

# Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式の逆問題解法による音源の指向性推定 —理論とシステムの構成— \*

池田雄介, 唐津佑宜, 渡邊祐子, 伊勢史郎 (東京電機大/ JST CREST)

## 1 はじめに

我々はあたかも同じ空間にいるかのような遠隔コミュニケーションの実現を目指し、音場共有システムの開発を行ってきた [1, 2]。音場共有システムは境界音場制御に基づき構築され、境界内の一定の領域の音場が物理的に再現されることで、受聴者は頭部を動かしながら自然に音を聴くことが可能である。

一方、音声や楽音など一般に音源は固有の指向性をもっており、特に人が発音に関与する場合その人の動きに応じて向きや方向など音の放射は時々刻々と変化する。また音声において話者の動きによる音の変化が人の存在感に影響を与えることが示唆されている [3]。

これまでに我々は音場共有システムにおいて動きも含めた音場の再現を行う目的で共有する音場の伝達特性に含まれる音源の指向特性を利用し、話者の顔の向きに応じて音源の指向特性の向きが異なる伝達特性を使用することで話者の動きに応じた音声を再現する音場共有システムの構築を行ってきた [4]。しかし、これには音源の指向性のモデル化と動きに応じた伝達特性の測定が必要となることや音源自体の動きを検知する必要があり、楽器など他の音源に適用するのが困難などの問題があった。

そこで本研究では Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式 (KHIE) と逆システムを用いて音源を取り囲む閉曲面の外側において音源の放射の再現を行う手法を提案し、自由音場シミュレーションにより指向性の再現について評価を行う。また本手法を用いた音源固有の指向性とその動きを物理的に再現することが可能な音場共有システムの構成について述べる。

## 2 理論

KHIE に基づき音源の放射を物理的に推定し再現する手法の概念図を Fig.1 に示す。音源を含む領域を  $V$ 、それを取り囲む閉曲面を  $S$  とするとその外側の領域  $V_O$  の音圧は

$$p(\mathbf{r}') = \iint_S \left( G \frac{\partial p(\mathbf{r})}{\partial \mathbf{n}} - p(\mathbf{r}) \frac{\partial G}{\partial \mathbf{n}} \right) dS \quad (1)$$

$(\mathbf{r} \in S, \mathbf{r}' \in V_O)$

と表せる [5]。ここで  $G$  はグリーン関数、 $\mathbf{n}$  は閉曲面  $S$  の内向きの法線ベクトルである。

同様に再現音場に領域  $V$  と閉曲面  $S$  と合同な領域  $V'$  と閉曲面  $S'$  を考える。ここで式 1 と領域  $V$  と  $V'$  が合同であるという関係を用いると領域  $V'$  の外側の領域  $V'_O$  の音圧は閉曲面  $S$  と  $S'$  上の音圧と粒子速度が一致することで領域  $V_O$  の音圧と一致する。したがって、閉曲面  $S$  上の音圧と粒子速度を閉曲面  $S'$  上で再現すれば、再現音場の閉曲面  $S'$  の外側において領域  $V'$  にあたかも音源が存在するかのように音の放射が再現される。

さらに原音場において閉曲面  $S$  の外側に観測面  $S_E$  を考える。観測面  $S_E$  は領域  $V_O$  に含まれることから観測面  $S_E$  上の音圧は式 1 によって表すことができる。閉曲面  $S$  と観測面  $S_E$  をそれぞれ  $N$  個と  $M$  個の微小領域  $\Delta S_k$  と  $\Delta S_{E,j}$  に離散化すると微小領域  $S_{E,j}$  上の音圧は式 1 より

$$p_{E,j} = \sum_{k=1}^N \left( G_{j,k} \frac{\partial p_k}{\partial \mathbf{n}} - p_k \frac{\partial G_{j,k}}{\partial \mathbf{n}} \right) \Delta S_k \quad (2)$$

$(j = 1, \dots, M)$

と表すことができる。ただし、 $p_k$  は微小領域  $\Delta S_k$  の音圧であり、 $G_{j,k}$  は微小領域  $\Delta S_k$  と  $\Delta S_{E,j}$  の Green 関数である。

ここで微小領域  $\Delta S_k$  に対する法線方向の外側と内側それぞれに微小領域  $\Delta S_{O,k}$ 、 $\Delta S_{I,k}$  を考え、微小領域  $\Delta S_k$  との距離を  $h$  とする。距離  $h$  が十分に小さければ微小領域  $\Delta S_{O,k}$ 、 $\Delta S_{I,k}$  の音圧  $p_{O,k}$ 、 $p_{I,k}$  を用いて微小領域  $\Delta S_k$  の音圧と粒子速度について下記の近似が成り立つ。

$$p_k \cong \frac{p_{I,k} + p_{O,k}}{2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p_k}{\partial \mathbf{n}} \cong \frac{p_{I,k} - p_{O,k}}{2h} \quad (4)$$

したがって式 3 と式 4 を式 2 に代入し、行列形式で書き直すと下記が得られる。

$$\mathbf{p}_E = \mathbf{H}_E \mathbf{p}, \quad (5)$$

\* Estimation of sound source radiation based on inversion of Kirchhoff-Helmholtz integral equation -Theory and System Architecture- by IKEDA, Yusuke, KARATSU, Yuki, WATANABE, Yuko, ISE, Shiro (Tokyo Denki University / CREST, JST)

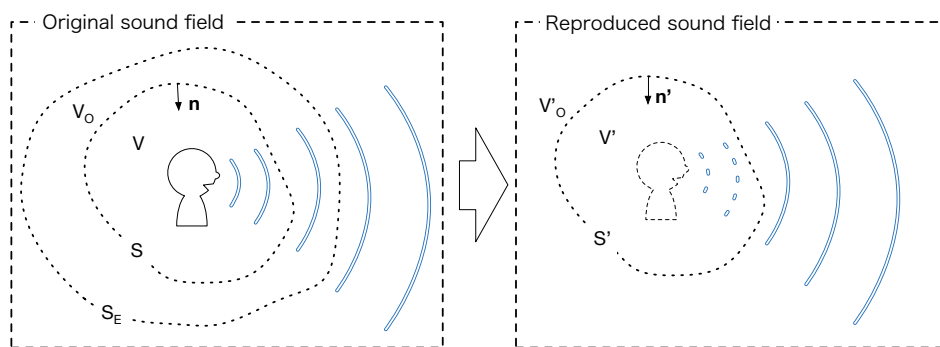


Fig. 1 Concept of sound radiation reproduction based on the KHIE and the inverse system.

ただし,

$$\mathbf{p} = [p_{I,1}, \dots, p_{IN,N}, p_{O,1}, \dots, p_{O,N}]^T,$$

$$\mathbf{H}_E = \frac{1}{2} \mathbf{G} \mathbf{S},$$

$$\mathbf{G} = [\mathbf{G}_1 \quad \mathbf{G}_2], \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_d & 0 \\ 0 & \mathbf{S}_d \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G}_1(j, k) = \frac{G_{j,k}}{h} - \frac{\partial G_{j,k}}{\partial \mathbf{n}}, \quad \mathbf{G}_2(j, k) = \frac{G_{j,k}}{h} + \frac{\partial G_{j,k}}{\partial \mathbf{n}},$$

$$(j = 1, \dots, M, \quad k = 1, \dots, N).$$

とする。ここで  $\mathbf{p}_E$  は微小領域  $\Delta S_{E,j} (j = 1, \dots, M)$  の音圧ベクトル,  $\mathbf{H}_E$  は  $M \times 2N$  行列,  $\mathbf{S}_d$  は対角行列  $diag(\Delta S_1, \dots, \Delta S_N)$ ,  $[\cdot]^T$  は転置を表す。

したがって, 式 5 より  $S$  上の音圧は  $\mathbf{H}_E$  の逆行列を用いて下記のように表せる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{H}_E^{-1} \mathbf{p}_E. \quad (6)$$

これは逆システム  $\mathbf{H}_E$  を用いることで  $S_E$  上の音圧から閉曲面  $S$  上の音圧が推定可能であることを示している。したがって推定された音圧を閉曲面  $S'$  上で再現することで音源の放射の再現が可能となる。

逆問題を用いて音源の放射を推定する手法には近距離場音響ホログラフィなどが知られているが, これらはその目的から観測に使用するマイクロホンアレイが一般に平面であることや音源となる物体そのものからの音の放射を推定している [5]。本手法では推定した放射を別の場所で再現することを目的としているので, 音源を取り囲む 2 次音源を用いる。また音源の放射を作り出す手法にはあらかじめ音源の放射をモデル化することにより単一のマイクロホンで収録された音を球状のスピーカアレイで放射する手法が知られているが [6], 音源ごとにモデルの生成が必要となるほか, 音源の動きによる放射の変化は放射の再現の対象となっていない。本手法では音源の放射をモデル化などが必要なく, 音源固有の放射や音源の動きによる変化を含む音源の放射の物理的な再現を可能にする。また逆問題は事前に解くことが可能であることから観測点で測定された信号に実時間で逆

システムを畳み込むことにより, リアルタイムに音源の放射を再現することができ, 通信システムへの応用も可能である。

### 3 システム構成

本節では, 前節の音源の放射の推定と再現手法を境界音場制御を用いた音場共有システムに適用する。音場共有システムは複数の音響樽を接続し, 樽内で発した音に共有音場の残響を付加し, 自分自身と相手のシステムにおいて音場を再現することであたかも同じ空間にいるかのような遠隔コミュニケーションを可能にする。この際, 樽内で発した音源に対して前節で提案した音源の放射の推定と再現手法を用いることで樽内の音源の指向性や動きの伝送が可能となる。

片側通信の提案手法を用いた音場共有システムを Fig.2 に示す。音響樽内の音源となる演奏者あるいは話者を取り囲むようにマイクロホンアレイを設置する。このマイクロホンアレイに音源より入力された信号を  $[S_k]$  とする。マイクロホンアレイより内側に音源を取り囲むように 2 次音源を想定し, 2 次音源からマイクロホンアレイの伝達関数行列  $[g_{kj}]$  を求める。式 6 と同様に音源の放射を再現する 2 次音源への入力信号は  $[g_{kj}]^{-1} * [S_k]$  で表すことができる。

共有する音場において仮想的な演奏者の位置に同一の 2 次音源を設置し, もう一方の仮想的な受聴者の位置に BoSC マイクロホンアレイを設置する。2 次音源からは演奏者の音源の放射が再現される。したがって仮想的な受聴者の位置において, あたかも演奏者がそこにいるかのように音の放射が再現されることとなる。境界音場制御により仮想的な受聴者の位置の音場は, 受聴者のシステムにおける制御点とスピーカシステムの伝達関数行列  $[g'_{im}]$  の逆システム  $[g'_{im}]^{-1}$  を用いて, 再現が可能である。

共有音場における 2 次音源から BoSC マイクロホンアレイへの伝搬もその伝達関数  $[h_{ij}]$  を用いることで再現できる。したがって音源の指向性を含めた受聴者への音場の再現を行うには受聴者のスピーカシス

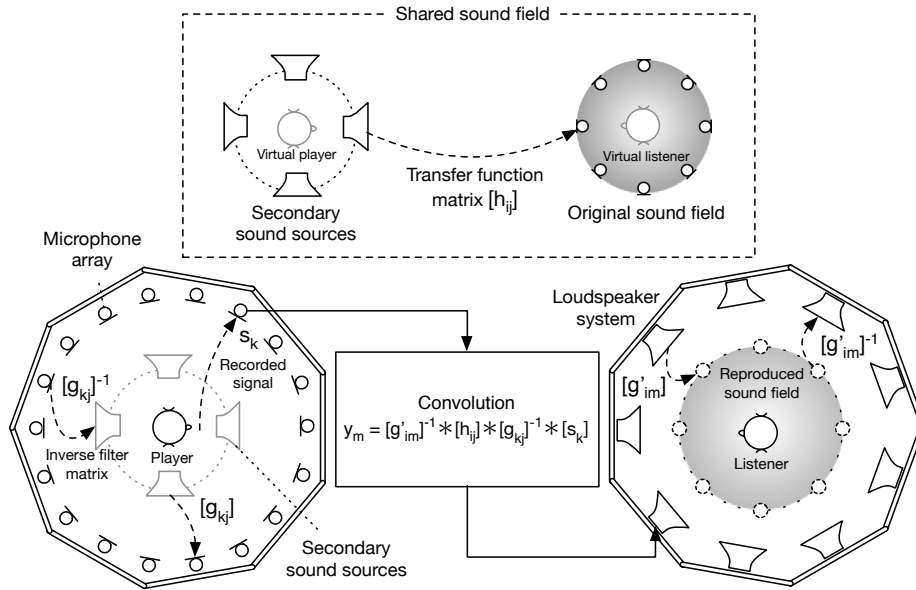


Fig. 2 Sound field sharing system with sound directivity reproduction

テムにおいて出力される信号  $y_m$  が

$$y_m = [g'_{im}]^{-1} * [h_{ij}] * [g_{kj}]^{-1} * [s_k] \quad (7)$$

となればよい。

2次音源は各マイクロホンアレイとの伝達関数の測定にのみ必要となるので必ずしも実際のスピーカアレイである必要がなく、一つのスピーカを移動させた擬似的なスピーカアレイを用いることが可能である。また式7の畳込みは信号  $[s_k]$  の畳込み以外は事前に行う事が可能であり、リアルタイムで行う畳込み処理の計算量に2次音源の数は影響を及ぼさない。したがって樽内に設置された観測用のマイクロホンは実際に設置する必要があり、その数が増えることはシステムの規模を大きくする恐れがあるが、2次音源の数が増えることは必ずしもシステムの規模を大きくするとは限らない。また2次音源の配置は前節の離散化手法から法線方向に対して2つ一組となると考えられるが、実際には粒子速度は音圧に対して特定の周波数以外は一意に決まること [5] や、各2次音源の配置を法線方向にわずかにずらしながら配置することで粒子速度も含めて2次音源の配置を工夫することが可能であると考えられる。

## 4 シミュレーションによる評価

### 4.1 実験条件

本節では自由音場シミュレーションによって提案手法の有効性を確認する。シミュレーションの条件を Fig.3 に示す。再現の対象となる音源（原音源）を中心に配置する。観測用のマイクロホンアレイは音響樽内部への設置を想定し、音響樽の中段の内寸と同じ

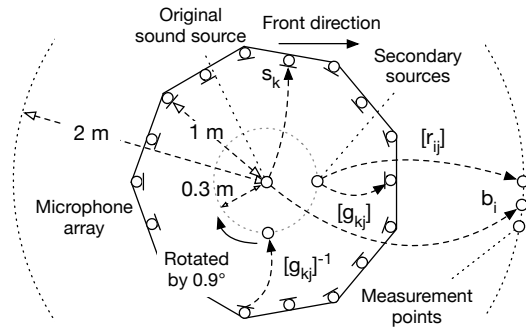


Fig. 3 Condition of free-field simulation

半径 1 m の円に内接する正九角形のマイクロホンアレイを考える。九角形マイクロホンアレイの中心が原音源の位置と一致するように配置し、その頂点と中点に合計 18 個の観測点があるとする。また2次音源はモータなどによって単一のスピーカを回転する事によって実現することを想定し中心から 0.3 m の円上に配置する。原音源と2次音源は下記の指向性を持つこととする。

$$Amp_{\theta} = \frac{1 + \cos\theta}{2} \quad (8)$$

$\theta$  は音源の向きに対するマイクロホンの角度である。2次音源は半径 0.3 m 円に対して外向きの法線方向を向いており、原音源は  $45^\circ$  ずつ回転させ合計 8 方向について評価を行う。評価点は中心に対して円上に配置し 5 度毎合計 72 点とする。

提案手法による評価点の信号  $b'_i$  は下記の式で得られる。

$$b'_i = [r_{ij}] * [g_{kj}]^{-1} * [s_k] \quad (9)$$

ここで  $[s_k]$  は原音源から九角形マイクロホンアレイ

への入力信号,  $[g_{kj}]$  は 2 次音源から九角形マイクロホンアレイへの伝達関数であり,  $[r_{ij}]$  は 2 次音源から評価点への伝達関数である。逆行列は正規化パラメータを用いて求める。逆行列の SNR を

$$SNR_{inv} = 10 \log_{10} \frac{M \sum_{n=1}^N |\delta(n-L)|^2}{\sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^N |\delta(n-L) - y_k[n]|^2}, \quad (10)$$

$$y_k[n] = [g_{kj}] * [\hat{f}_{jk}],$$

で定義する。ただし  $\delta$  はデルタ関数,  $[\hat{f}_{jk}]$  は正規化によって求められた逆システム,  $N$  and  $M$  はそれぞれ評価に用いる信号の長さとお測点の数である。本節では 8192 点 ( $N=8192$ ) を評価に用いた。

#### 4.2 実験結果

観測点の外側に位置する距離 2 m における 2 次音源数が 400 個 ( $M=400$ ) の場合のシミュレーションの結果を原音源の向きを基準とした指向性のグラフとして Fig.4 に示す。用いた逆フィルタの SNR は 34 dB であった。図より観測点の数に応じたピークとディップ

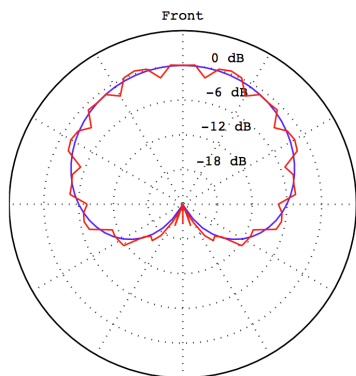


Fig. 4 Sound directivity of original and reproduced sound source (Distance: 2 m, M: 400, Blue line: Original, Red line: Reproduced)

プが見られるが, 原音場と再現音場でほぼ一致することが分かる。原音源の向きを中心に左右 135° の範囲について, 原音場と再現音場の差は 3.0 dB 以下でありその平均は 1.0 dB であった。またすべての向きの原音源について同様の範囲における原音場と再現音場の差は 4.3 dB 以下でありその平均は 1.1 dB であった。

同様に観測面の内側に相当する距離 0.5 m の測定点についての結果を Fig.5 に示す。ピークとディップの位置に変化が見られるものの距離 2 m の測定点と大きな差は見られなかった。またすべての向きの原音源について同様の範囲における原音場と再現音場の差は 3.7 dB 以下でありその平均は 1.2 dB であった。

また, 観測点の数を減らし 2 次音源数が 200 個 ( $M=200$ ) の場合について測定点の距離 2 m のシミュレーションの結果を Fig.6 に示す。用いた逆フィルタ

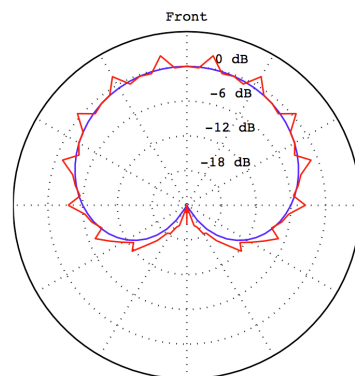


Fig. 5 Sound directivity of original and reproduced sound source (Distance: 1 m, M: 400, Blue line: Original, Red line: Reproduced)

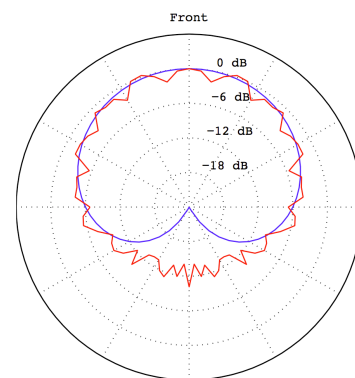


Fig. 6 Sound directivity of original and reproduced sound source (Distance: 2m, M: 200, Blue line: Original, Red line: Reproduced)

の SNR は 36 dB であった。図より 2 次音源の数が減る事により, 特に音源の向きと反対側で誤差が大きくなり指向性がゆるやかになることが分かる。したがって, 2 次音源数と観測点数が充分であれば, 本手法により指向性の再現が充分に可能であると考えられる。

#### 5 おわりに

本論文では KHIE に基づいた音源の放射の推定と再現を行う手法を提案し, シミュレーションによる評価によりその有効性を確認した。また本手法は無響室における実験によっても有効性が確認されている [7]。

#### 参考文献

- [1] 伊勢ら, 音講論 (春), 585-586, 2007 .
- [2] Ikeda and Ise, AESJ, 2012
- [3] 小林ら, 聴覚研究会, 41-46, 2012
- [4] Ikeda *et al.*, Proc. of 20th ICA, 2010
- [5] Earl G. Williams, "Fourier Acoustics," Academic Press, 1999 .
- [6] 山肩ら, 信学会, J94-A, 233-242, 2011
- [7] 唐津ら, 音講論 (秋), 2014