

# 指向性スピーカと波面合成法を用いた近接三次元音場再生システムの性能比較評価

木村 敏幸<sup>†</sup> 山肩 洋子<sup>††</sup> 勝本 道哲<sup>†</sup> 岡本 拓磨<sup>†††</sup> 矢入 聡<sup>††††</sup>  
岩谷 幸雄<sup>†††</sup> 鈴木 陽一<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>(独) 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

<sup>††</sup> 京都大学学術情報メディアセンター 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

<sup>†††</sup> 東北大学電気通信研究所/大学院情報科学研究科 〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1

<sup>††††</sup> 仙台高等専門学校電気システム工学科 〒981-1239 宮城県名取市愛島塩手字野田山48番地

E-mail: <sup>†</sup>{t-kimura,katumoto}@nict.go.jp, <sup>††</sup>yamakata@media.kyoto-u.ac.jp,

<sup>†††</sup>{okamoto,iwaya,suzuki}@ais.riec.tohoku.ac.jp, <sup>††††</sup>yairi@sendai-nct.ac.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、先に構築した指向性スピーカと波面合成法を用いた近接三次元音場再生システムの音像定位性能を評価するために、2種類の手法（計算機シミュレーション、音響測定）による音像位置推定を実施し、推定した結果を2手法間で比較する。

**キーワード** 超臨場感コミュニケーション、近接三次元音場再生、指向性スピーカ、波面合成法、計算機シミュレーション、音響測定、音像位置推定

## Comparative performance evaluation of near 3D sound field reproduction system using directional loudspeakers and wave field synthesis

Toshiyuki KIMURA<sup>†</sup>, Yoko YAMAKATA<sup>††</sup>, Michiaki KATSUMOTO<sup>†</sup>, Takuma OKAMOTO<sup>†††</sup>,  
Satoshi YAIRI<sup>††††</sup>, Yukio IWAYA<sup>†††</sup>, and Yôiti SUZUKI<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

<sup>††</sup> Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University  
Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

<sup>†††</sup> Research Institute of Electrical Communication / Graduate School of Information Sciences, Tohoku University  
2-1-1, Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577 Japan

<sup>††††</sup> Department of Electrical Engineering, Sendai National College of Technology  
48, Nodayama, Medeshima-shiote, Natori, Miyagi, 981-1239 Japan

E-mail: <sup>†</sup>{t-kimura,katumoto}@nict.go.jp, <sup>††</sup>yamakata@media.kyoto-u.ac.jp,

<sup>†††</sup>{okamoto,iwaya,suzuki}@ais.riec.tohoku.ac.jp, <sup>††††</sup>yairi@sendai-nct.ac.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 television and 3D tele-conference. In this report, in order to evaluate the performance of sound image localization in the developed near 3D sound field reproduction system using directional loudspeakers and wave field synthesis, the positions of sound images were estimated by two methods (computer simulation and acoustical measurement) and the estimated results were compared between two methods.

**Key words** Ultra-realistic communication, Near 3D sound field reproduction, Directional loudspeaker, Wave field synthesis, Computer simulation, Acoustical measurement, Sound image position estimation



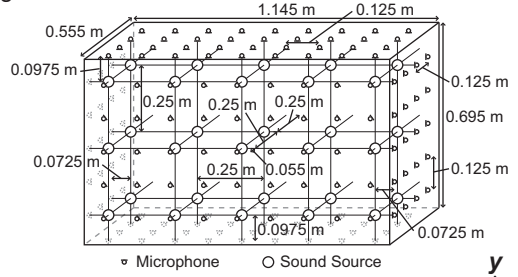
図1 超臨場感コミュニケーションの将来イメージ [1]  
Fig. 1 Future image of ultra-realistic communications [1].

## 1. はじめに

独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) では図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、立体映像技術や立体音響技術によって三次元空間上に映像や音響をよりリアルに表現し、周囲から鑑賞することができるようになれば、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) が可能になると期待される. 我々は三次元音場再生技術の一つである波面合成法 [3]~[5] を利用して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研究を行っている.

我々は超臨場感コミュニケーションを実現するための立体音響技術として、今までに指向性スピーカと波面合成法を用いることによって聴取者が音源の周りで音を聞くことができる近接三次元音場再生技術を提案し [6], 実際に包囲型マイクロホンアレイと放射型スピーカアレイを用いてシステムを実装してきた [7]. 本報告では、実装したシステムの音像定位性能を評価するために、まず、実装した放射型スピーカアレイと同じ条件において計算機シミュレーションによる音像位置推定を行う、さらに、実装したシステムにおいて音響測定による音像位置推定を行い、推定した結果を計算機シミュレーションによる結果と比較する.

## Original Sound Field



## Reproduced Sound Field

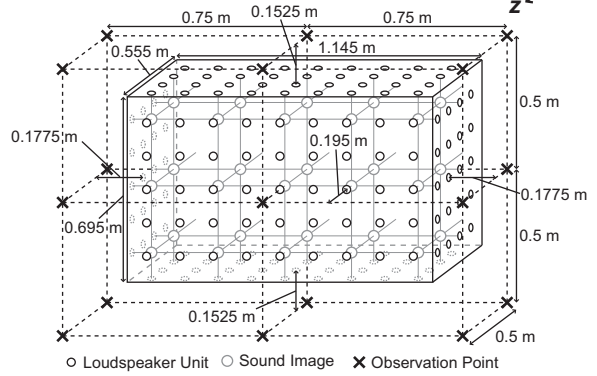


図2 計算機シミュレーションにおける音源、音像、マイクロホン、スピーカユニット、観測点の位置

Fig. 2 Positions of the sound sources, sound images, microphones, loudspeaker units, and observation points used in the computer simulations.

## 2. 音像位置推定による性能評価

### 2.1 計算機シミュレーション

#### 2.1.1 シミュレーション環境

まず、図2の上側に示すように、原音場において157個のマイクロホンで囲まれた空間内に30個の音源を配置した. その際、原音場は反射音のない自由音場とした. 一方、図2の下側に示すように、再生音場においてマイクロホンと同じ位置に157個のスピーカユニットを配置し、放射型スピーカアレイを構成した. 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. さらに、放射型スピーカアレイの外側に17点の観測点を配置した.

音源信号  $s(t)$  はオクターブバンドノイズ (中心周波数:  $f_{\text{cent}}$ ) とした.  $i$  番目のマイクロホン信号  $x_i(t)$  は音源信号  $s(t)$  と音源からマイクロホンまでのインパルス応答  $g_i(t)$  により以下のように表される.

$$x_i(t) = g_i(t) * s(t) = \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|} s\left(t - \frac{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}{c}\right) \quad (1)$$

但し、 $*$  は畳み込み演算、 $\mathbf{r}_i$  と  $\mathbf{r}_0$  は  $i$  番目のマイクロホンと音源の位置ベクトル、 $c$  は音速を表す. 従って、 $j$  番目の観測点  $\mathbf{R}_j$  での瞬時音圧  $p(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}}, t)$  は  $x_i(t)$  から以下のように表される.

$$\begin{aligned} p(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}}, t) &= \sum_{i=1}^M \frac{D_{si}}{|\mathbf{R}_j - \mathbf{r}_i|} x_i\left(t - \frac{|\mathbf{R}_j - \mathbf{r}_i|}{c}\right) \\ &= \sum_{i=1}^M \frac{D_{si}}{|\mathbf{R}_j - \mathbf{r}_i| |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|} s\left(t - \frac{|\mathbf{R}_j - \mathbf{r}_i| + |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}{c}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

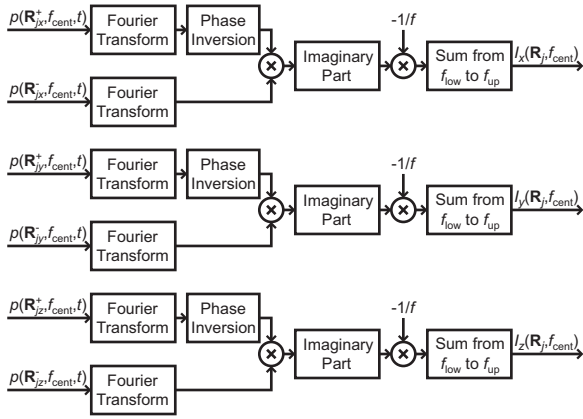


図3 計算機シミュレーションにおける音響インテンシティ算出のブロック図

Fig.3 Block diagram showing the calculation of sound intensities in the computer simulation.

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 the computer simulation.

Central frequency of sound sources ( $f_{cent}$ )	250, 500, 1000
Lower frequency of sound sources ( $f_{low}$ )	$f_{cent} \div \sqrt{2}$
Upper frequency of sound sources ( $f_{up}$ )	$f_{cent} \times \sqrt{2}$
Sound velocity ( $c$ )	340 m/s
Number of microphones and loudspeaker units ( $M$ )	157
Radiation directivity of loudspeaker units ( $D_{si}$ )	Omnidirectional, Decay 20 dB, Unidirectional, Shotgun

但し,  $M$  はスピーカユニットの総数,  $D_{si}$  は  $i$  番目のスピーカユニットの放射指向性を表す。

観測点  $\mathbf{R}_j$  における瞬時音圧  $p(\mathbf{R}_j, f_{cent}, t)$  を算出するだけでは観測点における音像定位置能に相当する音源の到来方向を評価することはできない。一方, 音響インテンシティの方向は単一音源の到来方向に相当するので [8], 今回のシミュレーションでは, 音源の到来方向を評価するために, 観測点  $\mathbf{R}_j$  における音響インテンシティもさらに算出した。

音響インテンシティは図3に示すようなクロススペクトル法により算出した [9]。但し,  $I_x(\mathbf{R}_j, f_{cent})$ ,  $I_y(\mathbf{R}_j, f_{cent})$ ,  $I_z(\mathbf{R}_j, f_{cent})$  は音響インテンシティベクトル  $\mathbf{I}(\mathbf{R}_j, f_{cent})$  の  $x$ ,  $y$ ,  $z$  成分を表し,  $p(\mathbf{R}_{jx}^+, f_{cent}, t)$ ,  $p(\mathbf{R}_{jx}^-, f_{cent}, t)$ ,  $p(\mathbf{R}_{jy}^+, f_{cent}, t)$ ,  $p(\mathbf{R}_{jy}^-, f_{cent}, t)$ ,  $p(\mathbf{R}_{jz}^+, f_{cent}, t)$ ,  $p(\mathbf{R}_{jz}^-, f_{cent}, t)$  は6点 ( $\mathbf{R}_{jx}^+$ ,  $\mathbf{R}_{jx}^-$ ,  $\mathbf{R}_{jy}^+$ ,  $\mathbf{R}_{jy}^-$ ,  $\mathbf{R}_{jz}^+$ ,  $\mathbf{R}_{jz}^-$ ) における瞬時音圧である。6点は以下の式のように設定した。

$$\mathbf{R}_{jx}^+ = \mathbf{R}_j + (\Delta, 0, 0)^T, \mathbf{R}_{jx}^- = \mathbf{R}_j - (\Delta, 0, 0)^T \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_{jy}^+ = \mathbf{R}_j + (0, \Delta, 0)^T, \mathbf{R}_{jy}^- = \mathbf{R}_j - (0, \Delta, 0)^T \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_{jz}^+ = \mathbf{R}_j + (0, 0, \Delta)^T, \mathbf{R}_{jz}^- = \mathbf{R}_j - (0, 0, \Delta)^T \quad (5)$$

但し,  $\Delta$  は 0.001 m とした。

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。音源位置  $\mathbf{r}_0 = (r_{0x}, r_{0y}, r_{0z})^T$  と観測点位置  $\mathbf{R}_j = (R_{jx}, R_{jy}, R_{jz})^T$

表2 計算機シミュレーションにおける音源の位置座標

Table 2 Position coordinates of sound sources in the computer simulation.

Index	$r_{0x}$	$r_{0y}$	$r_{0z}$	Index	$r_{0x}$	$r_{0y}$	$r_{0z}$
1	0.5	0.25	0.25	16	0.5	0.25	0
2	0.5	0	0.25	17	0.5	0	0
3	0.5	-0.25	0.25	18	0.5	-0.25	0
4	0.25	0.25	0.25	19	0.25	0.25	0
5	0.25	0	0.25	20	0.25	0	0
6	0.25	-0.25	0.25	21	0.25	-0.25	0
7	0	0.25	0.25	22	0	0.25	0
8	0	0	0.25	23	0	0	0
9	0	-0.25	0.25	24	0	-0.25	0
10	-0.25	0.25	0.25	25	-0.25	0.25	0
11	-0.25	0	0.25	26	-0.25	0	0
12	-0.25	-0.25	0.25	27	-0.25	-0.25	0
13	-0.5	0.25	0.25	28	-0.5	0.25	0
14	-0.5	0	0.25	29	-0.5	0	0
15	-0.5	-0.25	0.25	30	-0.5	-0.25	0

表3 計算機シミュレーションにおける観測点の位置座標

Table 3 Position coordinates of observation points in the computer simulation.

$j$	$R_{jx}$	$R_{jy}$	$R_{jz}$	$j$	$R_{jx}$	$R_{jy}$	$R_{jz}$
1	0.75	0.5	0.5	10	0.75	0.5	0
2	0.75	0	0.5	11	0.75	0	0
3	0.75	-0.5	0.5	12	0.75	-0.5	0
4	0	0.5	0.5	13	0	0.5	0
5	0	0	0.5	14	0	-0.5	0
6	0	-0.5	0.5	15	-0.75	0.5	0
7	-0.75	0.5	0.5	16	-0.75	0	0
8	-0.75	0	0.5	17	-0.75	-0.5	0
9	-0.75	-0.5	0.5				

は3次元座標上で表2~3に示すように設定した。また, マイクロホン及びスピーカユニットの位置ベクトル  $\mathbf{r}_i$  は3次元座標上で以下のように設定した。

$$\mathbf{r}_i = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0.5725 \times (-1)^{i-1} \\ 0.125 \times Q(\text{fix}(\frac{i-1}{2}), 4) - 0.25 \\ 0.125 \times R(\text{fix}(\frac{i-1}{2}), 4) - 0.125 \end{pmatrix} & (i = 1 \sim 40) \\ \begin{pmatrix} 0.125 \times Q(\text{fix}(\frac{i-41}{2}), 4) - 0.5 \\ 0.3475 \times (-1)^{i-41} \\ 0.125 \times R(\text{fix}(\frac{i-41}{2}), 4) - 0.125 \end{pmatrix} & (i = 41 \sim 112) \\ \begin{pmatrix} 0.125 \times Q(i - 113, 5) - 0.5 \\ 0.125 \times R(i - 113, 5) - 0.25 \\ 0.305 \end{pmatrix} & (i = 113 \sim 157) \end{cases} \quad (6)$$

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。

スピーカユニットの放射指向性  $D_{si}$  は図4に示すような4種類を設定した。特に, Decay 20dB は実装した放射型スピーカアレイ [7] における 157 個のスピーカユニットの中で最も鋭い放射指向性を模擬している。定義式を以下の式に示す。

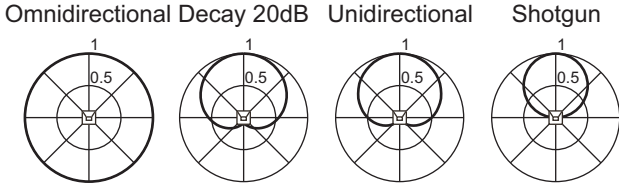


図4 計算機シミュレーションで用いたスピーカユニットの放射指向性パターン

Fig.4 Radiation directivity patterns of the loudspeaker units used in the computer simulation.

$$\text{(Omnidirectional)} \quad D_{si} = 1 \quad (7)$$

$$\text{(Decay 20dB)} \quad D_{si} = 0.55 + 0.45\cos\theta_{si} \quad (8)$$

$$\text{(Unidirectional)} \quad D_{si} = \frac{1 + \cos\theta_{si}}{2} \quad (9)$$

$$\text{(Shotgun)} \quad D_{si} = \begin{cases} \cos\theta_{si} & (|\theta_{si}| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta_{si}| > 90^\circ) \end{cases} \quad (10)$$

但し、 $\cos\theta_{si} = \frac{\mathbf{n}_{si}(\mathbf{R}_j - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{n}_{si}||\mathbf{R}_j - \mathbf{r}_i|}$  であり、 $\mathbf{n}_{si}$  は以下の式のように定義される。

$$\mathbf{n}_{si} = \begin{cases} \begin{pmatrix} (-1)^{i-1} & 0 & 0 \end{pmatrix}^T & (i = 1 \sim 40) \\ \begin{pmatrix} 0 & (-1)^{i-41} & 0 \end{pmatrix}^T & (i = 41 \sim 112) \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T & (i = 113 \sim 157) \end{cases} \quad (11)$$

算出した瞬時音圧  $p(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}}, t)$  及び音響インテンシティベクトル  $\mathbf{I}(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}})$  (但し、 $|\mathbf{I}(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}})| = 1$ ) から、以下の式のように音像位置  $\mathbf{r}_E$  を推定した。

$$\mathbf{r}_E = \frac{1}{FN} \sum_{f_{\text{cent}}}^{250,500,1000} \sum_{j=1}^N \left\{ \mathbf{R}_j - \frac{\mathbf{I}(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}})}{p(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}})} \right\} \quad (12)$$

但し、 $p(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}})$  は  $\mathbf{R}_j$  における瞬時音圧  $p(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}}, t)$  から、以下の式によって算出した平均二乗音圧を表す。

$$p(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}}) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{p(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}}, t)\}^2 dt} \quad (13)$$

但し、 $T$  は 1 秒間とした。また、推定した音像位置の分散が最小となるようにあらかじめ  $p(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}})$  を正規化してから  $\mathbf{r}_E$  を算出した。一方、 $F (= 3)$  は推定に用いたオクターブバンドノイズの数を表す。また、 $N$  は推定に用いた観測点の数を表し、本報告では 2 種類の場合 (全ての観測点を用いた場合、近接した 4 点の観測点を用いた場合) を設定した。全ての観測点を用いた場合では、全ての観測点における平均二乗音圧及び音響インテンシティベクトルを用いて音像位置の推定を行った。近接した 4 点の観測点を用いた場合では、入力した音像位置に近接した 4 点の観測点における平均二乗音圧及び音響インテンシティベクトルを用いて音像位置の推定を行った。

本報告で用いた音像位置推定手法の性能を確認するために、原音場において音源の位置を直接推定した。この場合の  $j$  番目の観測点  $\mathbf{R}_j$  での瞬時音圧  $p_0(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}}, t)$  は以下のように表される。

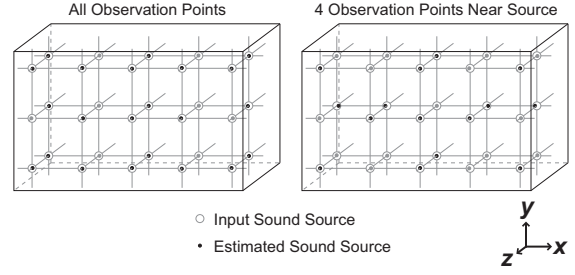


図5 計算機シミュレーションにおける原音場での音像位置推定結果  
Fig.5 Results of estimated sound image positions in the original sound field in the computer simulation.

$$p_0(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}}, t) = \frac{1}{|\mathbf{R}_j - \mathbf{r}_0|} s\left(t - \frac{|\mathbf{R}_j - \mathbf{r}_0|}{c}\right) \quad (14)$$

推定した結果を図 5 に示す。図中の灰色の  $\circ$  は表 2 によって示される入力した音像位置を表し、黒色の  $\bullet$  は推定した音像位置、灰色の  $\circ$  から黒色の  $\bullet$  までの線は位置推定の誤差を表す。但し、黒色の  $\bullet$  が灰色の  $\circ$  より奥にある場合には、黒色の  $\bullet$  の代わりに灰色の  $\bullet$  をプロットしている。つまり、 $\bullet$  の位置が  $\circ$  に近ければ、音像はより正しい位置に推定されていることを表している。

全ての観測点を用いた場合と近接した 4 点の観測点を用いた場合どちらにおいても、推定した音像位置は入力した音源の位置と全く同じである。従って、本報告で用いた音像位置推定手法は音像の位置を正しく推定できると考えられる。

### 2.1.2 シミュレーション結果

スピーカの放射指向性及び推定に用いた観測点の数ごとの音像位置推定結果を図 6 に示す。

全ての観測点を用いて音像位置を推定した場合、スピーカユニットの放射指向性が鋭いほど、正しい位置に音像が推定されている。これはスピーカユニットの放射指向性をより鋭くすることによって、放射型スピーカアレイの外側に波面がより忠実に合成されるためであると考えられる。従って、スピーカユニットの放射指向性をより鋭くすれば、どの観測位置においても正しい位置に音像が推定されるので、聴取者は放射型スピーカアレイの周囲のどの位置にいても常に正しい位置に音像を定位するということが言える。

一方、近接した 4 点の観測点を用いて音像位置を推定した場合、どの放射指向性においても大体正しい位置に音像が推定されている。これはスピーカユニットの放射指向性があまり鋭くない場合、音源から近い場所では波面が忠実に合成されるけれども音源から遠い場所では波面が忠実に合成されないためであると考えられる。従って、スピーカユニットの放射指向性があまり鋭くない場合でも、ある特定の観測位置では観測位置から近い音源の位置だけが正しく推定されるので、聴取者はある特定の聴取位置に立って音を聞けば、聴取位置の近くにある音像だけは常に正しい位置に定位できると言える。

## 2.2 音響測定

### 2.2.1 測定環境

まず、包囲型マイクロホンアレイにおいて室内インパルス応



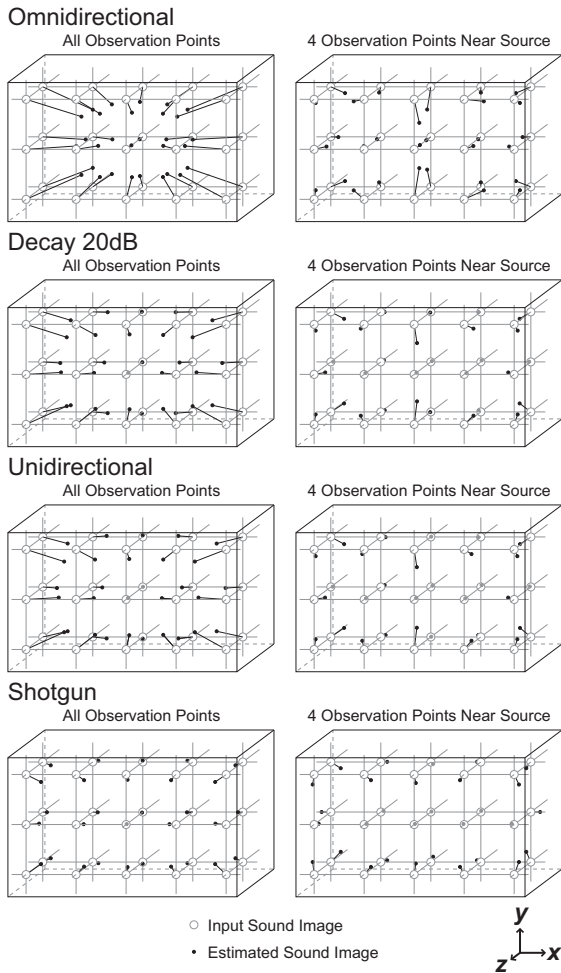


図6 計算機シミュレーションにおける再生音場での音像位置推定結果  
Fig. 6 Results of estimated sound image positions in the reproduced sound field in the computer simulation.

答を測定した。図7中の黒色の○で示す30ヶ所に無指向性スピーカ (Solid Acoustics: SA-355) を配置した。部屋の残響時間は約150 ms、室温は20°C、暗騒音レベルは18.4 dB(A)であった。TSP信号[10](標本化周波数: 48 kHz, サンプル長: 65536点)を再生機器 (M-Audio: FireWire 410) 及び無指向性スピーカから再生し、157個の無指向性マイクロホン及び収録機器 (Mark Of The Unicorn: HD192×14台) にて収録した。収録ソフトウェア (Steinberg: Nuendo 3) は4台のPC (Apple: Power Mac G5) にインストールして用いた。音圧レベルはスピーカから1 m地点で85.6 dB(A)とした。その後、収録した音を計算機上で処理し、FIRフィルタ形式の室内インパルス応答 (標本化周波数: 48 kHz, タップ長: 14400) を得た。その際、同期加算は16回行った。包围型マイクロホンアレイの大きさを放射型スピーカアレイと同じ大きさにするため、測定した室内インパルス応答を標本化周波数が192 kHzのFIRフィルタとみなした。これによって部屋の残響時間も1/4になり、残響時間の値は約37.5 msとなった。

次に、測定した室内インパルス応答を計算機上で音源信号に畳み込み、157チャンネル信号を作成した。音源信号には表1で示した3種類のオクターブバンドノイズを用いた。音源信号の

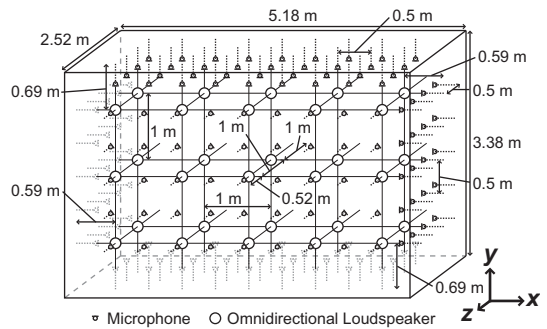


図7 音響測定における室内インパルス応答測定のためのマイクロホン及び無指向性スピーカの配置  
Fig. 7 Arrangement of microphones and omnidirectional loudspeakers for the room impulse response measurement in the acoustical measurement.

長さは10 sで、標本化周波数は48 kHzで、量子化ビットは16 bitである。また、音源信号の最初と最後に1 msの立ち上がり及び立ち下りを設けている。室内インパルス応答は畳み込み前にリサンプリング処理を行い、標本化周波数を48 kHzへ変更した。

そして、得られた157チャンネル信号 (標本化周波数: 48 kHz, 量子化ビット: 16 bit) を再生装置 (Digidesign: Pro Tools HD) 及び放射型スピーカアレイで再生した。その際、マイクロホンの位置とスピーカユニットの位置が同じになるようにチャンネルの割り当てを行った。再生ソフトウェア (Digidesign: Pro Tools HD) は1台のPC (Apple: Mac Pro) にインストールして用いた。再生した部屋の残響時間は約180 ms、室温は22°C、暗騒音レベルは22 dB(A)であった。その結果、図8中の灰色の○で示す放射型スピーカアレイ内の30ヶ所に音像が形成された。音圧レベルは放射型スピーカアレイの中心に形成された音像から1 m地点で71 dB(A)とした。さらに、放射型スピーカアレイの外側の17ヶ所に音響インテンシティプローブ (小野測器: MI-6420) を配置した。そして、音響インテンシティ解析用の装置 (小野測器: DS-2100 & DS-0285) とソフトウェア (小野測器: DS-0225) を用いて音圧レベルと音響インテンシティを測定した。

測定した音圧レベルと音響インテンシティから、以下の式のように音像位置  $\mathbf{r}_E$  を推定した。

$$\mathbf{r}_E = \frac{1}{FN} \sum_{f_{\text{cent}}}^{250,500,1000} \sum_{j=1}^N \left\{ \mathbf{R}_j - \frac{\mathbf{I}(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}})}{p(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}})} \right\} \quad (15)$$

但し、 $\mathbf{R}_j$  は  $j$  番目の音響インテンシティプローブの位置ベクトル、 $\mathbf{I}(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}})$  は  $\mathbf{R}_j$  において測定した音響インテンシティベクトル (但し、 $|\mathbf{I}(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}})| = 1$ )、 $p(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}})$  は  $\mathbf{R}_j$  において測定した音圧レベルである。推定した音像位置の分散が最小となるようにあらかじめ  $p(\mathbf{R}_j, f_{\text{cent}})$  を正規化してから  $\mathbf{r}_E$  を算出した。 $F (= 3)$  はオクターブバンドノイズの数、 $N$  は音像位置の推定に用いた音響インテンシティプローブ位置の数を表し、計算機シミュレーションの場合と同じ条件に設定した。

## 2.2.2 測定結果

推定に用いた音響インテンシティプローブ位置の数ごとの音像位置推定結果を図9に示す。

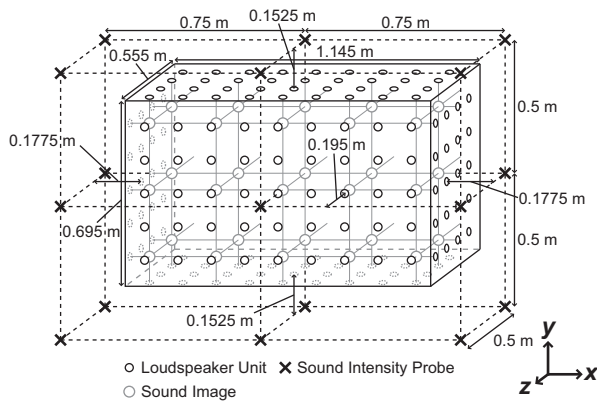


図8 音響測定における音響インテンシティ測定のためのスピーカユニット、音像及び音響インテンシティプローブの配置

Fig.8 Arrangement of loudspeaker units, sound images and intensity probes for the sound intensity measurement in the acoustical measurement.

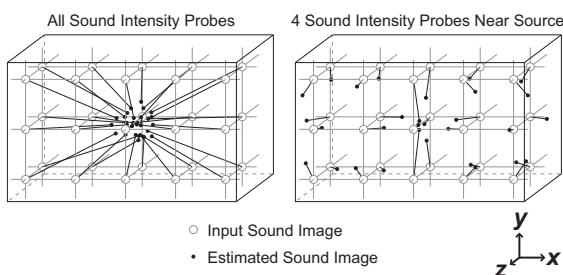


図9 音響測定における音像位置推定結果

Fig.9 Results of estimated sound image positions in the acoustical measurement.

近接した4点の音響インテンシティプローブ位置を用いて音像位置を推定した場合、大体正しい位置に音像が推定されている。この結果は計算機シミュレーションにおけるスピーカの放射指向性が無指向性の場合の結果に似ているので、実装した放射型スピーカアレイにおけるスピーカの放射指向性は最も良い場所においては局所的に鋭くなっているけれどもアレイ全体としては無指向性であると言える。しかし、計算機シミュレーションにおいても考察したように、ある特定の聴取位置に立って音を聞けば、聴取者は聴取位置の近くにある音像だけは常に正しい位置に定位できると考えられる。

全ての音響インテンシティプローブ位置を用いて音像位置を推定した場合、正しい位置に音像が推定されていないし、計算機シミュレーションにおけるスピーカの放射指向性が無指向性の場合の結果に比べると音像の推定位置がスピーカアレイの中心に偏っている。これはスピーカユニットの放射指向性が全体的に無指向性であることに加えて、室内インパルス応答や音響インテンシティを測定した部屋における反射音の影響による誤差が加わったためであると考えられる。しかし、計算機シミュレーションにおける考察から、スピーカユニットの放射指向性を全体的により鋭くすれば、聴取者はスピーカアレイの周囲のどの位置でも常に正しい位置に音像を定位できると考えられる。

### 3. 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先に実装した波面合成法を用いた近接三次元音場再生技術システムの音像定位性能を評価するために、計算機シミュレーションによって音像位置を推定した。その結果、スピーカの放射指向性をより鋭くすればどの聴取位置においても聴取者に全ての音像を正確に定位させることができるし、スピーカの放射指向性が鋭くなくても聴取者に聴取位置近くの音像を常に正確に定位させることができることが分かった。さらに、音響測定によって音像位置を推定し、推定した結果を計算機シミュレーションによる結果と比較したところ、聴取者は聴取位置近くの音像しか常に正確に定位していないけれども、スピーカの放射指向性をより鋭くできればどの聴取位置においても聴取者に全ての音像を正確に定位させることができるようになることが分かった。

今後はスピーカの放射指向性をより鋭くすることによって、実環境においてより良い性能を持ったシステムを実装していく必要があると考えられる。また、複数の人が周囲のあらゆる方向から立体映像を観察することのできるキューブ型立体ディスプレイも開発されているので[11]、この技術と組み合わせることによって複数の人が周囲のあらゆる方向から映像と音響を同時に鑑賞することのできるシステムを開発することも考えている。

### 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, Vol. 18, No. 9, pp. 41-45, September 2007.
- [3] A. J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel. Acoustic control by wave field synthesis. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 93, No. 5, pp. 2764-2778, May 1993.
- [4] 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, Vol. 5, No. 3, pp. 919-926, September 2000.
- [5] 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 VR 学会論文誌, Vol. 12, No. 2, pp. 191-198, June 2007.
- [6] 木村敏幸, 山肩洋子, 勝本道哲. 波面合成法を用いた近接三次元音場再生の理論的研究. 信学技報, No. EA2008-4, pp. 17-22, April 2008.
- [7] 木村敏幸, 山肩洋子, 勝本道哲, 岡本拓磨, 矢入聡, 岩谷幸雄, 鈴木陽一. 指向性スピーカと波面合成法を用いた近接三次元音場再生システムの音源探査による実環境評価. 信学技報, No. EA2008-141, pp. 31-36, March 2009.
- [8] F. J. Fahy. *Sound Intensity*. Spon Press, UK, 1995.
- [9] 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.
- [10] Y. Suzuki, F. Asano, H. Y. Kim, and T. Sone. An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 97, No. 2, pp. 1119-1123, February 1995.
- [11] 吉田俊介, R. Lopez-Gulliver, 矢野澄男, 安藤広志, 井ノ上直己. gCubik: 手に取り複数人で観察可能なキューブ型裸眼立体ディスプレイの実装手法. 映情学誌, Vol. 64, No. 4, pp. 570-576, April 2010.