

波面合成法による立体音場再生における マイクロホン及びスピーカの指向特性による 波面の合成精度への影響

木村 敏幸^{*1} 笥 一彦^{*2}

Effects of Microphone and Loudspeaker Directivity on Accuracy of Synthesized Wave Fronts
in Sound Field Reproduction with Wave Field Synthesis

Toshiyuki Kimura^{*1} Kazuhiko Kakehi^{*2}

Abstract – Sound field reproduction based on wave field synthesis is a technique that synthesizes wave fronts in a listening area using multiple microphones and loudspeakers placed at the boundary of the area. This study evaluates the effects of the directivity of microphones and loudspeakers on the accuracy of synthesized wave fronts. Microphones in an original field and loudspeakers in a reproduction field were placed at the boundary of both areas which have two cases (a circle with a radius of 2 m and a square 4 m on a side). Three directional patterns (omnidirectional, unidirectional, and shotgun) were designed as directivity conditions of microphones and loudspeakers. The results of computer simulation show that there is almost no effect due to directivity of loudspeakers and that unidirectional or shotgun microphones can reproduce accurate wave fronts.

Keywords : Sound field reproduction, Wave field synthesis, Surround system, Directional microphone, Computer simulation

1 はじめに

近年、聴覚バーチャルリアリティシステムのための立体音場再生技術が盛んに研究されている。この技術が実用化されると、遠隔通信会議システムや遠隔アンサンブルシステムのように、離れた場所にいる人々があたかも同じ会議室内で会議を行ったり、同じコンサートホール内で一緒に演奏しているように思わせることが可能になる。これらのシステムはテレビ電話のような従来のコミュニケーション手段とは比べ物にならないほどの臨場感を与えることができると考えられるため、普及すれば社会全体において遠隔コミュニケーションがより一層活発になっていくことが期待される。

立体音場再生技術はマイクロホンで音を収録し、ヘッドホンもしくはスピーカで音を再生するだけで聴取者に臨場感を感じさせることができる技術である。中でも、波面合成法 [1, 2, 3, 4, 5, 6] 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もので、Huygens の原理によって原音場の制御領域内の

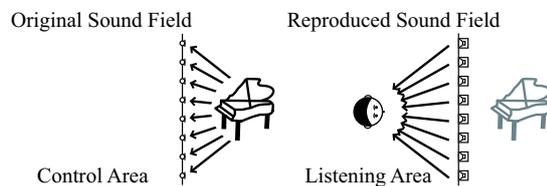


図1 従来の検討における原音場及び再生音場
Fig.1 Original sound field and reproduced sound field in ordinary studies.

波面が再生音場の聴取領域内に忠実に再現される。この技術はバイノーラル [7] やトランスオーラル [8] とは異なり、複数の聴取者が聴取領域内のどこに居ても構わないし、頭部を自由に動かしても自然な音像を得られるというところに特徴がある。

波面合成法に関する理論的な検討は従来から行われてきている。例えば、伊藤 [2] は2個のマイクロホンと2個のスピーカを用いた場合に波面が忠実に合成される条件を検討している。また、Berkhoutら [4] や川ら [5] は多数個のマイクロホンと多数個のスピーカを用いた場合の条件を検討している。しかし、これらの検討は図1に示すように自由音場においてマイクロホンアレー及びスピーカアレーを直線状に配置した場合を対象としている。

一方、5.1ch や7.1ch といったサラウンドシステム [9] がホームシアターなどの用途に実用化されており、

^{*1}東京農工大学 大学院工学府

^{*2}中京大学 情報理工学部

^{*1}Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

^{*2}School of Information Science and Technology, Chukyo University

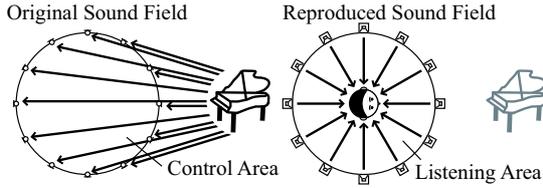


図2 サラウンドシステムにおける原音場及び再生音場
Fig.2 Original sound field and reproduced sound field in surround systems.

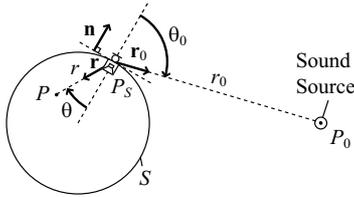


図3 Fresnel-Kirchhoff の回折理論におけるパラメータ条件
Fig.3 Parametric conditions in Fresnel-Kirchhoff diffraction theory.

更なる臨場感を表現するために波面合成法を適用する試みもなされている [10]. このような場合、従来の検討では聴取者の前方にしかスピーカが存在しないのに対して、サラウンドシステムでは聴取者の全ての方向にスピーカが存在することになる。つまり、マイクロホンアレー及びスピーカアレーを図2に示すように領域の周辺に配置し、マイクロホンアレーで収録した音をそのままスピーカアレーで再生することになる。しかし、自由音場という反射音がない状況において、マイクロホンやスピーカに指向特性を設けずに波面合成法による立体音場再生をしようとする場合、音源が前方にしかないにもかかわらず聴取領域では音が全方向から再生されることになる。このため、聴取者は空間的に反射のある音場にいるという違和感を感じるようになってしまうと考えられる。このような聴感上の問題を解決するためには、マイクロホンやスピーカに指向特性を設けて前方から聞こえる音は前方からしか再生されないようにする必要があると考えられる。

マイクロホンやスピーカに指向特性を設けることの根拠は Huygens の原理に数学的な解釈を加えた Fresnel-Kirchhoff の回折理論 [11] から解釈することができる。図3に示すように、点 P_0 に音源、領域の境界上の点 P_S にマイクロホン及びスピーカを配置し、 P_S における音圧が音源から音を再生することにより $\varphi_{P_S} = \frac{Ae^{-jk r_0}}{r_0}$ であったとする。この場合の聴取領域内の点 P における音圧 φ_P は Fresnel-Kirchhoff の回折公式から以下のように示される。

$$\varphi_P = \frac{jkA}{4\pi} \int_S \frac{e^{-jk(r_0+r)}}{r_0 r} (\cos \theta_0 + \cos \theta) dS \quad (1)$$

但し $k (= 2\pi f/c)$ は波数、 f は周波数、 c は音速、 r_0 、 r は点 P_S における P_0 、 P への方向ベクトル、 \mathbf{n} は点 P_S における領域の外側に向けた法線ベクトルである。また、 $\cos \theta_0$ 、 $\cos \theta$ は \mathbf{r}_0 と \mathbf{n} 、 \mathbf{r} と $-\mathbf{n}$ がなす角度 (つまり、マイクロホンの指向特性に対する音源方向及びスピーカの指向特性に対する聴取位置方向) に依存する。ゆえに、マイクロホン及びスピーカに指向特性を設けることによって波面を忠実に合成できると解釈できる。更に、点 P が領域の中央付近に存在する場合には θ は常に0度近くになるので、以下のような近似が成立する。

$$\cos \theta \approx 1 \quad (2)$$

すると、(1) 式は (3) 式のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} \varphi_P &\approx \frac{jk}{2\pi} \int_S \varphi'_{P_S} \cdot \frac{e^{-jkr}}{r} dS \\ \varphi'_{P_S} &= D_m \varphi_{P_S} = \frac{1 + \cos \theta_0}{2} \cdot A \frac{e^{-jk r_0}}{r_0} \end{aligned} \quad (3)$$

但し、 $D_m = \frac{1 + \cos \theta_0}{2}$ はマイクロホンの指向特性を表す。つまり、制御領域上の点 P_S において指向性マイクロホンで音 φ'_{P_S} を収録し、スピーカで再生すれば聴取領域内の中央付近の点 P に音場が再生されると解釈できるようになる。

マイクロホンやスピーカに指向特性を設けた立体音場再生システムの先行研究例としては、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 Camras の例がある [3]。しかし、Camras はマイクロホンやスピーカにどのような指向特性を設けたらよいのかについては明らかにしていない。

そこで、本論文では波面合成法を適用したサラウンドシステムを構築するために、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波面がより忠実に合成されるかを検討する。第2章では、ITU-R で勧告されているサラウンドシステムの標準スピーカ配置 [9] に従うことを想定して、マイクロホンアレー及びスピーカアレーを円形に配置した場合を計算機シミュレーションによって検討する。第3章では、文献 [10] のように部屋の4つの壁面にスピーカアレーを配置することを想定して、マイクロホンアレー及びスピーカアレーを正方形に配置した場合を計算機シミュレーションによって検討する。

2 計算機シミュレーション—領域が円形の場合—

2.1 シミュレーション実験の環境

原音場は反射音のない自由音場とした。計算機シミュレーションにおける原音場及び再生音場を図4に

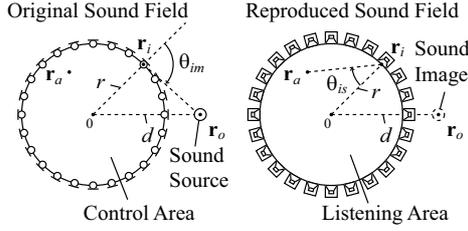


図4 領域が円形の場合の原音場及び再生音場
Fig.4 Original sound field and reproduced sound field in the case of circular areas.

示す。制御領域及び聴取領域はサラウンドシステムにおける標準的なスピーカ配置 [9] に従い、半径 $r (= 2 \text{ m})$ の円とした。音源は 1 個とし、図 4 に示すように円の中心から $d \text{ m}$ 離れた地点に設定した。マイクロホンを配置する際には隣り合うマイクロホン間の距離が一定になるように均等に配置した。一方、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、Camras の検討例 [3] と同じように、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 ($= \sin 2\pi ft$) 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。

$$p_o(\mathbf{r}_a, f, t) = \frac{1}{d_{ao}} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{d_{ao}}{c} \right) \right\} \quad (4)$$

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。

$$x_i(t) = \frac{D_{im}}{d_{io}} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{d_{io}}{c} \right) \right\} \quad (5)$$

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わす。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。

$$\begin{aligned} p(\mathbf{r}_a, f, t) &= \sum_{i=1}^M \frac{D_{is}}{d_{ai}} x_i \left(t - \frac{d_{ai}}{c} \right) \\ &= \sum_{i=1}^M \frac{D_{is} D_{im}}{d_{ai} d_{io}} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{d_{ai} + d_{io}}{c} \right) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

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わす。

表 1 領域が円形の場合のパラメータ条件
Table 1 Parametric conditions 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

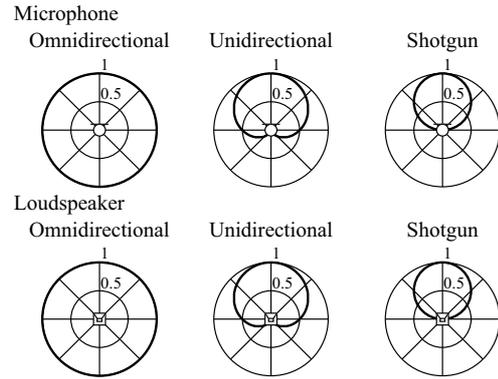


図5 マイクロホン及びスピーカの指向特性
Fig.5 Directional patterns of microphones and loudspeakers.

シミュレーションに使用したパラメータ条件を表 1 に示す。マイクロホン及びスピーカの間隔は約 2 cm であり、周波数が 8000 Hz の場合の波長 ($= \frac{340 \text{ m}}{8000 \text{ Hz}} = 4.25 \text{ cm}$) の $1/2$ 以下である。従って、波面を忠実に合成するための空間サンプリング定理条件は満たしている。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。

$$\mathbf{r}_o = (d \ 0)^T \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_a = (r_x \ r_y)^T \quad (r_x^2 + r_y^2 < r^2) \quad (8)$$

$$\mathbf{r}_i = (r \cos \frac{2\pi i}{M} \ r \sin \frac{2\pi i}{M})^T \quad (9)$$

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図 5 に示す。マイクロホンの指向特性は市場に流通しているマイクロホンの持つ指向特性である (例えば、ピンマイクロホンは無指向性、ダイナミックマイクロホンは単一指向性、ショットガンマイクロホンは超指向性)。一方、スピーカの指向特性は市場に流通しているスピーカが持つ指向特性である (例えば、低周波数域では無指向性、高周波数域では超指向性)。マイクロホンの指向特性 D_{im} は以下

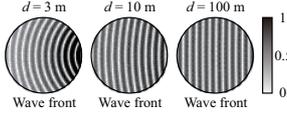


図6 領域が円形の場合の原音場の波面
($f = 500$ Hz)
Fig.6 Wave fronts of original sound field in the case of circular areas ($f = 500$ Hz).

の式によって設定した.

$$\begin{aligned}
 & \text{(無指向性)} \quad D_{im} = 1 \\
 & \text{(単一指向性)} \quad D_{im} = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta_{im}) \\
 & \text{(超指向性)} \quad D_{im} = \begin{cases} \cos \theta_{im} & (|\theta_{im}| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta_{im}| > 90^\circ) \end{cases} \quad (10)
 \end{aligned}$$

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.

$$\begin{aligned}
 & \text{(無指向性)} \quad D_{is} = 1 \\
 & \text{(単一指向性)} \quad D_{is} = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta_{is}) \\
 & \text{(超指向性)} \quad D_{is} = \begin{cases} \cos \theta_{is} & (|\theta_{is}| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta_{is}| > 90^\circ) \end{cases} \quad (11)
 \end{aligned}$$

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 ($\cos \theta_{is} = \frac{\mathbf{r}_{is} \cdot \mathbf{r}_{ai}}{|\mathbf{r}_{is}| |\mathbf{r}_{ai}|}$).

2.2 実験結果及び考察

一例として, $f = 500$ Hz における原音場の波面を図6に, 合成した波面とその差分を図7~9に示す. これらの図において, 音圧 p_o, p 及びその差分 $p - p_o$ の値は絶対値 ($|p_o|, |p|, |p - p_o|$) とし, 配色バーを図の右側に示した. ゆえに, 差分表示 $|p - p_o|$ が白いほど, 波面が忠実に合成されていることを表している.

無指向性マイクロホンを用いた場合には, 差分表示が白くないので, 波面は忠実に合成されていないと言える. これは制御領域の周りに配置した全てのマイクロホンが音を収録してしまうために, 音源が前方 (図の場合は右方向) にしかないにもかかわらず, 聴取領域において全ての方向から音が再生されてしまうためであると考えられる. それに対して, 単一指向性や超指向性のマイクロホンを用いた場合には, 無指向性マイクロホンを用いた場合に比べて差分表示 (特に円の中心付近) が白くなっており, 波面がより忠実に合成されていると言える. これはマイクロホンに指向特性を設けることによって, 音源の存在しない方向に向い

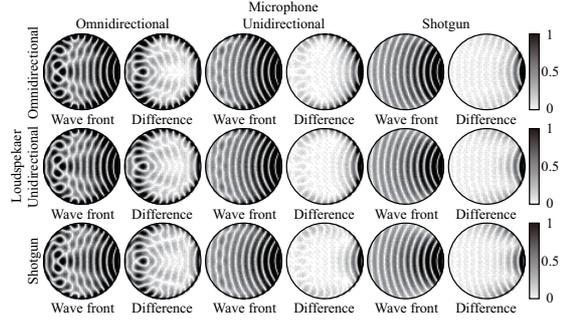


図7 領域が円形の場合の合成波面と差分
($f = 500$ Hz, $d = 3$ m)
Fig.7 Synthesized wave fronts and differences in the case of circular areas ($f = 500$ Hz, $d = 3$ m).

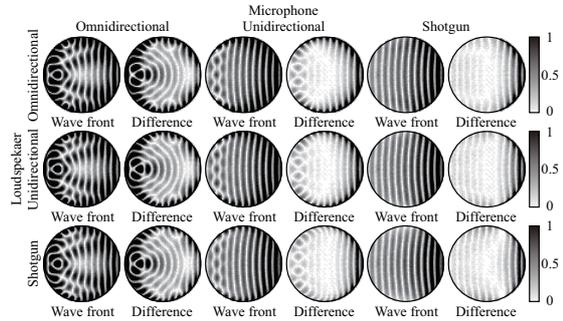


図8 領域が円形の場合の合成波面と差分
($f = 500$ Hz, $d = 10$ m)
Fig.8 Synthesized wave fronts and differences in the case of circular areas ($f = 500$ Hz, $d = 10$ m).

たマイクロホンでは音が収録されなくなったためであると考えられる.

一方, スピーカの指向特性についてはどの指向特性を用いても波面の合成結果に違いは見られない. これは (11) 式から \mathbf{r}_a が円の中心付近にある場合はスピーカの指向特性 D_{is} の値がほとんど変化しないためであると考えられる. 従って, 領域をマイクロホンアレーやスピーカアレーで囲むシステムを構築する場合, マイクロホンの指向特性の方が波面の合成精度により大きく寄与していると言える.

より定量的な評価を行うために, 以下の式で示される SNR を算出する.

$$\text{SNR} = \frac{\sum_f \left[10 \log_{10} \frac{\sum_{\mathbf{r}_a} \{p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)\}^2}{\sum_{\mathbf{r}_a} \{p(\mathbf{r}_a, f, 0) - p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)\}^2} \right]}{F} \quad (12)$$

但し, $F (= 13)$ は実験に用いた周波数値の総数である. また, \mathbf{r}_a の範囲は半径 1 m の円内 ($r_x^2 + r_y^2 < 1$) とし, $r_x^2 + r_y^2 < 1$ の範囲で $p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)$ 及び $p(\mathbf{r}_a, f, 0)$ の値を正規化してから SNR の算出を行った. マイクロホン及びスピーカの指向特性ごとの SNR の値を図10に示す. 但し, エラーバーは SNR の値の分布が正

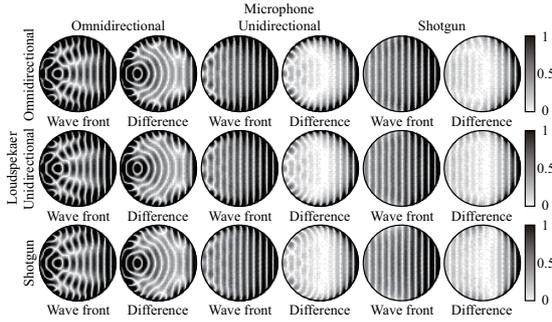


図9 領域が円形の場合の合成波面と差分
($f = 500 \text{ Hz}$, $d = 100 \text{ m}$)
Fig.9 Synthesized wave fronts and differences in the case of circular areas
($f = 500 \text{ Hz}$, $d = 100 \text{ m}$).

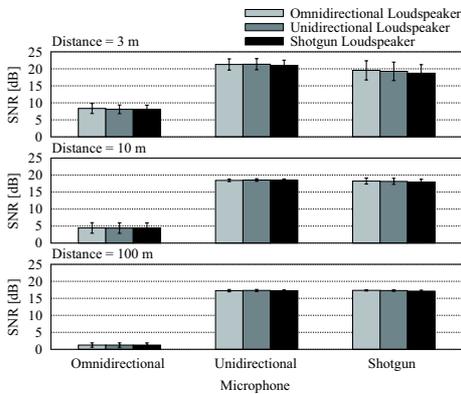


図10 領域が円形の場合のSNR
Fig.10 SNRs in the case of circular areas.

規分布であることに従って算出した95%信頼区間を表わす。全ての音源距離において、無指向性マイクロホンを用いた場合のSNRよりも単一指向性や超指向性マイクロホンを用いた場合のSNRの方が有意に高い値を示している。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することができると考えられる。また、単一指向性や超指向性マイクロホンを用いれば常に15dB以上のSNRを得ることができると言える。波面の合成精度に関する他の研究例[12, 13]ではSNRの値が30dB程度であるのに比べると、この値は決して高い値ではない。しかし、本論文で検討している手法が境界上の音圧のみを制御する手法であるのに対して、他の研究例は境界上の音圧と音圧傾度を制御する手法であるため、必要とするマイクロホン及びスピーカの数は本論文で検討している手法の2倍である。ゆえに、システムの実装の観点から考慮すると、波面の合成精度は多少劣化するが、より少ないマイクロホンやスピーカの数でシステムを実現できる本手法は実用上有効であると考えられる。

また、95%信頼区間は周波数によるSNRのばらつ

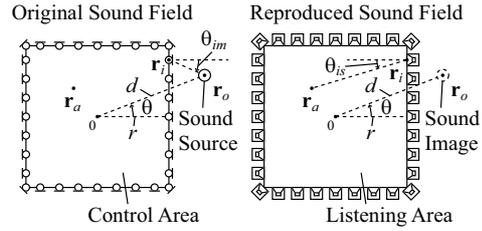


図11 領域が正方形の場合の原音場及び再生音場
Fig.11 Original sound field and reproduced sound field in the case of square areas.

表2 領域が正方形の場合のパラメータ条件
Table 2 Parametric conditions 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

き具合をあらわす。本実験の場合、指向性マイクロホンの平均SNRが15dBであるのに対して信頼区間の幅は6dB以下であるので、周波数による波面の合成精度への影響は見られないと考えられる。

3 計算機シミュレーション—領域が正方形の場合—

3.1 シミュレーション実験の環境

原音場は反射音のない自由音場とした。計算機シミュレーションにおける原音場及び再生音場を図11に示す。制御領域及び聴取領域は実際に部屋の壁面にスピーカアレーを取り付けることを想定して、一辺 $2r (= 4 \text{ m})$ の正方形とした。音源は1個とし、図11に示すように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。マイクロホンの配置は隣り合うマイクロホン間の距離が一定になるようにし、スピーカの位置はマイクロホンの位置と同じにした。また、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章におけるシミュレーションと同じように、(4)式及び(6)式によって算出した。

シミュレーションに使用したパラメータ条件を表2に示す。マイクロホン及びスピーカの間隔は2cmであるので、第2章と同じように、波面を忠実に合成するための空間サンプリング定理条件は満たしている。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

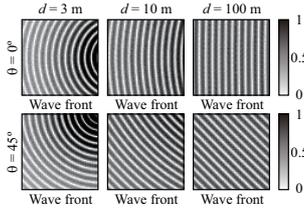


図 12 領域が正方形の場合の原音場の波面
($f = 500$ Hz)

Fig. 12 Wave fronts of original sound field in the case of square areas ($f=500$ Hz).

した.

$$\mathbf{r}_o = \begin{pmatrix} d\cos\theta & d\sin\theta \end{pmatrix}^T \quad (13)$$

$$\mathbf{r}_a = \begin{pmatrix} r_x & r_y \end{pmatrix}^T \quad (|r_x|, |r_y| < r) \quad (14)$$

$$\mathbf{r}_i = \begin{cases} \begin{pmatrix} -r + \frac{r}{100}i & -r \end{pmatrix}^T & (i = 1 \sim 200) \\ \begin{pmatrix} r & -r + \frac{r}{100}(i-200) \end{pmatrix}^T & (i = 201 \sim 400) \\ \begin{pmatrix} r - \frac{r}{100}(i-400) & r \end{pmatrix}^T & (i = 401 \sim 600) \\ \begin{pmatrix} -r & r - \frac{r}{100}(i-600) \end{pmatrix}^T & (i = 601 \sim 800) \end{cases} \quad (15)$$

マイクロホン及びスピーカの指向特性 D_{im} , D_{is} は第 2 章におけるシミュレーションと同じように, (10) 式及び (11) 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.

$$\mathbf{r}_{im} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \delta(i-200) & -1 \end{pmatrix}^T & (i = 1 \sim 200) \\ \begin{pmatrix} 1 & \delta(i-400) \end{pmatrix}^T & (i = 201 \sim 400) \\ \begin{pmatrix} -\delta(i-600) & 1 \end{pmatrix}^T & (i = 401 \sim 600) \\ \begin{pmatrix} -1 & -\delta(i-800) \end{pmatrix}^T & (i = 601 \sim 800) \end{cases} \quad (16)$$

$$\mathbf{r}_{is} = -\mathbf{r}_{im} \quad (17)$$

3.2 実験結果及び考察

一例として, $f = 500$ Hz における原音場の波面を図 12 に, 合成した波面とその差分を図 13~18 に示す. 第 2 章におけるシミュレーションと同じように, 音圧 p_o, p 及びその差分 $p - p_o$ の値は絶対値 ($|p_o|, |p|, |p - p_o|$) とし, 配色バーを図の右側に示した. ゆえに, 差分表示 $|p - p_o|$ が白いほど, 波面が忠実に合成されていることを表している.

単一指向性や超指向性のマイクロホンを用いた場合には, 無指向性マイクロホンを用いた場合に比べて差分表示 (特に正方形の中心付近) が白くなっており, 波面がより忠実に合成されていると見ることができる. これは第 2 章でも考察したように, マイクロホンに指向特性を設けることによって, 音源の存在しない方向に向いたマイクロホンでは音を収録しないようにし,

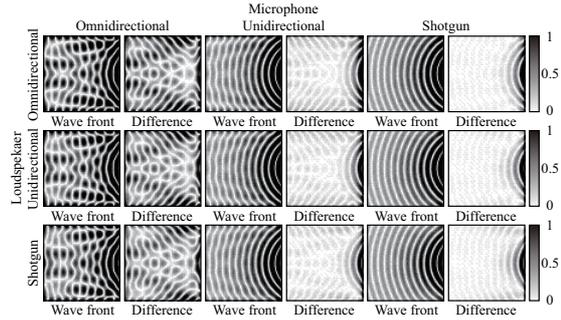


図 13 領域が正方形の場合の合成波面と差分
($f = 500$ Hz, $d = 3$ m, $\theta = 0^\circ$)

Fig. 13 Synthesized wave fronts and differences in the case of square areas ($f = 500$ Hz, $d = 3$ m, $\theta = 0^\circ$).

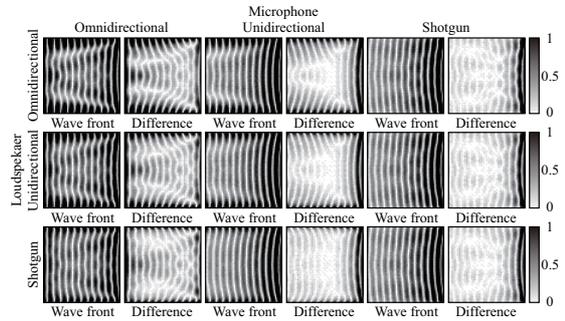


図 14 領域が正方形の場合の合成波面と差分
($f = 500$ Hz, $d = 10$ m, $\theta = 0^\circ$)

Fig. 14 Synthesized wave fronts and differences in the case of square areas ($f = 500$ Hz, $d = 10$ m, $\theta = 0^\circ$).

音源の方向 (図の場合は右方向及び右上方向) からしか音が再生されないようにしたためであると考えられる.

また, 定量的な評価を行うために, 第 2 章におけるシミュレーションと同じように, (12) 式によって SNR を算出した. 但し, \mathbf{r}_a の範囲は一辺 2 m の正方形内 ($|r_x|, |r_y| < 1$) とし, $|r_x|, |r_y| < 1$ の範囲で $p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)$ 及び $p(\mathbf{r}_a, f, 0)$ の値を正規化してから SNR の算出を行った. マイクロホン及びスピーカの指向特性ごとの SNR の値を図 19~20 に示す. 但し, エラーバーは SNR の値の分布が正規分布であることに従って算出した 95%信頼区間を表わす. $d = 3$ m, $\theta = 45^\circ$ の場合を除いて, 無指向性マイクロホンを用いた場合の SNR よりも単一指向性や超指向性マイクロホンを用いた場合の SNR の方が有意に高い値を示している. ゆえに, 領域が正方形の場合でも, 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, たいいていの場合において波面をより忠実に合成することができると考えられる. また, 単一指向性や超指向性マイクロホンを用いればたいいていの場合での SNR は 15dB 以上である. 第 2 章でも述べたように, 波面の合成精度に関する他の研究例 [12, 13] と比較すると, この値は決して

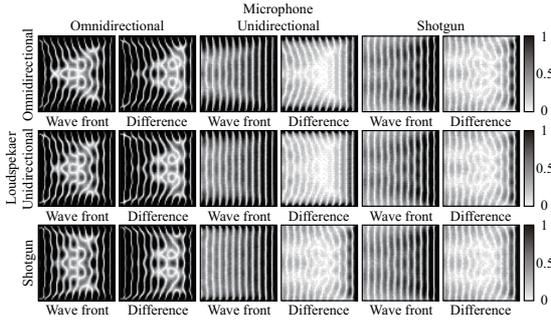


図 15 領域が正方形の場合の合成波面と差分 ($f = 500 \text{ Hz}$, $d = 100 \text{ m}$, $\theta = 0^\circ$)

Fig. 15 Synthesized wave fronts and differences in the case of square areas ($f = 500 \text{ Hz}$, $d = 100 \text{ m}$, $\theta = 0^\circ$).

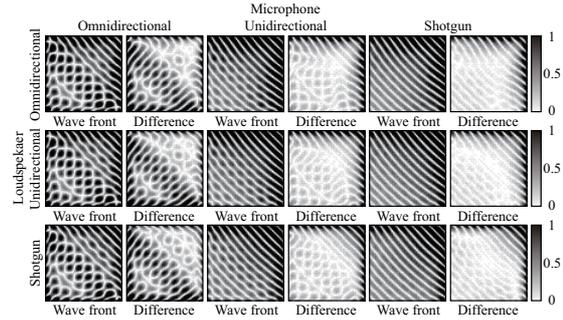


図 17 領域が正方形の場合の合成波面と差分 ($f = 500 \text{ Hz}$, $d = 10 \text{ m}$, $\theta = 45^\circ$)

Fig. 17 Synthesized wave fronts and differences in the case of square areas ($f = 500 \text{ Hz}$, $d = 10 \text{ m}$, $\theta = 45^\circ$).

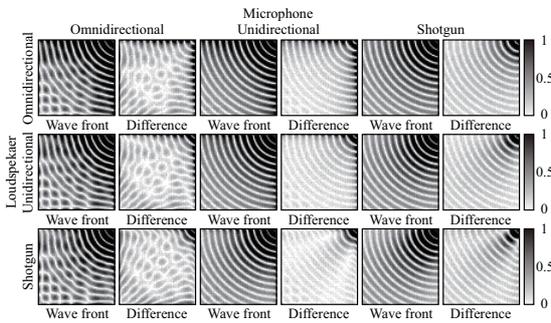


図 16 領域が正方形の場合の合成波面と差分 ($f = 500 \text{ Hz}$, $d = 3 \text{ m}$, $\theta = 45^\circ$)

Fig. 16 Synthesized wave fronts and differences in the case of square areas ($f = 500 \text{ Hz}$, $d = 3 \text{ m}$, $\theta = 45^\circ$).

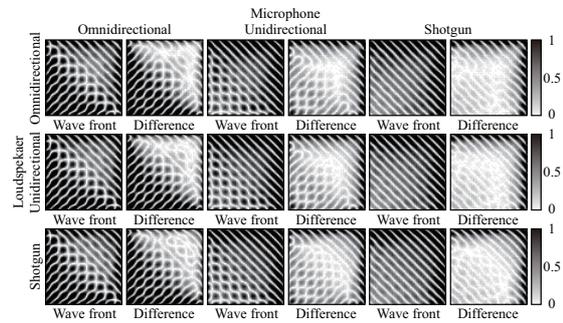


図 18 領域が正方形の場合の合成波面と差分 ($f = 500 \text{ Hz}$, $d = 100 \text{ m}$, $\theta = 45^\circ$)

Fig. 18 Synthesized wave fronts and differences in the case of square areas ($f = 500 \text{ Hz}$, $d = 100 \text{ m}$, $\theta = 45^\circ$).

高くはないが、他の研究例よりも必要とするマイクロホン及びスピーカの数が半分で済むという点で考慮すると、波面の合成精度は多少劣化しても本手法はシステムの実装上有効であると考えられる。

また、第 2 章と同じように、95%信頼区間によって波面の周波数による合成精度への影響を見てみると、指向性マイクロホンの平均 SNR が 15dB であるのに対して信頼区間の幅は 6dB 以下であるので、影響は見られないと考えられる。

4 まとめ

本論文では波面合成法を適用したサラウンドシステムを構築するにあたって、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するために、計算機シミュレーションを行った。領域が円形の場合と正方形の場合で検討した結果、どちらの場合においても、スピーカの指向特性は波面の合成精度にはほとんど影響がなく、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。また、単一指向性や超指向性マイクロホンをを用いた場合には、多くの

場合において SNR を 15dB 以上にすることができることも示された。

本論文ではサラウンドシステムに波面合成法を組み込むことを目的としたために、2次元平面上に円や正方形といった制御領域及び聴取領域を設定して計算機シミュレーションを行った。一方、波面合成法は制御領域及び聴取領域を3次元空間上に設定することも可能なので、今後は制御領域及び聴取領域を球や立方体などに設定して、3次元空間上において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波面がより忠実に合成されるかを検討する必要がある。

また、実際にサラウンドシステムを構築する場合はスピーカアレーを本論文で検討したような自由音場ではなく、部屋の反射や残響が伴った空間に配置することが多い。ゆえに、波面合成法を適用したサラウンドシステムを実用化するためには、スピーカアレーを部屋のような残響空間に配置した場合の波面の合成精度を今後検討する必要があると考えられる。

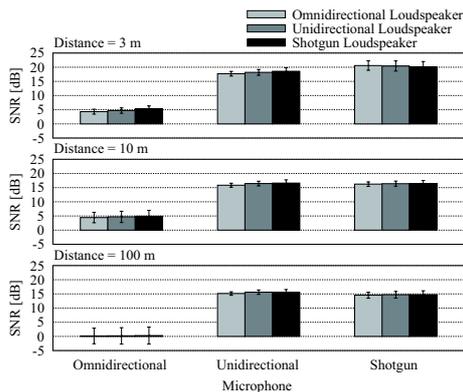


図 19 領域が正方形の場合の SNR ($\theta = 0^\circ$)
Fig. 19 SNRs in the case of square areas ($\theta = 0^\circ$).

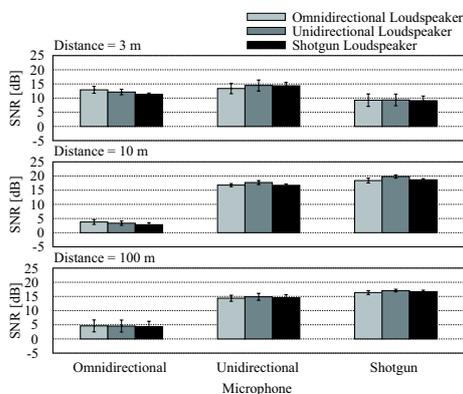


図 20 領域が正方形の場合の SNR ($\theta = 45^\circ$)
Fig. 20 SNRs in the case of square areas ($\theta = 45^\circ$).

謝辞

本研究の遂行にあたりご支援下さった名古屋大学大学院情報科学研究科武田一哉教授, 名城大学理工学部板倉文忠教授, 東京農工大学大学院工学府中川正樹教授諸先生方に感謝の意を申し上げる。

参考文献

- [1] H. Fletcher: "Symposium on wire transmission of symphonic music and its reproduction on auditory perspective: Basic requirement", Bell System Technical Journal, **13**, 2, pp. 239-244 (1934).
- [2] 伊藤毅: "音響工学原論", pp. 587-589, コロナ社, 東京 (1973).
- [3] M. Camras: "Approach to recreating a sound field", J. Acoust. Soc. Am., **43**, 6, pp. 1425-1431 (1968).
- [4] A. J. Berkhout, D. de Vries and P. Vogel: "Acoustic control by wave field synthesis", J. Acoust. Soc. Am., **93**, 5, pp. 2764-2778 (1993).
- [5] 及川靖広, 馬場貞如, 山崎芳男: "人間の聴覚を考慮した波面合成法による音場制御と音場再現", 日本 VR 学会論文誌, **5**, 3, pp. 919-926 (2000).
- [6] 平井徹, 本地由和, 池田雅弘, 清水寧, 川上福司, 東山三樹夫: "遠隔地音楽レッスン用 AVW システムとそ

の原理", 応用音響研究会技術報告 EA2000-17, 電子情報通信学会 (2000).

- [7] 岡部馨: "ダミーヘッドを用いた音場再生", 日本音響学会誌, **46**, 8, pp. 650-656 (1990).
- [8] 安藤四一, 設楽貞樹, 前川純一, 城戸健一: "電子計算機による室内音響設計法に関する二, 三の基礎的考察", 日本音響学会誌, **29**, 3, pp. 151-159 (1973).
- [9] ITU-R Recommendation BS.775-1: "Multichannel Stereophonic Sound System with and without Accompanying Picture" (1992-1994).
- [10] <http://www.iosono-sound.com/>.
- [11] 會田軍太夫: "光学・光通信のための波動光学入門", pp. 81-86, 東京電機大学出版局, 東京 (1980).
- [12] S. Ise: "A principle of sound field control based on the Kirchhoff-Helmholtz integral equation and the theory of inverse systems", ACUSTICA - Acta Acustica, **85**, 1, pp. 78-87 (1999).
- [13] S. Takane, Y. Suzuki, T. Miyajima and T. Sone: "A new theory for high definition virtual acoustic display named ADVISE", Acoustical Science & Technology, **24**, 5, pp. 276-283 (2003).

(2006年10月11日受付)

[著者紹介]

木村 敏幸 (正会員)



1998年名大・工・物化卒。2000年同大学院・人間情報・修士課程了。2005年同大学院・人間情報・博士課程了。日本学術振興会特別研究員 (PD), 名大研究員を経て, 2005年より東京農工大・工・特任助手。博士 (学術)。立体音場再生, 空間知覚に関する研究に従事。電子情報通信学会, 日本音響学会各会員。

寛 一彦



1965年早大・理工・電気卒。1967年同大学院修士課程了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 入社。通話品質, 聴知覚の基礎研究に従事。1994年名大・人間情報・教授。2003年名大・情報科学・教授。2004年中京大・情報科学・教授。2006年中京大・情報理工・教授。工博。現在, 音声知覚・理解・コミュニケーションの研究を行う。マルチモーダルな音環境認知, 視聴覚情報の分離・統合の処理過程にも興味。1981年度日本 ITU 賞, 1984年度電子情報通信学会論文賞, 1985年度科学技術庁長官賞受賞。日本音響学会, 電子情報通信学会, 日本認知科学会, 日本音聲学会, 日本高次脳機能障害学会, 日本語学会等会員。