

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19779

研究課題名（和文）災害対応を支援するUAVネットワークとMEC技術の高度融合に関する研究開発

研究課題名（英文）Advanced Integration of UAV Networks and MEC Technology to Support Disaster Response

研究代表者

川本 雄一（KAWAMOTO, Yuichi）

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：30778783

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究開発では、大規模災害時等の通信インフラが利用不可能な状況において、無人航空機（UAV: Unmanned Aerial Vehicle）ネットワーク及びモバイルエッジコンピューティング（MEC: Mobile Edge Computing）技術の融合により、高度な災害対応アプリケーションの利用環境を提供可能な自律分散通信プラットフォームを構築するための基盤技術創出を目的とした。この実現のために、処理負荷の分散によるシステムの低遅延化手法とUAVの位置と資源割当を最適化する干渉回避手法を提案した。また、コンピュータシミュレーションによる動作検証を行い、提案手法の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

UAVネットワークとMECの融合に関する研究は世界的にも非常に新規的なものであり、かつこれに対して自律分散制御によるアプローチを試みる点は他の研究には見られない本研究独自の取り組みである。特に本研究で取り組む、通信・計算資源の割当とUAVの配置・移動制御によるネットワーク構築を統合的に検討し、ユーザ要求に対して最適化するという点は学術的にも新規的な部分が多い。このような試みはこれまでにない世界で初のものであり、将来の新たな高度情報社会を実現するUAVネットワークの創造が期待される。

研究成果の概要（英文）：The goal of this research is to create the basic technology to build an autonomous distributed communication platform that can provide an environment for advanced disaster response applications in situations where communication infrastructure is unavailable, such as in a large-scale disaster, by integrating Unmanned Aerial Vehicle (UAV) networks and Mobile Edge Computing (MEC) technology. To achieve this, we proposed a method to reduce system latency by distributing the processing load and a method to optimize the location of UAVs and resource allocation by avoiding interference. The effectiveness of the proposed method was verified by computer simulation.

研究分野：総合領域

キーワード：無線通信 無人航空機 エッジコンピューティング

1. 研究開始当初の背景

近年、モノのインターネット (IoT: Internet of Things) は我々の生活に浸透しつつあり、今後もその数は増加すると見込まれている。IoT は高度道路交通システムやスマートシティといった生活を支えるシステムに組み込まれるが、これらのシステムの実行には画像処理や動画処理といった高度なアプリケーションのために知的データ処理が必要である。つまり、IoT にはそのための知的データ処理の実行が求められている。しかし、IoT は小さいものが多くストレージ容量やバッテリーの制限があり、処理能力には限界が存在するため、モバイルエッジコンピューティング (MEC: Mobile Edge Computing) という技術が注目されている。MEC では、ユーザにおいて発生したデータ処理の要求は近くのエッジサーバに委託され、IoT においてデータ処理を行う必要がなくなる。したがって、サービスの低遅延化と IoT の低消費電力化が期待されている。一方、近年多発する豪雨や台風、大地震等による大規模災害発生時においては、建物の損壊、津波、土砂崩れやそれに伴い発生する停電等の影響により、既存の通信インフラは利用が停止もしくは制限される状況が多く、臨時に構築されるネットワーク回線も容量は限られる。そのため災害時にこれらのサービスを実現するための多量のデータをクラウドや特定箇所に用意するサーバまで収集することは難しい。そこで本研究では、災害時という資源が限られかつ状況に応じた柔軟な対応が必要とされる環境においても有用であるアプローチとして、簡易なサーバ機能を搭載した無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) の活用について注目する。

UAV と MEC を組み合わせたシステムを利用することによって、インフラストラクチャが存在しない環境においても地上ユーザに対して空から通信資源と計算資源の提供が可能である。地上のユーザにおいて発生したタスクは通信によって UAV に搭載されたエッジサーバにオフロードされて、エッジサーバにて処理される。その後処理結果を UAV からユーザに伝達することで、地上ユーザは計算資源を獲得することと同等の効果を得ることができる。しかし、UAV に搭載可能なエッジサーバの処理能力には限りがあるため、地上ユーザの分布の偏りから処理負荷が集中してしまうサーバが発生してしまう恐れがある。したがって、処理負荷の集中によって遅延時間が増加してしまう課題が存在する。これはタスクが UAV に搭載されているエッジサーバにオフロードされた直後に演算処理は行われず、まずサーバキューに格納され、演算処理の待ち時間が発生してしまうことが原因である。またさらに、タスクや演算処理結果が受ける上空における遅延の増加と UAV の高い移動性によって、UAV とユーザが通信不可能な距離関係になってしまう可能性がある。そして演算処理中に UAV とユーザが通信不可能になった場合、ユーザは処理結果を受け取ることが出来ず資源提供に失敗してしまう。このように処理負荷の集中に伴う課題が多く存在するため、それらの課題を考慮したシステムを構築することは非常に重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は災害時において UAV ネットワーク及び MEC 技術を利用して効率的なデータ通信及び演算処理を実現し、低遅延かつ低消費電力にて高度なアプリケーションを提供可能な通信プラットフォームを構築することである。この目的を達成するために、以下の2点に焦点を当て課題解決のための手法を提案する。

(1) UAV-mounted Cloudlet システムにおける低遅延化のためのリレー制御手法

UAV と MEC を融合させたシステムには、処理負荷の集中による遅延時間の増大とそれに伴う資源提供の不安定性という課題がある。そこで特定のエッジサーバに集中している処理負荷を分散させシステム全体を低遅延化させる手法を提案する。

(2) C-OFDMA を使用する UAV ネットワークにおける UAV の位置と資源割当の最適化手法

端末数や通信要求の増大が予測される環境において、UAV の機体位置を制御するだけでは同一チャネル間干渉を十分に回避することができず、スループットが低下する課題がある。そこで干渉回避により端末のスループットを向上させる手法を提案する。

上記のアプローチによって、今後普及が予想される UAV を利用した画期的な通信プラットフォーム構築に貢献することを目指す。

3. 研究の方法

(1) UAV-mounted Cloudlet システムにおける低遅延化のためのリレー制御手法

UAV にエッジサーバを搭載して通信資源と計算資源を提供するシステムを UAV-mounted Cloudlet システムという。本想定システムは、ユーザ端末と UAV、UAV に搭載されているエッジサーバによって構成されている。地上に通信資源や計算資源は存在せず、また中央制御局も存在しない。そのため、ユーザ端末にて発生したユーザタスクは必ず本システム内で処理されると想定する。また、本研究では複数 UAV による資源提供を想定しており、UAV 間のリレー通信を用いることでタスク処理の負荷の分散が可能である。本想定システムにおける課題は、ワークロードバランスによる遅延時間の増加とハンドオーバーによるユーザへの資源提供の不安定性である。これらの課題を解決するために、処理負荷を分散してシステムの低遅延化を実現するリレー制御手法を提案する。

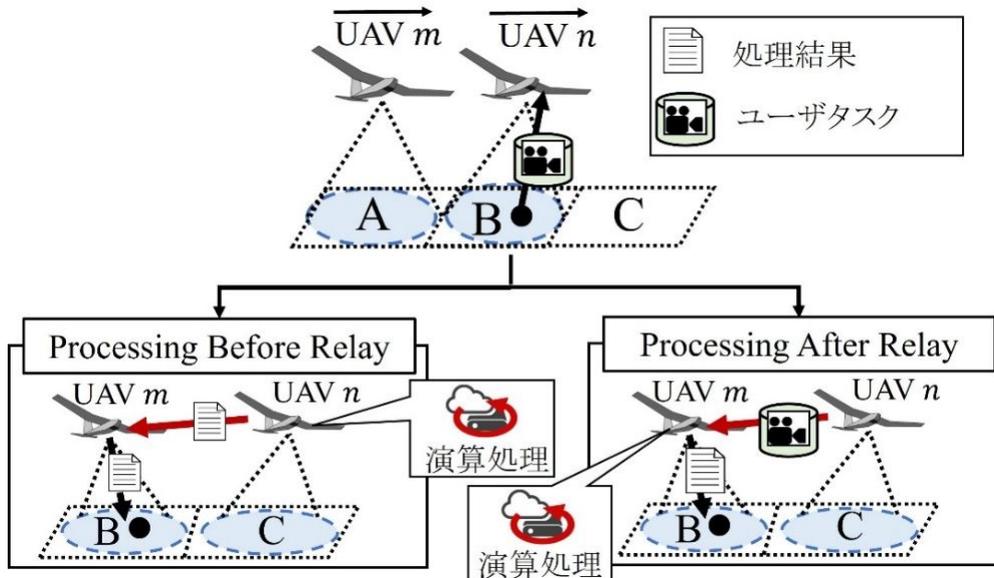


図 1: 提案する PBR 方式と PAR 方式の概要

提案手法では 2 つのリレー方式を提案し、それらのリレー方式を組み合わせることで処理負荷の分散とシステムの低遅延化を目指す。まず、2 つのリレー方式とは Processing Before Relay (PBR) と Processing After Relay (PAR) である。図 1 のように 2 台の UAV, n と m , そして 3 つのエリア A, B, C を想定し、これらのリレー方式を適用させたときの流れとその違いを説明する。最初のタイミングにおいて、UAV n と m はエリア B と A のユーザをそれぞれ收容し、2 台の UAV は追従するような状況を想定する。またこのときにエリア B 内のユーザはタスクが発生すると UAV n にタスクオフロードを行う。次のタイミングでは、UAV n と m はエリア C と B のユーザをそれぞれ收容しており、ユーザタスクの演算処理中にユーザに対してハンドオーバーが発生した場合、ユーザは処理結果を受け取ることができない。ここで PBR をこのハンドオーバーするユーザに対して適用した場合、UAV n にタスクオフロードされたタスクは UAV n に搭載されたエッジサーバにて演算処理が行われ、その後に処理結果が UAV n から UAV m に伝達される。そして UAV m からユーザに処理結果が伝達される。一方で PAR を適用した場合は、UAV n にタスクオフロードされたタスクはすぐに UAV m に伝達される。その後に、UAV m に搭載されたエッジサーバにて演算処理が行われ、処理結果が UAV m からユーザに伝達される。

PBR 方式と PAR 方式では優位な状況が異なるため、状況に応じて最適なリレー方式を選択する必要がある。図 1 における方式の説明において、PBR 方式では UAV m の通信範囲であるエリア B のユーザ数が多い場合やタスクのデータサイズが大きい場合に有効である。これは、サーバ n においてハンドオーバーするユーザのタスクを処理し、タスク過多なサーバ m にさらにタスクを増加させないためである。またタスクのデータサイズが大きい場合は、タスクをリレー通信するのではなく処理結果をリレーすることでリレー通信に要する遅延時間を小さくすることが可能なため PBR 方式が優位である。一方、PAR 方式では、UAV n の通信範囲 C 内のユーザ数が多い場合やタスクのデータサイズが小さい場合に有効である。これは、タスク過多なサーバ n のタスクをサーバ m に分配することが可能なためである。さらにタスクのデータサイズが小さい場合は、小さいリレー通信時間でワークロードバランスを等しくすることが可能なためである。このように 2 つの方式は有効的な状況が異なるため、優位な方式を選択する必要がある。

最適なリレー方式の選択のために選択方法の定式化を行う必要がある。提案手法では UAV n の全ユーザの集合を $PAR_{n,m}$, $PBR_{n,m}$, PWR_n に分けることでリレー方式の選択を定式化する。 $PAR_{n,m}$ とは、UAV n から UAV m に PAR を適用するユーザ集合で、 $PBR_{n,m}$ は UAV n から UAV m に PBR を適用するユーザ集合である。同様に PWR を適用するユーザ集合、つまり UAV n にタスクオフロードし演算処理と処理結果の送信も UAV n にて行われるユーザの集合を PWR_n とする。提案手法ではシステム全体の遅延が最小となるようなリレー方式を選択する。

(2) C-OFDMA を使用する UAV ネットワークにおける UAV の位置と資源割当の最適化手法

本研究では、C-OFDMA (Coordinated Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) で動作する無線 LAN 系ネットワークにおいて、UAV ネットワークにおける干渉回避に対処することを検討する。C-OFDMA は IEEE802.11be での利用が検討されている干渉回避方法のひとつである。IEEE802.11be は高速大容量で低遅延な通信を実現するための新しい通信規格であり、通信需要が高い UAV ネットワークにおける IEEE802.11be の使用想定は状況に適している。本手法では、XR (Extended Reality) を使用するイベント会場や工場などの状況を想定し、UAV ネットワークはその場所において増加した通信要求量に応えるために構築される。また、XR のデータを受け取る状況を想定し、UAV から端末へのダウンリンクの通信を考える。本論文において UAV は柔軟

なネットワーク構築が求められるため、長距離・長時間飛行が可能な固定翼 UAV ではなく、小回りが利きホバリングなどの空中制御に優れた回転翼 UAV の使用を想定する。UAV は複数台あり、AP (Access Point) を搭載している。各端末は近傍にある UAV の AP を介してネットワークに接続される。バックホール回線においては一部の AP のみ外部のインターネットと接続可能であり、UAV 間でマルチホップ通信を行うことによりインターネットと接続できるものと想定する。

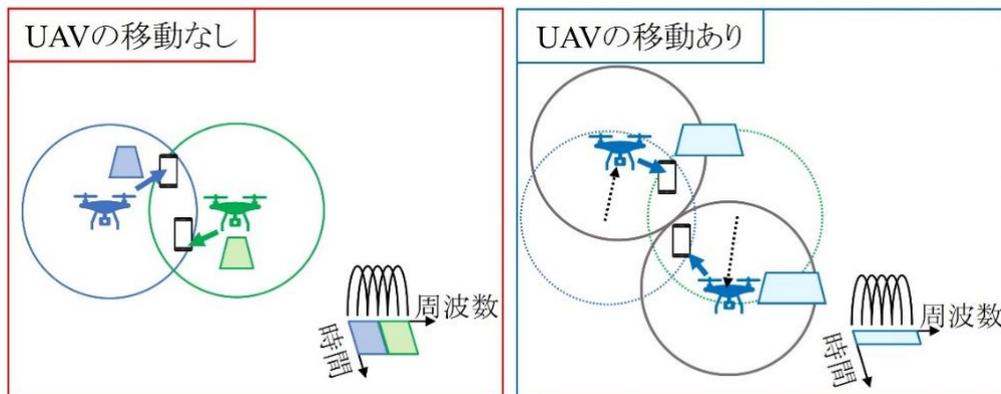


図 2：想定ネットワークにおける干渉回避

C-OFDMA は干渉回避に有効だが、端末が密集しているような干渉が多発する環境下では割り当てられる RU (Resource Unit) が小さくなり、スループットが低下する可能性が高い。これに対し、UAV ネットワークでは UAV の移動により干渉回避が可能である。図 2 に示すように UAV のカバレッジが重複している場合は異なる RU を使用することで干渉を回避する必要があるが、UAV を移動させることでカバレッジ範囲の重複を回避し、互いに干渉しない端末に対して同一の RU を割り当てることが可能になる。ただし、UAV の移動が成功する場合もあれば、元々干渉を受けていた端末の干渉回避に成功したとしても、新たに異なる端末が干渉を受ける可能性もある。特に端末が密集した状況では少し移動しただけで異なる端末へ干渉することが予測される。したがって、適切な UAV の位置決定とそれに合わせた RU 割当が必要になる。

UAV の移動と C-OFDMA による RU 割当に関連する値を定義し、構築した数理モデルを用いて C-OFDMA による RU 割当と UAV の位置を共同で最適化することでスループットの向上を目指す。C-OFDMA を使用する UAV ネットワークにおいてスループットは、UAV の位置、UAV に割り当てる帯域の選択、端末に割り当てる RU の選択の 3 つの要素で決定する。この 3 つの組み合わせそれぞれに対して各端末の通信路容量を導出し、全端末中で最小の通信路容量が最も向上する組み合わせを選択することでスループットの向上を目指す。

4. 研究成果

(1) UAV-mounted Cloudlet システムにおける低遅延化のためのリレー制御手法の評価

本性能評価における評価指標には、サービス遅延と、処理結果の受信に失敗するユーザの割合を用いている。また、2 つの比較手法を用いて、提案手法の有効性を示す。1 つ目の比較手法は、リレー通信をせず制御しない手法である。この比較手法では、ユーザタスクはオフロード先のサーバでのみ処理が行われるため、不均一な処理負荷の影響を大きく受けてしまう。2 つ目の比較手法は、処理遅延のみを考慮した手法である。この手法では、処理負荷は UAV 間で均一になるがその他の遅延の影響が考慮されていないため、システム全体の遅延が大きくなる恐れがある。これらの比較手法によって、提案手法のシステム全体の遅延を考慮した優位性が確認可能である。

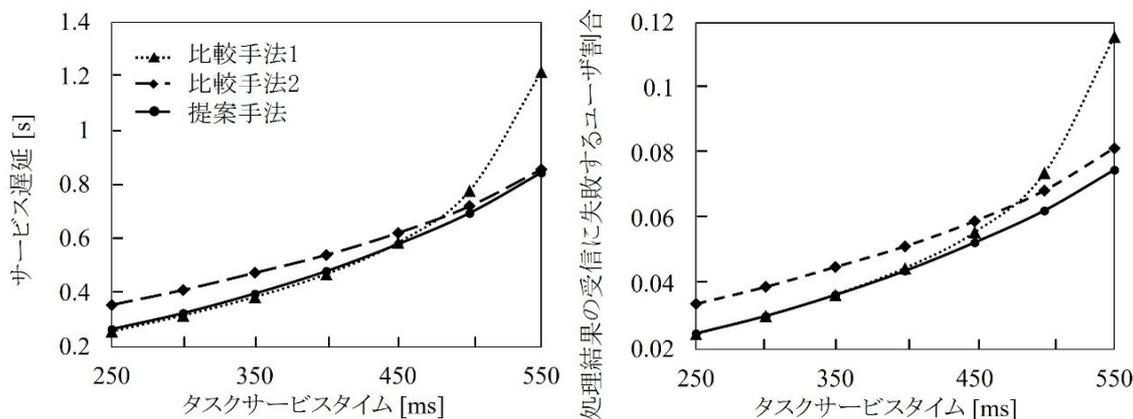


図 3：タスクサービスタイムが異なるときの評価結果

図3にタスクサービスタイムが評価指標に及ぼす影響の結果を示す。結果より、全てのタスクサービスタイムにおいて、提案手法が有効であることが分かった。タスクサービスタイムが小さいとき、提案手法は比較手法1に近似する。これは処理遅延が小さく、リレー通信によって処理負荷を均一にする必要性が小さいためである。一方でタスクサービスタイムが大きいたときは、提案手法は比較手法2に近似する。これは処理遅延が大きく、処理負荷を等しくする必要性が大きいためである。

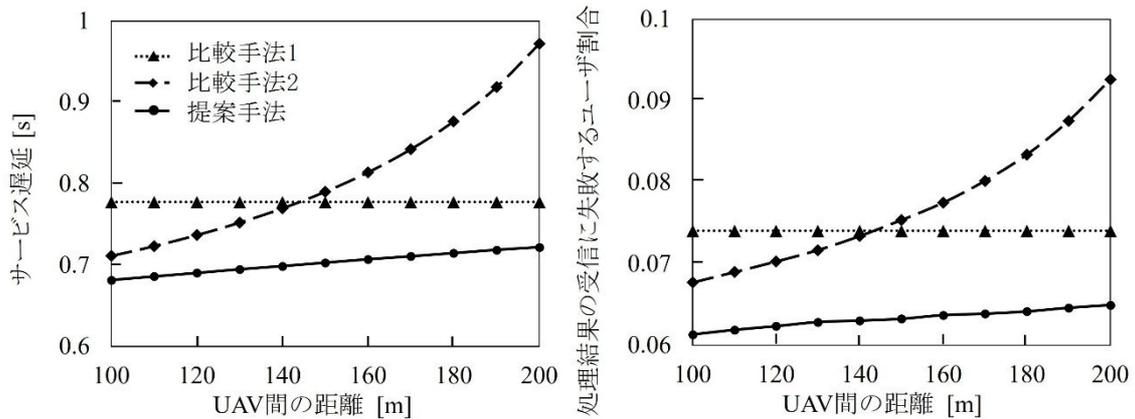


図4：UAV間の距離が異なる時の評価結果

図4に2台のUAVの初期位置間の距離が評価指標に及ぼす影響の結果を示す。比較手法1はリレー通信を行わないため、距離に依らず常に一定であった。一方で比較手法2では、距離が増加するとUAV間のスループットの減少によりリレー遅延が増加した。またさらに、UAV2とUAV1が収容するユーザとの距離も増加するため保有遅延も増加し、結果としてサービス遅延が急激に増加した。したがって2台の距離間が小さいときは比較手法2の方が優位であるが、距離が大きいたときは比較手法1の方が優位である。また提案手法は最適なりレー方式を選択しているため、どのような距離でも提案手法は比較手法より有効である。

(2) C-OFDMAを使用するUAVネットワークにおけるUAVの位置と資源割当の最適化手法の評価

本性能評価では、2つの比較手法を用いてエリアサイズを変えた場合の提案手法の有効性を確認する。1つ目の比較手法は各端末に均等な大きさのRUを割り当ててUAVの位置のみ最適化する手法である。2つ目の手法はUAVを初期位置から動かさず、C-OFDMAのみ最適化する手法である。これらの比較手法により、UAVの位置とC-OFDMAによるRU割当を共同で最適化する提案手法の有効性を確認する。

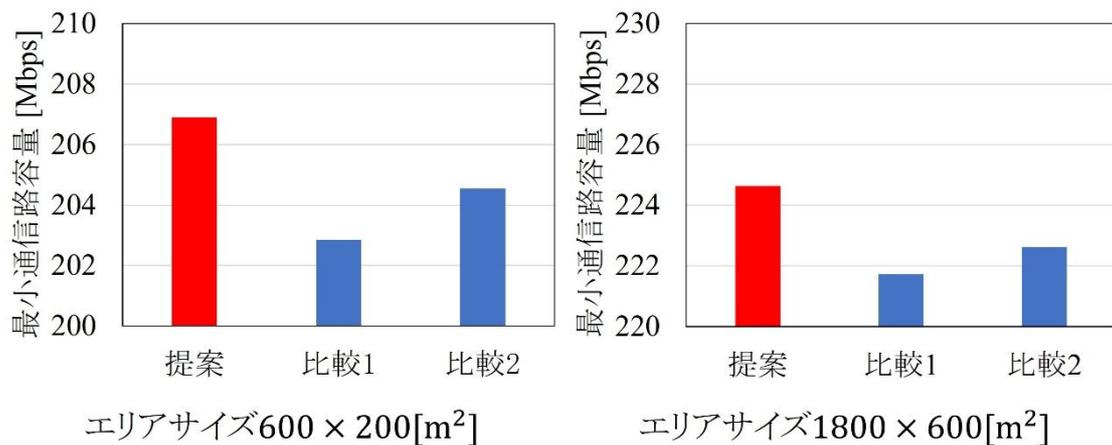


図5：エリアサイズが異なる時の評価結果

図5に性能評価の結果を示す。いずれのエリアサイズにおいても提案手法は比較手法より最小通信路容量が向上することを確認した。比較手法1は比較手法2と比べて最小通信路容量が小さくなったが、これはRUの大きさが通信路容量に与える影響は距離が通信路容量に与える影響よりも大きいためである。また、いずれの手法においてもエリアサイズが大きいた方が最小通信路容量は増加するが、UAV間の距離が大きいたことで他のUAVから受ける干渉が小さくなり、RUの再利用ができるようになったためである。

上記成果により、UAVネットワーク及びMEC技術を利用した、低遅延かつ低消費電力で高度なアプリケーションを提供可能な通信システムの構築を完了した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山崎凜, 川本雄一, 加藤寧
2. 発表標題 Latency Reduction with Different NR Sidelink Modes in V2X Networks with UAV Support
3. 学会等名 IEEE International Conference on Communications (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川本雄一
2. 発表標題 UAVネットワーク×MEC技術によるIoT支援プラットフォーム
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川本雄一
2. 発表標題 SAGINとUAV×MEC技術による新たな耐災害通信システムの実現に向けて
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松浦大裕, 川本雄一, 加藤寧
2. 発表標題 地上 - 衛星ネットワークにおけるeVTOL及びLEO衛星の位置に応じたスループット向上のためのハンドオーバータイミングに関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会衛星通信研究会
4. 発表年 2023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
---------	---------