

## 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

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

<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

E-mail: <sup>†</sup>{t-kimura,yamakata,katumoto}@nict.go.jp, <sup>††</sup>okamoto@ais.riec.tohoku.ac.jp,

<sup>†††</sup>{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 157 個のマイクロホンを用いた包囲型マイクロホンアレイと 157 個のスピーカユニットを用いた放射型スピーカアレイを構築して近接三次元音場再生システムを実現した。また、実現したシステムを展示するために、実際に弦楽四重奏を包囲型マイクロホンアレイで収録した。収録した音を放射型スピーカアレイで再生することにより、放射型スピーカアレイの中に弦楽四重奏を表現することができた。

**キーワード** 三次元音場再生, 近接音場, 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, 弦楽四重奏

## Development of prototype system for near 3D sound field reproduction using 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> Research Institute of Electrical Communication / Graduate School of Information Sciences, Tohoku University  
2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577 Japan

E-mail: <sup>†</sup>{t-kimura,yamakata,katumoto}@nict.go.jp, <sup>††</sup>okamoto@ais.riec.tohoku.ac.jp,

<sup>†††</sup>{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 communication such as 3D TV and 3D tele-conference. In this report, in order to evaluate whether the previously proposed near 3D sound field reproduction techniques using wave field synthesis is realized, the prototype system was developed by constructing the surrounding microphone array which has 157 microphones and the radiated loudspeaker array which has 157 loudspeaker units. In order to display the developed system, the string quartet was recorded in the surrounding microphone array. The string quartet was expressed in the radiated loudspeaker array by playing the recorded sound.

**Key words** 3D sound field reproduction, Near sound field, Wave field synthesis, Surrounding microphone array, Radiated loudspeaker array, String quartet



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 communication [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忠実に表現し、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ことができる三次元音場再生技術の一つである波面合成法 [3]~[7] 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収録した音をそのまま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。

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、先に聴取者が音源の周囲で音を聞くことができる波面合成法を用いた近接三次元音場再生技術を提案し、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

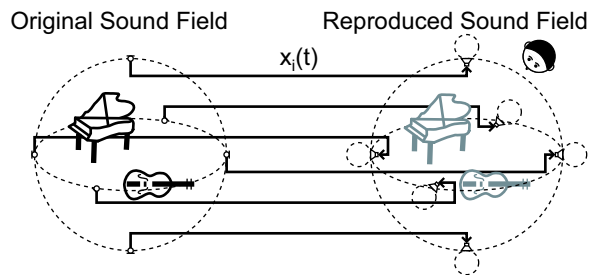


図2 指向点制御手法による近接三次元音場再生システム [8]  
Fig. 2 Near 3D sound field reproduction system based on directional point control method [8].

討してきた [8]. 本報告ではその中でも指向点制御手法に着目し、実際にマイクロホンアレイとスピーカアレイを構築することによって指向点制御手法によるシステムが実現可能であるかを検討した。

## 2. 指向点制御手法による近接三次元音場再生システム

先に提案した指向点制御手法による近接三次元音場再生システム [8] 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、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ことが期待される。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

### 3.1 マイクロホンアレイ

システムを実現するために用いたマイクロホンアレイとして、東北大学電気通信研究所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 [9]. 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 (B&K 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收音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



図3 包囲型マイクロホンアレイの概観図 [9]

Fig.3 Image of surrounding microphone array placed in the recording room [9].

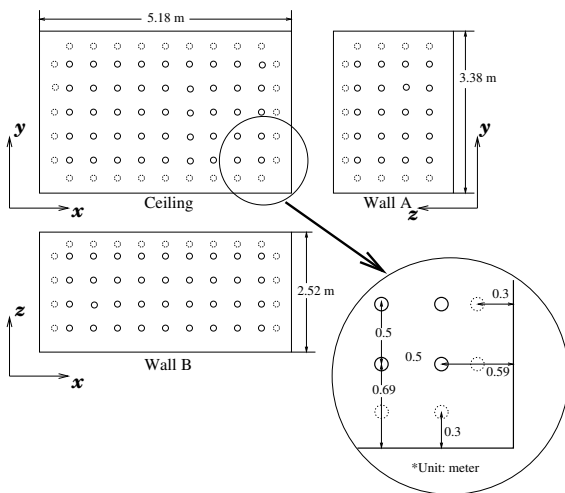


図4 包囲型マイクロホンアレイにおけるマイクロホンの配置図 [9]

Fig.4 Arrangement of microphones in the surrounding microphone array [9].

(B&K Type 2694) に接続されている。

### 3.2 スピーカアレイ

システムを実現するために用いるスピーカアレイとして、放射型スピーカアレイを新たに製造した。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スピーカアレイの大きさを想定するため、スピーカアレイの大きさは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)



図5 放射型スピーカアレイの概観図

Fig.5 Image of radiated loudspeaker array

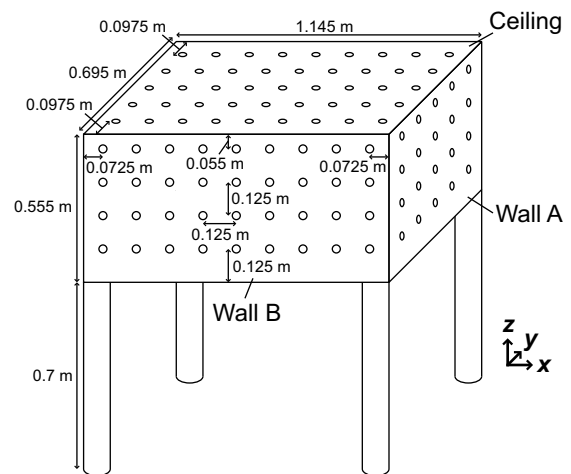


図6 放射型スピーカアレイにおけるスピーカユニットの配置図

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

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。但し、スピーカアレイの大きさは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、足を取り付けてスピーカアレイを床から0.7 m 底上げした。

## 4. システムの展示

### 4.1 音コンテンツの収録

試作したシステムを展示するために、展示用の音コンテンツを実際にマイクロホンアレイ部屋にて収録した。Fig. 7 に示すように、4名の演奏者 (2名のバイオリン奏者、ピアノ奏者、チェロ奏者) にマイクロホンアレイ部屋に入ってもらい、弦楽四重奏 (曲目: モーツァルト「アイネ・クライネ・ナハト・ムジーク」第1楽章) を4名で一斉に演奏してもらった。そして、演奏中の音を5面の壁に配置した計157個のマイクロホンで同期収録し、157チャンネルの入力信号を得た。収録機器には MOTU HD192 を14台用い、Steinberg Nuendo 3 を収録ソフトウェアとして4

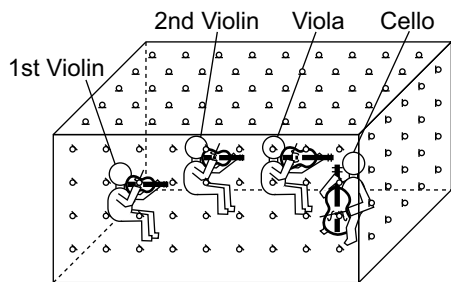


図7 試作システム展示のための弦楽四重奏の配置図

Fig. 7 Arrangement of string quartet for the display of the prototype system

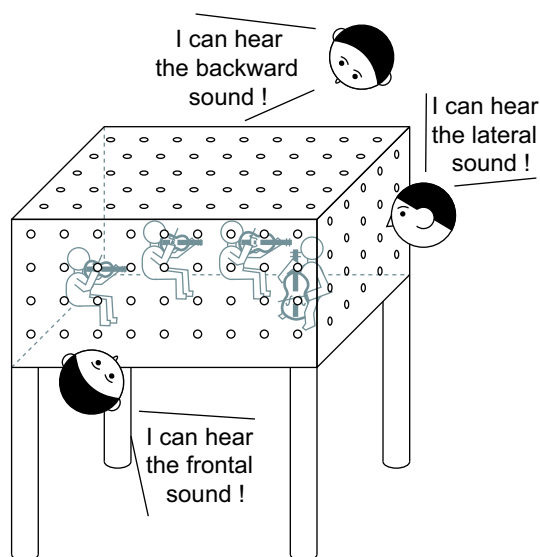


図8 試作システムの放射型スピーカアレイにおける弦楽四重奏の展示イメージ

Fig. 8 Image of display of string quartet in the radiated loudspeaker array of the prototype system

台の Apple Power Mac G5 にインストールして用いた。サンプリング周波数は 48 kHz で、量子化ビットは 16 bit である。

#### 4.2 音コンテンツの再生

3.1 節で収録した 157 チャンネル信号を Fig. 6 に示した放射型スピーカアレイに取り付けられた計 157 個のスピーカユニットでそのまま同期再生した。1 式の Digidesign Pro Tools HD を再生装置及びソフトウェアとして 1 台の Apple Mac Pro にインストールして用いた。その際、収録したマイクロホンの位置と再生した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。サンプリング周波数は 48 kHz で、量子化ビットは 16 bit である。その結果、放射型スピーカアレイの外側ではスピーカアレイの中に弦楽四重奏がいるように音場が形成されるので、Fig. 8 に示すようにスピーカアレイの外側で聴く場所によって弦楽四重奏の前や後ろ、横、上で聴いているように聴取者たちが感じることができるようになった。

なお、実現したシステムを 9 月 30 日～10 月 4 日に幕張メッセにて開催された CEATEC JAPAN 2008 [10] で展示したところ、「本当に弦楽四重奏がそこにあるように聴こえる」といった良い評価を多数得ることができた。

## 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指向点制御手法によるシステムを実現した。また、実現したシステムを展示するために実際に弦楽四重奏をマイクロホンアレイで収録し、スピーカアレイで再生した。

今後は今回実現したシステムの実環境性能を評価するために、測定した室内インパルス応答から音響インテンシティを算出し、音源位置推定を実施することによって、音源が所望した位置に推定されるかを検討する予定である。また、今回のシステム展示ではスピーカアレイの大きさがマイクロホンアレイの大きさと同じでないため、厳密にはスピーカアレイの外側では波面が忠実に合成されていない。それにもかかわらずシステムの効果を感じることができたので、今後はマイクロホンアレイとスピーカアレイの大きさが異なる場合におけるシステムの効果について詳細に検証していく必要があると考えられる。

一方で、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 [11]。従って、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, **18**, 9, pp. 41-45 (2007).
- [3] 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).
- [4] 伊藤敏: “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., **43**, 6, pp. 1425-1431 (1968).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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”, 応用音響研究会技術報告 EA2008-4, 電子情報通信学会 (2008).
- [9] T. Okamoto, R. Nishimura and Y. Iwaya: “Estimation of sound source positions using a surrounding microphone array”, Acoust. Sci. & Tech., **28**, 3, pp. 181-189 (2007).
- [10] CEATEC JAPAN. <http://www.ceatec.com/>.
- [11] 吉田俊介, R. Lopez-Gulliver, 矢野澄男, 井ノ上直己: “gCubik: 手に持ち複数人で鑑賞できるキューブ型立体ディスプレイの開発”, 3D 映像, **22**, 3, pp. 25-28 (2008).