

複数台の UAV を用いた災害時代替ネットワークの 展開手法の一検討

小原 和也^{1,a)} 今野 瞭¹ 今井 信太郎^{1,b)}

概要: 地震等の災害発生時、特に災害発生初期において、既存の通信インフラに障害が発生し、被災地の通信手段が失われる恐れがあり、災害環境下でも利用可能な災害時代替ネットワークが求められている。そこで、本研究では、複数台の無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) を用いて被災者と避難所間をつなぐ災害時代替ネットワークの展開手法を検討する。UAV はバッテリー等の制約があるため、短い稼働時間内で災害発生初期に必要な情報を効率良く集配する必要がある。そのため、より広範囲の被災者に対して通信を提供するためには、UAV 間での通信提供範囲の重複の低減を図り、通信状況に応じて UAV を配置・移動させる必要がある。そこで、本研究では、UAV を格子状に配置し、各格子点を中心として巡回させる手法を提案し、被災者と避難所間のパケット到達率、被災者への通信提供可能範囲に基づき実用性等の評価を行う。

1. はじめに

近年、スマートフォンやタブレットなどの携帯情報端末の普及が進んでいる。日本における 2019 年の個人のスマートフォンの保有率は 67.6 % に達しており、2 人に 1 人以上がスマートフォンを保有している状況にある [1]。また、過去 3 年の個人のスマートフォンの保有率は増加傾向にあり、今後もスマートフォンの利用普及が進むと予測される。さらに、スマートフォンやタブレット等の普及と共に、SNS (Social Networking Service) の普及も進んでいる [2]。スマートフォンやタブレット等の携帯情報端末は、従来の携帯通話・メールサービスに加え、インターネットを通じた SNS が発展していくことにより、今後さらに重要なコミュニケーションツールになっていくと予想される。

大規模災害発生時にも、携帯通信端末は情報収集の手段のひとつとして利用されている。2016 年に発生した熊本地震では、災害発生時、被災者の情報収集手段として、携帯通話、メール、SNS など様々なサービスが複数活用されていた [3]。

携帯通信端末は、携帯基地局や公衆無線 LAN の整備が進んだことにより、広域環境でインターネットに常時接続できるようになってきている。しかし、大規模災害発生時

の被災地においては、災害の影響による携帯基地局の物理的故障や停電による接続断、通信需要の急激な増加による輻輳が発生し、被災地の通信手段として機能しない恐れがある。そのため、大規模災害による既存の通信インフラに障害が発生した場合に備えて、既存の通信インフラの代替手法や既存の通信インフラに依存しない災害時代替ネットワークの展開手法が求められている。

既存の通信インフラの復旧手法として、車載型基地局や船舶型基地局などの移動基地局を用いた手法が挙げられる [4], [5]。しかし、移動基地局の台数は限られているため、災害の発生場所によっては被災地への移動等に時間がかかる場合がある。また、移動基地局が二次災害に巻き込まれる可能性もある。そのため、移動基地局による代替手法では、通信環境の即時代替は見込めず、災害発生初期の安否や避難情報等の重要な情報収集は難しい。

そこで、災害発生初期の通信断絶時間を低減するために、無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) を用いた代替手法や既存の通信インフラに依存しない災害時代替ネットワーク展開手法の開発研究 [6], [7] が行われている。UAV は、地上の交通状況や地形による影響を受けにくく、高い機動力を有しており、移動基地局による代替手法の問題点であった移動遅延や二次災害に移動基地局が巻き込まれるリスクを低減することができ、移動基地局よりも安価な費用で導入が可能である。UAV は、輸送、建築、農業など多岐にわたる分野での利用が進んでおり、地方、都市を問わず今後普及が進んでいくと予想される。普及が進む

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, Takizawa, Iwate 152-52

a) g231s006@s.iwate-pu.ac.jp

b) s-imai@iwate-pu.ac.jp

ことで、非災害時に別用途として利用されている UAV を、災害発生時には通信インフラを構築する通信機器として利用できる可能性も出てくる。

一方で、UAV は駆動時間に大きな制約があるため、長時間の運用では、バッテリーの交換・充電を考慮する必要がある。災害発生時は電力インフラの被害から停電が発生し、小型発電機などの限られた電力源しか使用できない状況が想定されるため、UAV のバッテリーの交換・充電を行い永続的に展開することは不可能である。

以上の背景から、災害発生初期における UAV による代替ネットワークは、できる限り広範囲に展開し、安否確認、救助要請、避難情報、被害状況などの情報収集に利用されることが望ましいと考えられる。そこで、本研究では災害発生初期の一時的な通信環境を広範囲に展開することを目的とし、複数台の UAV を用いた災害時代替ネットワークの展開手法を提案・評価する。

2. 関連研究

2.1 DTN を用いた災害時ネットワークの構築

災害時、既存の通信インフラを用いずに被災者のスマートフォンやパソコンなどの通信機器などを介してパケットリレー方式でパケットの転送を行う技術として遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Network) の研究が行われている [8], [9]。特にこの技術は、避難時の周辺の被災状況や避難経路情報の共有、その場を動けない被災者の救助要請等に役立てられる。しかし、ネットワーク性能は、その場の人口密度に依存してしまうため、人口密度の低い地域では、必要な情報の伝播が難しく、性能が低下する。また、Epidemic-routing などを用いた手法では、無条件にデータを接触した通信機器に転送していくため、高データ到達率、低遅延での伝播が見込めるが、バッファオーバーフローの発生やバッテリーの大量消費を招く。

2.2 UAV を用いた災害時代替ネットワークの展開手法

UAV を用いた災害時代替ネットワークの展開手法として、被災者からの情報を転送する UAV 群の中に、エリア全体を巡回する UAV を加え伝送遅延の短縮を図る手法と継続的な運用手法が提案されている [7]。一部の UAV を巡回させる場合は、被災者からの情報を転送する UAV の台数がその分減少することになるため、被災者への通信環境の提供範囲が狭まるという問題がある。

一方、UAV を巡回させない場合は、隣接 UAV 間の通信をどのように実現するのが問題となる。隣接 UAV 間の距離を常に通信ができるように設定することが一つの解決策であるが、この場合も被災者への通信環境の提供範囲が狭まるという問題がある。この問題を解決するために、本研究では、UAV 間の定期的な通信と広範囲への通信環境の提供が可能な UAV の展開手法を提案する。

3. 想定する環境

本研究では、災害発生初期の一時的な通信環境を広範囲に展開することを目的としている。そのため、限られた稼働時間および台数の UAV でより多くの被災者に対して災害発生初期に必要な安否情報や避難情報を効率良く集配する必要がある。

これを踏まえて、本提案手法では以下を実現する。

- 被災者と避難所間のパケット到達率の向上
 - 被災者・避難所間の遠回りのない通信経路の構築
- 限られた台数の UAV で多くの被災者の通信を中継し、パケット到達率を向上させるためには、各 UAV の担当範囲の重複を低減し、通信提供範囲を可能な限り大きくする必要があります。

本研究では、短時間での運用で確実に必要な情報を多く人に伝播させるため、送信内容や通信相手に制限を設ける。被災者は安否確認のために、各家族へそれぞれが直接連絡をとろうとすることが予想される。しかし、被災者間での直接通信では、送信相手がどこに居るか分からないため、確実にパケットを到達させるには全パケットを転送する必要がある。そのため、被災者間での直接通信の増加に伴い、通信帯域の圧迫やバッファオーバーフローが発生し、大幅な伝送遅延や情報の欠損が起こる可能性がある。

よって、本研究では、安否報告、救助要請、避難情報の集配を、図 1 のように、被災者と最寄りの避難所間の多対一の方式で行うこととする。被災者は、避難所から取得した避難情報を安全な避難活動ために利用し、避難所は、被災者からの安否情報や救助要請を、被災者の受け入れ態勢の準備や救助計画の策定に利用する。

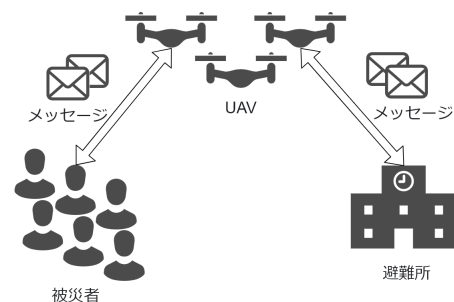


図 1 UAV を介した被災者と避難所間の通信イメージ

4. 格子状の UAV 展開手法

本研究では、UAV を格子状に展開し、各 UAV は格子点の中心から決められた範囲内を巡回する手法を提案する。4.1 節では、事前に展開手法に必要な情報とその取得方法について述べ、4.2 節以降で展開手法の詳細を述べる。

4.1 展開に必要な情報と取得方法

以下に、UAV が展開前にサーバから取得する情報と、その簡単な用途を示す。

- 避難所の位置：展開先の座標情報の取得に利用
- UAV の移動速度：協調巡回を行う際の巡回先の導出に利用
- 自身の配置先格子点の座標：展開先の座標情報と協調巡回を行う際の巡回先の導出、情報の伝播先の決定に利用
- 格子点間の距離：展開先の座標と通信提供範囲の導出に利用
- サーバ運用開始後の経過時間：協調巡回を行う際の巡回先の導出に利用

これらの情報は、各 UAV が避難所に設置されたサーバから取得することとし、情報の取得完了後ただちに各 UAV は災害用ネットワーク展開のため移動を開始するものとする。

4.2 UAV の格子状の配置と巡回

災害発生時の被災者の分布は不明であることから、より多くの被災者に通信環境を提供するために、UAV を均一に配置する必要がある。したがって、本提案手法では、避難所の位置情報を原点とした格子状に各 UAV を配置する。各 UAV は、図 2 のように自身の配置先の座標と格子点間の距離から自身の配置先の座標を算出し移動する。

各 UAV は自身が配置された格子点の座標情報を保持しておくことにより、隣接 UAV 間で通信が発生した際にその座標情報を交換することによって、自身よりも宛先に近い次の UAV にパケットを送信することが可能になる。これにより、3 節で述べた被災者・避難所間の遠回りのない通信経路の構築が可能となる。

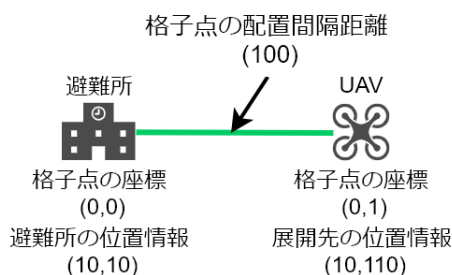


図 2 格子点の座標情報と位置情報との関係

図 3 のように、UAV を静的に展開し、隣接 UAV 間の距離を常に通信ができるように設定した場合、各 UAV の担当する通信提供範囲の重複が増えてしまい、全体の通信提供範囲が狭くなってしまふ。

そこで、本提案手法では、各 UAV の担当範囲の重複を低減し、通信提供範囲の拡大を図るために、UAV を格子状に配置したうえで、図 4 のように格子点を中心とした移動

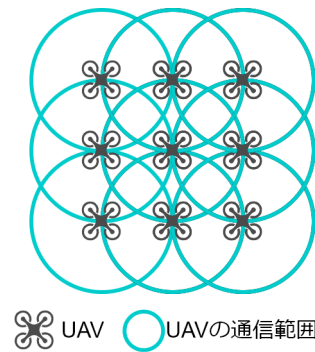


図 3 静的に展開された UAV 群

半径を設定し、範囲内で巡回させる。本提案手法では、移動半径は格子点間の距離の $\frac{1}{2}$ とする。

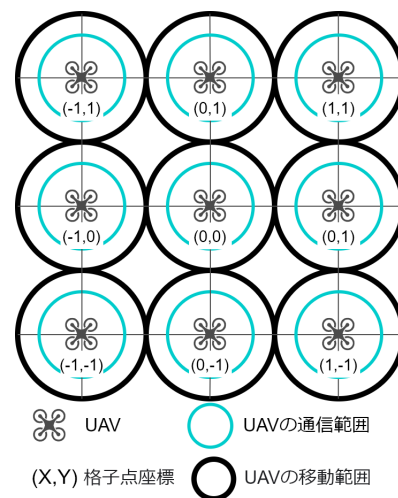


図 4 格子状に展開され巡回する UAV 群

4.3 協調巡回

本提案手法において、UAV は巡回を行うが、できる限り通信提供範囲内の通信機会を均一にし、隣接する UAV と情報伝播のための通信を行う必要がある。そこで、巡回経路の生成法と巡回順路について考える。

4.3.1 巡回経路の生成手法

各隣接 UAV と通信を行うには、図 4 における上下左右の地点を巡回する必要がある。そのため、本提案手法では、渦を描くように UAV を巡回させる。

本提案手法では、図 5 のように、 x 軸の正の方向を 0 度とした角度を用い、 0° 、 90° 、 180° 、 270° の線上に巡回地点を設定する。本稿では、巡回地点を中心から近い順に $P_1, P_2, \dots, P_{\max}$ とする。

隣接 UAV 間では、情報の転送ため、必ず一時的に担当する通信提供範囲に重複が生じてしまふ。情報の転送には図 6 の右側のようにある程度お互いに接近した状態で通信を行った方が安定した通信速度で通信を行うことができる。一方で、一定以上近づいても通信速度の向上は見込めないため、移動提供範囲の境界線まで近づいての転送は、図 6

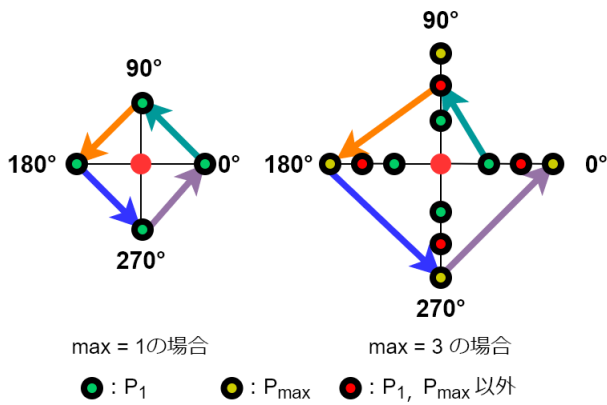


図 5 各巡回地点と巡回経路

の左側のように移動提供範囲の重複による被災者の通信機会の損失のデメリットが生じてしまう。そのため、図5の P_{max} を適切に設定する必要がある。本提案では、UAVの通信半径 (R_c)、通信見込み倍率 (x)、通信移動半径 (R_m) から、以下の式で中心と P_{max} 間の距離 (D_{max}) を求める。

$$D_{max} = R_m - \left(\frac{xR_c}{2}\right) \quad (0 < x < 1)$$

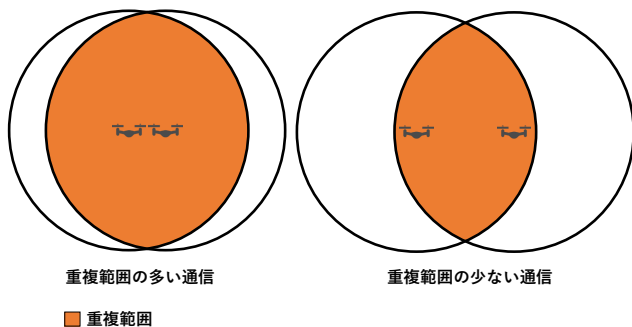


図 6 UAV 間の通信時における通信提供範囲の重複の関係

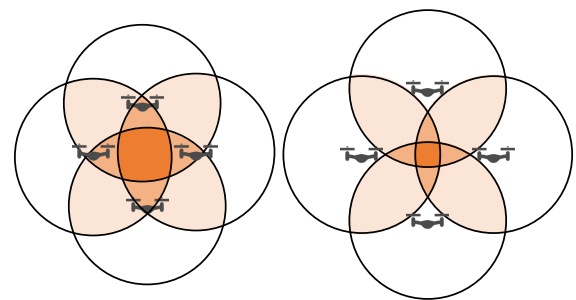
通信提供範囲内を渦を巻くように巡回を行う場合、図7の左側のような円の中心点に近い位置を巡回するほど、外側に存在する被災者の通信機会が少なくなり、被災者の現在位置による通信環境に格差が生じやすい。そのため、 P_1 は、図7の右側のように中心部の重複を考慮して決定する必要がある。本提案では、UAVの通信半径 (R_c)、通信見込み倍率 (x) から、以下の式で P_1 間の距離 (D_1) を求める。

$$D_1 = xR_c \quad (0 < x < 1)$$

上記のように求めた、中心から最も近い地点の中心からの距離 (D_1)、中心から最も遠い地点の中心からの距離 (D_{max})、さらに通信見込み倍率を掛けた UAV の通信半径 (xR_c) と格子点間の距離 (D_d) を用いて巡回地点の数を定める。まず、以上の条件を満たす場合は、 $max = 1$ となる。

$$xR_c > 2 \left(\frac{D_1}{2} - D_1\right)$$

この条件式は、隣接 UAV 間が互いの P_1 に配置する場合



中心部の重複範囲が多い巡回 中心部の重複範囲の少ない巡回

■ 4地点での重複範囲 ■ 3地点での重複範囲 □ 2地点での重複範囲

図 7 通信提供範囲の中心部を巡回した際の重複範囲

に通信が可能であることを表している。そのため、巡回地点は、巡回距離を減らすために P_1 となる。

次に条件式。

$$(D_1 + xD_c) \geq (D_{max} - xD_c)$$

を評価する。この式を満たす場合は、線分 P_1P_{max} 上の全ての点において、 P_1 、 P_{max} のいずれかに位置する UAV と通信可能であることを表している。よって、 $max = 2$ になる。一方、この条件式を満たさない場合は、線分 P_1P_{max} 上に通信不可能な点があることを表すため、その通信不可能な範囲に対して追加で巡回地点を設定する。

本提案手法において、UAV は図8のように巡回地点を渦を描くように巡回する。このとき、UAV は、ある角度の P_m から次の角度の $P_n (m \neq n)$ というように移動する。例えば、8の①では、 0° の P_1 から 90° の P_2 に移動している。これは、通信提供範囲の最大化を図るためである。しかし、この移動だけで経路を構築すると繰り返し同じ地点のみ巡回し、巡回されない地点が発生することになるので、1サイクルのうち必ず1回 P_{max} から P_{max} への移動を含むこととする。図8の②はこの移動を表している。

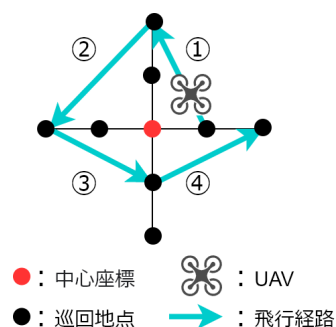


図 8 UAV の巡回経路の比較

4.3.2 巡回順序と方向

本提案手法において、UAV は渦を描くような巡回を行うが、各 UAV が生成された巡回地点を同じ速度かつ相対的に同一の経路で辿った場合、UAV 間の通信が行えなくなってしまう。そのため、UAV の展開のために保持して

いる格子点の座標情報を基に、巡回する際の回転方向、開始角度をずらすことによって、通信を実現する。本提案手法では、格子点の座標の x 軸の値の偶数、奇数で開始角度を決定し、 y 軸の値の偶数、奇数で回転方向を決める。図9に巡回の例を示す。図9では、各 UAV は、 x 軸の値が偶数の UAV A, C の場合、 0° 上の P_1 を巡回開始地点とし、 x 軸の値が奇数の UAV B, D の場合、初期の巡回地点を 180° 上の P_1 を巡回開始地点とする。また、 y 軸の値が奇数の UAV A, B の場合、左回転で巡回地点を移動し、 y 軸の値が偶数の UAV A, B の場合、右回転で巡回地点を移動する。これにより、図9のように、1 サイクルで必ず隣接する UAV に 2 台接触することができる。

しかし、UAV が担当する通信提供地点に到達し、巡回を開始するまでの時間は、担当する通信提供地点までの移動距離などにより異なるため、格子点座標のみでは、UAV 間の通信は上手くいかない恐れがある。そのため、本研究では、UAV 間で展開開始時刻と移動速度の UAV 間で展開開始時刻と移動速度をあわせ、移動速度と巡回地点間の距離から巡回に必要な時間を計算する。そして、担当する通信提供地点に到着した時刻から現在向かうべき巡回地点を求め、巡回を開始する。また、機体性能による移動速度の誤差の吸収や UAV 間のパケット転送時間を確保するために巡回時間にゆとり時間を加える。

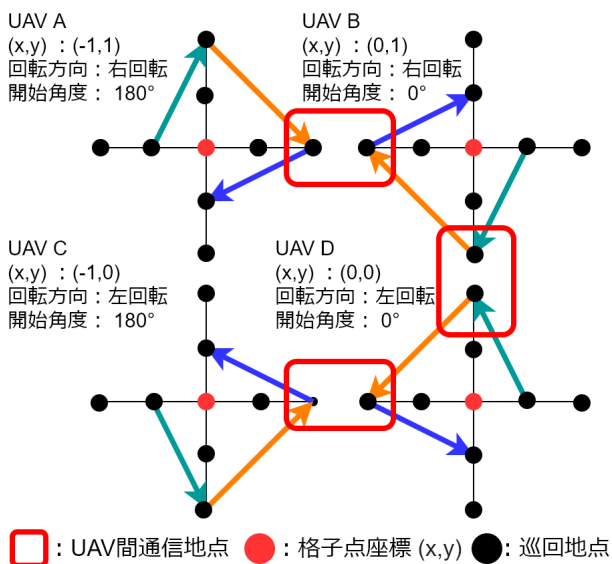


図9 UAV 群による協調巡回の例

5. 評価実験

本実験では、本提案手法の有効性をシミュレーションを用いて、比較手法と比べ、パケット到達率を評価する。また、提案手法に複数のパラメータを当てはめた際のホップ数と伝送遅延の変化から、本提案手法の通信特性を評価する。

5.1 実験条件

実験の共通条件を表1に示す。実験の初期状態は、災害発生直後において、避難所に災害時代替ネットワーク構築に利用する全ての UAV が集まっている状態を想定する。実験時間は、UAV が避難所から展開先への移動時間を含めて 20 分間とする。実験のフィールドは、避難所を中心とした $3500\text{m} \times 3500\text{m}$ の正方形の範囲とする。被災者は 100 人が避難所を中心とした $3000\text{m} \times 3000\text{m}$ の正方形の範囲にランダムに配置され、移動しないものとする。全ノード間の通信速度は 6Mbps とし、UAV の通信半径を 100m と 150m に設定した。また、今回は被災者から避難所への通信のみを想定する。

本実験では実際の運用を想定し、UAV の避難所から展開先までの移動時間を含め、さらに現状の UAV の稼働時間を考慮した実験時間を想定することにより、より現実的な実用性の評価を行う。

表1 実験の共通条件

展開範囲	3500m × 3500m
UAV の台数	49 台
格子点間隔	500m
通信速度	6Mbps
被災者数	100 人
被災者分布範囲	3000m × 3000m
被災者の送信パケットサイズ	1024 Byte
被災者のパケット送信回数	1000 回
シミュレーション時間	20 min
シミュレーション回数	100 回

5.2 ランダム移動による巡回手法との比較

比較対象として、本提案手法のうち、協調巡回をランダム移動に変更したものと比較し、本提案手法の評価を行う。ランダム移動を行う手法では、隣接する UAV 間の通信機会を最大化するため、通信提供半径に重複部分を持たせ、図10のように通信提供範囲の限界地点をランダムに角度を変更し移動する。そのため、UAV の移動範囲の半径は、提案手法では 250m、ランダム移動による巡回手法では 300m とする。

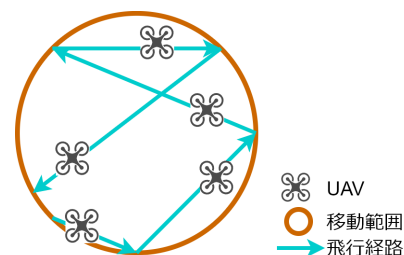


図10 ランダム移動による巡回の例

5.3 評価項目と評価対象

本実験では、被災者から避難所までのパケット到達率を評価する。それに加え、パケットが避難所までに到達するまでの遅延時間とホップ数の関係を明らかにし、通信品質の評価も行う。

今回の実験では、2つの手法を UAV の通信半径と移動速度を変更した表 2 にある 7 種類を評価対象とした。

表 2 実験対象と各手法の条件

評価対象	UAV の通信半径	UAV の移動速度
提案手法①	80m	10m/s
提案手法②	80m	15m/s
提案手法③	100m	10m/s
提案手法④	150m	10m/s
提案手法⑤	240m	10m/s
ランダム移動①	100m	10m/s
ランダム移動②	150m	10m/s

5.4 実験結果

表 3 に避難所まで到達した被災者のパケットの割合を示す。表 3 より、提案手法の③、④が、同一通信条件下のランダム移動による巡回手法と比べて、平均で約 48% から 62% 高いことが分かった。また、最高到達率、最低到達率、分散から、提案手法では、ランダム移動による巡回手法と比較し、安定して範囲内の被災者からのパケットの取得と伝播ができていているといえる。一方で、提案手法のパケット到達率が 100% にならなかった理由として、4つの格子点座標のから等距離の部分(例: 図 4 の (0.5, 0.5) の位置)の通信の提供が行き届かなかったため、避難者のパケット取得ができず、避難所までパケットが到達しなかったためと考えられる。提案手法①では、パケット到達率が他の提案手法②から⑤と比べて大きく低下していることが分かる。この原因は、巡回地点の増加による 1 サイクルあたりの巡回距離が増加したことにある。そのため、提案手法②は、1 サイクルあたりの巡回距離は提案手法①と同じであるが、移動速度が速かったため、パケット到達率が高かったと考えられる。

図 11 に避難所まで到達したパケットのホップ数と転送遅延の関係を示す。今回の実験では、被災者の送信パケットが必ず UAV を介して運ばれるため、被災者と避難所の 1 ホップでのパケットは存在しない。ランダム移動による手法では、3 ホップから遅延時間が急激に増大している。これは、UAV 間での隣接通信がうまく行われなかったため、増大していると考えられる。一方で、本提案手法は、協調巡回を行うことにより、遅延時間の急激な増大は無かったが、ホップ数の増加と共に遅延時間は増加している。また、2つの提案手法を比較した際に、UAV の通信可能半径が大きいほど遅延時間が少ない傾向にあることが分かる。これは、1 サイクルにかかる巡回距離が増大したためと考えられる。

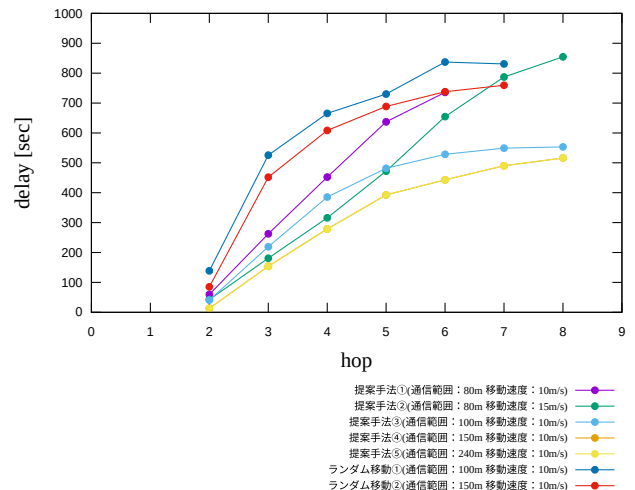


図 11 避難所まで到達したパケットのホップ数と平均転送遅延の関係

6. まとめと今後の課題

本研究では、災害発生直後の既存の通信インフラが失われた環境下で一時的な通信環境を提供することを目的とした、複数台の UAV による災害時代替ネットワークの展開手法について検討を行った。本提案手法は、評価実験より適切なパラメータ調整を行うことによって、UAV の稼働時間内で、静的に展開するよりも広範囲のユーザの通信環境を提供できることが示された。今後は、実際の UAV の機体性能や通信機器の通信性能を踏まえた適切な各 UAV の担当する通信提供範囲の算出方法の検討を行っていく。また、本提案手法では、UAV は、担当する通信提供範囲に滞在し、被災者から様々な情報を収集しているため、その情報の内、役立つ情報を通過する他の被災者に共有するといった、被災者と避難所間の単純な情報の伝播だけでなく、状況に応じて UAV による自律的な情報の配信を行う方法についても検討していく。

参考文献

- [1] 総務省, "令和 2 年版情報通信白書", 第 2 部 基本データと政策動向, 2020
- [2] ICT 総研: "2020 年度 SNS 利用動向に関する調査", 入手先 (<https://ictr.co.jp/report/20200729.html>) (参照 2021-4-15).
- [3] 総務省, "平成 29 年版情報通信白書", 第 1 部 特集 データ主導経済と社会変革, 2017
- [4] KDDI: "災害対策への取り組み", 入手先 (<https://www.au.com/mobile/anti-disaster/action/>) (参照 2021-4-15).
- [5] SoftBank: "復旧への取り組み", 入手先 (<https://www.softbank.jp/corp/csr/reconstruct/restoration/>) (参照 2021-4-15).
- [6] K. G. Panda, S. Das, D. Sen and W. Arif, "Design and Deployment of UAV-Aided Post-Disaster Emergency Network," in IEEE Access, vol. 7, pp. 102985-102999, 2019

表 3 避難所まで到達した被災者のパケットの割合

巡回手法	平均到達率 (%)	最高到達率 (%)	最低到達率 (%)	分散
提案手法①	50.67	61	39	19.64
提案手法②	71.59	81	62.56	16.85
提案手法③	81.17	89	63	19.72
提案手法④	91.92	100	83	9.42
提案手法⑤	100	100	100	0
ランダム移動①	16.55	41	3	78.92
ランダム移動②	42.98	72	9	169.539

- [7] 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.J103-B, No.2, pp. 57-66, 2020
- [8] 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シンポジウム 2013 論文集, Vol. 2013, pp. 621-626, 2013
- [9] 山下諒馬, 高見一正, ”災害時 DTN 通信でのハンドシェイク型マルチホップメッセージの転送方式”, マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, Vol. 2014, pp. 621-626, 2014