

# 波面合成法を用いた近接三次元音場再生の理論的研究

木村 敏幸<sup>†</sup> 山肩 洋子<sup>†</sup> 勝本 道哲<sup>†</sup>

<sup>†</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

〒 184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

E-mail: †{t-kimura,yamakata,katumoto}@nict.go.jp

あらまし 立体テレビや立体遠隔通信会議などの超臨場感コミュニケーションを実現するためには、近接三次元音場再生技術を開発することが非常に重要である。本報告では、波面合成法を用いた近接三次元音場再生技術の原理を Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式から導出し、2 種類の手法 (双極子制御, 指向点制御) を提案する。提案した 2 手法の性能を計算機シミュレーションによって検討し、双極子制御手法は良い性能が得られ、指向点制御手法はスピーカに指向特性を設ければ良い性能が得られることを示す。

キーワード 三次元音場再生, 近接音場, 波面合成法, 計算機シミュレーション, 音響インテンシティ

## Theoretical study of near 3D sound field reproduction using wave field synthesis

Toshiyuki KIMURA<sup>†</sup>, Yoko YAMAKATA<sup>†</sup>, and Michiaki KATSUMOTO<sup>†</sup>

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

4-2-1, Nukui-kitamachi, Koganei, Tokyo, 184-8795 Japan

E-mail: †{t-kimura,yamakata,katumoto}@nict.go.jp

**Abstract** It is very important to develop near 3D sound field reproduction techniques in order to realize the ultra-realistic communication such as 3D TV and 3D tele-conference. In this report, the principle of the near 3D sound field reproduction technique using wave field synthesis is defined from Kirchhoff-Helmholtz integral equation and two methods (dipole control method and directional point control method) are proposed. The performance of two proposed methods is studied by computer simulation and it is shown that the dipole control method has good performance and that the directional point control method has good performance if the directivity of loudspeakers is unidirectional or shotgun.

**Key words** 3D sound field reproduction, Near sound field, Wave field synthesis, Computer simulation, Sound intensity

### 1. はじめに

独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) では、2006 年 4 月から図 1 に示すような超臨場感コミュニケーション技術に関する研究を進めている [1], [2]. このように、立体映像技術や三次元音場再生技術によって三次元空間上の映像や音響をよりリアルに表現することができれば、今までの映像・音響メディアでは実現できなかったより臨場感のあるコミュニケーション (立体テレビや立体遠隔通信会議など) が可能になる。このような超臨場感コミュニケーションを聴覚的に実現するための三次元音場再生技術としてはバイノーラル [3], トランスオーラル [4]~[9], ステレオダイポール [10], 波面合成法 [11]~[18], 境界音場制御 [19]~[23] が挙げられるが、我々はその中の波面合成法に着目し、研究を行っている。

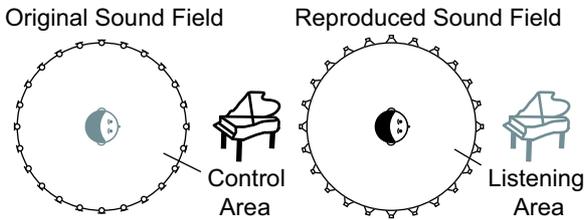
波面合成法は原音場内に設定した制御領域の境界面上に配置したマイクロホンアレイで音を収録し、再生音場内に設定した聴取領域の境界面上に配置したスピーカアレイで音を再生することによって、Huygens の原理に基づき制御領域の波面を聴取領域で忠実に合成する三次元音場再生技術である。その際、マイクロホンとスピーカはそれぞれの領域で同じ位置にしておく。この技術は聴取者の両耳位置ではなく三次元空間上の領域の音場を制御するので、聴取者はヘッドホンのような音響デバイスを装着せずに領域内の好きな場所で音を聞くことができる。

Huygens の原理は数学的には Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式で表すことができ [24], 波面合成法はこの方程式に従って構築されている。しかし、従来の波面合成システムでは図 2(a) に示すようにスピーカを聴取者の周りに配置するので、聴取者は音源の周りで音を聞くことができなかった。一方、今回提案する



図1 立体映像及び三次元音場再生を用いた超臨場感コミュニケーションの将来イメージ[1]  
Fig.1 Future image of ultra-realistic communication using 3D video and 3D sound field reproduction [1].

### (a) Conventional System



### (b) Proposed System

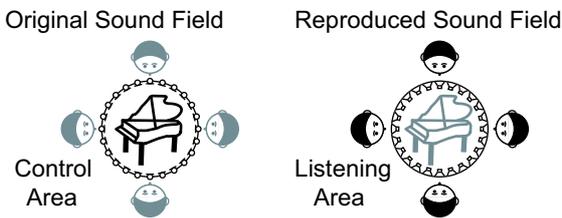


図2 従来及び提案システムにおける原音場及び再生音場

Fig.2 Original sound field and reproduced sound field in conventional and proposed systems.

システムは図2(b)に示すように聴取者が音源の周りで音を聞くことができるシステムであるので、制御領域及び聴取領域が従来システムとは反対になる。従来のシステムにおいて波面が忠実に合成される条件は理論的に検討されてきたが[18]、提案システムにおいては波面が忠実に合成される条件は理論的に検討

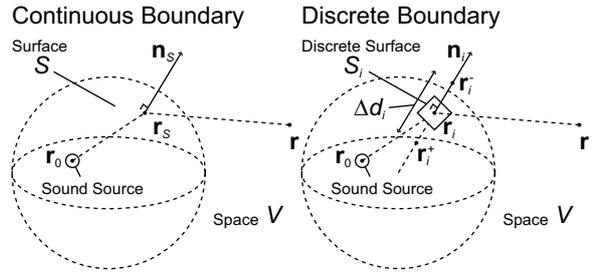


図3 Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式における座標系  
Fig.3 Coordinates in Kirchhoff-Helmholtz integral equation.

されていない。さらに、このシステムは音源から聴取者までの距離が1m以内である近接音場を対象としているが、その場合における条件も検討されていない。

そこで、本報告では聴取者が音源の周りの近接位置で音を聞くことができるようにするための近接三次元音場再生技術を波面合成法に基いて提案する。第2章では近接三次元音場再生技術の原理を Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式から導出し、2種類の手法(双極子制御, 指向点制御)を提案する。第3章では提案した2種類の手法の性能を計算機シミュレーションによって検討する。

## 2. 近接三次元音場再生技術の原理

### 2.1 Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式

図3の左側に示すように、連続境界面  $S$  内に音源が存在し、 $S$  上の点の位置ベクトルを  $\mathbf{r}_s$ 、 $S$  の外側の空間  $V$  上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ように表される。

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{4\pi} \oint_S \left\{ \frac{\partial P(\mathbf{r}_s, \omega)}{\partial \mathbf{n}_s} \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} - P(\mathbf{r}_s, \omega) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_s} \left( \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right) \right\} dS \quad (1)$$

但し、 $k$  は波数、 $\mathbf{n}_s$  は  $\mathbf{r}_s$  における境界面の外側方向への法線単位ベクトルを表す。つまり、(1)式は  $\mathbf{r}_s$  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れば空間  $V$  上の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には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3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。

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^M \left\{ \frac{\partial P(\mathbf{r}_i, \omega)}{\partial \mathbf{n}_i} \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} - P(\mathbf{r}_i, \omega) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_i} \left( \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \right) \right\} \Delta S_i \quad (2)$$

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  $\mathbf{r}_i$  における境界面の外側方向への法線単位ベクトルである。つまり、(2)式は  $M$  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れば空間  $V$  上の音圧が合成できることを示している。

## 2.2 双極子制御手法

以下の式のように音圧傾度  $\frac{\partial P(\mathbf{r}_i, \omega)}{\partial \mathbf{n}_i}$  及び音圧  $P(\mathbf{r}_i, \omega)$  を近傍点による音圧差分及び音圧平均で近似する。

$$\frac{\partial P(\mathbf{r}_i, \omega)}{\partial \mathbf{n}_i} \approx \frac{P(\mathbf{r}_i^+, \omega) - P(\mathbf{r}_i^-, \omega)}{\Delta d_i} \quad (3)$$

$$P(\mathbf{r}_i, \omega) \approx \frac{P(\mathbf{r}_i^+, \omega) + P(\mathbf{r}_i^-, \omega)}{2} \quad (4)$$

但し,  $\mathbf{r}_i^+$ ,  $\mathbf{r}_i^-$  は図3の右側に示すように  $\mathbf{r}_i$  の内側及び外側の近傍点の位置ベクトル,  $\Delta d_i$  は近傍点間の距離である。さらに, 以下の式のようにダイポール音源及びモノポール音源を近傍点上の2つのモノポール音源で近似する。

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_i} \left( \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \right) \approx \frac{1}{\Delta d_i} \left( \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^+|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^+|} - \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^-|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^-|} \right) \quad (5)$$

$$\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^+|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^+|} + \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^-|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^-|} \right) \quad (6)$$

(3)-(6) 式を (2) 式に代入すると, 以下の式が得られる。

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^M \left\{ P(\mathbf{r}_i^+, \omega) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^+|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^+|} - P(\mathbf{r}_i^-, \omega) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^-|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i^-|} \right\} \frac{\Delta S_i}{\Delta d_i} \quad (7)$$

つまり, (7) 式は  $M$  個の点  $\mathbf{r}_i^-$  上で大きさ  $P(\mathbf{r}_i^+, \omega)$  のモノポール音源,  $M$  個の点  $\mathbf{r}_i^+$  上で大きさ  $-P(\mathbf{r}_i^-, \omega)$  のモノポール音源を再生すれば空間  $V$  上の音圧が合成できることを示している。

(7) 式に基いた近接三次元音場再生システム (以下これを「双極子制御手法」と呼ぶ) の構成を図4(a)に示す。まず, 原音場において音源の周りの境界面上に計  $M$  個の無指向性マイクロホン対を配置し, 音を収録する。次に, 再生音場においてマイクロホンと同じ位置に計  $M$  個の無指向性スピーカ対を配置し, 収録した音を加工して再生する。すると, 境界面の外側で波面が合成されるので, 境界の外側にいる聴取者はあたかも境界内で音源が鳴っているように感じる。

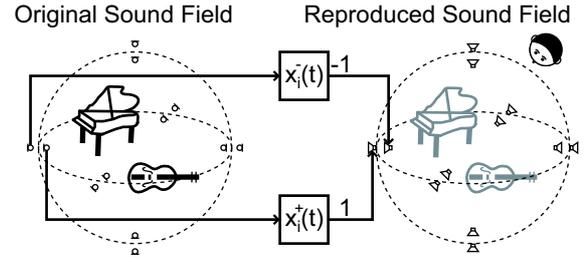
## 2.3 指向点制御手法

音圧傾度  $\frac{\partial P(\mathbf{r}_i, \omega)}{\partial \mathbf{n}_i}$  を以下のように近似する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(\mathbf{r}_i, \omega)}{\partial \mathbf{n}_i} &= \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_i} \left( \frac{Ae^{-jk|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|}}{|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|} \right) \\ &= -\frac{Ae^{-jk|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|}}{|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|^2} \left( \frac{1}{|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|} + jk \right) \cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0) \\ &= -P(\mathbf{r}_i, \omega) \left( \frac{1}{|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|} + jk \right) \cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0) \\ &\approx -jkP(\mathbf{r}_i, \omega) \cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0) \left( \text{if } k \gg \frac{1}{|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_0|} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

但し,  $\mathbf{r}_0$ ,  $A$  は原音場上の音源の位置ベクトルと振幅,  $(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0)$  はベクトル  $\mathbf{n}_i$  と  $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0$  がなす角度を表す。同じようにしてダイポール音源も以下のように近似する。

## (a) Dipole Control



## (b) Directional Point Control

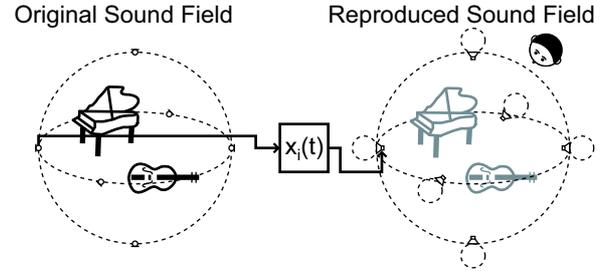


図4 双極子制御手法及び指向点制御手法による近接三次元音場再生システム

Fig.4 Near 3D sound field reproduction system based on dipole control method and directional point control method.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_i} \left( \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \right) &= -\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|^2} \left( \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} + jk \right) \cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r}) \\ &\approx -jk \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r}) \left( \text{if } k \gg \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

但し,  $(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r})$  はベクトル  $\mathbf{n}_i$  と  $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}$  がなす角度を表す。(8)-(9) 式を (2) 式に代入すると, 以下の式が得られる。

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{jk}{4\pi} \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \{ \cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r}) - \cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0) \} \Delta S_i \quad (10)$$

この式は「Fresnel-Kirchhoff の回折公式」として知られているものである [25]。さらに, 今回のシステムの場合では  $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0$  の方向は  $\mathbf{n}_i$  とほぼ同じ方向になり,  $\cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0) \approx 1$  とみなすことができる。また,  $\cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_i - \mathbf{r}) = \cos[\pi - (\mathbf{n}_i, \mathbf{r} - \mathbf{r}_i)]$  なので, (10) 式は以下のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} P(\mathbf{r}, \omega) &\approx \frac{jk}{4\pi} \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \{ -\cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r} - \mathbf{r}_i) - 1 \} \Delta S_i \\ &\approx \frac{jk}{4\pi} \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) D_i \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i|} \Delta S_i \end{aligned} \quad (11)$$

但し,  $D_i \approx -\cos(\mathbf{n}_i, \mathbf{r} - \mathbf{r}_i) - 1$  は  $\mathbf{r}_i$  に配置した音源の指向特性を表す。つまり, (11) 式は  $M$  個の点  $\mathbf{r}_i$  上で大きさ  $P(\mathbf{r}_i, \omega)$  の指向性音源を再生すれば空間  $V$  上の音圧が合成できることを示している。

(11) 式に基いた近接三次元音場再生システム (以下これを「指向点制御手法」と呼ぶ) の構成を図4(b)に示す。まず, 原音場において音源の周りの境界面上に計  $M$  個の無指向性マイクロ

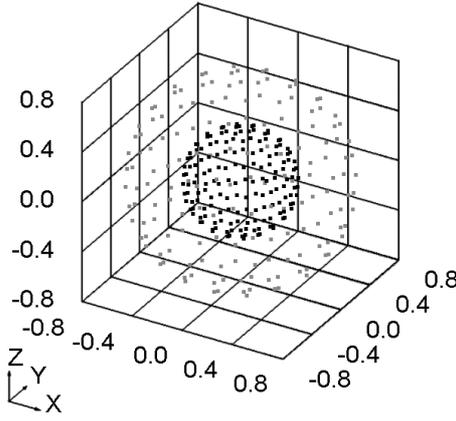


図5 計算機シミュレーションに用いた制御点(黒)及び合成点(灰)の位置

Fig. 5 Position of control points (black) and synthesis points (gray) used in computer simulation.

ホンを配置し、音を収録する。次に、再生音場においてマイクロホンと同じ位置に計  $M$  個の指向性スピーカを配置し、収録した音を再生する。すると、境界面の外側で波面が合成されるので、境界の外側にいる聴取者はあたかも境界内で音源が鳴っているように感じる。

### 3. 計算機シミュレーション

提案した2種類の手法(双極子制御手法, 指向点制御手法)の性能を評価するために計算機シミュレーションを実施した。

#### 3.1 シミュレーション環境

図5に示すように162点の制御点  $\mathbf{r}_i$  を半径0.4 mの球面上に、162点の合成点  $\mathbf{r}$  を半径0.8 mの球面上に均等に配置した。

音源信号  $s(t)$  は以下の式のように振幅  $A$ , 周波数  $f$  の正弦波信号とした。

$$s(t) = A \sin 2\pi f t \quad (12)$$

原音場における合成点  $\mathbf{r}$  での音圧  $p_0(\mathbf{r}, f, t)$  は以下のように表わされる。

$$p_0(\mathbf{r}, f, t) = \frac{1}{d_0} s\left(t - \frac{d_0}{c}\right) = \frac{A}{d_0} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{d_0}{c}\right)\right\} \quad (13)$$

但し,  $d_0 (= |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|)$  は音源から合成点までの距離,  $\mathbf{r}_0$  は音源の位置ベクトル,  $c$  は音速を表す。

双極子制御手法を用いる場合,  $i$  番目のマイクロホン対で収録する信号  $x_i^+(t)$ ,  $x_i^-(t)$  は以下のように表される。

$$x_i^+(t) = \frac{1}{d_{i0}^+} s\left(t - \frac{d_{i0}^+}{c}\right) = \frac{A}{d_{i0}^+} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{d_{i0}^+}{c}\right)\right\} \quad (14)$$

$$x_i^-(t) = \frac{1}{d_{i0}^-} s\left(t - \frac{d_{i0}^-}{c}\right) = \frac{A}{d_{i0}^-} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{d_{i0}^-}{c}\right)\right\} \quad (15)$$

但し,  $d_{i0}^+ (= |\mathbf{r}_i^+ - \mathbf{r}_0|)$ ,  $d_{i0}^- (= |\mathbf{r}_i^- - \mathbf{r}_0|)$  は音源から  $i$  番目のマイクロホン対までの距離,  $\mathbf{r}_i^+$ ,  $\mathbf{r}_i^-$  は以下の式で定義される  $i$  番目のマイクロホン対の位置ベクトルを表す。

$$\mathbf{r}_i^+ = \mathbf{r}_i - \frac{\Delta d_i}{2} \mathbf{n}_i \quad (16)$$

$$\mathbf{r}_i^- = \mathbf{r}_i + \frac{\Delta d_i}{2} \mathbf{n}_i \quad (17)$$

但し,  $\Delta d_i$  はマイクロホン対間の距離である。従って, 再生音場において双極子制御手法によって合成点  $\mathbf{r}$  で合成される音圧  $p(\mathbf{r}, f, t)$  は  $x_i^+(t)$ ,  $x_i^-(t)$  から以下のように表される。

$$\begin{aligned} p(\mathbf{r}, f, t) &= \sum_{i=1}^M \left\{ \frac{1}{d_i^-} x_i^+\left(t - \frac{d_i^-}{c}\right) - \frac{1}{d_i^+} x_i^-\left(t - \frac{d_i^+}{c}\right) \right\} \\ &= \sum_{i=1}^M \left[ \frac{A}{d_i^- d_{i0}^+} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{d_i^- + d_{i0}^+}{c}\right)\right\} \right. \\ &\quad \left. - \frac{A}{d_i^+ d_{i0}^-} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{d_i^+ + d_{i0}^-}{c}\right)\right\} \right] \quad (18) \end{aligned}$$

但し,  $M$  はスピーカ対の総数,  $d_i^+ (= |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i^+|)$ ,  $d_i^- (= |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i^-|)$  は  $i$  番目のスピーカ対から合成点までの距離を表す。

指向点制御手法を用いる場合,  $i$  番目のマイクロホンで収録する信号  $x_i(t)$  は以下のように表される。

$$x_i(t) = \frac{1}{d_{i0}} s\left(t - \frac{d_{i0}}{c}\right) = \frac{A}{d_{i0}} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{d_{i0}}{c}\right)\right\} \quad (19)$$

但し,  $d_{i0} (= |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|)$  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を表す。従って, 再生音場において指向点制御手法によって合成点  $\mathbf{r}$  で合成される音圧  $p(\mathbf{r}, f, t)$  は  $x_i(t)$  から以下のように表される。

$$\begin{aligned} p(\mathbf{r}, f, t) &= \sum_{i=1}^M \frac{D_i}{d_i} x_i\left(t - \frac{d_i}{c}\right) \\ &= \sum_{i=1}^M \frac{D_i A}{d_i d_{i0}} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{d_i + d_{i0}}{c}\right)\right\} \quad (20) \end{aligned}$$

但し,  $M$  はスピーカの総数,  $d_i (= |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|)$  は  $i$  番目のスピーカから合成点までの距離,  $D_i$  は  $i$  番目のスピーカの指向特性を表す。

計算機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。制御点間隔は最大13 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, 1000 Hz以下において波面を忠実に合成するための空間サンプリング定理を満たしている。また, 制御点  $\mathbf{r}_i$ , 合成点  $\mathbf{r}$  は3次元座標上で以下のように設定した。

$$\mathbf{r}_i = (r \cos \theta_i \cos \phi_i, r \sin \theta_i \cos \phi_i, r \sin \theta_i \sin \phi_i)^T \quad (i = 1 \dots M) \quad (21)$$

$$\mathbf{r} = (R \cos \theta_j \cos \phi_j, R \sin \theta_j \cos \phi_j, R \sin \theta_j \sin \phi_j)^T \quad (j = 1 \dots N) \quad (22)$$

但し,  $\theta_i$ ,  $\phi_i$  は  $i$  番目の制御点の方位角と仰角,  $\theta_j$ ,  $\phi_j$  は  $j$  番目の合成点の方位角と仰角を表す。一方, スピーカの指向特性  $D_i$  は以下の式によって設定した。

$$\text{(無指向性)} D_i = 1 \quad (23)$$

$$\text{(単一指向性)} D_i = \frac{1}{2} (1 + \cos \theta_{is}) \quad (24)$$

$$\text{(超指向性)} D_i = \begin{cases} \cos \theta_{is} & (|\theta_{is}| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta_{is}| > 90^\circ) \end{cases} \quad (25)$$

表 1 計算機シミュレーションにおけるパラメータ条件

Table 1 Parametric conditions in computer simulation.

Source amplitude ( $A$ )	1
Source frequency ( $f$ )	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 Hz
Source position vector ( $\mathbf{r}_0$ )	$(0, 0, 0)^T$ $(0.3, 0, 0)^T$ $(0, 0.3, 0)^T$ $(0, 0, 0.3)^T$
Sound velocity ( $c$ )	340 m/s
Total number of control points ( $M$ )	162
Radius of control points ( $r$ )	0.4 m
Total number of synthesis points ( $N$ )	162
Radius of synthesis points ( $R$ )	0.8 m
Normal unit vector ( $\mathbf{n}_i$ )	$\mathbf{r}_i/ \mathbf{r}_i $
Neighbor distance ( $\Delta d_i$ )	0.002 m
Directivity ( $D_i$ )	Omnidirectional, Unidirectional, Shotgun

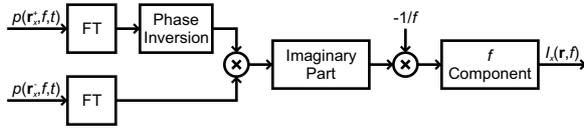


図 6 計算機シミュレーションにおける音響インテンシティ算出のブロック図 (再生音場,  $x$  成分の場合)  
Fig. 6 Block diagram of the calculation of sound intensity in computer simulation (reproduced sound field,  $x$  component).

但し,  $\cos\theta_{is} = \frac{\mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_s)}{|\mathbf{n}_i| |\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|}$  である。

さらに, 合成点  $\mathbf{r}$  における音圧  $p_0(\mathbf{r}, f, t)$ ,  $p(\mathbf{r}, f, t)$  に加えて, 音の到来方向を評価するために音響インテンシティを算出した。音響インテンシティは図 6 に示すようなクロススペクトル法により算出した [26]。但し,  $I_x(\mathbf{r}, f)$  は  $x$  成分の音響インテンシティ,  $p(\mathbf{r}_x^+, f, t)$ ,  $p(\mathbf{r}_x^-, f, t)$  は  $\mathbf{r}_x^+$ ,  $\mathbf{r}_x^-$  における音圧である。  $\mathbf{r}_x^+$ ,  $\mathbf{r}_x^-$  は以下の式のように設定した。

$$\mathbf{r}_x^+ = \mathbf{r} + (\Delta, 0, 0)^T \quad (26)$$

$$\mathbf{r}_x^- = \mathbf{r} - (\Delta, 0, 0)^T \quad (27)$$

但し,  $\Delta$  は 0.001 m とした。  $x$  成分に加えて  $y$  成分,  $z$  成分の音響インテンシティ  $I_y(\mathbf{r}, f)$ ,  $I_z(\mathbf{r}, f)$  を算出し, 得られた 3 次元の音響インテンシティ  $I(\mathbf{r}, f) = \{I_x(\mathbf{r}, f), I_y(\mathbf{r}, f), I_z(\mathbf{r}, f)\}^T$  を評価に用いた。また, 原音場における音響インテンシティ  $I_0(\mathbf{r}, f) = \{I_{x0}(\mathbf{r}, f), I_{y0}(\mathbf{r}, f), I_{z0}(\mathbf{r}, f)\}^T$  も同様に算出した。

### 3.2 シミュレーション結果

評価は 2 種類の指標で行った。一つは以下の式で定義される平均二乗音圧の SNR である。これは再生音場における音圧分布が原音場とどれくらい異なるかを表す指標で, 値が大きいほど性能が良いと言える。

$$\text{SNR}(f)[\text{dB}] = 10 \log_{10} \frac{\sum_{\mathbf{r}} \{p_0(\mathbf{r}, f)\}^2}{\sum_{\mathbf{r}} \{p(\mathbf{r}, f) - p_0(\mathbf{r}, f)\}^2} \quad (28)$$

但し,  $p_0(\mathbf{r}, f)$ ,  $p(\mathbf{r}, f)$  は以下の式で定義される原音場及び再生音場における平均二乗音圧である。

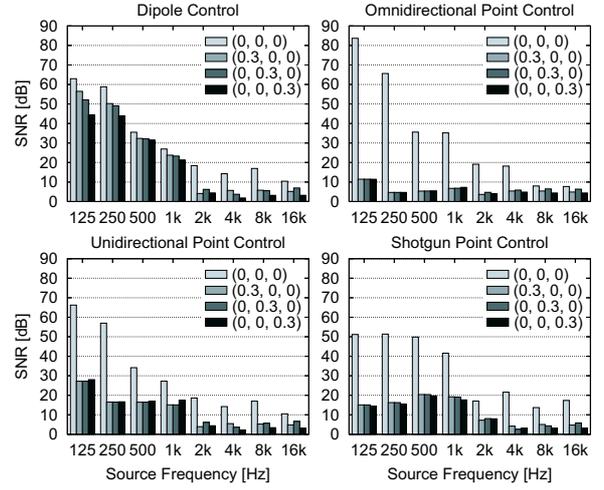


図 7 提案手法における SNR

Fig. 7 SNRs in proposed methods.

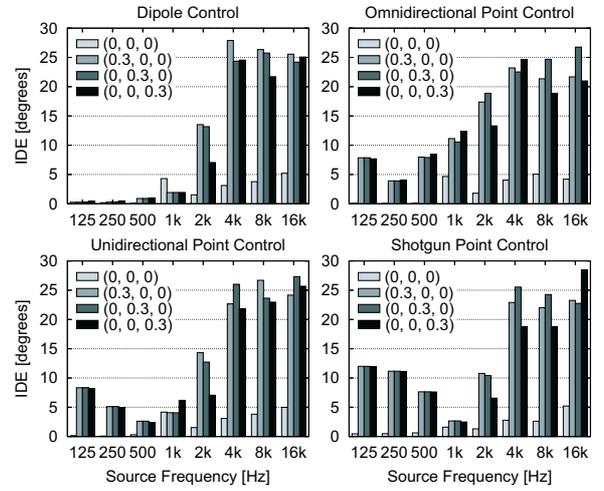


図 8 提案手法におけるインテンシティ方向誤差

Fig. 8 Intensity direction errors in proposed methods.

$$p_0(\mathbf{r}, f) = \sqrt{\int_0^1 \{p_0(\mathbf{r}, f, t)\}^2 dt} \quad (29)$$

$$p(\mathbf{r}, f) = \sqrt{\int_0^1 \{p(\mathbf{r}, f, t)\}^2 dt} \quad (30)$$

また,  $p_0(\mathbf{r}, f)$  と  $p(\mathbf{r}, f)$  を  $\mathbf{r}$  全体で正規化を行ってから SNR の計算を実施した。

もう一つは以下の式で定義されるインテンシティ方向誤差である。これは再生音場における音の方向が原音場とどれくらい異なるのかを表す指標で, 0 度に近いほど性能が良いと言える。

$$\theta(f)[\text{degrees}] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{\mathbf{r}} \left[ \cos^{-1} \left\{ \frac{I(\mathbf{r}, f) \cdot I_0(\mathbf{r}, f)}{|I(\mathbf{r}, f)| |I_0(\mathbf{r}, f)|} \right\} \right]^2} \quad (31)$$

但し,  $I_0(\mathbf{r}, f)$ ,  $I(\mathbf{r}, f)$  は原音場及び再生音場の音響インテンシティ,  $N (= 162)$  は合成点の総数である。

計算機シミュレーションにおける提案手法ごとの SNR 及びインテンシティ方向誤差の結果を図 7-8 に示す。

音源周波数が 2000 Hz 以上の場合, 全ての手法において SNR

は常に 20 dB 以下で、インテンシティ方向誤差は 20 度以上にまでなっている。これは計算機シミュレーションに用いた制御点の間隔のために 2000 Hz 以上では空間サンプリング定理が満たされていないからであると考えられる。

無指向性のスピーカを用いた指向点制御手法においては音源が中心以外のところでは 1000 Hz 以下においてインテンシティ方向誤差は 12.5 度以下であるけれども、SNR は 12 dB 以下である。従って、この手法によってシステムを構築した場合、音響インテンシティが再現されているために聴取者は音がスピーカアレイ内のどこで鳴っているかを判別することはできるが、音圧分布が再現されていないために聴取者がスピーカアレイの周りを動き回ったときに臨場感を感じなくなると考えられる。

それに対して、超指向性のスピーカを用いた指向点制御手法では 1000 Hz 以下において SNR は 14.3 dB 以上で、インテンシティ方向誤差は 12.0 度以下である。同じように、単一指向性のスピーカを用いた指向点制御手法では 1000 Hz 以下において SNR は 15.0 dB 以上で、インテンシティ方向誤差は 8.4 度以下である。ゆえに、これらの手法によってシステムを構築した場合、音圧分布や音響インテンシティが十分に再現されているために、聴取者は音がスピーカアレイ内のどこで鳴っているかを判別することができるし、スピーカアレイの周りを動き回ったときでも臨場感を感じるようになると考えられる。

さらに、双極子制御手法の場合、1000 Hz 以下において SNR は常に 21.3 dB 以上で、インテンシティ方向誤差は常に 4.3 度以下である。ゆえに、この手法は指向点制御手法に比べて 2 倍のマイクロホンとスピーカを必要とするが、この手法によってシステムを構築した場合、音圧分布や音響インテンシティが非常に良く再現されているために、聴取者はスピーカアレイの周りを動き回ったときにより臨場感を感じるようになると考えられる。

#### 4. ま と め

本報告では立体テレビや立体遠隔通信会議などの超臨場感コミュニケーションを実現するために、波面合成法を用いた近接三次元音場再生技術を提案した。Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式から原理を導出し、2 種類の手法(双極子制御, 指向点制御)を提案した。提案した 2 手法の性能を計算機シミュレーションによって検討したところ、双極子制御手法は良い性能が得られ、指向点制御手法はスピーカに指向特性を設ければ良い性能が得られることが分かった。

今後は今回提案した手法に基づいて実際にマイクロホンアレイ及びスピーカアレイを製作し、実環境における提案手法の波面合成の性能や聴取実験による提案手法の有効性を検討していく予定である。

#### 文 献

[1] 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。  
<http://www2.nict.go.jp/x/x171/>。  
[2] 榎並和雅：“超臨場感システムの研究推進に向けて - (独) 情報通信研究機構の研究と、産学官フォーラム URCF の活動 - ”, 画像ラボ, **18**, 9, pp. 41-45 (2007)。  
[3] 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)。  
[4] 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)。  
[5] M. R. Schroeder, D. Gottlob and K. F. Siebrasse: “Comparative study of european concert halls: Correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters”, Journal of Acoustical Society of America, **56**, 4, pp. 1195-1201 (1974)。  
[6] M. Miyoshi and Y. Kaneda: “Inverse filtering of room acoustics”, IEEE Transaction on Acoustics, Speech and Signal Processing, **36**, 2, pp. 145-152 (1988)。  
[7] 三好正人, 小泉宣夫：“多数のスピーカを用いたトランスオーラル系の構成について”, 日本音響学会研究発表会講演論文集, No. 1-7-1, pp. 371-372 (1991)。  
[8] 神沼充伸, 伊勢史郎, 鹿野清宏：“周波数領域における最小ノルム解を利用した多チャンネル音場再現システムにおける逆フィルタの設計”, 日本音響学会誌, **57**, 3, pp. 175-183 (2001)。  
[9] 古見芳幸, 徳刈治英, 島田正治：“立体音像再生に関するスピーカ配置の検討”, 電子情報通信学会論文誌, **J83-A**, 7, pp. 920-923 (2000)。  
[10] 浜田晴夫, 得能宏則, O. Kirkeby, P. A. Nelson: “新しい音場再生方式 (Stereo Dipole) に関する研究”, 電子情報通信学会技術研究報告, No. EA96-2, pp. 9-17 (1996)。  
[11] 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)。  
[12] 伊藤毅：“音響工学原論”, pp. 587-589, コロナ社, 東京 (1973)。  
[13] M. Camras: “Approach to recreating a sound field”, J. Acoust. Soc. Am., **43**, 6, pp. 1425-1431 (1968)。  
[14] 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)。  
[15] 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)。  
[16] 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)。  
[17] 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)。  
[18] 木村敏幸, 箕一彦：“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)。  
[19] 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)。  
[20] 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 (1990)。  
[21] 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)。  
[22] S. Takane, Y. Suzuki and T. Sone: “A new method for global sound reproduction based on Kirchhoff's integral equation”, ACUSTICA - Acta Acustica, **85**, 2, pp. 250-257 (1999)。  
[23] 伊勢史郎, 豊田政弘, 榎本成悟, 中村哲：“深いコミュニケーションを可能とする空間創造の試み-プロジェクトの基本方針-”, 日本音響学会研究発表会講演論文集, No. 2-1-20, pp. 585-586 (2007)。  
[24] M. Born and E. Wolf: “Principles of Optics”, pp. 418-421, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1999)。  
[25] M. Born and E. Wolf: “Principles of Optics”, pp. 421-425, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1999)。  
[26] 橋秀樹, 矢野博夫：“環境騒音・建築音響の測定”, pp. 20-23, コロナ社, 東京 (2004)。