

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*

矢内 宏樹^{†a)} 岡田 啓[†] 小林健太郎[†] 片山 正昭[†]

Flight Models in Wireless Relay Networks Using Drones for Large-Scale Disasters*

Hiroyuki YANAI^{†a)}, Hiraku OKADA[†], Kentaro KOBAYASHI[†], and Masaaki KATAYAMA[†]

あらまし 大規模災害時における通信確保のための臨時通信システムとして、複数のドローンを用いた無線中継ネットワークを想定する。情報が送信元から送信され宛先で受信されるまでにかかった情報伝送時間を短縮することを目的とし、伝送時間短縮のための飛行モデルを検討する。更に、ドローンが永続的に飛行することは不可能であることから、ドローンのバッテリー切れによる離脱を考慮する。離脱動作として、ドローンの離脱タイミングとバッテリー交換のための整備地点への移動を考える。提案飛行パターンにおいて、情報伝送遅延時間をシミュレーションにより評価する。そして、ドローンのバッテリー切れを考慮した低遅延な飛行モデルの指針を示す。

キーワード ドローン、臨時通信システム、大規模災害、無線中継ネットワーク、飛行モデル

1. ま え が き

大規模災害時における要求として人々の安否確認や被災地の被災状況の把握などの情報取得が挙げられ、そのための通信手段の確保が重要である。しかし、災害による通信インフラの破壊や通信施設の機能停止による通信の断絶、通信需要増大による通信の混雑などが通信障害をもたらすことが想定される。そこで、通信手段の確保のためにドローンを用いた臨時通信システムが提案されている [2]~[6]。ドローンを用いる利点は、地上の被害状況がシステムに与える影響が小さい点、ドローンが各々自律して動けることによる臨機応変なネットワーク形成が可能な点、そして有人ヘリや大型航空機に比べて低コストである点などが挙げられる。

本論文では、大規模災害時における臨時通信システムとしてドローンを用いた無線中継ネットワークを構築する。ドローンを用いた無線中継ネットワークでは、

上空を飛行する複数のドローンによりネットワークを構築することで地上のユーザ端末を収容する。もし多くのドローンによって無線中継ネットワークを構築する場合、通信接続は常に維持される。しかし、大規模災害時には常に通信接続を維持できるほどのドローンの台数を十分に確保できない可能性がある。このような状況でも情報を伝送できるよう、遅延耐性ネットワーク (Delay Tolerant Network: DTN) [8], [9] を導入する。ドローンがお互いに接続されていなくても、ドローンが移動することで他のドローンへ情報を中継し、送信元から宛先まで情報を伝送する。

DTN を導入した無線中継ネットワークでは、ドローンの台数が不足する場合でも情報を伝送することが可能であるが、ドローンが移動して情報を伝送するため遅延時間が大きくなる。この遅延時間の増大は、ドローンの台数が同じであっても、ドローンがどのように移動するかという飛行モデルに依存する。本論文ではより少ないドローンで低遅延なネットワークを構築することを考える。

大規模災害時における臨時通信システムについての関連研究 [2], [4] では、ドローンの飛行モデルが検討されていなかったり、1機のドローンがあらかじめ決められた軌道上を飛行して情報を収集していた。これに対し本論文では情報伝送に要する時間を短縮するため

[†] 名古屋大学, 名古屋市
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

a) E-mail: hyanai@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

* 本論文は著者による VTC-Fall 2018 ワークショップ DEWCOM での発表 [1] をもとにしている。

DOI:10.14923/transcomj.2019GTP0015

のドローンの飛行モデルの検討として、反発飛行、共用飛行経路を用いることを提案する。反発飛行では複数のドローンが重複した場所を飛行することを避けるために、ドローン同士が反発するような方向に移動する飛行モデルである。共用飛行経路は複数のドローンが共有して飛ぶ決められた経路を構築することで、情報をいったん共用飛行経路経路上のドローンに集約することができる飛行モデルである。提案飛行モデルにおける遅延特性を評価し、情報伝送遅延時間の短縮を確認する。

更に、ドローンの多くはバッテリー式であり永続的な飛行が不可能であるという課題がある。複数のドローンを用いたネットワークについての関連研究 [5]~[7]ではこのドローンを利用するにあたり問題となるドローンのバッテリー切れについての考慮がなされていない。ドローンは永続的な飛行が不可能であることを考えると、バッテリー切れにより飛行できないドローンはネットワークを構築することができなくなる。それによりネットワークの切断が発生し、遅延時間が増加してしまう。本論文では、ドローンのバッテリー切れを考慮し、ドローンがシステムから一時的に離脱することによる各飛行モデルの遅延特性への影響を評価する。このとき、ドローンがバッテリー交換のために離脱するタイミングとバッテリー交換のための整備地点の場所による遅延特性への影響をシミュレーションによって評価する。

本論文の貢献は以下の3点である。

1. 複数のドローンを用いた無線中継ネットワークにおいて、低遅延な通信を実現するための飛行モデルの検討。
2. ドローンのバッテリー切れを考慮した遅延特性評価。
3. シミュレーションによる特性評価に基づく低遅延化を図る飛行モデルの指針の検討。

2. ドローンを用いた無線中継ネットワーク

ドローンを用いた無線中継ネットワークを図1に示す。本ネットワークは、送信元ノード、宛先ノード、複数のドローンで構成される。ドローンは被災した地域の上空を飛行しながらしながら、空中でネットワークを構築する。ドローンは自身の通信可能範囲内に転送先のドローンがいる場合は、ドローン同士は接続状態となり通信が行われる。自身の通信範囲内に転送先のドローンがない場合は、ドローンは情報を保持しながら移動を行い、転送先のドローンが通信範囲内に

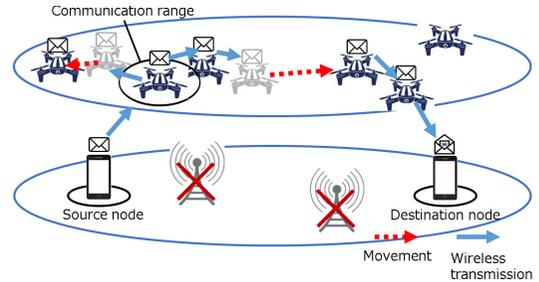


図1 ドローンを用いた無線中継ネットワーク
Fig.1 Wireless network using drones.

入ると通信を行い情報の転送を行う。広範囲にネットワークを構築できることが特徴だが、送信元ノードから宛先ノードまで情報を伝送するのに要する遅延時間はドローンの飛行パターンや台数に依存する。

本システムは被災したある一定の広さの地域全体をカバーするネットワークを想定している。この地域にいる被災者や災害対策本部で発生する情報の伝送に用いることを想定しているため、複数対複数の通信を行えるシステムである。伝送される情報はメッセージ等のリアルタイム通信を要求しない情報を想定する。

3. ドローンの飛行モデル

ドローンを用いた無線中継ネットワークを構築するにあたり、ドローンは被災地域内を移動しながら情報の伝送を行う飛行モデルを想定している。本モデルでは、少なくとも幾つかのドローンはランダムに移動することを基本とする。全てのドローンを定位置に配置したり定期的に移動させない理由は、飛行中のドローンの故障やバッテリー切れによる離脱を考慮しているからである。ドローンが離脱すると、ネットワークを維持するためにその穴を埋める必要がある。これを考慮してドローンの配置や移動規則を定めるのは飛行モデルが複雑になる。大規模災害時のための臨時通信システムということを考えると、簡単な設定のみで動作することが望ましい。少なくとも幾つかのドローンをランダムに移動していれば、特別な動作をしなくてもこの穴を埋めることができる。

よく用いられるランダムな移動モデルとして Random Waypoint (RWP) [10], [11] がある。本研究では各ドローンは基本的に RWP に従って飛行するが、ドローン同士が通信完了後お互いの反対方向に移動するような動作を追加する。これを反発飛行として用いる。また、一部のドローンで固定の経路を対象エリア

に構築し情報を集約する．これを共用飛行経路と名付けて用いる．本章では，RWP と提案飛行モデルについて説明する．

3.1 Random Waypoint (RWP) とその課題

RWP とは，ドローンが目的地を対象地域の中からランダムに決定しその目的地まで直線移動を行う動作を繰り返す飛行モデルのことである．ドローンは目的地に到着した後，再度対象地域内からランダムに目的地を決定し直線移動を行う．本論文では，RWP の位置づけは各ドローンが移動する目的地を地域内のランダムな座標に決定するためのものとする．そこで簡単のために，RWP に従うドローンは一定速度で移動し，目的地到着後，直ちに新しい目的地へ移動する．

本ネットワークではドローンは基本的にこの飛行モデルに従う．地域内のドローンそれぞれがランダムに動くため，ある時刻におけるドローンの位置分布の特徴としてドローンが過密する地域やほとんど飛行していない地域が発生する．また境界効果により中心部に集まりやすくなることが知られている [12]．ドローンが過密する地域では，ドローンの通信範囲の無駄な重なりが発生するという課題がある．

3.2 反発飛行

反発飛行について図 2 に示す．図 2(a) に示される基本動作のように通信範囲の重なりを最小にするためにドローン同士が通信完了後，お互いが反発し合うような方向に目的地を再決定し移動する飛行モデルである．この飛行モデルでは，各ドローンがお互いにそれらの通信範囲に入ったときお互いの位置情報を交換する．そして，図 2(b) のようにお互いの位置情報からお互いを結ぶ直線を求め，対象地域内における直線上の反対方向のランダムな位置を新しい目的地として設定する．これにより通信完了後のドローンはお互いの反発する方向に移動する．

地域内のドローンがそれぞれ反発して動くため，分布の特徴としてドローンは一様に分散する．これにより通信範囲の無駄な重なりが小さくなり，RWP の課題が改善される．

3.3 共用飛行経路

図 3 に共用飛行経路を示す．この図のように地域内において複数台のドローンが共通して利用する飛行経路のことである．ドローンは共用飛行経路上で一定の間隔を保つように配置される．ドローン間の距離はドローンの通信範囲内にすることで，共用飛行経路上の全てのドローンが常にネットワークを維持している状

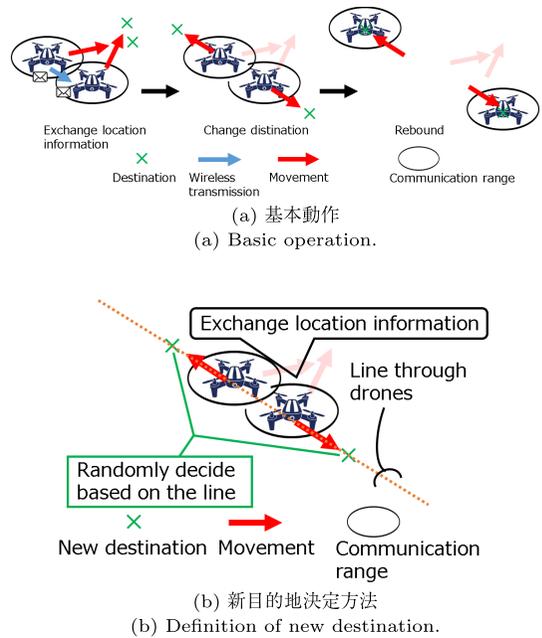


図 2 反発飛行
Fig. 2 Rebounding flight.

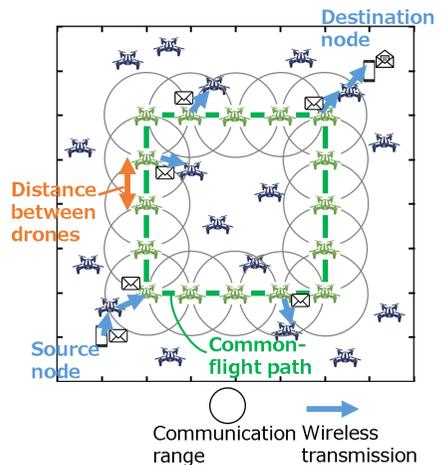


図 3 共用飛行経路
Fig. 3 Common-flight path.

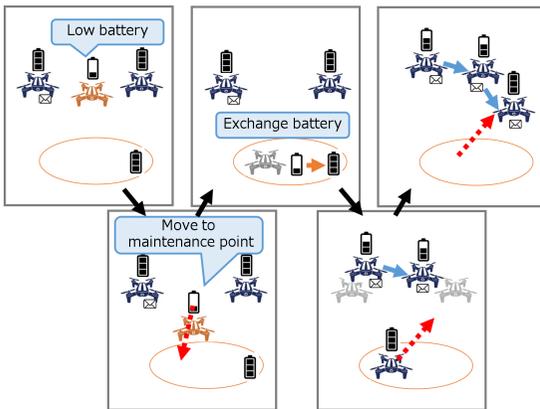
態になる．

共用飛行経路を導入する利点として，経路上のドローン 1 台に情報が伝送されると経路上の全てのドローンに情報が共有される．これにより，情報をいったん共用飛行経路上のドローンに集約することができ，情報の伝送効率を上げることが期待される．

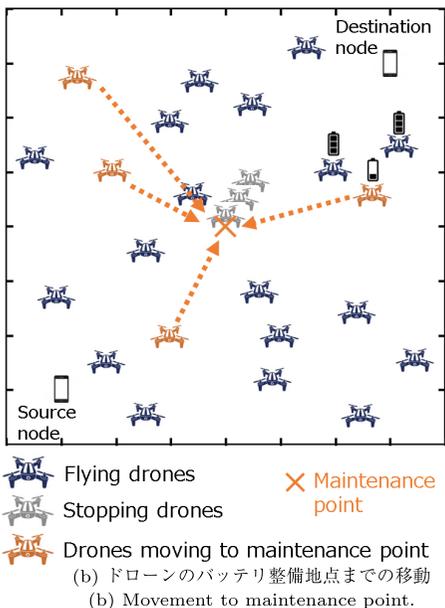
4. ドローンの離脱

4.1 ドローンのバッテリー切れとネットワークからの離脱

ドローンのバッテリーによる飛行可能時間を考える。ドローンは飛行可能時間の間は飛び続けることができるが、この時間を超えるとバッテリーが切れ飛行不可能となる。この基本動作を図 4(a) に示す。バッテリー残量が少なくなったドローンがネットワークから整備



(a) 基本動作
(a) Basic operation.



(b) ドローンのバッテリー整備地点までの移動
(b) Movement to maintenance point.

図 4 ドローンの離脱
Fig. 4 Drones' stops.

地点へ移動する。整備地点に到着したドローンはネットワークから一時的に離脱し、バッテリーの交換を行う。バッテリー交換が完了した後再び整備地点からネットワークに復帰する。このように、各ドローンは飛行モデルに従って動作、整備地点への移動、ネットワークから離脱後のバッテリー交換、ネットワークへの復帰を繰り返す。

また、図 4(b) にドローンが固定のバッテリー整備地点へ移動する場合の様子を示す。ドローンの整備地点は地域内のある位置に設けられるとする。ドローンは整備地点の位置を把握しており、自身の位置情報とバッテリー残量、整備地点の位置情報から飛行可能時間内つまりバッテリー残量内に整備地点へ到着するように目的地を変更して整備地点への移動を開始する。ドローンの位置によって整備地点までの距離が異なり、それにより整備地点への移動開始時間が異なる。

整備地点へ移動中のドローンは通信可能ではあるが、反発飛行は行わないとする。また、反発飛行に従って飛行しているドローンが整備地点へ移動中のドローンと通信を行っても反発しないとする。整備地点のドローンはバッテリー交換を行うものとして移動と通信は行わない。

4.2 ドローンの離脱タイミング

本節ではドローンの離脱タイミングとして三つ考える。一つ目は各ドローンが自身のタイミングでランダムに離脱する。二つ目は均等な順番に離脱、三つ目は全てが同時に離脱する。均等な順番と同時に離脱する場合、ドローン間でタイミングの調整が必要でありあまり望ましくないが、両極端の場合での特性を比較するために用いる。

3 種類の離脱タイミングを比較することで離脱タイミングによって遅延特性への影響に差があるか、そして情報伝送遅延時間が小さくなるような、つまり低遅延な離脱タイミングの検討を行う。

4.2.1 ランダム

各ドローンは自身のタイミングで離脱する。これを図 5 に示す。各ドローンは自身のタイミングで離脱するためドローン間で離脱タイミングの調整をする必要がない。そのため、離脱タイミングはランダムとなる。整備地点へ移動し始める時刻もランダムとなる。

このタイミングの特徴として、飛行可能なドローンの台数が多い時間帯と少ない時間帯が発生することが挙げられる。飛行可能なドローンの台数が多い時間帯では情報伝送遅延時間は小さくなるが、少ない時間帯

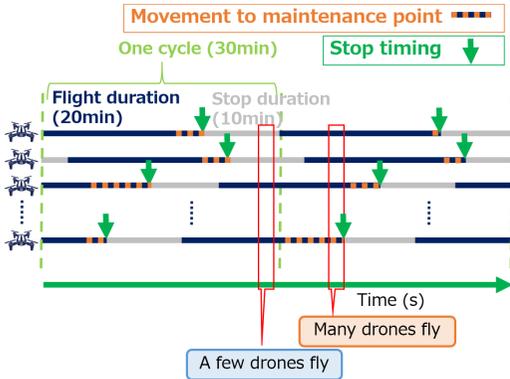


図 5 ドローンの離脱タイミング (ランダム)
Fig. 5 Random stop timing.

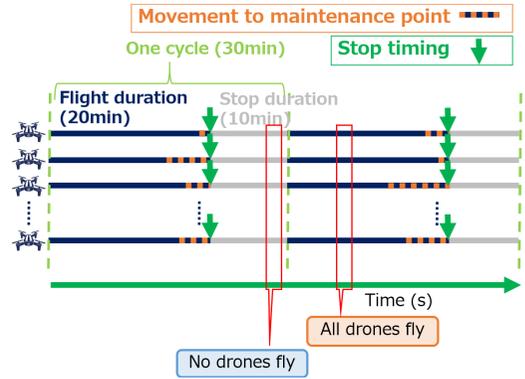


図 7 ドローンの離脱タイミング (同時)
Fig. 7 Simultaneous stop timing.

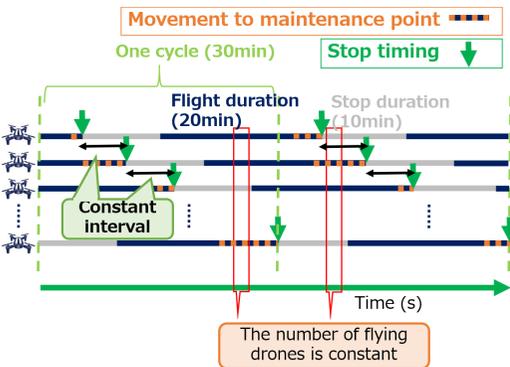


図 6 ドローンの離脱タイミング (均等な順番)
Fig. 6 Ordering stop timing.

では情報伝送遅延時間は大きくなることが予想される。

4.2.2 均等な順番

図 6 のように各ドローンの離脱タイミングを一定間隔でずらす。タイミングの間隔の導出は、ドローンの飛行可能時間と離脱時間の和を 1 周期の時間として、その時間をドローンの台数で割ることで算出する。各ドローンには 1 から順に番号が振られ、導出した間隔分ずれて番号順に整備地点に到着することで均等な順番にバッテリー交換を開始する。各ドローンが整備地点へ移動し始める時刻はそれぞれの位置により異なるため、均等にはならない。特徴としてどの時間帯でも飛行可能なドローンの台数が均等となり、時間帯による情報伝送時間の差がなくなることが予想される。

4.2.3 同時

図 7 のように全てのドローンが同じ時刻に離脱してバッテリー交換を開始する。このとき、整備地点への移動開始時刻は各ドローンの位置により異なる。整備地

点から遠いドローンは整備地点に近いドローンよりも先に整備地点への移動を開始する必要がある。バッテリー交換後、全てのドローンが同時にネットワークに復帰をする。

特徴として、全てのドローンが飛行可能な時間帯と飛行可能なドローンが 1 台もない時間帯が発生する。全てのドローンが飛行可能な時間帯では離脱動作を導入する前と同様の遅延特性が期待されるが、1 台も飛行可能でない時間帯ではネットワークは完全に途切れてしまう。

5. 数値例

5.1 シミュレーションモデル

表 1 にシミュレーション諸元を、図 8 にシミュレーションモデルを示す。全てのドローンが RWP に従って動く場合と反発飛行をする場合の 2 種類の飛行モデルに従ってドローンを飛ばす。また、各飛行モデルに加えて共用飛行経路を導入する。本論文では、各ドローンのバッファ容量を考慮せず、DTN のアルゴリズムとして基本的なエピデミックルーティングを用いる。

シミュレーション範囲は縦 4000[m] × 横 4000[m] とする。地域内に送信元と宛先ノードの座標を (500, 500), (3500, 3500) と固定して設置する場合と、それぞれ一様分布とする場合を検討する。ドローンの移動速度は実際のドローンの性能内である 10[m/s] とする [13]。ドローンの通信範囲は見通しが確保され電波の地上反射の影響も少ないことから 500m とする。シミュレーション範囲を正方形と設定していることから、簡単のために共用飛行経路の形状も正方形とし、その中心はシミュレーション範囲の中心と一致させる。共

表 1 シミュレーション諸元
Table 1 Simulation parameters.

| | |
|-------------------------------|--|
| Simulation area | 4000 m × 4000 m |
| Location of source node | (500, 500) |
| Location of destination node | Uniform distribution (3500, 3500) |
| Size of common-flight path | 500 m × 500 m 1000 m × 1000 m 1500 m × 1500 m 2000 m × 2000 m 2500 m × 2500 m 3000 m × 3000 m |
| Movement speed of drone | 10 m/s |
| Communication range of drone | 500 m |
| Location of maintenance point | (2000, 2000), Any point |
| Flight duration | 20 min |
| Stop duration | 10 min |
| Simulation count | 10000 times |

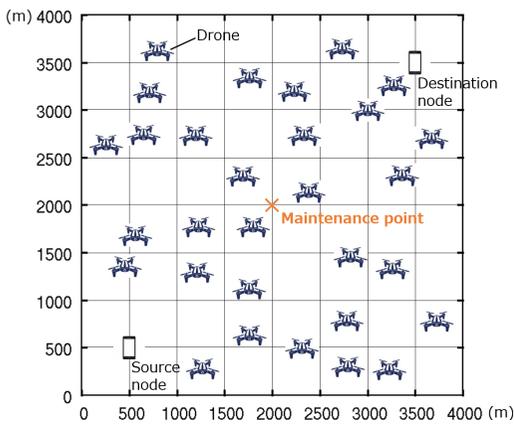


図 8 シミュレーションモデル
Fig. 8 Simulation model.

用飛行経路上のドローンは動かないものとし、経路外のドローンは RWP または反発飛行に従って飛行する。ドローンの整備地点の座標は (2000, 2000) または任意の場所とする。任意の場所の場合はドローンは飛行可能時間を終えた位置で離脱をすることとする。これは、整備地点への移動を考えないことを意味し、固定の整備地点へ移動する影響を評価するための比較対象として設ける。ドローンの飛行可能時間は 20 分 (1200 秒) [13], 離脱時間はドローンのバッテリー交換のための時間として 10 分 (600 秒) とする。

5.2 バッテリー切れを考慮しない場合

本節では、各飛行モデルにおける情報伝送遅延特性を評価する。ドローンの飛行可能時間は無制限とし、バッテリー切れを考慮しないものとする。共用飛行経路

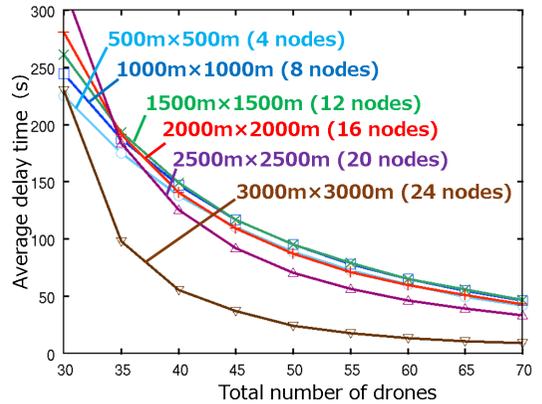


図 9 共用飛行経路の大きさによる情報伝送遅延特性 (送信元、宛先の位置が一様分布)

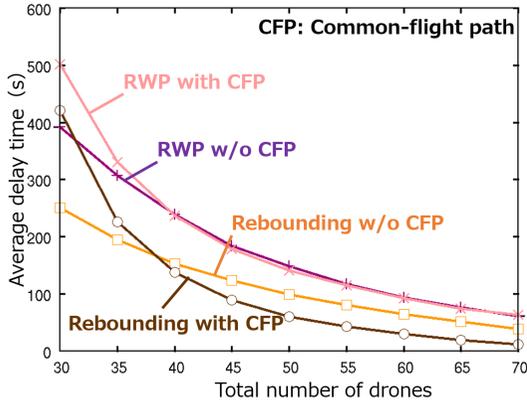
Fig. 9 The delay performance changing size of common-flight path (uniform locations of source and destination nodes).

があるパターンとないパターン、共用飛行経路を飛ばないドローンが RWP に従うパターンと反発飛行に従うパターンの組み合わせの 4 パターンにおける、ドローンの台数に対する情報伝送遅延時間を比較する。

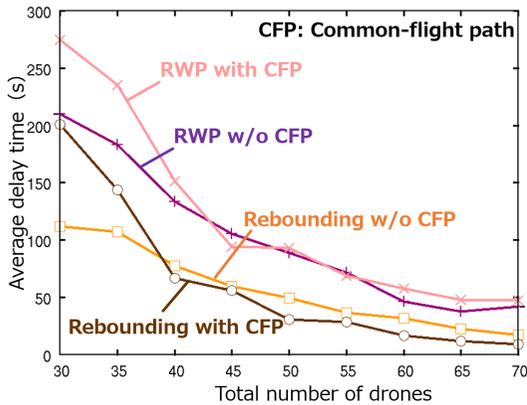
まずはじめに共用飛行経路の大きさについて検討する。図 9 に送信元と宛先ノードの位置が一様分布に従う場合の共用飛行経路の大きさによる情報伝送遅延特性を示す。横軸はドローンの台数で縦軸は平均情報伝送遅延時間を示す。経路外のドローンは RWP に従うこととする。また、共用飛行経路の大きさと経路内のドローンは、500[m]-500[m] のときは 4 台、1000[m]-1000[m] のときときは 8 台、1500[m]-1500[m] のときときは 12 台、2000[m]-2000[m] のときは 16 台、2500[m]-2500[m] のときは 20 台、3000[m]-3000[m] のときは 24 台となる。各場合において経路外の台数は総台数から経路内の台数を引いた数である。

この図より、ドローンの台数がある程度あれば共用飛行経路が大きくなるにつれて遅延が小さくなることがわかる。これは、送信元と宛先の座標が遠い場合に最も遅延時間が大きくなるが、共用飛行経路が大きいほどその場合の遅延時間を大きく短縮できるためと考えられる。ただしドローンの台数が少ないときは経路外のドローンの台数が少なくなりすぎるため、共用飛行経路を小さくしたほうが遅延時間を短縮できることが分かる。

図 10 に各飛行モデルに対する平均情報伝送遅延時間の比較評価の結果を示す。図 10 (a) に送信元と宛



(a) 送信元 (500, 500), 宛先 (3500, 3500)
 (a) Source node: (500, 500),
 Destination node: (3500, 3500).



(b) 送信元, 宛先の位置が一様分布
 (b) Uniform locations of source and destination nodes.

図 10 各飛行モデルにおける情報伝送遅延特性
 Fig. 10 The delay performance of the flight models.

先の座標が固定した場合の遅延時間を示す。このとき共用飛行経路の大きさは、経路上のドローンの通信範囲内に送信元と宛先が入らないように、縦 2000[m] × 横 2000[m] とする。この図より反発飛行を導入することで情報伝送遅延時間が短縮されることがわかる。また、図 11 に RWP と反発飛行に従う場合のある時刻におけるドローンの分布を示す。この図のように反発飛行ではドローン同士の通信範囲の無駄な重なりが低減し、ドローンがバランスよく分布したことが遅延時間短縮の大きな要因と考えられる。共用飛行経路を導入し経路外のドローンが反発飛行に従う場合、ドローンの全台数が 40 台以上であれば、情報伝送遅延時間が更に短縮されている。RWP に従う場合では、遅延

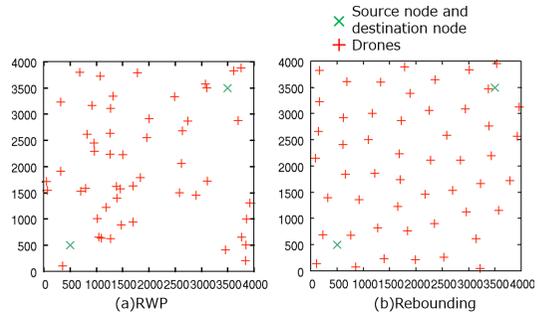


図 11 各飛行モデルにおけるドローンの分布 (50 台)
 Fig. 11 The drones' distributions of the flight models.

時間が短縮されず、共用飛行経路の導入効果が現れていない。この理由として、RWP は時間が経過するにつれてドローンがシミュレーション範囲の中央付近に集まってしまうことと、共用飛行経路が元々この範囲の中央付近に設定されていることから、ドローンの分布が被る状況が考えられる。一方で、ドローンの全台数が 40 台以下だと、経路外のドローンがどちらの飛行モデルにおいても台数が少ないことから共用飛行経路の効果を得られていない。

図 10 (b) に送信元と宛先の座標をそれぞれ地域内のランダムな地点に設定した場合の結果である。共用飛行経路の大きさは、図 10 (a) の条件と揃えるために 2000[m] × 2000[m] とする。これより、送信元と宛先の座標にかかわらず、同様の特性が得られていることがわかる。

5.3 バッテリー切れを考慮した場合

本節では、全てのドローンが RWP か反発飛行に従って飛行する場合のドローンのバッテリー切れを考慮した遅延特性を評価する。本節で共用飛行経路を導入しないのは、共用飛行経路が維持されない状況避けるためである。共用飛行経路上のドローンが離脱動作を行うとすると、共用飛行経路が崩れる状態が発生し共用飛行経路を用いる利点が弱くなる。よって、共用飛行経路のドローンは有線ケーブルによる地上からの電源供給を想定し、バッテリー切れによる離脱の影響を評価しないものとする。

図 12 に RWP と反発飛行に従う場合のドローンの離脱による遅延特性への影響を示す。ドローンの離脱タイミングはランダムとし、整備地点は任意の地点とする。この図より、どちらの飛行モデルにおいてもドローンの離脱により情報伝送遅延時間が増加している。

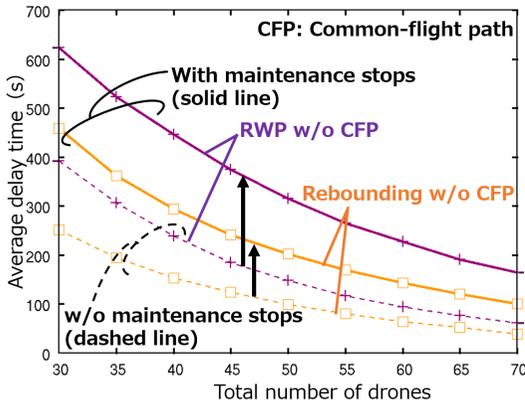


図 12 各飛行モデルにおける遅延特性への離脱の影響評価 (送信元 (500, 500), 宛先 (3500, 3500))

Fig. 12 The influence of drones' stops for the flight models (source node: (500, 500), destination node: (3500, 3500)).

バッテリー切れを考慮した離脱動作を飛行モデルに導入して、RWP と反発飛行を比較すると、反発飛行に従う場合が遅延時間増加量が抑えられ、遅延特性が良いことがわかる。RWP に従う飛行パターンにおいて、ドローンの離脱は飛行可能なドローンの台数の純粋な減少と考えられる。一方、反発飛行の場合において、ドローンが離脱すると飛行可能なドローンは地域内で再分散をするような動きをする。このことから反発飛行の方が離脱による遅延特性への影響が小さいと考えられる。

反発飛行の方がバッテリー切れを考慮した場合も遅延特性が良いため、続いて全てのドローンが反発飛行に従って飛行する場合において、ドローンがバッテリー交換のために離脱するタイミングとバッテリー交換のための整備地点の場所による遅延特性を評価する。図 13 に離脱タイミングと整備地点の違いによる情報伝送遅延時間を示す。固定の整備地点へ移動する場合と地域内の任意の位置で離脱する場合を比較すると、どのタイミングでドローンが離脱する場合でも固定の整備地点へ移動する場合が地域内の任意の位置で離脱する場合より遅延時間が増加している。これは固定の整備地点への移動がドローンの動きに加わることで一部のドローンが一点に集まるような動きをするため、ドローンの分布に偏りが生じることが原因であると考えられる。しかし、ランダムと均等な順番で離脱する場合でドローンの台数が 60 台以上と多いときは地域内の任意の位置で離脱する場合と固定の整備地点へ移動する

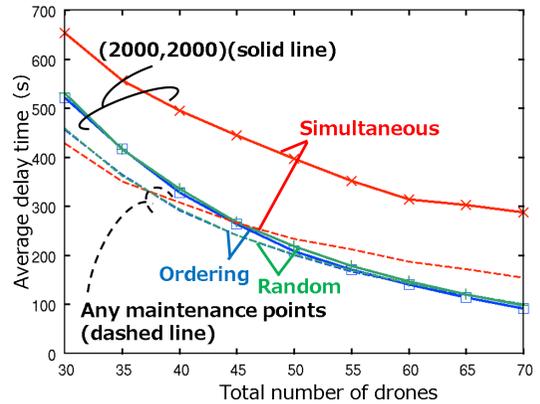


図 13 離脱タイミングと整備地点の違いによる平均情報伝送遅延時間 (反発飛行) (送信元 (500, 500), 宛先 (3500, 3500))

Fig. 13 The delay performance for stop timings considering maintenance points (rebounding) (source node: (500, 500), destination node: (3500, 3500)).

場合の遅延時間の差がない。これはドローンの台数が多いと、一部のドローンが固定の整備地点への移動をしても他のドローンによってカバーできているからと考えられる。

また、固定の整備地点へ移動する場合の離脱タイミングによる伝送遅延時間の増加の違いを考える。各ドローンがランダムに離脱する場合と均等な順番で離脱する場合では伝送遅延時間の増加に大きな差はない。しかしこれらの離脱タイミングと比べて全てのドローンが同時に離脱する場合、伝送遅延時間の増加が大きい。ランダムや均等な順番で離脱する場合は、任意の地域にドローンが全く存在しない状態がないが、全てのドローンが同時に整備地点でバッテリー交換を行うためには整備地点から遠い座標に位置しているドローンから順番に整備地点への移動が始まる。整備地点の座標が本シミュレーション地域の真ん中にあることから、シミュレーション地域の外側に位置しているドローンから順番に整備地点への移動が始まることとなる。それにより地域の外側から順にドローンが全く存在しない時間が発生する。このようにある特定の地域でドローンが全く存在しない状態が長く発生することにより、遅延時間が増加したと考えられる。

6. む す び

本論文では、災害時における臨時通信システムとしてドローンを用いた無線中継ネットワークを想定し、

新たなドローンの飛行モデルを提案し評価した。反発飛行を導入することで、情報伝送遅延時間が短縮されることがわかった。また、共用飛行経路を用いた場合経路外を飛行するドローンが一定数以上確保できる状況であれば、遅延時間をより短縮できた。本論文では、共用飛行経路の形状は、共用飛行経路を導入したときの効果を検証するために、シミュレーション範囲の形状に合わせて簡単な正方形のみの評価をしたが、形状差異の影響については被災地域の地形なども考慮して今後検討する必要がある。

そして、ドローンのバッテリー切れを考慮するために、バッテリー交換のための離脱動作を加えた飛行モデルを提案した。離脱動作を加えた場合でも反発飛行の遅延特性が良いことがわかった。更に、ドローンが離脱するタイミングと整備地点の場所による遅延特性への影響を評価し、ドローンがランダムに離脱する場合と均等な順番で離脱する場合の遅延特性が良いことがわかった。ランダムに離脱する場合はドローン間で離脱タイミングを調整する必要がない。以上より、ドローン間で離脱タイミングを調整しなくても反発飛行により低遅延化を図ることができる。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 (19K04392) の助成を受けて行われたものである。記して謝意を表す。また、本研究を進めるにあたり、貴重なご意見を頂いた名古屋大学山里敬也教授に感謝する。

文 献

- [1] H. Yanai, H. Okada, K. Kobayashi, and M. Katayama, "Flight schemes considering breaks for wireless relay networks using drones during large-scale disasters," International Workshop on Dependable Wireless Communications (DEWCOM), Aug. 2018. DOI:10.1109/VTCFall.2018.8690913
- [2] A. Mori, H. Okada, K. Kobayashi, M. Katayama, and K. Mase, "Construction of a node-combined wireless network for large-scale disasters," IEEE Consumer Communications and Networking Conference, pp.219–224, Jan. 2015.
- [3] K. Mase and H. Okada, "Message communication system using unmanned aerial vehicles under large-scale disaster environments," IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp.2366–2371, 2015.
- [4] 三浦 龍, 滝沢賢一, 鈴木幹雄, 辻 宏之, 井上真杉, 大和田泰伯, "小型無人航空機を用いた無線中継の検討～大規模災害時におけるネットワーク孤立地域の救済をめざして～," 信学技報, SAT2012-4, May 2013.
- [5] A. Merwaday, A. Tuncer, A. Kumbhar, and I. Guvenç, "Improved throughput coverage in natural disasters: Unmanned aerial base stations for public-safety communications," IEEE Veh. Technol. Mag., vol.11, no.4, pp.53–60, Dec. 2016.
- [6] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, "Optimal lap altitude for maximum coverage," IEEE Wireless Commun. Lett., vol.3, no.6, pp.569–572, Dec. 2014.
- [7] W. Shi, J. Li, W. Xu, H. Zhou, N. Zhang, S. Zhang, and X. Shen, "Multiple drone-cell deployment analyses and optimization in drone assisted radio access networks," IEEE Access, vol.6, pp.12518–12529, Feb. 2018.
- [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方法の提案," DICO2013 シンポジウム, pp.964–969, 2013.
- [9] 木村裕太, 辻 広志, 巳波弘佳, "東日本震災時の実道網トポロジに基づく Virtual Segment 方式の性能評価," 信学技報, NS2011-233, March 2012.
- [10] D.B. Johnson and D.A. Maltz, "Dynamic source routing in ad hoc wireless networks," in Mobile Computing, edited by T. Imielinski and H. Korth, chapter 5, pp.153–181, Kluwer Academic Publisher, 1996.
- [11] J. Broch, D.A. Maltz, D.B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva, "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols," Proc. ACM/IEEE MOBICOM, pp.85–97, Oct. 1998.
- [12] C. Bettstetter, G. Resta, and P. Santi, "The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks," IEEE Trans. Mobile Comput., vol.2, no.3, pp.257–269, July–Sept. 2003.
- [13] 野波健蔵, "ドローン技術の現状と課題およびビジネス最前線," 情報管理, vol.59, no.11, pp.755–763, Feb. 2017.
(2019年4月22日受付, 7月31日再受付,
9月27日早期公開)



矢内 宏樹 (学生員)

平 30 名大・工・電気電子・情報工卒。現在同大学院博士前期課程在学中。無線ネットワークの研究に従事。IEEE 学生員。



岡田 啓 (正員：シニア会員)

平 7 名大・工・電子情報学科卒。平 9 同大大学院博士課程前期課程了。平 11 同大大学院博士課程後期課程了。工博。同年日本学術振興会特別研究員。平 12 名大・助手，平 18 新潟大・助教授，平 21 埼玉大・准教授，平 23 名大・准教授，現在に至る。無線通信システム，無線ネットワーク，車車間通信，可視光通信等の研究に従事。IEEE，ACM 各会員。平 8 電気・電子情報学術振興財団・猪瀬学術奨励賞，平 10 本会学術奨励賞，平 26 本会通信ソサイエティComEX Best Letter Award 受賞。



小林健太郎 (正員)

平 17 名大・工・電気電子情報工卒。平 19 同大大学院博士課程前期課程了。平 22 同大大学院博士課程後期課程了。博士(工学)。同年名大・助教，現在に至る。平 21 より平 22 まで日本学術振興会特別研究員。制御と通信のクロスレイヤ最適化，センサ・アクチュエータネットワーク，可視光通信等の研究に従事。情報処理学会，IEEE 各会員。平 22 本会モバイルマルチメディア通信研究専門委員会若手研究奨励賞，平 25 本会学術奨励賞，平 24，27，30 本会通信ソサイエティ活動功労賞，平 30 IEEE 名古屋支部若手奨励賞受賞。



片山 正昭 (正員：フェロー)

昭 56 阪大・工・通信卒。昭 61 同大学院博士課程了。工博。同年豊橋技術科学大助手。平元阪大・講師。平 4 名大・講師，平 5 助教授，平 13 教授。現在，名大・未来材料・システム研究所・教授(工学研究科電子情報システム専攻教授及びグリーンモビリティ連携研究センター教授兼務)。1995 年 10 月より 1996 年 4 月まで，名大工学部との学術交流協定により，米国ミシガン大学アンアールバ校工学部電気電子計算機科学科に滞在。制御と通信の融合，スマートコミュニティ実現のための通信技術の活用，可視光通信システム，電力線通信システム，宇宙システムのための無線通信，宇宙システムを活用した通信システム等の研究に従事。IEEE シニア会員。電子情報通信学会フェロー，同学会 2012 年度東海支部支部長，高信頼制御通信研究専門委員会委員長(前)，ワイドバンドシステム研究専門委員会副委員長(元)，ソフトウェア無線研究専門委員会副委員長(元)。昭 61 本会篠原記念学術奨励賞，平 11，13，18 本会通信ソサイエティ功労感謝状受賞。平 18 電波の日総務省東海総合通信局長表彰。平 24 IEEE Communication Society Technical Committee on Power Line Communications 2012 Outstanding Award 受賞。著書，「Power Line Communications (共著)」，「無線通信工学(編著)」，「電力線通信システム(監修)」等。