

## (50) メッセージフェリー手法を用いた現地観測データ収集システムの設計とその初期検証

宇佐美 拓真<sup>1</sup>・宮田 秀介<sup>2</sup>・井上 公<sup>3</sup>・瀬川 佳祐<sup>1</sup>・  
曾根 卓朗<sup>1</sup>・和田 善尚<sup>1</sup>・杉田 暁<sup>3</sup>・木谷 友哉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>静岡大学 大学院総合科学技術研究科 (〒432-8011 静岡県浜松市中区城北3丁目5-1)

E-mail: {t-usami, t-kitani}@kitanilab.org

<sup>2</sup>京都大学 防災研究所 (〒506-1422 岐阜県高山市奥飛騨温泉郷中尾436-13)

<sup>3</sup>中部大学 中部高等学術研究所 国際GISセンター (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

大規模災害時中において、長期的に被災現場の状況を把握し続けることは重要である。しかしながら、大規模な土砂移動現象が起こった現場は危険な状態にあり、データを収集するために人間が訪れることが容易でない場合が多い。このため、危険な観測現場に赴くことなく観測データを回収するシステムは実用価値が高いと考えられる。我々は ZigBee に代表される低消費電力・低コストの無線通信規格 IEEE802.15.4 を用いたメッセージフェリーシステムを構築し、現地観測データ収集に利用するための基礎的な検討と初期の検証実験を行った。実環境での実験の結果、安定して通信できる距離は 30 m 程度であった。

**Key Words:** message-ferry, UAV, ZigBee, monitoring, wireless-communication

### 1. はじめに

深層崩壊や火山噴火のような大規模な土砂移動現象、土砂生産現象が発生した場合、中長期的に現地の状況を把握し続けることは、対策を講じる上で必須の情報となる。近年は UAV とカメラや小型 LiDAR を組み合わせた表面地形を計測する技術が進展しているが、現地に設置したセンサで得られる情報が貴重であることに変わりはない。例えば、複数の GNSS アンテナによる精密位置観測を現地で行えば、崩壊土砂の変形などを把握することができる。しかし多くの場合、大規模な土砂移動現象が起こった場合は危険な状態にあり、データを収集するために訪れることが容易でないこともある。

ある程度の通信速度と通信可能距離を有する無線通信規格に ZigBee に代表される IEEE802.15.4 がある。これは 2001 年から研究、規格化が進められてきた低消費電力、低コストの無線通信である。Wi-Fi (IEEE802.11) などと同じ 2.4 GHz 帯の周波数を使用し、250 Kbps の通信速度を有する。これを UAV などの移動体と組み合わせることで、危険な観測現場に何度も赴かずに観測データを収集するメッセージフェリーシステムを構築できる。メッセージフェリーは情報通信の分野では研究が行われてい

るが、山地斜面のセンシングの現場などで実際にどの程度機能するかを検証は十分されていない。そこで本研究では、メッセージフェリー手法を現地観測データ収集に利用するための基礎的な検討と初期的な実証実験を行い、実用化に向けた課題抽出を試みた。

### 2. メッセージフェリーシステムの概要

#### (1) メッセージフェリーについて

近年、災害発生時に携帯電話網が途絶された地域のデータ通信を確保するための DTN (Delayed/Disruption Tolerant Networking: 遅延・途絶耐性ネットワーク) について様々な研究が行われている。メッセージフェリーは、無線通信範囲の制限で直接通信できないノード間でも、ノードが物理的に移動することで、時間はかかるが情報の伝達を行うことが可能な通信方式である<sup>1)</sup>。例えば、Harounabadi and Mitschele-Thiel (2018) は複数の UAV を用いたメッセージフェリーのネットワークシステムを提案し、UAV ネットワーク間でのデータのやり取りに関する方法についてシミュレーションで検討している<sup>2)</sup>。このように UAV や自動車、船を移動体として利用するメ

メッセージフェリーシステムは大規模災害時の活用などを念頭に多く検討されている。

## (2) メッセージフェリーシステムの機能要件

山間地域や大規模な土砂移動現象が発生した場合でのメッセージフェリー手法の運用を想定して必要とされる要件について検討し、初期的なシステムを構築した。日本の山林上空を目視の範囲内で UAV を飛行させる場合の高さを 50 m 程度と想定し、ターゲットとするデータは、1回の収集当たり高々1 MB 以下とする。

本研究で現地観測を対象として想定したメッセージフェリーシステムの概要を図-1に示す。

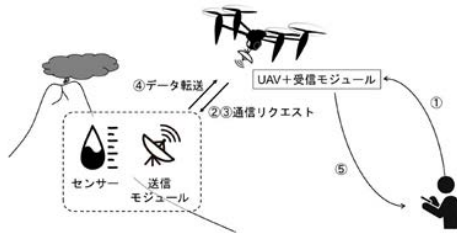


図-1 アクセスが困難な場所での現地観測を想定したメッセージフェリーシステム



図-2 想定されるメッセージフェリーシステムの使用方法

想定するデータ通信手順を図-2に示す。UAVを安全な場所から離陸させ、観測地点の上空に近づける。省電力のために、送信モジュールは常時データを通信できる状態とはしない。接近したUAVが通信をリクエストするトリガーを発信し、それを検知したセンサ側送信モジュールが観測データの送信を開始することとする。データ転送が完了したことを確認後にUAVを帰還させる。

## 3. 設計したメッセージフェリーシステムの概要

前章での検討を踏まえてセンサ側送信モジュールとUAV側受信モジュールのシステムを設計し、汎用品として容易かつ安価に入手可能な物品を用いて送信側および受信側のシステムを構築した。システム設計図を図-3(左)に示す。いずれもコントローラにはArduino互換

ボードであるSeed社製のSeeeduino XIAOを用い拡張ボードと併用することで、動作状態の表示やコネクタにより機能拡張が可能となっている。

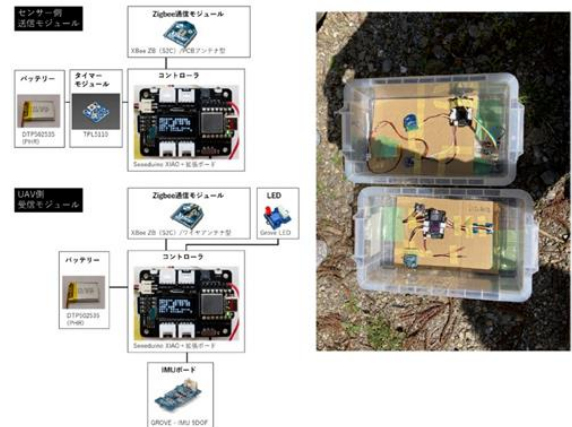


図-3 送信、受信モジュールシステムの(左)構成および(右)試作品

データ無線通信にはZigBee規格であるDigi International社製のXBee S2Cを用いた。カタログ上の性能では通信データレートは250 Kbps、通信距離は見通しのきく屋外で1200 mとされている。消費電力は約150 mWである。XBee S2Cは3通りのアンテナ形状が用意されている。送信モジュールは基盤に張り付いた形式のPCBアンテナ、受信側はマッチ棒のような形状のワイヤアンテナ形式とした。UAVへの搭載を想定した受信モジュールの重量(バッテリー込)は50 gであり、UAVに搭載するのは重量、サイズともに可能であるように設計した。

## 4. 実証実験

本研究では、UAVを利用したメッセージフェリーシステムを検証するために、試作システムを用いて2段階での実証試験を行った。第1段階では、実際に観測を行うような森林斜面での通信状況を調べた。第2段階ではUAV利用を模した、上空と地上の鉛直方向の通信について検証実験を行った。

### (1) 森林斜面でのデータ通信

前章で記したように試作システムで採用したXBee S2Cは、見通しが良い条件で1000 m以上の通信距離がカタログでは示されている。しかし立木を含む植生は電波の大きな障害要因であることから、実際に観測を行う環境での通信について検証する必要がある。試作したメッセージフェリーシステムについて、静岡県浜松市の天竜川沿いの森林斜面で検証実験を行った。実験では、簡単

のために UAV 側受信モジュールの位置は工事用作業道路上に固定とし、センサ側送信モジュールを斜面上の様々な位置に移動させて通信の状況を調べた (図-4)。実験 (3) から実験 (8) での移動させた送信モジュールから見た受信モジュール方面の写真を図-5 に示す。



図-4 送信モジュール (赤) と受信モジュール (黒) の位置



図-5 送信モジュールから受信モジュールを見た様子

実験結果を表-6 に示す。作業道沿いに水平方向に移動した実験 (1) から実験 (4) では、直線距離が約 80m まで正常に通信を行うことができた。直線距離が約 100 m の実験 (4) はかろうじて通信が可能なレベルであり、樹木などで見通しがきかない斜面では約 80 m の距離が限界であった。

表-6 検証実験の条件と通信の結果

実験番号	距離 (m)	環境	通信
①	18	作業道沿い 見通しが良い	○
②	55	作業道沿い 見通しが良い	○
③	82	作業道沿い少し立木あり*	○
④	101	作業道沿い立木あり*	× (通信は可能だが非常に遅い)
⑤	18	斜面方向で立木群あり*	○
⑥	45	斜面方向で立木群あり*	○
⑦	60	斜面方向で立木群あり*	○
⑧	82	斜面方向で立木群あり*	○

斜面方向に移動した実験 (5) から実験 (8) でも上と同様に約 80 m までの距離であればデータの通信が可能であった。これらの実験では図-5 にあるように送受信モジュールが立木でお互いに直接見えない状態でも正常な通信を担保することができることが明らかとなった。日本の一般的な森林の樹高は 50 m 以下であり、UAV でセンサ側送信モジュールの上空に到達できれば、観測データの回収が可能であると言える。

## (2) UAV 利用を模した鉛直方向のデータ通信

前節の検証実験により、森林斜面においても 80 m 程度の距離であれば正常な通信が可能であることがわかった。次の段階として、UAV 利用を想定して上空と地上との鉛直方向のデータ通信の検証を行った。

検証実験は静岡大学浜松キャンパスおよびその周辺で行った。キャンパス内の 6 階建ての建物屋上 (地上高約 20 m) から約 50 cm 突き出すように受信モジュールを設置した (図-6)。これは、UAV の下面に受信モジュールを装着した状態を想定したものである。そして、センサ側送信モジュールを移動させて通信状況について検証した (図-7、表-8)。実験 A から実験 C は送受信モジュール間の見通しが良い地点で行った。実験 D から実験 F は距離が 100 m 以上と遠いのに加え、送受信モジュール間に樹木やグラウンド脇に設置された防球ネットが介在していた。実験 G は水平距離が 21 m と近いものの、送信モジュールを樹冠下に置いた。送信モジュールに約 9 KB のデータを用意し、受信モジュールでの受信結果を調べた。

各実験における送信データに対する受信データの比については、水平距離が 100 m 以下で見通しの良い実験 A, B, C では全てのデータを正常に回収することができた。前節の検証実験と同様、水平距離が 100 m を超えた実験 D, E, F では正常な通信ができず、回収できたデータの割合はそれぞれ 0.045, 0.004, 0 であった。送信モジュールを樹冠下においた実験 G も正常な通信ができず、回収できたデータの割合は 0.04 であった。

前節の森林斜面での検証実験と同様に見通しが良い条件であれば、鉛直方向でも 80 m の距離は正常に通信できることが確認できた。一方、森林斜面では樹冠層を通過するような通信の検証ができなかった。実験 G のように樹冠を通過するような通信は大きく阻害されることが明らかとなった。このことから、センサ側の送信モジュールもしくはアンテナは上空が開けた場に設置する必要があることがわかった。

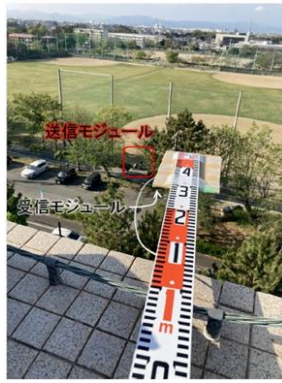


図-6 屋上に設置した受信モジュール (実験C)



図-7 上空 (屋上 20m) と地上との通信の検証実験位置

表-8 上空 (屋上 20m) と地上との通信の検証実験条件

実験	水平距離 (m)	環境
A	7.9	見通しが良い
B	45	見通しが良い
C	42	見通しが良い
D	100	樹冠下
E	155	
F	215	
G	21	樹冠下

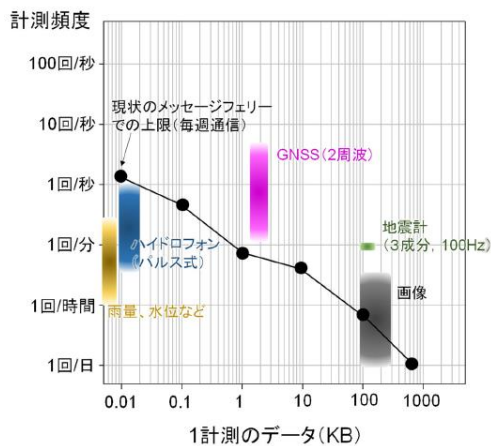


図-9 想定される観測データ容量のまとめ

今回の検証実験では送信側モジュールに PCB アンテナ, 受信側にワイヤアンテナを用いた. これらは外部アンテナに比べて通信性能が劣るものであり, このようなアンテナでも約 80 m の距離で通信できることが確認できた点に実験の意義がある. いずれか一方もしくは両方に外部アンテナを採用することで通信距離を延長することが可能であると推測される.

## 5. まとめ

本研究では UAV を利用したメッセージフェリーによる観測データ回収システムを構築するための基礎的な検討とその初期検証実験を行った. 実験により, 試作したシステムでは通信速度 250 Kbps (≒ 30 KB/s) で実際に使用する環境では約 80 m 以内の距離で正常に通信が可能であることが確かめられた. 受信モジュールの重量は約 50 g であり, 多くの一般的な UAV の積載可能な重量を下回ることができた.

しかし, 地震波形や画像データのように大容量の観測データを扱い, 高速での無線通信が必要な場合, 本システムでは通信速度が不足してしまう場合がある. 想定される観測データの容量を図-9 にまとめる.

これ以上の通信速度を確保するには無線通信規格を Wi-Fi にすることが選択肢として挙げられるが, 理想的な環境での通信距離が最長 100 m ほどであり, 現地では 20~30 m となることも想定される. UAV でセンサ側送信モジュールに接近して通信するときは通信距離が樹木高より大きくなることが望ましい. また Wi-Fi はより多くの電力を要することも考慮する必要がある.

今後は, 設計したモジュールを実際に UAV へ搭載し送受信を行う実験を行っていく予定である.

**謝辞:** 本研究は科学技術振興機構 (JST) ・持続可能開発目標達成支援事業 (aXis) 「最新の UAV ・RTKGNSS ・センサーを用いた火山・地震・災害監視技術の実装実験」ならびに, 砂防・地すべり技術センター研究開発助成「メッセージフェリー手法による現地観測データ収集システムの実証試験」から支援を受けた.

## 参考文献

- 1) Zhao, W., Ammar, M., and Zegura, E.: A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks, *Proc. the 5th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 187-198, 2004.
- 2) Harounabadi, M. and Mitschele-Thiel, A.: Applying message forwarding and replication to multi-UAV message ferry networks, *Mobile Networks and Applications*, Vol. 23, pp. 1337-1346, 2018.