

ドローンを用いた無線リレーネットワークにおける反発率を導入した反発飛行

浅野 博之^{†a)} (学生員)

岡田 啓^{††} (正員：シニア会員)

ベンナイラ シャドリリア^{††}

片山 正昭^{††} (正員：フェロー)

Rebounding Flight with Rebounding Rate in a Wireless Relay Network Using Drones

Hiroyuki ASANO^{†a)}, Student Member, Hiraku OKADA^{††}, Senior Member, Chedlia BEN NAILA^{††}, Nonmember, and Masaaki KATAYAMA^{††}, Fellow

[†]名古屋大学工学部電気電子情報工学科, 名古屋市

Department of Electrical Engineering, Electronics, and Information Engineering, School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††}名古屋大学未来材料・システム研究所, 名古屋市

Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University, C3-1 (631), Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

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

DOI:10.14923/transcomj.2020JBL4004

あらまし 広域災害被災地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リレーネットワークを考える。ドローンの飛行モデルである反発飛行について、どの程度離れた位置を目的地とするかを定める反発率を導入し、反発率を変化させた場合の遅延特性を評価する。

キーワード ドローン, 臨時通信システム, 無線リレーネットワーク, 飛行モデル

1. まえがき

広域災害被災地では、地上の通信インフラの破壊や通信需要の増大による通信障害が想定される。それは、被害状況の把握や救助活動が遅れる一因となる。そこで、上空にドローンを用いた臨時通信システムを構築することを考える [1], [2]。地上で展開する臨時通信システムに比べて、上空のドローンは無人であり早く柔軟に展開することができる。

本研究では、広域災害被災地における臨時通信システムとして図 1 に示すようなドローンを用いた無線リレーネットワークを構築する。このリレーネットワークでは、ドローンが上空を移動しながら通信範囲内のドローン同士で情報を中継する遅延耐性ネットワーク (Delay Tolerant Network: DTN) [3] の考え方をを用いる。ドローンの移動時間が情報伝達の遅延時間に大きく影響するため、ドローンの移動を決定する飛行モデルが遅延時間を短縮する上で重要となる。そこで、本研究では、ドローンを用いた臨時通信システムの飛行モデルについて、情報が送信元から宛先に伝達するまでに

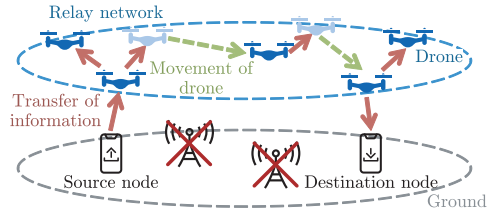


図 1 ドローンを用いた無線リレーネットワーク
Fig. 1 Wireless relay network using drones.

かかる遅延時間を短縮することを目指す。

ドローンを用いた臨時通信システムに関する先行研究 [2] では、ドローンの飛行モデルとして Random Waypoint (RWP), 反発飛行が検討されていた。反発飛行では、各ドローンは RWP に従って移動するが、他のドローンがお互いの通信範囲内に入った場合、位置情報を交換してドローン同士が反発する方向に目的地を決め直す。しかし、目的地決定方法にはランダム性があり、その有効性は示されていない。また、目的地到着後は他のドローンが通信範囲内に入るまでは RWP に従って移動するが、RWP 以外の飛行モデルの検討の余地がある。

そこで本研究では、反発飛行の目的地決定方法において反発位置からどの程度離れた位置を目的地とするかを決定する反発率を導入し、反発率がランダムである従来の反発飛行と比較検討する。また、反発飛行による動作がないときの飛行モデルとして RWP と Random Direction (RD) を用いた場合について比較検討する。シミュレーションにより、反発率を変化させた場合の遅延特性とドローンの台数に対する反発率の関係を検討する。

2. ドローンを用いた無線リレーネットワーク

ドローンを用いた無線リレーネットワークの構成を図 1 に示す。このネットワークは、送信元ノード、宛先ノード、複数のドローンで構成される。複数のドローンが被災地の上空を飛行することでネットワークを構築する。各ドローンは自身の通信範囲内に他のドローンがいる場合に情報を伝達する。一方、自身の通信範囲内に他のドローンがいない場合には、情報を保持したまま移動する。その後、通信範囲内に他のドローンが入ると情報を伝達する。

このような DTN により、継続的なネットワーク接続が不可能な場合でも広範囲に渡って情報伝達が可能となる。送信元ノードから宛先ノードまでに情報が伝達するまでの時間である情報伝達遅延時間は、主にド

ローンの移動時間による。本研究では、ドローンの台数が対象とする領域内で継続的なネットワーク接続が維持できるほど十分でない場合を想定し、伝達する情報はリアルタイム性の必要ないものを想定する。

3. 飛行モデル

本研究では、全てのドローンが自律的に動作することを仮定する。これは集中制御ではないことを意味しており、飛行中のドローンの故障や新しく飛行可能なドローンの整備によるシステム内で機能しているドローンの増減に対して有効である。また、RWP [4] と RD [5] について、簡単のためにドローンの移動速度を一定とし、目的地到着後は直ちに移動を再開する。なお、各ドローンは被災地である領域の範囲と自身の位置が分かるものとする。

RWP は、ドローンが対象領域内のランダムな位置を目的地として直線的に進む飛行モデルである。目的地に到着した後は、再び領域内のランダムな位置を目的地として直線的に進むことを繰り返す。RWP ではドローンが密集する時間があり均一に分布しない [5], [6]。RWP がランダムな位置であるのに対して、RD はドローンがランダムな方向の対象領域の境界を目的地として直線的に進むことを繰り返す飛行モデルである。RD は、比較的遠い目的地となり、RWP と比較してドローンはより均一に分布する。

4. 反発率を導入した反発飛行

反発飛行について、図 2 に示す。反発飛行は、ドローン同士が通信後、お互いに反発し合う方向に移動する飛行モデルである。ドローン同士が通信範囲内に入るとお互いの位置情報を交換した後、直線上の反発方向の点を新たな目的地として直線的に進む。反発方向の新たな目的地は、情報交換により得た相手の位置と自身の位置を結ぶ直線上の点として決定される。

先行研究では、直線上の反発方向のランダムな点を

新たな目的地としていた。しかし、反発方向にどの程度離れた位置を新たな目的地にするかによってドローンの移動が変わる。そこで本研究では、反発位置から対象領域の境界までの距離の割合を表す反発率 s ($0 \leq s \leq 1$) を導入する。反発率が小さいと目的地が反発位置に近い位置となり、反発率が大きいと目的地が反発位置からより離れた位置となる。 s が 1 のときは目的地が対象領域の境界上になる。

本研究では、反発飛行において目的地到着後に他のドローンが通信範囲内に入るまでにドローンが従う飛行モデルを基本飛行モデルと呼ぶ。ドローンは反発飛行による動作がない間は基本飛行モデルに従って移動する。先行研究では、基本飛行モデルを RWP としていた。本研究では、基本飛行モデルと反発率の関係を調べるために、基本飛行モデルを RD とした場合についても考える。

5. シミュレーション評価

5.1 シミュレーションモデル

シミュレーション諸元を表 1 に示す。反発飛行について基本飛行モデルを RWP と RD の 2 種類とし、反発率を変化させた場合についてシミュレーションを行う。本研究では、DTN のルーティングプロトコルとしてエピソードルーティング [7] を用いる。ただし、簡単のため各ドローンのバッファ容量は十分にあり、ホップ数の上限はないものとする。

シミュレーション範囲は $4000 \text{ [m]} \times 4000 \text{ [m]}$ の正方形とする。送信元と宛先ノードをそれぞれ領域全体に渡る一様分布に従いランダムに変化させて設置する。正方形領域内で、複数のドローンが飛行モデルに従い上空の水平面上を移動しながら送信元から宛先まで情報を中継する。ここで、ドローンは一定速度 10 [m/s] で移動する。また、送信元・宛先とドローン、及びドローン間の通信範囲を水平面上で半径を 500 [m] とする円内とし、通信範囲内での通信は瞬時に行われる。

5.2 反発率の影響と最適反発率

各飛行モデルに従った場合の送信元から宛先に情報

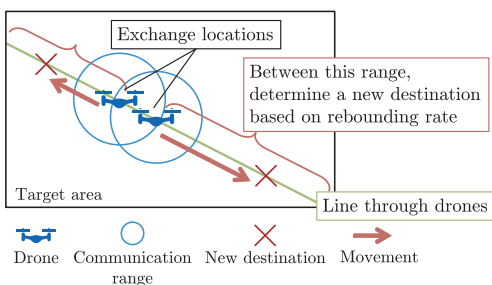
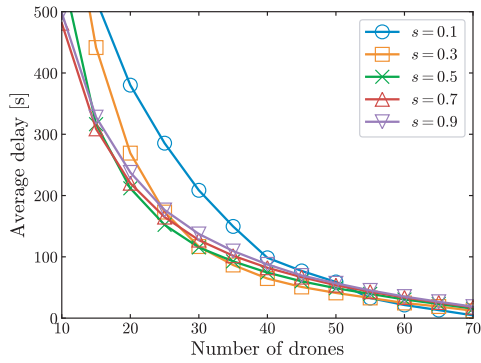


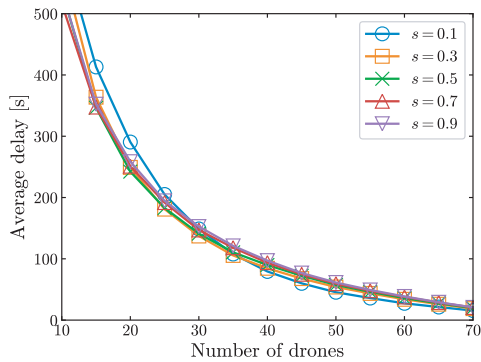
図 2 反発飛行
Fig. 2 Rebounding flight.

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

Simulation area	4000 m × 4000 m
Radius of communication range of drone	500 m
Movement speed of drone	10 m/s
Location of source node	Uniform distribution
Location of destination node	Uniform distribution
Number of simulations	10000 times



(a) Base flight is RWP.



(b) Base flight is RD.

図3 反発率を変えた場合の反発飛行の平均遅延時間

Fig. 3 Average delay of the rebounding flight as a parameter of a rebounding rate.

が届くまでの時間である情報伝達遅延時間の平均について、基本飛行モデルがRWPの場合を図3(a)に、RDの場合を図3(b)に示す。両者について、一定のドローンの台数において反発率が変わると遅延時間が変化することが分かる。

図3(a)の基本飛行モデルがRWPの場合について、ドローンの台数が55台あたりを境にドローンが多い場合には反発率が小さいほど遅延時間が小さい。ドローンが多い場合は、反発方向へ向かって遠い位置を目的地とするよりも、近い位置を目的地としたほうが遅延を短縮できる。一方、ドローンの台数が減少していくと、反発率が小さいほど遅延時間が小さくなるとは限らない。以上のような遅延特性は、基本飛行モデルがRDの場合についてもドローンの台数が35台あたりを境にして同様である。

そこで、各ドローンの台数において平均情報伝達遅延時間が最小となる反発率である最適反発率を考える。

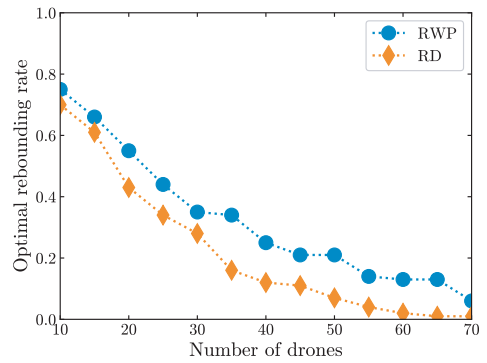
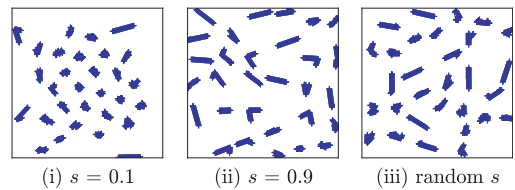
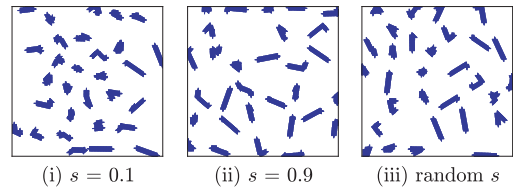


図4 ドローンの台数と最適反発率の関係

Fig. 4 The relationship between the number of drones and the optimal rebounding rate.



(a) Base flight is RWP.



(b) Base flight is RD.

図5 反発飛行の飛行軌跡

Fig. 5 Trajectory of the rebounding flight.

ドローンの台数と最適反発率の関係を図4に示す。基本飛行モデルがRWPとRDの場合について、ドローンの台数が減少するにつれて最適反発率が大きくなっている。ドローンの台数が少ないほど、反発方向へ向かって遠い位置を目的地としたほうが遅延を短縮できる。同じドローンの台数において、基本飛行モデルがRWPとRDの場合で最適反発率に差が生じるのは、3.で述べたRWPとRDでの分布の特性の違いが原因だと考えられる。

ドローンの台数が30台の場合の反発飛行の60秒間のドローンの飛行軌跡について、基本飛行モデルがRWPの場合を図5(a)に、RDの場合を図5(b)に示す。両者について、反発率が0.1のときは各ドローンの移動距離が短く、中心付近に密集したような分布となる。

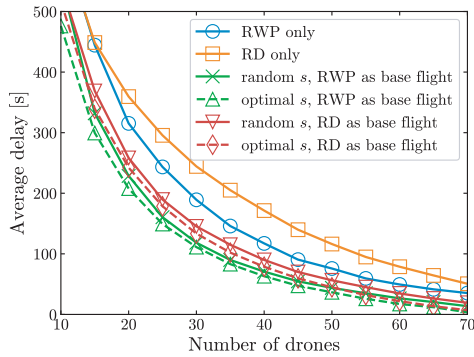
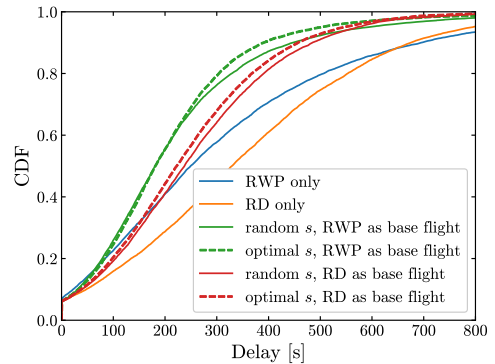


図6 最適反発率による反発飛行の平均遅延時間
Fig. 6 Average delay of the rebounding flight with optimal rebounding rates.

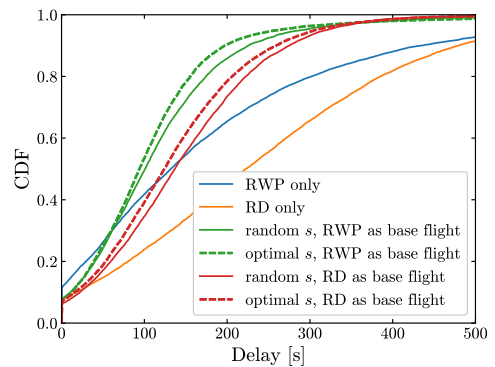
一方、反発率が0.9のときは各ドローンの移動距離が長く、領域全体に均一に分散したような分布となる。反発率がランダムなときはそれらの中間の具合の分布となる。反発方向の目的地までの距離を決定する反発率が、ドローンの一定時間の移動距離として反映されている。ドローンの台数が多い場合は、各ドローンの移動距離が短い方が遅延を短縮できる。一方、ドローンの台数が少ない場合は、ドローンが領域全体に分布し移動距離が長い方が遅延を短縮できる。

図6に最適反発率を用いた場合、ランダムに目的地を決める先行研究の場合、及び反発飛行を用いない場合の特性を示す。反発飛行について、反発率が最適反発率である場合は、反発率がランダムな場合よりも常に遅延が小さくなっている。ドローンの台数に応じて反発率を変えることで、従来のランダムな反発率による反発飛行よりも低遅延なネットワークを構成できることが分かる。また、その場合に基本飛行モデルがRDの場合よりもRWPの場合の方が低遅延となる。

図7にドローンの台数が20台、30台の場合の遅延時間の累積分布を示す。どちらの場合でも反発率がランダムの場合と比べ最適な反発率を用いることで遅延が大きい情報の伝達遅延を小さく抑えられていることが分かる。一般に、送信元と宛先ノードの位置が離れているほど遅延は大きくなるため、このような位置関係において最適な反発率を用いる効果が大いと言える。ドローンの台数が20台の場合と30台の場合を比べると、ドローンの台数が20台の場合の方がより遅延が大きい場合にのみ最適な反発率を用いる効果が表れている。ドローンの台数が少ない場合は最適な反発率が大きくなることでドローンが領域全体に分布する



(a) 20 drones.



(b) 30 drones.

図7 最適反発率による反発飛行の遅延時間累積分布
Fig. 7 Cumulative distribution of delays of the rebounding flight with optimal rebounding rates.

ため、送信元と宛先ノードが離れている場合に特に有効である。

6. むすび

本研究では、広域災害被災地における臨時通信システムであるドローンを用いた無線リレーネットワークにおいて、反発飛行に反発率を導入し、基本飛行モデルとしてRWPとRDを用いて評価した。シミュレーション結果から、反発率を変えることで遅延時間が変化することが分かった。そして、ドローンの台数が少なくなると最適反発率が大きくなることが分かった。これは、ドローンの台数が少ない場合は多い場合よりも反発飛行による目的地を遠い位置にしたほうが低遅延なネットワークを構築できることを示している。従来の反発飛行に対して、ドローンの密度に応じた適切な反発率を設定することでネットワークの低遅延化を図ることができるため、有効であると考えられる。また、その場合に基本飛行モデルはRDよりもRWPが

低遅延となることを示した。

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。また、日頃熱心にご指導頂いた名古屋大学山里敬也教授に深く感謝する。

文 献

- [1] H. Okada, "An overview of aerial wireless relay networks for emergency communications during large-scale disasters," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E103-B, no.12, Dec. 2020. (to be published)
- [2] 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," *信学論 (B)*, vol.J103-B, no.2, pp.57–66, Feb. 2020.
- [3] K. Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged internets," *ACM SIGCOMM 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication*, pp.27–34, 2003.
- [4] J. Broch, D.A. Maltz, D.B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva, "A performance comparison of multihop wireless ad hoc network routing protocols," *ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.85–97, 1998.
- [5] E.M. Royer, P.M. Melliar-Smith, and L.E. Moser, "An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks," *IEEE Int. Conf. Commun.*, pp.857–861, 2001.
- [6] 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 2003.
- [7] A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks," *Technical Report*, Duke University, 2000.

(2020年6月29日受付, 7月23日再受付,
8月7日早期公開)