

地上音源の位置推定を行うドローン聴覚システムのための 分散処理環境の開発

公文誠¹ 中臺一博^{2,3} 干場功太郎⁴ 奥乃博⁵

加川敏規⁶ 三浦龍⁶

Makoto KUMON¹ Kazuhiro NAKADAI^{2,3} Kotaro HOSHIBA⁴

Hiroshi OKUNO⁵ Toshinori KAGAWA⁶ Ryu MIURA⁶

¹ 熊本大学, ² 東京工業大学, ³ ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン,
⁴ 神奈川大学, ⁵ 早稲田大学, ⁶ 情報通信研究機構

¹ Kumamoto University, ² Tokyo Institute of Technology,

³ Honda Research Institute Japan, ⁴ Kanagawa University, ⁵ Waseda University,

⁶ National Institute of Information and Communications Technology

Abstract: マイクロホンを搭載したドローンによって地上の音環境理解を行うドローン聴覚技術実現に向けて、ドローン機上と地上局で分散して音響信号処理するシステムを考える。一般に、音情報の収集の観点からは出来るだけ多くの情報を地上局へと伝送することが望ましいが、実際には伝送路の帯域の制約があり、一定の処理を機上で行い伝送量を削減することが必要となる。本稿では、ドローンを用いて地上の音源位置を推定するタスクを題材に、分散処理システムと通信機構を提案するとともに、その有効性を実際の定位実験を通じて検証する。

1 はじめに

災害現場での要救助者の探索において助けを求める声は重要な手がかりで、どこからその音声が聞こえたのかを特定することは、迅速な救助活動に必要である。このような音源探査を広範囲に効率的に行う上で、音収録デバイスを対象領域全体にわたって自動的に移動させることが考えられるが、その一つの方法としてマイクロホンを搭載したマルチロータヘリコプタのようなドローンを活用することが期待されている。

マイクロホンを搭載したシステム自身が実環境で収録した音信号を用いて音環境を理解しようとする技術はロボット聴覚として奥乃や中臺ら [1] によって提案されており、精力的に研究されている。昨今、ドローンにおいてもマイクロホンや複数のマイクロホンを組み合わせたマイクロホンアレイを搭載し、ロボット聴覚のフレームワークを援用しようとする取り組みが盛んになっており、筆者らも地上音源の位置推定や識別といった技術やドローンに搭載するマイクアレイシステムの開発などを行ってきた (例えば [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] など)。ここで、プラットフォームとしてドローンを考える時、ドローン自身の発する雑音 (エゴノイズと呼ぶ) が著しいこと、対象とする目的音源が遠いこと、主に地上の音環境を認識・理解することを目的とすること、ペイロードの制約から演算・通信などの計算機資源が強い制約を受けること、ドローンの自己位置・姿勢の三次

元的不確かさがあることに加え、特にレスキューへの応用のようにリアルタイムでの実現を前提があるなど、ロボット聴覚の一つのカテゴリとして独特の技術的課題があると考えられ、特にドローン聴覚と分けて呼ぶことが出来る。

ドローン聴覚に関する研究の多くは、エゴノイズの影響の抑制と対象音の検知に関する音響信号処理の観点のものが多く、上述の通りこれを実用に供するためには、適切な実装方法を考える必要がある。特に、飛行しているドローンで全ての処理を実現することは容易ではなく、またレスキューのように微弱な目的音についての事前情報を仮定することは難しい場合、出来るだけオペレータに情報を提示しつつ、処理を行うなどタスクに合わせたシステムが必要となる。このことを考えれば、音収録デバイスとしての聴覚ドローンと得られた情報を高次のレベル扱う地上局との間の分散処理と、その間の通信路は適切に設計される必要がある [9] が、これまで実際的なタスクに供するレベルでは検討されてこなかった。そこで本稿では飛行しながら音源定位タスクを遂行する際のデータ送受を行うための通信とそのプロトコルを考え、ROS [10] に利用した分散型の処理システムとして提案する。提案システムの有効性を検証するため、開発したシステムを用いた実機での音源定位実験の結果も合わせて示す。

2 ドローンによる地上音源位置推定

本稿では音環境理解の中で最も基礎的機能の一つである音源位置の推定（音源定位）について着目する。ロボット聴覚では複数のマイクロホンから成るマイクロホンアレイを用いた音響信号処理を活用することが多く、対象音源の位置を把握する上で一般にアレイから見た音源方向（音到来方向）の推定が一般的であるが、ドローン聴覚での音環境理解では、対象が地上音源であることを想定すると、その方向だけではなく位置まで推定することが重要な基本機能になる。このため、音源方向に加えてその距離までを推定することが求められるが、一般には音源が音を発するのは時間的に間欠的で、また受信した対象信号もエゴノイズに埋没しやすいことを考えれば、複数地点で音源からの信号を受信して三角測量的にこれを統合するアプローチ [2] が困難な場合がある。そこで以下に示すように地形の簡単な幾何モデルを導入し、この知識に基づいて音源位置を推定する方法を考える。

2.1 聴覚ドローン

マイクロホンアレイを搭載したドローンで収録した音信号では、ロータ音を含む強いエゴノイズを含み、対象とする地上音源の信号は微弱なものとなるのが一般的である。このことから、マイクロホンを適切に配置して、雑音の影響を避けつつ、目的音を聞き分け易い構造を考える必要がある。Ishiki [3] はドローンの飛行特性とロータ雑音のモデルを組み合わせて、一様なリング状アレイの最適な大きさがあることを示しており、実際に図 1(a) に示すマルチロータヘリコプタによって音源定位実験を行っている。また、Hoshiba [4] が提案するマイクロホンアレイを本体からオフセットした位置に集約的に設置する（図 1(b)）ことで、エゴノイズの到来方向を幾何的に分離する方法もある。

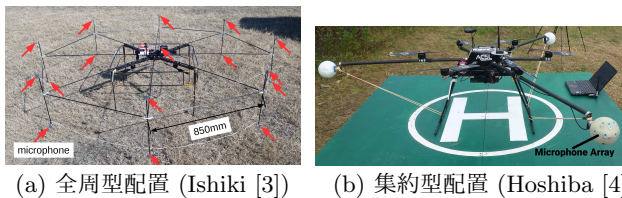


図 1: 聴覚ドローンのマイクロホンアレイの例

2.2 音源位置推定

マイクロホンアレイを用いて音到来方向を推定する手法が種々提案されており、本稿で考える音源位置推定では Multiple Signal Classification (MUSIC) 法 [11]

を用いる。本来、MUSIC 法は弱い白色雑音に対してロバストであることを利点とするが、ドローン聴覚に適した拡張として、ノイズの白色化処理を施す一般化固有値展開を用いる Generalized Eigenvalue Decomposition (GEVD)-MUSIC [5] や、エゴノイズ由来の誤観測を除去する手法 [6] などが提案されている。本稿ではこのような手法の詳細には立ち入らず、誤観測や不確かさが存在するものの、MUSIC 法あるいはその派生によって音到来方向（水平角、仰角）を音源方向としてある程度観測できるものとして議論を進める。

得られた音源方向情報から音源位置を推定するには音源までの距離を何らかの方法で推測する必要がある。ドローン聴覚では、空中から地上を見下ろす形での測定になること、また音の到達範囲が局所的であることから、ドローンの飛行地周辺の地形はある程度平坦であることを期待してよい。このことから、図 2 に示す平面で地形をモデル化し、音源方向の投影点を音源位置と推定することが考えられる [7, 8]。

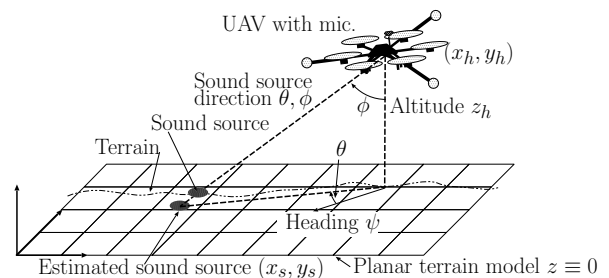


図 2: 地上の平面モデル

実際の飛行では、エゴノイズの影響や環境中に存在する対象外の音源、また誤検出などがあるため、得られた投影点を直ちに音源位置とすることは現実的ではない。複数の観測を統合し、観測や機体位置、地上モデルの不確かさを考慮して音源位置を推定する必要があり、例えば若林はカルマンフィルタと分離音の音響特徴を組み合わせることで地上の複数の音源を定位する手法 [8] を提案している。

3 聴覚ドローンシステム

3.1 分散データ処理

知能ロボットシステムは、サイズ・重量等の制約から、必要なすべての機能をその機体の実装することは一般には困難で、多くの場合、オペレータの居る基地局・制御局に一定の情報を送出する一方、基地局でロボットからの情報を分析・判断して意思決定を行って制御指令を定め、ロボットが基地局からの制御指令を受信して動作するのが現実的なアプローチである。ここで、ロボッ

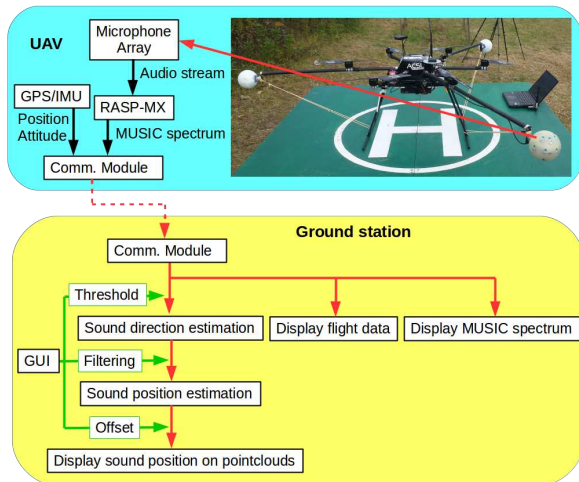


図 3: 地上音源位置推定システムの概略図

ト・基地局間の通信路に帯域の制限や遅延があることを考えると、ロボット本体でも一定の自律性や判断を課し、伝送する情報量を削減する必要がある。この考えに立てば、通信路の制約を満たすようロボットならびに基地局それぞれに処理を分散することが肝要であり、ロボット（ドローン）においても一定の情報処理が課されることになる。上述の地上音源の位置推定においても、センシングしたマルチチャンネルの音情報や機体情報を全て伝送するのは困難なため、本稿でも分散処理構造を採ることとした。システムの概略を図 3 に示す。

具体的な聴覚ドローンを実現する分散処理環境を実現するには、本稿では ROS (Robot Operating System) [10] を利用する。ROS は topic によるデータ共有に基づく複数ノードの並列実行を以って（主にロボットを対象とした）ソフトウェアシステムを実現するミドルウェアで、一般的な PC だけでなく組込プロセッサなどもサポートされていて可搬性が高い。さらに、ロボット聴覚ソフトウェア HARK でも対応しているため、聴覚ドローンの機能実現に適していること、またノードと呼ばれる処理プログラムの単位でシステムを分割できることから処理量の分配・調整が容易な点において、上記の分散処理を実現するに好適である。

なお、ROS の第一世代にあたる ROS1 では、システム上唯一の roscore と呼ばれる管理ノードによってデータ構造を統御するシンプルだが中央集権的なアーキテクチャであるが、近年開発の進む ROS2 [14] では動的にシステム構造の変更を可能とするデータ分散システム (Distributed Data System, DDS) を採っており、柔軟なシステムの実現を目指している (例えば [15] などを参照されたい)。本稿で考える分散処理システムは、システム構成は変化しないため ROS2 の DDS が供する動的なネットワーク調停機能は過剰であり、また後述

するように通信帯域の制約が厳しいため、QoS を保証するためのオーバーヘッドも看過できない。そこで、シンプルな ROS1 の ROS システムを機上・地上で並列に実行し、これらの二つのシステムのデータ (topic) のうち必要なものを相互に共有するアプローチを採用する。Schillinger は ROS1 でこのような実装として、複数の roscore で topic を TCP を用いて共有するノード [12] を提供している。本稿でも同様のアプローチで、制約のある経路上を考慮して UDP による複数 roscore を統合するノード `udp_relay` (後述) を開発し、分散 ROS システムを実現する。

3.2 データ伝送

3.2.1 地上音源位置推定のためデータ伝送

地上音源の位置推定では、マイクロホンアレイでの音響信号の同期収録、音到来方向の推定、機体位置・姿勢情報と音源方向の統合、音源位置の推定の手順を踏むことになる。強い騒音下で対象となる音源を検出する場合、対象音について事前情報を少なくすることが望ましく、収録しながら音信号を吟味して位置推定を行うことが適当である。一方、これを実現するために収録した全ての音信号を伝送するには広帯域の通信経路が必要となる¹。

本稿では MUSIC 法によって音源方向を推定することを考えている。MUSIC 法の算出する音源方向のパワー分布 (以下 MUSIC スペクトルと呼ぶ) は音源方向の分析フレーム毎に算出され、地上音源定位の場合、1Hz から数 Hz 程度でこの計算が行われるので、原信号に比べ少ない情報量で音源の存在を表現することが可能である。そこで、MUSIC スペクトルを地上局へと伝送し、地上局において閾値処理等を行って対象音源の検出と音源方向の推定するものとする。さらに、MUSIC スペクトルの算出タイミングにあわせて機体の位置・姿勢が得られれば良く、この点でも伝送量削減の効果がある。また、MUSIC スペクトルは一般に対数オーダで表現することが多く、音源の存在しない領域の値は比較的狭い範囲に収まる傾向があり、適当な符号化によってさらに情報圧縮が可能と期待される。

3.2.2 UDP 転送ノード `udp_relay`

伝送に必要なデータ量の削減とともに、飛行条件の変化など環境変動によって伝送路が不安定となることも考慮する必要がある。本稿では、通信プロトコルとして

¹例えば石木 [9] は地上局に高利得アンテナを利用した無線 LAN をよって 16ch のマイクロホンアレイの音響信号を地上へと伝送することに取り組んだが、安定して通信できる距離として 75m 程度が限界であった

リアルタイム性が高く、通信路の一時的な切断に対してロバストな UDP に基づいて複数の roscore 間でデータを送受する ROS 上のノードとして udp_relay を開発した (図 4)。基本的な構造は Schillinger の tcp_relay [12] を UDP 用に改修したものであるが、以下の機能の拡張がある。

1. 一つの UDP ポートで複数の topic を扱うことが出来る
2. topic を適宜シリアライズするとともにチェックサムによりデータの健全性が保証する
3. topic データを符号化して送受する (bzip2 [13] 対応)

伝送路中にシリアル通信のように機能の制限された経路がある場合、異種のデータを混在させる上で、上記 1, 2 を利用可能である²。また、伝送路が不安定でデータ欠損が生じた場合などにエラー処理を行うため、2 の健全性チェックを活用する。上述の通り、MUSIC スペクトルのように符号化によって伝送量の削減が期待される場合、3 を用いることが出来る。

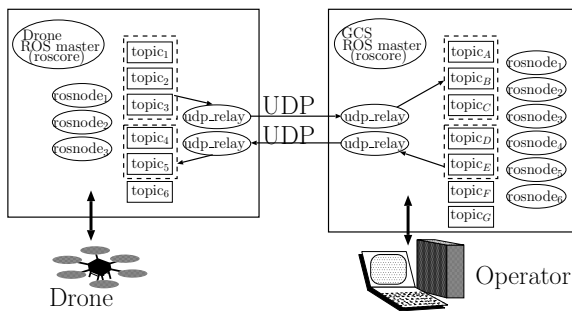


図 4: udp_relay による分散 ROS 環境

4 評価実験

提案した分散処理システムの有効性を検証するため、伝送実験ならびに実際の聴覚ドローンによる定位実験を行った。開発したシステムは、シングルボード PC 上の ROS システム (図 5) ならびに基地局 PC の ROS システムに実装した。特徴的な機上システムの諸元を表 1 にまとめる。

予備実験の結果を踏まえて MUSIC スペクトル、GPS (ROS NavSat/FIX), IMU (ROS sensor_msgs/IMU) をそれぞれ 1.6Hz, 2Hz, 2Hz の頻度で地上局へ送り、地上局からは RTK-GPS 用の RTCM3 信号を 1Hz で機

²udp_relay も tcp_relay と同じく複数のノードで伝送を分担することで、複数のポートに topic を振り分けることも出来る。

上 PC へと送信するものとした。また、全てのデータに対して bzip2 による符号化を施した。

4.1 データ伝送

伝送情報の主たる部分は音響信号であるので、まず機上 PC から基地局への通信について評価を行う。ここでは伝送量を評価するのが目的であるので、十分な帯域と安定した伝送経路として機上 PC と基地局の経路を有線 LAN で接続したものを用いる。計測には基地局側でインターフェースの通信量を 10 分間計測し、この平均を用いることとした。

本システムでの結果と、udp_relay の符号化法 (bzip2) を適用しなかった場合、また MUSIC スペクトルのパケットに対してのみ符号化法を適用した場合を、図 6 に示す。比較として、マイクロホンアレイで収録した全ての音響信号を送信する場合 [9] も合わせて示す。

図より、提案システムでは 30kbps 程度で必要な情報を送出できていること、また bzip2 による符号化によって 4 割程度の伝送量を削減していることが分かる。また、bzip2 の効果は MUSIC スペクトルに適用した場合に顕著であり、機体の位置・姿勢情報のような小さいサイズのデータパケットを符号化する場合、その効果が限定的であることが分かる。全ての音響データを伝送する従来法に比べた場合、およそ 200 分の 1 程度まで伝送量を削減しており、本稿での分散システムの分割法に効果があると言える。

4.2 音源位置推定実験

次に、実際の聴覚ドローンにシステムを搭載し、空中で収録した音情報から地上の音源を定位できるかを検証した。

実験は福島ロボットテストフィールド (福島 RTF) で行い、実験で用いたドローンを図 7 に、またフィールド内の音源位置や飛行計画の概略を図 8 に示す。ドローンと基地局の間には情報通信機構の開発したタフ・ワイヤレス技術 [16, 17, 18] を用いており、聴覚ドローンの他にもう 1 機のドローンに中継用伝送装置を搭載し、データ伝送を中継することで 250m 強の通信路を確立している。ドローンは離陸地点より離陸し、音源付近へと飛行して収録・定位を行い、その後着陸地点へと自動飛行で帰還する。

図 9 に、実際に udp_relay によって受信した topic の頻度を示す。図では各 topic の実際の受信頻度 (Hz) を積み上げ形式で示している。ここで、本実験では地上局から機上 PC に向けた機体の操作信号ならびにドローン本体のテレメトリ信号 (約 8kbps) も同じ経路を利用して送受信しており、基地局への送信には合計で



図 5: 装置外観

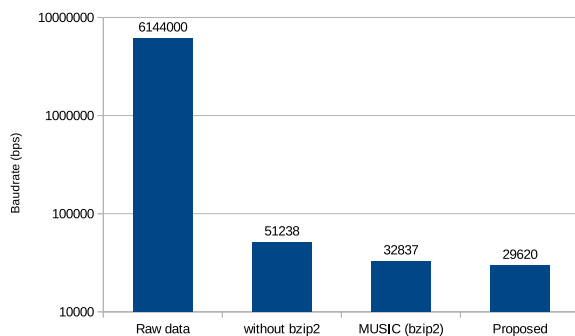


図 6: 伝送量の比較

音響データをそのまま伝送するもの (Raw data) [9], 符号化を施さないもの (without bzip2), MUSIC スペクトルのみに bzip2 符号化したもの (MUSIC bzip2), 提案法 (Proposed) の伝送量 (bps) を示す。

40kbps 程度の帯域が必要であったため, 実験で用いたタフ・ワイヤレス通信では, 仕様上 58.92kbps の通信帯域を有するよう設定した。

実験開始とともに topic を受信するようになり (30 秒付近), その後安定した受信を行っていた。160 秒付近で一時的に通信が行えない状態となり, それ以降受信率は変動しながらも, 一定の通信を確保していた。160 秒付近では, 地上付近へと接近して音源定位を行った後, 上昇して帰還するタイミングで, 高度の大きな変化に伴って通信路に影響があった可能性がある。MUSIC スペクトルにおいて変動傾向が顕著であるが, これは MUSIC スペクトルのパケットが大きいため, 伝送中でのデータ欠損の影響を受ける確率が高いためと考えられる。

このようにデータの一部に欠損の有るものであるが, この時の音源定位結果を図 10 に示す。図では, 事前にレーザ測量した点群データ上に定位された音源位置を青丸で示しており, 正しく音源位置を検出出来ていることが分かる。

表 1: 機上システム諸元

SBC	Raspberry Pi3B+ (Raspbian, Jessie base)
ROS	Indigo
音響信号処理	HARK-Embedded [4] (System Infrontier, アレイ統合)
GPS	NEO-M8P (u-blox)
IMU	MTi-3 (X-sens)
重量・大きさ	1.0kg, 150x150x75(突起部含まず)
消費電力	約 1W (定常状態 0.7A@12VDC)
	防水・防塵



図 7: 実験に用いた聴覚ドローン

5 おわりに

本稿では, ドローン聴覚での地上音源位置推定のタスクを題材に, ドローンと地上局の分散処理とそのためデータの転送について考察した。聴覚ドローンが音環境情報の収集にある以上, 出来るだけ多くの情報を地上局へと伝送することが望ましいが, 実際には伝送路の帯域の制約を考えれば, 事前の処理を機上で行って伝送量の削減が必要である。ここでは, 適当な符号化による情報圧縮機能を持った分散 ROS システムを提案し, MUSIC 法を用いた音源定位において MUSIC スペクトルを伝送することで現実的な伝送量とすることが出来ることを示した。また, 実際のドローンを用いた実験においても, 地上音源の位置を推定できることを示し, 提案するアプローチの有効性を確認した。

今後, 目的音の伝送などより一般的なタスクへの拡張が必要となる。このためには, 例えば音声信号の不可逆圧縮など, より情報削減効果の大きい方法を検討することが考えられる。



図 8: 実験環境の概略図

定位実験の概略を示す。図左側からドローンは離陸し、図中央の屋根様の物体そばの音源（星印、人）に接近し、音源定位を行う。その後、離陸地点へと帰還する。地上局は図右下の位置（飛行エリアから約 250m の地点）に設置した。

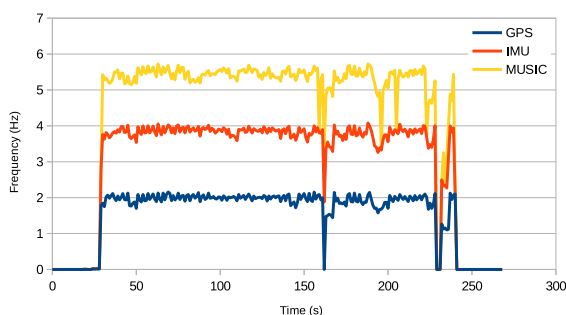


図 9: topic 受信率

GPS, IMU, MUSIC の topic の受信頻度を表している。ここでは総合的な通信状況を示すため、GPS, GPS+IMU, GPS+IMU+MUSIC のように積み上げたレートで Hz 単位で図示している。

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・チャレンジの助成を受けたものです。また、評価実験において、福島 RTF で測定した三次元点群データをご提供頂いた早稲田大学鈴木太郎先生に感謝致します。

参考文献

- [1] K. Nakadai, et al. "Active audition for humanoid." Proceedings of AAAI/IAAI, pp. 832-839, 2000.
- [2] K. Washizaki et al.: Position Estimation of Sound Source on Ground by Multirotor Helicopter with Microphone Array, *Proc. of 2016 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robot. and Sys.*, pp. 1980-1985 (2016).
- [3] T. Ishiki et al.: Evaluation of Microphone Array for Multirotor Helicopters, *J. of Robot. and Mechatro.* (Fuji technology press), **29**-1, pp. 168-176 (2017).

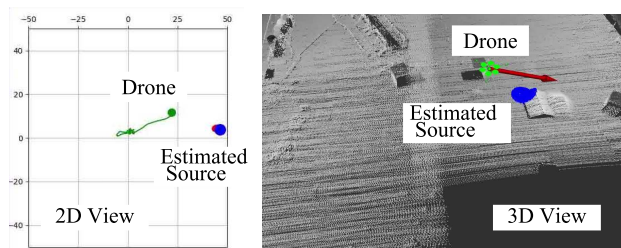


図 10: 音源位置の推定結果

音源位置推定の様子を平面図とポイントクラウド上での可視化したもの。図中の緑色はドローンの位置・軌跡を、青は推定された音源位置を示しており、赤い点・矢印はリアルタイムでの音源方向を示している。

- [4] K. Hoshiba et al.: Design of UAV-Embedded Microphone Array System for Sound Source Localization in Outdoor Environments, *Sensors*, **17**-11, pp. 2535 (2017).
- [5] 奥谷啓太他: クワドコプタ搭載のマイクロホンアレイを用いた屋外音環境理解の逐次雑音推定による向上, *日本ロボット学会誌*, **31**-7, pp. 676-683 (2013).
- [6] 鷺崎海他: MUSIC スペクトルにおけるエゴノイズ由来のピークの除去, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 1P1-10a5 (2016).
- [7] 長峰諒英他: 屋外音環境理解における音源検出の性能評価と可視化, *AI チャレンジ研究会, SIG-Challenge-B402-03* (2014).
- [8] 若林瑞保他: 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, *AI チャレンジ研究会, SIG-Challenge-B492-3* (2017).
- [9] 石木隆洋, 公文誠: マルチロータヘリコプタからのセンサデータの連続伝送, *第 33 回日本ロボット学会学術講演会論文集*, RSJ2015AC1L3-03 (2015).
- [10] M. Quigley et al.: ROS: an open-source Robot Operating System, *ICRA Workshop on Open Source Software* (2009).
- [11] R. Schmidt: Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, **34**-3, pp. 276-280 (1986).
- [12] P. Schillinger: tcp_relay, https://github.com/pschillinger/tcp_relay.git (最終閲覧: 2018/11/20).
- [13] bzip2: <http://www.bzip.org/> (最終閲覧: 2018/11/20).
- [14] Open Source Robotics Foundation (OSRF): ROS2, <https://github.com/ros2/> (最終閲覧 2018/11/20).
- [15] Y. Maruyama et al.: Exploring the performance of ROS2, *2016 International Conference on Embedded Software (EMSOFT)*, pp. 1-10 (2016).
- [16] 加川敏規他: タフ・ロボティクスのためのタフ・ワイヤレス技術の研究開発ー伝送遅延時間保証型マルチホップネットワークー, *ロボティクス・メカトロニクス 2017 講演会論文集*, 1P1-R07, (2017).
- [17] 加川敏規他: 見通し外での高信頼ドローン運用のための 169MHz 帯/920MHz 帯切換え型マルチホップ制御通信システムの開発, *高信頼制御通信研究会*, **117**-348, pp.275-278 (2017).
- [18] 加川敏規他: 920MHz 帯マルチホップ無線通信システムを用いたドローン制御およびセンサデータ伝送の実証実験, *高信頼制御通信研究会* (2018/12 発表予定).