

# 音像定位実験による音場再現システムの 性能評価法に関する検討\*

☆中村智咲季, 渡邊祐子, 伊勢史郎 (東京電機大)

## 1 はじめに

境界音場制御の原理 [1] に基づき没入型聴覚ディスプレイ「音響樽」を開発した。音響樽内で楽音などを再生したときに音像が比較的上方に定位するという問題点がある。そこで本研究では音像がどの程度上方に定位するのかを定量的に調べる。また、いくつか提案されている MIMO 逆システムの設計手法によって、音像定位の上方化が抑制可能かどうかについても検討する。

## 2 BoSC システムの概要

境界音場制御の原理に基づく BoSC システム [1] の概念図を Fig. 1 に示す。

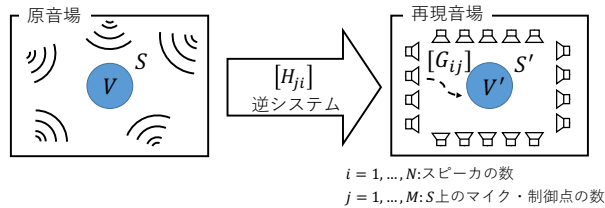


Fig. 1 BoSC システムの概念図

原音場における境界面  $S$  上に設置した  $M$  個のマイクロホンで収録した信号を、再現音場に設置された  $N$  個のスピーカを用いて再現する場合を考える。この時、原音場で  $j$  番目のマイクロホンにより収録された信号から得られる入力信号ベクトルを  $[X_j]$ 、再生音場における  $i$  番目のスピーカから境界面  $S'$  上の  $j$  番目のマイクロホンへの伝達関数を  $[G_{ij}]$ 、逆システムの伝達関数を  $[H_{ji}]$ 、再生音場における  $j$  番目のマイクロホンからの出力信号ベクトルを  $[Y_j]$  とすると次式 (1) が成り立つ。

$$[Y_j] = [X_j][H_{ji}][G_{ij}] \quad (1)$$

ただし、 $j = 1 \dots M, i = 1 \dots N$ , である。原音場における境界面上の音圧を再現音場において再生するためには  $[Y_j] = [X_j]$  となる  $[H_{ji}]$  を求めればよい。従って  $[G_{ij}]$  が正則な場合は一意に  $[H_{ji}]$  を求めることができるが、 $[G_{ij}]$  が正則でない場合は正則化法 [2]、打ち切り特異値分解法 [3]、最小誤差緩和アルゴリズム法 [3] などが提案されている。また 3 次元音場再生シ

ステムにおいて音源位置の推定結果が逆システムの設計法により異なるという報告がある [4]。

## 3 音像定位実験

本稿では、BoSC システムにおいて、逆システムの設計手法の違いが再現音場に与える影響を仮想音源の音像定位性能によって評価する。今回は特に、水平面内に提示した仮想音源の位置を、方位角と仰角によって観測する主観評価実験を行なった。

### 3.1 実験装置

実験に使用した BoSC システムは原音場を収録するための BoSC マイクロホンと、専用再生室“音響樽”で構成される。BoSC マイクロホンは 80 個の無指向性マイクロホンを C80 フラレーン分子構造の各頂点に配置したマイクロホンアレイであり、音響樽は 9 角形の樽型形状を有し、全ての壁面と天井 (床面を除く) に合計 96 個のフルレンジスピーカを設置した再生室である。

### 3.2 逆システムの設計

逆システムを設計するにあたり、まず音響樽内の中心に設置した BoSC マイクロホンを使用して、各スピーカから各制御点間の伝達関数をサンプリング周波数 48 kHz で収録した。次に収録した伝達関数をフィルタ長 2048 点で切り出した後、FFT 長 8192 点で周波数軸上に変換し、フィルタ長 4096 点の逆システム  $[H_{ji}]$  を設計した。ここで、今回採用した逆システムの設計手法は以下の 4 種類である。

1. 最適化正則化正則化パラメータ法 [5]
2. 直感的正則化パラメータ法
3. 打ち切り特異値分解法
4. 最小誤差緩和アルゴリズム法

打ち切り特異値分解法の打ち切り数は 8000、最小誤差緩和アルゴリズムの条件数は 30 に設定した。まず、心理実験に先立ち各々の手法により設計された逆システムの再現精度を式 (2) を用いて算出した。

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{|d(t)|^2}{|y_i - d(t)|^2} \quad (2)$$

\*Evaluation of 3-D Sound Reproduction System by Sound Localization Test. by NAKAMURA Chisaki, WATANABE Yuko, ISE Shiro, (Tokyo Denki University)

ただし、 $y_i$  は逆システムと伝達関数を畳み込んだ行列、 $d(t)$  は大きさ 1 のパルスをもつ対角行列である。計算した結果 17.1 dB、10.6 dB、16.9 dB、16.6 dB であった。

### 3.3 試験音源の作成

試験音源は 2 秒間の白色雑音と方向情報を有する伝達関数と逆システムを畳み込んだ信号を試験音源とした。方向情報を有する伝達関数は自由音場内で制御点中心より水平距離 1.5 m、床からの高さ 1.2 m の水平面内の仮想音源の伝達関数をシミュレーションにより算出した。作成した伝達関数は被験者正面を 0 度として  $\pm 90^\circ$  の範囲を  $15^\circ$  刻みに 13 条件として、合計 52 種類の音源を作成した。

### 3.4 手続き

実験には男女 3 名が参加した。被験者は音響樽の扉を正面にし、耳の高さが 1.2 m になるように調整した椅子に着座した。刺激提示中は頭部運動を許容した。どの位置から刺激が呈示されたか回答精度  $1^\circ$  で回答用紙に記入した。1 つの音源に対して方位角と仰角の両方について回答を行った。刺激音はランダムに呈示され、繰り返しは 3 回である。音源は頭部中心で 68 dB になるように設定されている。

## 4 結果と考察

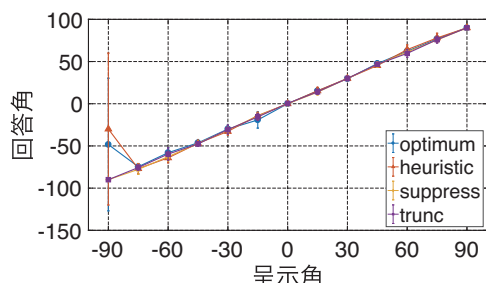


Fig. 2 方位角の音像定位結果

Fig. 2 に方位角の平均回答を示す。縦軸は被験者の回答角、横軸は刺激音の呈示角である。結果より、方位角に対する回答では逆システムの設計法の違いによる差は見られなかった。

次に Fig. 3 に仰角の回答平均を示す。仰角の回答結果より方位角の回答に比べ、仰角の回答は呈示した角度に知覚されていないものが多い。特に音源の方位角の呈示位置が  $0^\circ$  に近くなるにつれて上方に知覚している。しかし、方位角  $\pm 90^\circ$  を呈示した場合は所望の位置に知覚されている。また、直感的正則化パラメータ法が顕著に上方に知覚すると考えられる。

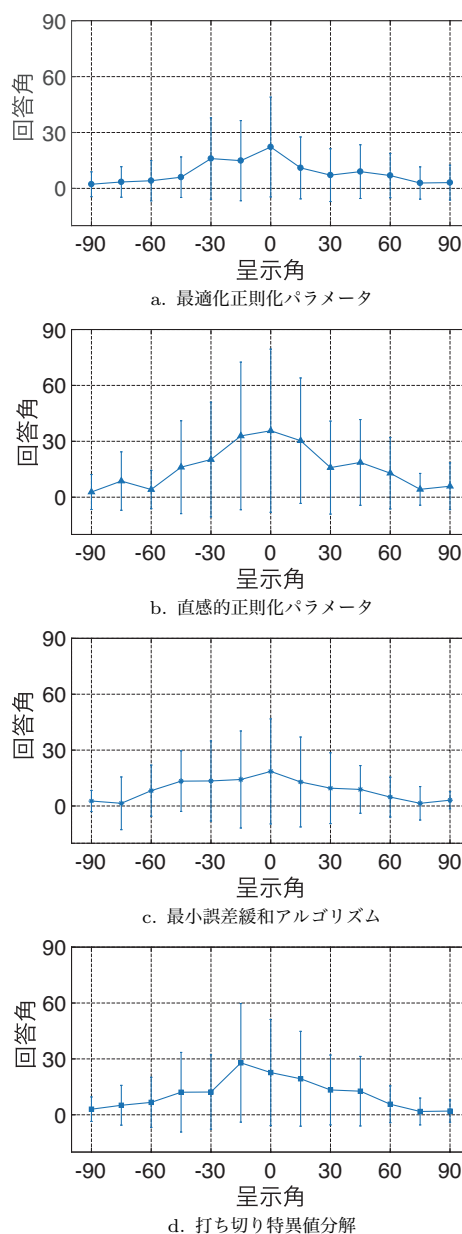


Fig. 3 仰角の音像定位結果

## 5 むすび

音響樽による音場再生デモなどで報告されてきた音像定位の上方化を定位実験により定量的に調べた。4 種の逆システム設計法を試みた結果、どの手法を用いても音像定位の上方化が観察されたが、特に直観的正則化パラメータ法ではその傾向が大きかった。水平面を呈示する音像定位実験において仰角を同時に答えさせる手法は音場再生システムの評価手法として有効である。

## 参考文献

- [1] 伊勢, 日本音響学会誌, 53(9), 706-713, 1997.
- [2] 田中 他, 信学論, J87-A, 1466-1467(2004).
- [3] 開原 他, 信学技報, EA2005-97, pp.7-11, 2006.
- [4] 浅井 他, 日本音響学会誌, 1-6-5, p519-522, 2015
- [5] 李 他, 日本音響学会誌, 96(6), 276-284, 2013.