

原音場における音源の到来方向を考慮した BoSC システムの検討*

☆内海覚, 井桁将也, 馬上優生, 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に基づく三次元音場再現システム (以降, BoSC システム) を用いた BoSC マイクロホンと没入型聴覚ディスプレイ装置 “音響樽” が開発された [1]。一方, 離散的に配置されたスピーカやマイクロホンの間隔に起因する空間エイリアシングは三次元音場再現において課題の 1 つであり, BoSC システムもその影響が示されている [2]。BoSC システムの空間エイリアシングを抑制するには数多くのマイクロホンを配置して間隔を短くする必要があるが, 小型マイクロホンの配置個数には限界があるため, マイクロホンのみの改善で影響を抑制するのは難しい。そこで本稿では, 空間エイリアシングの影響を抑制する新しい BoSC システムを検討する。

2 従来手法

原音場での収録信号を $[X_i]$, 逆システムを $[H_{ji}]$, 再現音場におけるスピーカからマイクロホンへの伝達関数を $[G_{ij}]$, 再現音場における信号を $[\hat{X}_i]$ とすると次式が成り立つ。

$$[\hat{X}_i] = [G_{ij}][H_{ji}][X_i] \quad (1)$$

BoSC システムは $i = 80, j = 96$ であるため, 最小ノルム解や次式のような正則化一般逆行列を用いて設計している。

$$[H_{ji}] = [G_{ij}]^\dagger ([G_{ij}][G_{ij}]^\dagger + \beta[I_j])^{-1} \quad (2)$$

ただし $[\cdot]^\dagger$ は行列の共役転置, β は正則化パラメータ, I は j 次元単位行列である。

3 提案手法

3.1 提案手法の要件

従来手法では空間ナイキスト周波数以上の音源を再生した場合, 波面の到来を再現できないため音源の方向が定まらず室全体や天井から鳴っているように聞こえてしまう。そこで, 収録した原音場の信号から音源方向を推定し, 音源方向に重み付けした音場を再生すれば, 受聴者は波面の到来を認識することができる。この提案手法には以下の 2 つの処理が必要になる。

1. 原音場で収録した音源の方向推定
2. 音源方向に重み付けする再生システム

本研究では, 音源の方向推定処理に MUSIC 法 [3], 音源方向への重み付け処理に北川の方法 [4] を採用した。

3.1.1 MUSIC 法

MUSIC (Multiple Signal Classification) 法は高分解能周波数推定の一手法である。信号のモードベクトルが雑音固有ベクトルによって張られる雑音部分空間に直行する関係を利用した次式の関数 $P_{music}(\theta)$ で定義され, θ について掃引することによって信号到来方向を推定することが可能である。

$$P_{music}(\theta) = \frac{\mathbf{v}(\theta)^H \mathbf{v}(\theta)}{\sum_{m=D+1}^N |e_m^H \mathbf{v}(\theta)|^2} \quad (3)$$

ただし, 到来する信号が D 個, 観測するマイクロホンが N 個 ($N > D$), N 次元の i 番目の信号モードベクトルを $\mathbf{v}(\theta_i)$, 相関行列の固有ベクトルを $e_m (m = 1, 2, \dots, N)$ とする。

3.1.2 北川の方法

音源の数が受音点の数より大きいと, 周波数領域に置いて計算したときの解は無数に存在する。北川は求める解 $[Y_j]$ について事前情報 $[Y_j^*]$ が与えられている場合, 許容される解の中で $[Y_j^*]$ に最も近い解を求めることを採用した。これを北川の解と呼ぶ。最小ノルム解と北川の解の関係を表した図を Fig.1 に示す。

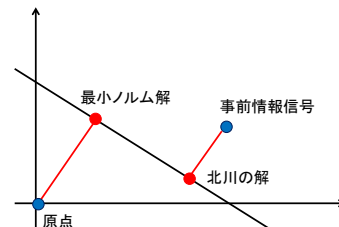


Fig. 1 最小ノルム解と北川の解

この解は, 座標の平行移動を考えることによって次式のように求められる。

$$[Y_j] = [H_{ji}][X_i] + ([I_j] - [H_{ji}][G_{ij}])[Y_j^*] \quad (4)$$

3.2 提案手法の実装

原音場信号から再生信号を算出するまでのフローを Fig.2 に示す。まず原音場にて収録した信号 $[X_i]$ から MUSIC 法を用いて音源の到来方向を推定する。そして推定された方向から音波を再生するような駆動信号を事前情報信号 $[Y_j^*]$ とし, 再生信号 $[Y_j]$ を求める。事前情報信号は, 推定された方向に近接する音響樽内の 3 つのスピーカを使った VBAP 法 [5] により算出

* A Study on Inverse-System design for BoSC System using the information of source direction in a primary sound-field. by UTSUMI, Satoshi, IGETA, Masaya, MAGAMI, Yu, WATANABE, Yuko, ISE, Shiro (Tokyo Denki University)

した。また移動音源に対応させるため、フレーム分割処理をする Overlap-Add 法を採用した。

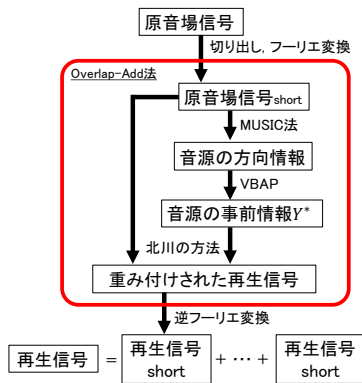


Fig. 2 重み付け再生信号を算出するまでのフロー

3.3 物理解析

3.3.1 再生信号のエネルギー

1.5[m] 前方からインパルスが到来する音場を従来手法と提案手法のそれぞれで再現するときの音響樽前半分のスピーカ駆動 1/3 オクターブバンドごとに解析した結果を Fig.3 に示す。図より、提案手法では高域の周波数においても前方のスピーカのみが強く駆動していることがわかる。つまり提案手法では前方から到来する、より高域の音源も認識できる可能性がある。

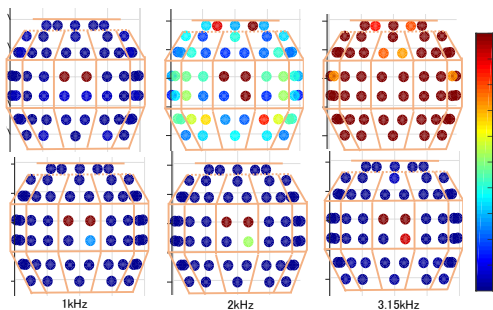


Fig. 3 従来手法 (上) と提案手法 (下) の再生信号

3.3.2 波面シミュレーション

1.5[m] 先から正弦波が到来する音場を従来手法と提案手法のそれぞれで再現したときの、制御領域内における波面の到来を数値シミュレーションした結果を Fig.4 に示す。図より、従来手法では再現できない 2k[Hz] 以上の正弦波の到来を提案手法では再現できていることがわかる。

3.3.3 音場再現精度

音場再現精度を評価するパラメータとして式 5 で表す SNR_{rep} を用いる。 SNR_{rep} は、ある原音場で収録された波面を再現したとき、制御領域内で観測され

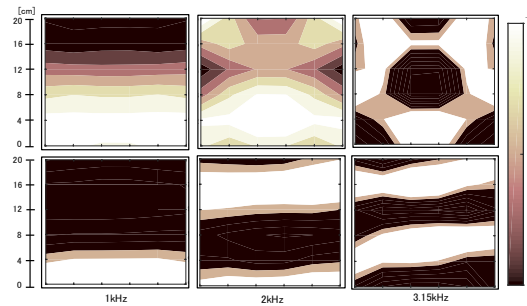


Fig. 4 従来手法 (上) と提案手法 (下) の波面

る原音場と再現音場の信号の近似度を表すパラメータである。ただし、 $d_i(t)$ は原音場での制御領域内における i 番目の信号、 $y_i(t)$ は再現音場での制御領域内における i 番目の信号である。

$$SNR_{rep} = 10 \log_{10} \frac{|\sum_{i=1}^M d_i(t)|^2}{|\sum_{i=1}^M y_i(t) - \sum_{i=1}^M d_i(t)|^2} \quad (5)$$

従来手法と提案手法の SNR_{rep} を周波数ごとに算出した結果を Fig.5 に示す。図より、提案手法では再現精度の低下が緩やかになり、また空間ナイキスト周波数と考えられる 1~2[kHz] 以上の帯域で従来手法よりも高い値となっている。つまり提案手法は従来手法に比べて空間エイリアシングを抑制したと言える。

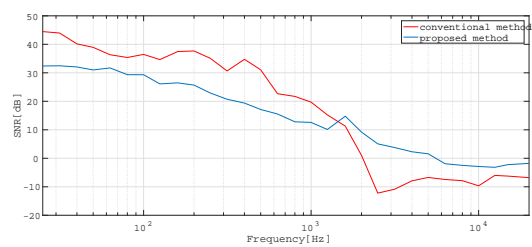


Fig. 5 従来手法 (赤) と提案手法 (青) の SNR_{rep}

4 おわりに

本稿では、空間エイリアシングの影響を抑制する新しい BoSC システムを提案し、その有用性を物理解析から示した。今後は聴感的な有用性を確かめる必要がある。また再現性能が低域において低下したため、空間ナイキスト周波数を境に再生信号を変える方法を検討したいと考えている。

参考文献

- [1] 伊勢, 音講論, 3-5-13, 2011.9
- [2] 梶田, 信学技報, vol. 117, no. 255, 35-39, 2017.
- [3] R. Schmidt, IEEE TAP Vol.34, Issue:3, 1986.3
- [4] 本城他, 応用力学論文集, Vol.2, pp73-81, 1999.8
- [5] V. Pulkki, .J.Audio Eng. Soc., 45, 6, pp456-466 1997