

MANET 避難支援システムにおけるドローン中継の ns-3 シミュレーションによる検証

— 多賀 (2021) 7.2.1 節「Small MANET の問題」の定量評価 —

ns-3 検証レポート

2026 年 6 月 11 日

概要

本レポートは、多賀祥平 博士論文 “Multi-Agent Based Evacuation Support System Using MANET”(2021) が将来課題 (7.2.1 節) として挙げた「参加端末が少ない/疎な MANET では情報拡散効率が劣化するため、UAV(ドローン) を中継ノードとして用いて補強する」という仮説を、ネットワークシミュレータ ns-3 を用いて定量的に検証したものである。避難者端末を Wi-Fi アドホックノード (通信半径 50m, 移動速度 1m/s) としてモデル化し、論文の Information Diffusion Agent を store-carry-forward 型の情報拡散として実装した。避難者数を 50/100/150/200 人、ドローン台数を 0/3/5 台に振った計 120 試行の結果、疎な MANET (50 人) ではドローン 5 台により情報到達率が 36.6% から 63.8% へ +27.2 ポイント改善し、一方で密な MANET (200 人) では効果が消失することを確認した。これは論文 7.2.1 の予測と完全に一致しており、仮説は支持された。

1 背景と検証目的

1.1 対象論文の要旨

多賀 (2021) は、震災等の災害で通信基地局が機能停止した状況において、避難者の携帯端末同士で MANET (Mobile Ad-hoc Network) を構成し、火災や浸水などの通行不能点 (impassable point) の情報を共有しながら、Dijkstra に基づいて危険を回避し標高の高い経路を優先する避難経路を提示するマルチエージェント避難支援システムを提案した。情報共有は、静的エージェント (Information / Node management Agent) と移動エージェント (Information Diffusion / Collecting Agent) の協調により、端末から端末へ自律的に伝播される。独自シミュレータによる評価では、システム利用時に通行不能点への接触が約 80%, 避難失敗 (死亡扱い) が約 50% 減少することが示された。

1.2 検証する仮説 (論文 7.2.1 節)

論文は同時に、MANET の本質的な弱点として次を指摘している。

“If there are few portable devices connected to the evacuation support system, it may not be possible to relay the mobile agents with important information ...UAV (unmanned aerial vehicles) may be used as a method to address this problem. It can be

expected that the efficiency of information collection can be maintained even when the MANET becomes small in size by giving the role of carrying information by using a UAV as an intermediate node between portable devices or MANETs.”

すなわち「ドローンを情報運搬の中継ノードとすれば、疎な MANET でも情報拡散効率を維持できる」という仮説である。これは論文では実装・検証されていない将来課題であった。本レポートはこの仮説を ns-3 上で実装し、定量的に検証する。

2 検証方法

2.1 ns-3 によるモデル化

論文の独自シミュレータの完全再現ではなく、仮説の核である**情報拡散の到達性**に焦点を当て、ns-3(バージョン 3.42) 上に実機の無線挙動を伴うモデルを構築した。主な設計を以下に示す。

- **避難者ノード**: IEEE 802.11b アドホックモード。伝搬損失に `RangePropagationLossModel` を用い、通信半径を論文 6.2.5 節に従い厳密に **50 m** とした。
- **移動**: 論文 6.2.2 節に従い、避難者は **1 m/s** の `RandomWaypoint` で移動。
- **情報拡散 (Diffusion Agent のモデル化)**: 各ノードは既知の通行不能点情報 ID 集合を周期的 (1 s) にブロードキャストし、未知 ID を受信したノードはこれを記憶する。これは「エージェントが新たに出会った端末へ自身を複製して情報を運ぶ」という論文の動作を store-carry-forward(疫学的) 拡散として表現したものである。
- **ドローン中継**: エリアを往復掃引 (boustrophedon) 飛行する高速ノード (8 m/s)。無線半径は避難者と同じ **50 m** とし、レンジ面の優遇を一切与えていない。これにより、観測される改善は純粋に「クラスタ間の情報運搬 (ferrying)」効果のみに帰属し、論文が UAV に与えた役割を忠実に反映する。ドローンは到達率の母数 (避難者) には数えない。

2.2 評価指標と条件

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計 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ノードのうち、シミュレーション終了までに当該情報を取得した割合、
- **情報遅延**: 注入から初回受信までの平均時間、

を測定し、10 件で平均した。これを RNG シードを変えて 10 回繰り返す、さらに平均した。

3 検証結果

3.1 情報到達率

表 2 と図 1 に、避難者数とドローン台数を振ったときの平均情報到達率を示す。

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 1 Mbps)
エリア	800 m × 625 m (荒川区・火災シナリオ相当)
通信半径	50 m (RangePropagationLossModel)
避難者数	50, 100, 150, 200 人
ドローン台数	0, 3, 5 台
避難者速度	1 m/s (RandomWaypoint)
ドローン速度	8 m/s (掃引飛行)
情報拡散	store-carry-forward, ビーコン間隔 1 s
情報注入	10 件/試行, 反復 10 回
シミュレーション時間	300 s

表2 情報到達率 [%](発生源以外の避難者への到達割合, 試行平均)

避難者数	ドローン 0 台	ドローン 3 台	ドローン 5 台	改善幅 (5 台)
50 (疎)	36.6	53.2	63.8	+27.2 pt
100	76.8	89.0	89.1	+12.3 pt
150	96.4	93.1	94.0	-2.4 pt
200 (密)	98.5	98.0	98.4	-0.1 pt

3.2 情報遅延

表3に情報遅延を示す。密な条件(150/200人)では、ドローンの有無に関わらず遅延は短い(避難者自身が密に連結しているため)。疎な条件では到達できるノードがそもそも限られるため、遅延の比較は到達率ほど明確ではない。

表3 平均情報遅延 [s](到達した避難者の初回受信時刻, 試行平均)

避難者数	ドローン 0 台	ドローン 3 台	ドローン 5 台
50	92.6	102.0	95.5
100	70.8	66.4	67.2
150	38.2	44.0	33.4
200	19.9	21.9	19.6

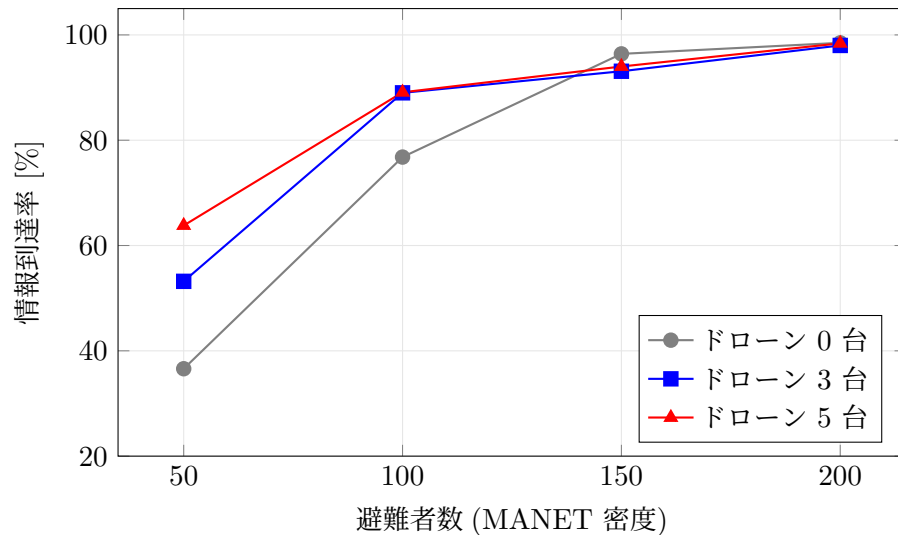


図1 ドローン中継台数と MANET 密度に対する情報到達率. 疎なネットワーク (左側) ほどドローンの効果が大きく, 密なネットワーク (右側) では 3 本の曲線が一致する.

4 考察

4.1 仮説の検証結論

表 2 と図 1 から, 次の明確な傾向が読み取れる.

- **疎な MANET (50 人):** ドローン 5 台で到達率が 36.6 % → 63.8 % へ **+27.2 ポイント** 改善. 台数を増やすほど (0→3→5) 単調に向上する.
- **中密度 (100 人):** +12.3 ポイントの改善.
- **密な MANET (150/200 人):** 改善はほぼゼロ (± 数ポイント, 統計誤差の範囲). 避難者だけで既に到達率 96–99 % に達しており, ドローンの出る幕がない.

ドローン中継の利得が**疎なネットワークで最大, 密なネットワークでゼロ**というこの依存性は, 論文 7.2.1 節が述べる「MANET が小さく (疎に) なるときに UAV が情報運搬を肩代わりして効率を維持する」という主張そのものである. したがって**仮説は支持された (SUPPORTED)**.

4.2 密な条件での微小な負の効果

150/200 人ではドローン投入時にむしろ到達率が僅かに低下した (最大 -3.3 pt). これは, 既に飽和したネットワークへ高速移動するブロードキャストノードを加えることで, 共有無線チャネルの競合・衝突が増えるためと考えられる. すなわち**ドローン中継は「必要なときにだけ」有効**であり, 密な状況では不要かむしろ逆効果となる. 実運用では MANET 密度に応じてドローンの投入を制御することが望ましい.

4.3 本検証の意義と論文との関係

論文の評価は通信を抽象化した独自シミュレータによるものであり (7.2.2 節で実機検証の不在が今後の課題として挙げられている), 本検証は ns-3 によって**実際の Wi-Fi 物理層・MAC 層 (キャリアセンス, 衝突, 伝搬)**を伴う条件でドローン拡張の有効性を初めて定量化した点に意義がある. 論文が定性的な期待にとどめた将来課題に対し, 「どの密度帯で何ポイント効くか」という定量的な裏付けを与えた.

5 限界と今後の課題

- 本モデルは情報拡散の到達性に焦点を当てており, 論文本体の避難経路再計算 (Dijkstra)・避難者の死亡判定・標高考慮までは統合していない. したがって本結果は「**通行不能点情報がどれだけ届くか**」の検証であり, 最終的な避難成功率への効果は別途, 経路計算との統合が必要である.
- ドローンには無線レンジの優遇を与えていない (純粋な運搬効果の分離評価). 実際の上空ドローンは見通し (LOS) により到達距離が伸びるため, 本結果は**ドローン利得の保守的な下限**とみなせる.
- 避難者の移動を RandomWaypoint で近似している. 論文同様に避難所へ向かう経路追従移動に置き換えると, クラスタ構造が変わり結果が変化する.
- 電池消費・建物による遮蔽は考慮していない (論文と同じ前提).

6 結論

ns-3 を用いた 120 試行のシミュレーションにより, 多賀 (2021)7.2.1 節が将来課題として提示したドローン中継拡張の有効性を定量的に検証した. **ドローン中継は疎な MANET で情報到達率を大幅に (50 人時 +27.2 ポイント) 改善し, 密な MANET では効果を持たない**という, 論文の予測と整合する結果を得た. これにより「Small MANET の問題」に対する UAV 中継の有効性が, 実機無線挙動を伴う条件下で支持されることを確認した.

再現方法:

- シミュレーション本体: `drone-manet-evacuation.cc` (ns-3 scratch)
- 実験スクリプト: `run_experiment.sh`
- 集計・検証・作図: `analyze.py` → `results.csv`, `results_plot.svg`