

3次元音場再生システムにおける移動音源定位評価に関する基礎的検討*

☆浅井拓朗, 高以良光, 尾本章 (九大・芸工/JST CREST)

1 はじめに

境界音場制御の原理に基づく3次元音場再生システム(BoSCシステム)が提案されており, 没入型聴覚ディスプレイ装置である音響樽^[1]が開発されている。その定位性能は主観評価実験によって水平面ではほぼ一致した呈示が可能であるが, 鉛直面では平均誤差が水平面に比べて大きくなることが報告されている^[2]。これらの実験は静止音源が用いられてきたが, 音響樽では任意の仮想音源を配置できることから, 本研究では移動音源定位に関してパーティクルフィルタを用いた評価を試みた。

2 実験方法

2.1 測定条件

原音場は無響室とし, 80 ch のフラーレン型マイクロホンをターンテーブルに乗せ, スピーカを固定した状態で水平角・仰角方向について以下の2パターンの測定を行なった。

1. マイクロホンから半径1mの円周上を音源が24[s/round]の早さで1回転する。
2. マイクロホンから半径1mの円周上を音源が下図(Fig.1)のように回転する。ただし, 初期値を -30° , 90° , 210° の3ヶ所から開始した。

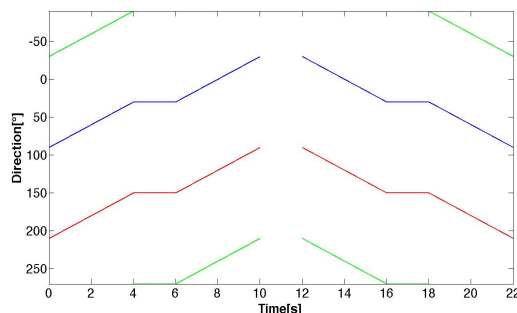


Fig. 1 回転パターン

実線の区間は音源が駆動していることを示している。使用した音源は純音(125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz), 帯域雑音(中心周波数125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz)を用いた。パーティクルフィルタによる音源推定に用いたマイクロホンは同一平面上に存在するものを抽出したものである。

80ch マイクロホンで測定した音源を設計方法が異なる5つの逆フィルタを畳込んだ上で, 音響樽内で再生を行なった。この樽内の再現音場において, 原音場と同様に音源推定のための録音を行なった。

2.2 パーティクルフィルタ

移動音源では短時間に音源位置を推定する必要がある。その際の過去のマイクロホンからの観測信号 $\mathbf{y}_t$ を基にした内部状態, ここでは角度 θ_t の事後確率計算をパーティクルフィルタ^[3]を用いて効率的に行なった。パーティクルフィルタアルゴリズムでは推定角度である内部状態 θ_t と重み w_t の2つのパラメータを持つ粒子が尤度関数 $p(\mathbf{y}_t|\theta_t)$ から求められる重みに基づいて増殖・淘汰する手続きを繰り返すことで, 次の時刻 $t+1$ の事後確率を求める。これはベイズの定理の事後確率にあたる。

事後確率密度関数はモンテカルロ法, 重点サンプリングにより下式に従って逐次的に計算される。

$$\hat{p}(\theta_k|\mathbf{Y}_{1:k}) = \sum_{i=1}^{N_p} \tilde{w}_k^{(i)} \delta(\theta_k - \theta_k^{(i)}) \quad (1)$$

$\tilde{w}_k^{(i)}$ はインポートランス重みであり, $\tilde{w}_k^{(i)} \propto \tilde{w}_k^{(i-1)} p(\mathbf{y}_k|\mathbf{x}_k^{(i)})$ という関係から遷移確率密度を用いて再帰的に求められる。

具体的な手続きを以下に示す。これらの手続きと数学的な結びつきは参考文献に任せる^[3]。

1. **サンプリング** 事前遷移確率密度 $p(\theta_t|\theta_{t-1})$ から粒子 $\mathbf{x}_k^{(i)}$ を発生させる。
2. **重み** 新たな観測値 $\mathbf{y}_t$ と予測値 $\theta_k^{(i)}$ から後述する尤度関数を求め, 各粒子の内部状態 $\theta_t^{(i)}$ から式(1)における $\tilde{w}_k^{(i)}$ の更新を行なう。
3. **リサンプリング** 各粒子の重みに従って粒子を増殖または淘汰することで, 均一な重みを持つ $\tilde{\mathbf{x}}_k^{(j)}$ を発生させる。この分布が事後確率密度 $p(\theta_k|\mathbf{Y}_{1:k})$ の近似 $\hat{p}(\theta_k|\mathbf{Y}_{1:k})$ である。
4. **サンプリング** 再び状態遷移を行ない, 均一な重みの粒子を分布させる。今回は $N(\theta_t^{(i)}, \sigma^2 = 2)$ の正規分布を遷移確率とした。

以上の手続きを繰り返すことで事後確率を求める。

2.2.1 尤度関数

確率分布関数である尤度関数は観測モデルと観測信号 $\mathbf{y}(t, j)$ との適合度を表している。各マイクロホンの観測信号を短時間周波数変換した行列の空間相関行列を尤度関数の算出に用いた。つまり, 各要素は振幅, 位相の情報を含む各マイクロホン間の分散関係を表している。この観測信号の空間相関行列 $\mathbf{C}_y$ に対

*Study on the evaluation of moving sound source localization for 3-D sound field reproduction systems by ASAI, Takuro, TAKAIRA, Hikari, OMOTO, Akira (Faculty of Design, Kyushu University, JST/CREST)

して、音源位置とマイクロホン配置の伝達関数を用いた観測モデルの空間相関行列 K_y を用いることで、尤度関数 $p(y_t|\theta_t)$ は以下のように表される [4]。

$$p(x_t|\theta_t) = \psi_x \exp\left(-\frac{1}{2} \text{tr}[C_y K_y^{-1}]\right) \quad (2)$$

ここでは予め観測信号を自由空間を仮定してモデル化することで、現在の観測信号に対する尤度関数を算出している。

3 実験結果

良好な音源位置推定は 500, 1000 Hz 付近の帯域であった。低域では尤度関数が音源推定に十分に先鋭にならず、高域では空間エイリアシング問題がみられた。原音場において純音 500 Hz で初期値 90° から Fig.1 のように回転させた試行を例にして、尤度関数 (Fig.2) と各粒子の示す推定角度 (Fig. 3) を示す。

パーティクルが尤度関数に従い増殖・淘汰されながら連続的に音源位置の推定が行なわれていることが分かる。

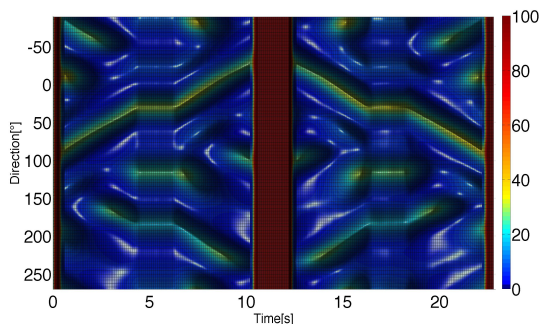


Fig. 2 尤度関数 (原音場 純音 500 Hz 水平方向)

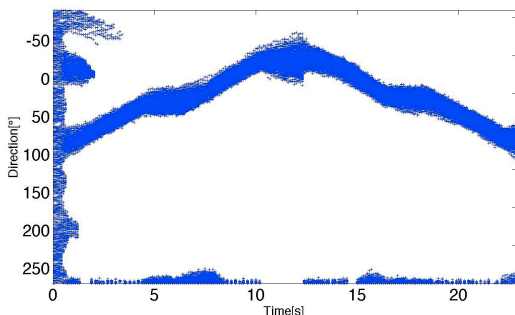


Fig. 3 音源の軌跡 (原音場 純音 500 Hz 水平方向)

再現音場での音源位置推定結果では畳込む逆フィルタによって推定結果に差異が現れた。最小ノルム解を利用し安定化を行なわないフィルタでは、ほとんど音源が検出不可能であったのに対し、正則化パラメータによって安定化を行なった逆フィルタではほぼ原音場と同様の追跡結果が得られた (Fig. 4)。打ち切り特異値分解による逆フィルタでは概ね再現ができているが、原音場には存在しない角度での尤度の増加がみられ、それにより本来存在しない位置に音源推定してしまっている区間が現れる傾向がみられた (Fig.5)。

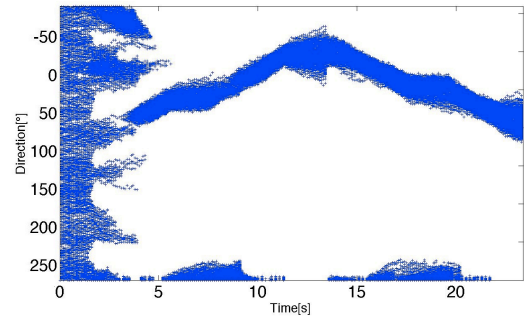


Fig. 4 音源の軌跡 (再現音場 正則化パラメータによる安定化した逆フィルタ)

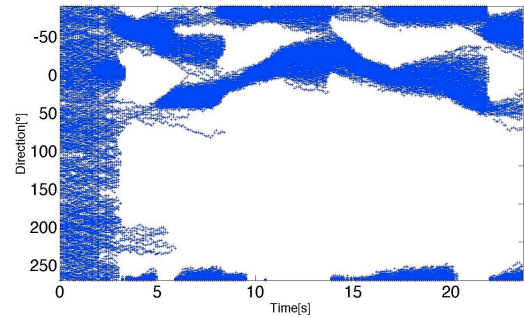


Fig. 5 音源の軌跡 (再現音場 打ち切り特異値分解による逆フィルタ)

4 まとめ

実環境においてパーティクルフィルタによる移動音源位置推定を適用し、3次元音場再生システムの原音場と再現音場での追跡の比較を行なった。結果から3次元音場再生システム・逆フィルタの空間再現性能評価への適用可能性が示唆された。特に今回は逆フィルタの性能評価を試みたが、再現音場において畳込む逆フィルタにより推定音源位置の鮮明性に影響があることが分かった。

参考文献

- [1] Omoto *et al.*, “Sound field reproduction and sharing system based on the boundary surface control principle”, *Acoust. Sci. Tech*, Vol. 36(1), 1-11, 2015
- [2] KOBAYASHI *et al.*, “Subjective evaluation of a virtual acoustic system: Trials with three-dimensional sound field reproduced by the ‘Sound Cask’”, *Proc ICA*, 2013
- [3] 浅野 太, “音のアレイ信号処理 -音源の定位・追跡と分離-”, コロナ社, 2011.
- [4] 浅野 太, 麻生 英樹, “パーティクルフィルタを用いた移動音源の追跡技術”, *日本音響学会誌*, 61巻 12号, pp720-727, 2005.