

高分解能な音源定位のための 展開可能なマイクロホンアレイの設計

Design of deployable microphone array for high-resolution sound source localization

LEE DONG WOO¹ 干場功太郎^{1*} 岩附信行¹
Lee Dong Woo¹ Kotaro Hoshiba¹ Nobuyuki Iwatsuki¹

¹ 東京工業大学

¹ Tokyo Institute of Technology

Abstract: 災害による被災地において、迅速な捜索・救助活動は重要な課題である。近年、マイクロホンアレイをドローンに搭載し、被害者の声といった音を頼りに被災者を捜索する音源定位の研究が行われている。これまで、ドローンの周囲にフレームを設置し、フレーム上にマイクロホンを配置した大型のマイクロホンアレイや、ドローンのアームの先に設置する小型の球形マイクロホンアレイなどが開発されているが、前者は定位の分解能は高いが、フレームの設置が難しい、飛行時の安定性に欠けるという問題点、後者は設置が容易であり、飛行時の安定性も高いが、分解能が低いといった問題点があった。そこで本稿では、飛行時にはコンパクトに収納され、被災者捜索時には大きく展開可能なマイクロホンアレイを提案する。航空宇宙工学分野で提案された展開構造物を参考に、少ない駆動源で展開可能な過拘束リンク機構からなる展開構造物を設計し、展開型マイクロホンアレイを試作した。屋内実験により、提案した展開型マイクロホンアレイの定位の分解能を評価し、その有用性を確認した。

1 はじめに

災害が発生した際、最も重要なのは、被害者の捜索救助活動である。The first 72 hour Response として知られるように、災害発生から 72 時間が過ぎると被害者の生存率が減少すると言われており、迅速な捜索救助活動が求められる [1]。近年、人による被害者捜索が困難である場所において、迅速な捜索を行うためにドローンを用いた捜索活動が注目されている [2]。しかし、現在開発されているドローンを利用した捜索活動は、カメラ画像を用いることが多いため [3, 4, 5]、人が瓦礫等に埋もれている場合や鮮明な画像が取得できない夜間などの暗い時間帯には捜索活動を行うことが難しいという問題がある [6]。そこで、声などといった被災者由来の音響信号を、複数のマイクロホンにより構成されるマイクロホンアレイを用いて取得し、音源位置を探索することで被災者の場所を特定する音源探査手法が研究されている [7]。また、ドローンから計測信号を照射し、地表からの反射波をマイクロホンアレイにより観測し、その伝搬時間と到来方向により地形のセンシングを行う研究も行われている [8]。このような技術はドローン聴覚と呼ばれ、さまざまな研究が行われている。

一般的に、マイクロホンアレイを用いて音が到来する方向を観測する場合、構成する各マイクロホンの間

隔が大きいほど解析結果の分解能が高いとされている [9]。図 1 に、これまでに音源定位に用いられてきたマイクロホンアレイの代表例を示す。1 つ目は図 1a のように、ドローンの周囲に直径 1.8 m のフレームを設置し、フレーム上に 16 個のマイクロホンを貼り付けたものである [10]。こちらの各マイクロホンの間隔は大きく、分解能は高いが、フレームの設置が難しく、またフレームが大きいと、飛行の安定性に欠ける。2 つ目は図 1b のように、直径 100 mm 程度の球体の筐体に 16 個のマイクロホンアレイを埋め込んだものである [11]。設置が容易になり、飛行時の安定性も高いが、各マイクロホンの間隔が小さいため、分解能が低い。そこで、飛行時には小さく収納され、音源探査時には大きく展開できる構造を持ったマイクロホンアレイを開発することができれば、高い音源定位の分解能、飛行時の高い安定性、設置の容易さを満たすことができる可能性がある。

展開可能な構造物は特に航空宇宙工学分野でよく研究されている。中でも、人工衛星のアンテナと太陽光パネルの分野で最も研究が進んでいる。人工衛星のアンテナは大きければ大きいほど地球との通信能力が高い。同様に、太陽光パネルも面積が大きいほど発電能力が高い。しかし、大きなアンテナや太陽光パネルをそのまま人工衛星に付けて宇宙空間に輸送するのは、輸送費用的に非効率であり、また飛行時に受ける力に耐えられる構造にする必要がある。そのため、人工衛星を発射する時にはコンパクトに収納され、宇宙空間で

*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 11-27
E-mail: hoshiba@rmsv.mech.e.titech.ac.jp

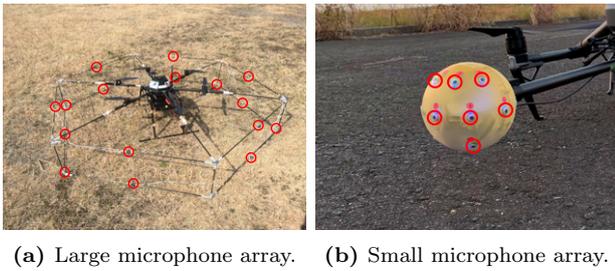


図 1: Example of drone-embedded microphone arrays. Microphones are marked as red circles.

大きく展開できるような展開構造物に対する研究が注目されている。Shah らは折り紙パターンを分析し、軽量、低費用で大きく展開できる折り紙パターンアンテナを提案した [12]。Wang らは花びらの折りたたみ・展開過程をモチーフとし、新しい平面展開機構を提案し、太陽光パネルを製作した [13]。しかし、これらの構造は質量が大きい、展開時に必要な駆動源が多いなどといった問題点があるため、これらをドローン搭載マイクロホンアレイに採用するには適切ではない。そこで、展開可能なリングトラス型アンテナを作るために、平面展開メカニズムから基本ユニットを提案し、基本ユニットの合成により展開可能なアンテナ構造物を構築した Han らの研究に着目した [14]。

本稿では、音源定位の分解能、飛行時の安定性の向上を目的に、ドローン搭載可能な展開型マイクロホンアレイの開発を行う。少ない駆動源で展開でき、かつ少ないリンクで構成される構造物である、Han らが提案した展開構造物の基本ユニットから最適なユニットを選定し、それらを反復配置することで、正八角形の展開構造物を設計した。設計した展開構造物にマイクロホンアレイを設置し、室内実験により音源定位の性能を評価した。

2 展開構造物の設計およびプロトタイプ製作

本章では、展開可能なマイクロホンアレイのための展開構造物の設計・試作を行う。

2.1 基本ユニットの選定

ドローンのペイロードは限られているため、駆動源を含めた展開構造物は軽量である必要がある。よって、少ない駆動源で展開でき、かつ少ないリンクで構成される軽量の構造物である、Han らが提案した展開構造 [14] を採用する。本展開構造では、図 2 のような単純な 5 つの基本ユニットが提案されている。本稿では、提案されている 5 つの基本ユニットから、適当な基本ユニットを選択する。地表の音源を高精度に定位するためには、マイクロホンアレイは雑音源、つまりプロペラより下に設置されるのが好ましい。しかし、ドロー

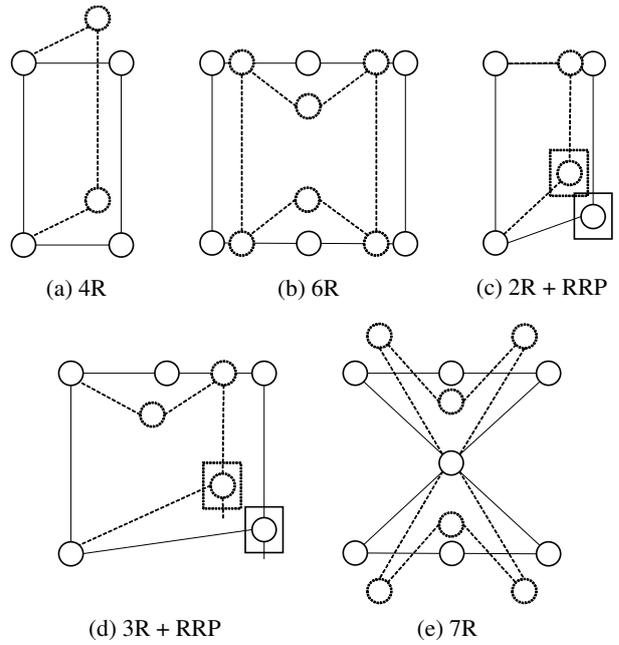


図 2: Five simple basic units for square deployable structure.

ン下部には着陸用の脚があるため、自由に展開することが難しい。そこで、あらかじめドローンに付属している脚の代わりに、展開型マイクロホンアレイを着陸用の脚として使うことを考える。その場合、展開前後の高さを維持させるために、長方形の高さを保ちながら幅を変化させる必要があるため、図 2(a), (e) は適当ではない。また、飛行中に空中で展開することを考えると、直進対偶 (P ジョイント) と比べ、回転対偶 (R ジョイント) はより柔軟性の高い動きが可能のため [12]、図 2(c), (d) も適当ではない。以上の理由から、図 2(b) の 6R 基本ユニットを選定した。選定した 6R 基本ユニットを 8 個反復配置することにより、正八角柱形となる構造物を構築する。構築した構造を図 3 に示す。正八角形の一辺の midpoint から頂点までの長さを l 、正八角形の中心点から頂点までの長さ (半径) を r とすると、正八角形の中心角は 0° であるため、式のように r と l の関係を表すことができる。

$$l = r \sin \frac{45^\circ}{2} \quad (1)$$

以降、この l の部分に当たるリンクを回転リンク、上段と下段の正八角形を接続する支柱を縦リンクと呼ぶことにする。ここで本機構の自由度を求める。1 つの対偶の左右に 2 つの回転対偶があることに注意し、展開構造物の自由度 F を求めると、式 2 のようになる。

$$F = 6N - J - 1 + \sum_{i=1}^J f_i = -6 \quad (2)$$

ここで、 N はリンクの数 ($N = 4 \times 8 + 8 = 40$)、 J は対偶の数 ($J = 2 \times 8 + 2 \times 2 \times 8 = 48$) であり、自由度は -6 であることがわかる。自由度が 0 以下である

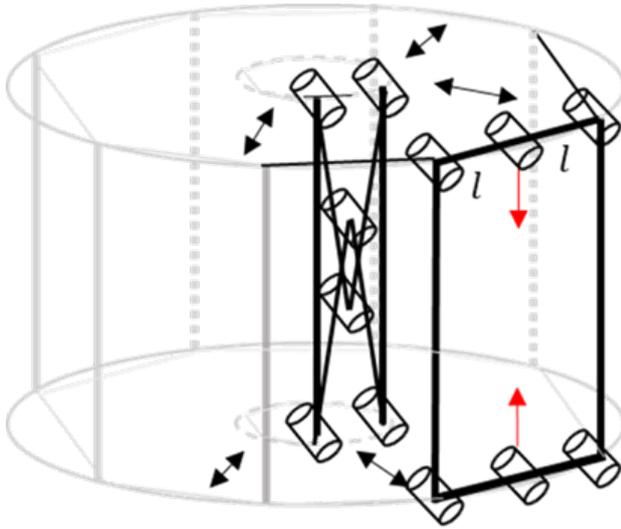


図 3: Designed regular octagonal deployable mechanism.

ため、運動機構とならず構造物となる。しかし、いくつかのリンク長が等しい、いくつかの対偶の姿勢が等しいなどといった機構の寸法の特異性により運動可能となる構造物が存在し、それを過拘束機構と呼ぶ [15]。本稿で構築した機構においても、基本ユニットのすべての回転対偶の対偶軸が平行であり、回転リンクを接続している上下2つの回転対偶の対偶軸が展開前後の正八角の軸に垂直に交わることで、2本の縦リンクが並行であること、また、同一の基本ユニットを8個接続して軸対称構造をとるといった機構寸法の特異性により運動可能な過拘束機構となる。本稿で構築した過拘束機構は自由度が1となるため、1つの駆動源で展開でき、前述した求められる性能を満たすことができる。本機構は、高さを維持しつつ、正八角形の半径が拡大・縮小するような動作を行う。

2.2 基本ユニット間のジョイント部の検討

図3で示した展開構造物を実際に製作するにあたり、注目すべき点は正八角形の頂点にあるジョイントである。正八角形を維持するように、ジョイントの左右に回転リンクが接続され、このロッドの回転によって正八角形の一辺の長さが調整されることになる。従って、ジョイントの左右を回転対偶とする必要がある。このような条件から、図4のようなジョイントを設計した。

2.3 設計および試作

これらの展開機構およびジョイントに基づいて、図5に示すCADモデルを作成し、実際に図6に示されるプロトタイプを製作した。本稿では、展開時に外径900 mmとなるマイクロホンアレイのための構造を考えた。式1で求めた r と l の関係から、 $r = 450$ mm、 $l = 172.2$ mmとなる。しかし、ジョイント部の長さも考慮し、回転リンクの長さを170 mmとした。縦リン

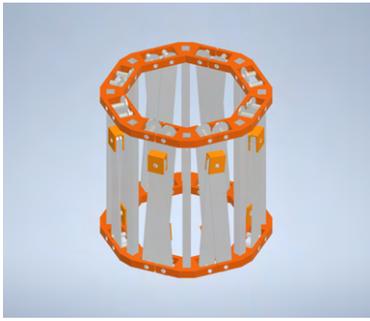


図 4: Designed joint with two revolute pairs.

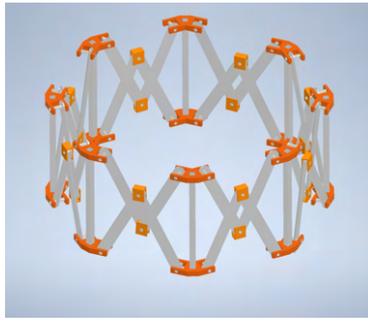
クの長さは、回転リンクより長い必要があるため、200 mmとした。この場合、理論上では、格納時の直径が170 mmとなる。ジョイントは3DプリンタにてABS材により作成し、縦リンクはアルミ角パイプ (A6063)、回転リンクは厚さ2 mmのアルミ板 (A1100)、回転軸はアルミ丸パイプ (A6063)を用いた。試作した機構の質量は1007.8 gとなり、中型のドローンであれば十分搭載できる質量であると言える。

3 評価実験

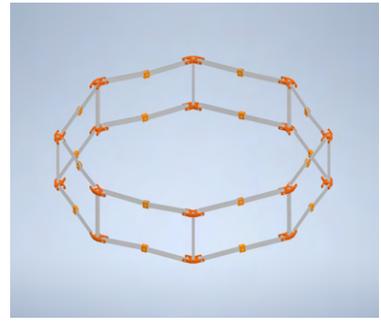
試作した機構にマイクロホンを設置することでマイクロホンアレイを構築し、評価実験を行った。図7に示されるように、正八角形の頂点および縦リンク上に、計12個のMEMSマイクロホンを設置し、直径900 mmの12chマイクロホンアレイとした。本実験は、マイクロホンアレイに対し、異なる3方向に存在する音源を定位する際の分解能を評価する。実験状況を図8に示す。マイクロホンアレイを机の上に固定し、音源1~3の位置からスピーカーにより評価用信号を再生し、処理を行う。マイクロホンアレイに対する音源1, 2, 3の方向(方位角 θ , 仰角 ϕ)はそれぞれ、 $(90^\circ, 0^\circ)$, $(80^\circ, 35^\circ)$, $(100^\circ, 49^\circ)$ であり、マイクロホンアレイからの距離は約3~5 mである。評価用信号には0-8 kHzのアップチャープ信号を用いた。収録は、本稿で試作したマイクロホンアレイに加え、図1bに示す、直径100 mmの球形16chマイクロホンアレイを用いて、比較を行った。それぞれのマイクロホンアレイは、中心座標が一致するよう設置した。なお、球形16chマイクロホンアレイは、本稿で試作したマイクロホンアレイとチャンネル数を合わせるため、上半球に配置されている12chのみで収録を行った。音響信号はサンプリング周波数16 kHz、量子化ビット数24 bitで収録した。収録された音響信号は、音源定位でしばしば用いられるMUSIC (Multiple Signal Classification) 法 [16]を用い



(a) Fully Folded.



(b) Half Deployed.



(c) Fully Deployed.

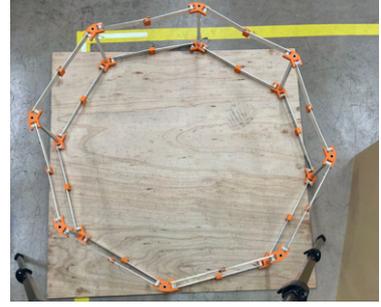
図 5: CAD model.



(a) Fully Folded.



(b) Half Deployed.



(c) Fully Deployed.

図 6: Prototype.

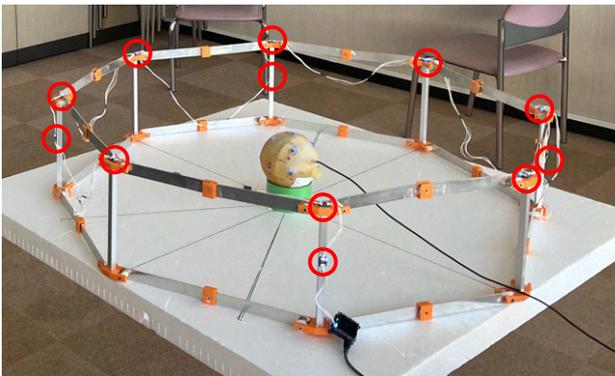


図 7: Deployable 12ch microphone array. Microphones are marked as red circles.

て処理を行う。

4 結果

各マイクロホンアレイにて収録した音響信号を、MUSIC法にて処理し、得られた空間スペクトルの結果を比較する。空間スペクトルは図9に従いプロットされ

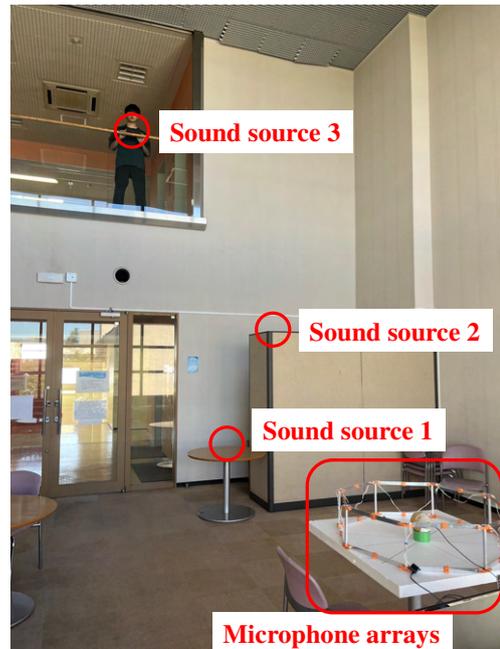


図 8: Experimental configuration.

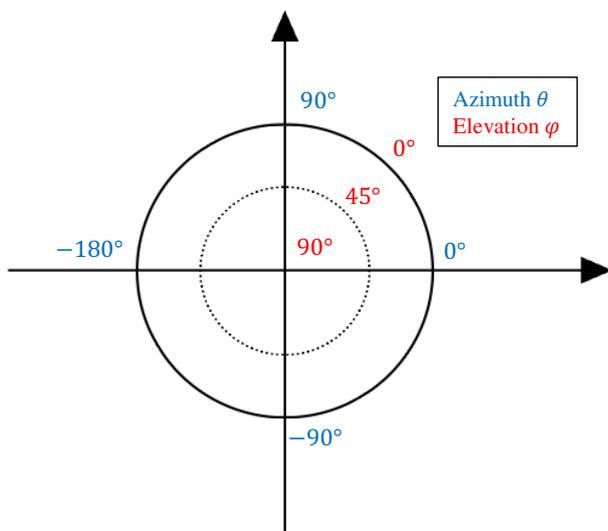


図 9: Setting of the coordinate system.

る。図 10 に球形マイクロホンアレイにて得られた空間スペクトル，図 11 に展開型マイクロホンアレイにて得られた空間スペクトルを示す。(a)~(c) は音源 1~3 に対する結果である。また，(i) は解析周波数が 500~1000 Hz，(ii) は 2500~3000 Hz，(iii) は 5500~6000 Hz の結果である。空間スペクトルはカラーマップにて各方向から到来する音のパワーを示している。球形マイクロホンアレイの結果では，音源方向にピークが確認できるものの，幅の広い分布となっていることがわかる。特に低周波域で顕著にその傾向が確認できる。一方，展開型マイクロホンアレイでは，球形マイクロホンアレイと比較し，鋭いピークとなっており，高い分解能を持っていることがわかった。ただし，アレイを構成する各マイクロホン間の距離が大きいため，特に高周波域にてエイリアスとみられる成分が複雑に発生しており，音源とその他の成分の判別が難しくなることが予想される。よって，展開型マイクロホンアレイは，SNR (Signal-to-Noise Ratio) が大きく，音源とその他の成分の分離が容易である場合には高分解能での音源定位が期待できる。

5 考察

得られた空間スペクトルから分解能を算出し，考察する。分解能は，ピークの値から -3 dB となる範囲を抽出し，方位角と仰角の幅を算出した。図 12 に方位角方向の，図 13 に仰角方向の分解能を示す。これらは音源 1~3 で平均されている。横軸が解析周波数，縦軸が分解能である。球形マイクロホンアレイの分解能は，方位角，仰角ともに，周波数が高くなるにしたがって分解能は小さくなるが，ほぼすべての周波数において 15° 以上であり，最大では 40° を超える。一方，提案した展開型マイクロホンアレイでは，方位角の分解能は球形マイクロホンアレイと比較すると $1/3$ 以下の値となっており，多くの周波数にて 5° 以下の分解能を得る

ことができた。仰角の分解能も球形マイクロホンアレイと比較すると $1/2$ 以下の値であり，優位性はあるものの方位角よりも分解能が大きくなっている。これは，展開型マイクロホンアレイに含まれるマイクロホンの多くは同一平面上に配置されており，方位角方向には分解能が小さくなるが，仰角方向には不利であることが原因と考えられる。また，展開機構の精度の影響で，展開時の各マイクロホンの位置と伝達関数との間に差異が発生してしまい，方位角，仰角とも予想よりも分解能が大きくなった。

以上の結果から，提案した展開型マイクロホンアレイの音響的な有用性が確認された。

6 結言

本稿では，ドローン聴覚における，音源定位の分解能向上を目的に，ドローンに搭載可能な展開型マイクロホンアレイを提案した。航空宇宙工学分野で提案された展開構造物の基本ユニットから，最適なものを選定し，正八角形柱が高さを維持しつつ拡大・縮小する空間展開構造物を設計した。実際に 3D プリンタを用いて展開型マイクロホンアレイを試作し，音源定位の分解能を評価した。その結果，これまで用いられていた小型のマイクロホンアレイと比較し，分解能が向上することがわかり，提案した展開型マイクロホンアレイの有用性が確認された。今後は，展開の正確性やドローンに搭載した際の駆動などについて検討を行い，実際に実機に搭載し評価を行っていく予定である。

7 謝辞

本研究は，JSPS 科研費 22K14218 の助成を受けた。

参考文献

- [1] 小谷稔, 飯塚敦, 河合克之: 急性期災害医療における DMAT 配置モデルに関する考察, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol. 71, No. 1, pp. 32-45, 2015, DOI: 10.2208/jscejsp.71.32.
- [2] Luo, C., Miao, W., Ullah, H., McClean, S., Parr, G., Min, G.: Unmanned aerial vehicles for disaster management, *Geological Disaster Monitoring Based on Sensor Networks*, pp. 83-107, 2019, DOI: 10.1007/978-981-13-0992-2-7.
- [3] Meier, L., Tanskanen, P., Fraundorfer, F., Pollefeys, M.: PIXHAWK: A system for Autonomous Flight using Onboard Computer Vision, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2011)*, pp. 2992-2997, 2011, DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980229.

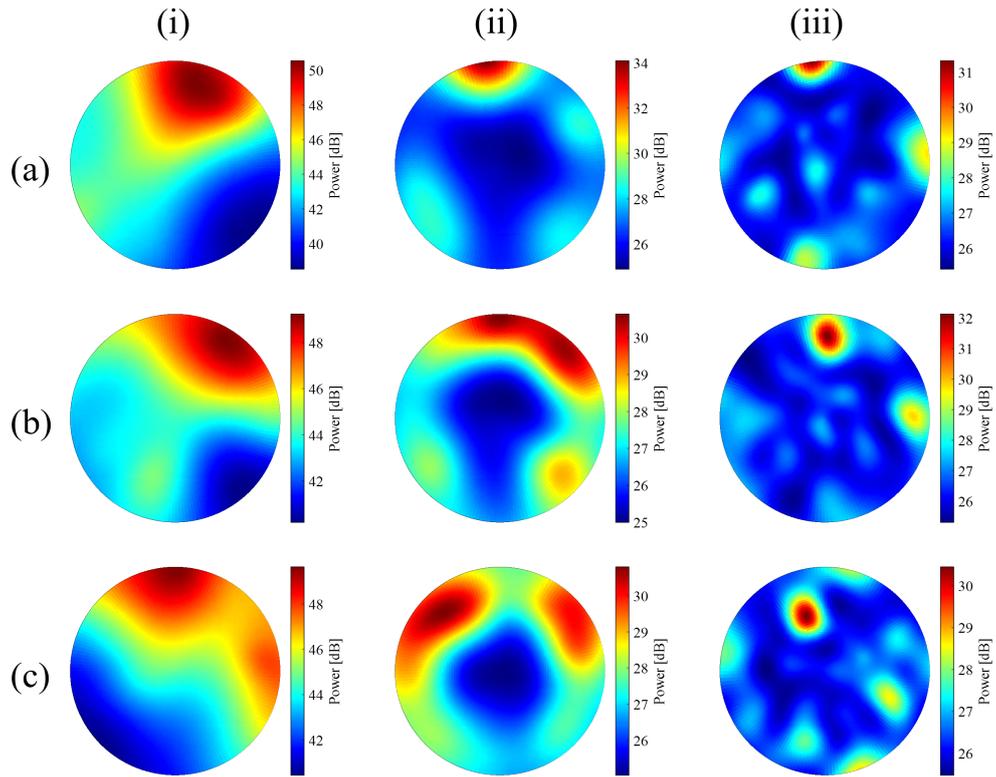


Figure 10: Spatial spectra obtained by small spherical microphone array. (a) Sound source 1, (b) Sound source 2, (c) Sound source 3. (i) 500-1000 Hz, (ii) 2500-3000 Hz, (iii) 5500-6000 Hz.

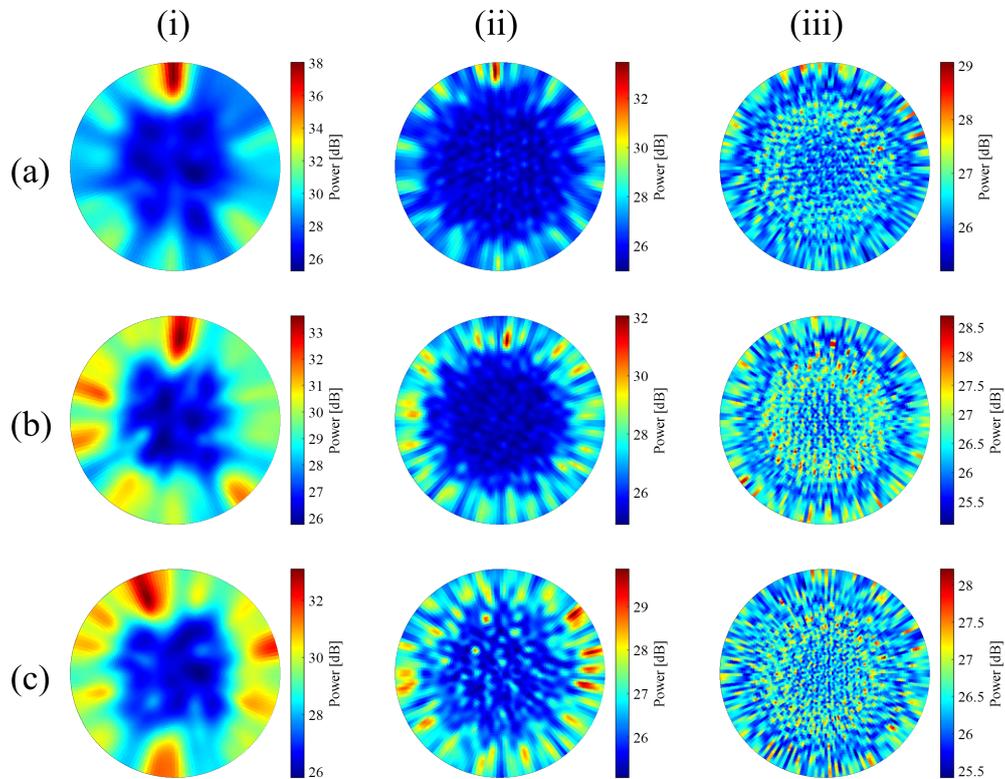


Figure 11: Spatial spectra obtained by proposed deployable microphone array. (a) Sound source 1, (b) Sound source 2, (c) Sound source 3. (i) 500-1000 Hz, (ii) 2500-3000 Hz, (iii) 5500-6000 Hz.

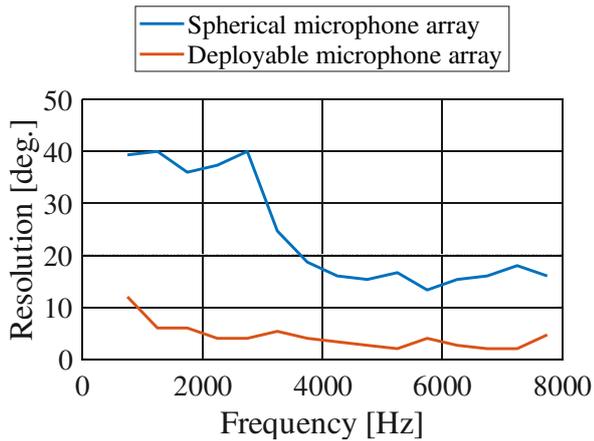


図 12: Resolution of azimuth direction.

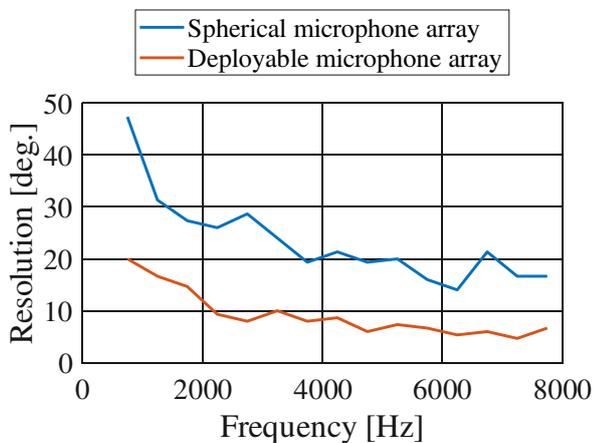


図 13: Resolution of elevation direction.

[4] Achtelik, W. M., Lynen, S., Weiss, S., Kneip, L., Chli, M., Siegwart, R.: Visual-Inertial SLAM for a Small Helicopter in Large Outdoor Environments, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012)*, pp. 2651-2652, 2012, DOI: 10.1109/IROS.2012.6386270.

[5] Lee, S., Har, D., Kum, D.: Drone-Assisted Disaster Management: Finding Victims via Infrared Camera and Lidar Sensor Fusion, *Proceedings of 3rd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering (APWC on CSE 2016)*, pp. 84-89, 2016, DOI: 10.1109/APWC-on-CSE.2016.025.

[6] Sandino, J., Maire, F., Caccetta, P., Sanderson, C., Gonzalez, F.: Drone-Based Autonomous Motion Planning System for Outdoor Environments under Object Detection Uncertainty, *Remote Sensing*, Vol. 13, No. 21, 4481, 2021, DOI: 10.3390/rs13214481.

[7] Basiri, M., Schill, F., Lima, P. U. and Floreano, D.: Robust acoustic source localization of emergency signals from Micro Air Vehicles, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012)*, pp.4737-4742, 2012, DOI: 10.1109/IROS.2012.6385608.

[8] 干場功太郎, 岩附信行: ドローン聴覚による地表のアクティブ音響センシングに関する基礎検討, 第40回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, RSJ2022AC4J3-10, 2022.

[9] 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.

[10] Wakabayashi, M., Okuno, H. G. and Kumon, M.: Multiple Sound Source Position Estimation by Drone Audition Based on Data Association Between Sound Source Localization and Identification, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 2, pp.782-789, 2020, DOI: 10.1109/LRA.2020.2965417.

[11] Yamada, T., Itoyama, K., Nishida, K. and Nakadai, K.: Sound Source Tracking by Drones with Microphone Arrays, *Proceedings of IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2020)*, pp. 796-801, 2020, DOI: 10.1109/SII46433.2020.9026185.

[12] Shah, S. I. H., Bashir, S., Ashfaq, M., Altaf, A., Rmili, H.: Lightweight and Low-Cost Deployable Origami Antennas—A Review, *IEEE Access*, Vol. 9, pp.86429-86448, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3088953.

[13] Wang, R., Sun, J., Dai, S. J.: Design analysis and type synthesis of a petal-inspired space deployable-foldable mechanism, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 141, pp. 151-170, 2019, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.07.005.

[14] Han, B., Xu, Y., Yao, J., Zheng, D., Guo, L., Zhao, Y.: Type synthesis of deployable mechanisms for ring truss antenna based on constraint-synthesis method, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 33, Issue 9, pp.2445-2460, 2020, DOI: 10.1016/j.cja.2019.07.015.

[15] 日本機械学会, JSME テキストシリーズ 機構学 機械の仕組みと運動, 2007.

[16] Schmidt, R. O.: Multiple emitter location and signal parameter estimation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 34, No. 3, pp. 276-280, 1986, DOI: 10.1109/TAP.1986.1143830.