

## 音場共有システムにおける指向性を含めた音源の收音方法に関する実験的検討\*

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

## 1 はじめに

他者の存在感を創出する音響情報は、身体運動に伴う音質の時間変化が重要な要素となることが知られており、その微妙な3次元波面を生成する技術として境界音場制御の原理に基づく三次元音場再現システム (以下, BoSC システム) は有効である [1, 2]。これまで BoSC 再生システム内で話者が発した音声とその指向性も含めて記録・再現する手法を提案し、その有効性を数値シミュレーションと無響室を用いた物理評価によって確かめた [3, 4]。そこで本稿では、室内音場のインパルス応答と BoSC システムのひとつである音響樽 [5] に提案手法を適用し、物理評価と主観評価実験を行い、提案手法の実環境における有効性を確かめる。

## 2 指向性を含めた音声の伝送システム [3]

音響樽を用いた音声の伝送システムを Fig. 1 に示す。話者音場となる音響樽内において発せられた音声の伝送を考える。話者を取り囲むように設置された指向性推定用マイクロホンアレイへの音声入力信号を  $[s_k]$  とする。ここで、音響

樽の内側で話者を取り囲むスピーカアレイ (音声再現用の2次音源) を考え、そのスピーカアレイからマイクロホンアレイへの伝達関数を  $[g_{kj}]$ 、その逆システムを  $[g_{kj}]^{-1}$  とする。逆システムを用いることで、この2次音源の外側で音声の放射を再現するためのマイクロホンアレイへの入力信号から推定できる。

対話相手と共有する仮想共有音場内において、聞き手の位置に BoSC マイクロホンアレイ、話者の位置に2次音源を設置する。2次音源を用いて音声の放射を再現し、聞き手の位置で境界音場制御を用いて音場の収録、再現することで、音声の放射特性を含めた音声の伝送が可能となる。

したがって、共有する空間内における、2次音源から BoSC マイクロホンアレイへのインパルス応答  $[h_{ij}]$  と音響樽の再生環境の特性を打ち消す逆システム  $[g'_{im}]^{-1}$  を用いると、音響樽のスピーカシステムからの出力信号  $y_m$  は

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

となる。ここで\*は畳み込みである。eq. 1にお

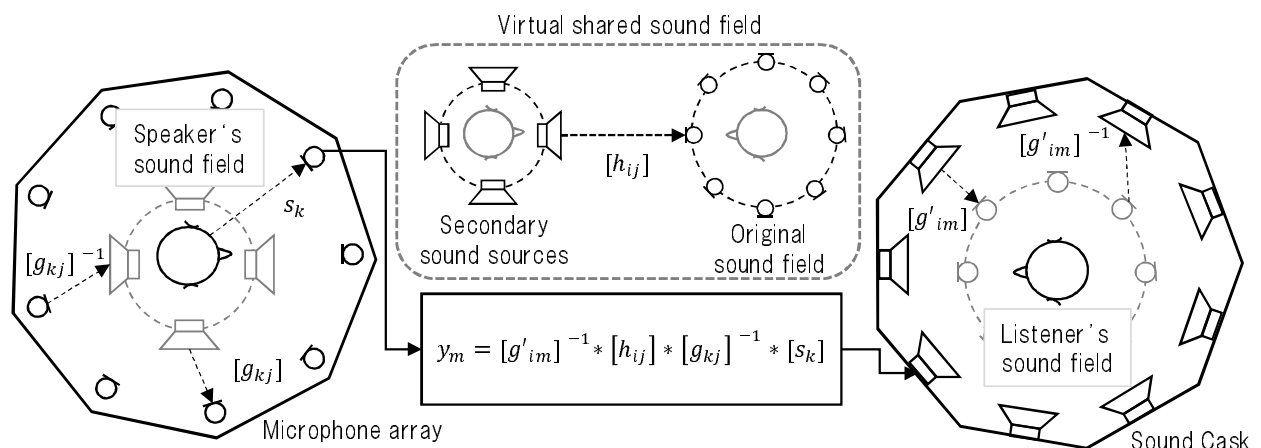


Fig. 1 音響樽を用いた指向性を含む音源の伝送システム

\*Experimental study on recording method of sound sources including directivity of a sound field sharing system by KARATSU, Yuki (Tokyo Denki University), IKEDA, Yusuke (WASEDA University), WATANABE, Yuko (Tokyo Denki University), ISE, Shiro (Tokyo Denki University/CREST, JST)

いて音声  $[s_k]$  以外の項の畳み込みは事前に計算しておくことができ、2次音源の数はリアルタイムでの畳み込み処理量に影響しない。また2次音源はインパルス応答の測定のみを使用することから実際のスピーカアレイである必要はなく、単一のラウド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。

### 3 物理評価

提案手法 [3] に基づいた指向性再現システムを構築し、指向性の再現精度を物理的に評価した。音源の向きを変化させたときの測定点の音圧変化を実音場と再現音場で比較する。

#### 3.1 実験方法

話者音場は無響室とし、ラウドスピーカ (TOA BST-264) から収録用マイクロホンアレイへのインパルス応答を測定した。収録用のマイクロホンアレイは1 m の円に内接する9角形の頂点と辺の中心に設置した18 chのマイクロホンで構成される。2次音源は単一のラウドスピーカ (TOA BST-264) を水平方向に0.9°刻みで360°回転させて模擬した400 chのスピーカアレイを用いる。対話相手と共有する音場を東京電機大学千葉ニュータウンキャンパス視聴覚実験 (残響時間0.3 s) とする。2次音源とBoSCマイクロホンの距離は1.5 mとし、高さは1.2 mに設置した。物理評価用の仮想共有音場の信号として単一ラウドスピーカからBoSCマイクロホンへのインパルス応答をBoSCマイクロホンの方向を0°とし、時計回りに45°刻みで360°ラウドスピーカを回転させながら測定した。各インパルス応答の測定はサンプリング周波数48kHz、長さ $2^{18}$ のTSP信号を用いた。逆フィルタの設計は収録系、再生系共に測定したインパルス応答から正規化を用いて求めた。

#### 3.2 実験結果

実験結果をFig. 2に示す。縦軸はラウドスピーカの向き0°の時の音圧を基準とした相対音圧レベル、横軸はラウドスピーカの向きを示し、緑線は実音場で測定した音圧、青線は話者音場で収録された信号を用いて提案手法により原音場を再現した音圧、赤線はそれらを聴取者音場で再生したときの相対音圧レベルを示す。Fig. 2

より実音場と提案手法による再現音場の音圧レベル差は1 dB以下、実音場と再現音場での音圧レベル差は2 dB以下に収まっていることが分かり、指向性を含めた音源の収録と再現が行われていることがわかった。

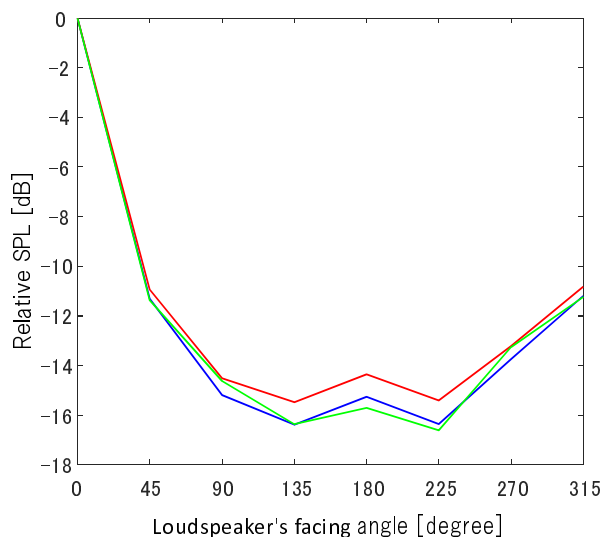


Fig. 2 実音場における収録信号 (緑) と提案手法による再現信号 (青), 音響樽での再現信号 (赤) の方向毎の相対音圧レベル (全周波数帯域)

### 4 心理評価

本章では、実音場と再現音場における話者の発話方向の知覚誤差について主観評価実験を行う。ここでは、ラウドスピーカ (TOA BST-264) を用いて音声を模擬する。

#### 4.1 実験方法

実験条件をTable. 1に、実環境における主観評価実験のシステム図をFig. 3, 回答方法をFig. 4に示す。被験者には1s程度の長さの音声を2度聞きラウドスピーカの向きの判断し、Fig. 4の円上の目盛りに印付け回答することとした。目盛りは5°間隔に打たれており、目盛りの間には回答しないよう教示を行った。実環境と再現音場の実験は順序効果を考慮し、半数を実環境を先に残り半数を再現音場の実験を先に行った。Fig. 3の実音場では、視覚的にラウドスピーカの放射角が分からないよう被験者とラウドスピーカの間を音響透過布で覆いをした。またラウドスピーカの回転にはモータ (NSK PN3型) を使用したが、回転中の動作音が回答の手がかりとな

らないように、モータの後ろに設置したラウドスピーカからマスキング音を再生した。加えて音源の再生前の案内音も放射角の手掛かりにならないように、マスキング用のラウドスピーカから再生した。

Table 1 実験条件

実験場所	東京電機大学 千葉ニュータウン キャンパス 視聴覚実験室, 同キャンパス 音響樽
呈示刺激	音声 (男性, 48kHz 24bit)
放射角度 $\theta$	-165° ~ +180° (被験者正面を 0°, 反時計回りが 正で 15° 間隔 24 方向)
試行回数	各放射毎 4 回 (2 回毎の異なる ランダムリストを 2 セット)
被験者	20 代男女 計 8 名

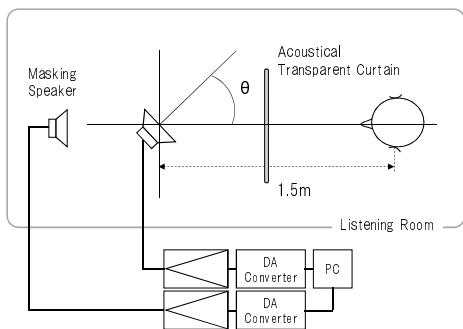


Fig. 3 実音場における実験システム

#### 4.2 実験結果

実音場と再現音場における音源の方向推定の結果をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す。横軸は実際のラウドスピーカのアングル、縦軸は被験者が回答したアングル、円の直径は回答数に相当する。Fig. 5 から実音場ではスピーカのアングルと回答アングルが一致する対角線上に回答が集中しており、被験者は概ね放射方向を知覚できていることがわかる。一方、Fig. 6 から再現音場では、Fig. 5 と同様に回答が対角線上に分布しているが、実音場と比べるとわずかながら左右の誤判定も確認できる。

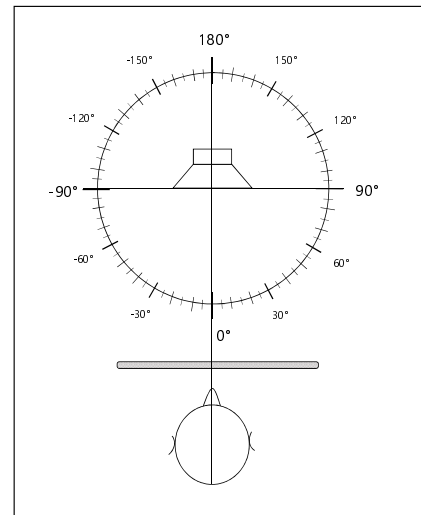


Fig. 4 回答方法

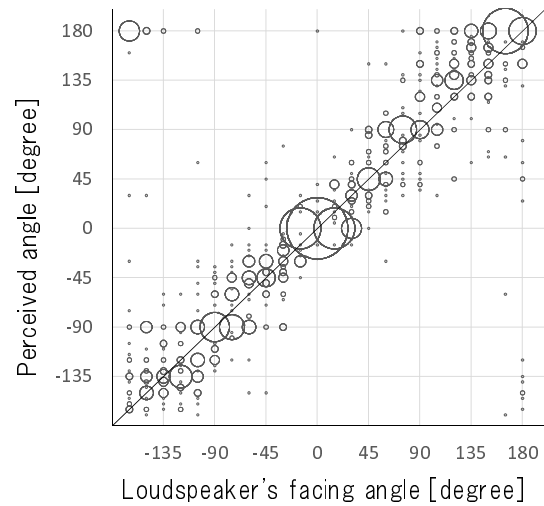


Fig. 5 実音場における回答分布

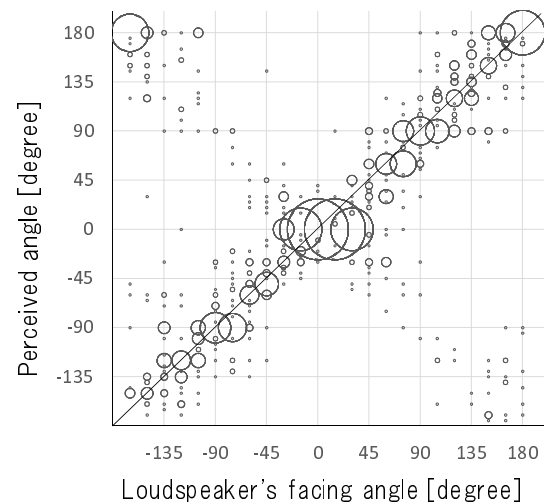


Fig. 6 再現音場における回答分布

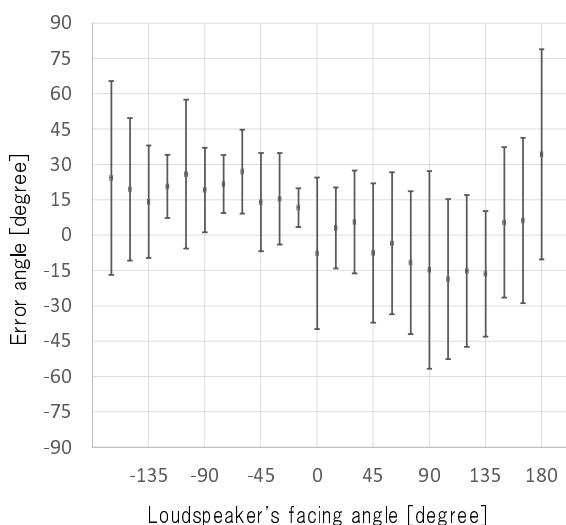


Fig. 7 実音場における平均誤差角度と標準偏差

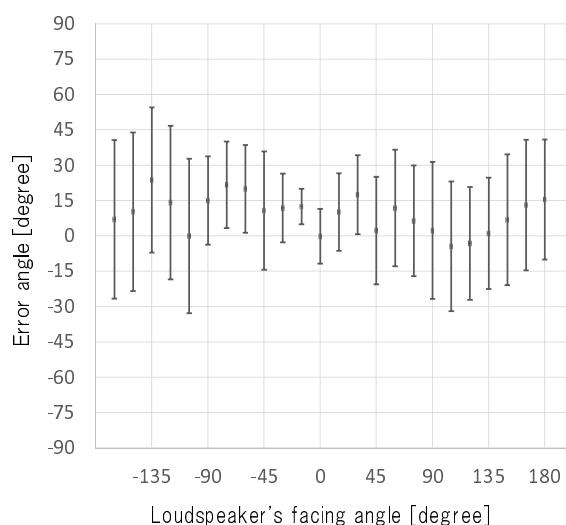


Fig. 8 再現音場における平均誤差角度と標準偏差

次に全呈示角度の平均誤差角度を算出した。実音場は  $24.7^\circ$ 、再現音場は  $29.7^\circ$  であった。差は  $5^\circ$  程度であり、有意差は見られなかった。最後に実音場と再現音場のラウドスピーカの方向別の誤差角度の平均値と標準偏差をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。横軸はラウドスピーカの角度、縦軸は誤差角度である。Fig. 7 から実音場では角度毎のばらつきに差があることが分かる。Fig. 8 からは Fig. 7 に比べ角度毎のばらつきに差がないことが分かる。実音場と再現音場の2水準と呈示角度24の繰り返しのある二元配置分散分析を行った結果、各角度間で有意差 ( $p < .05$ ) が確認されたが、実音場と再現音場には有意差は見られなかった。従って、指向性の知覚に関して再現音場は実音場を再現出来ていると言える。

## 5 おわりに

本稿では、音場共有システムにおける指向性再現手法を音響樽において実現し、その有効性を確かめるため物理評価と主観評価を行った。物理評価では音源の指向性の変化による実音場と再現音場の音圧変化を比較し、その音圧レベル差が 2dB 以下であることを示した。主観評価では実音場と再現音場で音源の指向性の知覚を比較した結果、実音場に対して再現音場は左右誤

判定や右方向への回答の偏りが見られたが、統計的に有意な差はなく、音場間に明確な違いが無いことが確認された。

今後は、本手法を適用することで相手の存在感や場の臨場感を得ることが可能となるかについて評価を行う。

## 参考文献

- [1] S. Ise, "A principle of sound field control based on the kirchhoff-helmholtz integral equation and the theory of inverse systems", *Acustica*, Vol. 85, pp. 78-87, 1999.
- [2] 小林ら, "話者の動きが実在感に及ぼす効果: 音場再現システムを用いた検討", 聴覚研究会資料, 41-46, 2012.
- [3] 池田ら, "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", 音講論 (秋), 703-706, 2014.
- [4] 唐津ら, "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", 音講論 (秋), 707-710, 2014.
- [5] 伊勢史郎, "音楽の技能を遠隔伝送するための没入型聴覚ディスプレイ装置" 音響樽の開発", 音講論 (春), 1287-1290, 2014.