

通信環境を考慮したUAV群による 自律的な代替ネットワーク構築手法の評価

福永 慧¹ 中村 嘉隆² 稲村 浩²

概要：大規模災害発生時には一部の携帯電話基地局が停波し、モバイル端末は携帯電話基地局との通信が困難になる問題が生じる。この問題を解決するためには、携帯電話基地局の電波が行き渡っていない領域で代替ネットワークを構築する必要がある。代替ネットワーク構築手法の1つとして無線機能を搭載したUAV(Unmanned Aerial Vehicle)群を利用することが挙げられる。しかし、UAVのコスト等の要因によってUAVの機数は有限であるため2つの問題が考えられる。1つ目は、通信量が多い場合はUAVのバッファに蓄積されるパケット数が増えることで、バッファオーバーフローが発生することである。2つ目は、カバレッジホールを全て埋めるほどのUAVの配備は現実的に困難であることである。そこで、本研究では、MANET(Mobile Adhoc Network)とDTN(Delay Tolerant Network)を状況に応じて自律的に切り替える既存手法The-OLSR-OPP(The-OLSR-Opportunistic)に着目し、The-OLSR-OPPよりもバッファオーバーフローを抑制しつつ、UAV群のカバレッジ外に存在するモバイル端末にもパケットを送受信させる手法を検討する。評価実験ではns-3.29で、The-OLSR-OPPのDTN部分にProPHET(Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity)v2を単に組み込んだ手法と提案手法の比較実験を行い、提案手法がUAV群の代替ネットワークとして有効であることを証明した。

キーワード：MANET, DTN, UAV, ProPHETv2, The-OLSR-OPP

1. 背景

2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震では、道内全域の停電によって、6505局の携帯電話基地局が停波した[1]。この停波により、道内170市町村のうち、札幌市を含めて100市町村以上で通信に支障が生じた[2]。このように、大規模災害発生時には一部の携帯電話基地局の機能が停止し、図1に示すように携帯電話基地局の機能が停止した場所にカバレッジホールが発生することで、移動体通信ネットワークを利用する通信端末であるUser Equipment(以下、UE)が携帯電話基地局と通信不能となる問題が発生する。この問題を解決するためには、携帯電話基地局の電波が行き渡っていない領域において代替ネットワークを構築する必要がある。

携帯電話基地局のカバレッジ外に代替ネットワークを展開する手段として、無線機能を搭載したUAV(Unmanned Aerial Vehicle)群の利用が挙げられる。UAV群がカバレッジ外に展開された後にUAV群と携帯電話基地局やUEを

含んだ代替ネットワークを構築することで、UAV群が中継ノードの役割を果たし、カバレッジ外に存在する送信元-宛先間の通信を補助する。空中を移動することが可能なUAVは、地形や建築物による移動方向や通信の制約を受けにくいという利点がある(図2)。しかし、UAVのコストなどの要因によって特に災害発生時に調達可能なUAVの機数は有限であるため2つの問題が考えられる。1つ目は、UAVを介した通信量が多い場合における、UAVへの蓄積

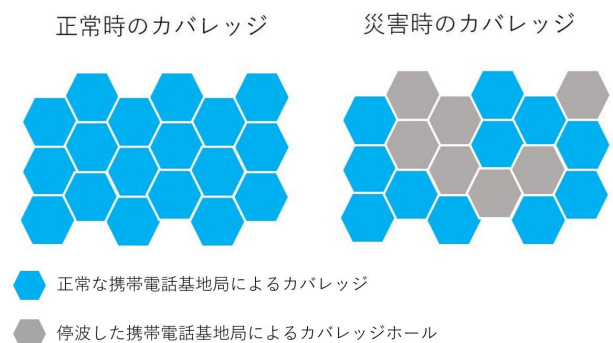


図1 携帯電話基地局のカバレッジホール

¹ 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科

² 公立はこだて未来大学 システム情報科学部

パケットの増加に伴うバッファオーバーフローの発生である。2つ目は、カバレッジホールをすべて被覆するような UAV の配備の現実性である。以上の問題点に対して、本研究ではパケットの蓄積量を減らしつつ、UAV 群のカバレッジ外に送信元や宛先が存在する場合でもパケットを送信できるようにすることを目的とする。

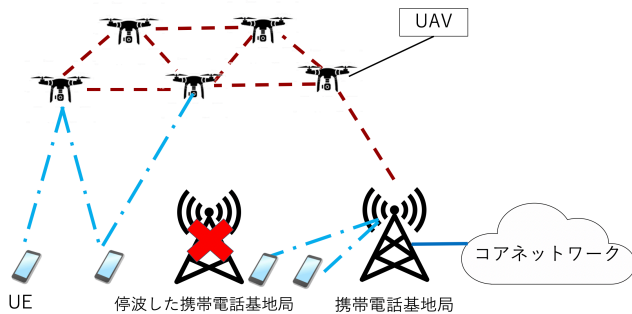


図 2 UAV 空中基地局群の展開

2. 関連研究

本章では、災害発生時に UAV 群が代替ネットワークを構築するための既存手法を紹介し、これらの手法を本研究の想定する環境で利用した場合に想定される利点や問題点を述べる。

2.1 災害発生時の代替ネットワーク構築手法

災害発生時における代替ネットワーク構築には MANET(Mobile Adhoc Network)[3] や DTN(Delay Tolerant Network)[4] を利用することが挙げられる。これらのネットワークは中継機能を持った複数の通信端末が集まった時点で即座に構築され、通信端末の移動、追加、退去によるネットワークトポロジの変化に対応することが可能であるため、ネットワーク構築の迅速性や障害耐性が求められる災害用の代替ネットワークに適している。

MANET と DTN にはそれぞれ異なる特徴がある。MANET はネットワークトポロジの変化が少ない場合に DTN と比較して遅延時間が短いという利点がある。しかし、ネットワークトポロジの変化が激しく通信端末同士の接続・切断が頻繁におこる環境ではネットワーク上の経路が構築されない場合がある。一方、DTN は蓄積運搬転送 (Store-Carry-Forward) により、送信するパケットを保持している端末は通信範囲内に他の端末が存在しない場合にはパケットを自端末内に蓄積しておき、通信範囲内に他の端末が存在する場合は蓄積したパケットを複製して渡すことができる。この機能によって、通信端末同士の通信の接続・切断が頻繁に行われる環境でも送受信端末間で通信可能となる。UAV 群が DTN を用いて代替ネットワークを構築した際の利点としては、UAV 群のカバレッジ外に宛先

端末が存在する場合においても、パケットを受信した UAV や UE のバッファにパケットを蓄積しておくことで宛先がカバレッジ内に移動したときにパケットを送信できることが挙げられる (図 3)。しかし、MANET よりも遅延時間が長く、通信端末のバッファやバッテリーを多く使用してしまうという欠点がある。そのため、状況に応じた MANET と DTN の使い分けが必要である。

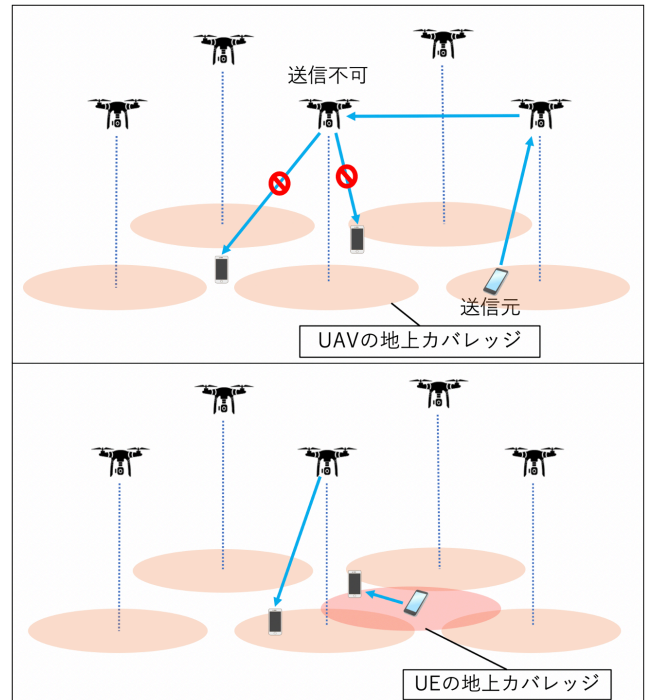


図 3 カバレッジ外に存在するパケットの受信が不可能なモバイル端末 (上) と蓄積したパケットを受信するモバイル端末 (下)

2.2 The-OLSR-OPP

MANET と DTN を使い分ける手法として The-OLSR-OPP(The-OLSR-Opportunistic)[5] が提案されている。The-OLSR-OPP では、MANET に OLSR(Optimized Link State Routing)[6]、DTN に SAW(Spray And Wait)[7] を用い、送信元ノードから宛先ノードまでの経路が構築されている場合は OLSR、送信元ノードから宛先ノードまでの経路が構築できない場合は SAW、SAW によってパケットを蓄積しているノードから宛先ノードまでの経路構築ができた場合は OLSR を使用する。

図 4 は、The-OLSR-OPP の概念を説明するための基本的な例を示している。

図 4(a) では、送信元ノード S は S-1-2-3-4-5-D を介して宛先ノード D への経路を構築している。このシナリオでは、ノード S は OLSR を利用してパケットをノード D に対して送信する。

図 4(b) では、ノード 3 の通信障害などによって、ノード S からノード D への経路が途切れるシナリオを想定している。この場合の OLSR はノード D 宛てのノード 2 のパ

ケットを単にドロップする。この動作に対して OLSR-OPP は、SAW の蓄積運搬機能によって、後に宛先ノードまでの OLSR の経路が再構築される場合に備えてパケットをノード 2 のバッファに蓄積する。その後、OLSR-OPP はノード 2 のバッファ内のパケットを SAW を用いて隣接ノード 6,7,8,9 に送信する。これらのノードからはノード D 宛てへの OLSR の経路が存在しないため、受信したパケットをそれぞれのバッファに蓄積し、パケットを受信していない隣接ノードに対して送信する。このように SAW によって蓄積されたパケットがネットワーク上に拡散することで、パケットを受信し蓄積したノードのいずれかが、ノード D への OLSR の経路を持っている場合にパケットはノード D に配信可能となる。

図 4(c) では、SAW によってパケットを受信し蓄積したノードが、ノード D への OLSR の経路が存在するシナリオを想定している。このシナリオでは、ノード 10 はノード 7 の通信範囲に移動する。移動後は、OLSR によってノード 7 はノード 10 を介してノード D まで新たに構築された経路を取得する。ノード 7 は以前にノード D 宛てのパケットのコピーを受信し蓄積しているため、OLSR の経路を介して宛先ノードまでパケットを送信する。送信後はノード 7 に蓄積されたパケットはバッファから削除される。

以上のような手順によって The-OLSR-OPP はドロップされるパケットを再度送信することで OLSR よりも送信成功率を向上させている。また、The-OLSR-OPP の DTN 部分で使用している SAW では、DTN のフラッディングベースの転送のオーバーヘッドを制限するために、パケットの転送回数の制限が課される。しかし、SAW はパケットの複製数は事前に設定する必要があるため、複製数が少なければ宛先までパケットが行き渡らない可能性がある。逆

に複製数が多ければ宛先までパケットが到達するものの、冗長なパケット複製が生じバッファオーバーフローが起こる可能性がある。ネットワーク状況に応じて適切な複製数を事前に設定することで SAW のパフォーマンスは向上するが、ネットワークの状況把握が難しい DTN の環境で複製の個数を適切に設定することは困難である。そのため、パケットの複製数を事前に設定せずに、環境に応じて自律的に変化させる手法が必要となる。

2.3 ProPHETv2

DTN では、パケット複製数を環境に応じて変化させる手法として ProPHET(Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity)v2 が検討されている [8]。ProPHETv2 は各ノードが宛先到達確率を計算し、より宛先到達確率が高い隣接ノードに対してパケットを送信する手法である。宛先到達確率の計算手順は 3 つある。1 つ目は、隣接ノードと通信した際に隣接ノードの宛先到達確率を向上させる手順である。ノード A を自ノード、ノード B を通信した隣接ノードとおくと、手順 1 は以下の式 1 で表すことができる。 $P(A, B)$ は通信後に更新された B を宛先と想定した場合の A から B の宛先到達確率で、 $P(A, B)_{old}$ は通信前の A から B の宛先到達確率となる。

$$P(A, B) = P(A, B)_{old} + (1 - P(A, B)_{old}) \times P_{enc} \quad (1)$$

P_{enc} は次の式 2 で算出される。ここで、 I_{typ} は、想定される接続の時間間隔を設定する。 $Intvl_B$ は、ノード B と最後に遭遇してから時間を設定する。

$$P_{enc} = P_{max} \times (Intvl_B / I_{typ}); \text{ if } 0 \leq Intvl_B \leq I_{typ}$$

$$P_{enc} = P_{max}; \text{ otherwise} \quad (2)$$

ノード A がノード B と通信した時、ノード B と通信しているノード C の宛先到達確率も向上させる。これが 2 つ目の手順であり、以下の式 3 で表すことができる。ここで、通信後に更新された $P(A, C)$ は A から C の宛先到達確率で、 $P(A, C)_{old}$ は通信前の A から C の宛先到達確率となる。 $P(B, C)$ はノード B を送信元と想定した場合の B から C の宛先到達確率となる。 $\beta \in [0, 1]$ は任意の定数である。

$$P(A, C) = \max(P(A, C)_{old}, P(A, B) \times P(B, C) \times \beta) \quad (3)$$

通信したことがある隣接ノードと長い間通信しない場合は、定期的に宛先到達確率を低下させるための調整を行う。これが 3 つ目の手順であり、式 4 で表すことができる。ここで、 i は通信したことがある隣接ノード i であり、 $\gamma \in [0, 1]$ 、 T は任意の定数となる。

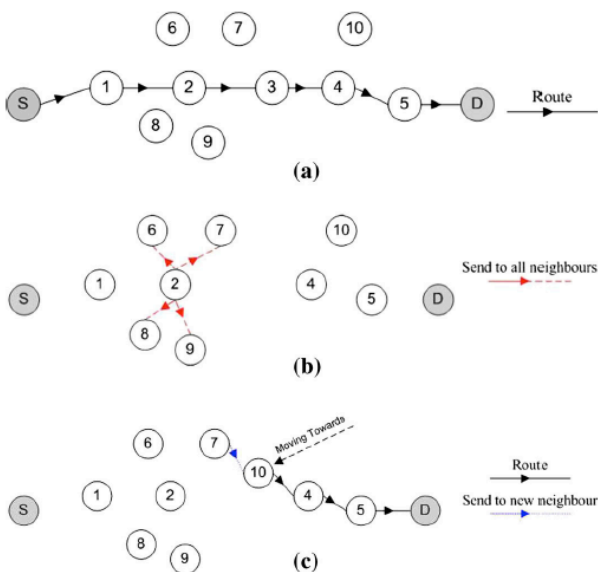


図 4 The-OLSR-OPP の動作例 (文献 [5] を参照)

$$P(A, i) = P(A, i)_{old} \times \gamma^T \quad (4)$$

以上の3つの手順によって隣接ノードとの通信時に ProPHETv2 の宛先到達確率が算出された後は、自ノードと隣接ノードの宛先到達確率を交換しあうことで更新を行う。この時、自ノードの宛先到達確率 < 隣接ノードの宛先到達確率であるなら、自ノードは隣接ノードに対してパケットを送信する。

しかし、The-OLSR-OPP の DTN 部分に SAW の代わりに ProPHETv2 を単に導入しただけでは ProPHETv2 は隣接ノードの宛先到達確率しか参照しないため、OLSR の経路上に宛先到達確率の高いノードが参加してもパケットを送信できない可能性がある。例として、図5のように宛先到達確率が送信元よりも高くない UAV のみが隣接している場合が挙げられる。図5では、UAV が3機、送信元と宛先が1台ずつ存在し、UAV が数珠つなぎで通信するように配置されていると仮定している。この仮定下で、右端の UAV のみが過去に宛先と通信した場合は ProPHETv2 により、右端と中央の UAV の宛先到達確率が向上する。しかし、ProPHETv2 は隣接ノードのみを考慮してパケットを送信するため、宛先到達確率が送信元よりも高くない左側の UAV のみが隣接している場合、宛先到達確率の高い右側と中央の UAV に対してパケットを送信することができない。

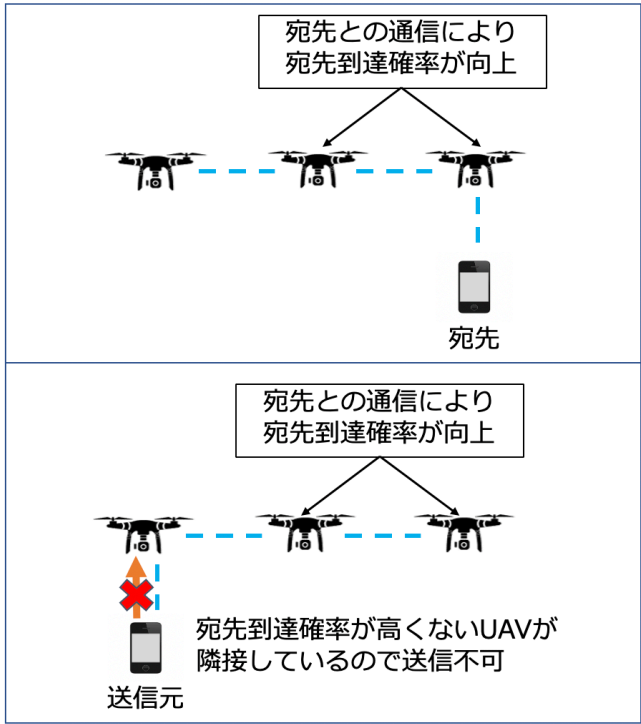


図5 prophetv2 の問題点
 (上: 宛先到達確率算出時, 下: パケット送信時)

3. 提案手法

本研究では The-OLSR-OPP の問題点を解決するために The-OLSR-OPP の DTN 部分に SAW の代わりに ProPHETv2 を導入し、導入に際して生じる問題点を解決する手法を検討する。提案手法では、OLSR の経路上に存在するノードが宛先到達確率を付加した経路情報を参照することで、送信元が経路上の宛先到達確率の高い隣接していないノードに対してもパケットを送信できるようにする。本章では、提案手法の宛先到達確率を OLSR の経路情報に付加する方法とパケットの送信方法について説明する。

3.1 宛先到達確率を OLSR の経路情報に付加する方法

OLSR は OLSR の経路上に存在する全てノードの IP アドレスを登録した経路情報を経路上に存在するノードが確認することができる。そのため、経路情報に各ノードの宛先到達確率の情報を付け加え、IP アドレスと紐づけることによって、経路情報から各ノードの宛先到達確率を把握することができる。各ノードはノード同士が OLSR の TC、HELLO メッセージを交換する際に宛先到達確率の情報も同時に交換しあうことで、宛先到達確率を付加した OLSR の経路表を生成する。

3.2 パケット送信方法

送信元から宛先までの経路が構築されている場合は OLSR を使用してパケットを送信する。送信元から宛先までの経路が構築できない場合は、送信元のバッファでパケットを蓄積する。蓄積したパケットの送信タイミングは、ProPHETv2 が定期的に蓄積したパケットを送信する時に用いられる Summary Vector 送信時と同時に行う。蓄積したパケットを送信する際には OLSR の経路表を確認し、パケットの宛先に対応する宛先到達確率が、自ノードの宛先到達確率 < OLSR 経路上のノードの宛先到達確率でわる場合、宛先到達確率の高いノードへとパケットを OLSR で転送する。受信したパケットは再度蓄積され提案手法によるパケット転送が行われる。パケットを蓄積しているノードが宛先までの経路構築ができた場合は、OLSR を使用してパケットを宛先まで送信する。宛先までパケットを送信する場合、送信するパケットをバッファから削除する。

3.3 提案手法の動作例

2.3 節で説明したシナリオを提案手法に適用した場合を図6で説明する。図6では、UAV が3機、送信元と宛先が1台ずつ存在し、UAV が数珠つなぎで通信するように配置されていると仮定する。この仮定下で右端の UAV のみが過去に宛先と通信した場合は、ProPHETv2 により右

端と中央の UAV の宛先到達確率が向上する。送信元が左側の UAV が通信しているとき、宛先との通信ができないため送信元がバッファにパケットを蓄積する。蓄積後は ProPHETv2 が Summary Vector を送信するタイミングで OLSR の経路上に存在する自ノードよりも高い宛先到達確率を持つノードにパケットを送信する。送信元と UAV 群は OLSR の経路が構築されているため、送信元は宛先到達確率の高い右端と中央の UAV に対してパケットを OLSR を用いて送信する。各 UAV がパケットを受信した後は宛先と通信できないため、バッファにパケットを蓄積する。以上のようなシナリオでは、提案手法は The-OLSR-OPP の DTN 部分を単に ProPHETv2 に変えた手法ではパケットを送信できなかった隣接ノード以外の宛先到達確率の高いノードに対して、パケットを送信できる。

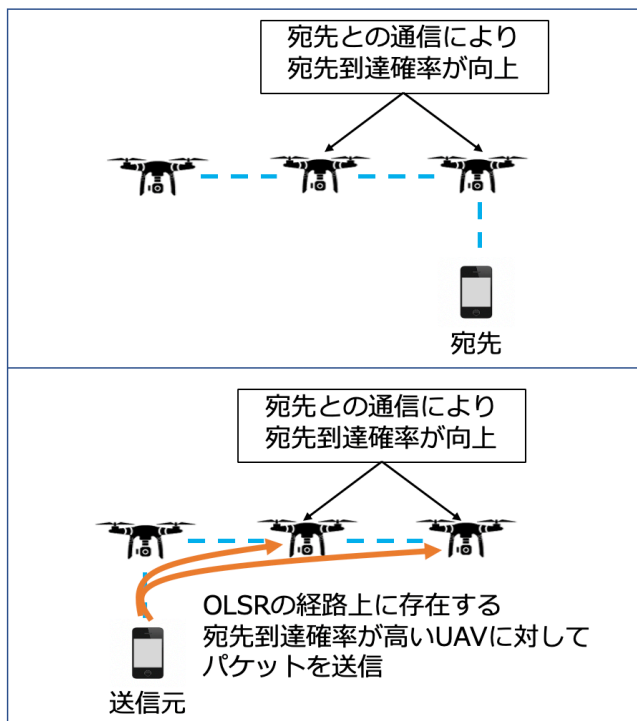


図 6 提案手法の動作例
 (上：宛先到達確率算出時, 下：パケット送信時)

4. 評価実験

提案手法と既存手法の比較実験を行い、提案手法の優位性が示せることを証明する。既存手法には、The-OLSR-OPP の DTN 部分を単に SAW から ProPHETv2 に変えた手法が含まれる。実験はネットワークシミュレータ ns-3[9] で行う。

4.1 実験目的

災害発生時に UAV 群の代替ネットワークを用いることを想定されるユースケースの 1 つとしてセンタレスな道路

交通情報システムが挙げられる。道路交通情報通信システムとは自動車の位置情報や車載カメラなどで撮影した画像をサーバに送り処理を行うことで、渋滞情報や交通規制情報などの情報を共有することができるシステムである。センタレスな道路交通情報通信システム [10] では、停電などによってサーバがダウンした場合を想定し、サーバの代わりに自動車同士で通信を行い情報を共有し合う。

本実験では、サーバがダウンした際にセンタレスな道路交通情報通信システムによる自動車同士の通信を UAV 群の代替ネットワークを用いて補助することを想定し、提案手法が宛先到達確率の高いノードに対してパケットを送信しやすくすることにより、既存手法よりも送信成功率が高くなることをシミュレーションにおける送信元から宛先への送信成功率の比較評価によって確認する。

4.2 実験環境

実験環境を構築するために用いた各シミュレーションパラメータを表 1 に記述する。本章では、各パラメータの詳細について説明する。

パラメータの種類	パラメータの設定値
空中線電力	21 [dBm]
電波伝搬モデル	Friis, Modified Hata Model
パケット損失が発生する信号強度	-80 [dbm]
通信に使用する周波数	2.4 [GHz]
UAV の機数	6 [機]
UAV の飛行高度	200 [m]
UAV の飛行間隔	1 [km]
自動車の台数	3 [台]
自動車の高度	1.5 [m]
自動車の速度	10 [m/s]
自動車の移動モデル	RandomWayPoint
バッファ	10 [MBytes]
トランスポートプロトコル	UDP
パケットサイズ	10 [kBytes]
パケット送信間隔	30 [秒]
シミュレーション時間	1000 [秒]

4.2.1 電波環境

通信を行う際の空中線電力と周波数は DJI 製の UAV のマシンスペック [11] を参考に、21dBm, 2.4GHz に設定した。UAV 同士の通信には自由空間伝搬損失を考慮した電波伝搬モデルである Friis Transmission Formula を用い、UAV-自動車間、車車間通信には Modified Hata Model[12] を使用する。Modified Hata Model は、秦モデル [13] では電波強度を推定できない 1500MHz 以上の高周波数帯通信の電波強度を推定するために、従来の秦モデルの推定可能な範囲を周波数を 30~3000MHz まで拡張した電波伝搬モデルである。

4.2.2 UAV と自動車のモビリティ

シミュレーション内に UAV の機数を 6 機，自動車を 3 台用意する。UAV のモビリティは UAV 同士が自由空間伝搬で通信可能な最大距離を開けて静止状態にする。自動車の移動速度は $10m/s$ に設定する。各自動車 (ノード 7,8,9) は図 7 のように，2,4,6 番目の UAV の近傍に存在し，近傍の UAV を中心とした $1km^2$ の範囲内をランダムに動く。

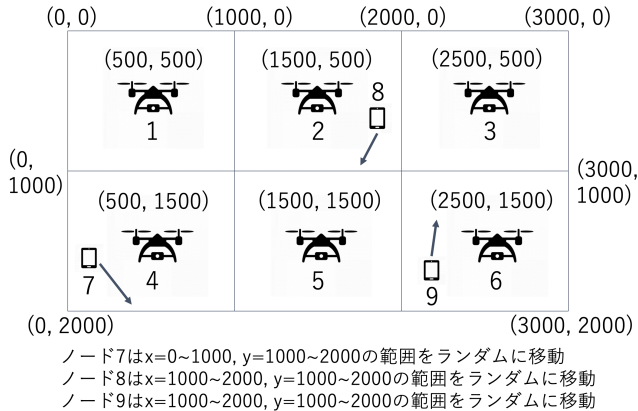


図 7 実験時の UAV と自動車の配置座標

4.2.3 ストレージの容量

HTTP 通信を考慮した ProPHET を用いた情報配信手法を提案している文献 [14] では，スマートフォンなどのモバイル端末のバッファを 10,20,30,40,50Mbytes に設定して実験を行なった。本実験では，この文献を参考に，UAV と自動車のバッファを文献 [14] のバッファと同等の容量と仮定し 10Mbytes に設定する。

4.2.4 パケット送信方法

自動車から生成されるパケットの大きさは 1000Bytes とおき，他の全ての自動車に対してパケットを送信する。各自動車のパケットの生成間隔は 30 秒に設定する。

4.3 結果

シミュレーション時間と送受信回数，送信成功率の 2 次元グラフを図 8 に示す。図 8 では上図が既存手法，下図が提案手法の実験結果となる。送信回数は全ての送信元の送信回数を合計した数となるため，30 秒に 1 度，3 台の自動車同士の通信が行われると送信回数が 30 秒ごとに 6 回ずつ増える。受信回数は全ての宛先の受信回数を合計した数となり，最大の受信回数は送信回数と同じ数になる。

図 8 から，既存手法ではシミュレーション終了時まで受信回数が 0 回であることが分かり，送信成功率は 0% となった。一方で提案手法では受信回数がシミュレーション開始から徐々に増え，最終的に 65 回パケットを受信した。送信成功率は最大で 64% となり (240[s] 計測時)，シミュレーション終了時には 34% に落ち着いた。

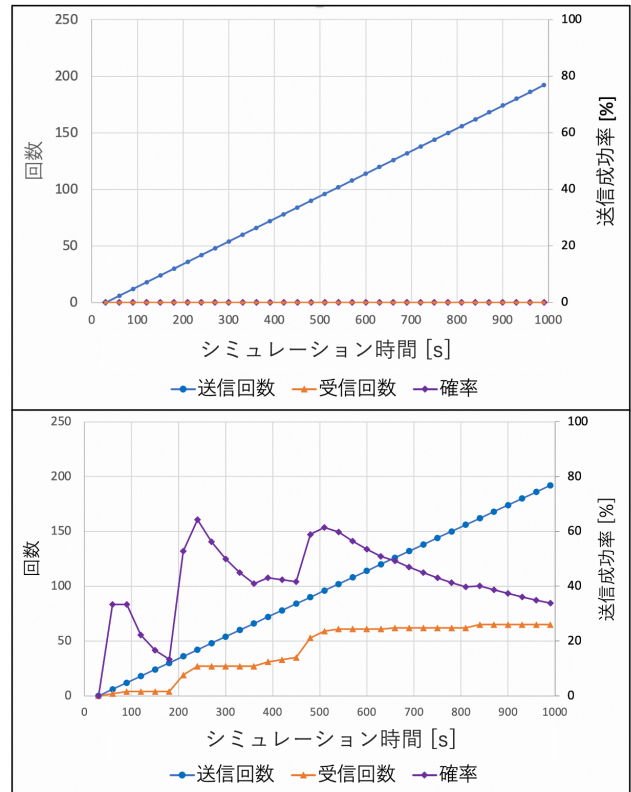


図 8 既存手法と提案手法の実験結果の比較
 (上：既存手法，下：提案手法)

5. 考察

既存手法の最終的な送信成功率が 0% である理由としては，送信元が OLSR で宛先までの経路を構築することができず，ProPHETv2 に切り替えてパケットを送信する際に，送信元の隣接ノードに宛先到達確率の高いノードが存在しないため，パケットを送信できなかったことが考えられる。今回のシミュレーション環境において，Friss Transmission Formula を用いた UAV-UAV 間の通信範囲は半径約 1km であることが分かっているため，各 UAV は隣接している UAV 同士と数珠つなぎで通信している。そのため，ProPHETv2 の宛先到達確率は宛先と隣接しているノードとそのノードと隣接しているノードで上昇することから，ノード 7 の宛先到達確率がノード 1,4,5，ノード 8 の宛先到達確率がノード 1,2,3,5，ノード 9 の宛先到達確率がノード 3,5,6 で上昇する。ProPHETv2 がパケットを送信する時は，ノード 7 が隣接ノードであるノード 4 の宛先到達確率を参照してパケットを送信するが，ノード 8,9 の宛先到達確率はノード 4 で向上していないため，ノード 7 はノード 8,9 宛てのパケットを隣接ノードに送信することができない。同様のことがノード 8,9 でも起こるため，他のノードに対してパケットを送信することができない。以上のことが原因で，送信元ノードが ProPHETv2 を用いてパケットを他ノードに対して送信・蓄積することができ

ないため、OLSRが送信元ノード-宛先ノード間の経路を構築できていない場合は宛先までパケットを送信することができていないと考えられる。

一方で、提案手法では既存手法より最終的な送信成功率が34%に増えた理由としては、提案手法では送信元ノードが隣接していない宛先到達確率の高いノードに対してもパケットを送信・蓄積できるからだと考えられる。送信元ノードがパケットをUAVに送信・蓄積できれば、送信元と宛先のOLSRの経路が構築されていない場合でもUAVと宛先の経路が構築されるとUAVから宛先までパケットを送信することができる。以上の理由から、今回のシミュレーション環境において送信成功率の面では提案手法が有効に機能していると考えられる。

6. まとめ

本研究では、UAVに蓄積されるパケット数を減らしつつ、UAV群のカバレッジ外に送信元や宛先が存在する場合でもパケットを送信することを目的とした手法を提案した。

提案手法では、The-OLSR-OPPのDTN部分にProPHETv2を用い、送信元と隣接していない宛先到達確率の高いノードに対してパケットを送信することを検討した。提案手法に対して評価実験を行なった結果、The-OLSR-OPPのDTN部分にProPHETv2を単に用いた手法よりも送信成功率が向上することが分かり、送信成功率の面で提案手法が有効に機能していると考えられた。

今後の課題として、実際の自動車のモビリティやUAVのバッテリー消費などを考慮した、より現実的な実験環境下で評価実験を行う必要がある。また、ネットワークに参加している全ノードのバッファ使用率に着目した実験も行う必要がある。

参考文献

- [1] 北海道総合通信局:通信、放送の被害状況(オンライン),入手先 入手先 (http://www.soumu.go.jp/main_content/000585075.pdf) (参照 2018-12-14).
- [2] 内閣府:平成30年北海道胆振東部地震に係る被害状況等について(オンライン),入手先 (http://www.bousai.go.jp/updates/h30jishin_hokkaido/pdf/300907_jishin_hokkaido.01.pdf) (参照 2018-12-14).
- [3] 間瀬憲一, 中野敬介, 仙石正和ほか:アドホックネットワーク, 電子情報通信学会誌, vol.84, no.2, pp.127-134, (2001).
- [4] Tsuru, M., et al.: Delay Tolerant Networking Technology - The Latest Trends and Prospects, IEICE Commun. Soc. Mag., vol.2011, no.16, pp.57-68 (2011).
- [5] Azzuhri, S., Saaidal, R., Ahmad, H., et al.: An efficient hybrid MANET-DTN routing scheme for OLSR, Wireless Personal Communications, Vol.89, No.4, pp.1335-1454 (2016).
- [6] Clausen, T., and P. Jacquet. : Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), RFC 3626, DOI 10.17487/RFC3626, (2003).
- [7] Spyropoulos, T.: Spray and wait : an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks, Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking, pp.252-259, ACM, (2005).
- [8] Grasic, S., Davies, E., Lindgren, A., et al.: The evolution of a DTN routing protocol - PProPHETv2, Proceedings of the 6th ACM Workshop on Challenged Networks, pp.27-30, ACM (2011).
- [9] ns-3 (online), available <<https://www.nsnam.org/>> (accessed 2019-05).
- [10] 伊達佳明, 梅津高明, 山口弘純ほか:車両の移動予測モデルに基づく通信コスト最適な車両間情報共有システム, 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, pp.1491-1502.
- [11] DJI: 一般向けドローンの比較, DJI(オンライン), 入手先 <<https://www.dji.com/jp/products/comparison-consumer-drones>> (参照 2020-08).
- [12] ITU-R: Monte Carlo simulation methodology for the use in sharing and compatibility studies between different radio services or systems, pp.1-67, SM 2028-1(2002).
- [13] Hata, M.: Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services, IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol.29, No.3, pp.317-325(1980).
- [14] 福田論, 梶岡慎輔, 松尾啓志:DTN通信でのレスポンス送信アクセスポイント選択による転送効率化手法, 信学技報, Vol.114, No.480, pp.87-94 (2015).