

複数音源追跡におけるドローン群の行動計画の検討

Study of drone swarm action planning in multiple sound source tracking

山田 泰基^{1*} 糸山 克寿^{1,2} 西田 健次¹ 中臺 一博¹

Taiki Yamada¹, Katsutoshi Itoyama¹, Kenji Nishida¹, Kazuhiro Nakadai^{1,2}

¹ 東京工業大学

¹ Tokyo Institute of Technology

² (株) ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン

² Honda Research Institute Japan Co.,Ltd.

Abstract: 本稿はマイクロホンアレイ搭載ドローン群による複数音源追跡を行うため、ドローン配置およびマイクロホンアレイ配置の最適化手法を提案する。一般的にマイクロホンアレイは、信号処理を通じて音源方向を推定できるツールとして用いられている。マイクロホンアレイと搭載することで、ドローンは災害現場などで助けを呼ぶ人の捜索が可能になり、マイクロホンアレイ搭載ドローンが複数台あればその位置を推定・追跡できるようになる。しかし、マイクロホンアレイ搭載ドローン群による音源位置追跡の性能はマイクロホンアレイの配置の影響が大きく、なるべく各マイクロホンアレイの推定方向同士は直交し、かつマイクロホンアレイ-音源間の距離は小さい方が望ましい。そこで、本稿では音源位置追跡のためのマイクロホンアレイの配置最適化手法を提案し、その有効性を検討する。提案手法は数値シミュレーションを通じて検証され、提案手法がマイクロホンアレイの推定方向同士を直交に近づけながらも音源との距離大きく離さないはたらきが見られた。シミュレーション上ではおよそ 10 m 離れた音源 2 つに対してそれぞれ 2.15 m, 0.65 m の RMSE (Root Mean Square Error) で追跡できたことを確認した。

1 はじめに

近年、災害現場におけるドローンの活用が期待されている。特にドローン群の制御技術が向上したことにより、災害フィールドにドローン群を配備し短時間でフィールドの環境理解を進められることが期待される。ドローン聴覚の文脈では、マイクロホンアレイと呼ばれる聴覚センサを搭載することで音源方向を推定し、瓦礫に埋もれて視認しづらい要救助者を発見する研究が報告されている [1-3]。以前に我々もマイクロホンアレイを搭載したドローン群による移動音源位置追跡について報告した [4,5]。複数マイクロホンアレイを用いることで同タイミングの方向推定・三角測量が可能になり、推定したい音源軌道への取束が早いというメリットがあるという手法である。しかし、既存研究ではドローンの位置に関する考察が少なく、実際にはドローンの配置によって三角測量の精度が落ちたり、ドローンが音源から遠すぎてしまい音源がほとんど聞き取れ

なかつたりすることがあるため、移動音源追跡の精度向上にドローン配置の最適化は不可欠である。そこで、我々は以前に単独移動音源追跡のためのドローン配置およびマイクロホンアレイ配置の最適化手法を提案した。本稿では、本手法を複数音源の追跡に拡張し、数値シミュレーションを通じてその有効性を検討する。複数音源追跡が単独音源追跡と異なる点は、全てのマイクロホンアレイが全ての音源の追跡に寄与できない点である。一般的に単独音源の位置追跡を行う際は、各マイクロホンアレイは音源を囲むように移動することで、音源から離れ過ぎず、ドローンノイズとの SN 比を大きくした状態で位置推定を行うことができる。しかし、複数音源を追跡する際、音源同士が離れている場合は全てのマイクロホンアレイが各音源を聞き取れる位置に置くことは困難である。そのため、各音源の追跡に用いるマイクロホンアレイの情報は取捨選択する必要があり、聞き取れるマイクロホンアレイだけで音源追跡とマイクロホンアレイ配置の最適化を考える必要がある。そこで本稿では、各マイクロホンアレイが各音源の方向を推定できたかという「確信度」なる変数を定義し、この概念を元に音源追跡に用いるマイ

*連絡先： 東京工業大学
〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 西 8 号館
W-30
E-mail: yamada@ra.sc.e.titech.ac.jp

クロホンアレイを選択し、その配置を最適化する。

2 提案手法

複数マイクロホンアレイを用いて音源位置追跡を行う場合、マイクロホンアレイの配置が追跡精度に影響を及ぼす可能性がある [6]。例えば、複数マイクロホンアレイで音源方向推定し、三角測量的に音源位置を推定するとき、マイクロホンアレイ同士の方向が音源から見て近しいと、その方向に音源位置推定誤差が乗りやすくなる場合がある。また、マイクロホンアレイをドローンに搭載する場合、常にドローンノイズがマイクロホンアレイに近い箇所で発生するため、ドローンが音源から離れるほど、追跡音源との SN 比が著しく小さくなる恐れがある。そこで本稿ではマイクロホンアレイを搭載したドローン群を用いた複数音源追跡の性能を向上するべく、ドローン群の配置を最適化するアルゴリズムを提案する。

2.1 提案アルゴリズム概要

音源追跡を行うにあたって、マイクロホンアレイ搭載ドローンが N 台、追跡音源が S 個存在するシナリオを考える。以後、 $i, j \in 1, \dots, N$ はドローンに搭載されたマイクロホンアレイのインデックス、 $k \in 1, \dots, S$ は音源のインデックスを指す。提案手法では各ドローンは Algorithm 1 に従い移動することで音源位置追跡の向上を図る。Algorithm 1 を文章化した内容は以下の通りである。

0. 変数の初期化は 2.5 節を参照
1. MUSIC 法を用いて音源方向推定を行う。
2. MUSIC スペクトルに応じてマイクロホンアレイ i の音源 k に対する確信度 $p(\alpha_{i \rightarrow k} | \mathbf{z})$ を式 (1) より計算する。確信度に応じて各音源の位置推定にどのマイクロホンアレイが寄与するかを決定する。
3. 推定方向と選択したマイクロホンアレイ群を元に各音源に対応するマイクロホンアレイ群毎に音源位置追跡を行う。
4. 推定した音源位置を元に式 (5) を通じて最適なマイクロホンアレイ配置を計算し、各ドローンは算出された位置に移動する。

続く小節は上記の行程の詳細を説明する。

Algorithm 1 提案アルゴリズム (1 タイムステップ分)

Require: $\hat{\mathbf{x}}_{i,t}$

- 1: **for** $i = 1, \dots, N$ **do**
- 2: $\mathbf{d}_i, P(\phi, \theta) \leftarrow$ MUSIC 法 [7] による推定方向と MUSIC スペクトル
- 3: **end for**
- 4: **for** $k = 1, \dots, K$ **do**
- 5: $\mathcal{M}_k \leftarrow \emptyset$
- 6: **for** $i = 1, \dots, N$ **do**
- 7: $p(\alpha_{i \rightarrow k} | \mathbf{z}) \leftarrow$ 式 (1)
- 8: **if** $p(\alpha_{i \rightarrow k} | \mathbf{z}) \geq p_{\text{thre}}$ **then**
- 9: \mathcal{M}_k に i を追加
- 10: **end if**
- 11: **end for**
- 12: $\hat{\mathbf{s}}_{k,t} \leftarrow \mathcal{M}_k$ に含まれるマイクロホンアレイを用いた MT-GSFT [4] による推定位置
- 13: **end for**
- 14: $\mathbf{x}_{t+1} \leftarrow$ 式 (5)

2.2 音源方向推定およびマイクロホンアレイの確信度の更新

一般に複数マイクロホンアレイを用いて音源位置を推定する場合、複数マイクロホンアレイで音源方向推定を行い、三角測量的に音源位置を推定することが多い。本稿では音源方向推定の手段として、MUSIC 法 [7] と呼ばれる手法を用いて音源位置推定を行う。MUSIC 法は収録された多チャンネル音響信号の空間相関行列 \mathbf{R} が張る固有空間を解析する手法であり、目的音源の部分空間と雑音部分空間の直交性を用いて音源の方位・仰角を推定する手法である。MUSIC 法では MUSIC スペクトルと呼ばれる空間スペクトル $P(\phi, \theta)$ を算出し、スペクトル P のピーク値に位置する方位角 ϕ と仰角 θ を推定方向とする。しかし、広いフィールドで音源位置追跡を行う場合、遠距離にある音源は減衰してしまい全てのマイクロホンアレイが遠距離音源の方向推定を行えるとは限らない。そのため音源位置追跡を行う際、音源を聞き取れたマイクロホンアレイのみで行うことが望ましい。本稿ではマイクロホンアレイの「確信度」を定義し、音源 k に対して確信度が高いマイクロホンアレイの方向推定結果のみを用いて音源位置追跡を行う。マイクロホンアレイ i が音源 k を観測するイベントを $\alpha_{i \rightarrow k}$ と定義し、 $\alpha_{i \rightarrow k} = 1$ で観測が成功、 $\alpha_{i \rightarrow k} = 0$ で観測が失敗したと定義する。このとき、マイクロホンアレイ i の音源 k に対する確信度 $p(\alpha_{i \rightarrow k} | \mathbf{z})$ は式 (1) で更新される確率で定義される。

$$p(\alpha_{i \rightarrow k} | \mathbf{z}) = \frac{p(\alpha_{i \rightarrow k})p(\mathbf{z} | \alpha_{i \rightarrow k})}{\sum p(\alpha_{i \rightarrow k})p(\mathbf{z} | \alpha_{i \rightarrow k})} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{z} は観測を表し、確信度 $p(\alpha_{i \rightarrow k} | \mathbf{z})$ は観測 \mathbf{z} が与えられたときマイクロホンアレイ i が音源 k を観測できている確率である。事前確率 $p(\alpha_{i \rightarrow k})$ は前タイムステップの事後確率によって与えられ、尤度 $p(\mathbf{z} | \alpha_{i \rightarrow k})$ は式 (2), (3) で計算する。

$$p(\mathbf{z} | \alpha_{i \rightarrow k}) = \begin{cases} P_{\text{norm}}(\phi_{i \rightarrow k}, \theta_{i \rightarrow k}) & (\alpha_{i \rightarrow k} = 1) \\ \frac{1}{N_\phi N_\theta} & (\alpha_{i \rightarrow k} = 0) \end{cases} \quad (2)$$

$P_{\text{norm}}(\phi, \theta)$ は MUSIC スペクトルの総和が 1 になるように正規化した MUSIC スペクトルであり、 N_ϕ, N_θ はそれぞれ MUSIC スペクトルを計算するときの方位角ビン、仰角ビンの数である。また、 $(\phi_{i \rightarrow k}, \theta_{i \rightarrow k})$ はマイクロホンアレイ i から見た音源 k の方位角、仰角であるため、 $P_{\text{norm}}(\phi_{i \rightarrow k}, \theta_{i \rightarrow k})$ はマイクロホンアレイ i から見た音源 k の正規化 MUSIC スペクトルにあたる。一般に正しい方向推定が行える場合、MUSIC スペクトルは音源方向にピークを立てるため、 $P_{\text{norm}}(\phi, \theta)$ は $\alpha_{i \rightarrow k} = 1$ のときの尤度分布と見なし式 (2) のように定義した。また、音源 k が正しく観測できない場合の MUSIC スペクトルの一般的な分布の形は存在しないため、 $\alpha_{i \rightarrow k} = 0$ である場合の尤度は MUSIC スペクトルが全方向において同値である場合の値と定義した。よって、マイクロホンアレイ i から見た音源 k の確信度は、マイクロホンアレイ i から見た音源 k の方向にあたる MUSIC スペクトルがピークに近い値を取るときに増加して 1 に近づき、そうでない場合は減少して 0 に近づく。本アルゴリズムでは確信度 $p(\alpha_{i \rightarrow k} | \mathbf{z})$ は全マイクロホンアレイ・音源の組み合わせに対して計算し、この確信度に基づいて音源 k の位置追跡に用いるマイクロホンアレイの取舍選択を行う。具体的には、音源 k に対するマイクロホンアレイ i の確信度 $p(\alpha_{i \rightarrow k} | \mathbf{x})$ が閾値 p_{thre} 以上である場合、そのマイクロホンアレイは集合 $\mathcal{M}_k \subseteq \{1, \dots, N\}$ に加えられ、続く音源位置追跡とマイクロホンアレイ配置の最適化に用いられる。

2.3 音源位置追跡

前小節で求めたマイクロホンアレイ集合 \mathcal{M}_k を用いて、音源位置追跡を行う。本稿では、以前我々が提案した音源位置追跡は MT-GSFT 法 [4] を用いて追跡を行う。MT-GSFT はドローンに搭載された複数マイクロホンアレイによる音源位置追跡のために提案された手法で、ドローンノイズで音源方向推定が大きく分散するような状況下でも外れ値となるような三角測量点の影響を抑えるはたらきを持つ。具体的には複数マイクロホンアレイの推定方向による三角測量によって得られた三角測量点群を $\boldsymbol{\mu} = \{\boldsymbol{\mu}_1, \dots, \boldsymbol{\mu}_Q\}$ と置き、こ

れらの三角測量点を式 (4) のような混合ガウス分布に置き換える。

$$\sum_{q=1}^Q \frac{1}{Q} \cdot \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_q, \boldsymbol{\Sigma}) \quad (4)$$

ただし、 \mathcal{N} はガウス分布を表し、 $\boldsymbol{\Sigma}$ はヒューリスティックに決める分散定数である。式 (4) で得られた混合ガウス分布を、Gaussian Sum Filter (GSF) に適用することで追跡したい音源の位置分布を得られ、混合ガウス分布の重み付き平均を取ることで推定音源位置 $\hat{\mathbf{s}}$ が得られる。注意すべき点は、音源 k について MT-GSFT 法による追跡を行いたい場合は、マイクロホンアレイ集合 \mathcal{M}_k に含まれたマイクロホンアレイの方向推定結果のみを用いて三角測量点の計算を行う点である。

2.4 マイクロホンアレイ配置の最適化

本稿では (i) 各マイクロホンアレイ推定方向同士が直交に近づき、かつ (ii) ドローンが音源に近い状況が、音源位置追跡に有効であるという仮定のもと、式 (5) を構成し、本式を最小化することで最適なマイクロホンアレイ配置を算出する。

$$\underset{\mathbf{x}_{t+1}}{\operatorname{argmin}} f(\mathbf{x}_{t+1}) + \lambda_g g(\mathbf{x}_{t+1}) + \lambda_h h(\mathbf{x}_{t+1}) \quad (5)$$

$$\text{s.t. } z_i \geq z_{\text{lim}} \quad (6)$$

$$f(\mathbf{x}_{t+1}) = \sum_{k=1}^S \sum_{\{i,j\} \in \mathcal{M}_k (i \neq j)} \frac{(\mathbf{x}_{i,t+1} - \hat{\mathbf{s}}_{k,t})^\top (\mathbf{x}_{j,t+1} - \hat{\mathbf{s}}_{k,t})}{\|\mathbf{x}_{i,t+1} - \hat{\mathbf{s}}_{k,t}\|_2 \|\mathbf{x}_{j,t+1} - \hat{\mathbf{s}}_{k,t}\|_2} \quad (7)$$

$$g(\mathbf{x}_{t+1}) = \sum_{k=1}^S \sum_{i \in \mathcal{M}_k} \|\mathbf{x}_{i,t+1} - \hat{\mathbf{s}}_{k,t}\|_2 \quad (8)$$

$$h(\mathbf{x}_{t+1}) = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{x}_{i,t+1} - \mathbf{x}_{i,t}\|_2 \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{x}_{i,t} \in \mathbb{R}^3$ は時刻 t におけるマイクロホンアレイ i の 3 次元位置であり、 $\mathbf{x}_t = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N\}$ は全マイクロホンアレイの時刻 t における 3 次元位置の集合である。 z_i はマイクロホンアレイ i の z 座標、 z_{lim} は z 座標の下限であり、式 (6) はドローンが音源に近づきすぎないための制約である。また、 $\mathbf{s}_{k,t} \in \mathbb{R}^3$ は時刻 t における音源 k の 3 次元位置である。 $f(\mathbf{x})$ は 2 つのマイクロホンアレイが正しい方向を推定した場合の 2 本の方向ベクトルの角度の余弦の総和である。よって、理想的な推定方向同士が直交化すると $f(\mathbf{x})$ は 0 に近づくため、 $f(\mathbf{x})$ の最小化によって推定方向同士が直交に近づき三角測量点の分散の抑制が期待できる。 $g(\mathbf{x})$ は音源とマイクロホンアレイの距離の総和であり、 $g(\mathbf{x})$ を最小化することによって音源とドローンの距離を抑えることができ、距離減衰による SN 比の減少を抑えることができる。 $h(\mathbf{x})$ は前タイムステップのドローン位

置と現在のタイムステップのドローン位置の距離を最小化することで、ドローンが大きく移動することを防ぐはたらきを持つ。 λ_g, λ_h はそれぞれ $g(\mathbf{x}), h(\mathbf{x})$ にかかる係数である。 $f(\mathbf{x})$ の値は大きくとも高々 $S \cdot N C_2$ までしか取らない一方、 $g(\mathbf{x}), h(\mathbf{x})$ はドローンと音源の距離やドローンの移動距離の総和を取るため、一般的には $f(\mathbf{x})$ は $g(\mathbf{x}), h(\mathbf{x})$ よりも著しく小さくなることが多い。そこで、項同士のバランスを取るために係数 λ_g, λ_h を設けており、本稿の評価シミュレーションでは $\lambda_g = 0.01, \lambda_h = 0.0001$ と設定した。また、本稿ではマイクロホンアレイはドローンから突き出ている形で搭載されていることを想定しており、そのためマイクロホンアレイの後方でプロペラがドローンノイズを発することになる。よって音源はドローンの後方ではなく、ドローンの前方にあることが好ましい。本アルゴリズムではドローンの姿勢は推定音源位置 $\hat{\mathbf{s}}_k$ を向くように配置し、マイクロホンアレイ i が複数音源に対して確信度が閾値 p_{thre} を超える場合は該当する音源群への平均方向を向くように配置した。

2.5 初期タイムステップの処理

上記のアルゴリズムを実行する際、音源数は既知である必要があり、また確信度 $p(\alpha_{i \rightarrow k})$ の初期値が必要になる。そこで、本稿では音源数は S は既知と仮定し、確信度 $p(\alpha_{i \rightarrow k})$ の初期値は全ての音源・マイクロホンアレイのペアに置いて 0.5 と設定する。また、MT-GSFT を行う上で初期事前分布を設定する必要があるが、本稿では全マイクロホンアレイから算出した三角測量点を k-means 法で S 個のクラスターに分割し、各クラスターの重心を平均、 $\Sigma_{\text{gen}} \in \mathbb{R}^3$ を分散とした正規乱数生成器から I 個の 3 次元の点を作り出し、それぞれの点を平均に持つ分散 Σ_0 の正規分布を合成した混合ガウス分布を初期事前分布に用いる。

3 評価シミュレーション

提案手法によるマイクロホンアレイ配置の最適化によって複数音源の位置追跡が可能になるかを確かめるため、数値シミュレーションを行い、その有効性を検証した。

3.1 シミュレーション設定

提案手法の有効性を評価するため、提案手法を MATLAB 上で実装した。本シミュレーションでは音源 1 と音源 2 の 2 個の音源を配置し、6 台のドローンでそれぞれの音源位置を追跡することを考える。(図 1) 以下図 1 で円形の軌跡を描く音源を音源 1、四角形の軌跡

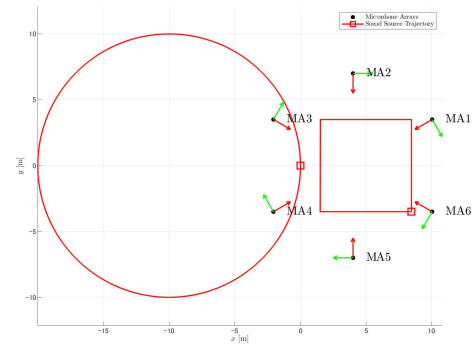


図 1: 上から見たフィールド図。各音源は赤四角マーカーから等速で反時計回りに移動する。赤矢印・緑矢印は各マイクロホンアレイの初期姿勢を示す。(MA=マイクロホンアレイ)

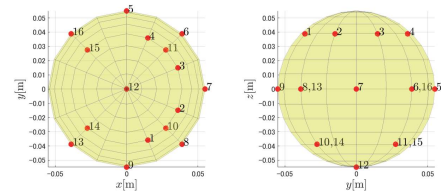


図 2: 球形 16 ch マイクロホンアレイを構成するマイクロホン配置

を描く音源を音源 2 と記述する。図 1 は上から見た俯瞰図であるが、実際には 3 次元の位置追跡を行っており、各音源は高さ $z = 1.5$ m に位置する。また、各ドローンの初期位置は $z = 5$ 平面で点 $(x, y, z) = (4, 0, 5)$ を中心に半径 7 m の円弧上に等間隔に置き、両音源を囲むように配置した。各ドローンには 16ch の球形マイクロホンアレイ (図 2) を 1 台ずつ搭載しており、24bit, 16 kHz で収録を行う。収録は $T = 46$ 秒間行い、追跡対象である音源は T 秒間かけて図の赤線の軌道をちょうど 1 周するように進む。音源 1 と音源 2 はそれぞれ 1000 Hz, 2000 Hz の正弦波を絶えず出力している。また、本シミュレーション環境を実際の屋外環境と近づけるため、各マイクロホンアレイには予め収録された 16 ch のドローンノイズを付加しており、音源信号との SN 比は -35 dB と設定した。各ドローンは式 (5) の更新則に従い移動し、更新に必要なパラメータは $\lambda_g = 0.01, \lambda_h = 0.0001, z_{\text{lim}} = 4.79$ と設定した。式 (5) の最小化の計算には内点法を用いた。音源方向推定には MUSIC 法 [7] を適用し、 $\omega_L = 900$ Hz から $\omega_H = 2100$ Hz の間の信号より方向推定に用いる空間スペクトルを方位角・仰角ともに 5 度刻みで算出する。

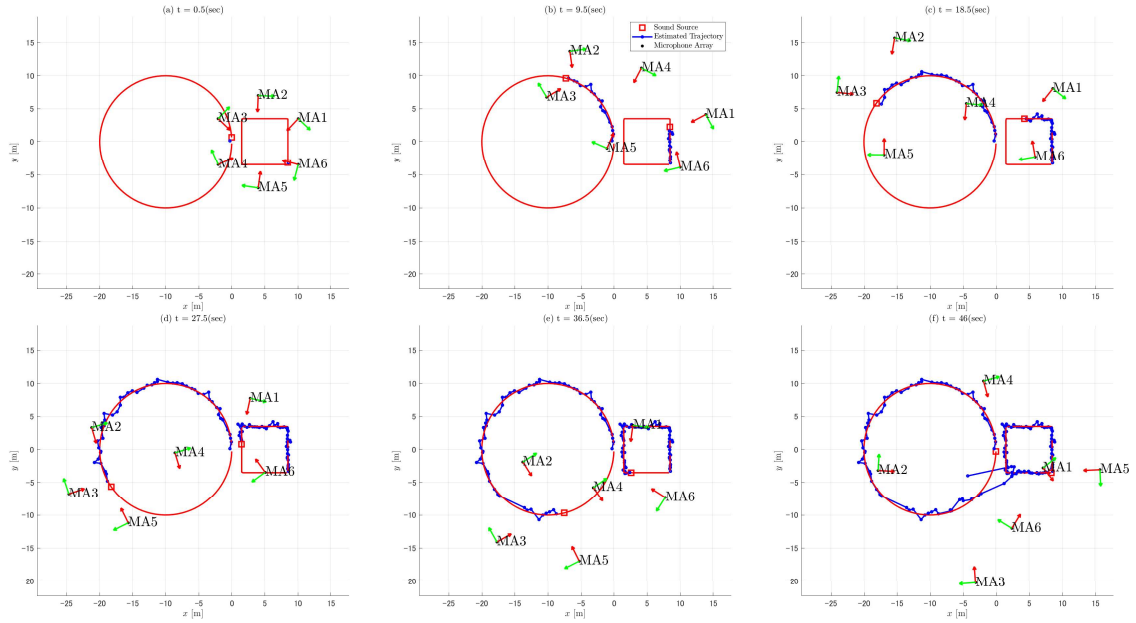


図 3: 音源位置追跡結果

3.2 結果・考察

図 3 は 46 秒間の収録の間に得られた音源位置の追跡結果とマイクロホンアレイ配置であり、提案手法は両音源の軌跡の概形を捉えていることが分かる。また、シミュレーション中盤では MA2, 3, 4, 5 が音源 1 を等間隔で囲んでおり、MA1, 4, 6 が音源 2 を等間隔で囲むように移動している様子が見られた。これは式 (5) を通じた最適化によって、各マイクロホンアレイの推定方向同士が直交に近づこうとするからであると思われる。また、各マイクロホンアレイの高さは常時 $z_{lim} = 4.79$ m であり、かつ観測できる音源とはおよそ 10 m 前後の距離を保とうとする動きが見られており、式 (5) の最適化を通じて各マイクロホンアレイが推定方向同士の直交性を守りつつも音源になるべく近づこうとしている様子が窺える。音源 1 (円軌道) の RMSE (Root Mean Square Error) は 2.15 m、音源 2 (四角軌道) の RMSE は 0.65 m であった。音源 1 の RMSE が比較的大きいのは、図 3(f) で見られるように、追跡結果が音源 2 の軌道に引っ張られてしまったからである。本稿では追跡するフィルター同士が共通する音源の位置を推定してしまったとき、同じ音源を追跡しないようにする処置を施していないため、図 3(f) のように近い音源軌道に追跡結果がドリフトしてしまう現象が起きたと考えられる。実際に、ドローン群に別の初期配置を与えてシミュレーションしたとき、2つの音源追跡フィルターが同じ音源を終始追跡してしまい、6 台のドローンが

音源 2 だけを囲むケースが見られた。よって、音源同士が近寄った場合に追跡フィルターが音源を混同しないような処置の必要性が窺えた。

図 4 は各マイクロホンアレイの音源に対する確信度 $p(\alpha_i \rightarrow k)$ の推移を示したものである。例えば、初期位置が音源 1 に近く、音源 2 から遠かった MA2, 3 は音源 1 に対する確信度が増加し、音源 2 に対する確信度が現象したことが見られる。そのため、MA2, 3 は音源 1 の音源追跡に寄与することに集中し、終始音源 1 の周囲を移動していることが分かる。音源 2 の追跡においても同様のことが MA1, 6 について見られる。MA4, 5 については、初期位置は比較的音源 1, 2 の両方に近かったことから、両方の音源の方向を推定できていたことが確認された。よって、シミュレーション序盤の両音源に対する MA4, 5 の確信度は $P_{thre} = 0.3$ を超えており、両音源の追跡に寄与していた様子が見られる。ただし、式 (5) によって各マイクロホンアレイは推定方向同士が直交するように配置する作用がはたさき、マイクロホンアレイ同士の位置はなるべく離れるように移動するようになる。そのため、MA4 は常に音源 1 と 2 の間に配置し両音源の方向推定に努める一方で、MA5 は音源 1 がある方へ引っ張られ、やがて音源 1 の追跡のみに寄与するようになった。以上より、式 (1) による確信度の更新を通じて、各マイクロホンアレイの確信度は音源を聞き取れる (= 音源に近く SN 比が大きい) 場合は上昇し、そうでない場合は減少する意図通りの傾向が見られた。また、提案アルゴリズム

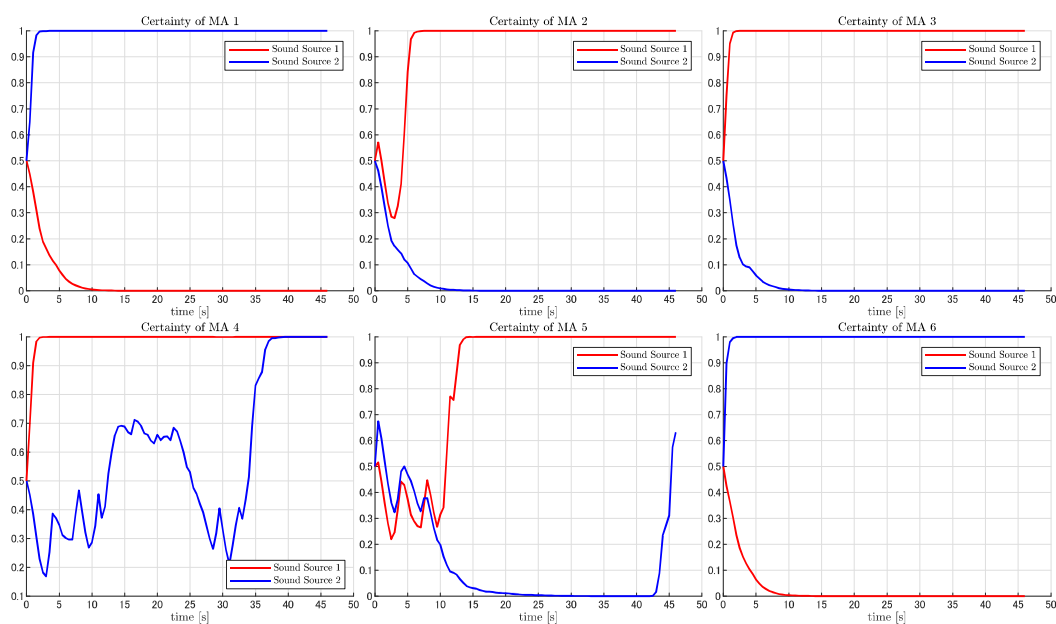


図 4: 各マイクロホンアレイの各音源に対する確信度の推移

によって音源の位置追跡とマイクロホンアレイ配置の更新は、その音源に対する確信度が高いマイクロホンアレイのみによって行われていることが窺える。

4 終わりに

本稿では、マイクロホンアレイ搭載ドローン群による複数音源の追跡のためのマイクロホンアレイ配置の最適化アルゴリズムを提案した。一般的に複数マイクロホンアレイで音源位置を推定する際に、各マイクロホンアレイが推定する音源方向同士は直交であることが好ましく、それと同時に音源が聞き取れるようにマイクロホンアレイは追跡音源に近づくことが望ましい。この2条件を満たすために評価関数式(5)を構築し、ドローンおよびマイクロホンアレイ配置を決定するアルゴリズムを提案した。また、複数の音源を同時に聞き取れないマイクロホンアレイが存在しても推定結果を損なわないように、確信度(式(1))という概念を導入し、確信度の高いマイクロホンアレイのみで音源追跡・マイクロホンアレイ配置の最適化が行えるようにした。提案アルゴリズムの有効性を検討すべく数値シミュレーションを行い、提案アルゴリズムが複数音源の追跡を行えるケースが確認できた一方、音源同士が近い時に追跡結果の混同が起こることが確認できた。また、MT-GSFTのような三角測量を行う手法では、1つの音源につきマイクロホンアレイが少なくとも2個以上

必要であり、もし追跡途中である音源を聞き取れるマイクロホンアレイが1個しかない状況下でも音源位置追跡を継続できるような、追跡戦略のスイッチングが求められる。まとめると、追跡フィルター同士の重なりを解消し音源を追跡できるマイクロホンアレイが1台のみになっても追跡が続けられる追跡手法のスイッチングが今後の課題である。加えて、音源の発生と消滅の検知や他の音源追跡手法についても有効であるかの検証も課題の1つである。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K12017, JP19KK0260 および JP20H00475 の助成を受けた。

参考文献

- [1] K. Nakadai, M. Kumon, H. G. Okuno, K. Hoshiba, M. Wakabayashi, K. Washizaki, T. Ishiki, D. Gabriel, Y. Bando, T. Morito, R. Kojima, and O. Sugiyama, "Development of microphone-array-embedded uav for search and rescue task," in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, pp. 5985–5990.

- [2] K. Hoshiba, K. Washizaki, M. Wakabayashi, T. Ishiki, M. Kumon, Y. Bando, D. Gabriel, K. Nakadai, and H. Okuno, “Design of uav-embedded microphone array system for sound source localization in outdoor environments,” *Sensors*, vol. 17, no. 11, p. 2535, 2017.
- [3] M. Wakabayashi, K. Washizaka, K. Hoshiba, K. Nakadai, H. G. Okuno, and M. Kumon, “Design and implementation of real-time visualization of sound source positions by drone audition,” in *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2020, pp. 814–819.
- [4] T. Yamada, K. Itoyama, K. Nishida, and K. Nakadai, “Sound source tracking by drones with microphone arrays (forthcoming),” in *Proceedings of 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration: 12-15 January 2020; Honolulu*, 2020.
- [5] —, “Sound source tracking using integrated direction likelihood for drones with microphone arrays,” in *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE, 2021, pp. 394–399.
- [6] —, “Assessment of sound source tracking using multiple drones equipped with multiple microphone arrays,” *International journal of environmental research and public health*, vol. 18, no. 17, p. 9039, 2021.
- [7] R. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276–280, 1986.