

# マイクロホンアレイを有するマルチロータヘリコプタを用いた地上の複数音源の位置推定について

Position Estimation of Multiple Sound Sources on the Ground by Multirotor Helicopter with  
Microphone Array

若林瑞保 公文誠

Mizuho WAKABAYASHI, Makoto KUMON

熊本大学

Kumamoto University

wakabayashi@as.mech.kumamoto-u.ac.jp

## Abstract

マルチロータヘリコプタは、環境認識のために様々なセンサを搭載し、実用的なタスクへの活用が期待されている。音情報はそのようなタスクを実行するうえで有用な情報の一つであり、本論文では、ヘリコプタで測定された信号を解析し音源の位置を推定することを検討する。ロータによって発生するノイズは目的信号を歪ませるので、推定される音源方向は不確かである。さらに、ヘリコプタは空中から幅広い範囲の複数の信号を受信するため、それらの情報を統合することは困難である。本論文では、誤検出が存在する下でデータアソシエーション手法を用いて複数の音源の検出を試みる。本論文では、開発したシステムが実際の飛行実験を通してリアルタイムで約 3m の精度で複数の音源を定位できることを示す。

## 1 はじめに

近年、無人航空機は計測や救難、物流など様々なタスクにおいて実用化への取り組みがなされている。より高度な無人航空機を実現するには、与えられたタスクを自律的に達成することが期待されており、無人航空機に搭載されたセンサを用いて地上の物体や事象を観測し環境を認識する必要がある。カメラ画像やレーザスキャナによる空間形状等の認識に関する研究はすでに多くなされているが、本論文では、要救助者の呼び声のような地上音源の検出について考えるものとする。

このようにロボットによる音環境理解は、Okuno, Nakadai[Nakadai 00]によって提案されたロボット聴覚として研究されている。この一例として、Sasaki[Sasaki 06]は、大型のマイクロホンアレイを用いて複数の音源を三角測量によって定位することを提案している。

Kumon[Kumon 11] は、音源定位のための拡張カルマンフィルタの相関行列に基づいてモバイルカートの制御法を提案している。無人航空機については Basiri[Basiri 12]が小型の固定翼機に 3 つのマイクロホンを搭載し、地上にある音源や周囲を飛行する他の無人航空機をパーティクルフィルタを使って定位することを提案している。無人航空機の場合、対象音源について水平方向（以下方位角）だけではなく垂直方向（以下仰角）を含めて、三次元的に音源位置を推定する必要がある点は注意が必要である。

無人航空機の中でもマルチロータヘリコプタは特に注目を集めており、盛んに研究されている飛行プラットフォームである。一般的なマルチロータヘリコプタは固定ピッチのロータを組み合わせたシンプルな構造ながら、垂直離着陸、ホバリング、低速飛行が可能で、地上音源を観測に好適である。例えば、安定したホバリング飛行を行い、音情報を観測することで音源方向が得られれば、その際の機体位置と適当な仮定の下で音源位置を算出することができる。先行研究として、Okutani[Okutani 12]と Ohata[Ohata 14] は、雑音情報を逐次的に推定し音源方向を推定する MUSIC(Multiple Signal Classification) 法 [Schmidt 86] によって地上音源の位置を推定することを提案している。また Washizaki[Washizaki 16] は飛行中に得られる音源方向情報を統合して音源位置を三次元的に推定する方法、著者ら [若林 16][山田 17] は推定された音源に接近してその位置をより正確に推定する方法などを提案している。

ところで、ロータの発生する騒音（以下、エゴノイズと呼ぶ）は大きなパワーを有する非定常な信号で、目標とする地上からの音信号を認識する上で障害となる。このため、音源方向の推定は不確かであり、誤検出や未検出などを含まれた推定をする可能性がある。また、上空から収録する方法では、音源の探索範囲が広がるため複数の地上音源の信号を観測することになる。従って、マルチロータによる地上音源の位置推定では、音源方向情報の

不確かさと、複数の対象が存在することへの配慮が必要となる点に特徴がある。

このような問題では、ロバストなデータアソシーションを行う必要がある。不確かさのある信号でのデータアソシーション手法には、例えば MHT (Multi Hypothesis Tracking) [Kim 15] や JPDA (Joint Probability Data Association) [Rezatofghi 15] などがある。本研究では、エゴノイズの影響で誤検出が多く発生し、このような環境での MHT では膨大な数の仮説を維持するため、計算量が増加しリアルタイムでの処理が困難となる。さらに、データアソシーションが多く使われている画像やレーザースキャナを用いた物体の追跡に比べ、観測は不確かであり、不規則に得られる。そのため本論文では、計算量が少なく、複数の対象も追跡可能な GNN (Global Nearest Neighbor) 法 [Konstantinova 03][Ozaki 12] を適用することを提案する。

また、手法を実現する上で、マルチロータヘリコプタの限られたペイロードや通信帯域、電力などの制約を考慮する必要がある。本研究では、著者がこれまでに開発してきたマイクロホンアレイ搭載型マルチロータヘリコプタ [Kumon 14][Ishiki 15] を改良し、提案手法を実時間で計算可能なシステムを開発し、実際の飛行実験を通じて、提案手法が実現可能であることを示し、さらに得られた定位性能についても評価を行う。

## 2 マイクロホンアレイ搭載マルチロータヘリコプタ

### 2.1 マイクロホンアレイによる音源方向推定

マイクロホンアレイで収録したマルチチャンネルの音信号に対して、音源から各マイクまでの音の伝達特性に基づいて音到来方向を推定する方法の一つに MUSIC 法 [Schmidt 86] がある。MUSIC 法は信号空間と雑音空間の直交性を利用した部分空間法に基づいた推定法で、一定の構造の雑音に対してロバストな手法として知られており、本研究でも MUSIC 法によって音源方向の推定を行う。ここで、マルチロータヘリコプタでの収録信号においては、エゴノイズが非正常で大きな信号であること、目的音がロータに比べて遠方で低 SNR 条件であることから、十分な推定精度を得られない場合があることに注意が必要である。

空中から地上音源を探查する場合、地上で音源探查する場合とは異なった特性があることも留意しなければならない。空中にあるマイクロホンアレイと地上音源の間には通常遮蔽はなく、また屋外では残響も無視できるため、比較的シンプルな音伝達特性を想定できる。同時に、地上の広い範囲からの音信号の到来が考えられるので、目的音以外の音源からの音信号も到来する複数音源の場合を考える必要がある。上述の通り、エゴノイズの存在による低

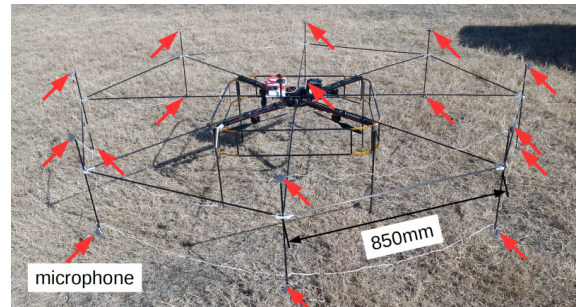


図 1: Quadrotor helicopter with microphone array

SNR 条件であることも加味すれば、音源方向が推定されたとしても、その情報は目的音か目的以外の音源なのか、あるいは誤検出であるかの全ての可能性を考えなければならぬ。

### 2.2 対象とするヘリコプタシステム

本論文は地上の複数音源の位置推定法を扱うものであるが、エゴノイズによる不確かさの程度によってその難しさが影響されるため、まず想定しているヘリコプタシステムについて説明する。

本研究では、エゴノイズを抑制する上でマイクロホンアレイの適切な構造や配置について著者らの先行研究 (Kumon[Kumon 14] と Ishiki[Ishiki 15]) を元に、音源の方位角と仰角を測定出来るようマイクロホンが立体的な配置にできるよう拡張したものを採用する。関連研究では、Nakadai[Nakadai 17] と Hoshiba[Hishiba 17] は球形に密集させたマイクロホンアレイを用いているが、こちらも音源の方位角と仰角を測定出来るので、前者のマイクロホンアレイと同様に扱うことができる。マイクロホンからの音響情報は、オンボードの音響処理ユニットである RASP-ZX (System Infrontier 社) [音響処理装置 (RASP-ZX) n.d.] で収録され、地上局に 2.4GHz の無線 LAN で送信される。詳細は筆者らの先行研究 [Washizaki 16] を参照されたい。

マイクロホンアレイを搭載したヘリコプタ (enRoute 社 PG-560 [ZION-PG560-SPECS 16]) を図.1 に示す。ヘリコプタはフライトコントローラ (Pixhawk[Pixhawk 17]) によって GPS による自動飛行が可能で、機体の位置・姿勢情報をリアルタイムに取得することができる。本研究では MAVROS[ROS.org - mavros 17] の ROS ノードを機体情報のインターフェースとして基地局で扱い、音響データとともに後述する音源位置アルゴリズムによってリアルタイムに位置推定するよう ROS ノードと接続される。また、処理の結果は地上局で図.3 のように表示される。

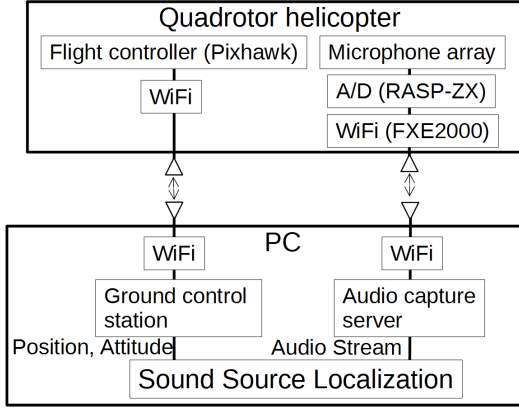


図 2: Structure of UAV based acoustic data capturing system

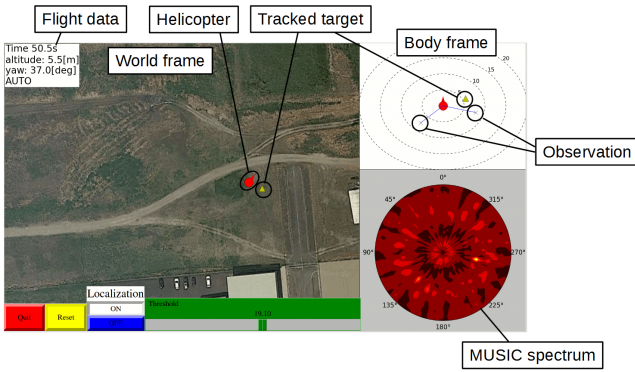


図 3: Screenshot of the developed sound localization system displayed at ground station

### 3 複数音源位置推定

#### 3.1 カルマンフィルタによる音源位置推定

音源定位には、測定値の不確かさを考慮するためにカルマンフィルタ [Welch 01] に基づく位置推定を用いる。図.5 に示すように、機体の高度、ヨー角、音源の方位角、仰角をそれぞれ  $h, \psi, \theta, \phi$  とする。ここで、 $h, \psi, \phi$  に不確かさがあると仮定し、 $h = \hat{h} + \delta h$  のように観測値  $\hat{h}$  と不確かさ  $\delta h$  に分けて考える。さらに地表面が不整地である場合などによる不確かさ  $\delta g$  を考える。不確かさの信号が十分に小さいと仮定すると、時刻  $k$  に  $m$  個の観測が得られその  $j$  番目 ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) の観測から機体座標における音源位置  $y_{k,j}$  は以下のように算出される。

$$y_{k,j} = (\hat{h}_k + \delta h) \tan(\hat{\phi}_k + \delta\phi) \mathbf{b}_k + \delta g_k, \quad (1)$$

ここで  $\mathbf{b}_k = \begin{bmatrix} \sin(\psi_k - (\hat{\theta}_k + \delta\theta)) & \cos(\psi_k - (\hat{\theta}_k + \delta\theta)) \end{bmatrix}^T$ 。  $\delta h, \delta\phi, \delta\theta, \delta g$  がそれぞれ  $\mathcal{N}(0, \sigma_h), \mathcal{N}(0, \sigma_\phi), \mathcal{N}(0, \sigma_\theta), \mathcal{N}(0, \Sigma_g)$  の正規分布に従うとすると、(1) 式は  $y_{k,j} = H \hat{x}_{k,j} + a_k$  と書ける。ただし、 $\hat{x}_{k,j} = \mathbf{b}_k \hat{h}_k \tan \hat{\phi}_k$  は観測によって算出される音源位置で、 $a_k$  は  $\sim \mathcal{N}(0, P)$

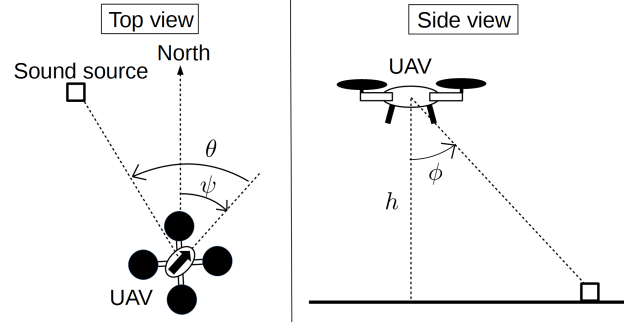


図 4: Geometric relationship between sound source position and its estimated direction

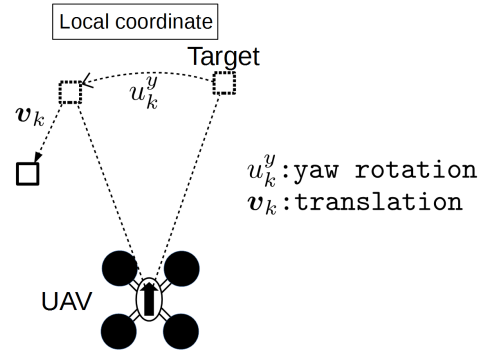


図 5: Update of the estimated target with UAV flight

の正規分布に従い、 $H$  は観測行列であり、ここでは単位行列である。共分散行列  $P$  は図.5 の幾何学的関係より算出される。

機体座標で表現される音源位置は機体の位置・姿勢の変化によって変化する。ここで、絶対座標における機体の平行移動とヨー角の変化量をそれぞれ  $u_k^x, u_k^y$  とする。時刻  $k-1$  から  $k$  において機体座標での音源位置は  $x_{k-1}$  から  $x_k$  に変化し、その移動ベクトルを  $v_k$  とする。 $v_k$  には不確かさがあるとすると、時刻  $k$  における  $i$  番目 ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) の音源  $x_{k,i}$  は以下のようにかける。

$$x_{k,i} = \mathbf{R}(\hat{u}_k^y) x_{k-1,i} + \hat{v}_k + \delta v, \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{R}(\hat{u}_k^y)$  はヨー周りの回転角  $\hat{u}_k^y$  だけ回転させる回転行列を表す。 $\delta v$  が  $\mathcal{N}(0, Q)$  の正規分布に従うと仮定すると、(2) 式は  $x_{k,i} = \mathbf{R}(\hat{u}_k^y) x_{k-1,i} + \hat{v}_k + c_k$  と書ける。ただし、 $c_k \sim \mathcal{N}(0, Q)$ 。上記のカルマンフィルタで用いる分散は全て経験的に設定される。

上記のモデルを用いて、音源  $i$  と観測  $j$  のカルマンフィルタの予測ステップと更新ステップは以下のように書ける。

#### 1. 予測ステップ

$$\bar{x}_{k,i} = \mathbf{R}(\hat{u}_k^y) x_{k-1,i} + \hat{v}_k \quad (3)$$

$$\bar{\Sigma}_{k,i} = Q + \mathbf{R}(\hat{u}_k^y) \Sigma_{k-1,i} \mathbf{R}(\hat{u}_k^y)^T \quad (4)$$

## 2. 更新ステップ

$$\tilde{\mathbf{y}}_{k,ij} = \mathbf{y}_{k,j} - \mathbf{H}\mathbf{x}_{k,i} \quad (5)$$

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H}\bar{\Sigma}_{k,i}\mathbf{H}^T + \mathbf{P} \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_k = \bar{\Sigma}_{k,i}\mathbf{H}^T\mathbf{S}_k^{-1} \quad (7)$$

$$\mathbf{x}_{k,i} = \bar{\mathbf{x}}_{k,i} + \mathbf{K}_k\tilde{\mathbf{y}}_{k,ij} \quad (8)$$

$$\Sigma_{k,i} = \bar{\Sigma}_{k,i} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}\bar{\Sigma}_{k,i} \quad (9)$$

### 3.2 データアソシエーション

複数の音源が存在する環境下で音源定位を実現するには、追跡音源と観測を対応付けるデータアソシエーションが必要となる。本論文では、GNN (Global Nearest Neighbor) 法 [Konstantinova 03][Ozaki 12] を用いている。

まず、追跡音源と観測の誤対応を減らすために、それぞれの追跡音源に以下で説明するような有効領域を導入する。観測  $j$  が追跡音源  $i$  の有効領域の中に存在する場合、追跡音源  $i$  はこの観測  $j$  を用いて更新される。追跡音源  $i$  と観測  $j$  の間のマハラノビス距離は (7) 式の観測残差と、(8) 式の共分散行列を用いて

$$d_{k,ij}^2 = \tilde{\mathbf{y}}_{k,ij}^T \mathbf{S}_k^{-1} \tilde{\mathbf{y}}_{k,ij} \quad (10)$$

と計算でき、これを元に有効領域として閾値  $G$  を定義する。

$$d_{k,ij}^2 = \tilde{\mathbf{y}}_{k,ij}^T \mathbf{S}_k^{-1} \tilde{\mathbf{y}}_{k,ij} < G. \quad (11)$$

(11) 式が満足する場合、追跡音源  $i$  に観測  $j$  が割り当てられる。閾値  $G$  はマハラノビス距離が  $\chi$  二乗分布に従うことから、2 自由度の  $\chi$  二乗分布表から決定される。本論文では、追跡音源の 95 % 信頼楕円を有効領域とするために  $G = 5.991$  と設定した。

一つの追跡音源の有効領域に一つの観測が存在する場合は直ちに割り当てることができる。しかし、一つの追跡音源の有効領域に複数の観測が存在する場合や、一つの観測が複数の追跡音源の有効領域の内部にある場合、直ちに割り当てるとは困難である。時刻  $k-1$  に  $n$  個の音源を追跡しているときに得られる観測は、現在追跡中の音源からの観測か、新たな音源からの観測のどちらかである。ここで、時刻  $k$  に  $n$  個の音源を追跡しており、 $m$  個の観測が得られたと仮定する。(11) 式を満足しているかどうか、追跡音源と観測のすべての組み合わせで検証し、以下のコスト行列によって与えられる割り当て問題を解く。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$c_{ij} = \begin{cases} E & d_{ij}^2 > G \\ d_{ij}^2 & d_{ij}^2 < G \end{cases} \quad (13)$$

このコスト行列で、追跡音源と観測の組み合わせでマハラノビス距離の和を最小にする解を求める。本論文では、Munkres 法 [Munkres 57] を用いてこの問題を解いている。ただし、式 (13) の定数値  $E$  はこの問題を距離の和が最小となる組み合わせを求める問題とするために、十分に大きな値を設定する。

### 3.3 追跡音源の管理方法

安定した音源の追跡のために、追跡音源の管理方法を導入する。

#### (a) 新規追跡音源の生成

追跡している音源が存在しない場合や、観測が現在追跡中の音源に割り当てられなかった場合、新たな追跡音源が生成され、カルマンフィルタによる追跡が開始される。このプロセスは、安定した観測が得られる場合に実行する必要があり、通常は多くの追跡音源が生成されてしまうので、観測が一定回数 ( $N_1$  とする) 以上連続して得られた場合のみ追跡を継続する。さらに追跡音源に観測が十分な回数 (ここでは  $N_1$  よりも多い  $N_2$  を設定する) 得られた場合、その追跡音源は正しい音源とラベル付けされる。

#### (b) 追跡中の音源

音源は観測が得られている間は追跡し続けるが、機体が音源から離れた時や、音が鳴らなくなった場合など長時間観測が得られない場合、機体の移動による不確かさが積み重なり、当該の音源の有効領域が拡大し続けてしまう問題がある。これを避けるために、観測が正当とラベル付けされた音源がさらに十分な回数 ( $N_3$  回) 観測されたにも関わらず、 $T_1$  (sec) の間に観測が得られなかった場合、カルマンフィルタによる追跡を停止し、その際の追跡音源の情報を保存して、更新を停止する。この場合、有効領域は半径が一定値  $r$  (m) の円と仮定する。再び観測が得られた場合は、保存状態からカルマンフィルタによる追跡を再開する。

#### (c) 追跡の終了

観測が得られた回数が、 $N_1$  以上  $N_3$  以下で  $T_2$  (sec) の間に観測が得られない場合、追跡を終了する。

## 4 検証

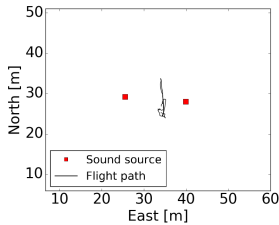
提案システムを検証するために、飛行実験を行った。

### 4.1 実験設定

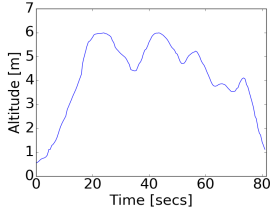
マイクロホンアレイを搭載したクアッドロータヘリコプタをマニュアル操縦とオートパイロットにより飛行させる。この実験では、オンボードの制御装置による姿勢安定化によってアシストされるマニュアル操縦によるホバリングと、オートパイロットによるウェイポイントの追従を行った。それぞれのフライトは、機首方向を北に向け、高度を地上から約 5m に維持した。



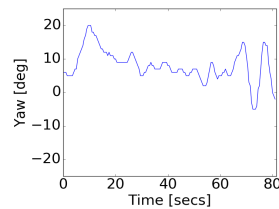
図 6: Photo of the experiment



(a) Flight path and position of the target



(b) Altitude



(c) Yaw

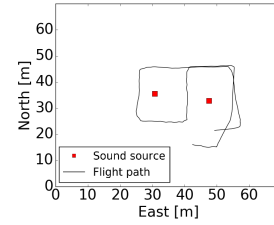
図 7: UAV state (1st flight)

音源には、人の叫び声を発するスピーカと、笛の音を使用した。スピーカは地上に設置したが、笛は人が立って吹いているので、音源は地上から約 1.6m の高さに位置している。マニュアル操縦によるホバリング飛行時は、スピーカを西側に、笛を東側に、それぞれ機体のホバリング位置から約 10m 離れた位置に設置した。オートパイロットによる飛行時は、スピーカを西側に、笛を東側に、音源間の距離が約 20m となるように設置し、飛行経路は機体がそれらの音源の周囲を飛行するように設定した。図.6 に実験の状況を示している。

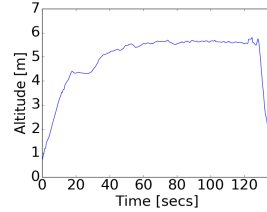
## 4.2 結果

### 4.2.1 フライト結果

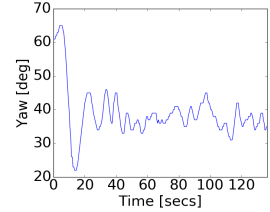
飛行経路を図.7(a) と図.8(a) に示す。図中の赤い四角が音源の位置を示している。次に、飛行高度を図.7(b) と図.8(b) に示す。ホバリングでは約 80 秒間、オートパイロットでは約 130 秒間飛行している。ホバリング飛行はマニュアル操縦であったため高度にばらつきがある。オートパイロットでは、機首方向が北向き (0 度) になるように設定したが、実際は北向きから 40 度ずれた結果になっている。この偏差は、(2) 式の観測モデルで機体のヨー方向を考慮しているためこの実験では問題とならない。



(a) Flight path and position of the target



(b) Altitude



(c) Yaw

図 8: UAV state (2nd flight)

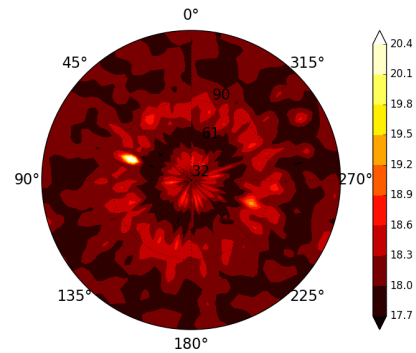
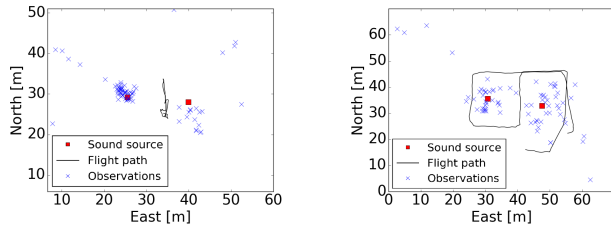


図 9: Example of MUSIC spectrum when a source was found (yellow peak)

### 4.2.2 複数音源の定位

音源定位は、MUSIC 法を 0.5 秒周期でリアルタイムに計算して音源方向を推定し、この情報と機体の位置・姿勢を統合して実施する。また、離陸中や着陸中はロータの雑音が大きくなり、誤検出が多く発生してしまうので、GNN 法による定位は高度 3.5m 以上の時のみ実行されるよう設定した。3.3 章で説明されているパラメータは、 $N_1 = 2$ ,  $N_2 = 4$ ,  $N_3 = 6$ ,  $T_1 = 10\text{sec}$ ,  $T_2 = 10\text{sec}$ ,  $r = 1.5\text{m}$  とした。

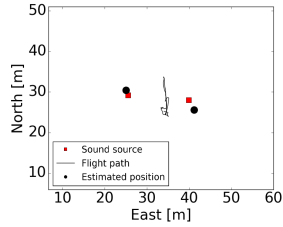
図.9 に機体を真上から見て円周方向を方位角、半径方向を仰角とした MUSIC スペクトルを示す。この図では、80 度方向と 260 度方向に MUSIC スペクトルのピークが立っているのがわかる。本論文の目的は、複数の音源を定位することであるため、MUSIC スペクトルの複数のピークを観測として用いる。観測として用いられるピーク数は、MUSIC の処理で仮定する音源数と等しく設定しており、本実験では 3 としている。さらに誤検出を減らすために閾値を設定し、パワーの小さいピークは観測として用いない。この閾値は、経験的に値を設定しており、この



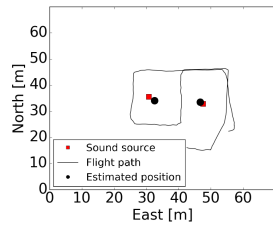
(a) First flight

(b) Second flight

図 10: Observations projected on the ground



(a) First flight



(b) Second flight

図 11: Final estimated sound source position

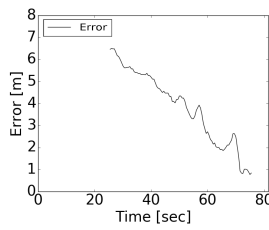
実験では 19.1 とした。

図.10 にそれぞれの飛行での観測を示す．図.10(a) ではスピーカ付近で密集した観測が得られているが，笛付近の観測はばらつきがあり実際の位置とはわずかにずれた位置に得られている．さらに，この図では左下と右下に誤検出があることがわかる．図.10(b) では，機体が移動しながらの観測であったため観測にばらつきがあり，左上と右下に誤検出も見られるが，実際の音源位置の周囲に多く観測が得られていることがわかる．

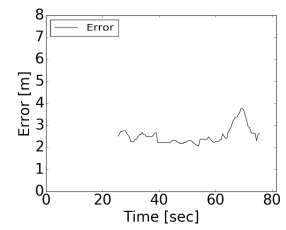
図.11 には各飛行終了時のカルマンフィルタによる推定音源位置を黒い丸で示しており，両方の飛行で正解音源位置に近い結果が得られているのがわかる．

図.12 と図.13 には追跡音源の推定位置の誤差を示している．図.12(a) では最初の観測では誤差が大きかったが，音源に近づくにつれて誤差が減少していく結果となった．図.13 の上部に現れている誤差は誤検出によるものであり，3 章で提案された追跡音源の管理方法 (c) により誤検出と判断し途中で削除されている．図.13 で誤差が一定の区間があるのは追跡音源の管理方法 (b) によるもので，カルマンフィルタによる予測を停止し，絶対座標で保存された位置を用いてデータアソシエーションによるマッチングを行っているためである．図.14 には飛行中に得られた誤検出を示している．これらの誤検出は提案システムにより誤りだと判断され削除されている．

表 1 に各飛行後の推定音源位置の誤差を示す．結果として誤差は 3m 以内に収まった．提案した音源定位法と音響データ伝送システムにより，複数音源の定位が実用的であると結論付けることができる．

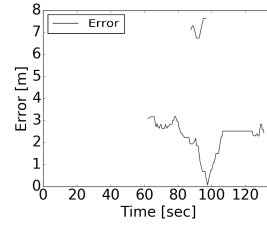


(a) Speaker

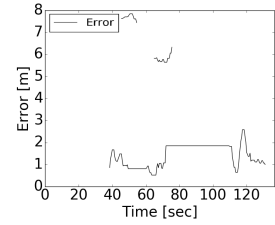


(b) Whistle

図 12: Position estimation error (1st flight)



(a) Speaker



(b) Whistle

図 13: Position estimation error (2nd flight)

表 1: Estimation error of the targets

Flight	Sound source	Error[m]
First	Speaker	0.84
First	Whistle	2.65
Second	Speaker	2.44
Second	Whistle	1.00

## 5 おわりに

本論文では，マイクロホンアレイを搭載したクアッドロータヘリコプタで得られた音響情報を用いて地上の複数の音源の位置推定を行った．各追跡音源の有効領域は追跡音源と観測の誤対応を防ぐことに有効である．

ホバリング飛行と自律飛行による実験を通して性能評価を行った．機体が音源から遠く離れていた場合，誤差は大きかったが，目標に近づくと誤差は 3m 以内にまで減少した．本論文での機体の飛行経路は，音源の周囲を飛行するように指定されていたが，実際に音源を探査する環境では音源の位置は不明であり，そのような飛行経路を指定することは不可能である．今後の課題として，音源が機体から離れた場所にある場合，音源に近づくことで正確な音源位置を得るために，推定された音源位置から音源に近づくような経路を機体に送信するシステムを開発することが挙げられる．

## 謝辞

本研究の一部は，総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (IMPACT) タフ・ロボティクス・チャレンジならびに科学研究費補助金 17K00365 の助成を受けたものです．

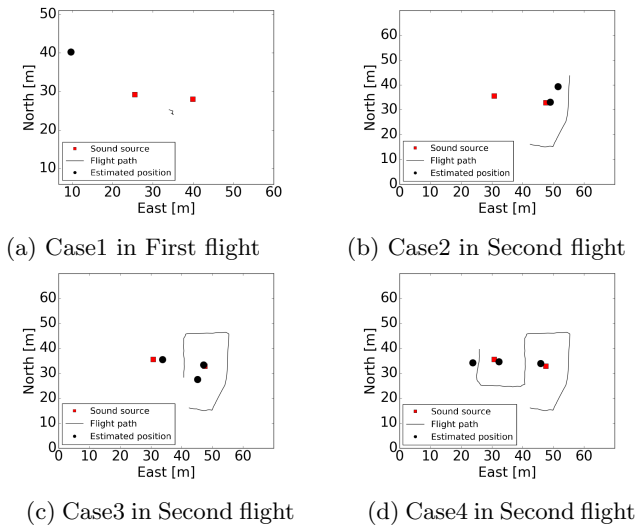


図 14: False positives detected during the experiments

## 参考文献

- [Nakadai 00] K. Nakadai, T. Lourens, H. G. Okuno, and H. Kitano, "Active audition for humanoid." in AAI/IAAI, H. A. Kautz and B. W. Porter, Eds. AAI Press / The MIT Press, 2000, pp. 832-839.
- [Sasaki 06] Y. Sasaki, S. Kagami, and H. Mizoguchi, "Multiple sound source mapping for a mobile robot by self-motion triangulation" in Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006, pp. 380-385.
- [Kumon 11] M. Kumon and S. Uozumi, "Binaural localization for a mobile sound source" *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, vol. 6, no. 1, 2011, pp. 26-39.
- [Basiri 12] M. Basiri, F. S. Schill, P. Lima U., and D. Floreano, "Robust acoustic source localization of emergency signals from micro air vehicles, " in Proceedings of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012, pp. 4737-4742.
- [Okutani 12] K. Okutani, T. Yoshida, K. Nakamura, and K. Nakadai, "Outdoor auditory scene analysis using a moving microphone array embedded in a quadcopter." in Proceedings of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012, pp. 3288-3293.
- [Ohata 14] T. Ohata, et al. "Improvement in outdoor sound source detection using a quadrotorembded microphone array" in Proceedings of 2014

IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014, pp. 1902-1907.

- [Washizaki 16] K. Washizaki, M. Wakabayashi and M. Kumon, "Position Estimation of Sound Source on Ground by Multirotor Helicopter with Microphone Array," Proceedings of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2016, pp. 1980-1985.
- [若林 16] 若林瑞保, 鷺崎海, 公文誠, "クアドロータヘリコプタを用いた音源探査", 第 34 回日本ロボット学会学術講演会論文集, 2016, RSJ20161C3-04.
- [山田 17] 山田健志郎, 公文誠, "Grid based Recursive Bayes Filter に基づくマルチロータヘリコプタによる音源探査における地図管理," 第 35 回日本ロボット学会学術講演会論文集, 2017, RSJ2017AC3AC2-06.
- [Rezatofghi 15] S. H. Rezatofghi, et al. "Joint Probabilistic Data Association Revisited" in ICCV. IEEE, 2015, pp. 3047-3055.
- [Kim 15] C. Kim, et al. "Multiple Hypothesis Tracking Revisited" in ICCV. IEEE, 2015, pp. 4696-4704.
- [Kumon 14] M. Kumon and T. Ishiki, "A microphone array configuration for an auditory quadrotor helicopter system," in Proceesings of the 12 th IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, 2014, p. 34.
- [Ishiki 15] T. Ishiki and M. Kumon, "Design model of microphone arrays for multirotor helicopters." in IROS. IEEE, 2015, pp. 6143-6148.
- [Nakadai 17] K. Nakadai, et al. "Development of Microphone-Array-Embedded UAV for Search and Rescue Task" in Proceedings of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017, pp. 5985-5990
- [Hishiba 17] K. Hoshiba, et al. "Design of UAV-embedded Microphone Array System for Sound Source Localization in Outdoor Environments" in *Sensors*, 17(11), 2017, doi:10.3390/s17112535.
- [ZION-PG560-SPECS 16] enRoute Inc., "ZION-PG560-SPECS." Available: <https://enroute1.com/portfolio-posts/zion-pg-700/zion-pg560-specs/>
- [Pixhawk 17] 3D Robotics Inc., "Pixhawk." Available: <https://store.3dr.com/t/pixhawk>

- [ROS.org - mavros 17] “ROS.org - mavros” Available:<http://wiki.ros.org/mavros>
- [音響処理装置 ( RASP-ZX ) n.d.] System Infrontier Inc., “音響処理装置 ( RASP-ZX ).” Available:[http://www.sifi.co.jp/system/modules/pico/index.php?content\\_id=36](http://www.sifi.co.jp/system/modules/pico/index.php?content_id=36)
- [Washizaki 16] K. Washizaki, M. Wakabayashi and M. Kumon, “Position estimation of sound source on ground by multicopter with microphone array.” in Proceedings of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2016, pp. 1980-1985.
- [Schmidt 86] R.Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.34, no.3, 1986, pp276-280.
- [Welch 01] G. Welch, G. Bishop, “An Introduction to the Kalman Filter” in SIGGRAPH Course Notes, ACM, 2001, Course 8.
- [Konstantinova 03] P. Konstantinova, A. Udvarov, T. Semerdjiev, “A Study of a Target Tracking Algorithm Using Global Nearest Neighbor Approach” in CompSysTech, 2003, pp. 290-295.
- [Ozaki 12] M. Ozaki, K. Kakinuma, M. Hashimoto. and K. Takahashi, “Laser-based pedestrian tracking in outdoor environments by multiple mobile robots” in Sensors, Vol. 12 2012, pp. 14489-14507.
- [Munkres 57] J. Munkres, “Algorithms for the Assignment and Transportation Problems” in Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol. 5, No. 1 1957, pp. 32-38.