

# マイクロホンアレーを用いた 自由聴点音場再生システムに関する理論的検討

水野渉<sup>†</sup> 木村敏幸<sup>†</sup> 西野隆典<sup>††</sup> 武田一哉<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 名古屋大学大学院情報科学研究科 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町  
<sup>††</sup> 名古屋大学エコトピア科学研究機構 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町  
<sup>†††</sup> 名古屋大学大学院情報科学研究科 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町  
E-mail: <sup>†</sup>{mizuno,kimura}@sp.m.is.nagoya-u.ac.jp, <sup>††</sup>nishino@media.nagoya-u.ac.jp,  
<sup>†††</sup>kazuya.takeda@nagoya-u.jp

あらまし 本稿はマイクロホンアレーが囲む空間内に音源が存在するとき、任意に定めた受聴点に対するバイノーラル信号を再現する音場再生システムを提案する。提案手法は音源の位置や数に関する情報を必要としないため、音源に対してより制約の少ないバーチャルリアリティシステムが構築できるようになると考えられる。本稿では提案手法の原理について説明し、シミュレーションによって生成した信号を用いた主観評価実験結果を報告する。

キーワード マイクロホンアレー, 頭部伝達関数, 音場再現, 立体音響

## The theoretical study of sound field auralization system in free listening point using microphone array

Wataru MIZUNO<sup>†</sup>, Toshiyuki KIMURA<sup>†</sup>, Takanori NISHINO<sup>††</sup>, and Kazuya TAKEDA<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

<sup>††</sup> EcoTopia Science Institute, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

<sup>†††</sup> Graduate School of Information Science, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

E-mail: <sup>†</sup>{mizuno,kimura}@sp.m.is.nagoya-u.ac.jp, <sup>††</sup>nishino@media.nagoya-u.ac.jp,  
<sup>†††</sup>kazuya.takeda@nagoya-u.jp

**Abstract** The sound field auralization system in which sound sources are surrounded with microphone array is proposed in this report. Since the proposed method does not require the information of the location and the number of sound sources, it is possible to develop the virtual reality system which has the less restriction against the condition of sound sources. In this report, the proposed method is described and examined by subjective tests.

**Key words** microphone array, head related transfer function, sound field reconstruction, spatial acoustics

### 1. はじめに

近年、バーチャルリアリティに関する研究が盛んに行われている。この技術を用いることで自宅に居ながらにしてコンサートホールで音楽を聴いているような体験が可能となる。本報告ではこのような音場再現システムに関して、特定の領域内における任意の点での音場再現について取り扱う。音場を再現する手法として、波面合成による方法 [1] や頭部伝達関数を用いた方法 [2] などが提案されている。この波面合成による方法では

マイクロホンアレーを用いて、ある制御領域の境界上の音圧を測定し、制御領域内の音場制御に利用する手法が提案されている [3,4]。例えば音源が制御領域の外にある場合、境界上の複数点で領域の外側に指向性を向けたマイクを用いて境界上の音圧を測定し、得られた信号をスピーカを用いて制御領域の内側に向けて再生することで、遠隔地において制御領域内の音場を再現する手法が提案されている [5]。また、音源とマイクロホン間の伝達特性が既知であれば、マイクロホンアレー処理によって音源信号を抽出することで実用性をさらに発展させた研究も行

われている [6]。従来の研究では主に制御領域の外側に音源があり、制御領域の内側を音場再現領域とみなしていた。本研究では制御領域の内側の音源を用い、制御領域内の任意の点における音場を再現することを目的とする。本手法の特徴は制御領域の中心付近に音源を仮定することであり、音源の正確な位置や数といった情報を必要としないことである。ゆえに、従来の頭部伝達関数を用いた手法では困難であった音源が移動している場合の音場再現も容易に実現することができると考えられる。また、音源 (対象物) を囲むようにマイクロホンアレーを配置するため、自由視点テレビ [7] などと組み合わせることによって、任意の点からの映像信号と音響信号を提示することによってより臨場感のあるバーチャルリアリティシステムを構築することが可能となるであろう。

本報告ではマイクロホンアレーと逆フィルタによって推定された仮想音源信号を用いた音場再現手法の提案、およびシミュレーションにより生成された音場の主観評価を行う。

## 2. 音場再現システム

### 2.1 仮想音源による音場再現

本手法は音場再現の方法として、実音源が作る音場を音源領域の境界上に仮定した仮想的な音源による信号の重ね合わせを用いて合成する。仮想音源は実音源を囲むように配置され、仮想音源信号は実音源が作る音場と同じ音場を構成するように制約をつけることで推定する。受聴者に知覚される音場が、実音源による音場と仮想音源の重ねあわせによる音場とが同一になることを目標とする。

本手法は Huygens の原理を基にしているため、仮想音源は密に配置されていると仮定する必要がある。実音源の位置が既知であり、実音源から仮想音源までの伝達関数も既知であれば、マイクロホンアレー信号を処理することで音源信号を抽出し、仮想音源信号を重ね合わせることで音場が再現できると考えられる。本手法では音源位置、音源数を未知としているため、マイクの位置のみを制御点とし、マイク信号のみを入力として音場の再現を行う。

聴取者への提示方法は 2 チャンネルのバイノーラル信号とし、出力信号は各仮想音源信号と、受聴点と仮想音源間の関係から決められる頭部伝達関数 (Head Related Transfer Function: HRTF) とを畳み込み、各仮想音源信号に対して合成することで生成する。

以上の手順から領域内の受聴位置に対してバイノーラル信号を生成し、実音源位置から受聴位置に対応する HRTF を畳み込んだ信号と比較することによって提案手法の特性を検討する。

図 1 に提案手法の概略図を示す。図 1(a) は実音源によって音場が形成され、実音源を囲むように設置されたマイクロホンアレーによって収録している様子である。図 1(b) は実音源が作る音場を仮想音源によって再構成した様子を表す。仮想音源は実音源の周りに、外向きに配置される。

### 2.2 仮想音源信号の推定

仮想音源信号の抽出はマイクロホンと仮想音源間の伝達関数から音源信号推定のための逆フィルタを適用させることによ

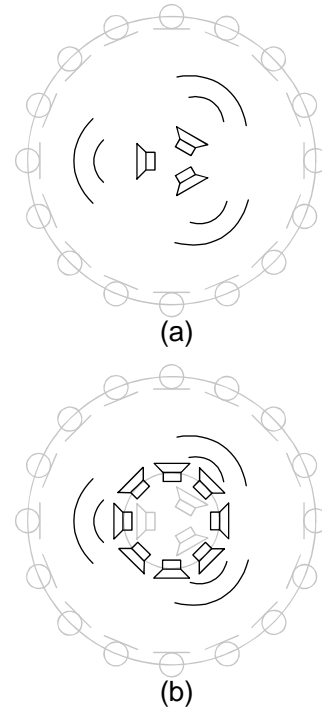


図 1 提案する音場再現の概略図

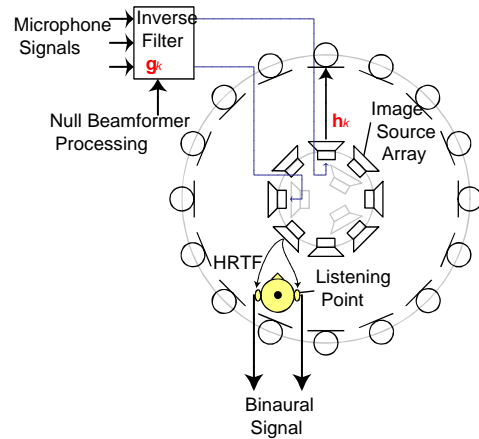


図 2 仮想音源と受聴点

て求める [8]。マイクロホンアレーと仮想音源の位置関係を図 2 に示す。マイク信号は実音源の信号に空間伝達関数が畳み込まれた信号であるが、本手法では、このマイク信号を仮想音源からの信号の重ねあわせで表されると仮定する。すなわち、この条件で仮想音源信号を推定し、実音源が作る音場が重ね合わせることにより再現可能となる。

ここで  $N$  個の仮想音源と  $M$  個のマイクによるシステムにおいて、仮想音源  $k$  の信号を  $S_k(\omega)$ 、マイク  $l$  が収録する信号を  $X_l(\omega)$  とする。ただし、 $N < M$  とする。仮想音源信号の推定には伝達関数の逆関数を用いる。仮想音源  $k$  からマイク  $l$  に対する伝達関数を  $G_{kl}(\omega)$  とする。これによりマイク  $l$  によって収録される信号  $X_l(\omega)$  は次のように表される。

$$X_l(\omega) = \sum_{k=1}^N G_{kl}(\omega) S_k(\omega) \quad (l = 1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

ここで、マイク信号から仮想音源信号を求めるために、マイク

信号  $l$  から仮想音源信号  $m$  に対する逆伝達関数を  $H_{lm}(\omega)$  とする。これによりマイク信号から仮想音源  $m$  の信号は次のように表すことができる。

$$S'_m(\omega) = \sum_{l=1}^M H_{lm}(\omega) X_l(\omega) \quad (m = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

式 (1) と式 (2) から以下の式が得られる。

$$\sum_{l=1}^M H_{lm}(\omega) G_{kl}(\omega) = \begin{cases} S'_k(\omega)/S_k(\omega) & (k = m) \\ 0 & (k \neq m) \end{cases} \quad (3)$$

この式では仮想音源信号の抽出を行っており、信号を出力している仮想音源  $k$  とマイクロホンアレーによって信号が抽出される仮想音源  $m$  が同じであれば仮想音源信号そのものが得られるが、違う場合は値を返さない (Null を返す)、一種の Null ビームフォーマットといえることができる。式 (3) を行列形式で書き改めると次のようになる。

$$\begin{pmatrix} H_{11}(\omega) & \cdots & H_{M1}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{1N}(\omega) & \cdots & H_{MN}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{11}(\omega) & \cdots & G_{N1}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{1M}(\omega) & \cdots & G_{NM}(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S'_1(\omega)/S_1(\omega) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & S'_N(\omega)/S_N(\omega) \end{pmatrix} \quad (4)$$

元の仮想音源信号が正確に抽出される場合、 $S'_k(\omega)/S_k(\omega)$  は 1 となる。しかし、一般に  $G_{kl}(\omega)$  は初期遅延を持つため、 $S'_k(\omega)/S_k(\omega)$  の値を 1 と設定すると、 $H_{lk}(\omega)$  は因果律を満たさないフィルタになってしまう。そこで因果律を満たす伝達関数を算出するために  $S'_k(\omega)/S_k(\omega)$  に  $\tau_0$  の遅延項を設ける。

$$S'_k(\omega)/S_k(\omega) = e^{-j\omega\tau_0} \quad (k = 1, \dots, N) \quad (5)$$

伝達関数行列  $\mathbf{G}(\omega)$ 、逆伝達関数  $\mathbf{H}(\omega)$  および対角行列  $\mathbf{D}(\omega)$  を次の式のように定義すると、式 (4) は式 (9) と書き換えることができる。

$$\mathbf{G}(\omega) \equiv \begin{pmatrix} G_{11}(\omega) & \cdots & G_{N1}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{1M}(\omega) & \cdots & G_{NM}(\omega) \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{H}(\omega) \equiv \begin{pmatrix} H_{11}(\omega) & \cdots & H_{M1}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{1N}(\omega) & \cdots & H_{MN}(\omega) \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{D}(\omega) \equiv \begin{pmatrix} e^{-j\omega\tau_0} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & e^{-j\omega\tau_0} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{H}(\omega)\mathbf{G}(\omega) = \mathbf{D}(\omega) \quad (9)$$

ここで  $N < M$  の場合には  $\mathbf{H}(\omega)$  にはいくつかの解が存在する。ここでは Moore-Penrose 擬似逆行列を用いて  $\mathbf{H}(\omega)$  を算

表 1 HRTF の測定条件

音圧レベル	69.0dB(A) (1m)
サンプリング周波数	48kHz
暗騒音レベル	13.8dB(A)

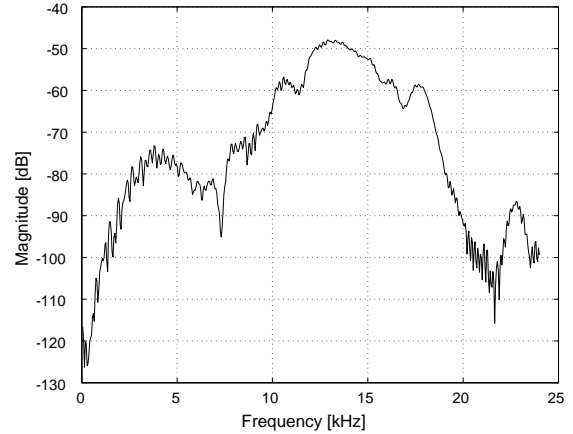


図 3 スピーカの周波数特性

出する [9]。

$$\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{D}(\omega)\mathbf{G}^+(\omega) \quad (10)$$

ここで  $\mathbf{G}^+(\omega)$  は  $\mathbf{G}(\omega)$  の Moore-Penrose 擬似逆行列である。

### 3. 近距離 HRTF データベースの測定

本手法では仮想音源と受聴点の位置関係によってさまざまな距離、方位によって測定された HRTF が必要となる。従来の研究では点音源とみなすことができ、かつ安定した出力が得られる音源がなかったために近距離の HRTF の測定が難しかった。そこで本実験では頭部から近距離の HRTF を圧電素子を用いた小型スピーカ [10] を用いて測定した。このスピーカを用いて 1m の距離で測定した正面左耳の HRTF の周波数振幅特性を図 3 に示す。ただし、時間波形においてパワーで正規化してある。図 3 を見ると低域の利得が小さいことがわかるが、ダミーヘッド中心との距離が 20cm 程度離れることで点音源として用いることが可能だと考えられる。HRTF の測定条件を表 1 に示す。

このスピーカを用いて両耳中心からの距離を 20cm、30cm、40cm、50cm、60cm、70cm、80cm、100cm とし、水平面上で  $1^\circ$  刻みの HRTF を測定した。すべての HRTF をまとめてデータベース化し、必要な距離・方位の HRTF を抽出可能とした。また、測定外の条件の HRTF を用いる場合は距離と方位の条件が最も近い HRTF から距離補間によって必要な HRTF を生成することでバイノーラル信号を生成した。

### 4. シミュレーション実験

#### 4.1 実験条件

シミュレーション実験では遅延成分と距離  $r$  に反比例する振幅補正をもつ伝達関数を用いた。また、仮想音源に指向性を持たせることで逆フィルタ算出時に解の安定化を図った。この条件では仮想音源はダイポール音源となる。また、シミュレーションで用いる実音源信号はデルタ関数とした。

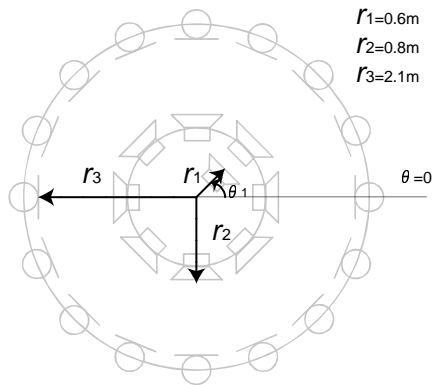


図 4 各機器の配置図

実験に用いた各機器の配置を図 4 に示す。ある点を中心として 3 つの円を描く。中心に最も近い円は半径 0.6m であり、この円周上に実音源を配置する。本実験では  $\theta_1 = 45^\circ$  に実音源を 1 つ配置した。半径 0.8m の円周上には仮想音源を配置する。仮想音源の数は 12、18、24、36 であり、 $\theta = 0^\circ$  に必ず 1 つ配置するという条件をつけて円周上に均等に配置した。半径 2.1m の円周上にはマイクロホンアレーを配置した。仮想音源と同様に  $\theta = 0^\circ$  上に必ず配置し、残りを円周上に均等に配置する。なおマイクの数 は 72 とした。

#### 4.2 仮想音源信号推定実験の結果

はじめに式 (10) を用いて逆伝達関数を算出する。伝達関数  $G(\omega)$  は仮想音源とマイク間距離に応じて求められる純遅延とした。続いて  $D(\omega)$  を設定し、 $H(\omega)$  を算出する。 $D(\omega)$  の対角成分に FIR バンドパスフィルタの DFT 変換係数を用いた。これにより FIR フィルタがもつ遅延を与えることが可能となり、実環境で用いる際に再現対象の周波数を限定することができる。特に低周波数や高周波数は音源信号の利得が小さく、逆行列計算時に非常に小さな値で割ることによって計算が不安定になるため、このような計算を避けることで計算の安定化にも貢献する。本研究ではサンプリング周波数は 48kHz であり、帯域は 375Hz-20kHz とした。バンドパスフィルタのフィルタ長は 1024 点であり、遅延は 10.7ms である。シミュレーションでは仮想音源とマイク間の最大遅延が 8.5ms であるので、フィルタによる遅延は伝達関数よりも長く、遅延は十分だと考えられる。しかし、実環境では仮想音源とマイク間のインパルス応答が収束するために必要な残響時間より長い遅延をバンドパスフィルタによって与える必要がある。

この条件によって式 (2) を用いて推定した仮想音源信号を図 5 に示す。シミュレーションでは実音源信号をデルタ関数として扱っているため、図ではデルタ関数に逆フィルタ算出時に用いた FIR フィルタが畳み込まれた信号になっており、遅延は FIR フィルタが持つ遅延と同じとなった。

この結果から、提案手法により推定された仮想音源信号は実音源から出力された信号が仮想音源信号位置に設置されたマイクによって収録された信号となり、Huygens の原理によって音場再現が可能となる可能性を示している。

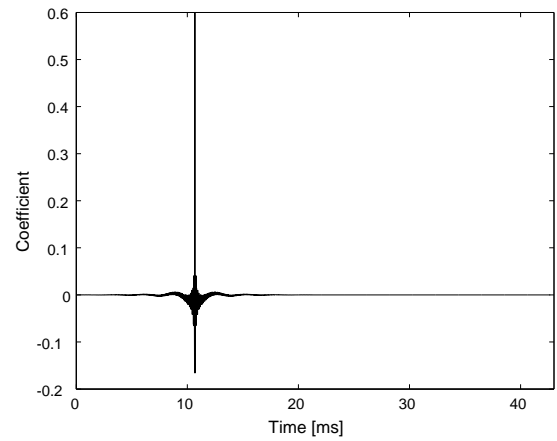


図 5 推定された仮想音源信号

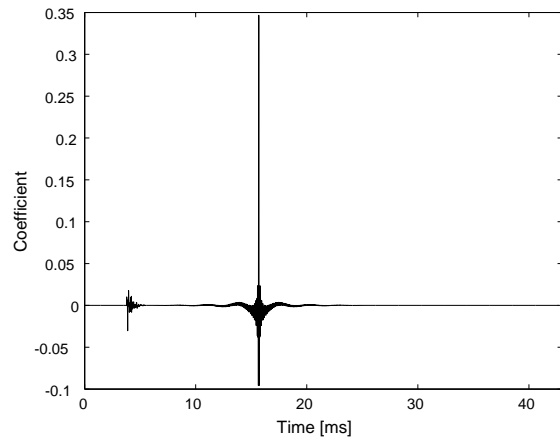


図 6 仮想音源信号から合成されたマイク信号

#### 4.3 仮想音源によるマイク収録信号の復元

図 6 に推定された仮想音源信号を用いて合成された信号を示す。合成位置はマイクの位置である。この信号は 4ms 前後に合成による誤差が見られるものの、実音源信号によってマイクが受信した信号に FIR フィルタを畳み込んだ信号である。つまり、本手法により実音源によって作られる音場はマイク信号によって推定された仮想音源信号の合成で再現されることが分かる。ゆえに実音源の位置や個数が分からなくても仮想音源によって実音源が作る音場を再現可能であると考えられる。

### 5. 2 次音源信号による音場再現

#### 5.1 実験条件

波面合成手法によるシミュレーションの精度について、主観評価を行い検討する。出力となるバイノーラル信号生成の概略図を図 7 に示す。

合成時に 2 次音源に指向性を持たせた場合、指向性は中心に対して外向きになるように設定され、 $\pm 90^\circ$  までは  $\cos \Delta$  を用いて振幅が補正され、それ以外の範囲では 0 となる。この条件はダイポール音源を仮定しており、2 次音源に指向性を与えない場合はモノポール音源と考えることができる。

バイノーラル信号は個々の 2 次音源信号から受聴点に対して生成された信号の和を取ることで生成する。

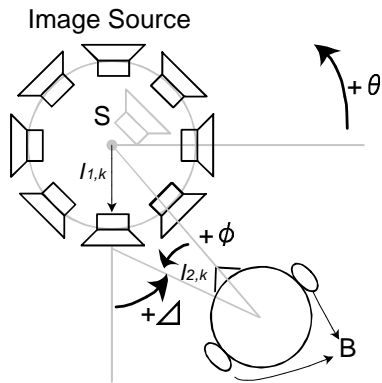


図 7 波面合成のモデル

$$B(t) = \sum_{k=1}^N c(\Delta)h(\phi, t) * I_{2k}(t) * I_{1k}(t) * S(t) \quad (11)$$

ただし、 $B(t)$  はバイノーラル信号、 $h$  は HRTF の時間信号、 $\phi$  は受聴者から 2 次音源に対する見込み角、 $c$  は補正係数、 $\Delta$  は 2 次音源から見た受聴点の見込み角、 $I_2$  は 2 次音源と受聴点間の伝達関数、 $I_1$  は実音源と 2 次音源間の伝達関数、 $S$  は 2 次音源信号、 $k$  は 2 次音源のインデックスとする。

バイノーラル信号は実音源の位置と信号、2 次音源の数と配置、受聴位置を決めることで求められる。2 次音源、実音源の位置は図 4 に従う。ここで 2 次音源数は 12、18、24、36、とした。受聴位置は中心からの距離 1.1m、偏角  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  の 4 箇所である。さらに 2 次音源の特性としてモノポール音源、ダイポール音源の 2 通りを与え、合計で 32 条件とした。加えて実音源と各受聴点の関係から求まる HRTF のみを畳み込んだ信号も作成し、合わせて 36 条件としてランダムマイズして実験した。

提示音は 4.5 秒であり、実音源信号には白色雑音を用いた。まず試験開始を知らせる 0.5 秒間の試験音 (1kHz の純音) が再生され、0.5 秒の空隙の後、合成音を 1 秒再生した。その後 2.5 秒の空隙の間に音像の位置を回答させた。回答はあらかじめ前方にしか定位しないという教示を行い、半円上に印を打つ形とした。評価は  $15^\circ$  刻みとした。被験者数は成人男性 4 名で、1 名につき同じ実験をランダムマイズして 4 回実験した。

## 5.2 実験結果

実験結果を表 2 に示す。表における単位は degree である。表 2 の最下段を除く値は各条件における全 16 回答の平均である。最下段の値は実音源と受聴点位置の関係から対応する HRTF のみを畳み込んだ信号を試験音に用いた場合の評価結果である。

表 2 を見ると、2 次音源数が同じ場合、2 次音源に指向特性がない条件で、より側方に知覚されていることが分かる。このことは付与した指向特性から理解できる。指向特性を付与すると受聴者から見て音源が側方に位置するにつれて、2 次音源から受聴者を見込む角度が大きくなり、2 次音源に与えられた指向特性によって受聴者に届く音が小さくなり、さらに角度が大きくなるといづれ届かなくなる。その結果、指向特性を与えない条件で、より側方に知覚したのだと考えられる。しかし信頼区間が重複する割合が大きく、確実に有意差があると言うまで

表 2 回答数値の平均と信頼区間

音源数 (特性)	$0^\circ$	$90^\circ$	$180^\circ$	$270^\circ$
12(あり)	$-29 \pm 10.2$	$27.2 \pm 12.4$	$-3.8 \pm 6.8$	$-5.6 \pm 9.2$
12(なし)	$-57 \pm 7.2$	$55.3 \pm 7.0$	$57.2 \pm 4.8$	$-56 \pm 7.4$
18(あり)	$-53 \pm 12.3$	$53.4 \pm 6.0$	$46.9 \pm 14.4$	$-38 \pm 14.2$
18(なし)	$-55 \pm 7.9$	$66.6 \pm 7.6$	$59.1 \pm 6.8$	$-34 \pm 11.5$
24(あり)	$-53 \pm 9.3$	$45.9 \pm 7.8$	$26.3 \pm 14.6$	$-39 \pm 11.0$
24(なし)	$-61 \pm 9.1$	$56.3 \pm 7.4$	$52.5 \pm 8.1$	$-53 \pm 7.6$
36(あり)	$-65 \pm 5.8$	$60.9 \pm 6.8$	$40.3 \pm 9.2$	$-46 \pm 9.1$
36(なし)	$-66 \pm 10.4$	$71.3 \pm 7.4$	$48.8 \pm 12.7$	$-53 \pm 8.9$
HRTF のみ	$-68 \pm 7.1$	$53.4 \pm 8.0$	$45.9 \pm 7.3$	$-53 \pm 6.0$

表 3 回答数値の平均と信頼区間

音源数 (特性)	$0^\circ$	$90^\circ$	$180^\circ$	$270^\circ$
12(あり)				
12(なし)				
18(あり)				
18(なし)				
24(あり)				
24(なし)				
36(あり)				
36(なし)				

にはいたらない。

表 3 に信頼区間から評価した方向感の再現性を示す。表 3 における記号 “ ” は HRTF のみの信号から求めた信頼区間の中に合成音の平均方位が含まれており、同時に合成音の信号から求めた信頼区間の中に HRTF のみの信号から求めた平均方位が含まれていることを示している。記号 “ ” は の 2 条件のうち、どちらか一方のみを満たしていることを示している。つまり記号 は HRTF のみを畳み込んで提示した音と合成音を提示した音に有意差がないことを示している。

表 3 を見ると、2 次音源数の増加に伴って方向感が再現されている傾向がわかる。方位  $90^\circ$ 、音源数 36 の条件において例外的に方向感が再現されていないが、値を見ると信頼区間の幅は狭く、安定していることが分かる。平均の値がかなり側方に位置しているために、HRTF のみの平均方位とのずれが大きくなったため、今回の評価方法では方向感が再現されたと判断されなかった。

また、2 次音源に指向性を付与することに対する検討はこの実験結果からだけでは難しいが、指向性を与えない条件においてより方向感が再現されているように見える。

## 6. 推定された仮想音源信号による音場再現

提案手法により、マイクにより受信された信号を用いて仮想音源信号を推定する。式 (11) を用いて仮想音源信号を重ね合わせ、音場再現性能を検討した。

### 6.1 実験条件

式 (10) を用いて逆フィルタを算出し、マイク信号と逆フィルタを用いて式 (2) により仮想音源信号を求める。さらに図 7 と式 (11) を用いて受聴点におけるバイノーラル信号を生成する。

マイクは半径 2.1m の円周上にあり、個数は 72 に設定した。

表 4 回答数値の平均と信頼区間

音源 (特性)	0°	90°	180°	270°
12(あり)	-33±11.8	14.1±8.7	13.1±8.0	-12±9.0
12(なし)	-47±11.7	30±12.3	22.5±15.0	-30±11.7
18(あり)	-26±10.9	56.3±8.7	29.1±9.1	-31±11.2
18(なし)	-45±14.5	50.6±8.4	32.8±14.8	-42±10.8
24(あり)	-54±9.2	34.1±9.6	12.2±22.1	-12±19.2
24(なし)	-38±14.5	16.9±21.9	22.5±14.7	-37±16.8
36(あり)	-52±8.0	42.2±7.7	2.8±19.0	-34±9.9
36(なし)	-47±7.0	46.9±12.0	39.4±8.9	-32±14.7
HRTFのみ	-56±5.0	55.3±8.8	45.9±8.7	-55±8.8

表 5 回答数値の平均と信頼区間

音源数 (特性)	0°	90°	180°	270°
12(あり)				
12(なし)				
18(あり)				
18(なし)				
24(あり)			×	×
24(なし)		×		×
36(あり)			×	
36(なし)				

その他の条件は先の実験と同じである。

## 6.2 実験結果

実験結果を表 4 に示す。表における単位は degree である。表 4 の最下段を除く値は各条件における全 16 回答の平均である。表 2 と同様に表 4 の最下段の値は音源と受聴点位置の関係から対応する HRTF のみを畳み込んだ信号を用いた場合の評価である。

表 4 を見ると、表 2 と比較して全体的に平均値が低く、信頼区間が広がっていることが分かる。これは前述の実験に比べて仮想音源信号が劣化したため、正しく側方に定位する信号が減り、また音像の定位感が減少していることを示している。

表 5 に信頼区間から評価した方向感の再現性を示す。表 5 における記号“ ”、“ ” は表 3 と同じであり、“×” は信頼区間が 15° を超えたことを示す。方向評価基準を 15° としているため、この記号がついている条件では別の方向に音像が知覚される可能性がある。

表 5 を見ると、表 3 のように仮想音源が 18 より多くなると正しく方向定位される傾向がある。しかし前述のように音源数が増えると音源信号が劣化するために合成音に影響が出ることがある。音源数 24 という条件下では信頼区間の幅が片側に対して 15° を超えることが多い。これは、被験者の感想から、音像が 2 箇所知覚されるため、どちらを選択するか判別しづらいという回答があり、ある音源数、受聴位置ではこのように正しく音像が再現できない可能性がある。音源数 36 のときは、マイク数が 72 に対して音源数が 1/2 となるので、音源信号推定時の逆フィルタの安定性が下がることにより、音源信号の劣化によって正しく音像が知覚されないと予想したが、音源の数の多さが正しい方向知覚に貢献したと考えられる。しかし正しく合成できていない条件もやはり存在した。

全体を見ると 180°、270° の受聴位置では精度が悪い。このことは表 3 には見られない性質であり、音源信号の劣化が正面付近の音像定位を困難にしているものと考えられる。

## 7. まとめと今後の課題

本報告では近距離 HRTF を測定し、その HRTF を用いて波面合成による定位感の検討と仮想音源を用いた音場再現の検討を行った。本提案手法のように、実音源の周囲に 2 次音源を配置する形状で、比較的距離が近い場合には 2 次音源は 18~24 程度でよく、音源の指向特性はない場合が良いと考えられる。

また、マイク信号から逆フィルタを用いて仮想音源信号を推定すると仮想音源信号の数に比例して推定精度が下がる。主な原因は仮想音源信号推定時の逆フィルタの安定性が下がるためだと考えられる。さらに逆フィルタに与えた条件はマイク位置での音場再現であるため、仮想音源数の増加はマイク位置での音場再現に特化することが考えられる。ゆえに仮想音源数が増えることにより、ある程度の仮想音源数までは音場再現精度が上昇するが、さらに仮想音源数を増やすことにより再現性は減少すると考えられるが、この点についてはさらに検討する必要がある。

今後は、既に測定されている実音源を用いた実環境でのマイク信号、ダミーヘッド両耳で収録したバイノーラル信号を用いて評価用の信号を作り、主観実験を行う予定である。

## 謝 辞

本実験で用いた HRTF を測定するにあたり、太平洋セメント (株) 石川勝之様から、小型スピーカに関してご協力をいただきました。

## 文 献

- [1] 伊勢史郎, “キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理,” 音響学会誌, Vol.53, No.9, pp.706-713, 1997
- [2] イェンス ブラウエルト, 森本政之, 後藤敏幸 訳 “空間音響,” 鹿島出版会, 1986
- [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, 1993.
- [4] 金田 豊, 山崎芳男, 大賀寿郎, “音響システムとデジタル信号処理,” (社) 電子情報通信学会, 1995
- [5] Philip A.Nelson, Hareo Hamada, and Stephen J.Elliott, “Adaptive Inverse Filters for Stereophonic Sound Reproduction,” IEEE Trans. on Signal Processing, Vol.40, No.7, July 1992.
- [6] 木村敏幸, 寛 一彦, 武田一哉, 板倉文忠, “音場再現におけるマルチチャネル信号の空間符号化,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.4, pp.433-442, 2003
- [7] T.Fujii, M.Tanimoto, “Free-viewpoint Television based on the Ray-Space representation”, SPIE ITCOM 2002, pp.175-189, August 2002.
- [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,” 音響学会誌, Vol.57, No.3, pp.175-183, 2001
- [9] J.Bauck and D.H.Cooper, “Generalized transaural stereo and applications,” J.Audio Eng.Soc., Voll.44, No.9, pp.683-705, 1996.
- [10] 田原靖彦, 石川勝之, 川村広則, 佐々木伸一, 中村守保, “圧電型 12 面体スピーカを用いた室内音響模型実験,” 音響学会誌, Vol.59, No.10, pp.614-621, 2003