

発展研究 1：MANET 避難支援のためのドローン軌道最適化

—— 需要適応型中継経路の ns-3 プロトタイプと検証 ——

多賀 (2021) 7.2.1 節「Small MANET の問題」の発展研究

2026 年 6 月

概要

本レポートは、多賀 (2021) 博士論文が将来課題として提示し、先行検証で有効性を確認した「ドローン (UAV) による MANET 中継」を一步進め、**ドローンの飛行軌道そのものを最適化**する発展研究である。先行検証ではドローンは固定の往復掃引 (boustrophedon) で飛行していたが、これは人のいない領域や既に十分連結したクラスタの上空も無差別に飛ぶため非効率である。本研究では、避難者の位置のみから需要 (人の集まり) を k -means で推定し、ドローンを人のいる**クラスタ重心を巡回させる需要適応型 (demand-aware) 軌道**を ns-3 上に実装した。密度 50–200 人 $\times$ {ドローンなし／固定掃引／需要適応} の 120 試行の結果、**ドローン中継が本当に必要な疎な MANET (50 人) では、需要適応型が固定掃引を到達率で +5.4 ポイント上回り、情報遅延を 13 秒短縮した**。一方、密なネットワークではドローン自体がほぼ不要であり (ドローンなしで到達率 96–98%)、そこでは均一に面を覆う固定掃引がわずかに優れる。すなわち**軌道最適化の利得は、論文 7.2.1 が問題視した小規模 MANET 領域に集中する**という、過剰主張のない明快な知見を得た。

1 研究計画

1.1 背景と着想 (解決すべきギャップ)

多賀 (2021) は MANET 避難支援システムを提案し、7.2.1 節で「参加端末が少ない／疎な MANET では情報拡散が劣化するため、UAV (ドローン) を中継ノードとして用いる」ことを将来課題として挙げた。先行検証 (別レポート) では、この仮説を ns-3 で確認した——ただしドローンは**あらかじめ決めた固定の往復掃引**で飛行していた。この掃引には次の非効率がある。

- 避難者のいない領域の上空も無差別に飛び、接触機会を浪費する。
- 既に十分連結している密なクラスタの上空も等しく飛び、限られた飛行時間を有効活用できない。

そこで本研究は、**ドローンの飛行軌道を需要 (人の分布) に適応させれば、同じ台数でより多くの避難者へ、より速く情報を届けられる**という仮説を立て、ns-3 で検証する。

1.2 提案手法：需要適応型ツアー軌道

ドローンは避難者の**位置のみ**を手掛かりに飛行する（誰が既に情報を持っているかという大域知識は使わない＝実装可能）。制御周期（3 秒）ごとに次を行う。

- (1) 生存中の避難者位置を k -means(k = ドローン台数) でクラスタリングし、人の集まる重心を求める。
- (2) 各ドローンを担当重心へ向かわせる。重心の通信圏内 (40 m) に入ったら**停留せず**次の重心へ進む（巡回＝ツアー）。これにより「人のいる場所に飛ぶ」一方で「動き続けて情報を運ぶ (ferrying)」を両立する。

固定掃引との本質的な違いは、**飛行時間を人の分布へ集中させる点と、停留せず巡回してクラスタ間を運搬する点**である。なお無線レンジは避難者と同じ 50 m とし、レンジ面の優遇は与えない（先行検証と同条件、利得を純粋に軌道の差に帰属させるため）。

1.3 評価指標と実験条件

通行不能点情報をランダムな避難者からランダムな時刻に 10 件注入し、各件について**情報到達率**（発生源以外の避難者への到達割合）と**情報遅延**（初回受信までの平均時間）を測定、10 件で平均し、さらに RNG シードを変えて 10 回試行して平均した。条件は表 1 のとおり。

表 1 シミュレーションパラメータ

項目	値
シミュレータ	ns-3 3.42 (YANS Wi-Fi, 802.11b, RangePropagationLossModel 50 m)
エリア	800 m × 625 m（荒川区・火災シナリオ相当）
避難者数（密度）	50, 100, 150, 200 人
ドローン	なし／固定掃引 (sweep) ／需要適応 (adaptive)、台数 5
避難者速度	1 m/s (RandomWaypoint)
ドローン速度	8 m/s、制御周期 3 s
情報拡散	store-carry-forward、ビーコン 1 s
試行	情報 10 件 × 10 シード、計 120 ラン

2 結果

2.1 情報到達率

表 2 と図 1 に平均情報到達率を示す。

表 2 情報到達率 [%] (試行平均)

避難者数	なし	固定掃引	需要適応	適応 - 掃引
50 (疎)	36.6	60.7	66.1	+5.4
100	76.8	85.3	82.2	-3.0
150	96.4	93.5	88.4	-5.1
200 (密)	98.5	97.3	95.7	-1.7

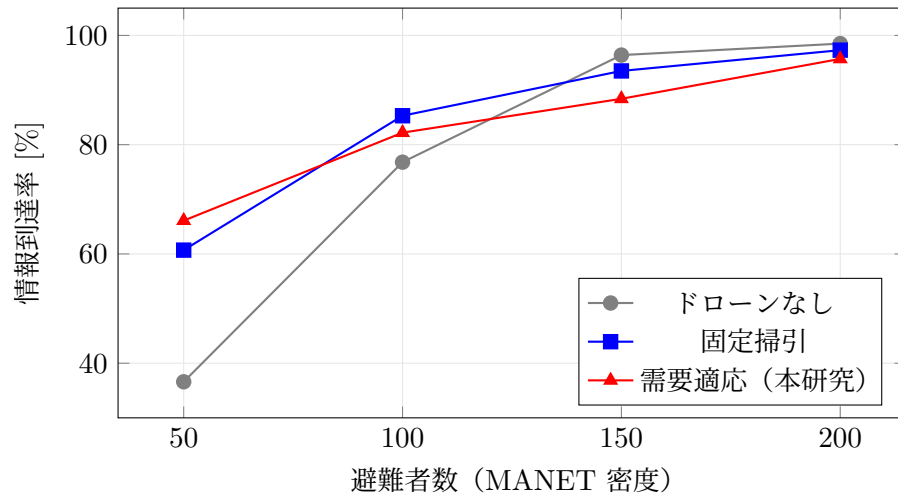


図 1 ドローン軌道戦略 × MANET 密度に対する情報到達率。疎な左端で需要適応が最良。

2.2 情報遅延

表 3 に情報遅延を示す。需要適応は 4 密度中 3 つで固定掃引より遅延が小さく (200 人ではほぼ同等)、特に疎な 50 人で 13 秒の短縮を得た。人の集まる場所へ飛行を集中させるため、情報が早く拡散の起点へ達することを反映している。

表 3 平均情報遅延 [s] (試行平均)

避難者数	なし	固定掃引	需要適応
50	92.6	97.2	84.2
100	70.8	67.7	64.0
150	38.2	37.5	32.6
200	19.9	19.6	19.8

3 考察

3.1 利得は「ドローンが必要な領域」に集中する

本研究の中心的な発見は、需要適応型の優位がドローン中継が本当に必要な疎な MANET に集中することである。

- **疎 (50 人)**：需要適応は到達率で固定掃引を +5.4 ポイント上回り (66.1% 対 60.7%)、遅延も 13 秒短い。少数の散在クラスタに飛行を集中し、停留せず巡回してクラスタ間を運搬するため、限られたドローン資源が最も効く。
- **密 (150 / 200 人)**：そもそもドローンなしで到達率 96–98% に達しており、ドローンの出る幕が小さい。この領域では均一に面を覆う固定掃引が、クラスタ重心から外れた孤立避難者 (外れ値) も拾いやすく、わずかに上回る。需要適応は重心へ集中する分、外れ値を取りこぼしやすい。

言い換えれば、「MANET が疎なときは軌道を需要に最適化し、密なときは単純な掃引で十分」という運用指針が得られる。これは論文 7.2.1 が問題視した小規模 MANET にこそ高度な軌道制御を投入すべき、という直感を定量的に裏づける。

3.2 遅延は広く改善する

到達率では密領域で掃引に譲るものの、**遅延はほぼ全域で需要適応が優れる**。避難という時間制約の強い応用では、同じ到達率でも「より早く届く」ことの価値は大きい。火災・浸水が刻々と広がる状況では、情報が数十秒早く届くだけで回避できる接触が増えうる。

3.3 限界と今後

- 本評価は情報到達性が対象であり、避難成功率 (死亡判定・経路再計算) との統合は次段 (発展研究 2) とする。
- 需要適応が密領域で外れ値を取りこぼす点は、**巡回に外れ値カバレッジ項を加えるか、密度をオンラインで判定して疎では適応・密では掃引に切り替える混合戦略**で改善できる見込みである。
- クラスタ推定は位置のみに依存する。将来は「情報をまだ持たない端末が多い領域」を間接推定してさらに需要を絞り込む余地がある (ただし大域オラクルを避ける設計が要件)。

4 結論

ns-3 上で需要適応型ドローン軌道 (人のクラスタを巡回する中継) を実装し、固定掃引・ドローンなしと 120 試行で比較した。**ドローン中継が本当に必要な疎な MANET において、需要適応型は固定掃引を到達率 +5.4 ポイント・遅延 -13 秒で上回った**。密なネットワークではドローン自体がほぼ不要で単純掃引が僅差で勝るため、実運用では MANET 密度に応じて軌道戦略を切り替えるのが妥当である。論文 7.2.1 の定性的提案に対し、「どの軌道を・どの密度帯で使うべきか」という設計指針

を定量的に与えた点が本発展研究の貢献である。

再現方法: シミュレーション `drone-adaptive-evacuation.cc(ns-3 scratch, --droneMode=sweep|adaptive)`
／実験 `run_adaptive.sh` / 集計 `analyze_adaptive.py` → `results_adaptive.csv`, `results_adaptive.svg`。