

発災初期における複数台のUAVによる非人口密集地域を優先した代替ネットワーク展開のための飛行方式の提案

小原 和也¹ 今野 瞭¹ 今井 信太郎¹

概要：発災初期には、災害の影響により既存の通信設備に障害の発生する可能性がある。一方、被災地域では、状況把握のため、通信を用いた情報収集が行われることが想定される。そのため、災害に備えた既存の通信設備に依存しない代替ネットワークの展開が重要となるが、被災地域に代替ネットワークを網羅的かつ常時接続可能な状態で展開することは困難である。そこで、本研究では、発災初期の人口密集地域と非人口密集地域が混在する被災地域において、通信の必要性が高い非人口密集地域の被災者を優先した被災者と避難所間を繋ぐ代替ネットワークの提供を目的とした、複数台のUAVによる代替ネットワーク展開のための飛行方式を提案する。本提案手法では、各UAVが飛行中に取得した被災者端末のプロープ信号から対象地域内の非人口密集地域を推定し、非人口密集地域を優先した対象地域の端と避難所間の往復飛行を行うことで、非人口密集地域の被災者の通信機会の向上を図る。本提案手法による非人口密集地域に存在する被災者に対する通信提供機会の向上効果を評価するため、オリジナルのシミュレータを用いて本提案手法と比較手法との比較評価を行い、通信提供機会の向上効果を確認した。

キーワード：災害時代替ネットワーク、アドホックネットワーク、UAV、飛行方式

1. はじめに

発災初期には、災害の影響により既存の通信設備に障害が発生することが想定される。そのため、災害による基地局の障害発生に備え、各移動体通信事業者において、各地方に車載型無線基地局や可搬型無線基地局が用意されているが、台数に限りがあるため、発災初期での運用が困難な地域が発生する恐れがある。一方で、発災初期の被災者、避難所は、安否確認、避難活動、救助活動のため、通信を用いた情報収集を行うことが想定される。以上の背景から、発災初期の被災地における通信による情報収集手段を確保するため、既存の通信設備に依存しない代替ネットワークの展開が重要となってくる。

この問題に対しては、無線端末間で直接通信を中継し、通信範囲を拡大する無線アドホックネットワークが有効であり、災害時の被災者端末のみを用いた展開手法 [1,2] や中継ノードとして地上の被災影響を受けない Unmanned Aerial Vehicle (UAV) を用いた展開手法 [3-5] の研究が進められている。しかし、利用可能な無線端末には限りがあるため、被災地域に代替ネットワークを網羅的かつ常時接続可能な

状態で展開することは困難である。そのため、通信の必要性に応じて限定した地域への通信機会の提供が重要となってくる。

また、特に非人口密集地域の被災者は、人口密集地域の被災者と比較し、通信を用いた情報収集の手段の必要性が高いと考えられる。例えば、人口密集地域の被災者の場合、避難中の他の被災者との会話からも情報収集が可能であるが、非人口密集地域の被災者の場合、孤立度合いが高くなるにつれ避難中の他の被災者との遭遇が難しくなり、被災者間の会話による情報収集が期待できなくなる。そのため、特に通信の必要性が高い非人口密集地域の被災者を優先した通信機会の提供が必要と考えられる。

そこで、本研究では、発災初期の人口密集地域と非人口密集地域が混在する被災地域において、非人口密集地域の被災者を優先した被災者と避難所間を繋ぐ代替ネットワークの提供を目的とする。本研究目的を達成するため、本研究では非人口密集地域へ迅速に移動可能かつ地形条件の影響を受けず、代替ネットワークの提供が可能な UAV に着目し、複数台の UAV による代替ネットワーク展開のための飛行方式の提案を行う。

¹ 岩手県立大学 大学院ソフトウェア情報学研究科
Graduate School of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

2. 関連研究

2.1 被災者間のアドホック通信を用いた展開手法

河本らは、Delay Tolerant Network (DTN) [6] を用いて被災地で身動きがとれない被災者の救助要請パケットを効率良く避難所へ転送するための被災者間のパケット転送手法について提案している [1]。この研究では、各被災者端末のバッファが限られた状況下において、送信元である被災者と送信先である避難所とを直線で結ぶ理想経路を計算し、その理想経路と自身の現在座標との距離に応じて、送信されたメッセージの中継可否を決定することで、送受信回数の減少とパケット到達率の向上を図っている。

また、金田らは、避難所などの一定範囲に集まった被災者間で構築された災害時通信システムの持続時間向上を目的とした災害時通信システムについて提案を行っている [2]。この研究では、自身や相手の端末のバッテリーの残量情報に基づき、パケット転送先の動的な選択や転送処理の実行可否を決定し、ネットワーク内の全被災者の端末のバッテリー残量が均等になるようにし、ネットワーク内での稼働端末数をできるだけ減らさずに長時間稼働できるようにしている。

これらの手法は、被災者が周辺に一定数いることを前提とした代替ネットワークでのパケットの転送の効率化、サービス稼働時間の持続化を図っている。しかし、本研究で優先対象とする非人口密集地域では、周囲の被災者の存在が期待できないため、他の被災者の協力を前提としたこれらの手法は適用が困難である。

2.2 UAV を中継ノードとした展開手法

矢内らは、対象地域をランダムに飛行する UAV に対し、反発飛行を加えることで対象地域に UAV を均一に展開する手法を提案している [3]。反発飛行では、対象地域をランダムに飛行する UAV 同士が図 1 のようにお互いの通信圏内に到達した場合にお互いの現在の座標情報を交換し、自身の座標と相手座標を結ぶ 2 点の直線上 (図 1 点線部分) かつ相手と反対方向のランダムな地点を新たな目的地として再設定し、直線飛行を行うことで、対象地域に対して均一な展開を可能としている。

Sanaa らは、UAV とユーザにそれぞれ陽子と電子の性質を持たせ、クーロンの法則に基づく展開手法を提案している [4]。これにより、各 UAV は、クーロンの法則に沿って、電子をもつユーザ集団に惹かれるように向かいつつ、同じ陽子を持つ UAV 間は反発し合うため、お互いがユーザの多い一点に集中せず、ユーザの数の多い地点を中心に分散配置が可能となっている。

また、浅野らは、不均一なユーザ分布を考慮したボロノイ領域をもとにした展開手法を提案している [5]。各 UAV

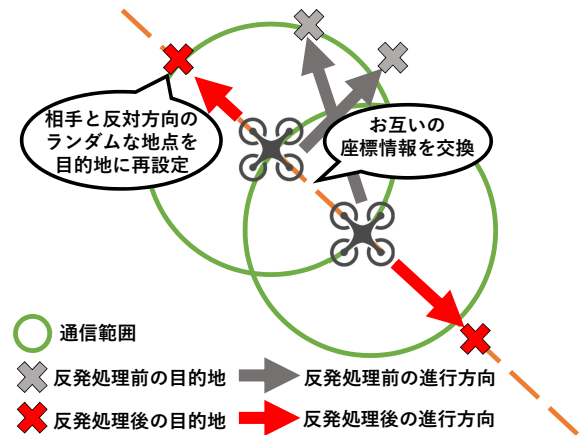


図 1 矢内らの反発飛行

は、ランダムな飛行を行い、他の UAV の通信圏内に入った際に、他の UAV の予測位置から自身のボロノイ領域を計算する。自身のボロノイ領域とユーザの分布情報を基に、自身のボロノイ領域内のユーザ密集地点を目標座標として移動を行い、目標座標到着後は、再度、他の UAV の通信圏内に入るまでランダム飛行を行う。この手法を適用することにより、ユーザの分布が不均一で一定の場所に集中しているほど、ユーザ間のパケットの遅延時間が改善されることが示されている。

参考文献 [3] では、対象地域に対して均一に展開することを重視した展開手法が提案されており、参考文献 [4,5] では、通信提供可能ユーザ数の最大化に着目した展開手法が提案されている。しかし、本研究のような人口分布に基づく利用者の通信の必要性に着目したものがなく、非人口密集地域の被災者を優先した代替ネットワーク展開のための飛行方式の十分な検討はなされていない。そのため、本研究では、発災初期の人口密集地域と非人口密集地域が混在する被災地域において非人口密集地域の被災者を優先した、複数台の UAV による代替ネットワーク展開のための飛行方式について検討を行う。

3. 本研究における想定環境

3.1 対象期間

本研究では、発災初期の想定期間を発災から 1 時間までと定義する。そのうち、UAV による代替ネットワーク稼働時間を、UAV の稼働時間を考慮し [7]、発災から 30 分間とし、残りの 30 分間を代替ネットワークから得られた情報に基づく避難活動、救助活動の時間に充てられるものとする。

3.2 想定する通信の流れ

本研究では、図 2 に示すように、スマートフォン等で一般的に利用されている Wi-Fi を用いて、対象地域に存在する被災者が避難所へ向けて送信する安否メッセージや救助要請メッセージを、複数台の UAV によってメッセージリレーで配送することを想定する。各 UAV は、通信圏内の

被災者から避難所へ向けた安否、救助要請等のメッセージを取得し、取得したメッセージを飛行中の他の UAV と共有する。最終的に、避難所に到達した UAV が取得したこれらのメッセージを避難所へ届ける。一方で、避難所が被災者に向けて配信するメッセージとして、避難所の位置情報や避難経路等の避難情報が想定されるが、これらのメッセージ内容は、時間経過による内容の変化が少ないと考えられる。そのため、本研究においては、各 UAV は事前にこれらの情報を保持した状態で飛行を開始し、通信圏内の被災者に定期的に配信することとし、避難所から被災者までの UAV によるメッセージリレーでの配送は想定しない。

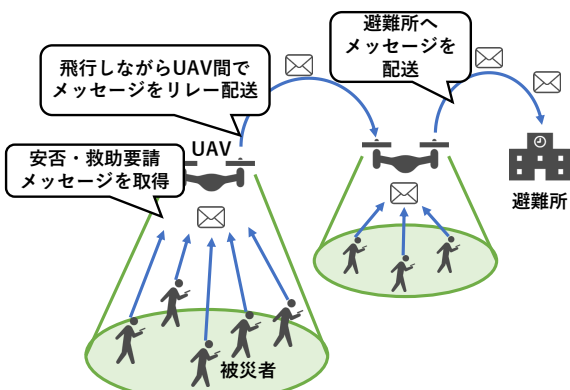


図2 被災者から避難所までのメッセージの流れ

4. 提案手法

本研究では、非人口密集地域の被災者を優先した代替ネットワークを提供するため、各 UAV が飛行中に取得した被災者端末から発信されるプローブ信号を基に対象地域を一定間隔で分割した各区域を人口密集地域と非人口密集地域に2分類化し、その情報を基に非人口密集地域に判定された区域を優先して対象地域の端と避難所間を往復するための往路飛行、復路飛行と UAV 同士の衝突回避のための反発飛行の三つの飛行方式を複合した飛行方式を提案する。

4.1 人口密度の推定

4.1.1 人口密度テーブルの作成

各 UAV は、対象地域を一定区域で分割された人口密度テーブルを保持している。テーブル内の要素は、図3のように UAV が各区域を飛行中に一定時間間隔で被災者から取得したプローブ信号の最大数とする。また、UAV 間がお互いに通信圏内に存在する場合、お互いのテーブル情報を交換し、各要素毎にプローブ数の少ない方の要素を多い方の要素で上書きする。

4.1.2 人口密度テーブルに基づいた区域の2分類化

人口密度テーブルの情報を基に各区域を人口密集地域と非人口密集地域に2分類化する。対象地域における総人口や人口分布が不明な対象地域では、一意の値を閾値として

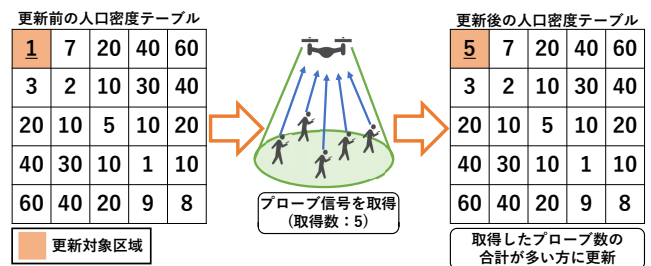


図3 人口密度テーブルの更新

人口密集地域と非人口密集地域の判定をすることが難しい。そこで、本研究では、図4のように人口密度テーブル内のプローブ数が明らかとなっている区域のみを用いて、対象地域内における人口密集地域と非人口密集地域を k-means 法 [8,9] で2分類化することで、各対象地域に応じた人口密集地域と非人口密集地域の判定を行う。ただし、プローブ数がまだ不明の区域に関しては、非人口密集地域である可能性があるため非人口密集地域に分類する。

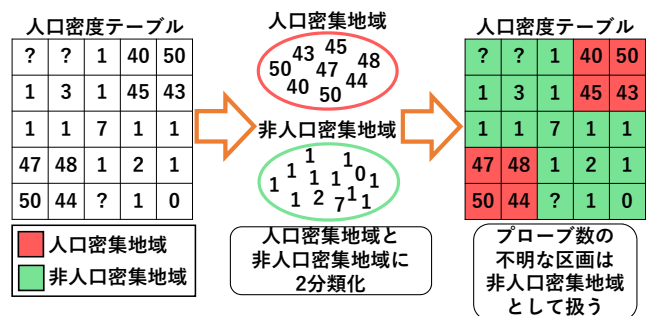


図4 人口密集地域と非人口密集地域の2分類化

4.2 往復飛行方式

人口密度テーブル内の各区域の人口密集地域と非人口密集地域の分類結果に基づく、非人口密集地域と判定された区域を優先した避難所と被災者間の往復飛行方式について述べる。

本飛行方式では、条件に応じて以下の飛行方式を適用して飛行を行う。

往路飛行 避難所から対象地域の端までの飛行

復路飛行 対象地域の端から避難所までの飛行

反発飛行 接近時の UAV 同士の衝突回避飛行

4.2.1 往路飛行

飛行開始初期の各 UAV には、必ず往路飛行が適用される。往路飛行では、図5左の網掛け区域のような、避難所から離れる3区域のうち、人口密集地域と判定された区域を除いたものを移動先候補として選定する。移動先候補が複数存在する場合は、移動先候補の中からランダムに一つが選択される。そして、選択された区域内を通過する目標座標をランダムに決定し、目標座標に向けて飛行を行い、目標座標到着後、再度同様の処理を繰り返し、隣接区域に移

動先候補がなくなるまで続ける。移動先候補が隣接区域からなくなった場合、図5右のように非隣接区域も含めて、避難所の座標から自身の座標に引いた直線の延長線上の左右45度以内に非人口密集地域が存在するか確認する。非人口密集地域と判定された区域が存在した場合は、最も近い非人口密集地域と判定された区域内を通過する目標座標をランダムに決定して飛行を行う。非人口密集地域と判定された区域が全くない場合は、復路飛行に切り替える。

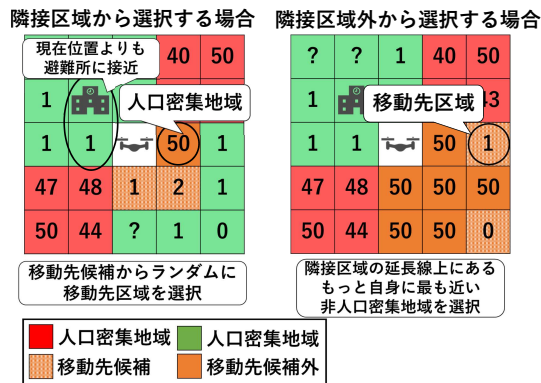


図5 往路飛行の目標飛行座標の決定方法

4.2.2 復路飛行

往路飛行では、必ず非人口密集地域と判定された区域のみを目標座標として選択するため、この飛行方式を復路飛行にそのまま適用した場合、避難所が人口密集地域と判定された区域に存在すると帰還することができない。そのため、復路飛行では、避難所が人口密集地域にある場合も考慮し、避難所までの復路経路全体として人口密集地域への飛行回数を最小限に抑えた飛行を行う。そこで、復路飛行では、避難所までの復路経路をダイクストラ法 [10] を用いて生成する。本提案手法では、人口密度テーブル上の各区域をノードとし、斜め方向を含む隣接区域間を相互に結んだエッジから構成される経路を生成する。各エッジに掛かるコストは、自ノードの状態に関わらず非人口密集地域に向けて繋がるエッジには1、人口密集地域に向けて繋がるエッジには十分大きな値を設定し、斜め方向に結ばれるノード間は、各コストに $\sqrt{2}$ を掛けたものを利用する。

各 UAV は、復路飛行に切り替えた直後、上記の情報に基づき、ダイクストラ法で復路経路を生成し、経路上の次の飛行区域内を通過するランダムな地点を目標座標に設定し飛行を繰り返す。次の飛行区域として避難所が含まれる区域が指定された場合、目標座標を区域内を通過するランダムな地点ではなく、避難所の座標に設定する。また、避難所への到着判定を避難所の設置座標一点のみで判定すると UAV が1台ずつしか到着できず避難所付近に UAV が集中してしまうため、本提案手法では、避難所への到着判定は、避難所と通信可能な一定距離内に到達したかで判定する。

これにより、図6ように人口密集地域と判定された区域

が UAV と避難所間の最短経路上に存在する場合、UAV を現在地点と避難所間の最短経路を飛行させるよりも、本提案手法によって生成された経路を飛行した方が人口密集地域の通過数を最小限に抑え、復路飛行中も非人口密集地域の被災者に通信機会をより多く提供可能になる。

そして、避難所到着後、復路飛行から往路飛行に切り替える。

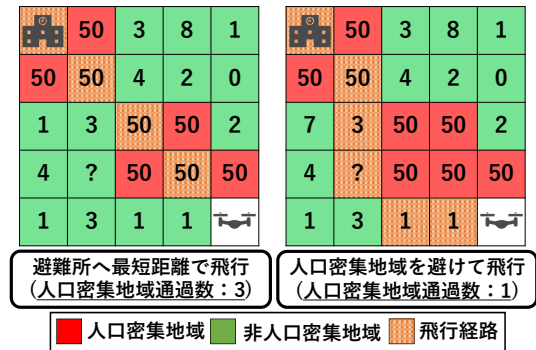


図6 復路飛行経路の比較

4.2.3 反発飛行

各 UAV は、自律的に往復飛行を行っているため、飛行中に UAV 同士で衝突が発生する恐れがある。そこで、2節で述べた矢内らの反発飛行 [3] の概念を往復飛行に取り入れる。本提案手法での反発飛行では、UAV 間が互いの通信圏内に入った際に、お互いが相手に対して反対の方向に飛行するように目標座標を変更し、反発飛行を行う。本提案手法では、被災者と避難所間での効率の良いメッセージのリレー配送のため、お互いの現在の飛行方式と座標情報を交換し、現在の飛行方式および現在座標から算出される復路飛行を利用した際の避難所までの飛行距離から表1のように各 UAV の反発飛行後の飛行方式を変更する。

表1 反発飛行後の飛行方式の遷移表

自身の飛行方式	相手の飛行方式	避難所までの飛行距離	反発処理後の飛行方式
往路飛行	復路飛行	自身の方が近い場合	復路飛行
復路飛行	往路飛行		
復路飛行	復路飛行	自身の方が遠い場合	往路飛行
往路飛行	復路飛行		
復路飛行	往路飛行		
往路飛行	往路飛行		

本提案手法における反発飛行では、人口密度テーブルも考慮し、図7のような相手と反対方向の隣接区域に存在する非人口密集地域と判定された区域を移動先候補とする。移動先候補が複数存在する場合は、移動先候補の中からランダムに一つが選択され、選択された区域内を通過する目標座標をランダムに決定し、目標座標に向けて飛行を行う。相手と反対方向に移動先候補が存在しない場合は、反発飛行後に往路飛行となるか復路飛行となるかで動作が異なり、反発飛行後に往路飛行に切り替わる UAV は、非隣接

区域も含めて、相手の座標から自身の座標に引いた直線の延長線上の左右 45 度以内に非人口密集地域と判定された区域が存在するか確認する。非人口密集地域と判定された区域が存在した場合は、自身の現在座標に最も近い区域内のランダムな地点を反発飛行時の目標座標として設定し、直線移動を行う。非人口密集地域と判定された区域が全く存在しない場合は、現在いる区域内で自身の座標と相手座標を結ぶ 2 点の直線上で相手との距離が最大となる地点を反発飛行時の目標座標として設定し、直線移動を行う。一方、反発飛行後に復路飛行に切り替わる UAV は、避難所への到着を優先させるため、相手と反対方向の隣接区域に移動先候補が存在しない場合は、現在いる区域内で自身の座標と相手座標を結ぶ 2 点の直線上で相手との距離が最大となる地点を反発飛行時の目標座標として設定し、直線移動を行う。

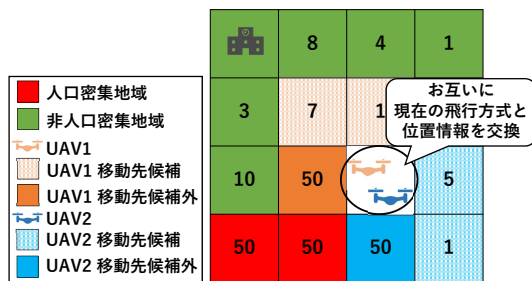


図 7 非人口密集地域を考慮した反発飛行の流れ

5. 実験

本実験では、人口密集地域と非人口密集地域が混在する地域で被災者が定期的に避難所へ安否メッセージを送信する状況を想定し、非人口密集地域に存在する被災者に対する通信提供機会の向上効果を、オリジナルのシミュレータを用いて、本提案手法と人口密度を考慮しない矢内らの反発飛行のみを適用した手法 [3] とで比較し評価を行う。通信提供機会の向上効果を測る指標として、非人口密集地域の被災者が送信したメッセージの避難所までの平均到達数と、避難所まで到達した被災者のメッセージにおける、被災者の送信から避難所にメッセージが到達するまでの平均遅延時間を用いる。また、本実験では、提案手法の飛行方式としての非人口密集地域の被災者への通信提供機会の向上効果を確認するため、通信性能による影響を最小限に抑えた形で実験を行う。

5.1 実験環境

表 2 に実験条件を示す。通信性能による影響を最小限に抑えた形で本提案手法の効果を確認するため、通信条件は、矢内らの通信条件 [3] を参考に、通信半径を全ノード共通で 500m とし、ノード間ではお互いの通信圏内に入った瞬間に全ての通信が行われ、UAV ノードの受信バッファは十分

にあるものとし、DTN のルーティング方式として Epidemic Routing [11] が用いられているものとする。そのため、各 UAV ノードのバッファに保存されたメッセージは、通信圏内の他の全 UAV に全て瞬時に共有されるものとする。提案手法に適用する人口密度テーブルのサイズは 10×10 とし、被災者からのプローブ信号送信間隔とそれに基づいた各 UAV が行う人口密度テーブル更新処理間隔をそれぞれ 1sec とする。また、提案手法では、復路飛行時に UAV が避難所の半径 300m 以内に入った場合、避難所へ到達したものとし、往路飛行へ切り替わる。被災者ノードから送信される安否メッセージは、被災者が UAV の通信圏内にいる場合のみ 1min 毎に 1 回のみ送信されるものとし、初回のメッセージ送信はシミュレーション開始 1min 後に行われる。また、被災者ノードは、移動を行わず常に静止しているものとする。本実験では、計 4 種類の避難所および被災者のノード分布マップに対して、各試行毎に UAV の初期位置をランダムに設定し、各ノード分布マップと UAV の台数毎に 100 回ずつ試行を行っている。

表 2 シミュレーションにおける条件

対象地域の範囲	4000m × 4000m
避難所ノード数	1
被災者ノード数	3000
UAV ノード数	15, 20, 25, 30
UAV ノード移動速度	10m/s
避難所ノード通信半径	500m
被災者ノード通信半径	
UAV ノード通信半径	
人口密度テーブルサイズ	10×10
人口密度テーブル更新間隔	1sec
被災者のプローブ信号送信間隔	1sec
被災者の安否メッセージ送信間隔	1min
シミュレーション時間	30min
避難所・被災者分布マップ数	4
試行回数	100 回

本実験で利用する避難所および被災者のノード分布マップとして、図 8 の岩手県内の各市町村が定めている指定避難所の位置と指定避難所周辺の約 4000m × 4000m の航空写真から確認できる建築物を参考に作成された図 9 のマップを用いる。被災者ノードの分布は、全ノード数 3000 のうち 2700 ノードは人口密集地域に対して一様分布で配置する。残り 300 ノードは対象地域の全範囲に対して一様分布で配置している。また、本実験では、避難所との位置や距離、隣接する非人口密集地域の規模を加味し、矩形上に分割した図 9 の赤枠部分をそれぞれ評価地域として実験結果を示す。

5.2 実験結果

図 10 に各評価地域の被災者が避難所に対して送信した

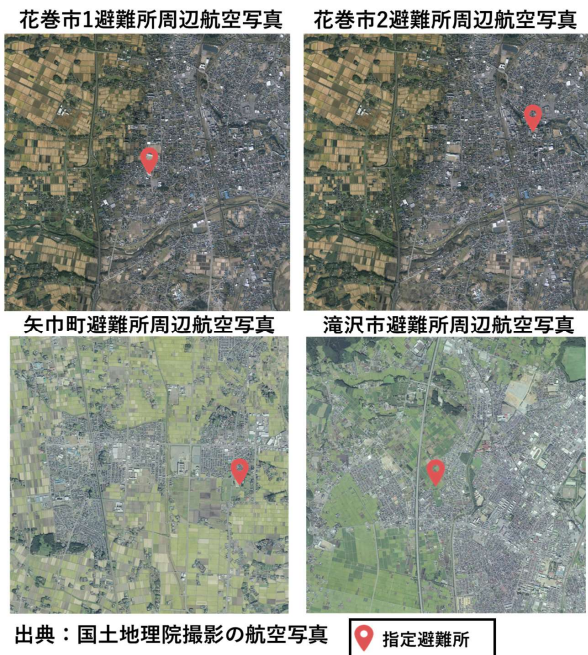


図8 本実験で参考にした市町村の航空写真と避難所の位置

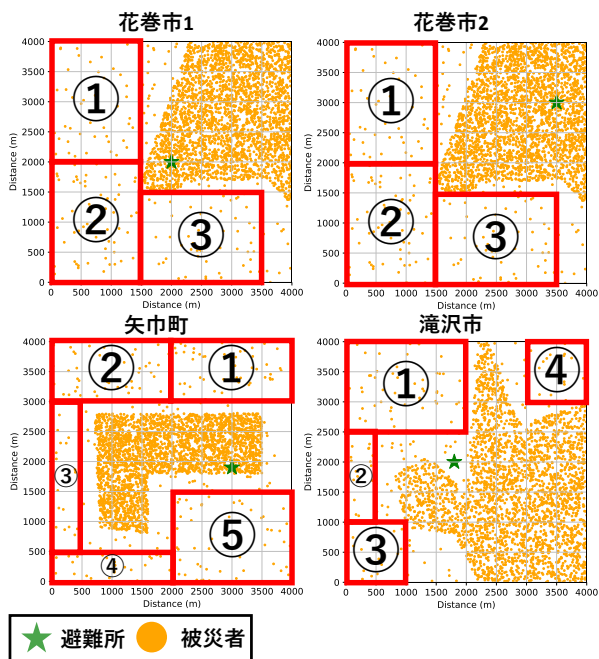


図9 各避難所・被災者のノード分布と各評価地域

メッセージのうち、避難所まで到達したメッセージの平均数を示す。また、図11にシミュレーション時間内に避難所に到達したメッセージについて、被災者のメッセージ送信から避難所に到達するまでに要した遅延時間を示す。また、表3、4にそれぞれ提案手法と反発飛行のみを比較した際のメッセージ到達数の向上率とメッセージの到達遅延時間の差を示す。

メッセージの到達数は、本提案手法を用いた場合にほとんどの評価地域において向上しているが、一部の評価地域では、花巻市2の評価地域③や矢巾町の評価地域①のよう

に減少する地域が発生した。メッセージ到達数の向上率でみると、最も平均向上率が高い滝沢市では、UAVが15台の場合ではどの地域においても30%以上到達数が向上していたが、ほとんどの地域においてUAVの台数が増加するに連れて向上率は減少していた。遅延時間は、花巻市1と滝沢市のほとんどの地域で反発飛行のみと比較し、遅延時間が減少していた。一方で、花巻市2と矢巾町では、ほとんどもしくは半分以上の地域で反発飛行と比較して遅延時間が増加していた。

表3 提案手法と反発飛行のみを比較した際のメッセージ平均到達数の向上率

ノード分布マップ	評価地域	被災者ノード数	メッセージ平均到達数の向上率 (%)			
			$100 \left(\frac{\text{提案手法}}{\text{反発飛行のみ}} - 1 \right)$			
			15台	20台	25台	30台
花巻市1	①	46	25.87	22.50	16.22	10.68
	②	69	12.73	16.38	15.47	11.63
	③	53	11.53	9.09	9.02	6.98
花巻市2	①	46	18.37	17.22	13.34	5.22
	②	69	17.22	13.19	11.48	5.27
	③	53	-2.48	-0.47	-0.86	-1.05
矢巾町	①	50	-19.82	-5.13	0.32	1.14
	②	45	12.18	11.24	7.18	4.89
	③	23	13.59	14.68	10.03	5.85
	④	26	76.75	53.70	35.97	24.42
	⑤	50	7.03	10.23	6.32	5.54
滝沢市	①	55	40.98	30.90	23.15	13.89
	②	19	30.60	26.52	18.32	11.99
	③	17	51.20	44.87	32.92	25.15
	④	18	39.11	24.53	20.36	13.70

表4 提案手法と反発飛行のみを比較した際の安否メッセージ平均到達遅延時間の差

ノード分布マップ	評価地域	被災者ノード数	メッセージ平均到達遅延時間の差 (sec)			
			(反発飛行のみ - 提案手法)			
			15台	20台	25台	30台
花巻市1	①	46	25.74	13.00	20.86	19.63
	②	69	3.85	6.12	18.97	23.78
	③	53	8.89	-1.26	9.59	13.31
花巻市2	①	46	-42.89	-32.72	-32.65	-29.25
	②	69	-76.86	-67.94	-49.99	-36.11
	③	53	-61.87	-79.93	-72.73	-53.55
矢巾町	①	50	-203.04	-148.12	-99.06	-59.95
	②	45	-175.86	-132.79	-95.54	-62.38
	③	23	-63.60	-75.07	-60.44	-43.38
	④	26	1.62	-11.38	-14.63	0.21
	⑤	50	16.72	-1.03	-12.58	-8.14
滝沢市	①	55	52.04	44.93	47.63	42.35
	②	19	48.99	41.58	43.94	42.04
	③	17	-1.64	14.07	29.16	39.65
	④	18	-16.16	1.57	20.99	31.28

5.3 考察

人口密集地域と非人口密集地域の配置によって、メッセージの到達数に大きな変化があった。

花巻市1の評価地域①では、他の花巻市1の評価地域②、③と比較し、UAVの台数が増加しても一貫してメッセージ取得向上率が高かった。この理由として、避難所の配置、被災者の分布の影響により、UAVが復路飛行の時の飛行経路が必ず、評価地域①を経由するように飛行経路が生成されたため、評価地域①にUAVが集中しメッセージ到達数が他の評価地域と比較して高い値になったと考えられる。

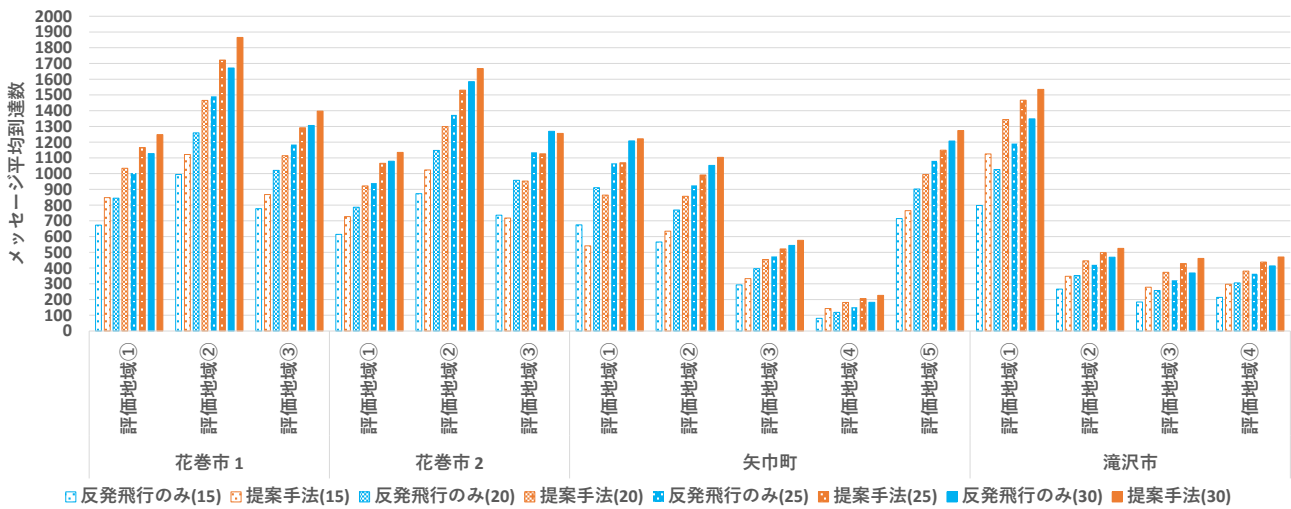


図 10 各評価地域におけるメッセージ平均到達数

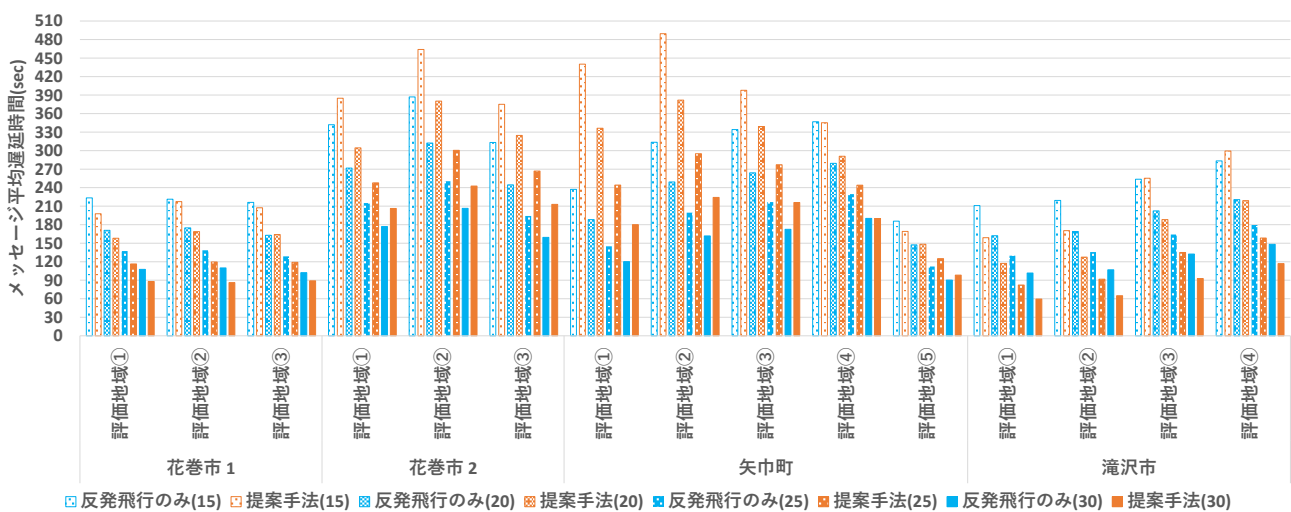


図 11 各評価地域におけるメッセージ平均到達遅延時間

また、花巻市 2 は、同じ被災者のノード分布である花巻市 1 に比べてメッセージ到達数の向上率が低下した。この原因は避難所と非人口密集地域の位置に関係すると考えられる。花巻市 2 では、花巻市 1 と比較し、避難所と各非人口密集地域との間に距離があり、さらに人口密集地域の奥に設置されていた。そのため、被災者のメッセージを避難所に向けて配送する際に、どの地点においても人口密集地域を横断するような飛行経路が生成され、結果として、避難所にメッセージを届けるために非人口密集地域から離れる UAV が花巻市 1 より多く発生し、非人口密集地域の被災者からのメッセージ到達数が減少した。この花巻市 1 と花巻市 2 の結果から、同じ被災者のノード分布であっても避難所の位置が結果に影響を与えることが明らかになった。また、花巻市 2 のように人口密集地域を飛行する割合が増加する場合は、対象地域全体に対して一様に展開する反発飛行のみと同じ状態に近づいていくため、反発飛行のみとの差が少なくなっていくと考えられる。

矢巾町の評価地域①は、反発飛行のみと比較しメッセー

ジ到達数が悪化していた。原因として、避難所へ向かう復路経路が人口密集地域を大きく迂回する経路が生成されてしまい遅延時間が増加したことで、復路飛行で避難所へ向かう UAV が評価地域③から④に付近に集中してしまい、評価地域①へ向かう UAV が少なかったことが挙げられる。遅延時間の増加原因は、矢巾町の k-means 法による分類結果で評価地域①から⑤にかけて連続した非人口密集地域が発生したことにあると考えられる。分類結果を基に復路の経路生成を行うと評価地域①の UAV は、メッセージを届けるために中央部にある人口密集地域の避けて評価地域②から⑤を通り、人口密集地域の周りを半周しながら届ける必要があるため、他の評価地域よりも遅延時間が増加し、被災者からメッセージを受信してもシミュレーション時間内に届けられないメッセージが発生する可能性が高まってしまった。また台数が増加すると、評価地域③の縦に細長い地域において復路飛行を行う UAV で渋滞が発生し、UAV の飛行の流れが停滞してしまった。このノード分布マップから、人口密集地域を回避するための復路経路の生成が正

常に機能し、人口密集地域の飛行を最小限に抑えて飛行ができていたことは確認できた一方で、評価地域④のように大きく迂回しすぎる場合や、経路上に渋滞が発生することによる UAV の飛行の流れの悪化が遅延時間の増加や UAV の偏りを発生させ、結果として避難所に到達するメッセージ数の悪化につながることが明らかになった。このことから、復路経路の生成時、避難所との距離や他の UAV の飛行状況を加味した経路生成手法を検討する必要がある。また、非人口密集地域が今回のノード分布マップのように四方もしくは複数箇所に存在する場合、可能な限り取り残しが発生しないよう UAV を均等に分散可能な往復飛行の方法を検討する必要がある。

滝沢市は、他のノード分布マップに比べ、平均してどの評価地域もメッセージ到達数の向上率が高かった。その理由の一つとして、非人口密集地域として判定された地域の割合が他ノード分布マップに比べ少なかったことが挙げられる。他のノード分布マップでは、k-means 法によって非人口密集地域と分類された割合が約 5 割であったが、滝沢市の非人口密集地域と分類された割合は、約 4 割と他のノード分布マップに比べ 1 割程度少なく、非人口密集地域の面積あたりの UAV の台数が他のノード分布マップに比べ高かった。そのため、各 UAV の通信圏内における非人口密集地域の被災者数が増加し、UAV が取得したメッセージの母数が増加したことが、避難所までのメッセージ到達数の向上に繋がったと考えられる。さらに、今回は避難所が非人口密集地域と人口密集地域の境界に近い位置に設置されており、復路飛行時に人口密集地域を飛行する割合が少なかったこともメッセージ到達数の向上の要因の一つだと考えられる。このノード分布マップでは、評価地域④のような人口密集地域に取り囲まれた非人口密集地域があったが、他の評価地域と比較しメッセージ到達数の向上率が極端に低下することはなかった。UAV の移動ログを確認したところ、隣接する評価地域①を飛行する UAV が反発飛行によって定期的に一定数、評価地域④に向けて飛行を行っていたため、評価地域④被災者のメッセージを安定して取得することができていたことが分かった。

よって本実験から、本提案手法を用いることで反発飛行のみと比較して、ほとんどの評価地域の被災者のメッセージ到達数が増加し、非人口密集地域の被災者への通信提供機会の向上に一定の効果があることが示された。一方、課題として、避難所や被災者の分布によっては遅延時間の増加やメッセージの到達数の低下が発生することが明らかとなった。今後は、これらの課題を解決するため、人口密集地域の迂回飛行手法の改善や UAV の配置の偏りをなくす分散展開手法を検討していく必要がある。

6. まとめ

本研究では、既存通信設備に障害が発生している発災初

期において、通信の必要性が高い非人口密集地域の被災者に対して優先的に通信機会を提供することを目的とした UAV による代替ネットワーク展開のため飛行方式について提案した。また、本提案手法による非人口密集地域の被災者に対する通信提供機会の向上効果を検証するため、オリジナルのシミュレータを用いて、実際の市町村を参考にしたノード分布マップを用いて人口密度を考慮しない手法との比較実験を実施した。結果として、ほとんどの評価地域で非人口密集地域の被災者から送信されるメッセージの避難所までの到達数が向上を確認した。また一方で、課題として、避難所や被災者の分布によっては遅延時間の増加やメッセージの到達数の低下が発生することが明らかとなった。今後は、これら課題を解決するため、人口密集地域の迂回飛行手法の改善や UAV の配置の偏りをなくす分散展開手法を検討していく。

参考文献

- [1] 河本美穂, 重安哲也: 災害発生時における DTN 手法を導入した効果的な被災情報収集システムの開発, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 2, pp. 643–656 (2016).
- [2] 金田知展, 中村嘉隆, 高橋修: DTN を用いた災害時通信システム構築法の提案, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム論文集, Vol. 57, No. 2, pp. 964–969 (2013).
- [3] 矢内宏樹, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭: 大規模災害被災地におけるドローンを用いた無線中継ネットワークの飛行モデル, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J103B, No. 2, pp. 57–66 (2020).
- [4] Sanaa, S. and Rania, I.: On-demand deployment of multiple aerial base stations for traffic offloading and network recovery, *Computer Networks*, Vol. 156, pp. 52–61 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.03.016> (2019).
- [5] 浅野博之, 岡田啓, ベンナイラシャドリヤ, 片山正昭: ドローンを用いた無線リレーネットワークにおける不均一なユーザ分布を考慮した飛行方式, 信学技報, Vol. 121, No. 41, pp. 33–38 (2021).
- [6] Fall, K.: A delay-tolerant network architecture for challenged internets, *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pp. 27–34 (2003).
- [7] DJI: Matrice 200 シリーズ V2 - 製品情報 - DJI, DJI JAPAN 株式会社 (オンライン), 入手先 (<https://www.dji.com/jp/matrice-200-series-v2/info#specs>) (参照 2022-2-7).
- [8] Steinhaus, H.: Sur la division des corps materiels en parties, *Bulletin L' Académie Polonaise des Science*, Vol. 4, No. 12, pp. 801–804 (1957).
- [9] MacQueen, J. et al.: Some methods for classification and analysis of multivariate observations, *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, Vol. 1, No. 14, Oakland, CA, USA, pp. 281–297 (1967).
- [10] Dijkstra, E. W. et al.: A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische mathematik*, Vol. 1, No. 1, pp. 269–271 (1959).
- [11] Vahdat, A., Becker, D. et al.: Epidemic routing for partially connected ad hoc networks, *Technical Report Technical report cs-200006*, Duke University (2000).