

# 指向性マイクロホンと境界音場制御を用いた 三次元音場再生システムの理論的検討及び数値解析

木村 敏幸<sup>\*1</sup>

Theoretical Study and Numerical Analysis of 3D Sound Field Reproduction System  
Using Directional Microphones and Boundary Surface Control

Toshiyuki Kimura<sup>\*1</sup>

**Abstract** – Three-dimensional sound field reproduction using directional microphones and wave field synthesis can be used to synthesize wave fronts in a listening area using directional microphones and loudspeakers placed at the boundary of the area; the position of the loudspeakers is the same as that of microphones in this technique. Thus, it is very difficult to construct an audio-visual virtual reality system using this technique because the screen or display of the visual system cannot be placed at the position of loudspeakers. In order to reproduce the 3D sound field of the listening area even when the loudspeakers are not placed at the boundary of the area, this paper proposes a 3D sound field reproduction system using directional microphones and boundary surface control. In the proposed system, the 3D sound field in the listening area can be accurately reproduced even when the loudspeakers are not placed at the boundary of the area by introducing inverse filters based on acoustic transfer functions. Results of a computer simulation show that the proposed system can reproduce the 3D sound field in the listening area more accurately than the conventional system.

**Keywords** : 3D sound field reproduction, wave field synthesis, directional microphone, boundary surface control, 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三次元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。

三次元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] は原音場に配置したマイクロホンアレイで音を収録し、再生音場に配置したスピーカアレイで収録した音を再生することにより、

Huygens の原理に従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させることができる技術である。この技術を用いたシステムはバイノーラル [5] やトランスオーラル [6] とは異なり、聴取者たちの聴取位置や頭部の向きに関する情報を取得しなくても複数の聴取者に同時に音場を体験させることができるというところに特徴がある。

Huygens の原理は「Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式に基づいて境界面上の音圧及び音圧傾度を制御すれば、聴取領域内の音圧が忠実に合成される」という数学的記述に裏付けされている [7]。図 1 の左側に示すように、空間  $V$  の外側に音源が存在し、空間  $V$  の内側の点の位置ベクトルを  $\mathbf{r}$  とした場合、 $\mathbf{r}$  における音圧  $P(\mathbf{r}, \omega)$  は Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式より以下の式のように表される。

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \oint_S \left\{ \frac{\partial P(\mathbf{r}_S, \omega)}{\partial \mathbf{n}_S} G(\mathbf{r}_S | \mathbf{r}, \omega) - P(\mathbf{r}_S, \omega) \frac{\partial G(\mathbf{r}_S | \mathbf{r}, \omega)}{\partial \mathbf{n}_S} \right\} dS \quad (\mathbf{r} \in V) \quad (1)$$

但し、 $S$  は空間  $V$  の境界面、 $\mathbf{r}_S$  は  $S$  上の点の位置ベクトル、 $\mathbf{n}_S$  は  $\mathbf{r}_S$  における空間  $V$  の外側方向への法線単位ベクトルを表す。また、 $G(\mathbf{r}_S | \mathbf{r}, \omega)$  は  $\mathbf{r}_S$  から

<sup>\*1</sup>独立行政法人情報通信研究機構 ユニバーサルメディア研究センター

<sup>\*1</sup>Universal Media Research Center, National Institute of Information and Communications Technology

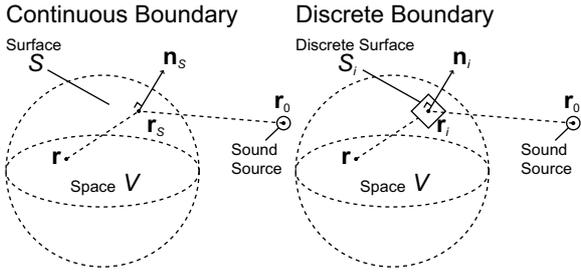


図1 Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式における座標系  
Fig.1 Coordinates in Kirchhoff-Helmholtz integral equation.

$\mathbf{r}$  までの音響伝達関数に相当し、以下の式のように表される。

$$G(\mathbf{r}_S|\mathbf{r}, \omega) = \frac{\exp(-jk|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}|)}{4\pi|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}|} \quad (2)$$

但し、 $k(= \omega/c)$  は波数、 $c$  は音速を表す。(1) 式は原音場において  $\mathbf{r}_S$  上で音圧  $P(\mathbf{r}_S, \omega)$  及び音圧傾度  $\frac{\partial P(\mathbf{r}_S, \omega)}{\partial \mathbf{n}_S}$  を収録し、再生音場において  $\mathbf{r}_S$  上で大きさ  $\frac{\partial P(\mathbf{r}_S, \omega)}{\partial \mathbf{n}_S}$  のモノポール音源と大きさ  $-P(\mathbf{r}_S, \omega)$  のダイポール音源を再生することで、再生音場における空間  $V$  内に原音場での収録時と同じ音圧が合成されることを示している。

しかし、実際にシステムを構築する場合、モノポール音源やダイポール音源を  $S$  上に連続的に配置することはできないので、境界面  $S$  を離散化する必要がある。図1の右側に示すように、離散化した境界面  $S_i$  における位置ベクトルを  $\mathbf{r}_i$  とし、 $\mathbf{r}_i$  における音圧  $P(\mathbf{r}_i, \omega)$  及び音圧傾度  $\frac{\partial P(\mathbf{r}_i, \omega)}{\partial \mathbf{n}_i}$  は  $S_i$  上で一定だとすると、(1) 式は以下のように書き換えられる。

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \sum_{i=1}^M \left\{ \frac{\partial P(\mathbf{r}_i, \omega)}{\partial \mathbf{n}_i} G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega) - P(\mathbf{r}_i, \omega) \frac{\partial G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega)}{\partial \mathbf{n}_i} \right\} \Delta S_i \quad (\mathbf{r} \in V) \quad (3)$$

但し、 $M$  は分割した境界面の数、 $\Delta S_i$  は境界面  $S_i$  の面積、 $\mathbf{n}_i$  は  $\mathbf{r}_i$  における空間  $V$  の外側方向への法線単位ベクトルである。(3) 式は原音場において  $M$  個の点  $\mathbf{r}_i$  上で音圧  $P(\mathbf{r}_i, \omega)$  及び音圧傾度  $\frac{\partial P(\mathbf{r}_i, \omega)}{\partial \mathbf{n}_i}$  を収録し、再生音場において  $M$  個の点  $\mathbf{r}_i$  上で大きさ  $\frac{\partial P(\mathbf{r}_i, \omega)}{\partial \mathbf{n}_i}$  のモノポール音源と大きさ  $-P(\mathbf{r}_i, \omega)$  のダイポール音源を再生することで、再生音場における空間  $V$  内に原音場での収録時と同じ音圧が合成されることを示している。

しかし、(3) 式に従ってシステムを構築する場合、原音場において  $M$  点の同じ位置に音圧マイクロホンと音圧傾度マイクロホンを、再生音場において  $M$  点の同じ位置にモノポール音源とダイポール音源を配置す

る必要があるため、システムの構築が現実的ではない。一方、(3) 式に近似を加えると、「Fresnel-Kirchhoff の回折公式」と呼ばれる以下の式が得られる [8]。

$$P(\mathbf{r}, \omega) = jk \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega) (\cos \theta_i - \cos \theta_{i0}) \Delta S_i \quad (\mathbf{r} \in V) \quad (4)$$

但し、 $\cos \theta_i (= \frac{\mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{r}_i - \mathbf{r})}{|\mathbf{n}_i| |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}|})$  はベクトル  $\mathbf{n}_i$  と  $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}$  がなす角度の余弦、 $\cos \theta_{i0} (= \frac{\mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0)}{|\mathbf{n}_i| |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|})$  はベクトル  $\mathbf{n}_i$  と  $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0$  がなす角度の余弦、 $\mathbf{r}_0$  は音源の位置ベクトルを表す。さらに、今回のシステムの場合では  $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}$  の方向は  $\mathbf{n}_i$  と常にほぼ同じ方向になるので、 $\cos \theta_i \approx 1$  とみなすことができる。ゆえに、(4) 式は以下のように書き換えることができる。

$$P(\mathbf{r}, \omega) = jk \sum_{i=1}^M D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i) P(\mathbf{r}_i, \omega) G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega) \Delta S_i \quad (\mathbf{r} \in V) \quad (5)$$

ここで、 $D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i) (= 1 - \cos \theta_{i0})$  は  $\mathbf{r}_i$  に配置したマイクロホンの指向特性に相当する。 $D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)$  は  $\theta_{i0}$  のみに依存しているので、音源からマイクロホンまでの距離には依存せず、音源の入射方向のみに依存している。従って、一般のカージオイドやショットガンといった指向性マイクロホンを用いることでシステムを実現することができると考えられる。(5) 式は原音場において  $M$  個の点  $\mathbf{r}_i$  上で音圧  $P(\mathbf{r}_i, \omega)$  を指向性マイクロホンで収録し、再生音場において  $M$  個の点  $\mathbf{r}_i$  上で大きさ  $jk D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i) P(\mathbf{r}_i, \omega)$  のモノポール音源を再生することで、再生音場における空間  $V$  内に原音場での収録時と同じ音圧が合成されることを示している。つまり、(3) 式では境界面上の音圧と音圧傾度を制御する必要があったが、(5) 式では音圧傾度はマイクロホンの指向特性によって制御されるので、境界面上の音圧のみを制御するだけで良いということが言える。また、(3) 式では必要となるマイクロホンとスピーカ数は  $2M$  個であったが、(5) 式では必要となるマイクロホンとスピーカ数は半分の  $M$  個になる。

(5) 式に従って境界面上の音圧のみを制御した三次元音場再生システムとしては、直線や平面状にマイクロホン及びスピーカを配置したシステムがすでに提案されている [1, 2, 3]。しかし、これらのシステムは聴取者の前方からの音のみを収録し、それを聴取者の前方に配置したスピーカで再生することで聴取者に前方の定位感や距離感のみを提示するものであるため、これらのシステムでは聴取者に後方からの音によるサラウンド感を提示することができない。そこで、さらにサラウンド感を表現するために、図2に示すように指

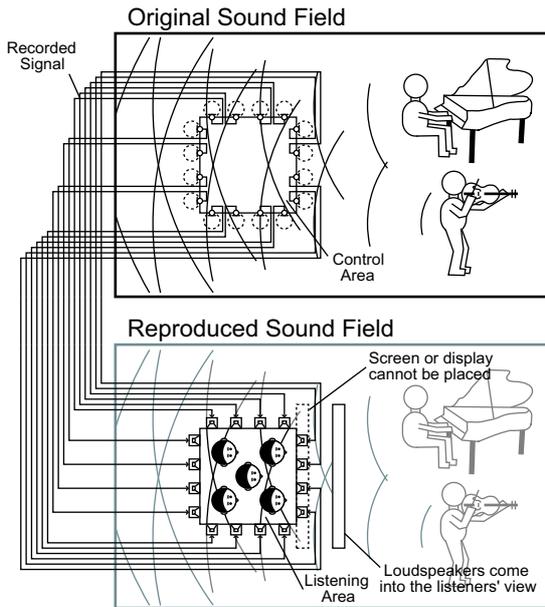


図2 指向性マイクロホンと波面合成法を用いた従来の三次元音場再生システム  
 Fig.2 Conventional 3D sound field reproduction system using directional microphones and wave field synthesis.

向性マイクロホンを用いて音を収録し、聴取者を取り囲むように配置したスピーカから音を再生して波面を合成するシステムも提案されており、そのシステムにおいて波面が忠実に合成される条件も検討されている[4].

しかし、図2に示したシステムは指向性マイクロホンとスピーカがそれぞれの領域の境界面上の同じ位置に配置されていることを前提としている。従って、視聴覚バーチャルリアリティシステムを構築するために聴取領域を保ちながら視覚システムを組み込もうとする場合、図2の下部に示すようにスクリーンやディスプレイを聴取領域の境界面上もしくは境界より外側に配置する必要が生じる。しかし、従来のシステムでは、スピーカが境界面上に配置されているので、スクリーンやディスプレイを境界面上に配置することができない。また、スクリーンやディスプレイを境界より外側に配置した場合には、スピーカがスクリーンやディスプレイの前に配置されているので、スピーカが聴取者の視界に入ってしまう。従って、これらの問題を解決するためには、スピーカを境界面上に配置せずに聴取領域内の三次元音場を再現する技術が必要になると考えられる。

スピーカを境界面上とは異なる場所に配置して領域内の音圧を制御する技術は従来から研究されている。古家らはKirchhoff-Helmholtz積分方程式における解の一意性に着目すれば境界面上の音圧を制御だけで領域内の音圧が制御できると考え、境界面上の音圧

のみを制御する音場制御手法を提案している[9]。この手法は領域が狭い場合には領域内の音圧が制御されるため、聴取者の頭部周辺という狭い領域内の音圧を制御したシステムが神沼らによって実現されているが[10]、領域の形状に依存した固有周波数では音場の再現精度が著しく劣化することが指摘されている[11]。また、Iseは境界面上の音圧と音圧傾度を制御することで境界面上にスピーカを配置しなくても領域内の音圧が制御できる音場制御技術を提案している(この手法は「境界音場制御」と呼ばれている)[12]。この手法は(3)式に基づいて領域内の音圧を制御するので、固有周波数でも音場の再現精度が劣化しないが、必要となるマイクロホンの数が制御点数の2倍になることが指摘されているし[11]、スピーカの最適な配置場所についても検討されていない。

一方、(5)式に基づいて領域内の音圧を制御する場合、境界面上の音圧傾度はマイクロホンの指向特性によって制御されると解釈できるので、境界面上にスピーカが配置されていなくても必要となるマイクロホンの数が制御点数と同じで、固有周波数でも音場の再現精度が劣化しないシステムが構築できると考えられるが、理論的な検討はまだされていない。

そこで、本論文では従来提案されている指向性マイクロホンと波面合成法を用いた三次元音場再生システムにおいて、スピーカを境界面上に配置することなしに聴取領域内の三次元音場を再現するために、従来システムに境界音場制御技術を導入することによって構成される指向性マイクロホンと境界音場制御を用いた三次元音場再生システムを新たに提案する。第2章では、音響伝達関数に基づいた逆フィルタ処理を(5)式に導入することによってスピーカを境界面上に配置することなしに聴取領域内の三次元音場を再現することができることを数学的に導出し、スピーカの最適な配置場所について理論的に検討する。そして、提案システムの概要について説明する。第3章では、提案システムの妥当性を検討するために、部屋の中に提案システムが実現されることを想定して、計算機シミュレーションを実施し、合成された三次元音場の数値解析を行う。

## 2 システムの理論的検討

まず、(5)式に逆フィルタ処理を導入することによってスピーカを境界面上に配置することなしに聴取領域内の三次元音場を再現することができることを数学的に導出する。

図3に示すように、空間 $V$ の外側に空間 $V'$ を設定する(つまり、 $V \in V'$ )。そして、空間 $V'$ の境界面を $N$ 個に離散化 $S'_l(l = 1 \dots N)$ し、その位置ベクトルを

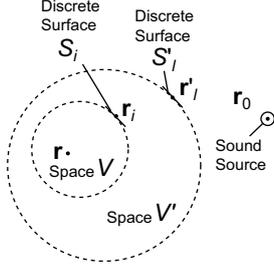


図3 提案システムの原理の数学的導出における座標系

Fig.3 Coordinates in the mathematical derivation of the proposed system's principle.

$\mathbf{r}'_l$  とする. 空間  $V'$  内で音場を再現すると考えると, (5) 式から以下の式が成立する.

$$P(\mathbf{r}, \omega) = jk \sum_{l=1}^N D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}'_l)P(\mathbf{r}'_l, \omega)G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}, \omega)\Delta S'_l \quad (\mathbf{r} \in V') \quad (6)$$

但し,  $\Delta S'_l$  は境界面  $S'_l$  の面積である. このとき,  $\mathbf{r}_i$  は常に空間  $V'$  内に存在するので, (6) 式より以下の式が成立する.

$$P(\mathbf{r}_i, \omega) = jk \sum_{l=1}^N D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}'_l)P(\mathbf{r}'_l, \omega)G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i, \omega)\Delta S'_l \quad (\mathbf{r}_i \in V') \quad (7)$$

一方, 空間  $V$  内において  $\mathbf{r}'_l$  に点音源があるような音場を再現すると考えると, (5) 式から以下の式が成立する.

$$P(\mathbf{r}, \omega) = jk \sum_{i=1}^M D_m(\mathbf{r}'_i|\mathbf{r}_i)P(\mathbf{r}_i, \omega)G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega)\Delta S_i \quad (\mathbf{r} \in V) \quad (8)$$

(7) 式を (8) 式に代入すると, 以下の式が成立する.

$$P(\mathbf{r}, \omega) = jk \sum_{l=1}^N D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}'_l)P(\mathbf{r}'_l, \omega) \left\{ jk \sum_{i=1}^M D_m(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i)G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i, \omega)G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega)\Delta S_i \right\} \Delta S'_l \quad (\mathbf{r} \in V, \mathbf{r}_i \in V') \quad (9)$$

ゆえに, (9) 式を (6) 式と比較すると, 以下の関係が成立する.

$$G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}, \omega) = jk \sum_{i=1}^M D_m(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i)G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i, \omega)G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega)\Delta S_i \quad (\mathbf{r} \in V, \mathbf{r}_i \in V') \quad (10)$$

ここで,  $\mathbf{r}_i$  に配置した  $M$  個の指向性マイクロホンで収録した信号に  $M$  入力  $N$  出力のフィルタで処理を施し, 得られた  $N$  チャンネル信号を  $\mathbf{r}'_l$  に配置した  $N$  個のスピーカで再生するシステムを考える. 収録した  $M$  チャンネル信号を  $D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)P(\mathbf{r}_i, \omega)$  とすると, フィルタ処理した  $N$  チャンネル信号  $P'(\mathbf{r}'_l, \omega)$  は以下の式のように表される.

$$P'(\mathbf{r}'_l, \omega) = \sum_{i=1}^M H_{li}(\omega)D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)P(\mathbf{r}_i, \omega) \quad (l = 1 \dots N) \quad (11)$$

但し,  $H_{li}(\omega)$  は設定した  $M$  入力  $N$  出力フィルタの係数である. ゆえに, 合成される音場  $P'(\mathbf{r}, \omega)$  は以下の式のようにになる.

$$\begin{aligned} P'(\mathbf{r}, \omega) &= \sum_{l=1}^N P'(\mathbf{r}'_l, \omega)G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}, \omega)\Delta S'_l \\ &= \sum_{l=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^M H_{li}(\omega)D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)P(\mathbf{r}_i, \omega) \right\} G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}, \omega)\Delta S'_l \\ &= \sum_{i=1}^M D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)P(\mathbf{r}_i, \omega) \left\{ \sum_{l=1}^N H_{li}(\omega)G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}, \omega)\Delta S'_l \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

(12) 式に (10) 式を代入すると, 以下の式のようにになる.

$$\begin{aligned} P'(\mathbf{r}, \omega) &= \sum_{i=1}^M D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)P(\mathbf{r}_i, \omega) \left[ \sum_{l=1}^N H_{li}(\omega) \left\{ jk \sum_{n=1}^M D_m(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_n)G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_n, \omega)G(\mathbf{r}_n|\mathbf{r}, \omega)\Delta S_n \right\} \Delta S'_l \right] \\ &= jk \sum_{i=1}^M D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)P(\mathbf{r}_i, \omega) \left[ \sum_{n=1}^M G(\mathbf{r}_n|\mathbf{r}, \omega) \left\{ \sum_{l=1}^N H_{li}(\omega)D_m(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_n)G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_n, \omega)\Delta S'_l \right\} \Delta S_n \right] \end{aligned} \quad (13)$$

このとき,

$$\sum_{l=1}^N H_{li}(\omega)D_m(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_n)G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_n, \omega)\Delta S'_l = \begin{cases} 1 & n = i \\ 0 & n \neq i \end{cases} \quad (14)$$

となるようなフィルタを設定すれば、(13)式は

$$\begin{aligned} P'(\mathbf{r}, \omega) &= jk \sum_{i=1}^M D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)P(\mathbf{r}_i, \omega)G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega)\Delta S_i \\ &= P(\mathbf{r}, \omega) \quad (\mathbf{r} \in V, \mathbf{r}_i \in V') \end{aligned} \quad (15)$$

となり、空間  $V$  中に三次元音場が再現される。ゆえに、(14)式によって設計されるフィルタで処理をすれば、音を収録した点 ( $\mathbf{r}_i$ ) とは異なる場所 ( $\mathbf{r}'_i$ ) にスピーカを配置しても、聴取領域内に三次元音場を再現させることができる。このとき、 $\mathbf{r}'_i$  は境界面  $S'$  上の点、 $\mathbf{r}_i$  は境界面  $S$  上の点であることから、スピーカは音を収録した境界面  $S$  より外側の境界面  $S'$  上に満遍なく配置する必要があるということが言える。

(14)式を行列表示すると、以下の式のように表される。

$$\mathbf{G}(\omega)\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{I} \quad (16)$$

$$\mathbf{G}(\omega) = \begin{pmatrix} D_{m11}G_{11} & \dots & D_{mN1}G_{N1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{m1M}G_{1M} & \dots & D_{mNM}G_{NM} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{H}(\omega) = \begin{pmatrix} H_{11}(\omega) & \dots & H_{1M}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N1}(\omega) & \dots & H_{NM}(\omega) \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

但し、 $D_{mli}G_{li}$  は  $D_m(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i)G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i, \omega)\Delta S'_l$  を表す。ゆえに、フィルタ  $\mathbf{H}(\omega)$  は以下の式によって算出される。

$$\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{G}^+(\omega) \quad (20)$$

但し、 $\mathbf{G}^+(\omega)$  は  $\mathbf{G}(\omega)$  の Moore-Penrose 擬似逆行列である。 $\mathbf{G}(\omega)$  は  $\mathbf{r}'_l$  から  $\mathbf{r}_i$  までの音響伝達関数によって構成される行列であるので、算出するフィルタ  $\mathbf{H}(\omega)$  は音響伝達関数の逆フィルタであるといえる。

導出した原理から提案する指向性マイクロホンと境界音場制御を用いた三次元音場再生システムの概要を図4に示す。まず、原音場において制御領域の境界面上  $\mathbf{r}_i$  に  $M$  個の指向性マイクロホンを配置し、音  $D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)P(\mathbf{r}_i, \omega)$  を収録する。その際、指向性マイクロホンは制御領域の外側に向くようにする。一方、再生音場において収録の時と同じ位置及び向きで  $M$  個の指向性マイクロホンを配置し、聴取領域の外側の境界面上  $\mathbf{r}'_l$  にさらに  $N$  個のスピーカを配置する。そして  $N$  個のスピーカから  $M$  個の指向性マイクロホンまでの音響伝達関数  $D_m(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i)G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i, \omega)\Delta S'_l$  を測定し、音響伝達関数行列から逆フィルタ  $H_{li}(\omega)$  を算

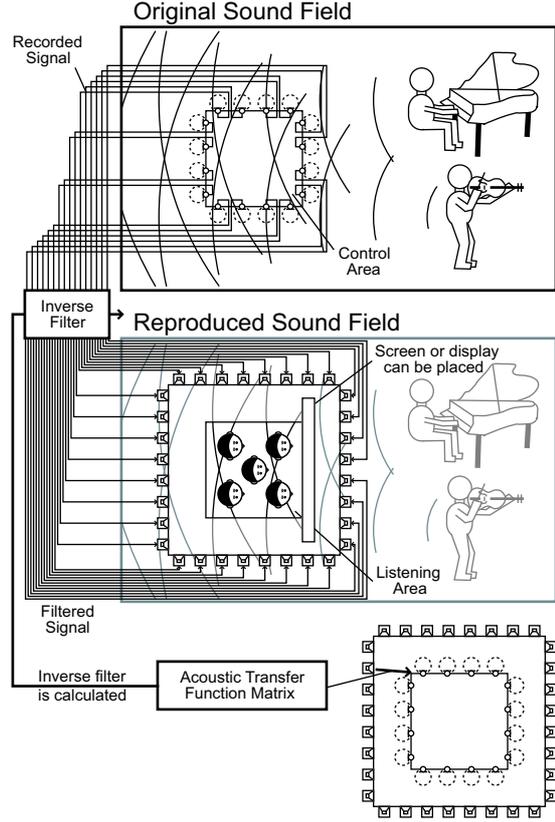


図4 指向性マイクロホンと境界音場制御を用いた提案する三次元音場再生システム

Fig. 4 Proposed 3D sound field reproduction system using directional microphones and boundary surface control.

出する。そして、収録した信号に逆フィルタを畳み込んで得られた信号  $P'(\mathbf{r}'_l, \omega)$  を  $N$  個のスピーカから再生する。その結果、聴取領域内において三次元音場が再現され、聴取領域内にいる聴取者たちはあたかも原音場において演奏を聴いているように感じる。このとき、逆フィルタの算出の際に聴取領域上に配置した指向性マイクロホンは音を再生するには配置する必要がないので、境界面上またはその外側にスクリーンやディスプレイを配置して視聴覚バーチャルリアリティシステムを構築することが可能になる。また、逆フィルタ処理によって、再生音場における  $\mathbf{r}_i$  での音圧は収録した音  $D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)P(\mathbf{r}_i, \omega)$  と同じになるので、原音場において音源は制御領域の外側の好きな位置に配置することができる。従って、制御領域の外側でかつスピーカアレイの内側に音源を配置すれば、聴取者たちにスピーカアレイの手前で音源が鳴っているように感じさせることも可能となる。

実環境において三次元音場再生システムを構築する場合、音響伝達関数には初期遅延が含まれているので、(20)式によって逆フィルタを算出すると、因果律を満たさないフィルタが算出される。そこで、因果律

を満たすフィルタを算出するために、以下のような式に従って逆フィルタを算出する。

$$\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{G}^+(\omega)\mathbf{I}(\omega) \quad (21)$$

$$\mathbf{I}(\omega) = \begin{pmatrix} e^{-j\omega T} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{-j\omega T} \end{pmatrix} \quad (22)$$

但し、 $T[s]$  は因果律を満たす逆フィルタを算出するために必要な遅延時間である。このとき、合成される音場は以下の式のようになり、システム全体で  $T$  秒の遅延が生じることになる。

$$\begin{aligned} P'(\mathbf{r}, \omega) &= e^{-j\omega T} jk \sum_{i=1}^M D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i) P(\mathbf{r}_i, \omega) \\ &\quad G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega) \Delta S_i \\ &= e^{-j\omega T} P(\mathbf{r}, \omega) \quad (\mathbf{r} \in V, \mathbf{r}_i \in V') \end{aligned} \quad (23)$$

### 3 計算機シミュレーションによる数値解析

第1章において(4)式から(5)式を導出する際に用いた近似 ( $\cos \theta_i \approx 1$ ) は領域が球形でかつ聴取位置が球の中心付近にある場合には成立する。一方、実際にシステムを構築する場合には、部屋の壁面にスピーカを配置した方が設備上都合が良く、領域が直方体の形であることが多いので、近似が成立しにくくなり、そのために音場の再現精度が劣化する可能性がある。そこで、本章では室内の壁面にスピーカを配置することを想定した条件で計算機シミュレーションを実施し、提案したシステムによって合成された音場の再現精度を検討する。

#### 3.1 実験環境

原音場は反射音のない自由音場とした。複数の人が領域内で音を聴くことを想定して、制御領域には2 m(幅)×2 m(奥行)×1 m(高さ)で構成される正方柱を設定し、指向性マイクロホンアレイは設定した正方柱の表面上に設置した。一方、再生音場において聴取領域は制御領域と同じ大きさの正方柱に設定した。さらに、実在の部屋の壁面にスピーカを取り付けることを想定して、聴取領域の外側に4 m(幅)×4 m(奥行)×2 m(高さ)で構成される正方柱を設定し、スピーカアレイは設定した正方柱の表面上に設置した。但し、計算機シミュレーションを簡略化するために、再生音場も反射音のない自由音場とした。原音場における指向性マイクロホンアレイと再生音場におけるスピーカアレイを図5に示す。但し、図5中の再生音場における灰色の領域は聴取領域を表す。図5で示すように、指向性マイクロホンは正方柱の6面上に格子間距離  $\Delta r_m$  で格子状に配置し、指向性を制御領域の外側に向けた。

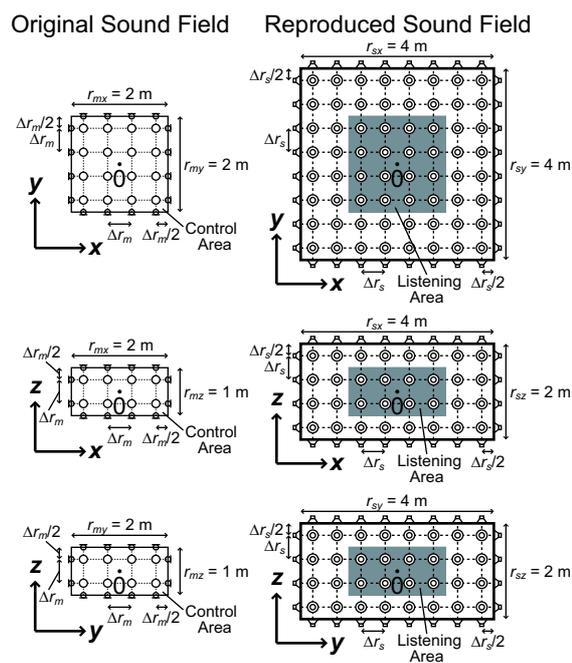


図5 計算機シミュレーションで用いた提案システムにおける指向性マイクロホンアレイ及びスピーカアレイ

Fig.5 Directional microphone array and loudspeaker array of the proposed system used in the computer simulation.

但し、正方柱の辺からマイクロホンまでの距離は格子間距離の半分 ( $= \Delta r_m/2$ ) とした。一方、スピーカもマイクロホンと同じように正方柱の6面上に格子間距離  $\Delta r_s$  で格子状に配置し、正方柱の辺からスピーカまでの距離は格子間距離の半分 ( $= \Delta r_s/2$ ) とした。また、三次元座標上の原点は制御領域及び聴取領域の中心に設定した。

音源信号  $s(t)$  は周波数  $f$  の正弦波信号 ( $= A \sin 2\pi f t$ ) とした。但し、 $A$  は音源信号の振幅を表す。原音場における制御領域内の点  $\mathbf{r}$  での音圧  $p_o(\mathbf{r}, t)$  は以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} p_o(\mathbf{r}, t) &= \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|} s\left(t - \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}{c}\right) \\ &= \frac{A}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}{c}\right)\right\} \end{aligned} \quad (24)$$

但し、 $\mathbf{r}_0$  は音源の位置ベクトル、 $c$  は音速である。

提案システムによる音場再現は以下の手順によって示される。まず、 $\mathbf{r}_i (i=1\dots M)$  に配置した  $M$  個の指向性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。

$$\begin{aligned} x_i(t) &= \frac{D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|} s\left(t - \frac{|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|}{c}\right) \\ &= \frac{D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)A}{|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|}{c}\right)\right\} \end{aligned} \quad (25)$$

但し、 $D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)$  は  $i$  番目の指向性マイクロホンの指

向特性を表わす. 次に, 収録した信号  $x_i(t)$  に逆フィルタを畳み込んだ信号  $y_l(t) (l = 1 \dots N)$  は以下のように表わされる.

$$\begin{aligned} y_l(t) &= \sum_{i=1}^M \Xi_{li} x_i \left( t - \frac{\Theta_{li}}{2\pi f} \right) \\ &= \sum_{i=1}^M \frac{\Xi_{li} D_m(\mathbf{r}_0 | \mathbf{r}_i) A}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|} \sin \left\{ 2\pi f \left( t - \frac{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}{c} \right) - \Theta_{li} \right\} \quad (26) \end{aligned}$$

但し,  $\Xi_{li} (= |H_{li}(\omega)|)$  及び  $\Theta_{li} (= \arg H_{li}(\omega))$  は算出した逆フィルタ  $H_{li}(\omega)$  の絶対値及び偏角を表す. 今回の計算機シミュレーションでは音源信号  $s(t)$  に正弦波を用いているので, 絶対値及び偏角は  $\omega$  に依らない定数として扱っている. また,  $s(t)$  は無限時間長の信号であるため, 算出する逆フィルタは因果律を満たす必要がない. ゆえに, 今回の計算機シミュレーションでは (20) 式に基づいて逆フィルタを算出している. 最後に,  $\mathbf{r}'_l$  に配置した  $N$  個のスピーカから  $y_l(t)$  を再生することで, 再生音場における聴取領域内の点  $\mathbf{r}$  での音圧  $p_p(\mathbf{r}, t)$  は以下のように表わされる.

$$\begin{aligned} p_p(\mathbf{r}, t) &= \sum_{l=1}^N \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_l|} y_l \left( t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_l|}{c} \right) \\ &= \sum_{l=1}^N \sum_{i=1}^M \frac{\Xi_{li} D_m(\mathbf{r}_0 | \mathbf{r}_i) A}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_l| |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|} \sin \left\{ 2\pi f \left( t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_l| + |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}{c} \right) - \Theta_{li} \right\} \quad (27) \end{aligned}$$

計算機シミュレーションに用いたパラメータ条件を表 1 に示す. マイクロホンの間隔は 16.67 cm であり, 周波数が 1000 Hz の場合の波長 ( $= \frac{340 \text{ m}}{1000 \text{ Hz}} = 34 \text{ cm}$ ) 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.

マイクロホンの指向特性  $D_m(\mathbf{r}_0 | \mathbf{r}_i)$  は以下の式のような超指向性とした. この指向特性は先行研究 [4] において波面がより忠実に合成されることが示されている指向特性である.

$$D_m(\mathbf{r}_0 | \mathbf{r}_i) = \begin{cases} \cos \theta_{im} & (|\theta_{im}| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta_{im}| > 90^\circ) \end{cases} \quad (28)$$

但し,  $\cos \theta_{im} (= \frac{(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{n}_{im}}{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i| |\mathbf{n}_{im}|})$  は  $\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i$  と  $\mathbf{n}_{im}$  がなす角度の余弦であり,  $\mathbf{n}_{im}$  は以下の式によって設定した  $i$  番目の指向性マイクロホンの指向性ベクトルである.

$$\mathbf{n}_{im} = \begin{cases} \begin{pmatrix} (-1)^i & 0 & 0 \end{pmatrix}^T & (i = 1 \sim 144) \\ \begin{pmatrix} 0 & (-1)^{i-144} & 0 \end{pmatrix}^T & (i = 145 \sim 288) \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & (-1)^{i-288} \end{pmatrix}^T & (i = 289 \sim 576) \end{cases} \quad (29)$$

表 1 計算機シミュレーションに用いたパラメータ条件

Table 1 Parametric conditions used in the computer simulation.

Amplitude ( $A$ )	1
Frequency ( $f$ )	63, 125, 250, 500, 1000 Hz
Distance ( $d$ )	2, 10, 50 m
Direction vector ( $\mathbf{u}$ )	$\begin{pmatrix} 1, 0, 0 \end{pmatrix}^T$ $\begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0 \end{pmatrix}^T$ $\begin{pmatrix} \frac{2}{3}, \frac{2}{3}, \frac{1}{3} \end{pmatrix}^T$
Sound velocity ( $c$ )	340 m/s
Microphone number ( $M$ )	576
Microphone interval ( $\Delta r_m$ )	0.1667 m
Microphone directivity ( $D_m(\mathbf{r}_0   \mathbf{r}_i)$ )	Shotgun
Microphone array size ( $r_{mx}, r_{my}, r_{mz}$ )	$2 \times 2 \times 1$ m
Loudspeaker number ( $N$ )	2304
Loudspeaker interval ( $\Delta r_s$ )	0.1667 m
Loudspeaker array size ( $r_{sx}, r_{sy}, r_{sz}$ )	$4 \times 4 \times 2$ m

また,  $\mathbf{r}_0, \mathbf{r}, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}'_l$  は 3 次元座標上で以下のように設定した.

$$\mathbf{r}_0 = d\mathbf{u} \quad (30)$$

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_x & r_y & r_z \end{pmatrix}^T \quad (|r_x|, |r_y| < 2, |r_z| < 1) \quad (31)$$

$$\mathbf{r}_i = \begin{cases} \begin{pmatrix} \frac{r_{mx}}{2} (-1)^i \\ \Delta r_m R \left( \frac{i}{2}, \frac{r_{my}}{\Delta r_m} \right) + \frac{\Delta r_m - r_{my}}{2} \\ \Delta r_m Q \left( \frac{i}{2}, \frac{r_{my}}{\Delta r_m} \right) + \frac{\Delta r_m - r_{mz}}{2} \end{pmatrix} & (i = 1 \sim 144) \\ \begin{pmatrix} \Delta r_m R \left( \frac{i-144}{2}, \frac{r_{mx}}{\Delta r_m} \right) + \frac{\Delta r_m - r_{mz}}{2} \\ \frac{r_{my}}{2} (-1)^{i-144} \\ \Delta r_m Q \left( \frac{i-144}{2}, \frac{r_{mx}}{\Delta r_m} \right) + \frac{\Delta r_m - r_{mz}}{2} \end{pmatrix} & (i = 145 \sim 288) \\ \begin{pmatrix} \Delta r_m R \left( \frac{i-288}{2}, \frac{r_{mx}}{\Delta r_m} \right) + \frac{\Delta r_m - r_{mz}}{2} \\ \Delta r_m Q \left( \frac{i-288}{2}, \frac{r_{mx}}{\Delta r_m} \right) + \frac{\Delta r_m - r_{my}}{2} \\ \frac{r_{mz}}{2} (-1)^{i-288} \end{pmatrix} & (i = 289 \sim 576) \end{cases} \quad (32)$$

$$\mathbf{r}'_l = \begin{cases} \begin{pmatrix} \frac{r_{sx}}{2}(-1)^l \\ \Delta r_s R\left(\frac{l}{2}, \frac{r_{sy}}{\Delta r_s}\right) + \frac{\Delta r_s - r_{sy}}{2} \\ \Delta r_s Q\left(\frac{l}{2}, \frac{r_{sy}}{\Delta r_s}\right) + \frac{\Delta r_s - r_{sz}}{2} \end{pmatrix} & (l = 1 \sim 576) \\ \begin{pmatrix} \Delta r_s R\left(\frac{l-576}{2}, \frac{r_{sx}}{\Delta r_s}\right) + \frac{\Delta r_s - r_{sx}}{2} \\ \frac{r_{sy}}{2}(-1)^{l-576} \\ \Delta r_s Q\left(\frac{l-576}{2}, \frac{r_{sx}}{\Delta r_s}\right) + \frac{\Delta r_s - r_{sz}}{2} \end{pmatrix} & (l = 577 \sim 1152) \\ \begin{pmatrix} \Delta r_s R\left(\frac{l-1152}{2}, \frac{r_{sx}}{\Delta r_s}\right) + \frac{\Delta r_s - r_{sx}}{2} \\ \Delta r_s Q\left(\frac{l-1152}{2}, \frac{r_{sy}}{\Delta r_s}\right) + \frac{\Delta r_s - r_{sy}}{2} \\ \frac{r_{sz}}{2}(-1)^{l-1152} \end{pmatrix} & (l = 1153 \sim 2304) \end{cases} \quad (33)$$

但し,  $Q(u, v)$ ,  $R(u, v)$  は  $u$  を  $v$  で割った際の商及び余りを示す.

一方, 従来システムとして (5) 式に基づいた三次元音場再生システム [4] を用いた 2 種類の条件を設定した. 1 番目は  $\mathbf{r}_i$  に  $M$  個の指向性マイクロホンとスピーカを配置するシステムである. このシステムでは必要となる指向性マイクロホンの数が提案システムの場合と同じであるが, 境界面上にスピーカが配置されているので, ディスプレイやスクリーンを配置する際に支障が生じる. このシステムにおける聴取領域内の点  $\mathbf{r}$  での音圧  $p_{c1}(\mathbf{r}, t)$  は以下のように表わされる.

$$p_{c1}(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=1}^M \frac{D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)A}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i||\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|+|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|}{c}\right)\right\} \quad (34)$$

2 番目は  $\mathbf{r}'_l$  に  $N$  個の指向性マイクロホンとスピーカを配置するシステムである. このシステムではディスプレイやスクリーンは聴取領域内に配置するので, ディスプレイやスクリーンの配置の際に支障は生じないが, システムの空間解像度を同じにする場合, 必要となる指向性マイクロホンの数は領域の表面積に比例して多くなる (今回の計算機シミュレーションにおいては提案システムの 4 倍). このシステムにおける聴取領域内の点  $\mathbf{r}$  での音圧  $p_{c2}(\mathbf{r}, t)$  は以下のように表わされる.

$$p_{c2}(\mathbf{r}, t) = \sum_{l=1}^N \frac{D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}'_l)A}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'_l||\mathbf{r}'_l-\mathbf{r}_0|} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'_l|+|\mathbf{r}'_l-\mathbf{r}_0|}{c}\right)\right\} \quad (35)$$

但し,  $D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}'_l)$  は以下のように表わされ,  $\cos \theta_{lm} =$

$\frac{(\mathbf{r}_0-\mathbf{r}'_l) \cdot \mathbf{n}_{lm}}{|\mathbf{r}_0-\mathbf{r}'_l||\mathbf{n}_{lm}|}$  である.

$$D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}'_l) = \begin{cases} \cos \theta_{lm} & (|\theta_{lm}| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta_{lm}| > 90^\circ) \end{cases} \quad (36)$$

$$\mathbf{n}_{lm} = \begin{cases} \begin{pmatrix} (-1)^l & 0 & 0 \end{pmatrix}^T & (l = 1 \sim 576) \\ \begin{pmatrix} 0 & (-1)^{l-576} & 0 \end{pmatrix}^T & (l = 577 \sim 1152) \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & (-1)^{l-1152} \end{pmatrix}^T & (l = 1153 \sim 2304) \end{cases} \quad (37)$$

### 3.2 実験結果及び考察

一例として,  $t = 0$  s,  $f = 500$  Hz における原音場の波面, 合成した波面及びその差分を図 6~8 に示す. これらの図ではスピーカアレイで囲まれた  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  の空間のうちの XY 平面 ( $z = 0$ ), XZ 平面 ( $y = 0$ ), YZ 平面 ( $x = 0$ ) のみを図示し, 点線はスピーカアレイで囲まれた空間の中に設定した聴取領域 ( $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ) の境界を表している. 平面上に図示している値は音圧  $p_o(\mathbf{r}, t)$ ,  $p_{c1}(\mathbf{r}, t)$ ,  $p_{c2}(\mathbf{r}, t)$ ,  $p_p(\mathbf{r}, t)$  及びその差分  $p_{c1}(\mathbf{r}, t) - p_o(\mathbf{r}, t)$ ,  $p_{c2}(\mathbf{r}, t) - p_o(\mathbf{r}, t)$ ,  $p_p(\mathbf{r}, t) - p_o(\mathbf{r}, t)$  の絶対値とし, 配色バーを図の右側に示している. 従って, 点線内で囲まれた聴取領域内の差分表示  $|p_{c1}(\mathbf{r}, t) - p_o(\mathbf{r}, t)|$ ,  $|p_{c2}(\mathbf{r}, t) - p_o(\mathbf{r}, t)|$ ,  $|p_p(\mathbf{r}, t) - p_o(\mathbf{r}, t)|$  が白いほど, 聴取領域内において波面が忠実に合成されていることを示している. 但し, 差分は聴取領域内の  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  の空間 ( $|r_x| < 0.5$ ,  $|r_y| < 0.5$ ,  $|r_z| < 0.25$ ) において音圧  $p_o(\mathbf{r}, t)$ ,  $p_{c1}(\mathbf{r}, t)$ ,  $p_{c2}(\mathbf{r}, t)$ ,  $p_p(\mathbf{r}, t)$  を正規化した後に算出を行った.

1 番目の従来システムを用いた場合には, 差分表示があまり白くなっていないので, 波面はあまり忠実に合成されていないと考えられる. これは今回の計算機シミュレーションではスピーカから聴取位置までの距離が短いことにより (聴取領域の中心に聴取位置を設定すると最短で  $0.5 \text{ m}$ ), スピーカから聴取位置までの音響伝達関数が無限大に発散する傾向になり, そのために波面の合成精度が全体的に劣化してしまったと考えられる. また, 2 番目の従来システムを用いた場合には, スピーカから聴取位置までの距離が長くなり (聴取領域の中心に聴取位置を設定すると最短で  $1 \text{ m}$ ), スピーカから聴取位置までの音響伝達関数が無限大に発散する傾向がなくなるため, 音源の距離が  $10 \text{ m}$  や  $50 \text{ m}$  の時には 1 番目の従来システムよりも差分表示が白くなっている. しかし, 音源の距離が  $2 \text{ m}$  のときには波面が全く合成されていない. これは音源の距離が  $2 \text{ m}$  の場合には音源が制御領域の中に存在し, 指向性マイクロホンが音源からの音を収録していないためであると考えられる.

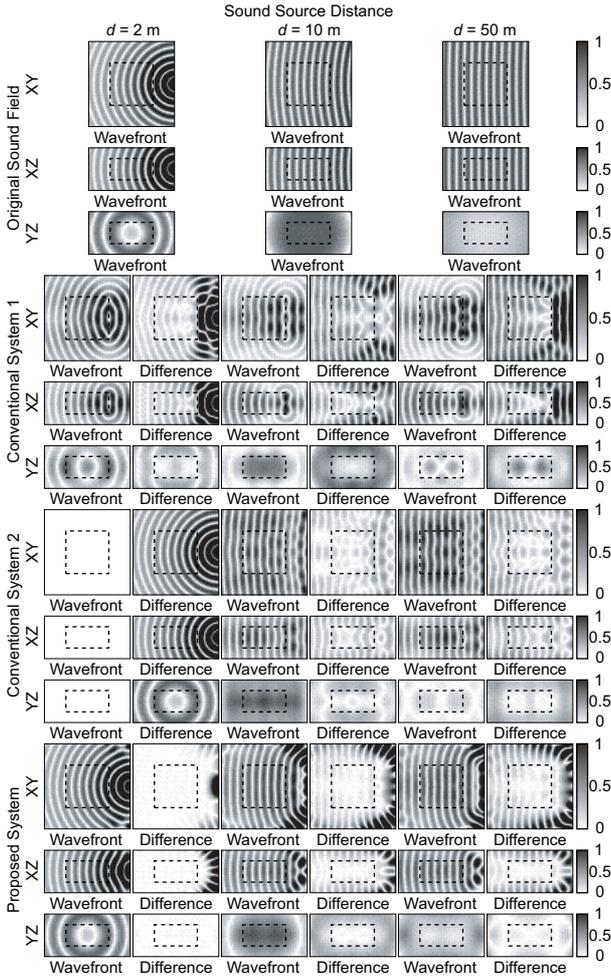


図6 計算機シミュレーションにおける原音場の波面，合成波面及びその差分 ( $t = 0$  s,  $f = 500$  Hz,  $\mathbf{u} = (1, 0, 0)^T$ )

Fig. 6 Wavefronts of original sound field, synthesized wavefronts and their differences in the computer simulation ( $t = 0$  s,  $f = 500$  Hz,  $\mathbf{u} = (1, 0, 0)^T$ ).

それに対して，提案システムを用いた場合には，音源の距離が 2 m の場合でも波面が合成されているし，2 種類の従来システムを用いた場合よりも点線で囲まれた区間の差分表示が白くなっている。従って，提案システムを用いれば，従来システムよりも波面がより忠実に合成されると考えられる。

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。

$$\text{SNR}(f) = 10 \log_{10} \frac{\sum_{\mathbf{r}} \{p_o(\mathbf{r}, 0)\}^2}{\sum_{\mathbf{r}} \{p_{c1,c2,p}(\mathbf{r}, 0) - p_o(\mathbf{r}, 0)\}^2} \quad (38)$$

但し， $\mathbf{r}$  の範囲は  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  の空間内 ( $|r_x| < 1$ ,  $|r_y| < 1$ ,  $|r_z| < 0.5$ ) とし，その範囲において  $p_o(\mathbf{r}, 0)$ ,  $p_{c1}(\mathbf{r}, 0)$ ,  $p_{c2}(\mathbf{r}, 0)$ ,  $p_p(\mathbf{r}, 0)$  の値を正規化し

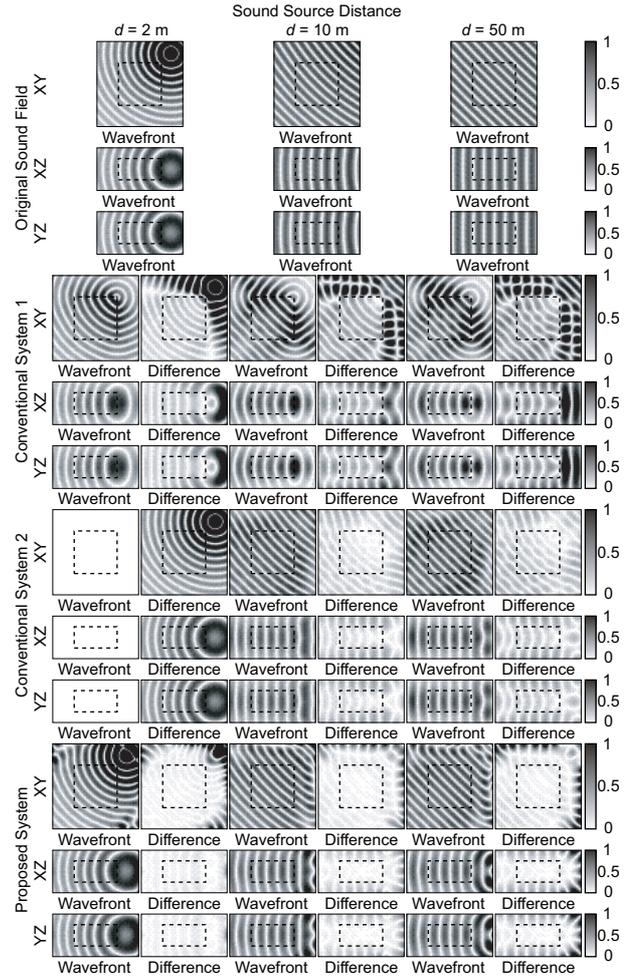


図7 計算機シミュレーションにおける原音場の波面，合成波面及びその差分 ( $t = 0$  s,  $f = 500$  Hz,  $\mathbf{u} = (\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0)^T$ )

Fig. 7 Wavefronts of original sound field, synthesized wavefronts and their differences in the computer simulation ( $t = 0$  s,  $f = 500$  Hz,  $\mathbf{u} = (\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0)^T$ ).

てから SNR の算出を行った。

システムごとの SNR の周波数特性を図 9 に示す。2 種類の従来システムにおいては全ての全ての周波数，音源距離及び音源方向において SNR が常に 15 dB 以下である。それに対して，提案システムを用いた場合， $d = 10, 50$  m,  $\mathbf{u} = (1, 0, 0)^T$ ,  $f = 1000$  Hz の場合を除いて SNR が従来システムよりも向上している。ゆえに，提案システムを用いれば，従来システムを用いた場合よりも波面をより忠実に合成することができると思われる。特に， $d = 2$  m,  $\mathbf{u} = (1, 0, 0)^T$  の場合，提案システムを用いれば常に 15 dB 以上の SNR を得ることができると言える。境界音場制御技術を用いたシステムで波面の合成精度について検討している先行研究 [12] では，同じような音源位置の条件 ( $d = 1.2$  m,  $\mathbf{u} = (-1, 0, 0)^T$ ) において SNR の値が 1000 Hz 以下で 50 dB 以上であったのに比べると，今回の計算機

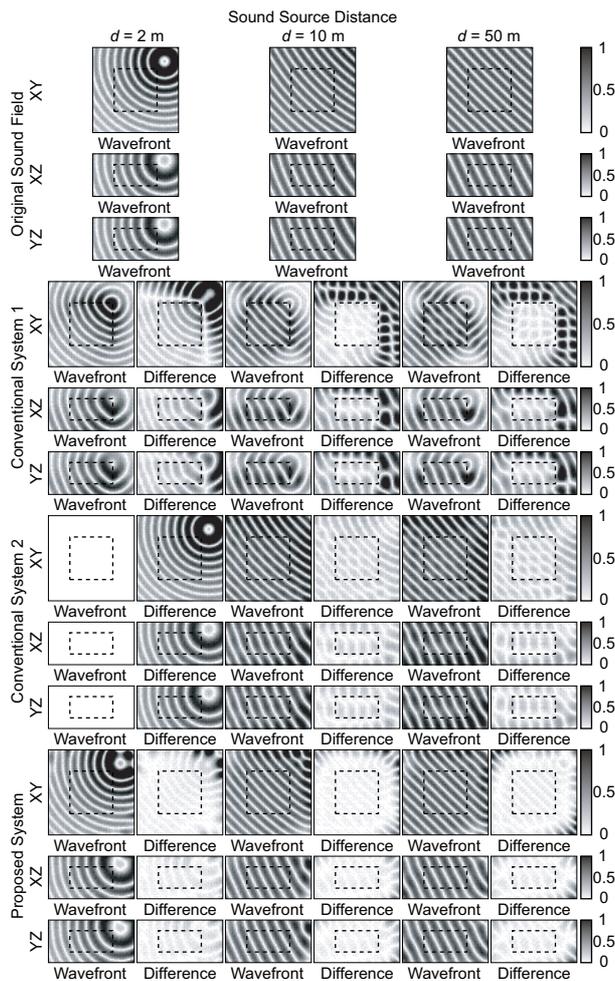


図 8 計算機シミュレーションにおける原音場の波面、合成波面及びその差分 ( $t = 0$  s,  $f = 500$  Hz,  $\mathbf{u} = (\frac{2}{3}, \frac{2}{3}, \frac{1}{3})^T$ )  
 Fig. 8 Wavefronts of original sound field, synthesized wavefronts and their differences in the computer simulation ( $t = 0$  s,  $f = 500$  Hz,  $\mathbf{u} = (\frac{2}{3}, \frac{2}{3}, \frac{1}{3})^T$ ).

シミュレーションで得られた SNR の値は決して高い値ではない。しかし、先行研究が境界面上の音圧と音圧傾度を制御する手法であるのに対して、本論文で検討している手法は境界面上の音圧のみを指向性マイクロホンで制御する手法であり、必要とするマイクロホンの数は先行研究の半分になるので、その分逆フィルタを算出する演算量も少なくすることができる。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、より少ない数のマイクロホンでシステムを実現することができる本提案手法は実用上有効であると考えられる。

### 3.3 スクリーンやディスプレイの配置による影響

今回の計算機シミュレーションではスクリーンやディスプレイを配置しない場合を実験環境としたが、システムを実装する際にはスクリーンやディスプレイを配置することによる音場の再現精度への影響を考慮する

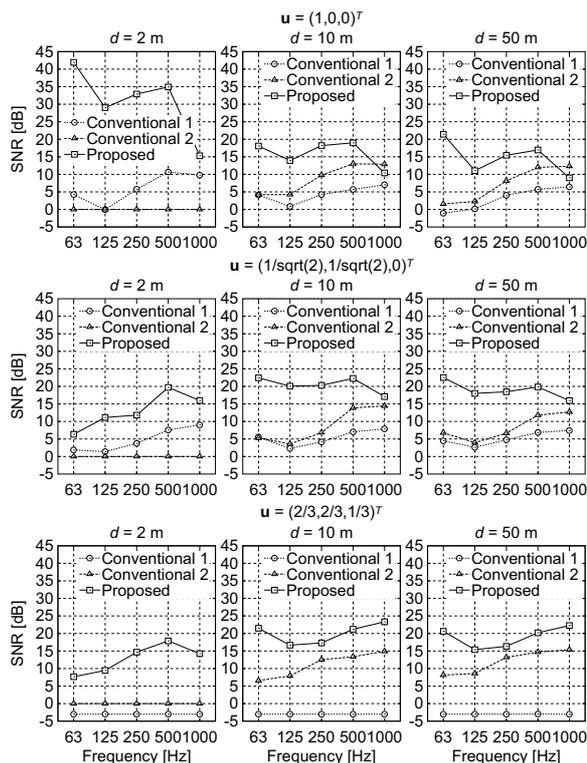


図 9 計算機シミュレーションにおける従来システム及び提案システムの SNR  
 Fig. 9 SNRs of conventional and proposed systems in the computer simulation.

必要がある、そこで、本節ではスピーカが聴取者の視界に入ることなくスクリーンやディスプレイを配置することが可能な 3 種類のシステム (今回の計算機シミュレーションで用いた 2 番目の従来システム, Ise による境界音場制御システム [12], 提案システム) について、スクリーンやディスプレイの配置による音場の再現精度への影響を考察する。

音響透過型スクリーンを用いた場合、スクリーンを配置してもスクリーンの後ろから前までの音響伝達特性はほとんど変動しない。従って、この場合にはどのシステムにおいても音場の再現精度はほとんど劣化しないと考えられる。

音響透過型でないスクリーンやディスプレイを用いた場合、今回の計算機シミュレーションにて用いた 2 番目の従来システムでは、スクリーンやディスプレイが聴取領域内に配置されるので、それによってスピーカから聴取位置までの音響伝達特性が変動し、音場の再現精度が劣化する可能性がある。また、Ise による境界音場制御システムではスクリーンやディスプレイがスピーカと制御点の間に配置される。しかし、スピーカ配置を工夫すれば、それによって生じるスピーカから制御点までの音響伝達特性の変動による音場の再現精度への影響は最小限に抑えることができる可能性がある。一方、提案システムではスクリーンやディス

レイは常にスピーカと指向性マイクロホンの間に配置されるので、それによってスピーカから指向性マイクロホンまでの音響伝達特性は変動する。しかし、スクリーンやディスプレイを配置した上で音響伝達関数の測定及び逆フィルタの算出を行えば、音響伝達特性の変動による音場の再現精度への影響は逆フィルタ処理によって抑圧することができる可能性がある。

以上のことから、提案システムを用いた場合でも、スクリーンやディスプレイを配置しても音場の再現精度があまり劣化しないシステムを構築することが可能であると考えられる。しかし、このことを確認するためには今後更なる検討を実施する必要があると考えられる。

#### 4 まとめ

本論文では従来提案されてきた指向性マイクロホンと波面合成法を用いた三次元音場再生システムにおいてスピーカを境界面上に配置することなしに聴取領域内の三次元音場を再現するために、従来システムに境界音場制御技術を導入し、指向性マイクロホンと境界音場制御を用いた三次元音場再生システムを提案した。計算機シミュレーションを実施し、合成された三次元音場の数値解析を行ったところ、提案システムの方が従来システムよりも忠実に聴取領域内の三次元音場を再現することが分かった。

本論文ではスピーカアレイを配置する再生音場は反射がない自由音場という条件で計算機シミュレーションを実施したが、サラウンドシステムを構築する場合にはスピーカアレイを配置する室内に反射や残響が生じている。ゆえに、本論文で提案したシステムを用いてサラウンドシステムを構築するためには、スピーカアレイを残響空間内に配置した場合における三次元音場の再現精度を今後更に検討していく必要があると考えられる。

また、今回の結果に基づいて実際にサラウンドシステムを構築する場合、マイクロホンやスピーカの数が非常に多いのでシステムを実装することは現実的ではない。一方、人間の聴覚性能に着目した場合、システムに必要なマイクロホンやスピーカの数を減らすことができる [13]。従って、今後は本論文で提案したシステムにおいてマイクロホンやスピーカの数を減らしていても十分な聴覚性能を保持することができるかどうかを聴取実験によって検討する必要があると考えられる。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、ご支援下さった NICT ユニバーサルメディア研究センター超臨場感基盤グループ

栗田泰市郎グループリーダー、勝本道哲博士、山肩洋子博士に感謝の意を申し上げる。

#### 参考文献

- [1] 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).
- [2] 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", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **5**, 3, pp. 919-926 (2000).
- [3] 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", *電子情報通信学会技術研究報告*, No. EA2000-17, pp. 25-32 (2000).
- [4] 木村敏幸, 寛一彦: "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", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **12**, 2, pp. 191-198 (2007).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] B. B. Baker and E. T. Copson: "The Mathematical Theory of Huygens' Principle", pp. 23-26, Oxford University Press, London, UK, second edition (1950).
- [8] B. B. Baker and E. T. Copson: "The Mathematical Theory of Huygens' Principle", pp. 72-74, Oxford University Press, London, UK, second edition (1950).
- [9] 古家賢一, 一ノ瀬裕: "境界面音圧による閉空間の音場制御", *電子情報通信学会技術研究報告*, No. EA90-15, pp. 25-32 (2000).
- [10] 神沼充伸, 伊勢史郎, 鹿野清宏: "受聴者の頭部の動きを考慮した多チャンネル音場再現システム", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **5**, 3, pp. 957-964 (2000).
- [11] S. Takane, Y. Suzuki and T. Sone: "A new method for global sound field reproduction based on Kirchhoff's integral equation", *ACUSTICA - Acta Acustica*, **85**, 2, pp. 250-257 (1999).
- [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] 木村敏幸, 寛一彦, 武田一哉, 板倉文忠: "波面合成におけるチャンネル数の主観的影響—音源が正面付近にある場合—", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **10**, 2, pp. 257-266 (2005).

(2009年11月4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, 東京農工大特任助手を経て, 2007年よりNICT・専攻研究員, 現在に至る。立体音響, 空間知覚, アレイ信号処理に関する研究に従事。博士(学術)。日本音響学会, 電子情報通信学会, AES各会員。