

電波不感地帯における生態系モニタリング利用に向けた LoRaWAN の性能調査とドローン活用

梶田 宗吾¹ 小倉 且也¹ 本田 美輝¹ 山田 遊馬¹ 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹ 高井 峰生^{1,2}

概要 : IoT やセンサー技術の高度化にともない、野生生態系を様々な側面からみえる化し、生態系サービスを定量化することで、経済的・学術的価値を向上させることへの期待が高まっている。現在、北海道大学が中心となり、鮭に装着したロガーで河川遡上行動をセンシングし、そのデータを陸上の中継局を介してクラウドに集約する技術開発を行っているが、我々の研究グループは、同プロジェクトにおいて中継局をどの地点に設置すべきを電波伝搬の側面から検討している。対象とする河川域はその大半が LTE の不感地帯であり、河岸付近の各中継局からの LTE データ送信は不可能である。そのため、LTE 通信可能地域までの数 km 以上の距離を適切な通信方式で送信することが求められる。加えて河川域では安定電源供給が期待できないため、電池駆動が可能な省電力通信も求められる。これに対し、本研究では省電力で長距離通信が可能な LoRa を利用し、特に上流付近まで遡上した鮭の産卵行動などの貴重なセンシングデータの集約をマルチホップ通信で実現するための通信特性の基礎調査を実施したため、それについて報告する。森林・河川域においては、樹木や地形的起伏が電波伝搬に大きな影響を与えるため、見通し条件がよい場合は特性が大きく異なる。そういった森林環境において LoRa の測定実験を行った結果、最大で約 1.8km の通信が可能であったことを確認している。また、通信特性調査を対象河川域で行うことは大きな労力を要するため、LoRa を搭載したドローンを用いたリンク測定実験の実現に向けた基礎実験を実施したため、それについて述べる。

1. はじめに

人類は野生生態系から直接的・間接的に恩恵を享受することで生活を営んでおり、人間活動の持続性を保証するには生態系の機能保全が必要不可欠である。しかし、近年の人口増加やそれに伴う大規模開発などの影響により、野生生態系の機能が大きく低下していると言われている。生態系機能は生物多様性によって支えられているとされており、その保全を目的とし、我が国では生物多様性国家戦略 [1] を策定している。こうした動きの中で、生物多様性・生態系機能の必要性を社会に浸透させるため、人類が生態系から享受している恩恵を生態系サービスとみなし、その経済的価値を定量化することが求められている。また、この定量化の前提として、これまで困難であった森林・河川域などの電波不感地帯における野生生態系を、様々な側面からみえる化することに注目が集まっている。

これに対し、北海道大学が中心となり、川と海を行き来

する鮭をみえる化対象のモデル生物とし、河川遡上時の鮭の行動情報を、クラウドまで自動的に集約するシステムの構築を目的としたプロジェクトが実施されている [2]。我々の研究グループも同プロジェクトに参画し、システム構築技術開発のための研究を実施している。同プロジェクトでは、図 1 に示すような北海道の河川を遡上する鮭を対象とし、その行動情報をモニタリングおよび可視化することを目的としている。具体的には、図 2 のように鮭の背びれ部分にセンサ内蔵のロガー [3] を装着し、鮭の位置や加速度、深度などの行動情報を収集する。ロガーに蓄積された行動情報は、図 3 に示すように、鮭が陸上中継機との通信範囲に入った際に、中継器側に送信される。この送受信には、ライセンス不要の 429MHz 帯が使用され、水深 1m においても半径 8m の範囲で通信が可能である。しかし、こうして陸上中継機に集約された鮭の行動情報を携帯通信網のサービスエリア外からクラウドサーバーに集約するには、独自に無線通信システムを構築する必要がある。

しかし、人里離れた森林域・河川流域に、既設の通信インフラに依存しない独自の通信ネットワークを構築するには様々な困難が伴う。まず、鮭が遡上する河川域でセンシングを実施するためには、鮭が遡上する上流区域から、

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University

² カリフォルニア大学ロスアンゼルス校
University of California, Los Angeles



図 1 モニタリングの対象河川（北海道）



図 2 鮭に装着したセンサ

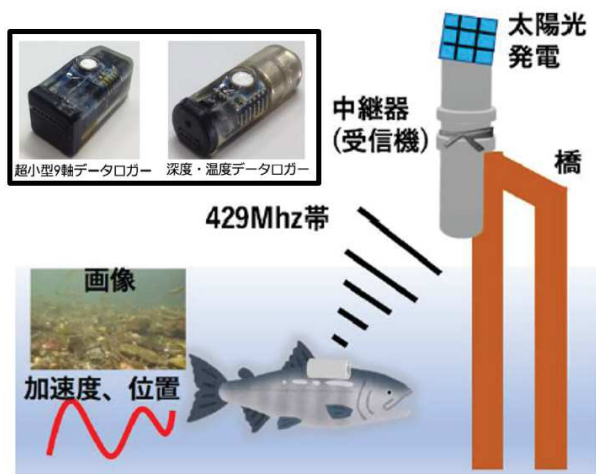


図 3 水中の鮭からの行動データ収集

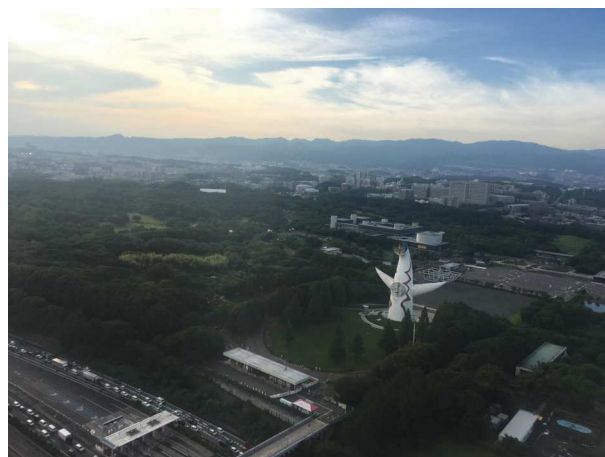


図 4 万博記念公園（大阪府）

る LoRAWAN システムの構築を目指す。

一般に、フィールドにおけるマルチホップネットワークを構築する場合、設置個所の選択が極めて重要となる。特に、図 1 に示すような森林・河川域に中継局を設置する場合、地点間に存在する樹木や地形的な起伏が電波伝搬に大きな影響を与えると想定される。また伝搬損失量は樹木の特徴（樹木の高さ、密度、幹の太さ、葉の形状と密度など）にも依存し、またリンク測定事例もほとんどないため、十分な知見は得られていない。これに対し本研究では、そういった樹木が LoRAWAN の通信リンク性能に与える影響を河川域に類似する様々な環境で調査し、置局設計のためのデータ収集を行っている。

まず、大阪府の万博記念公園（図 4）および能勢町において LoRaWAN のリンク測定実験を実施した。その結果、樹木や起伏による減衰の影響下で見通しが無い環境において、最大で約 1.8km 程度の通信距離でも通信可能であることが確認できた。一般に、LoRaWAN は見通し環境で最大 30km の通信も可能とされている。しかし本研究が対象とする森林・河川域環境では樹木の影響でその 5% 程度の通信距離とする必要があり、中継局設置のための重要な指標が得られた。また、前述の進入困難地点におけるリンク性能試験を行うため、ドローンに LoRa 無線通信モジュールを搭載した測定用プロトタイプを構築し、大阪府能勢町においてリンク測定実験を実施した。ドローン操作の安全のため、同実験はドローンが目視可能な見通しのよい環境において実施したものの、連続的な距離変化に対する LoRAWAN のリンク性能特性の変化を計測することができ、貴重なデータが得られたと考える。また、進入困難地点へのドローン投入に一定の目的が得られ、今後の置局設計の労力を大幅に削減できる可能性があることを示せたと考えている。

LTE サービスエリアまでの数 km から 10km 程度のデータ通信を実現する必要がある。一方でそれらの領域では電力インフラはなく、人や車両が進入困難な領域がほとんどである。そういった厳しい制約下においては、なるべく低コストかつ長期にわたり維持管理がなくても持続可能なネットワークを構築することが求められる。

そこで本稿では、省電力で動作し広域をカバーすることが可能な LPWA (Low Power Wide Area) を用いて生態系モニタリング用ネットワークを構築するための検討を行う。LPWA の中でも、ライセンス不要な 920MHz 帯を利用する LoRa [4] を利用し、鮭の行動情報を前述の陸上中継機から携帯通信網の通信可能域までマルチホップで配送す

2. 関連研究

2.1 野生生態系モニタリング

野生生態系や動物の行動のモニタリングは従来広く研究されているが、近年のIoTならびにセンシング技術の発展に伴いその高度化も加速しつつある。[5]では、動物福祉の観点から、スマートコンピューティングとセンシング技術の活用により、動物と人間のコミュニケーション・動物の行動やトラッキング・動物の健康状態・人の健康状態といった指標でモニタリングが実施されていることが示されている。[6]では、ワイヤレスセンサネットワークを活用した野生生態系モニタリングシステムが提案されている。また、野生生態系モニタリングにおいては、生態系を妨害することなくモニタリングを実現するため、ドローンの活用が期待されている[7]。例えば、[8]では、熱帯や極地の環境における野生生物のモニタリングにドローンを活用し、ドローンによる観測は従来の観測よりもより良質のデータを得ることができることを確認している。他にも、[9]では、ドローンと生物認識のための動画処理AIを併用した野生生態系モニタリングシステムが提案されている。いずれの研究においても、システムの維持コストや設置コストの低減が極めて重要であり、進入困難地域におけるモニタリングシステムの共通課題として認識されている。

2.2 LoRa ネットワーク

IoT (Internet of Things) の普及を背景に、省電力で動作する広域な無線通信システムとしてLPWA技術が近年注目を集めている。その中の一つであるLoRaWANにおいても、キャパシティ評価[10]やスケール評価[11]が盛んに実施されている。[12]では、大学キャンパス全域を対象とした学生の健康状態のモニタリングを実施するために、LoRaの活用を検討している。[13]では、LoRaがスマートシティにおける基盤通信システムとして導入されたことを想定した場合、どの程度の端末密度で運用可能かを検証している。同実験の結果から、3.8ヘクタールあたり120ノード程度で運用可能であることが確認されている。また、現在ではIoTを前提としたスマートシティアプリケーションにおけるLoRaの活用事例が多く見られるなか、[14]は郊外でのLoRaの活用を検討している。同事例では、植生がLoRaの通信範囲を制限することから、それらを考慮した置局設計の重要性が述べられている。本研究においては、植生のみならず、地形的な起伏なども多い河川域ならびに森林域における置局が必要であり、それらを考慮した置局設計が必要であるとともに、進入困難地域におけるリンク測定についても検討している点が異なると考えられる。

3. リンク測定実験

樹木や建造物による電波伝搬の影響を確認するためのリンク測定実験を行うため、大阪府吹田市にある万博記念公園(図4)において、LoRaのリンク測定実験(電波強度測定ならびに通信実験)を実施した。また、LoRaWAN構築に係る労力の削減を目的として、LoRaモジュール[15]を搭載したドローンを試作し、大阪府能勢町にあるドローンフィールドにおいて測定実験を実施した。加えて、ドローンフィールドが山間部にあったため、植生と地形的な起伏を組み合わせた見通しのない環境下でのLoRaの通信範囲を確認するため、LoRaモジュールを車両に搭載しリンク測定実験を実施した。以下ではこれらの実験の結果の解析ならびに性能考察を行う。

3.1 万博記念公園におけるリンク測定実験

図4に示した万博記念公園の俯瞰図を図5に示す。万博記念公園は外周道路に囲まれた楕円形に近い形状をしており、楕円形の長径にあたる距離は約1.7kmである。後述の山間部にある能勢ドローンフィールドと比較すると、園内は起伏の少ない地形であるものの、多くの木々が生えていることを活用し、植生や建造物による見通しのない環境下におけるLoRaの通信距離を確認する。

実験では2つのLoRaモジュールを用意し、2台のノートPCにそれぞれ接続することで、送信機および受信機とした。送信点は東側の大きく開けた広場(図5右側の赤いピンが示す場所)に固定し、ノートPCを手で持ち上げるによりアンテナ高(約1.5m)を確保している。受信点は、受信機であるノートPCを携えて園内を歩いて回り、送信点からの距離はおおよそ等しいが、介在する遮蔽物が異なる5地点を選択し、観測した受信電波強度を比較することで、遮蔽物が電波伝搬および通信に与える影響を明らかにする。具体的には、図5の青いピンが示す5箇所を受信点とし、送信点と同様にノートPCを掲げることでアンテナ高(約2m)を確保している。送信点と各受信点の間の距離と介在する遮蔽物を図6に示す。確実に通信できることを確認するためにPoint1を、建造物の影響を確認するためにPoint2とPoint5を、植生の影響を確認するためにPoint3とPoint4を選定した。また、Point1、Point2およびPoint3はおおよそ同一直線状に位置しているため、距離による減衰の傾向も観測できると考える。LoRaモジュールの通信パラメータとして、帯域幅は6.5kHz、拡散率(sf)は12とした。これは最も通信距離が長くなる設定に相当する。

測定結果を図7および表1に示す。LoRaの受信電波強度は分散が非常に大きくなるのが従来研究において言及されていることから、極端な外れ値を除外する目的で、各

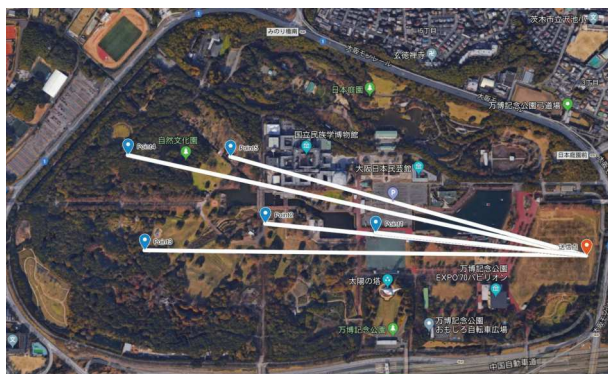


図 5 実験環境 (万博記念公園)

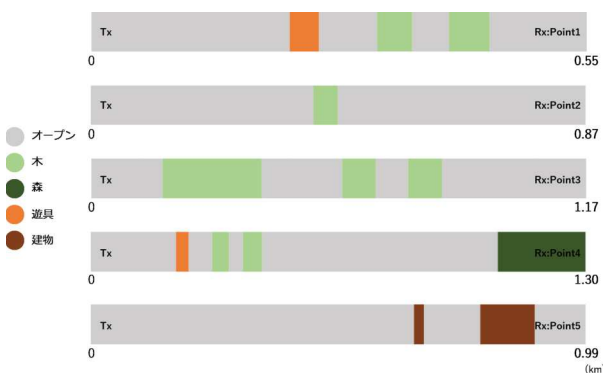


図 6 送受信機間の距離と遮蔽物

受信点における複数の受信電波強度の中央値を示した。この結果より、Point1 から Point3 へ受信点が送信点から遠ざかる方向へ移動するに従って、受信電波強度の減少トレンドを確認することができた。また、Point4 では、図 8 に示すように受信点付近が木々に囲まれている環境で植生影響があるものの、十分な受信電波強度で LoRa 通信が可能であることを確認することができた。一方で、Point5 では、大きな建造物の影にあたる部分に受信点が存在していることにより、Point4 より距離が短い経路にもかかわらず、大きな減衰が確認された。これらの結果から、本研究で対象とする森林・河川域での置局設計においては、木々の少ない河川上空などを利用することで、遮蔽物のできるだけ少ない伝搬経路を確保すべきだと考えられる。加えて、アンテナ高について、今回の測定実験においては手で持ち上げることで高さを確保したが、図 9 に示すように、地表付近で LoRa 端末を設置し測定を行った場合だと、送受信を一度も確認することができなかった。これより、今後の測定実験や実際の設置においては、アンテナ高をできるだけ高く設置する方法の模索などが必要だと考える。

3.2 能勢ドローンフィールドにおける測定実験 (ドローン)

高精度な飛行が可能なドローン (DJI M600 [16]) に LoRa のモジュールと Raspberry Pi3, ならびにそれらを駆動するバッテリーを搭載することで、置局設計に利用可能なドローンの試作を行った。このドローンを遠方に飛行させる

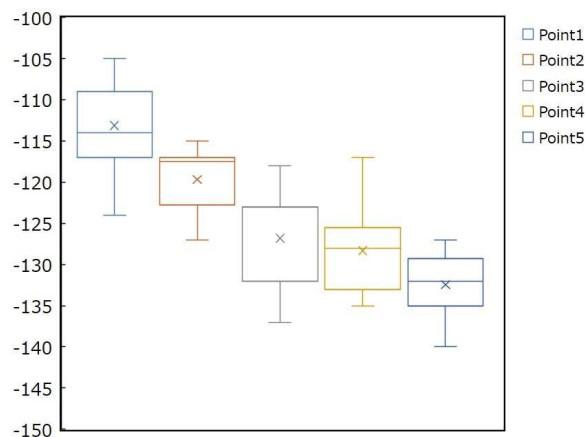


図 7 リンク測定結果 (万博記念公園)

表 1 リンク測定結果 (万博記念公園, 中央値)

Location	受信電波強度 (dBm, Median)
Point1	-114
Point2	-117.5
Point3	-123
Point4	-128
Point5	-132



図 8 Point4 での測定風景

ことで通信実験を実施し、設置労力の削減可能性を検証する。

実験環境を図 10 に示す。ドローンに搭載した LoRa モジュールを送信端末とし、受信端末は地上に設置した。両端末の LoRa のアンテナは垂直上向きに固定しており、地上側のアンテナ高は約 1m とした。LoRa モジュールの通信パラメータは、万博記念公園におけるものと同様、最も通信距離が長くなる設定 (帯域幅 6.5kHz, 拡散率 (sf) 12) としている。通信実験の開始とともに、ドローンが障害物と接触することがないように地表から 50m まで上昇させた後、3m/s の速度で約 1km 遠方まで移動させる設定とした。ドローンの制御は DJI GS Pro (DJI 純正アプリ) で行っ



図 9 送信機のアンテナ高 (送受信不可の場合)

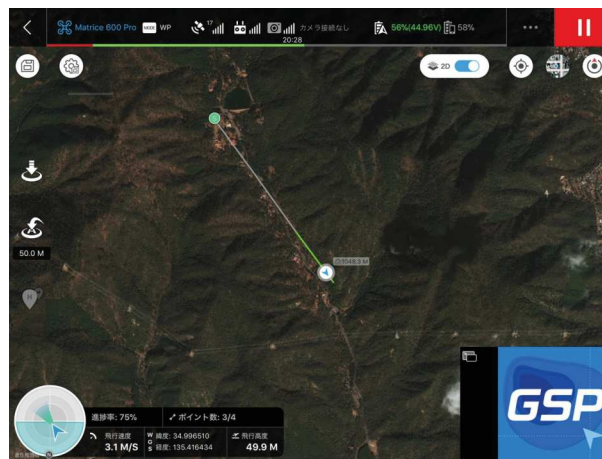


図 11 ドローンフライトログ (DJI GS Pro)

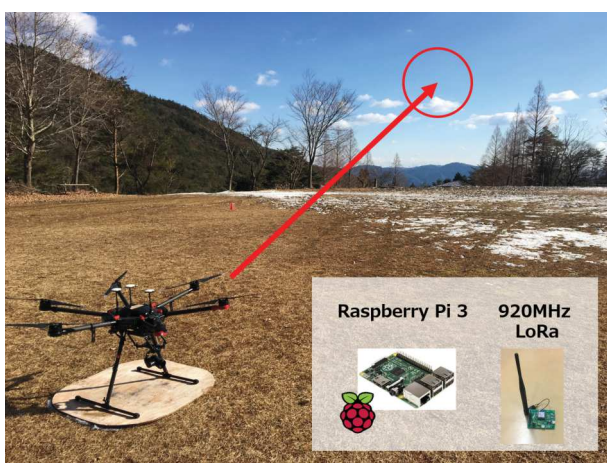


図 10 実験環境 (能勢・ドローン)

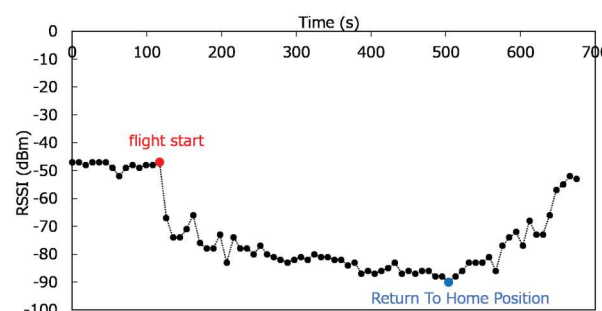


図 12 測定結果 (能勢・ドローン)

た。その様子を図 11 に示す。このもとで、送信端末から受信端末へ 6 秒ごとに 50byte のデータを送信し、その受信可否を記録するとともに、電波受信強度も併せて記録した。

受信電波強度の変化を図 12 に示す。縦軸は受信電波強度を表し、横軸はドローンの移動に伴う時間変化を表している。この図に示すように、ドローンが遠方に移動するに従い、受信電波強度が徐々に低下することがわかり、ドローンを帰還させると再び増加トレンドに転じることがわかる。図 10 に示したように、本実験環境は見通しが良い環境で行ったため、LoRa が通信不能な状況になることはなかったものの、ドローンを活用することで受信電波強度の連続的な変化を記録することができ、置局設計への活用 に一定の目途が得られている。

3.3 能勢ドローンフィールドにおける測定実験 (車両)

加えて、樹木等が送受信モジュール間に存在する環境を想定し、ドローンに搭載したモジュールを車両に搭載し、地上モジュールから離れる方向 (標高が下がり、かつ遠ざかる方向) に車両を移動させ、通信の状況を観察した。LoRa モジュールは、車内の助手席に座る人が保持するノート

PC に接続されている。この実験環境を図 13 に示す。この環境では、地形の起伏が存在し、かつ、樹木を介在するため、送受信端末間に見通しはない。

この測定結果を図 14 に示す。縦軸は受信電波強度を表し、横軸は車両の移動に伴う時間変化を表している。試作したドローンでの測定結果 (図 12) と同様に、車両が遠方に移動するに従い、受信電波強度が徐々に低下することを確認した。また、見通しのない環境においても、最大で約 1.8km の距離で -139dBm で通信できることを確認した。これは、PER (Packet Error Ratio) が 1%未滿時の受信電波強度の最小レベルが -142dBm 程度である [15] ことを考慮すると、妥当な結果である。この結果から、およそ 1~1.5km の範囲で中継局を配置するマルチホップ通信により、見通しがいい電波不感地帯からでもデータ集約が可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、置局設計の基礎検討として、樹木や地形的な起伏による電波伝搬の影響を確認するため、万博記念公園および能勢ドローンフィールドにおいて LoRa のリンク測定実験を実施した。その結果として、樹木や起伏による減衰の影響下で見通しがいい環境において、最大で約 1.8km 程度の通信範囲を確認した。LoRa は見通し環境であれば最大 30km が通信範囲とされていることに対し、通信範囲

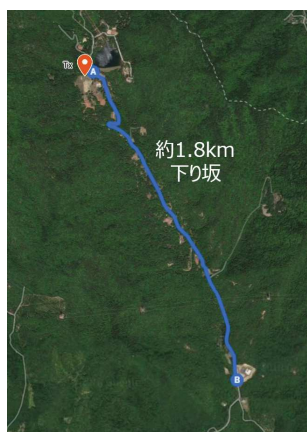


図 13 実験環境 (能勢・車両)

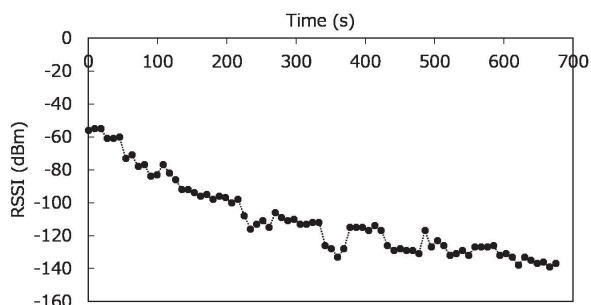


図 14 測定結果 (能勢・車両)

が大きく制限されることがわかった。さらに、本研究が対象としている森林・河川域において、1.5km 程度の範囲で中継機を配置するマルチホップ通信によりデータ集約が可能であるとの知見を得ることができている。また、置局設計や設置時の労力削減の検討として、近年様々な分野での利活用が期待されているドローン [16] を用いたリンク測定実験を行った。具体的には、LoRa モジュールを搭載したドローンを試作してリンク測定実験を実施し、その適用可能性を検討した。これにより、設置候補点に無線機のアンテナを搭載したドローンをホバリングさせて実際のリンク性能試験を実施することで、多くの置局候補点で効率的なリンク性能試験が実施可能となり、置局設計に関わる労力を大幅に削減することが可能になる。また、同時に、受信電力測定とドローンの飛行制御と連動させることでアンテナ高や角度の調整を実現し、これまでの手作業によるアンテナ設置時の労力削減できる可能性もあると考えている。

今後の課題として、今回のリンク測定実験により得られた知見と我々が開発したドローンを用いた地形データ取得技術 [17] の併用による置局設計アルゴリズムの検討を行う。具体的には、地形 (起伏) データとして国土地理院 [18] の情報を参照しつつ、[17] により、図 15 に示すような物体認識によって植生などを把握することで、地形や植生を考慮した置局設計アルゴリズムを提案する。加えて、試作した LoRa モジュールを搭載したドローンを改良することで、置局設計の労力の削減を確認することを予定している。

(a) 元の空撮画像



(b) 切り出された植生や建造物

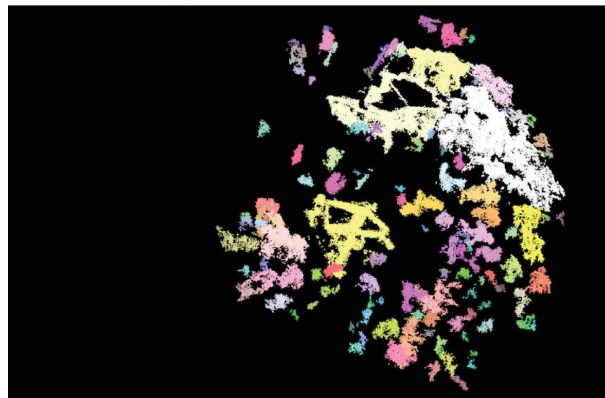


図 15 オブジェクト切り出し

謝辞

本研究開発は総務省 SCOPE (受付番号 175001002: 森林・河川等電波不感地帯における野生生態系の見える化) の委託を受けたものです。

参考文献

- [1] 環境省: 生物多様性国家戦略 2012-2020, http://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/initiatives/files/2012-2020/01_honbun.pdf.
- [2] 宮下和士: 「森林・河川等電波不感地帯における野生生態系の見える化」の概要. http://www.soumu.go.jp/main_content/000530692.pdf.
- [3] Biologger: Biologging Solutions Inc., <https://biologging-solutions.com/>.
- [4] LoRa: LoRa Alliance, <https://www.lora-alliance.org/>.
- [5] Jukan, A., Masip-Bruin, X. and Amla, N.: Smart Computing and Sensing Technologies for Animal Welfare: A Systematic Review, *ACM Comput. Surv.*, Vol. 50, No. 1, pp. 10:1–10:27 (2017).
- [6] Dyo, V., Ellwood, S. A., Macdonald, D. W., Markham, A., Mascolo, C., Pásztor, B., Scellato, S., Trigoni, N., Wohlers, R. and Yousef, K.: Evolution and Sustainability of a Wildlife Monitoring Sensor Network, *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '10, New York, NY, USA, ACM, pp. 127–140 (2010).
- [7] Julie, L., Jonathan, L., Jean, S., Philippe, L. and Cdric, V.: Are unmanned aircraft systems (UASs) the future of wildlife monitoring? A review of accomplishments and

- challenges, *Mammal Review*, Vol. 45, No. 4, pp. 239–252.
- [8] Hodgson, J. C., Baylis, S. M., Mott, R., Herrod, A. and Clarke, R. H.: Precision wildlife monitoring using unmanned aerial vehicles, *Scientific Reports*, Vol. 6 (2016).
- [9] Gonzalez, L. F., Montes, G. A., Puig, E., Johnson, S., Mengersen, K. and Gaston, K. J.: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Artificial Intelligence Revolutionizing Wildlife Monitoring and Conservation, *Sensors*, Vol. 16, No. 1 (2016).
- [10] Mikhaylov, K., Petäejäjaervi, J. and Haenninen, T.: Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology, *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference*, pp. 1–6 (2016).
- [11] Wixted, A. J., Kinnaird, P., Larijani, H., Tait, A., Ahmadinia, A. and Strachan, N.: Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks, *2016 IEEE SENSORS*, pp. 1–3 (2016).
- [12] Petjirvi, J., Mikhaylov, K., Hmlinen, M. and Iinatti, J.: Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring, *2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, pp. 1–5 (2016).
- [13] Bor, M. C., Roedig, U., Voigt, T. and Alonso, J. M.: Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?, *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM '16*, New York, NY, USA, ACM, pp. 59–67 (2016).
- [14] Iova, O., Murphy, A. L., Picco, G. P., Ghio, L., Molteni, D., Ossi, F. and Cagnacci, F.: LoRa from the City to the Mountains: Exploration of Hardware and Environmental Factors, *Proceedings of the 2017 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, USA, pp. 317–322 (2017).
- [15] EASEL: LoRa モジュール ES920LRB.
<http://easel5.com/>.
- [16] DJI: MATRICE 600 Pro, <https://www.dji.com/jp/matrice600-pro>.
- [17] 小倉且也, 山田遊馬, 梶田宗吾, 山口弘純, 東野輝夫, 高井峰生: 複数の立体物で構成された三次元点群の切り分け手法の検討, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2018) シンポジウム, pp. 236 – 246 (2018).
- [18] 国土地理院: 基盤地図情報サイト.
<http://www.gsi.go.jp/kiban/>.