

指向性スピーカと境界音場制御を用いた 三次元放射音場再生システムの理論的検討*

○木村敏幸, 牧勝弘, 勝本道哲 (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]. これにより、今までの映像・音響技術では実現できなかったより臨場感、あるいは存在感を感じるコミュニケーションやサービスが可能になると期待されている. そのためには、これまで以上に物理的に忠実な映像や音響を再現する技術が必要となる.

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超臨場感音響技術として現在盛んに研究されているものとしては、波面合成システム [2-4] や 22.2ch システム [5] といったように、スピーカで空間の周りを囲むことによって映画館などの大規模な空間における臨場感を表現することを目指したものが多く、一方、我々の研究は Fig. 1 に示すように空中に立体物を提示することによって、提示した場所に立体物の存在感を表現することを目指している. これにより、人々は立体物を前後、左右もしくは上下から鑑賞することが可能になると考えられる.



Fig. 1 Future image of ultra-realistic communication

このような存在感を表現することのできる超臨場

感音響システムとして、我々は今までに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提案し [6], 包囲型マイクロホンアレイや放射型スピーカアレイを構築して実際にシステムを試作した [7]. さらに、音源探査技術を用いて試作システムの実環境性能を評価した [8].

しかし、今まで提案してきたシステムでは、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ということを前提としているのに対し、実際に試作したシステムでは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大きさの 1/4 である. そのため、包囲型マイクロホンアレイで収録した音を放射型スピーカアレイでそのまま再生しても、三次元放射音場の大きさが 1/4 に縮小されているため、実際に試作したシステムでは包囲型マイクロホンアレイで収録した三次元放射音場を忠実に再現することができない.

一方、超臨場感音響システムの実用例を考えると、マイクロホンアレイとスピーカアレイの大きさが異なっていることが多い. そのため、三次元放射音場の大きさが縮小されるという問題を解決するためには、マイクロホンアレイとスピーカアレイの大きさが異なっても忠実に三次元放射音場を再現することができる技術を新たに開発する必要があると考えられる.

そこで、本報告では従来提案されているシステムに境界音場制御技術 [9] を導入すれば、マイクロホンアレイとスピーカアレイの大きさが異なっても忠実に三次元放射音場が再現されることを数理的に導出し、指向性スピーカと境界音場制御を用いた三次元放射音場再生システムを新たに提案する.

2 システムの理論的検討

2.1 従来システムの原理

Fig. 2 に示すように、境界面 S 内に音源が存在し、境界面 S の外側の空間 V 上の点の位置ベクトルを \mathbf{r} 、離散化した境界面 S_i における位置ベクトルを \mathbf{r}_i 、 \mathbf{r}_i における境界面の外側方向への法線単位ベクトルを \mathbf{n}_i とした場合、 \mathbf{r} における音圧 $P(\mathbf{r}, \omega)$ は先に提案し

* Theoretical Study of 3D Radiated Sound Field Reproduction System with Directional Loudspeakers and Boundary Surface Control. by T. Kimura, K. Maki and M. Katsumoto (National Institute of Information and Communications Technology)

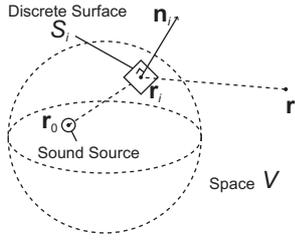


Fig. 2 Coordinates in the conventional system.

1. Sounds are recorded by M microphones
2. Sound fields are reproduced by playing M channels

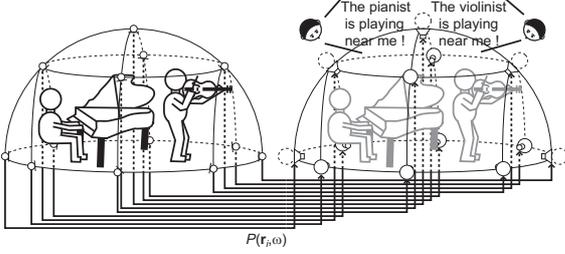


Fig. 3 Diagram of the conventional system.

たシステム [6] より以下のように表される.

$$P(\mathbf{r}, \omega) = jk \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) D_s(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}) G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega) \Delta S_i \quad (\mathbf{r} \in V) \quad (1)$$

但し, M は分割した境界面の数, ΔS_i は離散した境界面 S_i の面積, $D_s(\mathbf{r}_i|\mathbf{r})$ は \mathbf{r}_i に配置したスピーカの \mathbf{r} までの放射特性である. また, $G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega)$ は \mathbf{r}_i から \mathbf{r} までの音響伝達関数に相当し, 以下の式のように表される.

$$G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega) = \frac{\exp(-jk|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}|)}{4\pi|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}|} \quad (2)$$

但し, $k(= \omega/c)$ は波数, c は音速である. (1) 式は原音場において M 個の点 \mathbf{r}_i 上で音圧 $P(\mathbf{r}_i, \omega)$ をマイクロホンで収録し, 再生音場において M 個の点 \mathbf{r}_i 上で大きさ $jkP(\mathbf{r}_i, \omega)$ の指向性音源を再生することで, 再生音場における空間 V において原音場での収録時と同じ音圧が合成されることを示している.

(1) 式に基いた従来システムの構成を Fig. 3 に示す. まず, 原音場において音源の周りの境界面上に計 M 個の無指向性マイクロホンを配置し, 音 $P(\mathbf{r}_i, \omega)$ 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計 M 個の指向性スピーカを配置する. その際, 指向性スピーカは境界面より外側に向くようにする. そして, 収録した音 $P(\mathbf{r}_i, \omega)$ を M 個の指向性スピーカから再生する. すると, 境界面の外側で波面が合成されるので, 境界の外側にいる聴取者はあたかも境界内で音源が鳴っているように感じる. しかし, このシステム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ので,

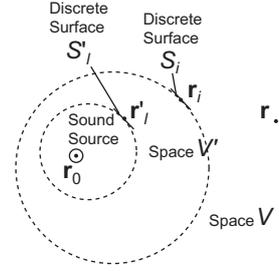


Fig. 4 Coordinates in the proposed system.

合成される放射音場の大きさはスピーカアレイの大きさに依存することになる. そのため, 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, マイクロホンアレイで収録した三次元放射音場を忠実に再現することができない.

2.2 提案システムの原理

Fig. 4 に示すように, 境界面 S の内側に境界面 S' を設定し, S' の外側を空間 V' とする (つまり, $V \in V'$). そして, 空間 V' の境界面 S' を N 個に離散化 $S'_l (l = 1 \dots N)$ し, その位置ベクトルを \mathbf{r}'_l とする. このとき, 空間 V' において音場を再現すると考えると, (1) 式から以下の式が成立する.

$$P(\mathbf{r}, \omega) = jk \sum_{l=1}^N P(\mathbf{r}'_l, \omega) D_s(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}) G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}, \omega) \Delta S'_l \quad (\mathbf{r} \in V') \quad (3)$$

但し, $\Delta S'_l$ は離散した境界面 S'_l の面積である. 一方, \mathbf{r}_i は常に空間 V' に存在するので, (3) 式より以下の式が成立する.

$$P(\mathbf{r}_i, \omega) = jk \sum_{l=1}^N P(\mathbf{r}'_l, \omega) D_s(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i) G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i, \omega) \Delta S'_l \quad (\mathbf{r}_i \in V') \quad (4)$$

(4) 式を (1) 式に代入すると, 以下の式が成立する.

$$P(\mathbf{r}, \omega) = jk \sum_{l=1}^N P(\mathbf{r}'_l, \omega) \left\{ jk \sum_{i=1}^M D_s(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i) G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i, \omega) D_s(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}) G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega) \Delta S_i \right\} \Delta S'_l \quad (\mathbf{r} \in V, \mathbf{r}_i \in V') \quad (5)$$

ゆえに, (5) 式を (3) 式と比較すると, 以下の関係が成立する.

$$D_s(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}) G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}, \omega) = jk \sum_{i=1}^M D_s(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i) G(\mathbf{r}'_l|\mathbf{r}_i, \omega) D_s(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}) G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega) \Delta S_i \quad (\mathbf{r} \in V, \mathbf{r}_i \in V') \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{r}_i に配置した M 個のマイクロホンで収録した信号に M 入力 N 出力のフィルタで処理を施し、得られた N チャンネル信号を \mathbf{r}'_l に配置した N 個の指向性スピーカで再生する境界音場制御システムを考える。収録した M チャンネル信号を $P(\mathbf{r}_i, \omega)$ とすると、フィルタ処理した N チャンネル信号 $P'(\mathbf{r}'_l, \omega)$ は以下の式のように表される。

$$P'(\mathbf{r}'_l, \omega) = \sum_{i=1}^M H_{li}(\omega) P(\mathbf{r}_i, \omega) \quad (l = 1 \dots N) \quad (7)$$

但し、 $H_{li}(\omega)$ は設定した M 入力 N 出力フィルタの係数である。ゆえに、合成される音場 $P'(\mathbf{r}, \omega)$ は以下の式のようになる。

$$\begin{aligned} P'(\mathbf{r}, \omega) &= \sum_{l=1}^N P'(\mathbf{r}'_l, \omega) D_s(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}) G(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}, \omega) \Delta S'_l \\ &= \sum_{l=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^M H_{li}(\omega) P(\mathbf{r}_i, \omega) \right. \\ &\quad \left. D_s(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}) G(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}, \omega) \Delta S'_l \right\} \\ &= \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) \left\{ \sum_{l=1}^N H_{li}(\omega) \right. \\ &\quad \left. D_s(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}) G(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}, \omega) \Delta S'_l \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

(8) 式に (6) 式を代入すると、以下の式のようになる。

$$\begin{aligned} P'(\mathbf{r}, \omega) &= \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) \left[\sum_{l=1}^N H_{li}(\omega) \left\{ jk \sum_{n=1}^M D_s(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}_n) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. G(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}_n, \omega) D_s(\mathbf{r}_n | \mathbf{r}) G(\mathbf{r}_n | \mathbf{r}, \omega) \Delta S_n \right\} \Delta S'_l \right] \\ &= jk \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) \left[\sum_{n=1}^M D_s(\mathbf{r}_n | \mathbf{r}) G(\mathbf{r}_n | \mathbf{r}, \omega) \right. \\ &\quad \left. \left\{ \sum_{l=1}^N H_{li}(\omega) D_s(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}_n) G(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}_n, \omega) \Delta S'_l \right\} \Delta S_n \right] \\ &\quad (\mathbf{r} \in V, \mathbf{r}_i \in V') \quad (9) \end{aligned}$$

このとき、

$$\sum_{l=1}^N H_{li}(\omega) D_s(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}_n) G(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}_n, \omega) \Delta S'_l = \begin{cases} 1 & n = i \\ 0 & n \neq i \end{cases} \quad (10)$$

となるようなフィルタを設定すれば、(9) 式は

$$\begin{aligned} P'(\mathbf{r}, \omega) &= jk \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) D_s(\mathbf{r}_i | \mathbf{r}) G(\mathbf{r}_i | \mathbf{r}, \omega) \Delta S_i \\ &= P(\mathbf{r}, \omega) \quad (\mathbf{r} \in V, \mathbf{r}_i \in V') \quad (11) \end{aligned}$$

となり、空間 V において三次元放射音場が再現される。ゆえに、(10) 式によって設計されるフィルタで処理をすれば、音を収録した点 (\mathbf{r}_i) とは異なる場所 (\mathbf{r}'_l)

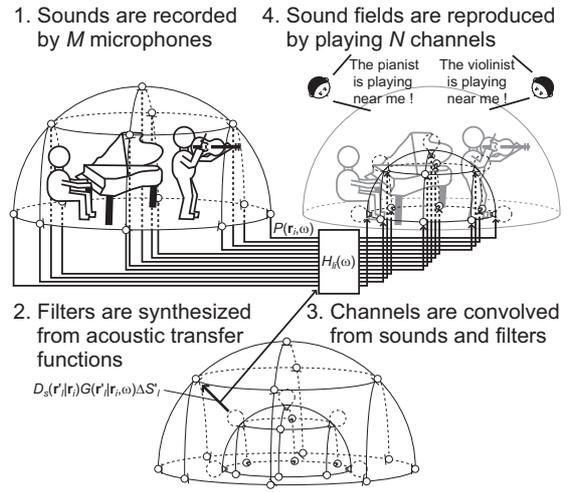


Fig. 5 Diagram of the proposed system.

に指向性スピーカを配置しても、聴取領域 (空間 V) において三次元放射音場を忠実に再現させることができる。このとき、 \mathbf{r}'_l は境界面 S' 上の点、 \mathbf{r}_i は境界面 S 上の点であることから、指向性スピーカは音を収録した境界面 S より内側の境界面 S' 上に満遍なく配置する必要があるということが言える。

(10) 式を行列表示すると、以下の式のように表される。

$$\mathbf{G}(\omega) \mathbf{H}(\omega) = \mathbf{I} \quad (12)$$

$$\mathbf{G}(\omega) = \begin{pmatrix} D_{s11} G_{11} & \dots & D_{sN1} G_{N1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{s1M} G_{1M} & \dots & D_{sNM} G_{NM} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{H}(\omega) = \begin{pmatrix} H_{11}(\omega) & \dots & H_{1M}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N1}(\omega) & \dots & H_{NM}(\omega) \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

但し、 $D_{sli} G_{li}$ は $D_s(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}_i) G(\mathbf{r}'_l | \mathbf{r}_i, \omega) \Delta S'_l$ を表す。ゆえに、フィルタ $\mathbf{H}(\omega)$ は以下の式によって算出される。

$$\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{G}^+(\omega) \quad (16)$$

但し、 $\mathbf{G}^+(\omega)$ は $\mathbf{G}(\omega)$ の Moore-Penrose 擬似逆行列である。 $\mathbf{G}(\omega)$ は \mathbf{r}'_l から \mathbf{r}_i までの音響伝達関数によって構成される行列であるので、算出するフィルタ $\mathbf{H}(\omega)$ は音響伝達関数の逆フィルタであるといえる。

導出した原理から提案する指向性スピーカと境界音場制御を用いた三次元放射音場再生システムの概要を Fig. 5 に示す。まず、原音場において制御領域の境界面上 \mathbf{r}_i に M 個のマイクロホンを設置し、音 $P(\mathbf{r}_i, \omega)$ を収録する。一方、再生音場において収録の時と同

じ位置で M 個のマイクロホンを配置し、制御領域の内側の境界面上 \mathbf{r}'_i にさらに N 個の指向性スピーカを配置する。その際、指向性スピーカは内側の境界面より外側に向くようにする。そして N 個の指向性スピーカから M 個のマイクロホンまでの音響伝達関数 $D_s(\mathbf{r}'_i|\mathbf{r}_i)G(\mathbf{r}'_i|\mathbf{r}_i, \omega)\Delta S'_i$ を測定し、音響伝達関数行列から逆フィルタ $H_{ii}(\omega)$ を算出する。最後に、収録した信号に逆フィルタを畳み込んで得られた信号 $P'(\mathbf{r}'_i, \omega)$ を N 個の指向性スピーカから再生する。その結果、聴取領域において三次元放射音場が再現され、聴取領域にいる聴取者たちはあたかも原音場における演奏を取り囲んで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 \mathbf{r}_i での音圧は収録した音 $P(\mathbf{r}_i, \omega)$ と同じになるので、原音場において音源は制御領域の内側の好きな位置に配置することができる。従って、制御領域の内側でかつスピーカアレイの外側に音源を配置すれば、聴取者たちにスピーカアレイの外側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。

実環境において提案システムを構築する場合、音響伝達関数には初期遅延が含まれているので、(16)式によって逆フィルタを算出すると、因果律を満たさないフィルタが算出される。そこで、因果律を満たすフィルタを算出するために、以下のような式に従って逆フィルタを算出する。

$$\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{G}^+(\omega)\mathbf{I}(\omega) \quad (17)$$

$$\mathbf{I}(\omega) = \begin{pmatrix} e^{-j\omega T} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{-j\omega T} \end{pmatrix} \quad (18)$$

但し、 T [s] は因果律を満たす逆フィルタを算出するために必要な遅延時間である。このとき、合成される音場は以下の式のようになり、システム全体で T 秒の遅延が生じることになる。

$$\begin{aligned} P'(\mathbf{r}, \omega) &= e^{-j\omega T} \sum_{i=1}^M P(\mathbf{r}_i, \omega) D_s(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}) G(\mathbf{r}_i|\mathbf{r}, \omega) \Delta S_i \\ &= e^{-j\omega T} P(\mathbf{r}, \omega) \quad (\mathbf{r} \in V, \mathbf{r}_i \in V') \end{aligned} \quad (19)$$

3 まとめ

本報告では、先に提案した近接三次元音場再生システムに境界音場制御技術を導入することによって、マイクロホンアレイとスピーカアレイの大きさが異なっても忠実に三次元放射音場が再現されることを数理的に導出し、指向性スピーカと境界音場制御を用いた三次元放射音場再生システムを提案した。

今後の方針としては、計算機シミュレーションによって提案したシステムの有効性を数値的に解析し

ていくことや、先に試作したシステムを利用し、音響計測を行うことによって提案したシステムの実環境性能を評価していくことが考えられる。

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] 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).
- [3] 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, **5**, 3, pp. 919–926 (2000).
- [4] 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).
- [5] 火山浩一郎, 濱崎公男: “走査線 4000 本級超高精細映像のための 3 次元音響システム”, 日本音響学会講演論文集, No. 2-10-12, pp. 567–568 (2004).
- [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”, 応用音響研究会技術報告 EA2008-4, 電子情報通信学会 (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: “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”, 応用音響研究会技術報告 EA2008-111, 電子情報通信学会 (2008).
- [8] 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”, 応用音響研究会技術報告 EA2008-141, 電子情報通信学会 (2009).
- [9] 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).