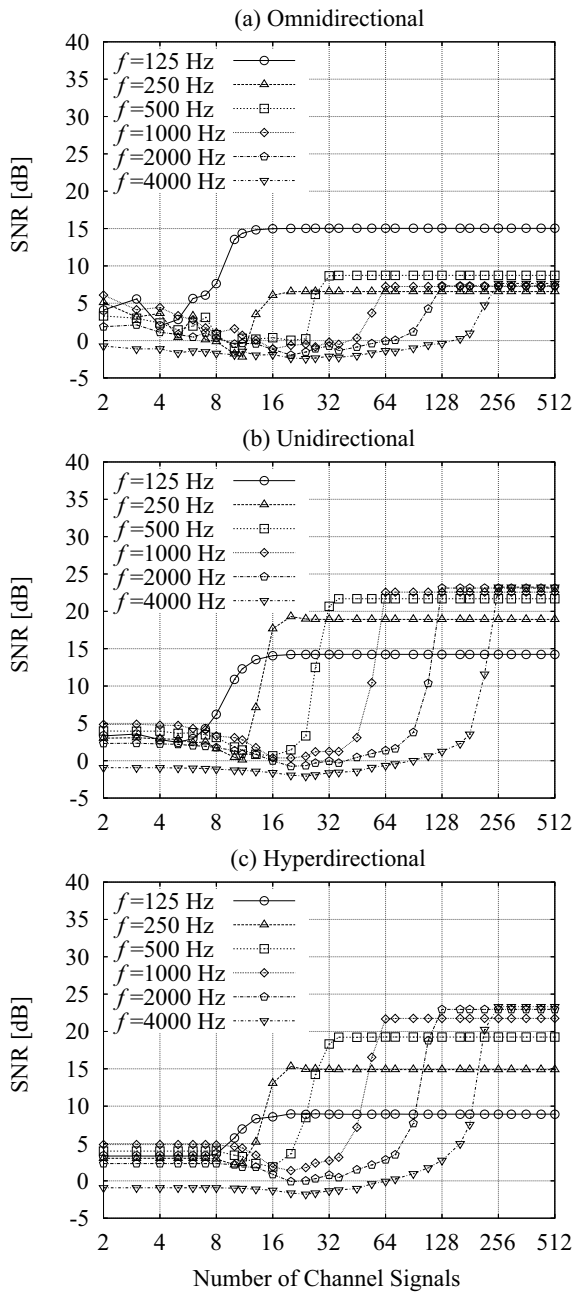


Fig. 2 SNR の結果 (音源距離 3 m)

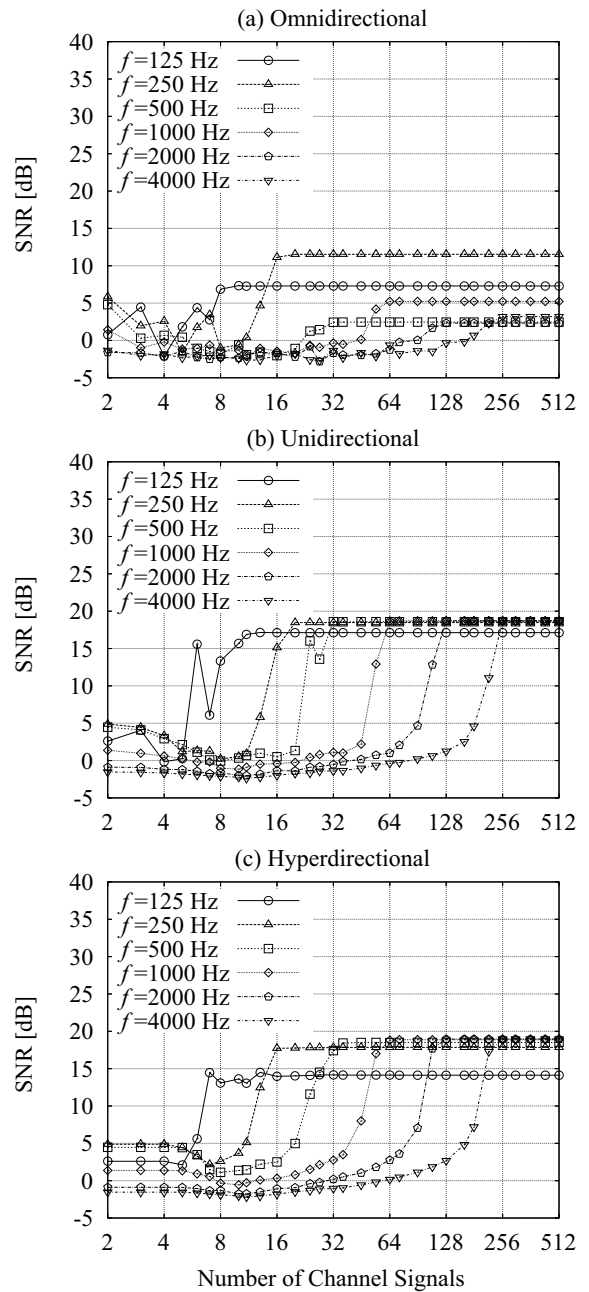


Fig. 3 SNR の結果 (音源距離 10 m)

頼区間を表わす．どちらの音源距離においても無指向性のときの平均 SNR より単一指向性や超指向性のときの平均 SNR の方が有意に高い値を示している．ゆえに、波面を忠実に合成するためには単一指向性マイクロホンもしくは超指向性マイクロホンを用いた方が良い結果が得られる．

3 まとめ

本報告では波面が忠実に合成される現実的な条件を検討するために、計算機上において波面合成実験を行った．その結果、波面を忠実に合成するためにはマイクロホン間及びスピーカ間の間隔を波長の 1/2 以下にすること、無指向性マイクロホンよりも単一指向性マイクロホンもしくは超指向性マイクロホンを用いた方が良いということが分かった．

参考文献

[1] M. Camras, J. Acoust. Soc. Am., 43 (6), 1425-1431 1968.

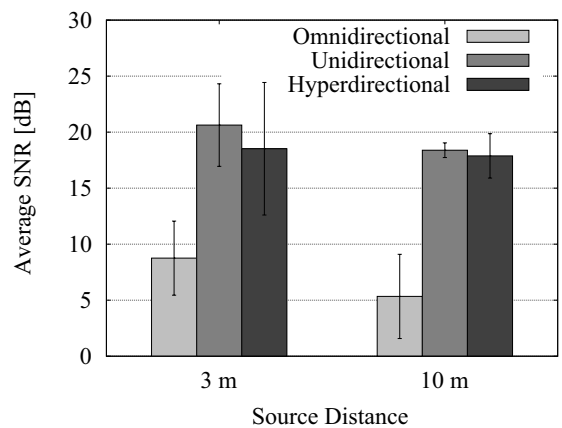


Fig. 4 平均 SNR の結果