

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

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^{††}

[†] 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

^{††} 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

E-mail: [†]{t-kimura,yamakata,katumoto}@nict.go.jp, ^{††}okamoto@ais.riec.tohoku.ac.jp,

^{†††}{yairi,iwaya,yoh}@riec.tohoku.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、先に提案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を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構築した。構築したシステムの性能を評価するために、放射型スピーカアレイによって合成される音像の位置を音源探査システムによって推定したところ、音像が所望の位置に推定されていることが分かった。

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, 包囲型マイクロホンアレイ, 放射型スピーカアレイ, 音源探査

Real environment evaluation by sound source search in near 3D sound field reproduction system using directional loudspeakers and wave field synthesis

Toshiyuki KIMURA[†], Yoko YAMAKATA[†], Michiaki KATSUMOTO[†], Takuma OKAMOTO^{††}, Satoshi YAIRI^{††}, Yukio IWAYA^{††}, and Yôiti SUZUKI^{††}

[†] Universal Media Research Center, National Institute of Information and Communications Technology
4-2-1, Nukui-kitamachi, Koganei, Tokyo, 184-8795 Japan

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

E-mail: [†]{t-kimura,yamakata,katumoto}@nict.go.jp, ^{††}okamoto@ais.riec.tohoku.ac.jp,

^{†††}{yairi,iwaya,yoh}@riec.tohoku.ac.jp

Abstract It is very important to develop near 3D sound field reproduction techniques in order to realize the ultra-realistic communications such as 3D television and 3D tele-conference. In this report, the near 3D sound field reproduction system using directional loudspeakers and wave field synthesis was developed by constructing the surrounding microphone array and the radiated loudspeaker array. In order to evaluate the performance of the developed system, the estimation of sound image positions synthesized by the radiated loudspeaker array was performed by the sound source search system. As a result, it was indicated that the sound images were estimated at the desired positions.

Key words Ultra-realistic communications, Near 3D sound field reproduction, Directional loudspeaker, Wave field synthesis, Surrounding microphone array, Radiated loudspeaker array, Sound source search



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 Fig. 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]~[10] 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.

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、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、Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式に基づき、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. バイノーラル [11] やトランスオーラル [12]~[17] とは異なり、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.

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、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

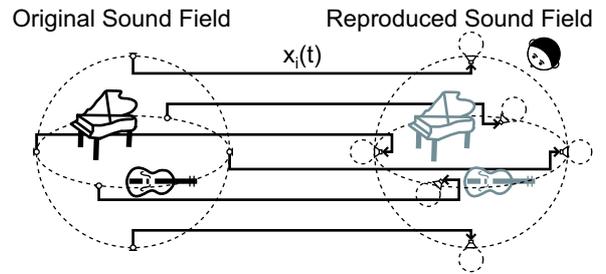


図2 指向性スピーカと波面合成法を用いた近接三次元音場再生システム [18]
Fig. 2 Near 3D sound field reproduction system using directional loudspeakers and wave field synthesis [18].

音場再生技術を先に提案し、忠実に波面が合成できる条件を計算機シミュレーションによって検討してきた [18]. 本報告では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構築することによって実装したシステム [19] の実環境における性能を評価するために、音源探索システムによって音像位置を推定し、音像が所望した位置に推定されるかを検討した.

2. 提案システムの概要

先に提案した近接三次元音場再生システム [18] の構成を Fig. 2 に示す. まず、原音場において音源の周りの境界面上に多数の無指向性マイクロホンを配置し、音 $x_i(t)$ 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マイクロホンと同じ数の指向性スピーカを配置し、収録した音 $x_i(t)$ をそのまま再生する. その際、指向性スピーカの向きは境界面の外側に向けるようにする. すると、Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式に従って境界面の外側で波面が忠実に合成されることにより、境界の外側にいる聴取者は外側のどこにいてもあたかも境界内で音源が鳴っているように感じるようになる. Fig. 2 の例で言えば、ピアノの近くにいる聴取者はピアノが近くで鳴っているように感じるし、バイオリンの近くにいる聴取者はバイオリンが近くで鳴っているように感じるようになることが期待される.

3. システムの試作 [19]

3.1 包囲型マイクロホンアレイ

システムを実装するために用いた包囲型マイクロホンアレイには、東北大学電気通信研究所内の包囲型マイクロホンアレイが配置されている部屋を利用した [20]. この部屋の残響時間は約 150 ms であり、Fig. 3 に示すように部屋の 5 つの壁面から内側に 30 cm 離れたところに計 157 個の無指向性マイクロホン (Brüel & Kjaer: Type 4951) が設置されている. 但し、部屋全体で防音加工を施しており、さらに壁面には吸音マットを装着しているため、結果としてマイクロホンは部屋の内部に配置した音源からの直接音を主に収録していることになる.

マイクロホンの配置を Fig. 4 に示す. 2 面の狭い壁面 (Wall A) には 1 面ごとに 20 (= 5 × 4) 個のマイクロホンが配置されており、2 面の広い壁面 (Wall B) には 1 面ごとに 36 (= 9 × 4) 個のマイクロホンが配置されている. 天井面には 45 (= 9 × 5) 個の



図3 包囲型マイクロホンアレイの概観図 [20]

Fig. 3 Image of surrounding microphone array placed in the recording room [20].



図5 放射型スピーカアレイの概観図

Fig. 5 Image of radiated loudspeaker array.

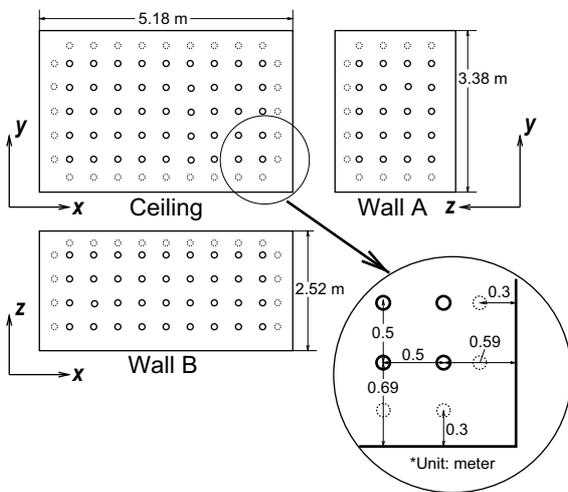


図4 包囲型マイクロホンアレイにおけるマイクロホンの配置図 [20]

Fig. 4 Arrangement of microphones in the surrounding microphone array [20].

マイクロホンが配置されている。全てのマイクロホンは 50 cm 間隔で配置されており、計 10 台の 16 ch マイクロホンアンプ (Brüel & Kjær: Type 2694) に接続されている。

3.2 放射型スピーカアレイ

システムを実装するために用いる放射型スピーカアレイは新たに製造した。Fig. 5 に示すように直方体の形をしたスピーカ筐体の 5 つの面に計 157 個のスピーカユニット (AURASOUND: NSW1-205-8A 相当品) を外向きに配置した。スピーカユニット自身は指向性を持っていないが、筐体にスピーカユニットを直接埋め込み、筐体内部に放射された音は外に漏れないようにしているため、結果として各スピーカユニットは外向きに指向特性を持っている。また、立体テレビなどに応用される際に要求されるアレイの大きさを想定するため、放射型スピーカアレイの大きさは包囲型マイクロホンアレイの 1/4 の大きさに設定した。

スピーカユニットの配置を Fig. 6 に示す。各スピーカユニットの位置を各マイクロホンの位置と同じにするため、2 面の狭い

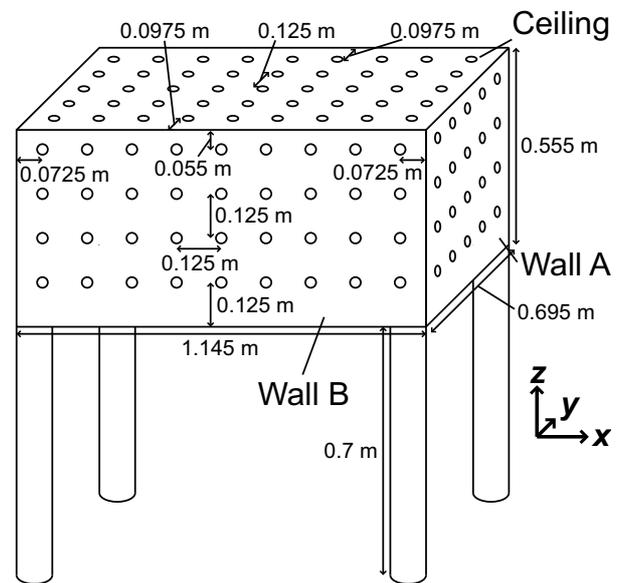


図6 放射型スピーカアレイにおけるスピーカユニットの配置図

Fig. 6 Arrangement of loudspeaker units in the radiated loudspeaker array.

側面 (Wall A) には 1 面ごとに 20 (= 5 × 4) 個のスピーカユニットを配置し、2 面の広い側面 (Wall B) には 1 面ごとに 36 (= 9 × 4) 個のスピーカユニットを配置した。天井面には 45 (= 9 × 5) 個のスピーカユニットを配置した。放射型スピーカアレイの大きさは包囲型マイクロホンアレイの 1/4 であるため、全てのスピーカユニットは 12.5 cm 間隔で配置し、157 ch 分のスピーカアンプ (特注品) に接続した。また、会議机上で再生されている音を周囲から聴くということを想定するため、足を取り付けて放射型スピーカアレイを床から 0.7 m 底上げした。

4. 音源探査による実環境評価

実装したシステムの実環境性能を評価するために、以下の作業を行った。まず、3.1 節にて述べた包囲型マイクロホンアレイにて室内インパルス応答を測定した。次に、測定した室内インパルス応答から 157 チャネル信号を作成した。さらに、作成した 157 チャネル信号を 3.2 節にて述べた放射型スピーカアレイ

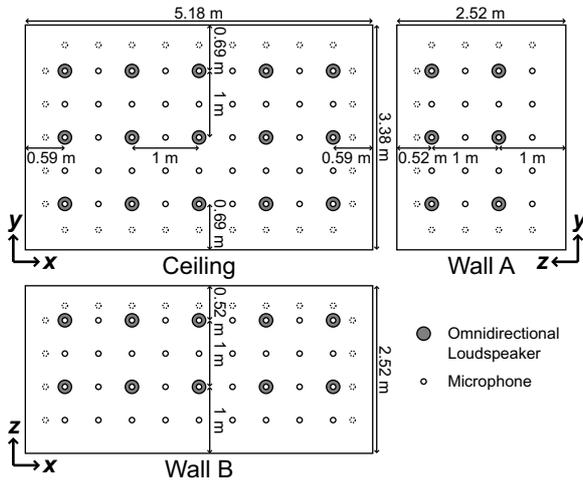


図7 室内インパルス応答測定における無指向性スピーカの配置図
Fig. 7 Arrangement of omnidirectional loudspeakers in the room impulse response measurement.

いで再生した上で放射型スピーカアレイの外側で音源探査を実施し、放射型スピーカアレイ内に合成される音像の位置を推定した。次節以降では実施した各作業の詳細について述べる。

4.1 包囲型マイクロホンアレイでの室内インパルス応答測定

包囲型マイクロホンアレイが設置されている部屋において室内インパルス応答を測定した。Fig. 7中の灰色の丸で示す30ヶ所(=3×5×2)に音源用の無指向性スピーカ(Solid Acoustics: SA-355)を配置した。但し、白色の丸は157個の無指向性マイクロホンの位置を表す。

部屋の残響時間は約150ms、室温は20°C、暗騒音レベルは18.4dB(A)であった。音圧レベルはスピーカから1m地点で85.6dB(A)とした。TSP信号[21](サンプリング周波数:48kHz, 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)にて同期収録し、157チャンネルのオーディオ信号(サンプリング周波数:48kHz, 量子化ビット:16bit)を得た。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。測定は30ヶ所の無指向性スピーカ位置において行った。その後、計算機上で処理をおこない、FIRフィルタ形式の室内インパルス応答(タップ長:14400)を得た。その際、同期加算は16回行った。その結果、157ヶ所のマイクロホン位置における室内インパルス応答を無指向性スピーカ位置30ヶ所分取得した。つまり、取得した室内インパルス応答の数は4710(=157×30)になる。

包囲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、次節以降では測定した室内インパルス応答をサンプリング周波数が192kHzのFIRフィルタとみなす。これによって包囲型マイクロホンアレイの大きさは1/4になるので、マイクロホンアレイの大きさが放射型スピーカアレイと同じになる。このとき、部屋の残響時間も1/4になるので、残響時間の値は約37.5msとなる。

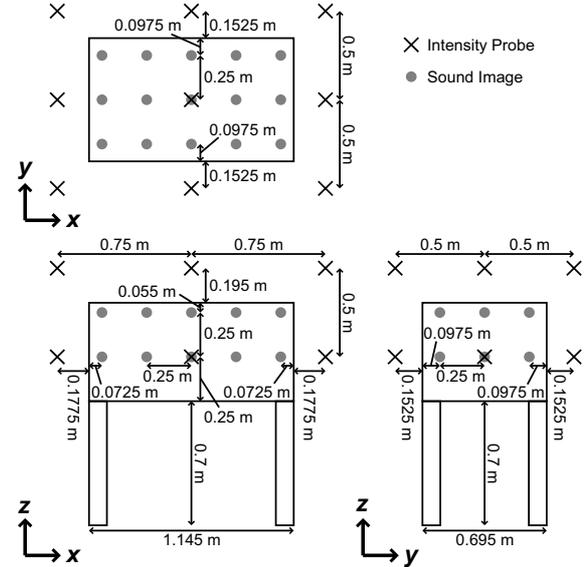


図8 音源探査における音像及び音響インテンシティプローブの配置図
Fig. 8 Arrangement of sound images and intensity probes in the sound source search.

4.2 157チャンネル信号の作成

4.1節にて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むことにより157チャンネル信号を作成した。音源信号には24kHz帯域の白色雑音を用いた。音源信号の長さは10sで、サンプリング周波数は48kHzで、量子化ビットは16bitである。また、音源信号の最初と最後に1msの立ち上がり及び立ち下がりをつけている。なお、室内インパルス応答は4.1節にてサンプリング周波数192kHzのFIRフィルタとみなしているため、畳み込む前にサンプリング処理を行い、サンプリング周波数を48kHzへ変更した。

4.3 放射型スピーカアレイでの音源探査

4.2節にて作成した157チャンネル信号(サンプリング周波数:48kHz, 量子化ビット:16bit)を再生装置(Digidesign: Pro Tools HD)及び放射型スピーカアレイで同期再生した。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。再生した部屋の残響時間は約180ms、室温は22°C、暗騒音レベルは22dB(A)であった。音圧レベルはスピーカ中心の音像から1m地点で71dB(A)とした。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。その結果、Fig. 8中の灰色の丸で示す放射型スピーカアレイ内の30ヶ所に音像があるような音場が放射型スピーカアレイの外側に形成された。30ヶ所の音像の位置座標をTable 1に示す。但し、位置座標の原点は放射型スピーカアレイの中心に設定している。

さらに、放射型スピーカアレイの外側のFig. 8中の×印で示す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。17ヶ所の音響インテンシティプローブの位置座標をTable 2に示す。但し、位置座標の原点はTable 1と同じように放射型スピーカアレイの中心に設定している。そして、音響インテンシティ解析装置(小野測器: DS-2100 & DS-0285)と音

表1 音源探査における音像の位置座標

Table 1 Position coordinates of sound images in the sound source search.

Index	x [m]	y [m]	z [m]	Index	x [m]	y [m]	z [m]
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2 音源探査における音響インテンシティプローブの位置座標

Table 2 Position coordinates of sound intensity probes in the sound source search.

Index	x [m]	y [m]	z [m]	Index	x [m]	y [m]	z [m]
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				

響インテンシティ解析ソフトウェア (小野測器: DS-0225) を用いて音源探査を実施した。その際、音源探査に用いる周波数範囲は 150 Hz-5 kHz とした。音源探査は 30ヶ所の音像位置において行った。その結果、17ヶ所の音響インテンシティプローブ位置における音の三次元方向及び大きさに関する計測データを音像位置 30ヶ所分取得した。つまり、取得した計測データの数は 510 (= 17 × 30) になる。

4.4 音源探査結果からの音像位置推定

4.3 節にて取得した音の三次元方向及び大きさに関する計測データから、以下の式のように 30ヶ所の音像位置 $\mathbf{r}_E = (x_E, y_E, z_E)^T$ を推定した。

$$\mathbf{r}_E = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\mathbf{r}_j + d_j \mathbf{I}_j) \quad (1)$$

但し、 $\mathbf{r}_j = (x_j, y_j, z_j)^T$ 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、 $\mathbf{I}_j = (I_{jx}, I_{jy}, I_{jz})^T$ は \mathbf{r}_j における音像の方向ベクトル (但し、 $|\mathbf{I}_j| = 1$)、 d_j は音響インテンシティプローブ位置から音像位置までの距離である。音像の方向ベクトル \mathbf{I}_j は音の三次元方向に関する計測データから算出し、距離 d_j は音の大きさに関する計測データから算出した。N は音像位置の推定

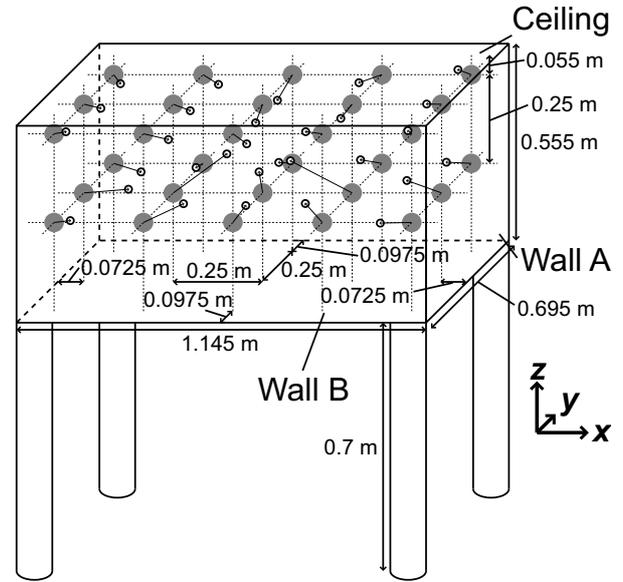


図9 音源探査における推定した音像位置

Fig. 9 Estimated sound image position in the sound source search.

に用いた音響インテンシティプローブ位置の数を表し、本報告では 17 点の音響インテンシティプローブ位置のうち、入力した音像位置に最も近い上位 2 点の音響インテンシティプローブ位置における音源探査の計測データから音像位置を推定した。ただし、上位 2 点に属する位置が 3 点以上存在する場合は、それらを全て含めて音像位置を推定した。例えば、入力した音像位置が (0, 0, 0) の場合、音像位置から最も近い音響インテンシティプローブ位置としては (0, 0, 0.5)、(0, 0.5, 0)、(0, -0.5, 0) の 3 点が存在する。この場合、 $N = 3$ とし、3 点における音源探査の計測データを全て用いて音像位置の推定を行った。

音像位置を推定した結果を Fig. 9 に示す。図中の灰色の円は Fig. 8 によって示される入力した音像位置を表し、○は推定した音像位置、灰色の円から○までの矢印は位置推定の誤差を表す。つまり、矢印の距離が短いほど、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。Fig. 9 より、音源探査結果から推定した音像位置はほぼ灰色の円に近い位置に推定されている。ゆえに、音源探査システムによって、所望の位置に音像が推定されているということが言えるので、実装した近接三次元音場再生システムは実環境において十分な性能を有していると考えられる。

さらに、音像及び推定した音像の位置座標を Table 3 に示す。但し、位置座標の原点は放射型スピーカアレイの中心に設定しており、距離誤差 Δd は以下の式から算出している。

$$\Delta d = |\mathbf{r}_E - \mathbf{r}_o| \quad (2)$$

但し、 $\mathbf{r}_o = (x_o, y_o, z_o)^T$ は音像の位置ベクトルである。Table 3 より、距離誤差は平均で 8.4 cm であり、大きくても 20 cm 以内であることが分かる。

5. 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

表3 音源探索における音像及び推定した音像の位置座標

Table 3 Position coordinates of sound images and estimated sound images in the sound source search.

Index	Image Position			Estimated Position			Error Δd [m]
	x_o [m]	y_o [m]	z_o [m]	x_E [m]	y_E [m]	z_E [m]	
1	0.5	0.25	0.25	0.463	0.249	0.264	0.040
2	0.5	0	0.25	0.459	-0.003	0.251	0.041
3	0.5	-0.25	0.25	0.481	-0.225	0.250	0.032
4	0.25	0.25	0.25	0.194	0.226	0.235	0.063
5	0.25	0	0.25	0.224	-0.018	0.216	0.046
6	0.25	-0.25	0.25	0.194	-0.221	0.246	0.064
7	0	0.25	0.25	-0.009	0.151	0.211	0.107
8	0	0	0.25	-0.018	-0.005	0.199	0.054
9	0	-0.25	0.25	0.000	-0.134	0.183	0.134
10	-0.25	0.25	0.25	-0.203	0.237	0.227	0.054
11	-0.25	0	0.25	-0.206	0.011	0.228	0.050
12	-0.25	-0.25	0.25	-0.191	-0.218	0.223	0.072
13	-0.5	0.25	0.25	-0.468	0.211	0.238	0.052
14	-0.5	0	0.25	-0.449	-0.012	0.243	0.053
15	-0.5	-0.25	0.25	-0.467	-0.249	0.255	0.033
16	0.5	0.25	0	0.432	0.245	0.005	0.069
17	0.5	0	0	0.395	0.024	0.027	0.111
18	0.5	-0.25	0	0.396	-0.203	-0.017	0.115
19	0.25	0.25	0	0.213	0.180	0.033	0.085
20	0.25	0	0	0.083	-0.018	0.097	0.193
21	0.25	-0.25	0	0.181	-0.186	0.032	0.099
22	0	0.25	0	-0.013	0.174	0.028	0.082
23	0	0	0	-0.001	-0.029	0.069	0.075
24	0	-0.25	0	0.000	-0.143	0.012	0.107
25	-0.25	0.25	0	-0.244	0.174	0.014	0.078
26	-0.25	0	0	-0.097	-0.011	0.114	0.191
27	-0.25	-0.25	0	-0.141	-0.242	0.050	0.120
28	-0.5	0.25	0	-0.411	0.212	-0.011	0.097
29	-0.5	0	0	-0.372	-0.011	0.014	0.129
30	-0.5	-0.25	0	-0.444	-0.281	0.015	0.065
Average							0.084

コミュニケーションを実現するために先に提案した波面合成法を用いた近接三次元音場再生技術が実現可能かを検討するために、実際にマイクロホンアレイとスピーカアレイを構築してシステムを実装した。さらに、実装したシステムの実環境性能を評価するために、音源探索システムによって音像の位置を推定したところ、所望の位置に音源が推定され、実装したシステムが実環境において十分な性能を有していることが分かった。

今後は主観評価実験を行うことによって、実装したシステムによって音像が所望の位置に定位するかを検討していく予定である。また、実用的なシステムを構築するために、マイクロホンやスピーカの数がより少ない場合でも同等の実環境性能を保つようなシステムを検討していく予定である。さらに、立体テレビなどに応用する際には映像そのものが実物大ではなく拡大・縮小されて提示されていることが多い。しかし、本報告ではマイクロホンアレイとスピーカアレイの大きさが同じであることを前提としている。ゆえに、マイクロホンアレイの大きさ

がスピーカアレイの大きさと同じでない場合でも適用できる近接三次元音場再生技術も合わせて検討していく必要があると考えられる。

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] H. Fletcher. Symposium on wire transmission of symphonic music and its reproduction on auditory perspective: Basic requirement. *Bell System Technical Journal*, Vol. 13, No. 2, pp. 239–244, April 1934.
- [4] 伊藤毅. 音響工学原論, pp. 587–589. コロナ社, 東京, 1973.
- [5] M. Camras. Approach to recreating a sound field. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 43, No. 6, pp. 1425–1431, June 1968.
- [6] 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.
- [7] 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, Vol. 5, No. 3, pp. 919–926, September 2000.
- [8] 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, June 2000.
- [9] S. Takane, Y. Suzuki, T. Miyajima, and T. Sone. A new theory for high definition virtual acoustic display named ADVISE. *Acoustical Science & Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 276–283, September 2003.
- [10] 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, Vol. 12, No. 2, pp. 191–198, June 2007.
- [11] 岡部馨. ダミーヘッドを用いた音場再生. 日本音響学会誌, Vol. 46, No. 8, pp. 650–656, August 1990.
- [12] 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, Vol. 29, No. 3, pp. 151–159, March 1973.
- [13] 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*, Vol. 56, No. 4, pp. 1195–1201, October 1974.
- [14] M. Miyoshi and Y. Kaneda. Inverse filtering of room acoustics. *IEEE Transaction on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. 36, No. 2, pp. 145–152, February 1988.
- [15] 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, March 1991.
- [16] 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, Vol. 57, No. 3, pp. 175–183, March 2001.
- [17] 古見芳幸, 穂刈治英, 島田正治. 立体音場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, Vol. J83-A, No. 7, pp. 920–923, July 2000.
- [18] 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. 電子情報通信学会技術研究報告, No. EA2008-4, pp. 17–22, April 2008.
- [19] 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. 波面合成法を用いた近接三次元音場再生のシステム試作. 電子情報通信学会技術研究報告, No. EA2008-111, pp. 61–64, December 2008.
- [20] T. Okamoto, R. Nishimura, and Y. Iwaya. Estimation of sound source positions using a surrounding microphone array. *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol. 28, No. 3, pp. 181–189, May 2007.
- [21] 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. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 97, No. 2, pp. 1119–1123, February 1995.