

指向性マイクロホンと境界音場制御を用いた三次元音場再生システムにおける音響障害物の影響*

○木村敏幸 (NICT)

1 はじめに

近年、立体映像や立体音響を用いて超臨場感コミュニケーションを実現する研究が行われている [1]. この技術が実用化されると、遠隔通信会議システムや遠隔アンサンブルシステムのように、離れた場所にいる人々があたかも同じ会議室内で会議を行ったり、同じコンサートホール内で一緒に演奏しているように思わせることが可能になる. これらのシステムはテレビ電話のような従来のコミュニケーション手段とは比べ物にならないほどの臨場感を与えることができると考えられるため、普及すれば社会全体において遠隔コミュニケーションがより一層活発になっていくことが期待される.

超臨場感コミュニケーションを実現する要素技術の一つである三次元音場再生技術はマイクロホンで音を収録し、ヘッドホンもしくはスピーカで音を再生するだけで聴取者に臨場感を感じさせることができる技術である. 中でも、波面合成法 [2-6] は原音場に配置したマイクロホンアレイで音を収録し、再生音場に配置したスピーカアレイで収録した音を再生することにより、Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式 [7] に従って原音場の制御領域内の波面を再生音場の聴取領域内に忠実に再現させることができる技術である. この技術を用いたシステムはバイノーラル [8] やトランスオーラル [9] とは異なり、聴取者たちの聴取位置や頭部の向きに関する情報を取得しなくても複数の聴取者に同時に音場を体験させることができるというところに特徴がある.

筆者は今までに指向性マイクロホンを用いれば境界面上の音圧を制御するだけで三次元空間の音場が忠実に再現されることを示し、指向性マイクロホンと波面合成法を用いた三次元音場再生システムを提案してきた [10]. さらに、境界音場制御技術 [11] を導入すればスピーカを境界面上に配置しなくても三次元空間の音場が忠実に再現されることを示し、指向性マイクロホンと境界音場制御を用いた三次元音場再生システムを提案してきた [12].

しかし、今まで提案してきた指向性マイクロホンと境界音場制御を用いた三次元音場再生システムでは、スピーカアレイとマイクロホンアレイの間に音響透過型スクリーンのように音響伝達特性がほとんど変動しない音響障害物を配置した場合の検討を行っており、薄型テレビのような映像ディスプレイを配置した場合の検討を行っていなかった. 今後提案システムを用いて視聴覚システムを実用化させていくためには、薄型テレビのような映像ディスプレイを配置した場合の検討を行うことが必要であると考えられる.

そこで、本報告では従来提案されている指向性マ

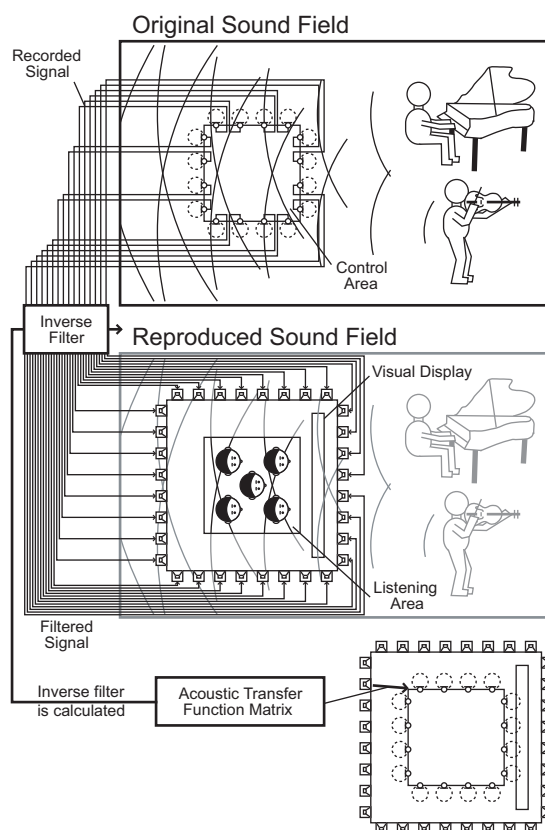


Fig. 1 Diagram of the proposed system.

イクロホンと境界音場制御を用いた三次元音場再生システムにおいて、映像ディスプレイのような音響障害物を配置することによる三次元空間音場への影響を計算機シミュレーションにより検討する.

2 提案システムの原理

今までに提案している指向性マイクロホンと境界音場制御を用いた三次元音場再生システムの概要を Fig. 1 に示す. まず、原音場において制御領域の境界面上に M 個の指向性マイクロホンを配置し、音を収録する. その際、指向性マイクロホンは制御領域の外側に向くようにする. 一方、再生音場において収録の時と同じ位置及び向きで M 個の指向性マイクロホンを配置し、その外側には音響障害物を、さらには聴取領域の外側の境界面上に N 個のスピーカを配置する. そして N 個のスピーカから M 個の指向性マイクロホンまでの音響伝達関数を測定し、音響伝達関数行列から逆フィルタを算出する. そして、収録した信号に逆フィルタを畳み込んで得られた信号を N 個のスピーカから再生する. その結果、聴取領域内において三次元音場が再現され、聴取領域内にいる聴取者

* Effect of Acoustic Obstacle in 3D Sound Field Reproduction System with Directional Microphones and Boundary Surface Control. by T. Kimura (National Institute of Information and Communications Technology)

私たちはあたかも原音場において演奏を聴いているように感じる。このとき、逆フィルタ処理によって、再生音場におけるでの音圧は収録した音と同じになるので、原音場において音源は制御領域の外側の好きな位置に配置することができる。従って、制御領域の外側かつスピーカアレイの内側に音源を配置すれば、聴取者たちにスピーカアレイの手前で音源が鳴っているように感じさせることも可能となる。

3 計算機シミュレーション

3.1 実験環境

原音場は反射音のない自由音場とした。複数の人が領域内で音を聴くことを想定して、制御領域は 1.92 m(幅)×1.92 m(奥行)×0.96 m(高さ)の大きさの正方柱に設定し、指向性マイクロホンアレイを設定した正方柱の表面上に設置した。一方、再生音場において聴取領域は制御領域と同じ大きさの正方柱に設定し、実在の部屋の壁面にスピーカを取り付けることを想定して、聴取領域の外側に 3.84 m(幅)×3.84 m(奥行)×1.92 m(高さ)の大きさに設定した正方柱の表面上にスピーカアレイを設置した。その際、再生音場も反射音のない自由音場とした。さらに、42 インチ型薄型映像ディスプレイを想定して 1.12 m(幅)×0.56 m(高さ)×0.16 m(奥行)の大きさに設定した音響障害物を聴取領域とスピーカアレイの間に設置した。原音場における指向性マイクロホンアレイと再生音場におけるスピーカアレイ及び音響障害物を Fig. 2 に示す。但し、Fig. 2 中の再生音場における灰色の領域は聴取領域を表す。Fig. 2 で示すように、指向性マイクロホンは正方柱の 6 面上に格子間距離 Δr_m で格子状に配置し、指向性を制御領域の外側に向けた。但し、正方柱の辺からマイクロホンまでの距離は格子間距離の半分 ($=\Delta r_m/2$) とした。一方、スピーカもマイクロホンと同じように正方柱の 6 面上に格子間距離 Δr_s で格子状に配置し、正方柱の辺からスピーカまでの距離は格子間距離の半分 ($=\Delta r_s/2$) とした。また、三次元座標上の原点は制御領域及び聴取領域の中心に設定した。

提案システムによる音場再現は以下の手順によって示される。まず、 $\mathbf{r}_i (i = 1 \dots M)$ に配置した M 個の指向性マイクロホンで収録する信号 $x_i(t)$ は音源信号 $s(t)$ から以下のように表わされる。

$$x_i(t) = D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)g(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i, t) * s(t) \quad (1)$$

但し、 $*$ は畳み込み演算、 \mathbf{r}_0 は音源の位置ベクトル、 $g(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i, t)$ は音源から M 個の指向性マイクロホン \mathbf{r}_i までの音響インパルス応答、 $D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)$ は i 番目の指向性マイクロホンの指向特性を表わす。 $g(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i, t)$ の算出には波動音響解析ソフトウェア COMFIDA(日東紡音響エンジニアリング社製)を用いた。その際、制御領域内の音速を 1/10 にすることによって、 $D_m(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_i)$ は制御領域の外側に指向性を持つようにした。また、音源信号 $s(t)$ は周波数 f の正弦波信号 ($= A \sin 2\pi f t$) とした。但し、 A は音源信号の振幅を表す。次に、収録した信号 $x_i(t)$ に逆フィルタを畳み込んだ信号 $y_l(t) (l = 1 \dots N)$

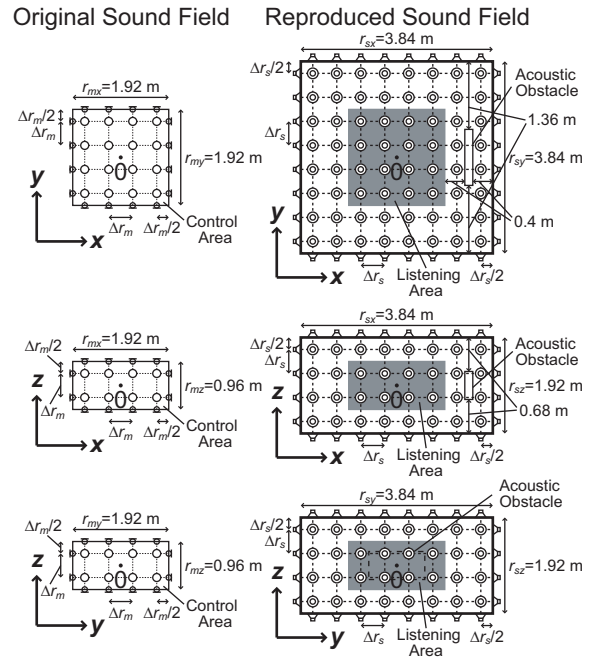


Fig. 2 Position of directional microphones, acoustic obstacles and loudspeakers.

は以下のように表わされる。

$$y_l(t) = \sum_{i=1}^M \Xi_{li} x_i \left(t - \frac{\Theta_{li}}{2\pi f} \right) \quad (2)$$

但し、 $\Xi_{li} (= |H_{li}(\omega)|)$ 及び $\Theta_{li} (= \arg H_{li}(\omega))$ は逆フィルタ $H_{li}(\omega)$ の絶対値及び偏角を表す。今回の計算機シミュレーションでは音源信号 $s(t)$ に正弦波を用いているので、絶対値及び偏角は ω に依らない定数として扱っている。逆フィルタは以下の式を満たすように算出した。

$$\sum_{i=1}^N D_m(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i)G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i, \omega)H_{li}(\omega) = \begin{cases} 1 & n = i \\ 0 & n \neq i \end{cases} \quad (3)$$

但し、 $G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i, \omega)$ は再生音場において \mathbf{r}'_l に配置した N 個のスピーカから M 個の指向性マイクロホンまでの音響伝達関数、 $D_m(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i)$ は N 個のスピーカから M 個の指向性マイクロホンまでの指向特性を表わす。 $G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i, \omega)$ の算出にも COMFIDA を用いた。最後に、 N 個のスピーカから $y_l(t)$ を再生することで、再生音場における聴取領域内の点 \mathbf{r} での音圧 $p(\mathbf{r}, t)$ は以下のように表わされる。

$$p(\mathbf{r}, t) = \sum_{l=1}^N g(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}, t) * y_l(t) \quad (4)$$

但し、 $g(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}, t)$ は N 個のスピーカから聴取領域内の点 \mathbf{r} までの音響インパルス応答を表す。 $g(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}, t)$ の算出にも COMFIDA を用いた。

計算機シミュレーションに用いたパラメータ条件を Table 1 に示す。マイクロホンの間隔は 16 cm であり、周波数が 1000 Hz の場合の波長 ($= \frac{343.59}{1000} = 34.359$ cm) の 1/2 以下である。従って、波面を忠実に合成するための空間サンプリング定理条件は満たされている。

Table 1 Parametric conditions.

Amplitude (A)	1
Frequency (f)	62.5, 125, 250, 500, 1000 Hz
Source Position (\mathbf{r}_0)	$(1.92, 0, 0)^T$, $(-1.92, 0, 0)^T$, $(0, 1, 92, 0)^T$, $(0, 0, 0.96)^T$
Sound velocity (c)	343.59 m/s
Microphone number (M)	576
Microphone interval (Δr_m)	0.16 m
Microphone array size (r_{mx}, r_{my}, r_{mz})	1.92×1.92×0.96 m
Loudspeaker number (N)	2304
Loudspeaker interval (Δr_s)	0.16 m
Loudspeaker array size (r_{sx}, r_{sy}, r_{sz})	3.84×3.84×1.92 m

また, \mathbf{r} , \mathbf{r}_i , \mathbf{r}'_l は 3 次元座標上で以下のように設定した.

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} \quad (|r_x|, |r_y| \leq 1.92, |r_z| \leq 0.96) \quad (5)$$

$$\mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} \frac{r_{mx}}{2} (-1)^i \\ \Delta r_m R\left(\frac{i}{2}, \frac{r_{my}}{\Delta r_m}\right) + \frac{\Delta r_m - r_{my}}{2} \\ \Delta r_m Q\left(\frac{i}{2}, \frac{r_{mz}}{\Delta r_m}\right) + \frac{\Delta r_m - r_{mz}}{2} \end{pmatrix} \quad (i = 1 \sim 144) \quad (6)$$

$$\mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} \Delta r_m R\left(\frac{i-144}{2}, \frac{r_{mx}}{\Delta r_m}\right) + \frac{\Delta r_m - r_{mx}}{2} \\ \frac{r_{my}}{2} (-1)^{i-144} \\ \Delta r_m Q\left(\frac{i-144}{2}, \frac{r_{mz}}{\Delta r_m}\right) + \frac{\Delta r_m - r_{mz}}{2} \end{pmatrix} \quad (i = 145 \sim 288) \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} \Delta r_m R\left(\frac{i-288}{2}, \frac{r_{mx}}{\Delta r_m}\right) + \frac{\Delta r_m - r_{mx}}{2} \\ \Delta r_m Q\left(\frac{i-288}{2}, \frac{r_{mz}}{\Delta r_m}\right) + \frac{\Delta r_m - r_{mz}}{2} \\ \frac{r_{my}}{2} (-1)^{i-288} \end{pmatrix} \quad (i = 289 \sim 576) \quad (8)$$

$$\mathbf{r}'_l = \begin{pmatrix} \frac{r_{sx}}{2} (-1)^l \\ \Delta r_s R\left(\frac{l}{2}, \frac{r_{sy}}{\Delta r_s}\right) + \frac{\Delta r_s - r_{sy}}{2} \\ \Delta r_s Q\left(\frac{l}{2}, \frac{r_{sz}}{\Delta r_s}\right) + \frac{\Delta r_s - r_{sz}}{2} \end{pmatrix} \quad (l = 1 \sim 576) \quad (9)$$

$$\mathbf{r}'_l = \begin{pmatrix} \Delta r_s R\left(\frac{l-576}{2}, \frac{r_{sx}}{\Delta r_s}\right) + \frac{\Delta r_s - r_{sx}}{2} \\ \frac{r_{sy}}{2} (-1)^{l-576} \\ \Delta r_s Q\left(\frac{l-576}{2}, \frac{r_{sz}}{\Delta r_s}\right) + \frac{\Delta r_s - r_{sz}}{2} \end{pmatrix} \quad (l = 577 \sim 1152) \quad (10)$$

$$\mathbf{r}'_l = \begin{pmatrix} \Delta r_s R\left(\frac{l-1152}{2}, \frac{r_{sx}}{\Delta r_s}\right) + \frac{\Delta r_s - r_{sx}}{2} \\ \Delta r_s Q\left(\frac{l-1152}{2}, \frac{r_{sz}}{\Delta r_s}\right) + \frac{\Delta r_s - r_{sz}}{2} \\ \frac{r_{sy}}{2} (-1)^{l-1152} \end{pmatrix} \quad (l = 1153 \sim 2304) \quad (11)$$

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. 今回の計算機シミュレーションでは, 音響障害物を配置しない場合と配置した場合において計算を実施し, 得られた結果を比較することによって音響障害物による三次元音場の再現精度への影響を検討した.

3.2 実験結果及び考察

再生音場における瞬時波面を Fig. 3 に示す. これらの図ではスピーカアレイで囲まれた 3.84 m×3.84 m×1.92 m の空間のうちの XY 平面 ($z = 0$), XZ 平面 ($y = 0$), YZ 平面 ($x = 0$) のみを図示し, 白色の点線はスピーカアレイで囲まれた空間の中に設定した

聴取領域 (1.92 m×1.92 m×0.96 m) の境界を表している. 平面上に図示している値は音圧 $p(\mathbf{r}, t)$ とし, 配色バーを図の右側に示している. 但し, 音圧は聴取領域内の 0.96 m×0.96 m×0.48 m の空間 ($|r_x| < 0.48$, $|r_y| < 0.48$, $|r_z| < 0.24$) において値を正規化している. “Without AO” は音響障害物を配置しない場合における波面, “With AO” は音響障害物を配置した場合における波面を表す. 従って, “With AO” における聴取領域内の配色が “Without AO” における聴取領域内の配色と同じであれば, 音響障害物による三次元音場への影響が小さいということが言える.

$\mathbf{r}_0 = (-1.92, 0, 0)^T$, $(0, 1, 92, 0)^T$, $(0, 0, 0.96)^T$ のときは “With AO” における聴取領域内の配色が “Without AO” における聴取領域内の配色とあまり変わらない. これはこれらの条件においては音源から聴取領域までの伝達経路の間に音響障害物が存在しないためであると考えられる. 従って, 薄型テレビのような映像ディスプレイを配置して視聴覚システムを構築した場合, 聴取者の側方, 後方, 上方からの音像による三次元空間音場は忠実に再現されると言える.

また, $\mathbf{r}_0 = (1.92, 0, 0)^T$ の場合でも, 周波数 f が 62.5, 125 Hz のときには “With AO” における聴取領域内の配色が “Without AO” における聴取領域内の配色とほとんど変わらない. これはこれらの条件においては音源から聴取領域までの伝達経路の間に音響障害物が存在するけれども, 回折の影響によって音響伝達特性がほとんど変化しないためであると考えられる. 従って, 薄型テレビのような映像ディスプレイを配置して視聴覚システムを構築した場合, 聴取者の前方からの音像による三次元空間音場は 125 Hz 以下の帯域において忠実に再現されると言える.

一方, $\mathbf{r}_0 = (1.92, 0, 0)^T$ において周波数 f が 250, 500, 1000 Hz のときには “With AO” における聴取領域内の配色が “Without AO” における聴取領域内の配色に比べてかなり変化している. これはこれらの条件においては音源から聴取領域までの伝達経路の間に音響障害物が存在することによって音響伝達特性が大きく変化するためであると考えられる. しかし, これらの条件では音源からの同心円の形状はほとんど変化していないため, 薄型テレビのような映像ディスプレイを配置して視聴覚システムを構築した場合でも, 250 Hz 以上の帯域においては聴取者の前方からの音像による定位方向は保持されると考えられる.

4 まとめ

本報告では, 先に提案した指向性マイクロホンと境界音場制御を用いた三次元音場再生システムにおいて, 映像ディスプレイのような音響障害物を配置することによる三次元空間音場への影響を計算機シミュレーションにより検討した. その結果, 聴取者の側方, 後方, 上方から音像を提示した場合には音響障害物を配置しても三次元空間音場が忠実に再現されることがわかった. また, 聴取者の前方から音像を提示した場合, 音響障害物を配置しても音像の定位方向は保持されるということが分かった.

今後は, 音波の流れを考慮した更なる評価を行う

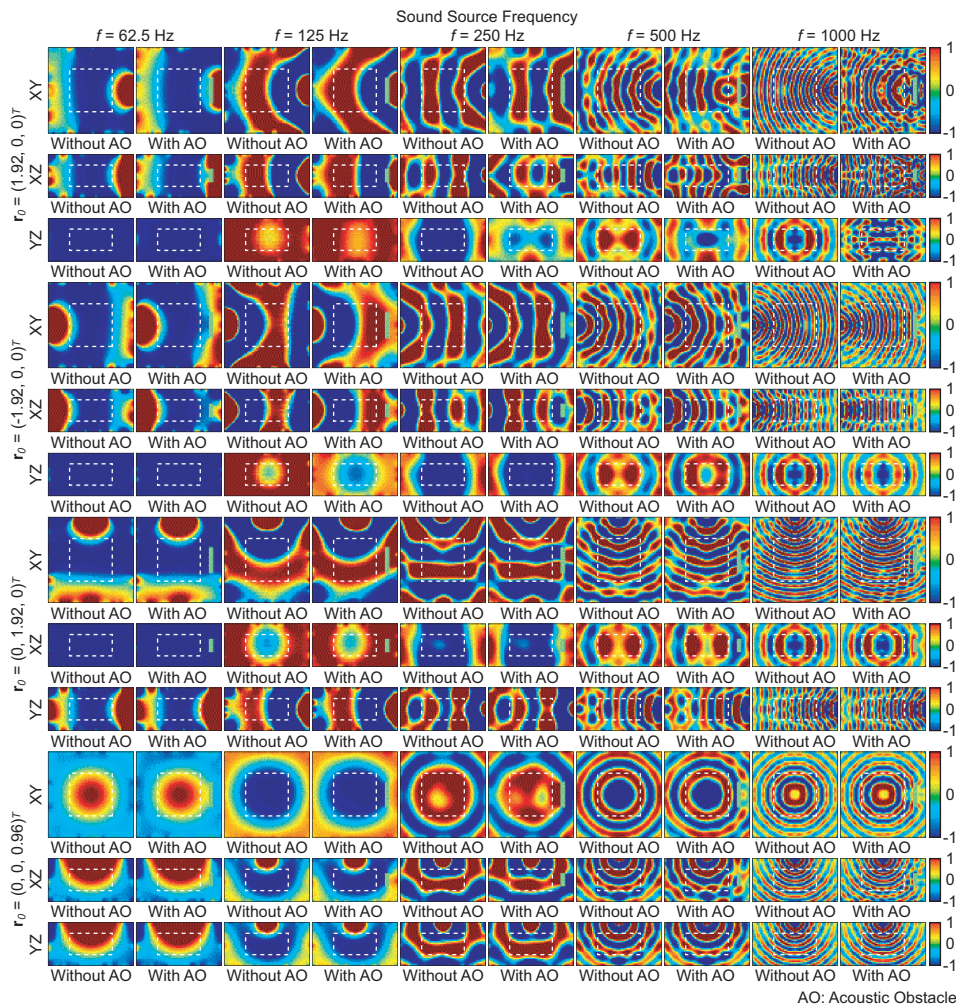


Fig. 3 Wavefronts of reproduced sound fields without and with acoustic obstacles in the computer simulation.

ために、パルス音源を用いた計算機シミュレーションを実施する必要があると考えられる。また、実際に薄型テレビのような映像ディスプレイを配置した視聴覚システムを構築し、聴取実験を実施することによって提案したシステムの実環境性能を評価する必要があると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、ご支援下さった NICT 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栗田泰市郎グループリーダー、勝本道哲博士、牧勝弘博士に感謝の意を申し上げます。また、波動音響解析ソフトウェア COMFIDA の運用に関してご支援下さった日東紡音響エンジニアリング株式会社鶴秀生博士に感謝の意を申し上げます。

参考文献

- [1] 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).
- [2] M. Camras: “Approach to recreating a sound field”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **43**, 6, pp. 1425–1431 (1968).
- [3] 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).
- [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*, **5**, 3, pp. 919–926 (2000).
- [5] 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).
- [6] J. Ahrens and S. Spors: “Sound field reproduction using planar and linear arrays of loudspeakers”, *IEEE Trans. Audio. Speech Lang. Process.*, **18**, 8, pp. 2038–2050 (2010).
- [7] B. B. Baker and E. T. Copson: “The Mathematical Theory of Huygens’ Principle”, pp. 23–26, Oxford University Press, London, UK, second edition (1950).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 木村敏幸, 笈一彦: “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*, **12**, 2, pp. 191–198 (2007).
- [11] 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).
- [12] 木村敏幸: “指向性マイクロホンと境界音場制御を用いた三次元音場再生システムの理論的検討及び数値解析”, *日本 VR 学会論文誌*, **15**, 2, pp. 231–241 (2010).