

都市環境における UAV 空中基地局群を用いた代替ネットワークの性能向上に関する検討

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 UAV 空中基地局群を VSM(Virtual Spring Mesh) を用いて展開する手法が存在する。しかし、既存の展開手法では UAV 空中基地局の地上カバレッジを考慮した展開を行っていないため、地上カバレッジにカバレッジホールが生じ、UAV 空中基地局群の地上カバレッジ外に存在するモバイル端末とは通信ができない問題がある。そこで、本研究では、カバレッジホールの発生を抑制するように UAV 空中基地局群を展開し、UAV 空中基地局群とモバイル端末の代替ネットワークを構築する。代替ネットワーク上では、MANET(Mobile Adhoc Network) と DTN(Delay Tolerant Network) を組み合わせた通信を行い、UAV 空中基地局からモバイル端末への送信成功率を向上させる。提案手法に対しネットワークシミュレータ ns-3 を用いて送信成功率と遅延時間の評価を行い、代替ネットワークとして有効であることを示した。

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]。この携帯電話基地局の停波によってモバイル端末が携帯電話基地局との通信に支障が生じた市町村は、道内最大の都市である札幌市を含めて179団体のうち100団体以上となった [2]。このような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、スマートフォン等のモバイル端末が携帯電話基地局と通信不可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で代替ネットワークを構築する必要がある。

災害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。

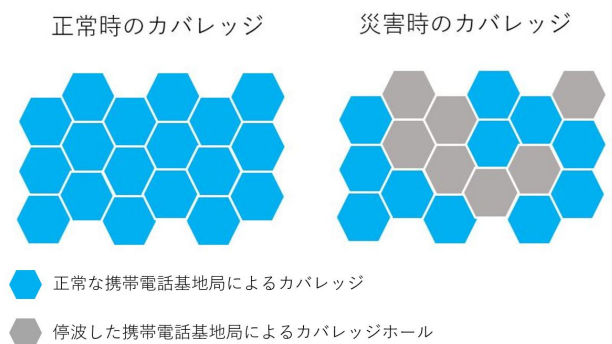


図1 携帯電話基地局のカバレッジホール

一方、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の経路が構築されない場合があるため、送信端末がパケットを送信しても受信端末が受信することは困難である。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ない場合はパケットを蓄積しておき、通信範囲内に他の端末がい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

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

る。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。

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、UAV(Unmanned Aerial Vehicle) に基地局の機能を搭載した UAV 空中基地局群の利用が挙げられる。モバイル端末 (携帯電話など基地局と通信できる端末) は UAV 空中基地局の中継によって携帯電話基地局までの通信が可能となり、その先のコアネットワークとも通信可能となる (図 2)。

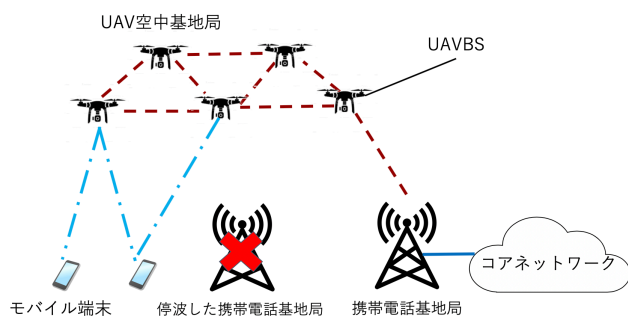


図 2 UAV 空中基地局群の展開

空中を移動することが可能な UAV 空中基地局は、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。しかし、UAV 空中基地局の地上カバレッジまで考慮した適切な配置ができない場合にはカバレッジ間の隙間、すなわちカバレッジホールが発生してしまい、UAV 空中基地局同士の距離が離れ過ぎた場合には通信ネットワークが分断されてしまう可能性がある。

そこで、本研究では、UAV 空中基地局群のうち 1 局の停波していない携帯電話基地局を経由してコアネットワークに接続している UAV 空中基地局が存在する条件下で、他の携帯電話基地局が停波してカバレッジホールが発生した場合に、UAV 空中基地局群の地上カバレッジにカバレッジホールが生じないような UAV 空中基地局の自律配置アルゴリズムを提案する。以下、停波していない携帯電話基地局を通じてコアネットワークに接続している UAV 空中基地局のみを UAVBS と呼ぶ。また、UAV 空中基地局群とモバイル端末群で構築される代替ネットワーク上の通信に端末の特性に応じて MANET と DTN を組み合わせて用いることで、UAV 空中基地局のバッファ及びバッテリー消費量を削減しつつ、カバレッジ外端末への通信を可能にする手法を提案する。図 3 の上図は、UAV 空中基地局が UAVBS から受信したパケットを送信する時に UAV 空中基地局のカバレッジ外に存在していたモバイル端末が UAV 空中基地局からパケットを受信不可能となる状況を示しており、図 3 の下図は、DTN によってパケットを受信した UAV 空中基地局やモバイル端末にパケットを蓄積してお

くことで、パケットを受信できなかったモバイル端末がパケットを受信している UAV 空中基地局やモバイル端末に接触し、パケットを受信することが可能な状況を示している。提案手法によって UAVBS からモバイル端末への送信成功率の向上が期待される。

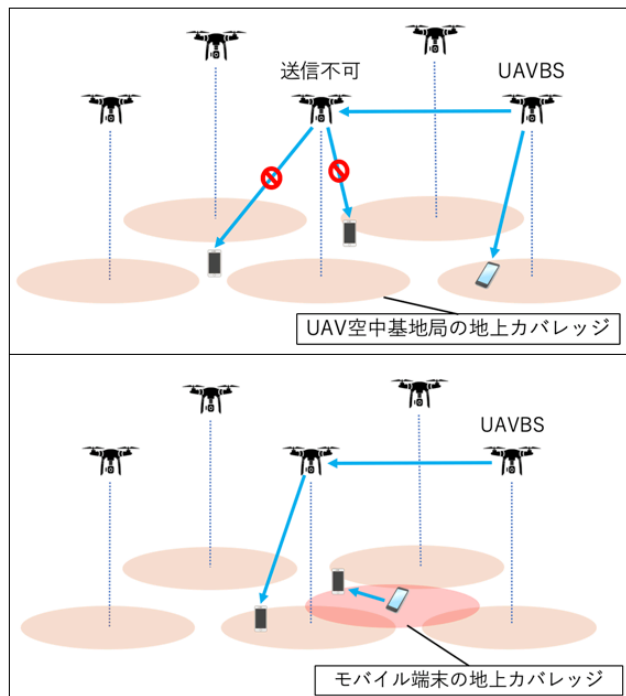


図 3 カバレッジ外に存在するパケットの受信が不可能なモバイル端末 (上) と蓄積したパケットを受信するモバイル端末 (下)

2. 関連研究

本章では、MANET と DTN を組み合わせたネットワークに関する既存研究と移動機能を持ったノード群の展開に関する既存研究について述べる。本文中のノード群の展開とは、ノード群がネットワークを維持しつつ通信範囲を拡大することを示す。

2.1 MANET と DTN を用いた代替ネットワーク

文献 [5] では、モバイル端末の代替ネットワークを MANET と DTN で構築することで携帯電話基地局のカバレッジ外に存在するモバイル端末へパケットを送信する手法を提案している。この手法では、モビリティ度が低く、バッテリー残量の大きなモバイル端末は MANET を用い、その条件を満たさないモバイル端末は DTN を用いて通信させることで、DTN のみを利用した通信よりも遅延を抑えつつ、MANET のみを利用した通信よりもネットワークポロジの変化に強いネットワークの構築を実現している。

2.2 VSM(Virtual Spring Mesh)

文献 [6] はノード間のメトリクスにばねのような性質を

与える仮想ばねを特定のノード間に繋いで VSM(仮想ばね網)を形成することで、ノード間の距離を維持しながらノード群の展開ができるアルゴリズムを提案している。

2.2.1 仮想ばね

仮想ばねとは、フックの法則に従ってノード間に疑似的な力を加えることでノード同士がばねによって繋がれているような動きをさせるためのノード間パラメータを指す。ノード i に仮想ばねで繋がれている隣接ノードをノード j とおくと、ノード i に仮想ばねによって与えられる力の加速度ベクトル \vec{a} が式 (1) で求まる。

$$\vec{a} = \left[\sum_{j \in S} k(l_{ij} - l_o) \vec{u}_{ij} \right] \quad (1)$$

S はノード i につながれている仮想ばねの数、 k は仮想ばねのばね定数、 l_{ij} はノード i とノード j 間の距離、 l_o は仮想ばねの自然長、 \vec{u}_{ij} はノード i の位置からノード j の位置へのベクトルを正規化した単位ベクトルである。式 (1) を適用することによって、各ノードに仮想ばねによってかかる力を算出可能となり、その力によってノード間を一定の自然長の間隔に配置することが可能になる。図 4 では、 \vec{a} を式 (1) によって、算出している。 \vec{a} は l_{ij} が l_o になるまで働く。

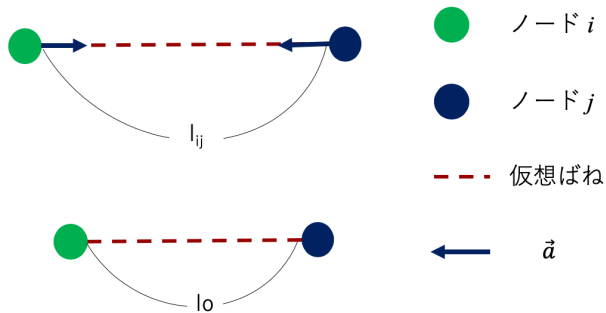


図 4 ノード i とノード i に仮想ばねでつながれている隣接ノード j

2.2.2 仮想ばねを繋ぐノード間リンクの選定

文献 [6],[7] では、仮想ばねを繋ぐノード間リンクの選定を行う AcuteAngleTest を提案している。AcuteAngleTest は、あるノード間の距離を直径とした円の中に他のノードが存在しない場合にのみ該当ノード間を仮想ばねで繋ぐ。図 5 はノード M とノード L の間に仮想ばねを繋ぐ場合を表しており、図の左側が AcuteAngleTest の失敗例、右側が AcuteAngleTest の成功例である。失敗例ではノード M とノード L の距離を直径とした円の中にノード N4 が入っているため、ノード M とノード L 間は仮想ばねで繋がれない。一方、成功例ではノード M とノード L の距離を直径とした円の中に他のノードが入っていないため、ノード M とノード L 間は仮想ばねで繋がれる。

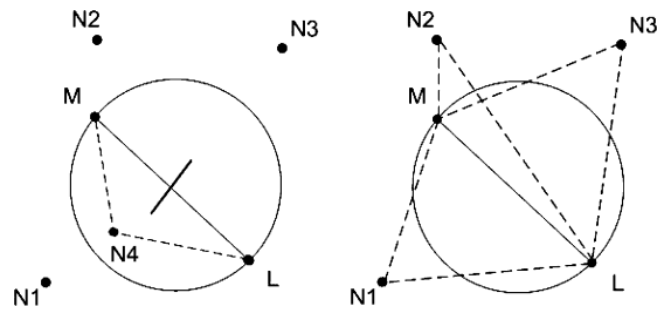


図 5 AcuteAngleTest の失敗例 (左) と成功例 (右)(文献 [6] から引用)

AcuteAngleTest はノードの隣接ノードのみの位置情報を用いて、自律分散的に VSM を形成するので、個々のノードが必要とする計算量が集中制御に比べて少ない。また、AcuteAngleTest によって、ノード群は三角形の格子状の VSM を形成し、ノードごとに均等な数の仮想ばねを設置することができる。

2.3 UAV 空中基地局群に適用することを考慮した VSM

文献 [8] では、携帯電話基地局の停波によりモバイル端末が携帯電話基地局との通信が不可能なエリア内の一部を UAV 空中基地局群を展開する AOI(関心領域: Area Of Interest) として設定し、電波の RSSI(Received Signal Strength Indication) の強弱や仮想ばねを利用して AOI 内に UAV 空中基地局群の代替ネットワークを展開する手法が提案されている。UAV 空中基地局群の代替ネットワークを展開することで、UAV 空中基地局を介してモバイル端末同士の通信を可能にする。

図 6 に示すように文献 [8] のアルゴリズムでは、AOI をセル状に分割して、UAV 空中基地局が探索しているセルを探索領域、UAV 空中基地局が未探索なセルを AOI 内の未探索領域として定義する。また、UAV 空中基地局同士の RSSI を維持するために UAV 空中基地局同士に繋がれている「AtA(Air to Air) 仮想ばね」、UAV 空中基地局に AOI 内の未探索領域を探索させる力を働かせるための「AtF(Air to Frontier) 仮想ばね」、モバイル端末と UAV 空中基地局同士の RSSI を維持するためにモバイル端末と UAV 空中基地局間に繋がれている「AtG(Air to Ground) 仮想ばね」の 3 種類の仮想ばねを組み合わせることで、UAV 空中基地局群とモバイル端末との通信が途切れないように、AOI 内の未探索領域に UAV 空中基地局群を展開することができる。また、UAV 空中基地局群の飛行高度を上げることによって障害物の影響が少なくなり、モバイル端末同士の通信成功率を向上可能なことが実験により証明されている。

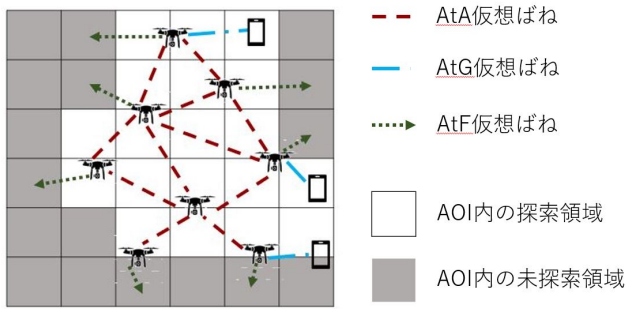


図 6 文献 [8] のアルゴリズムの概要

2.4 関連研究の問題点

文献 [5] では、提案技術の実験をモバイル端末のみでしか行なっておらず、UAV 空中基地局群に利用することについては十分に検討されていない。UAV 空中基地局同士が離れすぎた場合を考慮すると、必ずしも通信が行われるとは限らない。この場合、UAV 空中基地局間での代替ネットワークは構築されないため、災害時においては、UAV 空中基地局間の距離を維持しながら UAV 空中基地局群を展開するなど常に代替ネットワークが構築されるような展開手法が必要になる。

文献 [8] では、AtA 仮想ばねは、UAV 空中基地局の地上カバレッジを考慮した自然長の設定を行っていないため、UAV 空中基地局群の地上カバレッジに図 7 のようなカバレッジホールが発生する可能性がある。そのため、UAV 空中基地局の地上カバレッジを推定し、推定した地上カバレッジからカバレッジホールの発生を抑制可能な UAV 空中基地局群展開手法や、UAV 空中基地局群の地上カバレッジ外に存在するモバイル端末にパケットが送信できるような代替ネットワークを検討する必要がある。

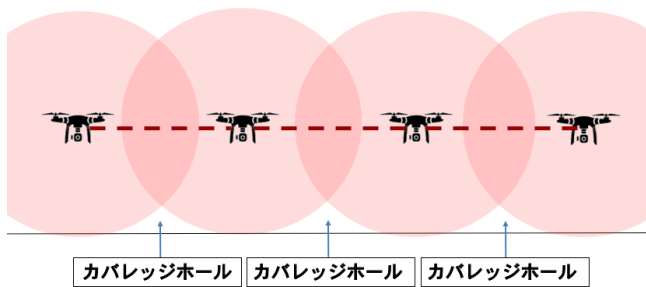


図 7 文献 [8] の問題点

3. 提案手法

本章では、提案手法の提案手法の概要、前提条件、提案手法に組み込む既存技術を説明し、提案手法の具体的な内容を説明する。

3.1 提案手法の概要

提案手法では、携帯電話基地局が停波している場所へ UAV 空中基地局群を展開する際に UAV 空中基地局群の地上カバレッジのカバレッジホールを抑制するような自律配置アルゴリズムを検討する。また、UAV 空中基地局群とモバイル端末群で構築される代替ネットワーク上の通信に MANET と DTN を組み合わせて用いる手法を検討する。

以下では、UAV 空中基地局群の地上カバレッジのカバレッジホールを抑制するような自律配置アルゴリズムを提案手法 1 で説明し、代替ネットワーク上の通信に MANET と DTN を混合させて用いる手法を提案手法 2 で説明する。

3.2 前提条件

UAV 空中基地局にはモバイル端末と通信を行うための 2.4GHz 帯の周波数を持つ中継設備と、自身の位置を把握するための気圧計、GNSS(Global Navigation Satellite System) 受信機が搭載されていると仮定する。各 UAV 空中基地局の地上カバレッジの半径を同じ大きさにするために、UAV 空中基地局の飛行高度は全て同じであり、不変であるとする。また、UAV 空中基地局群の代替ネットワークを展開する環境は、UAV 空中基地局の飛行高度未満の高さのビルが立ち並んでいるような都市環境を想定する。

3.3 提案手法 1 : UAV 空中基地局群展開手法

3.3.1 提案手法 1 で用いる既存技術

UAV 空中基地局が自身の地上カバレッジを推定するために使用する Modified Hata Model[9] について説明する。その後、Modified Hata Model によって推定した地上カバレッジから、カバレッジホールが発生しないような仮想ばねの自然長を設定するための無人センサネットワークの三角形配置アルゴリズム [10] について説明する。

Modified Hata Model

都市、郊外、田舎の 3 種類の環境にある基地局の電波強度の減衰を推定可能な秦モデル [11] は、周波数が 100~1500MHz、送信局と受信局間の距離が 1~20km の範囲で、電波強度の減衰を推定可能である。これに対し、Modified Hata Model は秦モデル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、送信局と受信局の距離が 0.04~100km までの範囲まで拡張している。今回は UAV 空中基地局の周波数を 2.4GHz 帯に設定しているため、Modified Hata Model を使用する。

無人センサネットワークの三角形配置アルゴリズム

文献 [10] では、全てのセンサ群が同じ大きさの地上カバレッジを持っている場合、各センサが隣接センサの位置情報のみで、カバレッジホールが無い状態かつ最大の地上カバレッジを保证するセンサ群を展開する手法を検討してい

る。全てのセンサ群の地上カバレッジの半径を r とおいた場合、センサ群を一辺が $\sqrt{3}r$ の正三角形の格子状に展開すれば、センサ群がカバレッジホールが無い状態かつ最大の地上カバレッジを得られることを証明している。提案手法では、Modified Hata Model で推定した UAV 空中基地局群の地上カバレッジがカバレッジホールが無い状態かつ最大のカバレッジを得るために、この展開手法を使用する。

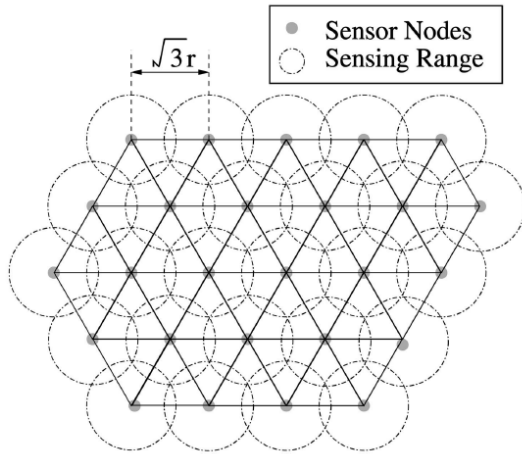


図 8 カバレッジホールが無い状態かつ最大の地上カバレッジを得るためのセンサ群展開 (文献 [10] から引用)

3.3.2 UAV 空中基地局群の展開

提案手法 1 では UAV 空中基地局群の展開を行う。まず UAV 空中基地局が自身の地上カバレッジを推定する。Modified Hata Model を伝搬損失 L , UAV 空中基地局の高さ h_1 , モバイル端末の高さ h_2 , UAV 空中基地局とモバイル端末の通信に使用される周波数 f から送受信間の距離 d を求める式に式変形する。この変形した式を、 f_{HATA} と呼ぶことにする。ここで、UAV 空中基地局とモバイル端末が通信が可能な最大の伝搬損失を L_{max} とすると、 f_{HATA} によって通信が可能な最大の伝搬損失を保証する送受信間の距離 d_{max} が算出されるため、 d_{max} を半径とした円は、UAV 空中基地局とモバイル端末が通信可能な地上カバレッジと推定できる。仮想ばねの自然長 l_{max} は文献 [10] から地上カバレッジの半径 d_{max} に $\sqrt{3}$ を掛けた値となる (図 9)。

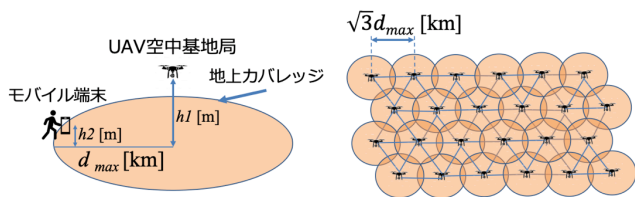


図 9 UAV 空中基地局の地上カバレッジの半径 d_{max} (左) と仮想ばねの自然長 $\sqrt{3}d_{max}$ (右)

次に、 l_{max} を用いて、UAV 空中基地局群を VSM によって展開する。各 UAV 空中基地局は周囲の UAV 空中基地局に対して AcuteAngleTest を用いて仮想ばねを繋いでいき、三角格子状の VSM を形成する。この VSM 上で接続された他の UAV 空中基地局について、それぞれ式 (1) をもとに仮想ばねにかかる力 \vec{F}_{SOFij} を算出し、 \vec{F}_{SOFij} の合力 \vec{F}_{SOFi} を算出する。この \vec{F}_{SOFi} によって、UAV 空中基地局の位置が定まる。

以下に、VSM によって UAV 空中基地局を展開するためのアルゴリズムを示す。アルゴリズム中の TU は UAV 空中基地局群に存在する全ての UAV 空中基地局の数、 TS_i は i 番目の UAV 空中基地局に仮想ばねで繋がれている隣接 UAV 空中基地局の数、 k は仮想ばねのばね定数、 l_{ij} は i 番目の UAV 空中基地局と j 番目の UAV 空中基地局の距離で、 \vec{F}_{SOFi} は i 番目の UAV 空中基地局にかかる力を示している。

Algorithm 1 VSM による UAV 空中基地局群展開

Require: $d_{max} \leftarrow f_{HATA}(f, h_1, h_2, L)$, $l_{max} \leftarrow \sqrt{3}d_{max}$
Ensure: 全ての UAV 空中基地局の \vec{F}_{SOF}

- 1: **loop**
- 2: Do AcuteAngleTest
- 3: **for** $i = 1$ to TU **do**
- 4: $\vec{F}_{SOFi} \leftarrow \sum_{j=1}^{TS_i} F_{SOFij}$
- 5: **end for**
- 6: **end loop**

アルゴリズムでは、 i 番目の UAV 空中基地局の \vec{F}_{SOFi} を i 番目の UAV 空中基地局に仮想ばねで繋がれている TS_i 個分の隣接 UAV 空中基地局から算出する (図 10)。UAV 空中基地局の \vec{F}_{SOFi} の算出は、 i が TU に達するまで続けることで、全ての UAV 空中基地局の \vec{F}_{SOF} が算出される。 i が TU に達したら、再び i を 1 に戻して、 \vec{F}_{SOFi} の算出を繰り返す。

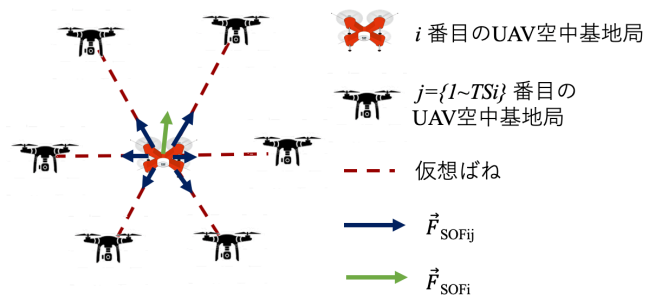


図 10 \vec{F}_{SOFi} の算出

3.4 提案手法 2 : 代替ネットワーク構築手法

提案手法 1 によって展開された UAV 空中基地局群にモバイル端末との代替ネットワークを構築する。UAV 空中基地局とモバイル端末では移動特性が異なるため、UAV 空中

基地局同士の通信をする際のネットワークと UAV 空中基地局とモバイル端末やモバイル端末同士との通信をする際は別の通信ネットワークを利用し、それぞれのネットワークを組み合わせることで1つの代替ネットワークを構築する。2つのネットワークは UAV 空中基地局に搭載されたゲートウェイを中継することによって異なるネットワークとの通信が可能になる (図 11)。

UAV 空中基地局群のネットワーク

提案手法 1 によって展開された UAV 空中基地局群は一定の距離を維持して停止するため、UAV 空中基地局の故障やバッテリー切れが起きない限りはネットワークトポロジが変化することが無い。そのため、UAV 空中基地局-UAV 空中基地局間の通信には OLSR(Optimized Link State Routing)[12] を利用する。

UAV 空中基地局とモバイル端末のネットワーク

モバイル端末は UAV 空中基地局群のカバレッジ外に存在していた場合は UAV 空中基地局からパケットを受信できないため、パケットを受信した UAV 空中基地局やモバイル端末はパケットを受信していないモバイル端末に送信するパケットを蓄積する必要がある。そのため、UAV 空中基地局-モバイル端末間、モバイル端末-モバイル端末間の通信には Epidemic Routing[13] を利用する。

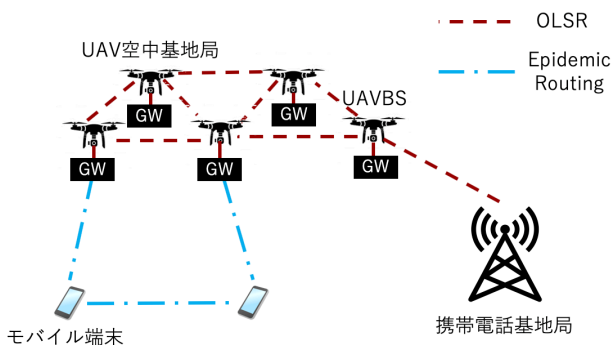


図 11 OLSR と DTN を組み合わせた代替ネットワーク

4. 評価実験

本章では、提案手法によって UAVBS からモバイル端末へ送信する際の送信成功率が維持できることを確認するために、モバイル端末のパケットの送信成功率と遅延時間を計測する実験を行う。実験はネットワークシミュレータ ns-3[14] で行う。

4.1 実験準備

ns-3 上に携帯電話基地局停止時における都市部の環境を構築する。都市環境を模倣するために、障害物はビルのような建築物を想定し文献 [15] に従って、4 種類の道路によって区切られた区画に直方体の障害物を配置する。それぞれの道路は、表 1 のような幅員と配置間隔を持ち、区画

は図 12 の道路ネットワークのモデルの例を参考に区切る。

道路の区分	幅員	配置間隔
地区幹線道路	16m 前後	概ね 1km
主要生活道路	8~12m	概ね 500m
主要区画道路	6m	概ね 250m
区画道路	4m	概ね 100m

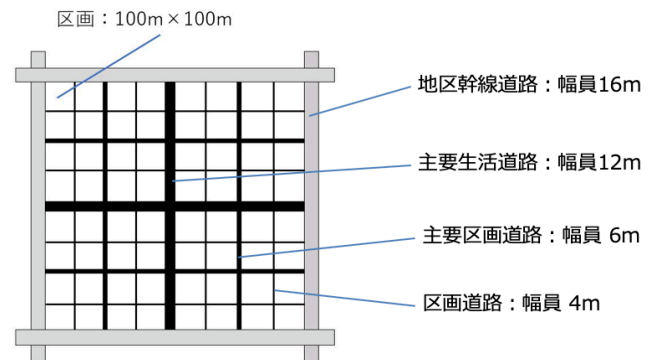


図 12 道路ネットワークモデルの例 (文献 [15] から引用)

直方体の障害物の底面積は 100m × 100m とし、高さはビル実態調査 (平成 25 年版)[16] に従って、13m~32m 未満を 59.4%、32m~64m 未満を 29.6%、64m 以上を 11% の割合で配置する (図 13)。

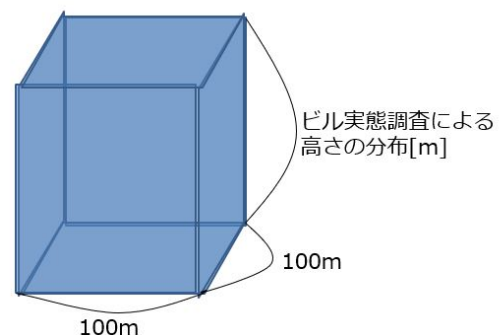


図 13 直方体の障害物の大きさ

4.2 動作設定

4.2.1 UAV 空中基地局群

UAV 空中基地局は 30 機用意し、UAV 空中基地局の飛行高度は 200m とする。提案手法 1 を用いて UAV 空中基地局群を展開させる。展開された UAV 空中基地局群はモバイル端末の移動する範囲を全て被覆する。

4.2.2 モバイル端末

モバイル端末は、図 14 に橙色で示した 216m × 216m の範囲に存在する道路上をランダムに動かす。道路上に 1 台のモバイル端末を配置するため、モバイル端末の数は 6 台とする。モバイル端末の高さは歩行者がモバイル端末を手を持っていると想定し、1.5m とする。モバイル端

末の速度は文献 [17] から 6~80 歳までの年齢の人の平均速度が 74.0575[m/min] と算出されるため、近似値である 74[m/min] に設定する。

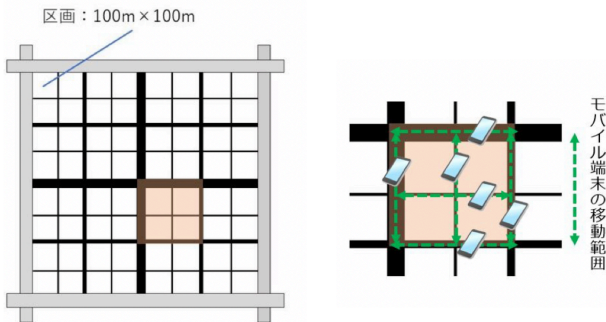


図 14 モバイル端末の動作範囲 (左) とモバイル端末の動作範囲の拡大図 (右)(文献 [15] から引用)

4.2.3 実験方法

UAV 空中基地局群とモバイル端末の代替ネットワークに OLSR のみを使用して構築した場合と提案手法 2 を使用して構築した場合の比較実験を行う。ここで、代替ネットワークを OLSR のみを使用して構築する場合はシナリオ A, 提案手法 2 を使用して構築する場合はシナリオ B とする。

シナリオ A では UAV 空中基地局群とモバイル端末群の全てに OLSR のみを使用したネットワークで, UAVBS からモバイル端末へパケットを送信する (図 15)。シナリオ B では UAVBS が OLSR で構築されたネットワークで各 UAV 空中基地局に対してパケットを送信し, パケットを受信した UAV 空中基地局はゲートウェイを介して Epidemic Routing で構築されるネットワークでモバイル端末へパケットを送信する (図 16)。各シミュレーションのシミュレーション時間は 600 秒に設定する。比較実験は, モバイル端末のランダムな動きを制御するための乱数生成器のシード値を変えて, 6 回繰り返す。表 2 に本実験で使用するシミュレーションパラメータを示す。

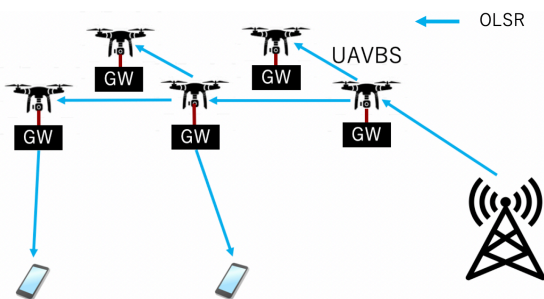


図 15 シナリオ A での UAVBS のパケット送信方法

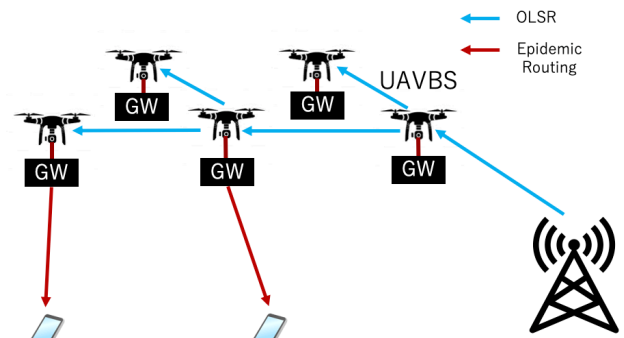


図 16 シナリオ B での UAVBS のパケット送信方法

表 2 シミュレーションパラメータ

パラメータの種類	パラメータの設定値
UAV 空中基地局の飛行高度	200 [m]
モバイル端末の高度	1.5 [m]
モバイル端末の速度	74 [m/min]
モバイル端末の移動モデル	RandomWayPoint
トランスポートプロトコル	UDP
パケットサイズ	2048 [Byte]
パケット送信速度	512 [kbps]
通信に使用する周波数	2.4 [GHz]
シミュレーション時間	600 [s]

4.2.4 評価方法

各シミュレーションにおける UAVBS からモバイル端末への平均送信成功率と UAVBS からモバイル端末までパケットを送信する際の遅延時間によってシナリオ A とシナリオ B の比較評価を行う。各シミュレーション内でモバイル端末がパケットを受信する毎に平均送信成功率と遅延時間の座標をプロットする。平均送信成功率は各シミュレーション内の全てのモバイル端末がパケット受信した場合に 100%となる。

4.2.5 結果

シナリオ A での平均送信成功率と遅延時間の 2 次元グラフを図 17 に示す。モバイル端末は UAVBS のパケット送信開始時から 4.01 秒後に最初のモバイル端末がパケットを受信し, 5.03 秒後に最後にパケットを受信しており, 平均遅延時間は 4.28 秒となった。最後のパケットが受信されたときの平均送信成功率は 83.33%となり, これ以降値が更新されることはなかった。

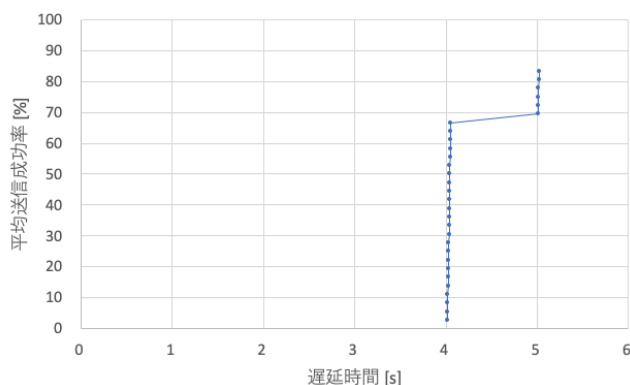


図 17 シナリオ A での平均送信成功率と遅延時間

シナリオ B での平均送信成功率と遅延時間の 2 次元グラフを図 18 に示す。UAVBS のパケット送信開始時から 4.18 秒後に最初のモバイル端末がパケットを受信し、13.73 秒後に最後にパケットを受信しており、平均遅延時間は 7.76 秒となった。平均送信成功率は 100% になった。

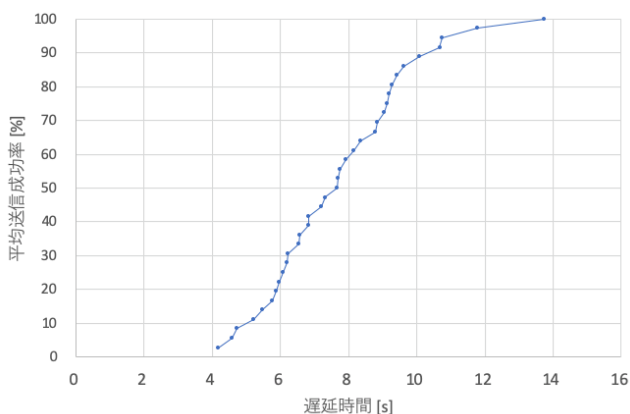


図 18 シナリオ B での平均送信成功率と遅延時間

5. 考察

送信成功率の面では、シナリオ A では平均送信成功率が 83.3% となることから、UAVBS からパケットを受信できないモバイル端末が存在するため、提案手法 1 は全ての UAV 空中基地局群の地上カバレッジホールの発生を防ぐことができず、一方、シナリオ B では平均送信成功率が 100% になることから、送信成功率の面では提案手法 2 は有効に機能しているといえる。

一方、遅延時間の面では、シナリオ A での平均遅延時間が 4.28 秒であるのに対し、シナリオ B での平均遅延時間が 7.76 秒であることから、Epidemic Routing を使用することで OLSR を使用した場合よりも遅延時間が増えることが考えられる。

6. まとめ

本研究では、UAV 空中基地局群の地上カバレッジのカ

バレッジホールを抑制しながら UAV 空中基地局群を展開すること、モバイル端末が UAV 空中基地局群の地上カバレッジホールが発生した部分に存在していた場合でも、モバイル端末が UAVBS から送信されたパケットを受信可能にすることを目的とした手法を提案した。

提案手法では、Modified Hata Model によって UAV 空中基地局の地上カバレッジを推定し、推定した地上カバレッジを元に UAV 空中基地局群を展開する手法および UAV 空中基地局群とモバイル端末の代替ネットワークを OLSR と Epidemic Routing を組み合わせたネットワークとして構築する手法を検討した。提案手法に対して評価実験を行い、現実的な遅延時間のもとで UAV 空中基地局からモバイル端末への送信成功率を向上させ、代替ネットワークとして有効な性能であることを示した。

今後の課題として、モバイル端末の存在密度に基づいて UAV 空中基地局群を展開することによる、効率の良い UAV 空中基地局群の配置手法の検討が挙げられる。また、通信が安定している状況では MANET を使用し、通信が不安定な状況では DTN を用いるような自律制御を導入することにより、端末のバッファ消費および通信遅延時間を抑制する手法の検討が必要である。

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, 篠田庄司: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] Nishiyama, H., Ito, M., and Kato, N.: Relay-by-Smartphone: Realizing Multi-Hop Device-to-Device Communications, IEEE Communications Magazine, vol.52, no.4, pp.56-65 (2014).
- [6] Shucker, B. and Bennett, J.K.: Virtual Spring Mesh Algorithms for Control of Distributed Robotic Macrosensors, Computer Science Technical Reports, University of Colorado, CU-CS-996-05, pp.1-13(2005).
- [7] Shucker, B., Murphey, T, and Bennett, J.K.: An approach to switching control beyond nearest neighbor rules, Proceedings of the American Control Conference(ACC 2006), pp. 7(2006).
- [8] Felice, M.D., et al.: Self-organizing aerial mesh networks for emergency communication Proceedings of the IEEE 25th Annual International Symposium on, Personal Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC 2014) , pp.1631-1636(2014).
- [9] 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).
- [10] Ma, M., Yuanyuan, Y.: Adaptive Triangular Deployment Algorithm for Unattended Mobile Sensor Networks, IEEE Transactions TC, Vol.56, No.7, pp.946-847(2007).
 - [11] 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).
 - [12] Clausen, T., and P. Jacquet. : Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), RFC 3626, DOI 10.17487/RFC3626, (2003).
 - [13] Lindgren, A., Doria, A., and Scheln, O.: Probabilistic routing in intermittently connected networks, Proceedings of the International Workshop on Service Assurance with Partial and Intermittent (SAPIR 2004), pp.239-254 (2004).
 - [14] ns-3 (online), available <<https://www.nsnam.org/>> (accessed 2019-05).
 - [15] 国土技術政策総合研究所:基準作成に役立つ基礎知識(オンライン), 入手先 <<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0368pdf/ks0368034.pdf>> (参照参照 2018-12).
 - [16] 日本ビルディング協会連合会:ビル実態調査(平成25年版)調査結果要旨(オンライン), 入手先 <http://www.jboma.or.jp/h24_birujittai/zenkoku> (参照参照 2018-11).
 - [17] Waters, R.L., Lunsford, B.R., Perry, J., and Byrd, R.: Energy - speed relationship of walking: Standard table, Journal of Orthopaedic Research, vol.6, no.2, pp.215-222(1988).