

## 複数のマイクロホンアレイを搭載した複数のUAVによる移動音源の三次元追跡

山田 泰基<sup>1</sup>, Daniel Gabriel<sup>1</sup>, 糸山 克寿<sup>1</sup>, 西田 健次<sup>1</sup>, 中臺一博<sup>1,2</sup>

1 東京工業大学 工学院 システム制御系 2 (株) ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン

### 1 はじめに

近年、音源位置推定技術と組み合わせ、瓦礫に埋もれた要救助者探索など災害現場におけるUAVの応用が期待されている[1, 2]. 特に、複数のマイクロホンからなるマイクロホンアレイを用いた音源の位置推定は盛んに研究がおこなわれている. 一般に、マイクロホンアレイを単独で用いる場合、位置の推定は困難であり、方向推定に用いられることが多い. この問題に対し、これまでUAV1台に複数のマイクロホンアレイを取り付け、移動音源の軌跡を推定する手法を提案し、数値シミュレーションにより、音源位置推定、および音源軌跡推定ができることを示した[3]. しかし、単独のUAVに複数マイクロホンアレイを取り付けただけでは、遠方音源に対する位置推定精度が落ちるという問題があった. 本稿では、複数台のUAVそれぞれに複数台のマイクロホンアレイを搭載することにより、音源軌跡推定の精度改善を目指す.

### 2 問題設定

UAVの総数を  $M (\geq 2)$  とし、各UAVは  $UAV_1, \dots, UAV_m, \dots, UAV_M$  と番号付けする.  $m$  番目のUAVである  $UAV_m$  に取り付けられたマイクロホンアレイの総数を  $N_m (\geq 1)$  とし、 $UAV_m$  のマイクロホンアレイを  $MA_{m1}, \dots, MA_{mn}, \dots, MA_{mN_m}$  と番号付けする. また、全UAVに取り付けられたマイクロホンアレイの総数は  $N = \sum_m N_m \geq 2$  とし、各マイクロホンアレイは Fig. 1 のようにUAV中心から  $d$  離れた場所に取り付けられているとする. UAVは3次元並進運動と方位角方向のみの回転運動が可能であると仮定し、 $UAV_m$  の状態  $\mathbf{r}_m(t)$  ( $t$  は時刻) は

$$\mathbf{r}_m(t) = (x_m(t), y_m(t), z_m(t), \lambda_m(t)) \quad (1)$$

と表現し、既知であるとする.  $(x_m(t), y_m(t), z_m(t))$  は  $UAV_m$  の絶対座標系における3次元座標であり、 $\lambda_m(t)$  は  $UAV_m$  の方位角を指す. 音源として、3次元並進運動が可能で点音源を1つ仮定する. 音源座標  $\mathbf{e}(t)$  は

$$\mathbf{e}(t) = (x_e(t), y_e(t), z_e(t)) \quad (2)$$

と表す. また、音源信号  $s(t)$  は断続的でなく、継続的であるととし、マイクロホンアレイ  $MA_{mn}$  の各マイクロホンに時刻  $t$  に入力される信号の集合を  $s_{mn}(t)$  とする. UAVと音源が3次元空間上を移動する際に得られる入力  $s_{mn}(t)$  ( $m = 1, \dots, M, n = 1, \dots, N_m$ ) をもとに、音源の絶対座標  $\mathbf{e}(t)$  の軌跡を推定し出力する手法について、以下で提案する.

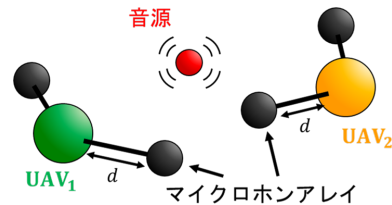


Fig. 1 Image of sound source localization with microphone array installed UAVs.

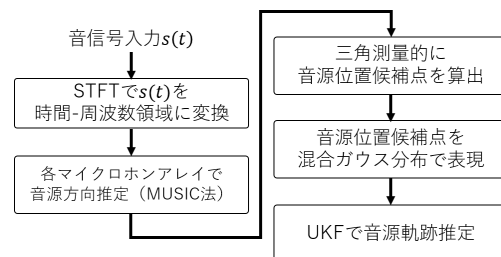


Fig. 2 Flow of the proposed method.

### 3 提案手法

提案手法のフローは Fig. 2 に示す. 本手法は音源方向を推定できるマイクロホンアレイを複数用いることで三角測量的に音源位置推定を行う. 従来の音源方向情報のみを用いた音源軌跡推定研究[4]では、距離が無情報分布  $\mathcal{N}(0, \infty)$  に基づくとしているため、推定処理を開始してから十分な時間が経過するまでは、距離方向の推定誤差が大きくなるという問題がある. 本手法では推定開始から距離情報を含む位置推定を行うため、推定開始直後の誤差を小さく抑えることができ、性能向上が期待できる. しかし、複数マイクロホンアレイを一機体に取り付けるだけでは、遠方音源の三角測定の精度が著しく低下してしまう. そこで本手法では、既提案手法[3]を拡張し、マイクロホンアレイを複数機体に搭載した上で、様々な方向から音源の観測及び音源位置推定を行う. 既提案手法と異なる点は、一機体に搭載された複数マイクロホンアレイを用いて機体中心から見た音源位置を推定する代わりに、複数機体に搭載された全マイクロホンアレイを用いて絶対座標系原点から見た音源位置を推定している点である.

本手法の工程を説明する. 複数マイクロホンアレイによる三角測量を行うために、Multiple Signal Classification (MUSIC) 法[5]を用いて音源方向推定を行う. MUSIC法は時間-周波数領域の信号を扱うため、入力された音信号  $s(t)$  に Short Time Fourier Transform (STFT) を施し、時間-周波数領域の信号に変換する. 各マイクロホンアレイにおいて音源方向が推定された後、すべてのマイクロホンアレイの組み合わせにおいて、三角測量を行う. 実際は、推定される音源方向ベクトル同士は1点に交わらないため、各推定音源方向ベクトル上の点の距離が最小となる際の2点の midpoint を疑似的に交点とする. 全通りのマイクロホンアレイの組み合わせ数を  $J = {}_N C_2$ , 各組み合わせにおいて求めた交

3D sound source tracking using multiple microphone arrays installed UAVs

Taiki Yamada<sup>1</sup>, Daniel Gabriel<sup>1</sup>, Katsutoshi Itoyama<sup>1</sup>, Kenji Nishida<sup>1</sup>, Kazuhiro Nakadai<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Systems and Control Engineering, School of Engineering, Tokyo Institute of Technology

<sup>2</sup> Honda Research Institute Japan Co., Ltd.

Table 1 Initial states and dynamics of the UAVs and the sound source (Positions are in meters. Rotations are in radians. UAV's dynamics are seen from their own coordinates)

移動体	初期状態	ダイナミクス
UAV <sub>1</sub> ( $\mathbf{r}_1$ )	(1, 0, 0, 0)	(0.2, 0.2, 0.1, -0.1)
UAV <sub>2</sub> ( $\mathbf{r}_2$ )	(0, 1, 1, $\frac{\pi}{2}$ )	(0.2, -0.3, 0, 0.2)
音源 ( $\mathbf{e}$ )	(2, 1.5, 0)	(0.1, 0.2, 0)

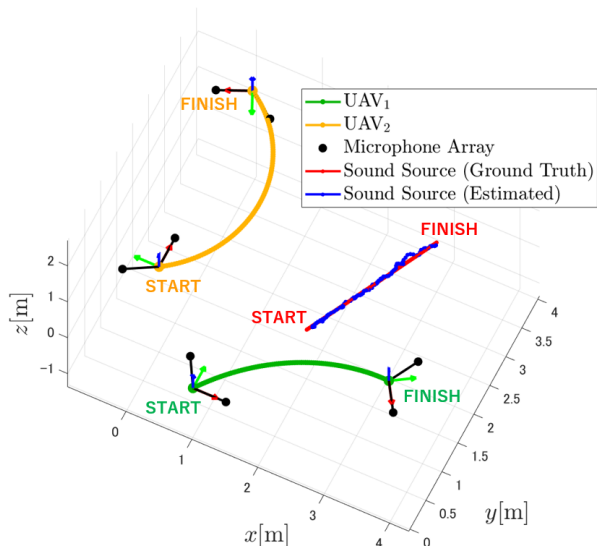


Fig. 3 Bird's eye view of the simulation result.

点を  $\mu^j$  ( $1 \leq j \leq J$ ) とする。推定音源位置を平均が  $\mu^j$  ( $1 \leq j \leq J$ ) のガウス分布による混合分布で表現すれば、推定音源位置を混合ガウス分布で表現したまま推定する Unscented Kalman Filter(UKF) フレームワーク [3] を用いることで、音源軌跡を推定することができる。

#### 4 数値シミュレーション

提案手法を MATLAB® に実装し、シミュレーションを行った。UAV は 2 台移動しており、音源と UAV の初期状態とダイナミクスを Table 1 に示す。また、UKF 更新時間  $T = 100[\text{ms}]$  であり、全体で  $10[\text{s}]$  シミュレーションを行った。アレイ・マニフォールド・ベクトル  $\mathbf{a}$  の分解能は  $5^\circ$  とした。マイクロホンアレイの数は  $N_1 = N_2 = 2$  とし、機体座標系の  $x$  軸から反時計回りに  $0, 120^\circ$  の位置に配置した。また、 $d = 0.5[\text{m}]$  とした。音の収録は  $44.1[\text{kHz}]$  で行い、STFT はフレーム長  $1024/44100 = 23.2[\text{ms}]$ 、シフト長  $11.6[\text{ms}]$  で行った。

Fig. 3 の通り、推定音源軌跡は真の音源軌跡周辺を推定できていることが分かる。また、本手法は推定開始から距離情報を含む位置推定をしているため、推定序盤に大きな誤差が生じていない。Fig. 4 では音源軌跡の真値と推定音源軌跡のユークリッド距離を誤差として、その大きさを表示している。前手法 [3] と比較するため、各 UAV を 1 台のみを使った音源軌跡推定誤差も Fig. 4 に示す。ただし、マイクロホンアレイの数を合わせるため、UAV1 台を用いた音源軌跡推定では 1 台に 4 つのマイクロホンアレイを取り付けているとしている。Fig. 4 より、UAV を複数用いた方が、1 台のみを用いる場合と比べて全体的な音源軌跡推定誤差が小さく、10 秒間のシミュレーションで  $0.2[\text{m}]$  以内の誤差で推定していることが分かる。

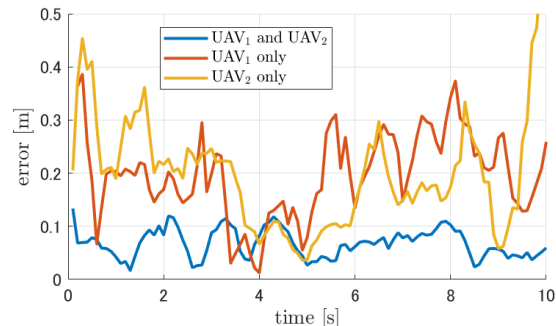


Fig. 4 The Euclidean distance between the sound source's ground truth and estimated path.

#### 5 考察・課題

以前の提案手法 [3] では一台の UAV の周りにマイクロホンアレイを取り付け、音源軌跡推定を行ったが、近傍に複数のマイクロホンアレイが集合している場合は、遠方の音源の位置推定性能が劣化してしまった。これは音源が遠いほど、各マイクロホンアレイが推定する音源方向同士が平行に近づき、少しの方向推定誤差で疑似交点の位置が著しく変わってしまうからである。本稿の提案手法では、この問題の緩和を試み、良好な音源位置推定が実現できるようになることを数値シミュレーション実験により示すことができた。ただし、複数の UAV が音源から見て同様の方向に配置される場合は、問題が再度顕在化してしまうため、各 UAV の飛行計画には工夫が必要である。また、本手法は各 UAV に搭載されたマイクロホンアレイの推定方向が同タイミングで得られる仮定をしており、実機を用いるにあたってずれたタイミングで推定方向が得られる場合に対応する必要がある。本手法を実際に用いる場合のシステム構築と、実機を用いた検証が今後の課題である。

#### 6 まとめ

本稿では、複数 UAV に搭載された複数マイクロホンアレイを用いて、音源軌跡推定を行う手法を提案し、数値シミュレーションにより  $0.2[\text{m}]$  以内の誤差で推定できることを実証した。UAV を複数用いることで、単独 UAV では困難だった遠方の音源軌跡推定性能の向上できることが示された。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 16H02884, 16K00294, 17K00365 および、JST ImPACT タフロボティクスチャレンジの助成をうけた。

#### 参考文献

- [1] K. Nakadai, *et al.*, "Development of Microphone-Array-Embedded UAV for Search and Rescue Task.", *IROS 2017*, pp.5985-5990.
- [2] Y Bando, *et al.*, "Low-Latency and High-Quality Two-Stage Human-Voice-Enhancement System for a Hose-Shaped Rescue Robot.", *JRM*, 29(1), pp.198-212. 2017.
- [3] 山田他, "複数の移動マイクロホンアレイによる移動音源の 3 次元定位", *SICE SI-2018*
- [4] A. Portello, *et al.*, "Active localization of an intermittent sound source from a moving binaural sensor.", *Forum Acusticum*, 2014.
- [5] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation.", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 34(3), pp.276-280. 1986.