

解説 波面合成技術の研究動向*

木村敏幸 (独立行政法人情報通信研究機構) **

43.38.Hz, 43.60.Ac, 43.60.Sx, 43.60.Tj

1. はじめに

波面合成技術とは、ホイヘンス(Huygens)の原理に基づき、マイクロホンアレイとスピーカアレイを用いて原音場の波面を別の空間で合成する音場再現技術のことである。その際、物理的な波面を忠実に合成する点が心理音響モデルに基づく技術(5.1 サラウンド[1], 22.2 マルチチャンネル音響システム[2])とは大きく異なる特徴である。

本稿では、波面合成技術の原理と現在までに提案されてきた様々な技術の研究動向について解説する。

2. ホイヘンスの原理

図 1 にホイヘンスの原理に基づいた波面合成技術の模式図を示す。まず、図 1(a)に示すように、原音場においてマイクロホンアレイを配置し、音源(図 1 の場合はバイオリン奏者)からの音波を収録する。次に、図 1(b)に示すように、再生音場においてスピーカアレイを配置し、マイクロホンアレイで収録した音波をそのまま再生する。すると、各スピーカから発生された音波(図 1(c)中の点曲線)が合わさって、もう一つの別の音波(図 1(c)中の実曲線)が合成される。このとき、各スピーカの位置を各マイクロホンと同じ位置に対応させておけば、マイクロホンアレイで収録した音波と全く同じものがスピーカアレイから再生されるので、図 1(d)に示すように、スピーカアレイの前にいる人はマイクロホンアレイで収録した際の音の位置で音が鳴っているように感じる。

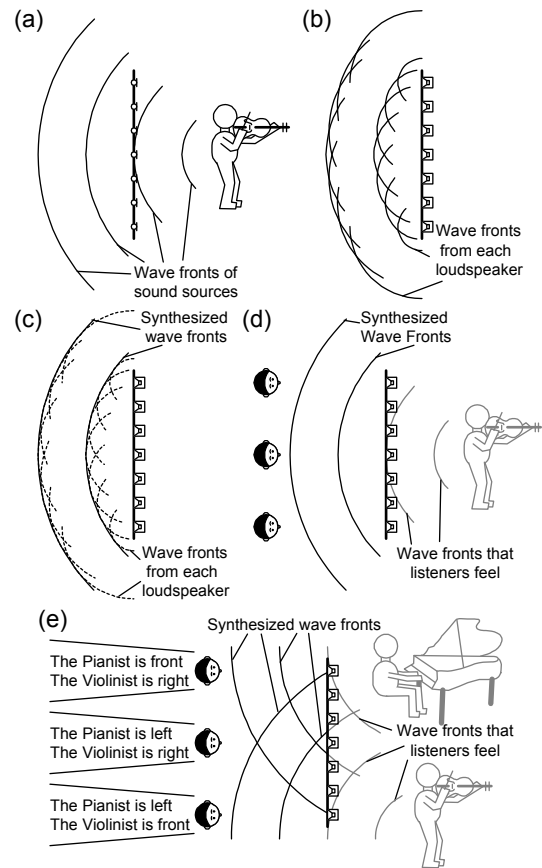


図 1 ホイヘンスの原理に基づいた技術の模式図

このように、マイクロホンアレイとスピーカアレイを用いれば、常に収録時の音の位置で音が鳴っているように複数の聴取者に感じさせることができるようになる。例えば、図 1(e)ではアレイの左手にピアノ奏者、右手にバイオリン奏者を配置した例を示しているが、アレイの中央にいる聴取者はピアノ奏者が左側で、バイオリン奏者が右側で演奏しているように感じるのに対し、アレイの左側(もしくは右側)にいる聴取者はピアノ奏者(もしくはバイオリン奏者)が正面で演奏しているように感じる。

* Research trends of wave front synthesis technologies.

** Toshiyuki Kimura (National Institute of Information and Communications Technology, Kyoto 619-0288) t-kimura@nict.go.jp

3. 黎明期の技術

当初、波面合成技術は主に直感的な発想に基づいて研究が行われていた。本章ではそのような時期に提案された技術について解説する。

1960年代に Camras はホイヘンスの原理に基づいた波面合成技術を提案した[3]。図 2 に提案された波面合成技術の模式図を示す。まず、原音場となる部屋に制御領域を想定し、制御領域の境界面上に単一指向性(カージオイド型)のマイクロホン(正面に 7 個、側方に 2 個、背面に 2 個、頭上に 1 個)配置する。その際、指向性マイクロホンは制御領域の外側に向けて配置する。一方、再生音場内に制御領域と同じ形をした聴取領域を想定し、マイクロホンと同じ位置にスピーカを配置する。そして、マイクロホンで収録した音をスピーカから再生すると、ホイヘンスの原理に基づいて聴取領域内に制御領域の波面が合成される。

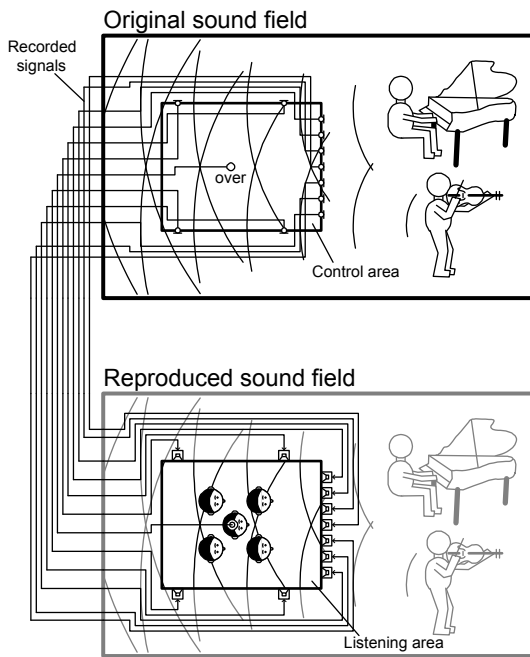


図 2 Camras による波面合成技術の模式図

Camras は原音場にコンサートホールのような非常に残響の多い空間を用い、会議室や屋外のような比較的残響の少ない空間にスピーカを配置して聴取者に音を聞かせたところ、聴取領域内にいる聴取者は比較的残響の少ない空間にいるにもかかわらず、あたかもコンサートホールにいるような印象を受けたと報告している[3]。Camras

によって提案された技術は、理論的な検討(単一指向性マイクロホンを用いた根拠、マイクロホンとスピーカの配置の妥当性など)については行っていないが、ホイヘンスの原理に基づいて技術を実装し、成果を挙げた最初の研究であると言える。

4. Wave Field Synthesis (WFS)

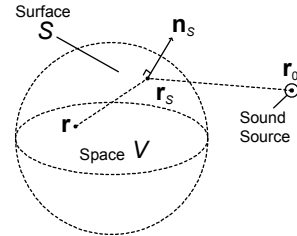


図 3 キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式の座標系

ホイヘンスの原理はキルヒホッフ-ヘルムホルツ(Kirchhoff-Helmholtz)積分方程式によって数学的に定式化されていることから、その後、1990年代からキルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式に基づいて波面合成技術が理論的に研究されるようになった。図 3 に示すように、全ての音源が閉空間 V の外側にある場合、キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式によって閉空間 V 内の音圧 $P(\mathbf{r}, \omega)$ は以下の式のように表わされる[4]。

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left\{ \frac{\partial P(\mathbf{r}_s, \omega)}{\partial \mathbf{n}_s} \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} - P(\mathbf{r}_s, \omega) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_s} \left(\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right) \right\} dS \quad (1)$$

ただし、 j は虚数単位、 $k = \omega/c$ は波数、 c は音速、 \mathbf{r} は閉空間 V 内の聴取位置の位置ベクトル、 S は閉空間 V の境界面、 \mathbf{r}_s は S 面上の点の位置ベクトル、 $\partial/\partial \mathbf{n}_s$ は S 面上における外向きの法線方向の偏微分、 $P(\mathbf{r}_s, \omega)$ は \mathbf{r}_s における音圧、 $\partial P(\mathbf{r}_s, \omega)/\partial \mathbf{n}_s$ は \mathbf{r}_s における外向きの法線方向の音圧勾配を表

わす。 $\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}$ は無指向性点音源、 $\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_s} \left(\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right)$

は双指向性点音源の音響伝搬特性を示している。なので、(1)式は、 \mathbf{r}_s 上で大きさ $\partial P(\mathbf{r}_s, \omega)/\partial \mathbf{n}_s$ の無指向性点音源と大きさ $-P(\mathbf{r}_s, \omega)$ の双指向性点音源を再生すれば、空間 V 内で音場が忠実に合成されることを示している[5]。しかし、(1)式に基づいた

技術は、2種類(無指向性、双指向性)のマイクロホンおよびスピーカを同じ位置に配置する必要があることから、実装することが困難であると考えられてきた。

一方、境界面を無限大の大きさを持つ平面($z=z_1$)とすると、(1)式は下記の2種類の式に変形することができる[5].

$$P(\mathbf{r}, \omega) = -\frac{1}{2\pi} \int_S \frac{\partial P(\mathbf{r}_s, \omega)}{\partial \mathbf{z}} \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} dS \quad (2)$$

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_S P(\mathbf{r}_s, \omega) \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}} \left(\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right) dS \quad (3)$$

ただし、法線方向は z 軸方向に等しいので、 $\partial/\partial \mathbf{n}_s$ を $\partial/\partial \mathbf{z}$ に置き換えている。(2)式は第1種レイリー(Rayleigh)積分と呼ばれており、 \mathbf{r}_s 上で大きさ $-\partial P(\mathbf{r}_s, \omega)/\partial \mathbf{z}$ の無指向性点音源を再生すれば、空間 V で音場が忠実に合成されることを示している[5]. 一方、(3)式は第2種レイリー積分と呼ばれており、 \mathbf{r}_s 上で大きさ $P(\mathbf{r}_s, \omega)$ の双指向性点音源を再生すれば、空間 V で音場が忠実に合成されることを示している[5]. これらの式に基づいて技術を実装することは、無指向性もしくは双指向性のマイクロホンおよびスピーカを境界面上に配置するだけで良いので、十分に可能となる。

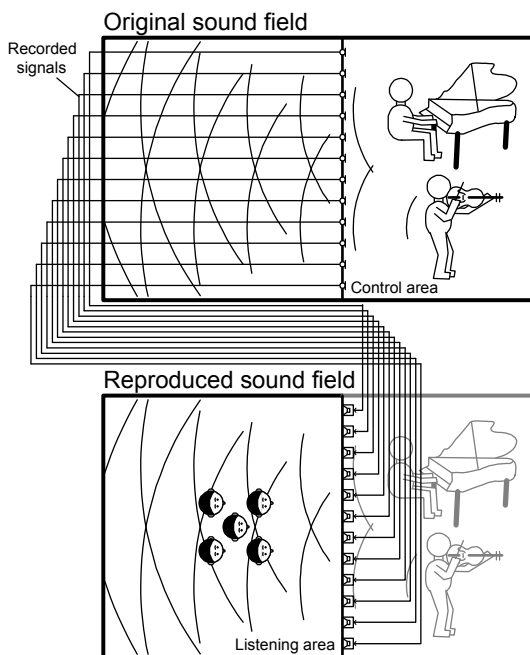


図4 Wave Field Synthesis (WFS)の模式図

そこで、Berkhoutらは(3)式の第2種レイリー

積分に基づいた波面合成技術を提案した. この技術は一般に Wave Field Synthesis (WFS)と呼ばれている[6]. 図4にWFSの模式図を示す. まず, 境界面上に無指向性マイクロホンを配置し, 音を収録する. 一方, 再生音場内に境界平面に面した聴取領域を想定し, マイクロホンと同じ位置に双指向性スピーカを配置する. その際, 双指向性スピーカは聴取領域側に向かって配置する. そして, 収録した音を双指向性スピーカから再生すると, 境界平面の聴取領域側に波面が合成される.

WFSの場合, 理想的にはマイクロホンやスピーカを連続的に配置した無限長の平面アレイを用いることが望ましいが, 設備の都合上, 現状では離散的に配置した有限長の線形アレイを用いている. そのため, そのようなアレイを用いたことによる影響(離散化・二次元化・有限長化による誤差)が必ず発生するが[7], ヨーロッパの大学・研究機関を中心として現在でも盛んに研究が行われており, WFSを構築するためのソフトウェアやハードウェアも製品化されている[8].

また, 最近では(2)式の第1種レイリー積分に基づいた波面合成技術も研究されている. この技術は無指向性のスピーカを用いるので, 双指向性スピーカを用いたWFSよりもより忠実に波面が合成されると期待されている. 音の収録の際には境界面上の音圧勾配 $-\partial P(\mathbf{r}_s, \omega)/\partial \mathbf{z}$ を収録する必要があるが, 現在までに様々な収録方法が提案されている[9-10].

WFSに関連した最近の成果の一つとして, 複加振板(Multi-Actuator Panel, MAP) [11]を用いたスピーカアレイを紹介する. 図5に構成図を示す. MAPは薄くて硬い振動板に複数の加振器を装着した構造となっている. その際, 内部減衰の高い材料を振動板に採用することで, ある特定の加振器が振動しても, その振動した加振器の装着位置周辺でしか振動板が振動しないようにする. その結果, 従来の動電型スピーカで構築したアレイと同じような波面をMAPでも合成できるようになる.

加振器は振動板の裏側に装着されていて普段は目に見えないので, 部屋のインテリアとしても邪魔にならない. また, MAPをプロジェクト用のスクリーンとして用いれば, 映像と統合したシステムも容易に構築できることがMAPの大きな

特徴である. 現在までにヨーロッパを中心とした大学・研究機関において MAP を用いた WFS が実装されている[11].

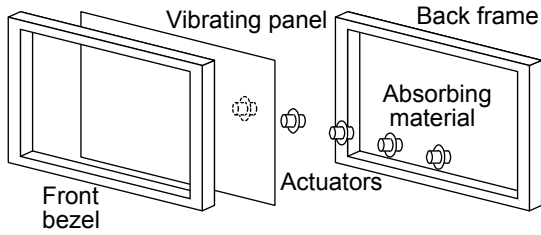


図 5 Multi-Actuator Panel (MAP)の構成図

5. 指向性マイクロホンを用いた技術

WFS は境界面の音圧もしくは音圧勾配のどちらかを制御すればよく, 実装しやすいのが特徴であるが, 境界面を無限大の平面としているために, 制御領域と聴取領域が壁で分断されたような構成になってしまう. そのため, 前方からの音のみを再生するような用途には適しているが, (側方や後方からの)サラウンド音も再生するような用途には適していないのが欠点である.

一方, (1)式において音圧勾配 $\partial P(\mathbf{r}_s, \omega) / \partial \mathbf{n}_s$ と双

指向性音源の音響伝搬特性 $\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_s} \left(\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right)$ は下記

のように近似することができる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(\mathbf{r}_s, \omega)}{\partial \mathbf{n}_s} &= \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_s} \left(\frac{Ae^{-jk|\mathbf{r}_s-\mathbf{r}_0|}}{|\mathbf{r}_s-\mathbf{r}_0|} \right) \\ &= -\frac{Ae^{-jk|\mathbf{r}_s-\mathbf{r}_0|}}{|\mathbf{r}_s-\mathbf{r}_0|} \left(\frac{1}{|\mathbf{r}_s-\mathbf{r}_0|} + jk \right) \cos \theta_0 \\ &= -P(\mathbf{r}_s, \omega) \left(\frac{1}{|\mathbf{r}_s-\mathbf{r}_0|} + jk \right) \cos \theta_0 \\ &\approx -jkP(\mathbf{r}_s, \omega) \cos \theta_0 \left(k \gg \frac{1}{|\mathbf{r}_s-\mathbf{r}_0|} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_s} \left(\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right) &= -\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \left(\frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} + jk \right) \cos \theta \\ &\approx -jk \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \cos \theta \\ &\quad \left(\text{if } k \gg \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

ただし, $\theta_0 = \cos^{-1} \left\{ \frac{\mathbf{n}_s \cdot (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_0)}{|\mathbf{n}_s| |\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_0|} \right\}$ はベクトル \mathbf{n}_s と

$\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_0$ がなす角度, $\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\mathbf{n}_s \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_s)}{|\mathbf{n}_s| |\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|} \right\}$ はベクトル \mathbf{n}_s と $\mathbf{r} - \mathbf{r}_s$ がなす角度を表す.

(4)式と(5)式を(1)式に代入すると, 下記の式が得られる.

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{jk}{4\pi} \int_S \left\{ P(\mathbf{r}_s, \omega) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} (\cos \theta - \cos \theta_0) \right\} dS \quad (6)$$

この式はフレネルーキルヒホッフ (Fresnel-Kirchhoff) の回折公式と呼ばれている [12]. さらに, \mathbf{r} が閉空間 V の中心付近にある場合, \mathbf{n}_s と $\mathbf{r} - \mathbf{r}_s$ の方向は常にほぼ同じになる. したがって, $\cos \theta - \cos \theta_0$ の項は θ_0 のみ依存するので, (6)式は以下のように近似される.

$$P(\mathbf{r}, \omega) \approx \frac{jk}{4\pi} \int_S \left\{ D(\theta_0) P(\mathbf{r}_s, \omega) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right\} dS \quad (7)$$

ここで, $D(\theta_0)$ は \mathbf{r}_s に配置したマイクロホンの指向特性に相当する. (7)式は \mathbf{r}_s 上で大きさ $jkD(\theta_0)P(\mathbf{r}_s, \omega)$ の無指向性点音源を再生すれば, 空間 V で音場が忠実に合成されることを示している. WFS では境界面上の音圧もしくは音圧勾配のみを制御するために, 境界面そのものを変形しているが, (7)式では境界面を変形せずに境界面上の音圧のみを制御するために, マイクロホンの指向特性を導入していると言える. その際, $D(\theta_0)$ は θ_0 のみに依存しているため, 音源からマイクロホンまでの距離には依存せず, 音源の入射方向のみに依存している. 従って, 一般的な指向性マイクロホンを用いることで波面合成技術を実装することが可能になると考えられる.

そこで, 木村らは(7)式に基づき, 指向性マイクロホンを用いた波面合成技術を提案した[13]. 図6に提案した技術の模式図を示す. まず, 原音場において制御領域の境界面上に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にスピーカを配置する. そして, 収録した音をス

ピーカから再生する。その結果、聴取領域内において音場が再現され、聴取領域内にいる聴取者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。

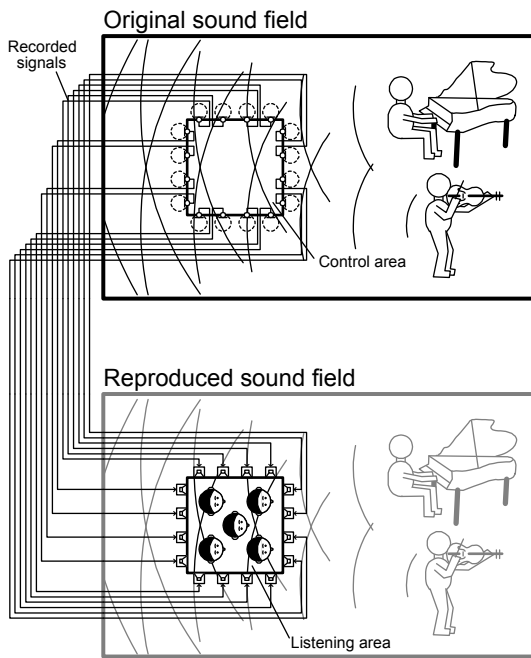


図 6 指向性マイクロホンを用いた波面合成技術の模式図

木村らはマイクロホンとスピーカの指向特性が波面の合成精度に及ぼす影響を計算機シミュレーションによって検討したところ、スピーカの指向特性による影響は見られなかったが、マイクロホンに関しては無指向性よりも単一指向性や超指向性のものを用いた方がより忠実な波面が合成できると報告している[13]。結果的に、木村らによって提案された技術は第 3 章で述べた波面合成技術を理論的及び数値的に裏付けていると言える。

さらに、木村は逆フィルタ技術を導入すれば、スピーカの位置が指向性マイクロホンの位置と異なっても波面が忠実に合成されていることを理論的に説明し、映像用ディスプレイと組み合わせることのできる波面合成技術を提案している[14]。図 7 に提案した技術の模式図を示す。まず、原音場において制御領域の境界面上に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指向性マイクロホンを配置し、

聴取領域の外側の境界面上にさらにスピーカを配置する。そしてスピーカから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スピーカから再生する。その結果、聴取領域内において音場が再現され、聴取領域内にいる聴取者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、逆フィルタの算出の際に聴取領域上に配置した指向性マイクロホンは音を再生する際には配置する必要がないので、境界面上またはその外側にスクリーンやディスプレイを配置して視聴覚システムを構築することが可能になる。また、制御領域の外側で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。

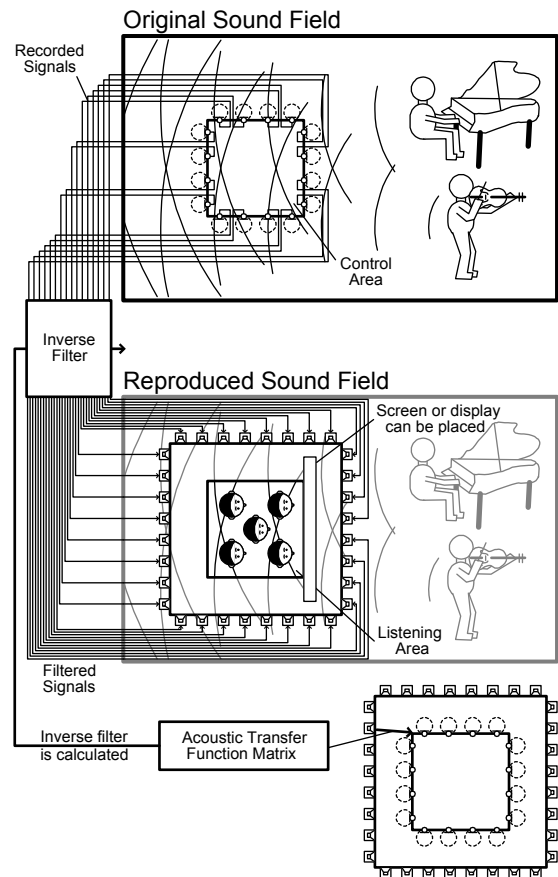


図 7 指向性マイクロホンと逆フィルタを用いた波面合成技術の模式図

木村は計算機シミュレーションによって提案した技術の有効性を検討したところ、逆フィルタを用いた方がより忠実な波面が合成されると報

告している[14].

6. おわりに

ホイヘンスの原理は元々自然界における光波の様々な現象(回折, 屈折, 反射など)を説明するために提案され, 後にフレネルやキルヒホッフによって数学的な裏付けがなされた波動光学の原理である. 波面合成技術はその原理を音波に転用したものである. 音波の自然現象を忠実に取り扱っていると言える. そのため, 波面合成技術によって合成された音場は「より自然な」ものであると期待されている.

今後は実環境で波面合成技術を実装する際の問題点(スピーカアレイを残響空間に配置した場合など)をどう解決していくかが研究の焦点になると考えられるが, 一方で波面合成技術を実装するためのマイクロホンやスピーカの開発も研究の焦点となると考えられる. 例えば, MEMS(Micro Electro Mechanical System)技術を用いたスピーカが現在開発されており[15], これを用いれば超小型のスピーカを構築することが可能となる. 従って, MEMS スピーカを用いれば, 今まではスピーカ単体の大きさの問題から実装が困難と考えられてきたキルヒホッフーヘルムホルツ積分方程式に基づいた波面合成技術も実装が可能になることが期待される.

参考文献

- [1] ITU-R Rec. BS.775-2, "Multi-channel Stereophonic Sound System with or without Accompanying Picture," ITU (2006).
- [2] K. Hamasaki, T. Nishiguchi, R. Okumura, Y. Nakayama and A. Ando, "A 22.2 Multichannel Sound System for Ultrahigh-definition TV," *SMPTE Motion Imaging J.*, **117**, 40-49 (2008).
- [3] M. Camras, "Approach to Recreating a Sound Field," *J. Acoust. Soc. Am.*, **43**, 1425-1431 (1968).
- [4] 安藤彰男, "高臨場感音響技術とその理論," *IEICE Fundamentals Review*, **3**, 33-46 (2010).
- [5] 安藤彰男, "物理音響モデルに基づく音響システムの研究動向," *NHK 技研 R&D*, **126**, 14-24 (2011).
- [6] A. J. Berkhout, D. de Vries and P. Vogel, "Acoustic Control by Wave Field Synthesis," *J. Acoust. Soc. Am.*, **93**, 2764-2778 (1993).
- [7] タイレ・ギュンター, ヴィテック・ヘルムート(抄訳: 小野一穂, 濱崎公男), "Wave Field

Synthesis による空間レンダリング手法について," 日本音響学会誌, **60**, 608-613 (2004).

- [8] IOSONO GmbH,
<http://www.iosono-sound.com/>.
- [9] S. Koyama, Y. Hiwasaki, K. Furuya and Y. Haneda, "Inverse Wave Propagation in Wave Field Synthesis," *Proc. AES 40th Int. Conf.*, P-10, pp.1-9 (2010).
- [10] J. Ahrens and S. Spors, "Sound Field Reproduction Using Planar and Linear Arrays of Loudspeakers," *IEEE Trans. Audio Sp. and Lang. Process.*, **18**, 2038-2050 (2010).
- [11] B. Pueo, J. J. López, J. Escolano and L. Hörchens, "Multiactuator Panels for Wave Field Synthesis: Evolution and Present Developments," *J. Audio. Eng. Soc.*, **58**, 1045-1063 (2010).
- [12] B. B. Baker and E. T. Copson, *The Mathematical Theory of Huygens' Principle* (Oxford University Press, London, 1950), pp. 72-74.
- [13] 木村敏幸, 寛一彦, "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**, 191-198 (2007).
- [14] 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," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **15**, 231-241 (2010).
- [15] S.-S. Je, F. Rivas, R. E. Diaz, J. Kwon, J. Kim, B. Bakkaloglu, S. Kiaei and J. Chae, "A Compact and Low-Cost MEMS Loudspeaker for Digital Hearing Aids," *IEEE Trans. Biomedical Cir. Sys.*, **3**, 348-358 (2009).

木村敏幸

1998年名大・工・物化卒. 2000年同大学院・人間情報・修士課程了. 2005年同大学院・人間情報・博士課程了. 日本学術振興会特別研究員(PD), 名大研究員, 東京農工大特任助手を経て, 2007年よりNICT・専攻研究員, 現在に至る. 立体音響, 空間知覚, アレイ信号処理に関する研究に従事. 博士(学術).