

令和 5 年 5 月 28 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04392

研究課題名(和文) ドローンを用いた大規模災害時臨時無線ネットワークにおける情報伝送の低遅延化

研究課題名(英文) Low latency information transmission in emergency communication systems using drones during a large-scale disaster

研究代表者

岡田 啓 (Okada, Hiraku)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

研究者番号：50324463

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では大規模災害時における臨時通信システムとして、ドローンを用いて臨時無線ネットワークを構築することを目指す。本システムにおいて、より少ないドローンによる情報伝送の低遅延化を図ることを目的とする。これを達成するために、(1)低遅延化を図るための飛行パターン、(2)バッテリー切れによるドローンの離脱が遅延特性に与える影響、(3)ドローンが飛行することによる機体の傾きが通信路に与える影響という三つの課題について検討した。飛行パターンとして反発飛行と共用飛行経路を導入することで、ドローンを用いた大規模災害時臨時無線ネットワークにおける情報伝送の低遅延化を達成することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではドローンの飛行パターンとして反発飛行と共用飛行経路を導入することで情報伝送の低遅延化を図る。どちらの飛行パターンも簡易な操作で実現できるものである。反発飛行ではランダムな移動を保ちつつ、通信範囲の重なりを避け、ドローンを被災地域全体に均一に飛ばすことができる。共用飛行経路により、情報を一旦集約することができ、送信元から宛先への情報伝送の高効率化を図ることができる。これらの点に本研究の創造性がある。さらに、バッテリー切れによるドローンの離脱や、飛行による機体の傾きを考慮することはドローンを用いるために生じる独特な課題であり、ここに本研究の学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：This study aims to construct a temporary wireless network using drones as an emergency communication system for large-scale disasters. The purpose of this study is to reduce the latency of information transmission using fewer drones in this system. To achieve this, we investigated three issues: (1) flight patterns to achieve low latency, (2) the effect of drone drops due to battery failures on latency performances, and (3) the effect of drone flight on the communication channel due to the tilt of the aircraft. By introducing rebounding flight and common flight paths as flight patterns, we were able to achieve low-latency information transmission in the emergency communication systems using drones for large-scale disasters.

研究分野：無線通信システム

キーワード：大規模災害 臨時無線ネットワーク ドローン

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災などの大規模災害時には、安否情報や被災状況の把握などのために通信手段の確保が重要となる。しかし、通信インフラの破壊、通信施設の機能停止、通信需要増大によるネットワークの混雑などにより通信障害が発生することが想定される。そこで、通信障害発生時における通信手段確保のため、臨時通信システムの構築が求められている。本研究では、大規模災害時における臨時通信システムとして、ドローンを用いて臨時無線ネットワークを構築することを目指す。

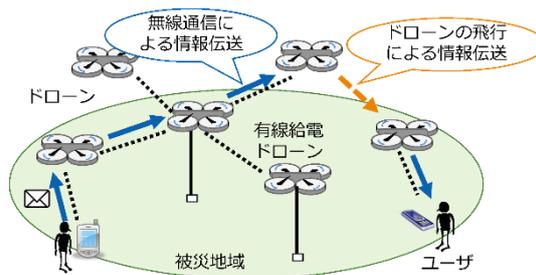


図1 ドローンを用いた臨時無線ネットワーク

ドローンを用いた臨時無線ネットワークでは、上空を飛行する複数台のドローンにより無線ネットワークを構築することで、地上にいるユーザ端末を収容する(図1)。送信元となるユーザ端末から送信された情報は、この無線ネットワークを経て宛先となるユーザ端末や災害対策本部に設置されたサーバなどへ伝送される。このように上空にネットワークを構築することで、ドローン間やドローンとユーザ端末間の見通しを確保し、無線通信路の安定化を図ることができる。しかし、大規模災害時にはドローンの台数を十分に確保できない可能性がある。ドローン間の通信可能距離には制限があるため、少ない台数のドローンで被災地域をカバーしようとすると、ドローン間の距離がこの制限を超えてしまい、ネットワークが途切れてしまうことがある。このとき、途絶耐性ネットワーク(Disruption-Tolerant Networking: DTN)で用いられている技術を導入することで、ドローンがお互いに接続されていなくても、ドローンが飛行することで他のドローンへ情報を中継し、宛先まで情報を伝送する。

ドローンを用いた臨時無線ネットワークを構築するための課題として、以下の四つが挙げられる。一つ目の課題は少数のドローンによる低遅延な無線ネットワークの実現である。DTNを導入した無線ネットワークでは、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、ドローンが飛行して情報を伝送するため、無線による伝送と比べると遅延時間が長くなる。これは、ドローンの台数が少なければ少ない程、ドローンの飛行により情報が伝送される距離が長くなり、遅延時間も増大する。そのため、より少ないドローンの台数でどのように遅延時間を短くするのが重要な課題である。二つ目の課題は簡単な設定のみで無線ネットワークを構築できることが望ましい点である。これは、大規模災害時における臨時通信システムということを考えると、必ずしも専門的な知識を持った人が被災地域に居るとは限らないためである。三つ目の課題はバッテリー切れによるドローンの離脱である。ドローンは通常バッテリーにより動作し、飛行可能時間は20分程度である。そのため、ドローンはバッテリーが切れた場合、バッテリーを交換するために一旦離脱することになる。ドローンの離脱が起こっても、ネットワークの分断による遅延時間の増加を抑えることが求められる。四つ目の課題は無線通信路のモデル化である。ドローンに搭載される無線通信のアンテナは、任意のドローン間で通信ができるように水平方向には無指向性のアンテナが用いられるが、垂直方向には指向性を有することになる。ドローンは移動するとき、機体を傾けて飛行する。また、風の影響により揺れることも想定される。この場合、垂直方向の指向性により、受信信号電力に変動が生じる。この影響を考慮して無線ネットワークを構築することが重要であり、そのためには通信路のモデル化が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、ドローンを用いた臨時無線ネットワークにおいて、上記四つの課題に取り組むことで、より少ないドローンによる情報伝送の低遅延化を図ることを目的とする。

この目的を達成するために、(1)低遅延化を図るための飛行パターンについて検討する。簡単な設定のみで動作することが望ましいため、すべてのまたは一部のドローンはランダムに移動することを基本とする。そして、飛行パターンとして、反発飛行と共用飛行経路の導入を提案す

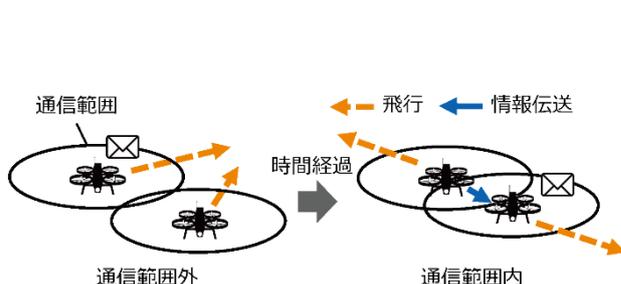


図2 反発飛行

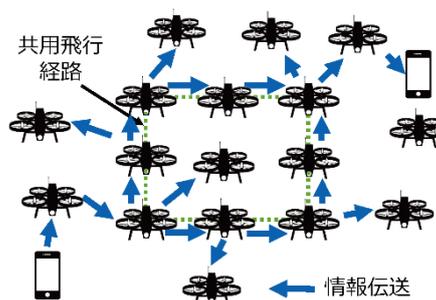


図3 共用飛行経路

る。複数のドローンが重複した場所を飛ぶことを避けるために、反発飛行では各ドローンが互いに通信範囲が重なった場合、それぞれ反発し合うように移動する (図 2)。共用飛行経路は複数のドローンが共用して飛ぶある決められた経路であり、これを導入することで、常時、共用経路上に無線ネットワークが分断されずに構築される (図 3)。共用飛行経路上のドローンは移動する必要がないため有線給電ドローンを用いることもできる。この場合、バッテリー切れによるドローンの離脱が生じない。これにより、情報を一旦共用飛行経路上のドローンに集約することができ、送信元から宛先への情報伝送を効率的に行うことができる。さらに、ドローンはバッテリーで動作しており長時間飛び続けることができないため、(2)バッテリー切れによるドローンの離脱を考慮して上記二つの飛行パターンについて検討する。また、(3)ドローンが飛行することによる機体の傾きを考慮して、通信路のモデル化を行う。この通信路モデルを用いて遅延時間の再評価を行うとともに、機体の傾きを考慮したドローンの飛行パターンについて検討する。

3. 研究の方法

(1) 低遅延化を図るための飛行パターンについての検討では、反発飛行および共用飛行経路を導入した無線ネットワークの遅延特性を計算機シミュレーションにより評価する。さらにボロノイ分割を利用した新たな飛行パターンを提案する。

(2) バッテリー切れによるドローンの離脱を考慮した飛行パターンについては、考案した飛行パターンを計算機シミュレーションにより評価することで、遅延時間の増加を抑えることができることを示す。

(3) ドローンが飛行することによる機体の傾きが通信路に与える影響をモデル化する。理論的な検討によるモデル化とともに、ドローンを実際に飛ばして機体の傾きと受信信号電力の変動を測定することで、通信路モデルの妥当性を明らかにする。そして、モデル化した通信路を用いて機体の傾きを考慮した遅延特性を評価する。

4. 研究成果

(1) 低遅延化を図るための飛行パターンとして反発飛行と共用飛行経路を提案し、計算機シミュレーションによりその性能を明らかにした。まずは共用飛行経路の大きさについて検討し、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った (図 4)。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った。また、反発飛行における平均情報伝送遅延時間を求めた (図 5)。その結果、反発飛行を導入することで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することで遅延時間を短縮できるのを示した。

さらに、低遅延化を図るための飛行パターンとしてボロノイ分割を利用した新たな飛行パターンを提案した。これは、複数のドローンとの情報交換を通して複数の位置情報を同時に利用して目的地を決める。対象となる領域でドローンの密度が大きいほどドローンは多くの他のドローンの位置情報を知る機会が増え、それら複数の位置情報を考慮した移動をすることで遅延をより小さくできる。また、ドローンの予測位置に対して重みを設定する重み付きボロノイ領域を用いることも提案している。提案飛行パターンでは重みの減衰方法や持続時間を変化させることで、従来の飛行モデルとは異なりドローンの領域内での分布や移動具合を変化させることができる。それにより、従来の飛行モデルに対してネットワーク

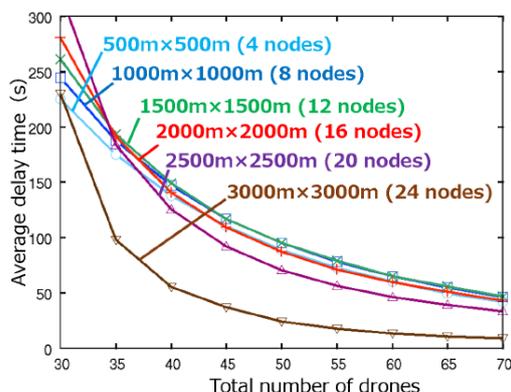


図 4 共用飛行経路の遅延特性^①

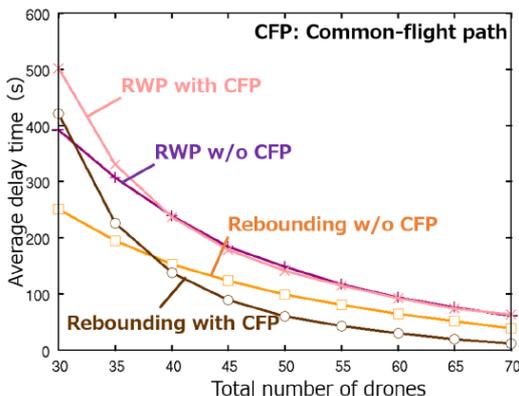


図 5 各飛行パターンの遅延特性^①

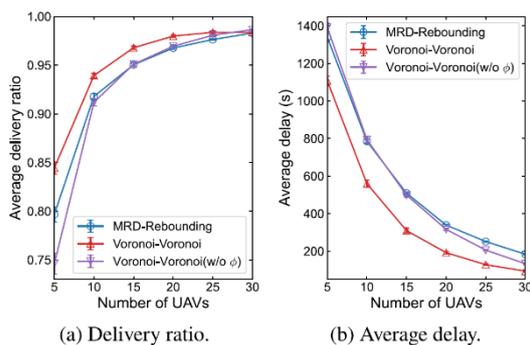


図 6 ボロノイ領域を用いた飛行パターンの特性^②

の遅延を短縮することができるのを示した (図 6)。

(2) バッテリ切れによるドローンの離脱を考慮して遅延時間を評価した (図 7)。ドローンの離脱を考慮することで遅延時間は増加する。しかし、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。この動作により反発飛行の方が離脱による遅延特性への影響が小さくなることが分かった。

さらに、バッテリ切れによるドローンの離脱を考慮した飛行パターンとして、ドローンの位置分布推定を用いた飛行パターンを提案した。この提案手法はドローンの台数が少ない場合において、低遅延化を図ることができたものの、逆にドローンの台数が多い場合は遅延時間が増加した。本研究は災害時を想定しておりできるだけ少ない台数でネットワークを構築したいため、提案手法に有用性があると考えられる。

(3) ドローンが飛行することによる機体の傾きが通信路に与える影響を考慮するために、ドローン移動時の速度と傾きの関係について運動方程式を用いてモデル化した。この速度と傾きの関係を用いて移動時の傾きを考慮したドローン間の受信電力をモデル化した。そして、このモデルを用いて移動時の傾きが与える影響を、ドローンの移動速度と台数をパラメータとしてシミュレーションにより評価した (図 8)。この結果、最も低遅延となるドローンの速度はドローンの台数に依存するということが分かった。

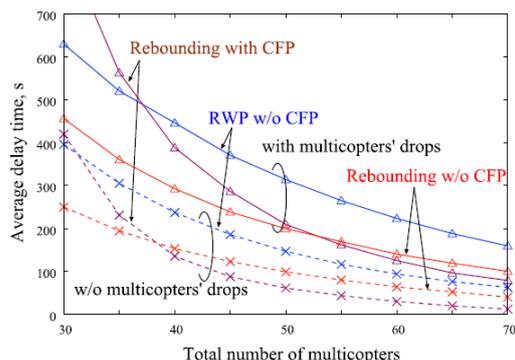


図 7 バッテリ切れを考慮した遅延特性^③

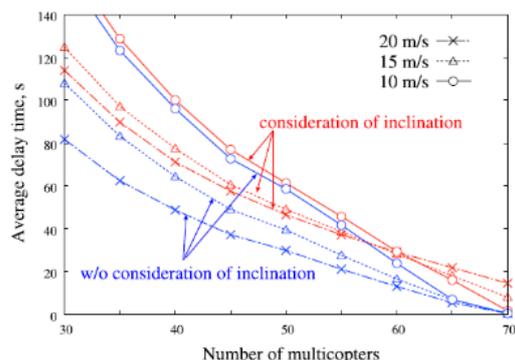


図 8 機体の傾きを考慮した遅延特性^③

<引用文献>

①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.
 ②H. Asano, H. Okada, C. Ben Naila, M. Katayama, “Voronoi-based UAV flight method for non-uniform user distribution in delay-tolerant aerial networks,” IEICE Trans. Commun., vol.E105-B, no.11, pp.1414-1423, Nov. 2022.
 ③H. Okada, “An overview of aerial wireless relay networks for emergency communications during large-scale disasters,” IEICE Trans. Commun., vol.E103-B, no.12, pp.1376-1384, Dec. 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Asano Hiroyuki, Okada Hiraku, Naila Chedlia Ben, Katayama Masaaki	4. 巻 E106-B
2. 論文標題 Communication-Aware Flight Algorithms for UAV-Based Delay-Tolerant Networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.2023EBP3029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 ASANO Hiroyuki, OKADA Hiraku, BEN NAILA Chedlia, KATAYAMA Masaaki	4. 巻 E105.B
2. 論文標題 Voronoi-Based UAV Flight Method for Non-Uniform User Distribution in Delay-Tolerant Aerial Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 1414 ~ 1423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.2022EBP3017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Asano Hiroyuki, Okada Hiraku, Naila Chedlia Ben, Katayama Masaaki	4. 巻 9
2. 論文標題 Flight Model Using Voronoi Tessellation for a Delay-Tolerant Wireless Relay Network Using Drones	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 13064 ~ 13075
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3051913	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 浅野 博之、岡田 啓、ベンナイラ シャドリヤ、片山 正昭	4. 巻 J103-B
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 679 ~ 683
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2020JBL4004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 OKADA Hiraku	4. 巻 E103.B
2. 論文標題 An Overview of Aerial Wireless Relay Networks for Emergency Communications during Large-Scale Disasters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 1376 ~ 1384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.2020SEI0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 矢内 宏樹、岡田 啓、小林 健太郎、片山 正昭	4. 巻 J103-B
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 57 ~ 66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2019GTP0015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 H. Asano, H. Okada, C. Ben Naila, M. Katayama
2. 発表標題 Communication-aware flight algorithm for UAVs in delay-tolerant aerial networks
3. 学会等名 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浅野博之、岡田啓、ベンナイラシャドリヤ、片山正昭
2. 発表標題 都市環境におけるLoS伝搬を考慮したUAVの最適配置
3. 学会等名 革新的無線通信技術に関する横断型研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅野博之, 岡田啓, ベンナイラシャドリア, 片山正昭
2. 発表標題 デジタルサイネージ搭載ドローンによる広告に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田啓
2. 発表標題 [招待講演] 広域災害時におけるドローンを用いた臨時無線ネットワーク ~ 情報伝送の低遅延化を図る飛行方式 ~
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅野博之, 岡田啓, ベンナイラシャドリア, 片山正昭
2. 発表標題 都市環境におけるLoS伝搬を考慮した複数UAV配置
3. 学会等名 電子情報通信学会センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浅野博之, 岡田啓, ベンナイラシャドリア, 片山正昭
2. 発表標題 ドローンを用いた災害時向け遅延耐性ネットワークのための粒子群最適化に基づく移動方式
3. 学会等名 電子情報通信学会センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野博之, 岡田啓, ベンナイラシャドリア, 片山正昭
2. 発表標題 ドローンを用いた遅延耐性ネットワークのための粒子群最適化に基づく移動方式の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会革新的無線通信技術に関する横断型研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野博之, 岡田啓, ベンナイラシャドリア, 片山正昭
2. 発表標題 ドローンを用いた無線リレーネットワークにおける不均一なユーザ分布を考慮した飛行方式
3. 学会等名 電子情報通信学会センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Asano, H. Okada, C. Ben Naila, M. Katayama
2. 発表標題 A Voronoi-Based Flight Method of UAVs in Delay-Tolerant Aerial Networks
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Okada
2. 発表標題 Emergency Communication Systems during Large-Scale Disasters
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Asano, H. Okada, C. Ben Naila, M. Katayama
2. 発表標題 A UAV Flight Method for Non-Uniform User Distributions in Aerial Wireless Relay Networks
3. 学会等名 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅野博之, 岡田啓, ベンナイラシャドリヤ, 片山正昭
2. 発表標題 ドローンを用いたリレーネットワークにおける被覆制御に注目した飛行モデルの一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 通信ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野博之, 岡田啓, ベンナイラシャドリヤ, 片山正昭
2. 発表標題 広域災害被災地におけるドローンを用いた無線リレーネットワーク ~ ボロノイ分割を利用した飛行モデルの一検討 ~
3. 学会等名 電子情報通信学会 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Okada, J. Suzuki, H. Yanai, K. Kobayashi, M. Katayama
2. 発表標題 Inclination of Flying Drones in Aerial Wireless Relay Networks
3. 学会等名 IEEE VTC2019-Fall Workshops on Swarm Intelligence: Autonomous and Connected Unmanned Aircraft Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木丈, 矢内宏樹, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭
2. 発表標題 ドローンを用いた災害時臨時通信システムにおける飛行時の傾きが伝送遅延に与える影響の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田啓
2. 発表標題 [招待講演] 大規模災害時における臨時通信システムとしてのドローン/気球無線ネットワーク
3. 学会等名 電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田啓
2. 発表標題 [招待講演] 大規模災害時における臨時通信システムとしてのドローン無線メッシュネットワーク
3. 学会等名 電子情報通信学会 短距離無線通信研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田啓
2. 発表標題 [依頼講演] 大規模災害時臨時通信システムのためのUAVを用いた無線ネットワーク
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢内宏樹, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭
2. 発表標題 大規模災害被災地におけるドローンを用いた臨時通信システム ~ ドローンの位置分布推定を用いた飛行モデルの一検討 ~
3. 学会等名 電子情報通信学会 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関