

Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式の逆問題解法による音源の指向性推定

-実験的検討-*

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

1 はじめに

遠隔環境で高いリアリティを維持しながらコミュニケーションを行うためには言語情報以外に非言語情報の伝達が重要となる。ヒトが発話するときの頭部運動は微細だが、頭部運動から生じる音響情報の変化が話者の存在感に影響を与えることが示唆されている [1]。したがって話者の動きに伴い絶えず変化する音の指向性の再現は高いリアリティの創出において重要となる。またコンサートホールのステージ上で楽器を演奏するとき演奏家はホールの響きを考慮しながら楽器の方向を意識する場合がある。

これまで境界音場制御の原理 [2] に基づく音場共有システム [3] において音声の指向性を再現する方法について提案した [4]。しかし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ため汎用性が低く、楽器などへの適用が困難である。

そこで本研究では、Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式 (以下, KHIE) と逆システムを用いて音源の放射を推定, 再現する方法に関する実験的検討を行う。無響室における実験により音源の放射の再現精度, すなわち音源の指向性の再現精度を調べる。

2 理論 [5]

音源の放射の推定手法の概念図を Fig. 1 に示す。KHIE に基づくと音源が閉曲面 S の内側に存在するとき閉曲面 S の外側の領域 V への音源の放射は, 閉曲面 S 上の音圧 p と法線方向の粒子速度 $\partial p(\mathbf{r})/\partial \mathbf{n}$ を用いて下記のように表すことができる [6]。

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

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

ここで G は Green 関数であり, \mathbf{n} は閉曲面 S 上の法線ベクトル, \mathbf{r} は閉曲面 S 上の点である。し

たがって閉曲面 S と合同な別の閉曲面上において音圧と粒子速度を再現すれば, 音源の放射が再現可能となる。

さらに閉曲面 S の外部に観測面 S_E を考える。式 (1) により閉曲面 S 上の音圧と粒子速度によって観測面 S_E 上の音圧が表せる。この逆問題を解くことで観測面 S_E 上の音圧から閉曲面の音圧と粒子速度が求めることが可能である。

システムとして実装するには閉曲面 S と観測面 S_E をそれぞれ離散化する。閉曲面 S 上には 2 次音源を配置し観測面 S_E 上にはマイクロホンアレイを設置する。さらに 2 次音源とマイクロホンアレイ間の伝達特性を測定し, その逆システムを設計する。音源から観測面 S_E 上に置かれたマイクロホンアレイに入力された信号にこの逆システムを畳み込み, 別の場所に設置した同形状の 2 次音源から放射することで閉曲面 S 上の音圧と粒子速度が再現される。式 1 より閉曲面 S より外側の領域についての音源の放射が別の場所で物理的に再現可能となる。特に本手法を境界音場制御を用いた音場共有システムとともに用いることにより, 音源固有の放射特性や音源の動きも含めた音源の物理的な放射の伝送が可能となる。

3 実験

3.1 実験条件

本論文では, 無響室において単一のスピーカ (TOA BST-256, 以下, 原音源) の水平方向の放射を 2 次音源を用いて再現し, 原音源の放射と再現された放射について指向性の比較を行う。Fig.3 に測定の条件を示す。原音源から半径 1 m あるいは 2 m の半円上にある評価点へのインパルス応答 y_i を測定する。

次に原音源から観測用マイクロホンアレイへのインパルス応答 $[s_k]$ を測定する。観測用マイクロホンアレイは音響樽中段の内寸と同等であり, 半径 1 m の円に内接する正九角形の形状をして

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

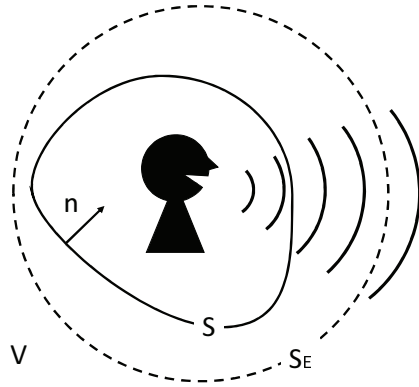


Fig. 1 Concept of estimation of sound radiation based on KHIE

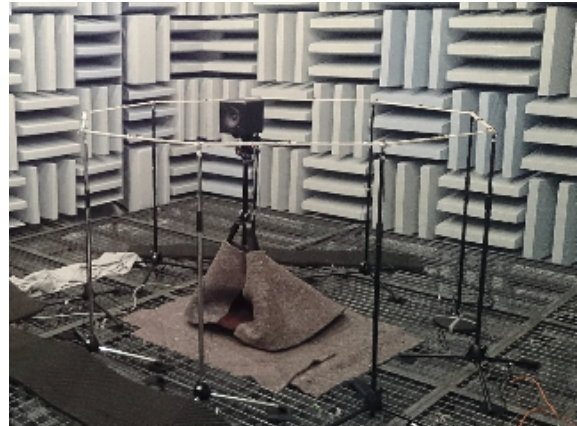


Fig. 2 Experimental setup

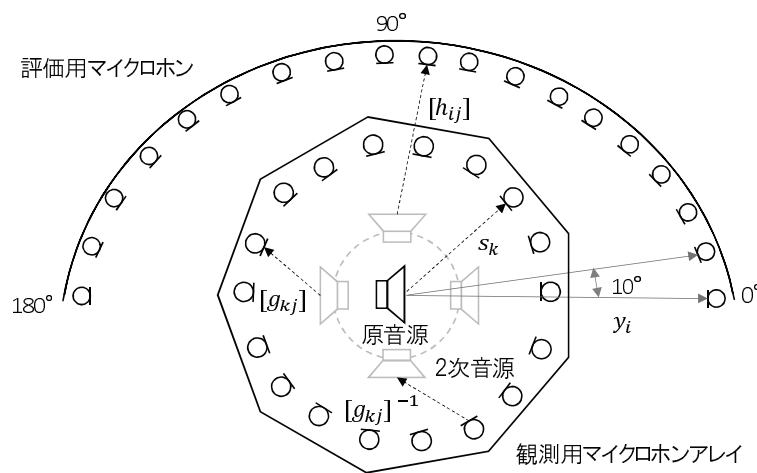


Fig. 3 Experimental condition

いる。正九角形の頂点と中点に合計 18 点に無指向性マイクロホン (DPA 4060) を設置した。

原音源の放射を再現する 2 次音源には原音源と同じスピーカを回転させた擬似的なマイクロホンアレイを用いた。回転はモータ (NSK PN3045KN001) によって中心から 0.3 m の位置で、水平方向に 0.9 度毎に合計 400 回回り、2 次音源から観測用のマイクロホンアレイへのインパルス応答 $[g_{kj}]$ を測定した。また 2 次音源から評価点へのインパルス応答 $[g_{ij}]$ の測定も同時に行った。

評価点における再現音 y'_i は、下記の式で表すことができる。

$$y'_i = [h_{ij}] * [g_{kj}]^{-1} * [s_k] \quad (2)$$

ただし、 $*$ は畳み込みである。原音源から評価点への直接のインパルス応答 y_i と、2 次音源によって再現されたインパルス応答 y'_i を用いて指

向性の比較を行う。

逆システム的设计には 2 次音源から観測用マイクロホンアレイへのインパルス応答 $[g_{kj}]$ から正則化を用いて求めた。インパルス応答 $[g_{kj}]$ を 2 回測定し、1 回目を逆システム的设计に用い、2 回目を正則化パラメータの決定に用いた。測定信号には TSP 信号を用い、サンプリング周波数 48kHz であった。

3.2 実験結果

原音源の向きが 0° 、原音源から評価点までの距離 2 m の音圧レベルについて原音場と再現音場の比較を Fig. 4 に示す。評価点における収録音と再現音の平均音圧レベル差は 1.8 dB、最大音圧レベル差は 5.0 dB であった。原音場の指向性と同様に、再現音場においても指向性が再現できていることが確認できる。

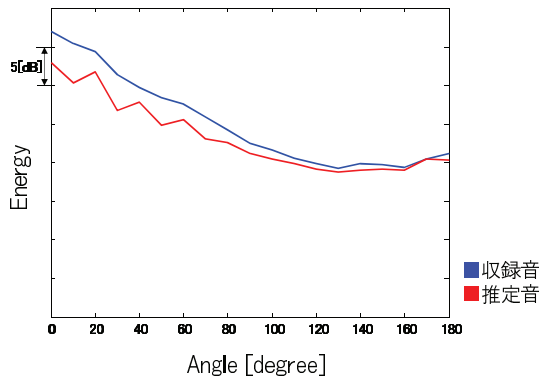


Fig. 4 Sound directivity of original and reproduced sound source (Distance 2m, Original source direction 0°)

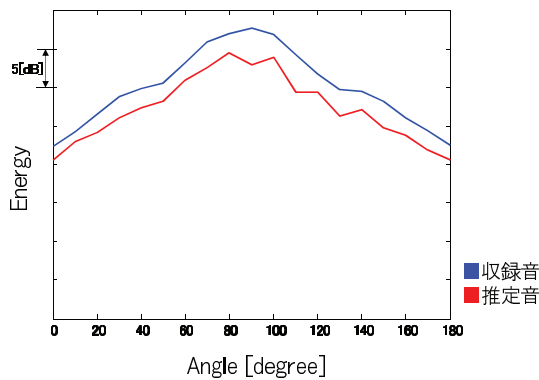


Fig. 5 Sound directivity of original and reproduced sound source (Distance 2m, Original source direction 90°)

次に原音源の角度を90°回転させた場合の音圧レベルの比較を Fig. 5 に示す。平均音圧レベル差は2.7 dB、最大音圧レベル差は4.9 dBであった。原音源の45°毎の平均音圧レベル差と最大音圧レベル差を Table 1 に示す。音源の角度によらず再現音場は原音場と同様の指向性が再現されている事がわかる。原音源の向きが90°の時、音圧レベル差が最大となり、逆に原音源の向きが270°の時音圧レベル差が最小となったが、原音源の向きにかかわらず音圧レベル差はわずかであった。ただし、評価点は半円上に配置されており、原音源の向きが90°のときスピーカの正面方向に対して左右90°の放射が測定されているが、原音源の向きが270°のときはスピーカに対して背面方向の放射が測定されている。したがって原音源の向きが270°のときは指向性が正面方向と比べて緩やかであるので、少ない観測点での再現が用意になり音圧レベル差が小さくなったと考えられる。

次に原音源の向きが0°のときのオクターブバ

Table 1 Difference of sound pressure level of original and reproduced sound source per original source direction

音源角度 [°]	平均音圧 レベル差 [dB]	最大音圧 レベル差 [dB]
0	1.8	5.0
45	2.5	6.0
90	2.7	4.8
135	2.4	5.5
180	1.7	4.3
225	1.1	3.4
270	0.9	2.0
315	1.1	3.5

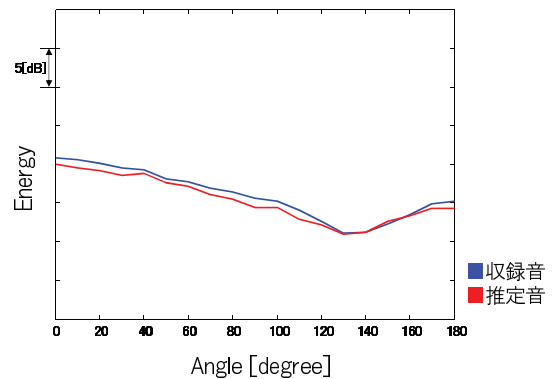


Fig. 6 Sound directivity of original and reproduced sound source (Distance 2m, Original source direction 0°, Center frequency 1000Hz)

ンド (中心周波数 1000 Hz) の音圧レベルの比較を Fig. 6 に示す。平均音圧レベル差は約0.9 dB、最大音圧差は約0.7 dB となり、音圧レベル差は僅かである。全帯域の結果と比較しても音圧レベル差は小さく、再現精度は高い。原音源の向きが0°のときのオクターブバンド毎の原音場と再現音場の平均音圧レベル差と最大音圧レベル差を Table 2 に示す。4 kHz 以上の帯域では、音圧レベル差が大きくなる事が分かる。高い周波数では指向性が鋭くなり、再現精度を保ち難くなることが分かった。

次に、原音源と評価点の距離について検討する。2 m の条件では観測面の外側の放射を評価したが、観測面上とほぼ同じ距離である1 m の距離の指向性の再現を評価する。音源と評価点の距離が1 m のときの原音場と再現音場の音圧レベルの比較を Fig. 7 に示す。平均音圧差は2.7

Table 2 Difference of sound pressure level of original and estimated sound source per octave band

中心周波数 [Hz]	平均音圧 レベル差 [dB]	最大音圧 レベル差 [dB]
125	0.5	0.7
250	1.0	2.4
500	1.0	2.4
1k	0.7	1.2
2k	1.0	1.7
4k	2.8	6.3
8k	4.1	8.1

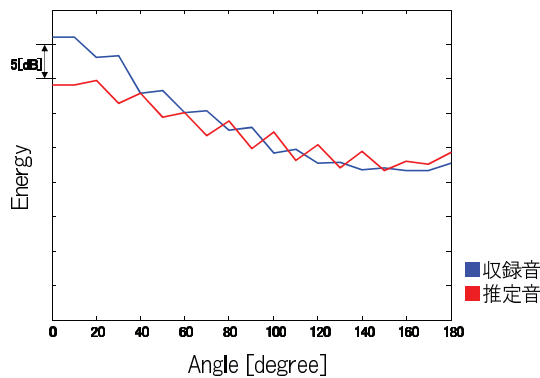


Fig. 7 Sound directivity of original and estimated sound source (Distance 1m, Original source direction 0°)

dB, 最大音圧差は 7.0 dB であった。レベル差は測定距離 2 m の結果より大きい、原音音場と同様の指向特性が再現出来ていることが分かる。また、原音源の方向と帯域毎の指向性の比較に関しても測定距離 2 m と同様の結果が得られた。

また、遠隔コミュニケーションシステムに本手法を実装する際に 2 次音源数は事前の畳み込みによって実時間畳み込みの演算量に影響を及ぼさないが、観測点の数は実時間畳み込み処理の演算量に大きく影響する。そこで、観測点数と指向性の再現精度の関係について検討する。音源と評価点の距離を 2 m, 2 次音源数を 400 個とし観測点数を変更する。観測点は後ろから、連続せず左右対称になるように減らした。各観測点数における、原音と再現音の平均音圧レベル差と最大音圧レベル差を Table 3 に示す。観測点が少ないほど、音圧レベル差は大きくなる傾向にあり観測点数が 11 点の時に差は最大となった。

Table 3 Difference of sound pressure level of original and estimated sound source per number of observation points

観測点数	平均音圧 レベル差 [dB]	最大音圧 レベル差 [dB]
18	1.8	5.1
17	2.1	8.1
16	4.3	13.7
15	5.0	10.0
14	7.2	13.6
13	9.0	15.4
12	9.6	16.0
11	11.3	19.0
10	5.0	16.7
9	7.6	12.4

しかし、音圧レベル差は観測点数が 10 点のとき、11 点のときと比べて小さくなることがわかった。観測点の減らし方と関係していると考えられる。したがって、観測点は等間隔に配置することが望ましいと考えられる。

4 おわりに

Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式に基づく音源の推定と再現手法について無響室実験による指向性再現精度について評価を行った。距離 1 m と 2 m において音源の指向性を原音場と再現音場で比較した結果、音源の指向性を再現可能であることが分かった。また観測点を減らすことにより指向性再現の精度が大きく下がることも確認された。

参考文献

- [1] 小林ら, 聴覚研究会資料, 41-46, 2012
- [2] 伊勢 史郎, 音学誌 53(9), 706-713, 1997
- [3] 伊勢ら, 音講論 (春), 585-586, 2007
- [4] Ikeda *et al.*, Proc. of 20th ICA, 2010
- [5] 池田ら, 音講論 (秋), 2014
- [6] Earl G. Williams, "Fourier Acoustics," Academic Press, 1999