

## 原音場の音源方向を事前情報とする逆問題解法の音場再現への応用\*

☆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 (BoSC: Boundary Surface Control) 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”が開発されており [1]、空間エイリアシングの影響による再現精度の低下が一つの課題として検討されている [2]。そこで我々は原音場の音源到来方向を事前情報として逆問題を解くことにより、空間エイリアシングによる再現精度の低下を抑制することを試みている [3]。本稿では、さらに移動音源に対応可能なフレーム処理を用いた新しいアルゴリズムを提案し、その効果を心理実験により確認する。

### 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  $[G_{ij}]$ 、再現音場における制御点上の信号を  $[\hat{X}_i]$  とすると次式が成り立つ。

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

ただし  $i = 1 \cdots 80, j = 1 \cdots 96$  である。逆システムは最小ノルム解を用いて解くことができるが、そのままでは不安定な解となるため次式に示すような正則化法などを用いて逆システムを設計している。

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

ただし  $H$  はエルミート共役,  $\beta$  は正則化パラメータ,  $[I_j]$  は  $j$  次元単位行列である。

### 3 提案手法

#### 3.1 理論

一般にマイクロホンアレイの最小間隔から求められる空間ナイキスト周波数以上の周波数帯域の音情報、空間的な再現精度が低下することが知られている。しかし、再現するべき音源の方向がわかれば、その方向から音を再生するために最適な信号出力が予測でき、さらにその出力信号の解にできるだけ近くなるような出力信号の補正が可能である [4]。そこで収録した原音場信号から音源の到来方向推定をおこない、再現音場において推定した音源方向に重み付けをした再生信号を計算し、その再生信号に近づけるような補正処理をすることで、受聴者は音源の方向からの波面を認識することができる。すなわち以下3つの処理が必要になる。

1. 原音場における音源の到来方向推定
2. 再現音場における音源の方向重み付けによる最適な再生信号の計算
3. 再生信号の補正

本研究では、音源の到来方向推定の処理に MUSIC 法 [5]、音源の方向重み付けの処理に VBAP 法、再生信号の補正に北川の方法 [4] を採用する。

#### 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。到来する信号が  $D$  個、観測するマイクロホンが  $N$  個と仮定する ( $N > D$ )。空間相関行列  $R_{xx}$  より求まる、信号のモードベクトル ( $e_1, e_2 \cdots e_D$ ) によって張られる信号部分空間と雑音固有ベクトル ( $e_{D+1}, e_{D+2} \cdots e_N$ ) によって張られる雑音部分空間は直交している。この関係より関数  $P_{music}(\theta)$  が定義される。

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

つまり  $P_{music}(\theta)$  を  $\theta$  について掃引することによって  $\theta_i (i = 1 \cdots D)$  で分母が 0 になるため鋭いピークを有し、信号の到来方向を推定することが可能である。

#### 3.1.2 北川の方法

二次音源の数が制御点の数より大きい場合、周波数領域において逆問題を解いたとき、解は不定となり無数の解が存在する。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 (ノルム最小) 解を取ることを提案した。これを北川の解と呼び、この解は座標の平行移動を考えることで

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

と与えられる。

#### 3.2 提案手法の実装

原音場信号から補正した再生信号を算出するフローを Fig.1 に示す。まず、収録した原音場信号から MUSIC 法を用いて音源の到来方向を推定する。推定した音源方向から波面が到来するように駆動信号を VBAP 法を用いて求め事前情報信号  $[Y_j^*]$  とし、北川の方法により再生信号  $[Y_j]$  を求める。つまり、原音場の音源到来方向の波面に近づけるように再生信号を補正するには式 (4) の  $[Y_j^*]$  を求めることが重要である。また、非

\*Study on inverse problem using the source direction of the primary sound field for BoSC system. by MAGAMI, Yu, WATANABE, Yuko, ISE, Shiro (Tokyo Denki University)

常に長い原音場信号にも対応するため Overlap-Add 法を用いた。

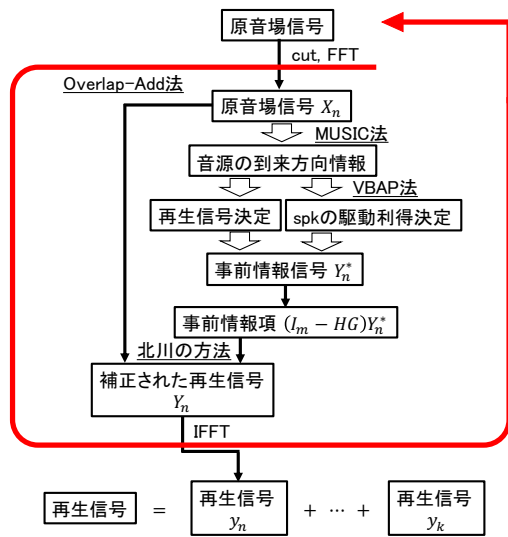


Fig. 1 補正された再生信号を算出するフロー

## 4 提案アルゴリズム

ここでは移動音源に対応可能である,  $[Y_j^*]$  を算出するアルゴリズムについて述べる. 移動音源に対して VBAP 法で算出した各スピーカの駆動重み係数が, フレームが切り替わると急激に変化することで不連続点が生じる. そこでこの問題を解決する, フレームを滑らかに接続するアルゴリズムを提案する.

$n$  フレーム目のスピーカ番号  $l$  の事前情報信号を  $Y^*[n, l]$  とすると次式で表せる.

$$Y^*[n, l] = \mathcal{F}(x[n, b] \times amp[n, l]) \times fadeout[m] + (x[n, b] \times amp[n+1, l]) \times fadein[m] \quad (5)$$

ただし,  $x[n, b]$  は  $n$  フレーム目の BoSC マイクロホンのマイク番号  $b$  の原音場信号 (1ch) であり, 以下の式より算出する.

$$theta[n, b] = \min \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{\overrightarrow{VBAPspk_n} \cdot \overrightarrow{mic_i}}{|\overrightarrow{VBAPspk_n}| |\overrightarrow{mic_i}|} \right) \right\} \quad (6)$$

$VBAPspk_n$  は  $n$  フレーム目の VBAP 法で算出した利得が最大のスピーカ座標,  $mic_i$  は BoSC マイクロホンのマイク座標 ( $i = 1 \dots 80$ ) である. つまり,  $n$  フレーム目において  $VBAPspk_n$  のベクトルと BoSC マイクロホンの各々のマイクのベクトルのなす角の中で角度が最小になる BoSC マイクロホンのマイク番号を  $b$  とする.

また,  $amp[n, l]$  は  $n$  フレーム目,  $amp[n+1, l]$  は  $n+1$  フレーム目の音響樽のスピーカ番号  $l$  の駆動重み係数であり, それぞれ以下の式で算出する.

$$amp[n, l] = VBAPgain[n, l] \times \left( \frac{1}{MAXx_n} \right) \quad (7)$$

$$amp[n+1, l] =$$

$$VBAPgain[n+1, l] \times \left( \frac{1}{MAXx_{n+1}} \right) \quad (8)$$

$VBAPgain[n, l]$  は  $n$  フレーム目,  $VBAPgain[n+1, l]$  は  $n+1$  フレーム目の VBAP 法で算出した音響樽のスピーカ番号  $l$  の利得,  $MAXx_n$  は  $n$  フレーム目,  $MAXx_{n+1}$  は  $n+1$  フレーム目の原音場信号 80ch の振幅の最大値である.

$fadein[m], fadeout[m]$  は Hanning 窓を用いてフェードイン・フェードアウト処理をおこなう.

すなわち, フレーム間で VBAP 法による各スピーカの駆動重み係数が不連続にならない処理をすることで, 移動音源に対応することができる.

## 5 心理評価

### 5.1 評価の条件

実音場収録音源 (オペラ歌手が歌いながら移動する音源) を用いて, 従来手法 (正則化法) と提案アルゴリズム手法より生成した 2 つの音源を約 12[sec] ごとに分割し, 全 7 刺激対として, 被験者ごとにランダムに呈示した. 刺激の音圧レベルは被験者の頭部中心位置で 72 dB(A) とした. 音響樽での試聴経験が多い学生 3 名を対象に「移動音源に対応できていない (フレーム間の不連続点を感じる) 音源があるか」, 「音質に違いがあるか」の 2 項目について回答させた. 音質に違いがあると回答した場合は, 具体的な違いについてインタビューをおこなった.

### 5.2 評価結果

「移動音源に対応できていない (フレーム間の不連続点を感じる) 音源があるか」については全被験者, 全刺激対において, 従来手法と提案アルゴリズム手法ともに対応できているという結果が得られた. 「音質に違いがあるか」についてのインタビューでは, 提案アルゴリズム手法のほうが「音像がシャープ」や「音源の距離感が近い」などの意見が得られた.

## 6 おわりに

本稿では, 移動音源に対応可能なフレーム処理を用いた新しいアルゴリズムを提案, 定式化し実装をおこなった. また, 心理評価により提案アルゴリズムの有効性を確認した.

## 参考文献

- [1] 伊勢, 音講論, 3-5-13, 2011.9
- [2] 梶田他, 信学技報, vol. 117, no. 255, 35-39, 2017.
- [3] 内海他, 音講論, 3-4-8, 2018.3
- [4] 本城他, 応用力学論文集, Vol.2, pp73-81, 1999.8
- [5] R. Schmidt, IEEE TAP Vol.34, Issue:3, 1986.3
- [6] V. Pulkki, .J.Audio Eng. Soc., 45, 6, pp456-466 1997