

4-2 ミリ波・テラヘルツ通信を活用したドローンによる 災害時大容量データ回収手法

4-2 *A Method for High-Capacity Data Transmission via Drones Utilizing Millimeter-Wave and Terahertz Communications during Disasters*

横山 亜生 荘司 洋三

YOKOYAMA Aoi and SHOJI Yozo

本稿では、災害時におけるドローンによる大容量データ回収手法として、ミリ波・テラヘルツ通信の活用、時空間同期スケジュールに基づくフライト制御、サイバー空間による協調システムについて述べる。

This paper presents a large-capacity data collection method using drones in disaster situations. The proposed approach leverages millimeter-wave and terahertz communications, flight control based on spatiotemporal synchronization scheduling, and a cyberspace-enabled cooperative system to achieve efficient data gathering from disaster-affected areas.

1 まえがき

ソーシャルICTシステム研究室では、2030年代の社会基盤となるBeyond 5G / 6Gの実現に向け、超高周波数帯無線通信、時空間同期、AI・自律型モビリティ利活用、デジタルツイン構成技術などの研究開発を推進している。その一環として、ミリ波・テラヘルツ帯を活用した超高速大容量無線通信技術と、それをドローンなどの自律型モビリティと組み合わせて現場データを効率的に取り扱う手法の高度化に取り組んでいる。

災害現場では、通信インフラの損傷、遮蔽物の存在、立入り制限などにより、被害状況や設備状態を十分に把握できない場合がある。一方、近年の観測機器の高度化により、高精細な可視光画像や赤外画像、三次元計測データ、音声、各種センサ情報など、現場で取得できるデータは多様化に加え、高精細化によって大容量化している。これらを組み合わせれば現場の状態をより詳細に把握できるが、災害現場から安定して伝送することは容易ではない。

従来無線通信技術（LTE／5Gや業務用無線等）に依れば、ドローンや運用システム間の状態共有、運用情報の伝送等、比較的通信データ量が少なく済む基本的な接続性の維持を担うことは可能である。しかし、高精細かつ大容量の観測データをすべてリアルタイムに送信し続けるには、通信帯域や接続安定性の面で限界がある。

そこで本稿では、従来通信で基本的な接続性を維持しながら、通信条件が整ったタイミングでミリ波・テラヘルツ通信により大容量データを短時間で伝送・回収する手法を紹介する。観測ドローンが現場で高精細な観測データを取得・蓄積し、回収ドローンが接近する短時間の間に一括伝送できれば、リアルタイム伝送だけに依存しないデータ収集が可能となる。以下では、災害現場における課題、ミリ波・テラヘルツ通信の有効性と課題、ドローンを活用したデータ収集、時空間同期スケジュールに基づくフライト制御、サイバー空間による協調システム、期待される効果と今後の展望について述べる。

2 災害現場における大容量データ収集の課題

災害現場では、構造物の損傷、火災や熱源の有無、地形や障害物の状態など、多様な情報を短時間で把握する必要がある。正確な状況判断には、単一の画像や一部のセンサ情報だけでなく、複数種類の観測データを組み合わせることが有効である。

しかし、高精細な観測を行うほど、伝送・回収すべきデータ量は増大する。高精細な映像や画像、赤外情報、三次元点群、音声、環境センサ情報などを十分な品質で取得するには、従来よりも多くの通信容量とデータ管理能力が必要となる。例えば映像データを一定時間蓄積するだけでも、データ量は数十GB規模に達し得る（図1）ため、取得したデータをどのタイミン

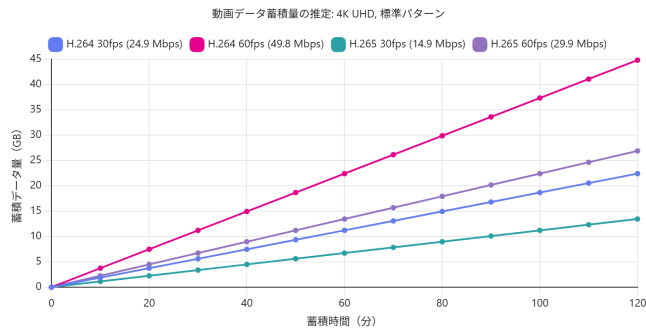


図1 高精細観測データを蓄積した場合のデータ量の目安
(4K映像、フレームレート30 fps・60 fps、H.264 / H.265圧縮を想定)

グで、どの通信手段により伝送するかをあらかじめ考慮しておく必要がある。

災害時には、通信インフラの損傷や、建物・^{がれき}瓦礫・地形による遮蔽が発生し得る。また、安全確保の観点から、作業員が長時間現場に留まることが難しい場合もある。ドローンを用いることで、人の立入りが困難なエリアの観測が可能となる一方、運用時間、バッテリー容量、通信環境、気象条件などの制約を受けるため、長時間にわたり安定した大容量通信を維持し続けることは必ずしも現実的ではない。

従来通信だけで大容量データを扱おうとした場合、次のような制約が生じやすい。

- ・通信可能な容量に合わせてデータを圧縮・削減せざるを得ず、事後分析に必要な観測データの完全性が損なわれやすい。
- ・データ伝送に長い時間がかかり、ドローンの運用時間や運用負荷が増加する。
- ・通信が途切れた場合、重要なデータを十分に回収できない可能性がある。

このように、災害時のデータ利用では、「データを取得できるか」だけでなく、「取得したデータをどのように確実に伝送・集約し、後段の分析に活かせる形で残すか」が重要となる。

3 ミリ波・テラヘルツ搭載ドローンによる大容量データ収集システム

本章では、ミリ波・テラヘルツ通信の技術的特性を踏まえたうえで、ドローンを用いた大容量データ収集システムの構成と、通信機会を計画的に活用するフライト制御について述べる。

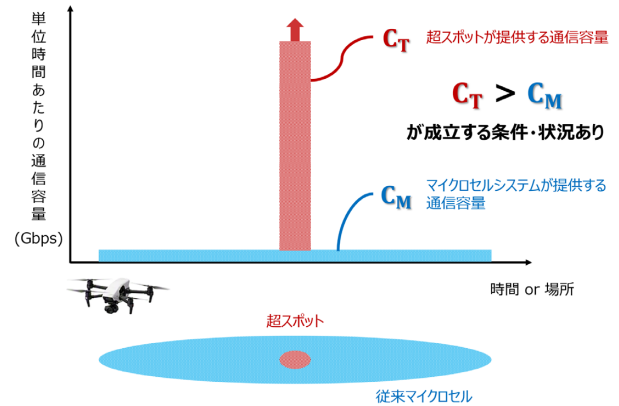


図2 従来通信と超スポット通信の役割の違い

3.1 ミリ波・テラヘルツ通信を用いることの有効性と課題

ミリ波・テラヘルツ通信は、十分に広い周波数帯域を活用した無線通信が可能となるため、大容量データを短時間で無線伝送することができる。長時間かけて少しずつ送るのではなく、通信条件が整った短い時間を捉えて、観測ドローンが蓄積したデータを回収ドローンへ一括して受け渡す点に、従来通信とは異なる価値がある。

この考え方を表すものが、超スポット通信である。超スポット通信では、広い範囲を常時カバーすることを目的とせず、通信可能な場所と時間を限定し、その短い通信機会に大容量データを一括して受け渡す(図2)。

ミリ波・テラヘルツ通信には特有の課題がある。高い通信速度が期待できる反面、十分な信号強度を得るためには高いアンテナゲインが必要となり、電波は特定方向に集中する。そのため、送受信のアンテナ方向がわずかにずれるだけでも通信品質が低下しやすい。加えて、直進性が強く反射や回折もほとんど期待できないため、建物、瓦礫、設備構造物などで見通しが遮られると電波は大きく減衰する。ドローン同士の通信では、相対距離の変化、位置ずれ、機体姿勢などによっても通信条件が変動する。

したがって、ミリ波・テラヘルツ通信の高い伝送能力を活かすには、通信可能な位置関係、アンテナ方向、見通し、通信タイミングといった条件をそろえる必要がある。災害現場では、これらの条件が自然に揃うとは限らないため、通信機会そのものを能動的に作り出す発想が求められる。

3.2 ドローンを活用したデータ収集

災害現場のような危険環境においても、自在に上空を飛行し、現場の観測を行い、観測したデータを迅速に持ち帰ることも可能であるが、本手法では、ドロー

ンを単なる観測装置としてではなく、通信を成立させるための移動体としても捉える。特にミリ波・テラヘルツ通信では、アンテナ方向や見通しが通信品質に大きく影響するため、ドローンの位置や機体姿勢の制御がデータ伝送性能に直結する。

ドローンが担う主な役割は、次のように整理できる。

- ・人が立ち入ることが難しい場所を上空から観測する。
- ・高精細な可視光画像や赤外画像、三次元計測データなどを取得し、時刻と位置情報と関連付ける。
- ・取得した高精細な観測データを機体内に一時的に蓄積する。
- ・従来通信 (LTE / 5G や業務用無線等) により、位置、姿勢、状態、簡易な観測情報などを共有する。
- ・ミリ波・テラヘルツ通信に適した位置関係やアンテナ方向を確保する。
- ・観測ドローンから回収ドローンへ、大容量データを短時間で伝送する。

例えば、災害現場の上空で観測を続ける観測ドローンと、通信に適した位置へ移動してデータを受け取る回収ドローンが協調する構成が考えられる。観測ドローンは現場の状態を高精細に記録し、回収ドローンは通信条件が整う機会を捉えて、短時間で大容量データを取得する。

具体的なシステム構成としては、複数のドローンが役割を分担し、観測データを伝送・集約する形が考えられる。これは災害現場だけでなく、社会インフラ点検や危険環境でのデータ取得・伝送にも展開可能である。

ただし、ミリ波・テラヘルツ通信によるデータ受け渡しを成立させるには、どのドローンが、いつ、どこで、どのような姿勢で通信を行うのかを、通信条件に合わせて整合する必要がある。限られた運用時間の中で大容量データを効率的に受け渡すには、飛行と通信を別々に考えるのではなく、両者を一体として扱うことが重要となる。

3.3 通信機会を活かす時空間同期スケジュールに基づくフライト制御

ミリ波・テラヘルツ通信では、高利得アンテナによる狭いビームを利用して高速大容量通信を実現する。そのため、通信可能な位置関係やアンテナ方向から外れると、通信品質が低下しやすい。通信機会を偶然に委ねるのではなく、通信条件が整う機会を計画的に作り出すことが重要となる。

本手法では、飛行計画と通信計画を時間軸上で統合



図3 実験のドローン機器構成外観



図4 実験の様子

した「時空間同期スケジュール」を活用する。ここでいう時空間同期スケジュールとは、観測ドローンと回収ドローンが、通信を行う時刻に通信可能な位置関係およびアンテナ方向を満たし、無線通信処理を実行できるようにするための計画である。

このスケジュールを機能させるには、ドローン同士が時刻同期しており、計画した位置関係やアンテナ方向を実現することに加え、通信タイミングと無線通信処理を整合させる必要がある。また、各ドローンの位置、姿勢、状態を共有し、状況変化に応じて計画を調整できることも重要である。

この考え方の有効性は、実際の飛行通信実験でも確認されている。実験には、60 GHz帯ミリ波通信機器を搭載したドローン (図3) を用い、屋外の試験環境で観測ドローンと回収ドローンによる飛行通信を行った (図4)。図5および図6は、観測ドローンと回収ドローンの飛行開始・終了位置、目標移動速度を同一とした条件で実施した飛行通信実験の結果例 (図5・6) である。両図はドローン同士が接近して、すれ違う際に通信が行われた時の通信データ量・ステータス・RSSIの時

4 フェーズ3 災害復旧活動等

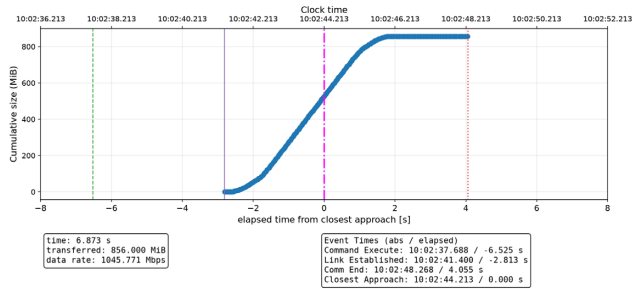


図5 時空間同期スケジュールに基づくフライト実行時の通信結果例

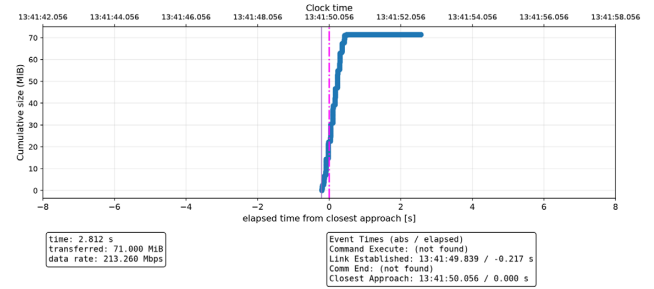


図6 時空間同期スケジュールに基づくフライト非適用時の通信結果例

系列変化をグラフにしたものである。同図左下凡例は通信結果(通信総時間、通信量、通信時になる。また、同図右下凡例は通信イベントとドローン同士の最接近タイミングになる。両者の違いは、時空間同期スケジュールに基づき、位置関係、アンテナ方向、通信タイミングを整合させたかどうかである。

時空間同期スケジュールに基づくフライト制御を適用した場合(図5)には、短時間で多くのデータを伝送できた。一方、適用しない場合(図6)には、開始位置、終了位置、目標移動速度が同じであっても、通信品質や伝送効率に大きな差が生じた。これは時空間同期スケジュールに基づくフライトにより通信可能時間を得たことが主要因で生じた結果である。このことは、ミリ波・テラヘルツ通信の性能を活かすには、通信条件を満たす位置関係、アンテナ方向、通信タイミングを計画的に整えることが重要であることを示している。

4 サイバー空間による協調システムの導入構想

4.1 システム概念と課題

ここまで述べたように、飛ばし中のドローン間でのミリ波・テラヘルツ通信を用いた大容量データ伝送では、接近時におけるドローンの位置関係、アンテナ方向、通信タイミングを整えることが重要である。一方、災害現場では、周辺の障害物分布、他機の動作、気象条件、通信の混雑状況なども変化するため、個々のドローンや局所的な判断だけでは、複数機の動作を常に適切に整合させることが難しい場合がある。

そこで、実空間で動くドローン群と従来無線通信を通じて連携し、サイバー空間側で複数機の動作を俯瞰して整合させる仕組みが有効となる。本稿では、こうした仕組みをサイバーフィジカルシステム(以下、CPS)と呼ぶ。CPSは、ミリ波・テラヘルツ通信の機会を計画的に活用させる上位の枠組みである。広域の通信基盤が使えない状況では現場側の運用による最低限の維持を行い、通信基盤が確保できる状況ではCPS

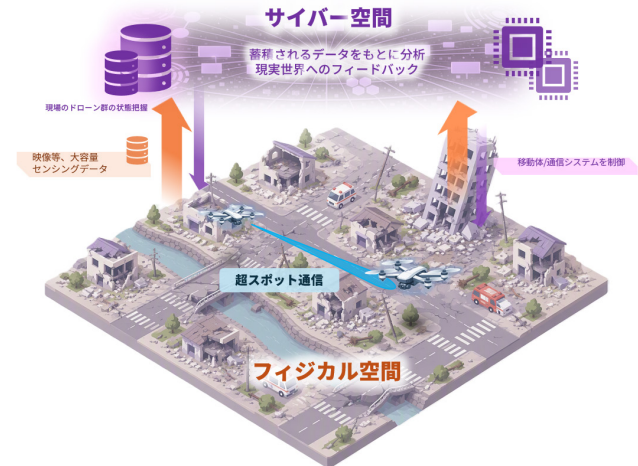


図7 CPSと協調したドローンによる大容量観測データ回収システムのイメージ

による支援を活かすという、状況に応じた柔軟な運用を実現できる(図7)。

CPSが担う主な役割は、次のとおりである。

- ・現場のドローン群の状態把握
- ・通信可能な位置とタイミングの把握・見通し
- ・複数機の動作を全体として整合させる計画支援
- ・現場状況の変化に応じた計画の見直し

こうした基盤があることで、局所的な判断では実現しにくい通信機会の予測と、複数ドローンの協調的な運用につながる。

4.2 期待される効果

CPSを含む本手法により期待される効果は、単に大容量データを高速に送れるようになることではない。ミリ波・テラヘルツ通信と時空間同期スケジュールに基づくフライト制御により、ドローン間の大容量データ通信そのものは現場側の運用でも成立する。CPSはこれをさらに高度化し、従来無線通信を通じて複数機の状態把握、動作整合、計画見直しを行うことで、ミリ波・テラヘルツ通信の機会を効率的に活用させる。これにより、現場から得られる情報の質と量を一段と

高め、災害対応や安全管理の実効性向上に寄与する。
期待される主な効果は、次のように整理できる。

- ・状況把握と初期判断の精度向上：CPSが複数機を俯瞰し通信機会を整合させることで、必要なエリアの必要な時刻の詳細データを回収できる。被害範囲の把握、危険箇所の特特定、救助・復旧作業の優先順位付けの精度が高まる。
- ・後段解析の自由度向上：CPSが通信機会を計画的に確保することで、時刻と位置情報が関連付いた大容量データを揃えた状態で持ち帰れる。現場を離れた後の詳細な再解析、複数データの統合解析、時系列変化の確認、AIによる画像認識や異常検知などが安定して行える。現場での「取り直し」が困難な災害対応において特に価値が大きい。
- ・作業員の安全確保：CPSが複数機の動作を整合させ、現場変化に応じて計画を見直すことで、危険エリアを時系列的な変化まで含めて漏れなく観測できる。人が立ち入る前の判断根拠が揃い、二次災害のリスク低減に寄与する。
- ・社会インフラ点検への展開：CPSによる俯瞰と計画支援の枠組みは、災害以外でも複数機運用が必要な場面に応用できる。人が入りにくい場所や、長時間の作業が難しい場所での点検・保守作業の高度化や省力化に寄与する。

5 むすび

本稿では、ミリ波・テラヘルツ通信を活用したドローンによる、災害時の大容量観測データの効率的な伝送手法について紹介した。さらに、現場側のドローン運用と、サイバー空間側のCPSによる支援を組み合わせることで、通信機会を計画的に活用することを目指している。

この手法は、災害現場で「取得できるデータの質」と「持ち帰れるデータの量」の双方を高めるものであり、幅広い社会的価値につながる。

一方で、実運用に向けては検証すべき課題も多い。通信距離、アンテナ方向、遮蔽物、機体姿勢、風による揺れなどが通信性能に与える影響を、実際の災害現場に近い条件で評価し、効率的なデータ伝送が成立する条件を明らかにする必要がある。また、複数ドローンが協調する場合には、通信可能なタイミングの予測や優先的に伝送すべきデータの選択に加え、バッテリー制約を考慮した飛行計画、観測対象や現場状況の変化に応じた運用計画の更新、安全な飛行経路の確保なども重要な検討課題である。

今後は、これらの検証と改良を進めるとともに、AI解析や被害状況の可視化、復旧計画の支援、過去

データとの比較活用など、取得したデータを判断につなげる仕組みまで含めて検討を進める。ミリ波・テラヘルツ通信を搭載したドローンによる大容量データ伝送手法が、災害時に必要な情報を安全かつ高精細に、効率よく活用するための基盤として発展していくことを目指す。

謝辞

本研究の遂行にあたり、実験およびシステム開発にご協力いただくとともに、有益な議論を通じてご支援いただいたソーシャルICTシステム研究室の皆様、ドローン間時空間同期システムに関わる助言等を頂いたワイヤレスシステム研究室、および時空標準研究室の皆様、実験用通信デバイスの提供を頂いたソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社の関係者の皆様に深く感謝する。

【参考文献】

- 1 莊司 洋三ほか, ““今だけ・ここだけ・あなただけ” デジタルツインサービスを実現する時空間同期×ミリ波・テラヘルツ超スポット通信技術,” 情報通信研究機構研究報告, vol.71, no.1, pp.3-11, 2025



横山 亜生 (よこやま あおい)

Beyond Connectivity研究開発推進ユニット
先進的Connectivity協創センター
ソーシャルICTシステム研究室
有期研究技術員



莊司 洋三 (しょうじ ようぞう)

Beyond Connectivity研究開発推進ユニット
先進的Connectivity協創センター
研究センター長／
ソーシャルICTシステム研究室
室長
博士(工学)
無線通信、光通信
【受賞歴】

2010年 第21回電波功績賞 電波産業会会長賞
2008年 平成20年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞
2007年 電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ賞