

# ドローン聴覚におけるヒストグラム情報と 周波数情報を用いた音源定位性能向上の検討

## Improvement of sound source localization performance in drone audition using histogram and frequency information

小松崎和泉<sup>1\*</sup> 干場功太郎<sup>1</sup> 岩附信行<sup>1</sup>  
Izumi Komatsuzaki<sup>1</sup> Kotaro Hoshiba<sup>1</sup> Nobuyuki Iwatsuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup> Tokyo Institute of Technology

**Abstract:** ドローンを用いた被災者捜索のための音源探査技術において、これまで、著しい時刻変化を伴うドローン自身のエゴノイズに対する頑健性、広い搜索範囲、低い計算コスト、汎用性をすべて満たす音源定位手法の開発を目的に、ヒストグラム情報を用いて空間スペクトルにおけるエゴノイズの除去を動的に行う音源定位手法の提案を行った。本論文では、これまでの提案手法における、エゴノイズと目標音の方向が近い場合に定位性能が低下するといった問題点を解決するために、周波数方向の情報も利用して空間スペクトルを三次元的に解析することにより、エゴノイズと近い方向に存在する目標音に対しても定位が可能となるよう提案手法の改良を行った。実環境での屋外実験とシミュレーションにより、提案手法の性能を評価した結果、本論文で紹介する改良した提案手法を用いることでノイズ付近の目標音も定位可能となり、高いノイズ耐性と広い搜索可能範囲の両者を同時に満足することができ、本手法の有用性が確認された。

## 1 はじめに

近年、災害地において、人が侵入できない場所にも容易に侵入できること、迅速な活動ができることから、ドローンを用いた要救助者の搜索手法が注目されている。ドローンを用いた搜索では、カメラによる方法が一般的であるが[1]、暗い時間帯の搜索活動、および瓦礫等に埋もれた被災者といったカメラに映らない対象の搜索は困難である。そこで、音情報による搜索手法の確立を目的に、ドローン搭載マイクロホンアレイを用いた音源探査技術の研究が行われている[2]。ドローンを用いた音源探査の実用化にあたり、課題の一つがドローンのエゴノイズである。風や飛行状態の影響により時刻変化を伴うエゴノイズに対する頑健性、広い搜索範囲、ドローン搭載の小型コンピュータを用いてリアルタイムで処理を行うための低い計算コスト、どのような機体・状況でも搜索可能な汎用性を持った音源探査手法が求められる。

これまで、音源探査手法として、MUSIC (Multiple Signal Classification) 法[3]に基づく音源定位手法が提案されてきている。音源定位において多く用いられる、一般的なMUSIC法であるSEVD-MUSIC (MUSIC based on Standard Eigen Value Decomposition) 法は、計算コストが低い反面、ノイズ耐性が低い。そこで、事前収録したノイズの相関行列を用いてノイズ成分を除去するGEVD-MUSIC (MUSIC based on

Generalized Eigen Value Decomposition)[4] やGSVD-MUSIC (MUSIC based on Generalized Singular Value Decomposition)[5]が提案された。これらは、SNR (Signal-to-Noise Ratio) の低い状況でも高い音源定位性能を持つが、計算コストが高く、事前に収録した過去のノイズ情報を用いているため汎用性がない。さらに、時刻変化するノイズへの耐性の強化および汎用性を補うことを目的に、直前の時刻の収録音をノイズと仮定して処理を行うiGEVD-MUSIC (incremental GEVD-MUSIC)[6] やiGSVD-MUSIC (incremental GSVD-MUSIC)[7]が提案されている。しかし、これらは、計算コストが高いことに加え、著しく時刻変化するノイズに対する耐性は不十分である。また、Hoshibaらは、一定の方向からエゴノイズが到来するようなマイクロホンアレイを設計し、SEVD-MUSICにて得られた空間スペクトルに対し、目標音の搜索範囲からエゴノイズの到来範囲を事前に除外することでノイズ耐性を向上させる手法を提案した[8]。しかし、除外範囲をあらかじめ設定する必要があり、狭い範囲を除外すると時刻変化を伴うノイズに対する十分な耐性が見込めず、広い範囲を除外すると搜索範囲が狭まる。

これらの問題を解決するため、これまでに、過去の情報を用いず、得られた現在の空間スペクトルから、ヒストグラム情報に基づきノイズの判定を行い、動的に搜索範囲の制限を行う手法を提案した[9]。しかし、ノイズと目標音の方向が近い場合に、目標音がノイズと誤判定されてしまうことから、搜索可能な目標音方向が限られるといった問題点があった。

\*連絡先：東京工業大学 工学院 機械系  
〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 11-26  
E-mail: komatsuzaki.i.aa@m.titech.ac.jp

本稿では、著しい時刻変化を伴うノイズに対する頑健性、広い搜索範囲、低い計算コスト、汎用性をすべて満たす音源定位手法の開発を目的に、提案手法 [9] の改良を行い、より高い定位性能を持つ空間スペクトルにおけるノイズ判定手法を提案する。本手法では、得られた現在の空間スペクトルから、ヒストグラム情報と周波数情報に基づき動的にノイズ判定を行い、目標音成分の抽出を行う。通常、方位角、仰角の二次元で行われる空間スペクトルにおける解析を、周波数情報を含めた三次元で行うことで、ノイズ付近の目標音がノイズと誤判定される問題点が解決され、より多くの目標音方向に対して、搜索が可能になると期待される。本稿では基礎検討として、提案手法のノイズ耐性および搜索範囲について、屋外実験及びシミュレーションにより評価した。

## 2 これまでの提案手法

過去のノイズ情報やモデルを使わず、現在の空間スペクトル情報のみからノイズの判定を行い、動的に搜索範囲の制限を行う手法を提案した [9]。ここでは空間スペクトルとして、計算コストが低い SEVD-MUSIC により得られる MUSIC スペクトルを扱う。また、一定の方向からエゴノイズが到来するようなマイクロホンアレイを使用することを想定する。以下にこれまでの提案手法のアルゴリズムを示す。

ある時刻にて得られた空間スペクトル  $P(\psi)$  より、ヒストグラム  $H$  を算出する。

$$H(p) = \text{histogram}(P(\psi)) \quad (1)$$

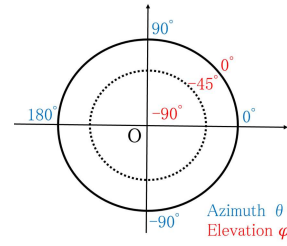
ここで、 $\psi$  はマイクロホンアレイに対する方位角  $\theta$ 、仰角  $\phi$  から、 $\psi = (\theta, \phi)$  と定義する。また、 $p$  は空間スペクトルのパワーに対する階級である。

一般的に空間スペクトルから音源定位を行う場合、ピーク検出を行うが、目標音成分の最大パワーより大きいエゴノイズ成分がある場合、正確な目標音源の定位ができない。そこで、目標音成分の最大パワーより小さい基準値を定義し、基準値より大きいエゴノイズ成分を除去することで、ピーク検出により正しい定位が可能になる。また、目標音成分の最大パワー近傍の基準値を取ることで、目標音の定位に影響のあるエゴノイズ範囲のみが除外でき、搜索範囲が最大になると考えられる。本稿では、空間スペクトル全要素のヒストグラムのピーク以降の変曲点が、目標音成分の最大パワーより小さいかつ近傍という傾向があったため、試験的に基準値をそのように定める。 $H$  の二階微分を求め、変曲点における空間スペクトルのパワー  $p_t$  を得る。

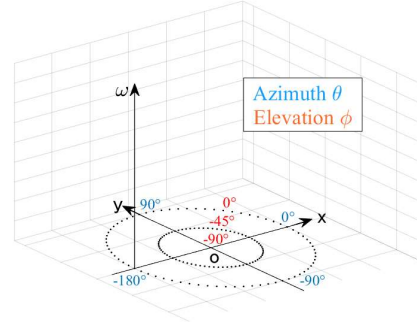
$$H''(p) = \frac{d^2 H}{dp^2} \quad (2)$$

$$p_t = p |_{H''(p)=0} \quad (3)$$

エゴノイズは一定方向より到来することから、基準方向  $\psi_0 = (\theta_0, \phi_0)$  を設定し、 $\psi_0$  を含む、 $p_t$  以上のパワー



(a) 二次元 MUSIC スペクトルの座標設定。



(b) 三次元 MUSIC スペクトルの座標設定。

図 1: 座標設定。

を持つ連続した方向  $\Psi$  をノイズとみなす。

$$\Psi = \{\psi | P(\psi) > p_t\} \ni \psi_0 \quad (4)$$

得られた  $\Psi$  を除外した範囲を搜索範囲とし、搜索範囲にて  $P(\psi)$  が最大値をとる方向を目標音の方向  $\psi_{target}$  として検出する。

$$\psi_{target} = \operatorname{argmax}_{\psi \notin \Psi} (P(\psi)) \quad (5)$$

## 3 提案手法の改良

前章の手法を用いた場合、エゴノイズと目標音の方向が近い場合、目標音の成分がエゴノイズが存在する範囲と重なることが原因で、目標音のエゴノイズと誤判定されるといった問題点があった。その問題点を解決するため、周波数情報を取り入れ、提案手法の改良を行う。これまで二次元で解析していた空間スペクトルを、周波数情報を含めた三次元で解析することで、エゴノイズと目標音の方向が近い場合であっても、それらの周波数特性の違いから分離が可能になると期待できる。以下に提案手法のアルゴリズムを示す。

SEVD-MUSIC 法では、周波数毎に算出した空間スペクトル  $P_\omega(\psi)$  を周波数方向に加算した、空間スペクトル  $P(\psi)$  を解析に用いる。

$$P(\psi) = \sum_{\omega} P_\omega(\psi) \quad (6)$$

ここで、 $\omega$  とは周波数ビンを表す。一方、本手法では、加算する前の空間スペクトル  $P_\omega(\psi)$  に着目する。ある

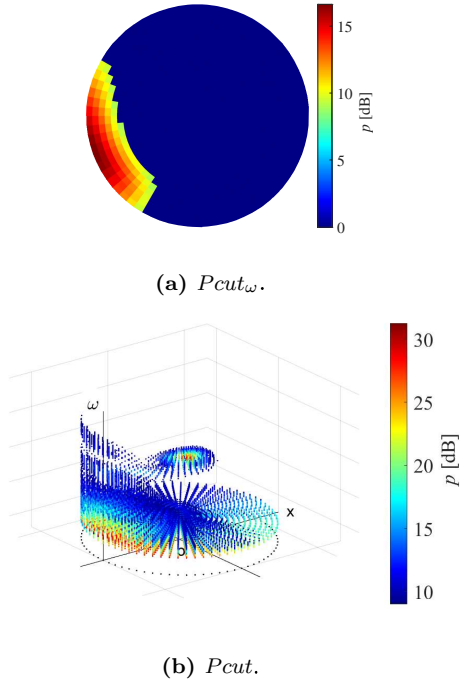
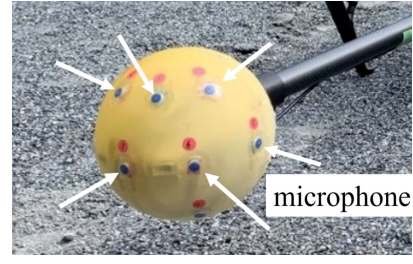


図 2: 改良した提案手法における目標音成分抽出の過程.

1つの周波数ビンの空間スペクトル  $P_\omega(\psi)$  に対して,  $p_t$  以上のパワーを持つ範囲  $P_{cut_\omega}(\psi)$  を抽出する.

$$P_{cut_\omega}(\psi) = P_\omega(\psi) > p_t \quad (7)$$

得られた  $P_{cut_\omega}(\psi)$  の一例をプロットしたものを図 2a に示す. ここでは, 図 1a の設定軸に従ってプロットされており, 各方向から到来した音のパワーをカラーマップで示している. 紺色の範囲を除く範囲が  $p_t$  以上の範囲である. 全周波数ビンにて算出した  $P_{cut_\omega}(\psi)$  の集合を



(a) 16ch 球形マイクロホンアレイ.



(b) マイクロホンアレイ搭載ドローン.

図 3: 実験にて使用したマイクロホンアレイおよびドローン.

表 1: 比較条件

条件 1. SEVD-MUSIC
条件 2. 従来手法 (搜索範囲: $-90^\circ \sim 90^\circ$ )
条件 3. 従来手法 (搜索範囲: $-135^\circ \sim 135^\circ$ )
条件 4. 提案手法
条件 5. 提案手法 (改)

$P_{cut}(\omega, \psi)$  とおく. この  $P_{cut}(\omega, \psi)$  の一例をプロットしたものを図 2b に示す. 図 2b は図 1b の設定軸に従ってプロットされている. エゴノイズと目標音は, その周波数特性の違いから, このような三次元データとして見ると, エゴノイズと三次元的に連続していない目標音成分があると思われる. そこで,  $P_{cut}(\omega, \psi)$  に対して,  $\psi_0$  を含み, 三次元的に連続している部分をエゴノイズ成分  $P_{noise}(\omega, \psi)$ , その他を目標音成分  $P_{target}(\omega, \psi)$  と分離する. それぞれの成分を図示したものが図 2c であり, 赤色が  $P_{noise}(\omega, \psi)$ , 青色が  $P_{target}(\omega, \psi)$  を表す. そして,  $P_{target}(\omega, \psi)$  を周波数方向に足し合わせ, 二次元の空間スペクトル  $P'(\psi)$  を得る.

$$P'(\psi) = \sum_{\omega} P_{target}(\omega, \psi) \quad (8)$$

得られた  $P'(\psi)$  の一例をプロットしたものを図 2d に示す. 図 2d は図 1a の設定軸に従ってプロットされている.  $P'(\psi)$  に対して, 最大値をとる方向を目標音方向  $\psi_{target}$  として検出する.

$$\psi_{target} = \operatorname{argmax}_{\psi} P'(\psi) \quad (9)$$

## 4 評価実験

提案手法の性能を検証するため, 評価実験を行った. 屋外実環境にて収録したエゴノイズと, シミュレーショ

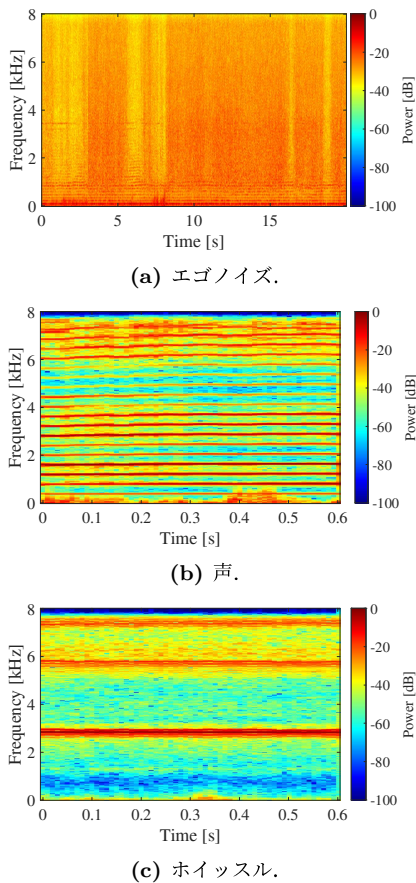


図 4: 評価に使用した音源のスペクトログラム.

ンにより作成した任意の方向から到来した目標音を加算することにより評価用信号を作成し、解析を行った.

エゴノイズは、DJI 社製 Inspire 2 に搭載したマイクロホンアレイにて収録した. マイクロホンアレイには、下半球に 12ch, 上半球に 4ch の MEMS マイクロホンが設置されている 16ch 球形マイクロホンアレイ (図 3a)[10] を用いた. 本マイクロホンアレイでは、サンプリング周波数 16 kHz, 量子化ビット数 24 bit で音響信号が収録される. マイクロホンアレイはドローンの中心から 600 mm の位置に設置した (図 3b). 高度 10 m でホバリング中、および速度 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s で飛行時のエゴノイズを収録した. 目標音のサンプルには声およびホイッスルを用い、方位角が  $-180^\circ \leq \theta < 180^\circ$ , 仰角が  $-90^\circ \leq \phi \leq 0^\circ$  の範囲で  $5^\circ$  刻みで到来方向を設定し、幾何計算により得た伝達関数から各方向から到来した目標音を作成した. そして、収録したノイズと作成した目標音を、SNR が 4 dB 刻みで  $-20 \sim 0$  dB となるよう加算し、評価用信号を作成した. エゴノイズ、目標音のスペクトログラムを図 4 に示す.

まず、評価用信号を SEVD-MUSIC により解析し、MUSIC スペクトルを求めた. SEVD-MUSIC のパラメータは、目標音源数を 2, 相関行列に用いる平均化フレーム数を 50, 最小解析周波数を 500 Hz, 最大解析周波数を 4000 Hz とした. 得られた MUSIC スペクトルに対し、従来手法として、エゴノイズが到来する方向を探索範囲から一定範囲除外する Hoshiba らの手法 [8], お

よび提案手法 [9], 本稿で改良した提案手法 (以降、提案手法 (改) と呼ぶ) により処理を行い比較した. 表 1 に比較条件を示す. 従来手法の探索範囲は  $-90^\circ \sim 90^\circ$  と  $-135^\circ \sim 135^\circ$  の二通りとした. また、提案手法および提案手法 (改) における基準方向は、 $\psi_0 = (-180^\circ, 0^\circ)$  とした.

## 5 結果

様々な条件で作成した評価用信号を、表 1 で示した各手法で処理した結果を図 5 に示す. 図 5a~5e が SNR が  $-12$  dB, 目標音源がホイッスル, 目標音源方向が  $\psi_{target} = (-45^\circ, -45^\circ)$  の場合の結果, 図 5f~5j が SNR が  $-12$  dB, 目標音源がホイッスル,  $\psi_{target} = (-180^\circ, -45^\circ)$  の場合の結果, 図 5k~5o が SNR が  $-12$  dB, 目標音源がホイッスル,  $\psi_{target} = (-150^\circ, -10^\circ)$  の場合の結果である. また、5a, 5f, 5k が条件 1, 5b, 5g, 5l が条件 2, 5c, 5h, 5m が条件 3, 5d, 5i, 5n が条件 4, 5e, 5j, 5o が条件 5 で解析を行った. これらの空間スペクトルは図 1a の設定軸に従ってプロットされている.

図 5a, 5f, 5k は SEVD-MUSIC により算出された MUSIC スペクトルであり (条件 1), 左側にエゴノイズが存在することが確認できる. なお、目標音は図 5a では右側, 図 5f, 5k ではエゴノイズと重なって存在しているが、いずれもエゴノイズの方がパワーが大きく、ピーク検出による目標音方向の定位ができない. 図 5b, 5c, 5g, 5h, 5l, 5m は、図 5a, 5f, 5k から従来手法によりエゴノイズを除外した結果であり (条件 2, 3), 図中における紺色の部分が除外範囲である. 条件 2 において、除外範囲は全体の 50% を占めており、搜索可能範囲が大幅に減少していることがわかる. 一方、条件 3 は、除外範囲が狭く、搜索可能範囲が広い. また、5d, 5i, 5n は、提案手法によりエゴノイズを除外した結果 (条件 4) である. 条件 2~4 において、エゴノイズと目標音が離れている結果 1 では空間スペクトルに目標音成分が確認できる. 一方で、エゴノイズと目標音が近い結果 2 および結果 3 では、目標音が除外範囲に含まれていることがわかる. 図 5e, 5j, 5o は、図 5a, 5f, 5k から提案手法 (改) によりエゴノイズを除外した結果である (条件 5). 提案手法 (改) を用いたところ、結果 1, 2 ともに目標音が抽出できている. しかし、目標音源方向がエゴノイズが及ぶ方向と完全に一致する結果 3 では、目標音が抽出できていない. 以上の結果から、提案手法 (改) は、従来手法およびこれまでの提案手法と比べて、エゴノイズに近い目標音も定位可能であるため搜索範囲が広く、高いノイズへの耐性および広い搜索範囲の両者を満足すると期待できる.

## 6 考察

ノイズ耐性と搜索範囲について評価するため、評価用音響信号 80 フレーム (40 秒分), 目標音 2 種類, 音

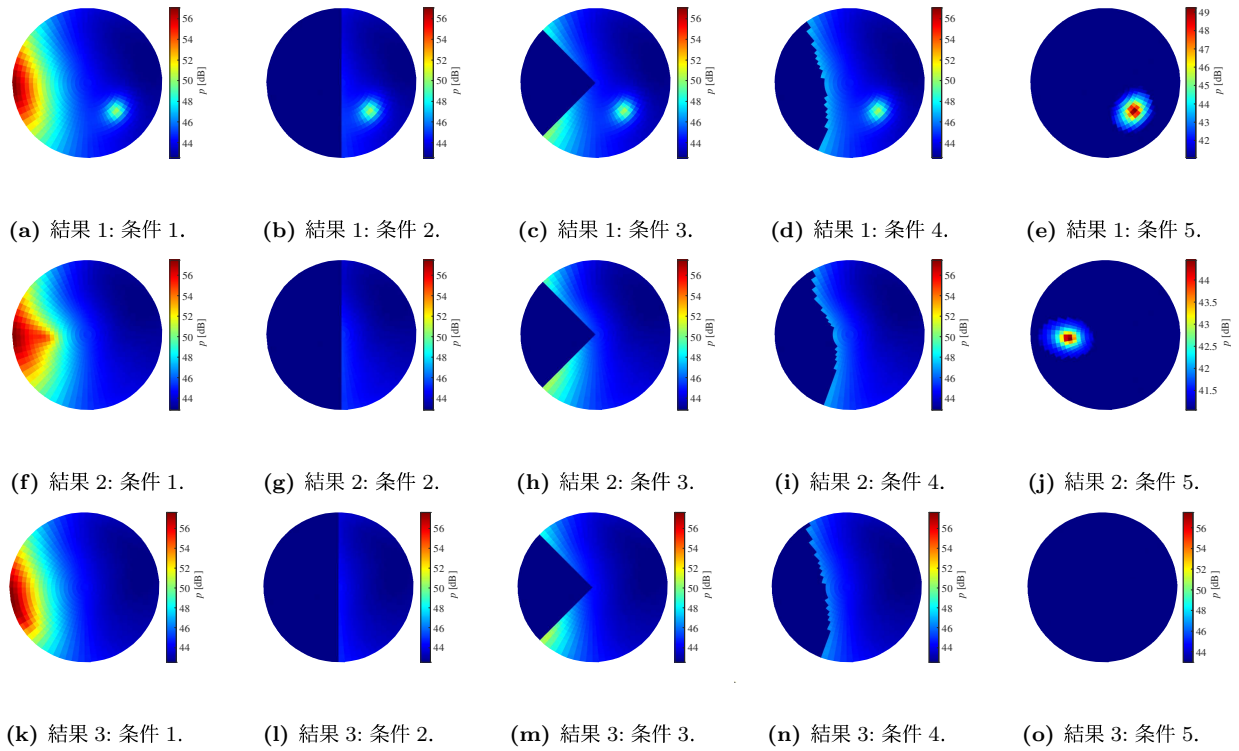


図 5: 各手法で得られた空間スペクトル.

結果 1 (SNR:  $-12$  dB, 目標音源: ホイッスル, 目標音源方向:  $\psi_{target} = (-45^\circ, -45^\circ)$   
 結果 2 (SNR:  $-12$  dB, 目標音源: ホイッスル, 目標音源方向:  $\psi_{target} = (-180^\circ, -45^\circ)$   
 結果 3 (SNR:  $-12$  dB, 目標音源: ホイッスル, 目標音源方向:  $\psi_{target} = (-150^\circ, -10^\circ)$ )

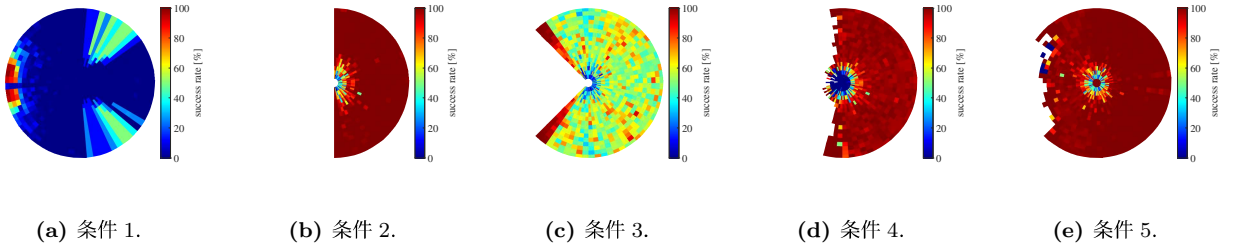


図 6: 目標音の設定方向毎の定位成功率 (SNR= $-12$  dB).

源方向 1,297 通り, SNR6 通りの全 1,245,120 回の試行を行った.

初めに, 定位成功率について考察する. 図 6 に各条件における目標音の設定方向毎の定位成功率を示す. 図 1a の設定軸に従いプロットされており, 各方向毎の定位成功率をカラーマップで示している. 定位成功率は,  $\psi_{target}$  が目標音の設定方向  $\pm 5^\circ$  以内のとき定位成功とし, 成功数 / 目標音が除外範囲に含まれなかった試行数のように算出した. SEVD-MUSIC である条件 1 は, 多くの目標音の方向において, 定位成功率が大幅に低下している. また, 従来手法にて狭い範囲を除外する条件 3 (図 6c) においても, 定位成功率が低くなった. 一方, 従来手法にて広い範囲を除外する条件 2 (図 6b), 提案手法である条件 4 (図 6d) および提案手法 (改) である条件 5 (図 6e) は, 目標音が除外範囲に含まれなかった試行において, 高い定位成功率を獲得した. 図 8 に全目標音の設定方向における定位成功率を

示す. 横軸は SNR, 縦軸は全方向で平均した定位成功率であり, 各条件ごとに図 6 にて検索可能であった方向における定位成功率を平均し算出した. SNR が  $-20 \sim -12$  dB のときは, 条件 5 の提案手法 (改) が最も高い定位成功率を獲得した. 一方, SNR が  $-12 \sim 0$  dB のとき, 提案手法 (改) の定位成功率は条件 2, 条件 4 に比べて低下した. この原因として, SNR が高くなるにつれヒストグラム情報から算出される基準値の値が大きくなるため, 基準値以下に該当するエゴノイズ成分が発生し, エゴノイズ成分の連続性が失われてしまうことが考えられる. そのため, 除外されずに残ったエゴノイズ成分の影響から, 提案手法 (改) において SNR が高い場合の定位成功率が低下すると考察できる.

次に検索可能範囲について考察する. 図 7 に各条件における目標音の設定方向毎の検索可能割合を示す. 図 1a の設定軸に従いプロットされており, 各方向毎の検索可能割合をカラーマップで示している. 検索可能割合

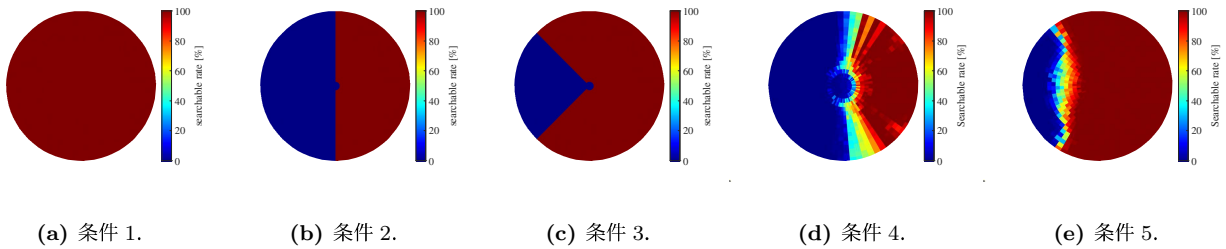


図 7: 目標音の設定方向毎の検索可能割合 (SNR=-12 dB).

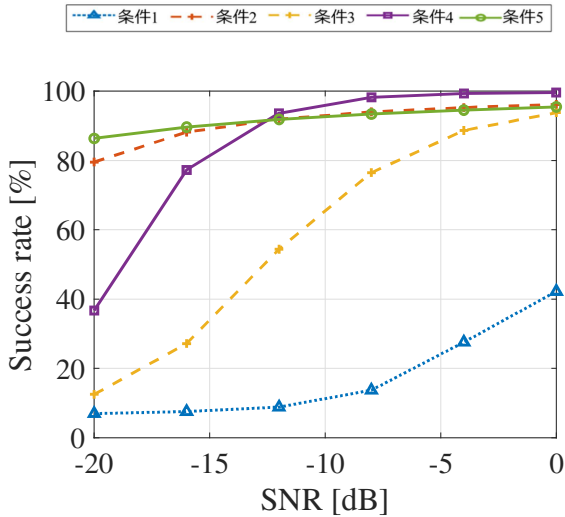


図 8: 全目標音の設定方向における定位成功率.

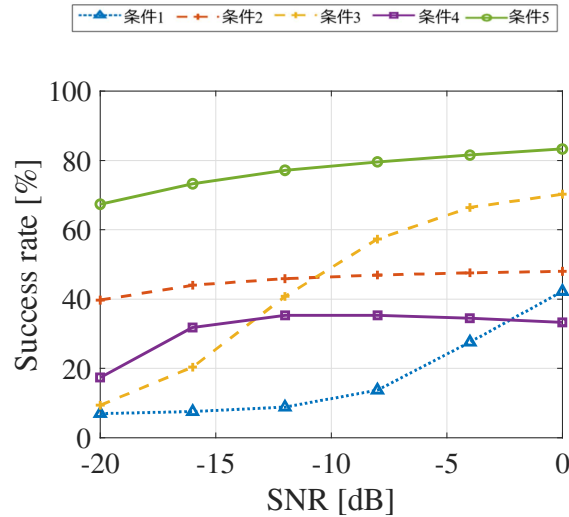


図 10: 検索可能範囲を考慮した定位成功率.

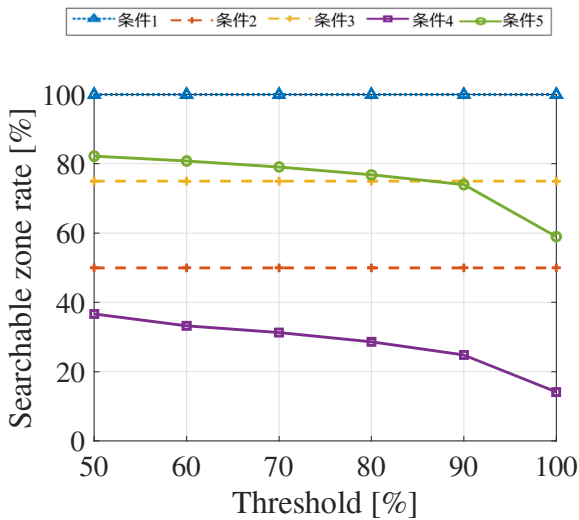


図 9: 全目標音の設定方向における検索可能範囲.

合は、目標音が除外範囲に含まれなかった試行数 / 試行数 のように算出した。条件 2 (図 7b), 条件 4 (図 7d) において、検索可能割合が高い目標音方向は全体の半分以下であり、除外範囲に含まれる目標音方向が多い。一方、条件 3 (図 7c), 条件 5 (図 7e) は、多くの目標音方向で検索可能割合が高い。図 9 に全目標音の設定方向における検索可能範囲を示す。横軸は閾値、縦軸は検索可能範囲であり、検索可能範囲は、図 7 に

おいて閾値以上の検索可能割合を持つ目標音方向 / 全目標音方向 として算出した。条件 5 である提案手法 (改) は閾値が 90% 以下であるとき、条件 1 を除いた手法の中で、最も高い広い検索可能範囲を獲得した。条件 4 である提案手法は、前報告 [9] では、検索可能範囲を、目標音が除外範囲に含まれたか否かを考慮せずに、全解析範囲 - 除外範囲 / 全解析範囲 として算出したため、十分広い検索可能範囲が得られた。しかし、検索可能範囲の算出方法を変更した本報告では、すべての条件の中で検索可能範囲が最小となった。

以上の結果を踏まえ、定位成功率 (図 8) と検索可能範囲 (図 9) を統合させた、検索可能範囲を考慮した定位成功率を図 10 に示す。横軸は SNR、縦軸は検索可能率である。検索可能率は、成功率 / 試行数 のように算出し、定位成功率および検索可能範囲をどちらも考慮した評価値とした。これより、提案手法 (改) は従来手法およびこれまでの提案手法に比べて、検索可能率が大幅に向上していることがわかる。

以上から、提案手法 (改) は著しい時刻変化を伴うノイズへの耐性と広い検索範囲を満足し、実環境におけるドローン搭載マイクロホンアレイを用いた音源探査において有用性があることがわかった。提案手法 (改) を用いることにより、前章における図 5i, 5j, のように、これまでの提案手法にて問題であった、エゴノイズ付近の目標音がエゴノイズと誤判定され定位が不可

能であるといった問題が解決できた。しかし、図 5n, 5o のように、目標音方向がエゴノイズが及ぶ方向と完全に一致する場合、目標音成分がエゴノイズと判定され除外されてしまい、定位が失敗するという問題も新たに判明した。今後は、このような状況を解決する手法の検討に加え、本稿で評価していない計算コストや汎用性について、様々な条件や他の手法で比較、評価を行っていく予定である。

## 7 結言

本稿では、著しい時刻変化を伴うノイズに対する頑健性、広い搜索範囲、低い計算コスト、汎用性をすべて満たす音源定位手法の開発を目的に、過去の情報を用いず、得られた現在の空間スペクトルから、ヒストグラム情報と周波数情報に基づきノイズの判定を行い、目標音成分の抽出を行う手法を提案した。これまでの提案手法では、エゴノイズ付近の目標音がエゴノイズと誤判定され定位が不可能であるといった問題点があったが、以前は方向情報のみの二次元で解析していた空間スペクトルを、周波数情報を含めた三次元で解析し提案手法を改良することにより、これまでの提案手法における問題点を解決することができた。評価実験の結果、改良した提案手法により、従来手法およびこれまでの提案手法では同時に満たすことのできなかったノイズ耐性と広い搜索範囲の両者を同時に満足することができ、有用性が確認できた。しかし、目標音の到来方向がエゴノイズが及ぶ方向と完全に一致しているとき、改良した提案手法を用いた場合においても、目標音成分がエゴノイズ判定され除外され、定位が失敗するという問題も新たに判明した。今後は、このような状況を解決する手法の検討に加え、計算コストや汎用性について、様々な条件や他の手法で比較、評価を行っていく。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 22K14218, 公益信託小野音響学研究助成基金および東京工業大学 工学院助教インセンティブ研究経費の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] 加藤, 寺島, 高見: 要救助者の複数ドローンによる協調探索のためのエッジサーバ集約型自動スケジューリング手法とシミュレーション評価マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2019 論文集, pp.291-296 (2019)
- [2] K. Hoshiba, O. Sugiyama, A. Nagamine, R. Kojima, M. Kumon, K. Nakadai: Design and Assessment of Sound Source Localization System with a UAV-Embedded Microphone Array *J. of*

*Robotics and Mechatronics* VOL. 29, NO. 1, pp. 154-167 (2017)

- [3] R. O. Schmidt: Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, VOL. 34, NO. 3, pp. 276-280 (1986)
- [4] K. Nakamura, K. Nakadai, F. Asano, Y. Hasegawa, H. Tsujino: Intelligent Sound Source Localization for Dynamic Environment, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2009)
- [5] K. Nakamura, K. Nakadai, G. Ince: Real-time Super-resolution Sound Source Localization for Robots *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Robots and Intelligent Systems (IROS)* pp. 694-699 (2012)
- [6] K. Okutani, T. Yoshida, K. Nakamura, K. Nakadai: Intelligent Sound Source Localization for Dynamic Environment, *Outdoor Auditory Scene Analysis Using a Moving Microphone Array Embedded in a Quadcopter* (2012)
- [7] T. Ohata, K. Nakamura, A. Nagamine, T. Mizumoto, T. Ishizaki, R. Kojima, O. Sugiyama, K. Nakadai: Outdoor Sound Source Detection Using a Quadcopter with Microphone Array *J. of Robotics and Mechatronics* VOL. 29, NO. 1, pp. 177-187, (2017)
- [8] K. Hoshiba, K. Washizaki, M. Wakabayashi, T. Ishiki, M. Kumon, Y. Bando, D. Gabriel, K. Nakadai, H. G. Okuno: Design of UAV-Embedded Microphone Array System for Sound Source Localization in Outdoor Environments *Sensors* VOL. 17, NO. 11, pp. 1-16, (2017)
- [9] 小松崎, 干場, 武田, 菅原: ヒストグラム情報を用いた時刻変化の著しい雑音に対する体制の高い音源定位手法の提案日本ロボット学会 (2022)
- [10] K. Nonami, K. Hoshiba, K. Nakadai, M. Kumon, H.G. Okuno, Y. Tanabe, K. Yonezawa, H. Tokutake, S. Suzuki, K. Yamaguchi, S. Sunada, T. Takaki, T. Nakata, R. Noda, H. Liu, S. Tadokoro: Recent R&D Technologies and Future Prospective of Flying Robot in Tough Robotics Challenge *Disaster Robotics - Results from the ImPACT Tough Robotics Challenge, Satoshi Tadokoro Ed., Springer International Publishing* pp. 77-142, (2019)