

ドローンと通信技術による 新たな価値創造を目指して

本号の小特集は、ドローン及びドローンとソサイエティの技術領域である通信技術の交差領域をテーマとして編集致しました。ドローンは広義には地上や水中、水上の無人機を含む場合もありますが、本小特集では無人航空機を対象としています。

ドローンは従来の無人航空機より操縦が容易になったことで、空撮、物流など様々な分野での活用が始まっています。また、ドローン自体の技術的な進歩やユースケースの広がりに合わせて、制度や運用のためのシステムの検討や実装も進んでいます。本小特集ではドローンの仕組みや飛行のメカニズムとドローン運航管理システムについて、そして無線マルチホップネットワークを用いた新たなドローンの分散管理方式について解説しています。

ドローンと通信技術の交差領域については二つのテーマを取り上げました。一つ目はドローンの制御及び運航監視、管制における無線通信の活用です。ドローンはGPSなどによる測位を基に完全に自律で飛行することも可能ですが、サービスとして運用する場合や複数のドローンが近い空域で飛行する場合には、安全性の確保のための監視、管制が欠かせません。また、災害地での被災状況の確認などドローンからの映像を用いて遠隔制御を行うユースケースも多く存在します。このような場合、移動体であるドローンには無線通信が欠かせず、周波数帯や通信方式を含めて、様々な技術の活用が考えられます。本テーマについてはドローン運航における無線通信の課題と新たな制御用通信技術の取組みについて解説しています。

二つ目のテーマはドローンを活用した無線通信のカバレッジ拡大です。次世代のモバイル通信規格である6G（第6世代移動通信システム）では、通信カバレッジの拡張が大きなテーマの一つとなっています。既に商用サービスが始まっている低軌道の衛星同様に、ドローンは空から広域をカバーする無線通信の活用が期待されており、衛星よりも地上に近いことから様々な利点があります。本テーマについてはHAPS（High Altitude Platform Station）を中心に解説しています。

ドローンに限らず、自律的に移動する機械（ロボット）と通信の融合領域は今後ますます重要になると考えられます。活用が進むドローンを題材にした本小特集が、その領域について知識を得る起点となれば幸いです。最後に本小特集に解説論文を寄稿頂いた著者の皆様と査読・校閲で御協力頂いた皆様に感謝致します。

小特集編集チーム

金友 大、磯崎裕臣、伊藤暢彦、沢田健介、東野武史、山下泰輝

非地上系ネットワーク (NTN) における HAPS の研究開発

Research and Development of HAPS in Non-terrestrial Network

大津留 豪 Go Otsuru[†] 辻 宏之 Hiroyuki Tsuji[†] 宗正 康 Yasushi Munemasa[†]
大倉拓也 Takuya Okura[†] 三浦 龍 Ryu Miura^{††}

Summary

次世代移動通信システムでは、多様化するアプリケーションに対応するために、非地上系ネットワーク (NTN) へのスケーラビリティが重要な要件となる。高高度プラットフォーム (HAPS) は、地上系ネットワークのバックホール回線や、携帯端末との直接通信する“空飛ぶ基地局”として大きな期待を寄せられている。本論文では、これまでの HAPS に関連する研究開発の歴史を概説するとともに、HAPS 向けの技術開発要素について紹介する。

Key Words

HAPS, 非地上系ネットワーク (NTN), 光通信, 無線通信, 5G

1 HAPS とは

第 5 世代移動通信システム (5G: 5th Generation) に代表される地上系ネットワーク (TN: Terrestrial Network) の成熟は著しく、日本における携帯電話網の人口カバー率は 99.99 % を超えるものとして公称されている⁽¹⁾。しかしながら、山間部や海洋においては、地理的・経済的な観点から、バックホール回線としての光ファイバの敷設や基地局の整備が進まない不感地帯が存在し、TN によるエリアカバー率の改善には限界がある。また、水道・電気・ガスにも並び立つインフラとして、人々にとって通信が当たり前になりつつある現代社会の在り様を受けて、地震や豪雨といった大規模災害にも対応可能な、高いレジリエンス性を有する通信基盤の確立が急務である。総務省の令和 6 年度版情報通信白書では、令和 6 年の元日に発生した能登半島地震における課題及び今後の対応として、光ファイバの切断回避のための地中化による強じん化等に加えて、衛星回線の活用が挙げられており、SpaceX 社の低軌道 (LEO: Low Earth Orbit) 衛星通信サービス「Starlink」が応急的に活用されたことが取り上げられている⁽²⁾。

図 1 に Beyond 5G における非地上系ネットワー

ク (NTN: Non-terrestrial Network) の構想を示す。Beyond 5G における NTN は、静止軌道 (GEO: Geostationary) 衛星や非静止衛星、その他の多様な空中ノードにより構成され、携帯電話網などに代表される TN と比較して、三次元的に拡張されたネットワークである⁽³⁾。高高度プラットフォーム (HAPS: High Altitude Platform Station) は NTN における通信ノードの一つであり、高度約 20 km の気象条件が比較的安定した成層圏を飛行するプラットフォームとして、通信や地球観測、リモートセンシングなどの多様なユースケースでの活躍が期待されている。近年、HAPS に対する期待の高まりが顕著であるが、その構想は、30 年近く前から存在していた⁽⁴⁾。図 2 に示すのは、2000 年代における HAPS のユースケースを描いたものであり、現代におけるユースケースとしても囑望されている非常時における冗長回線や、HAPS 間の空間光通信なども既に検討されていた。現代では、主要なアプリケーションが携帯電話との直接通信に移り、更には IoT などの新たなユースケースが登場したことに加えて、HAPS 間のみならず、NTN における他ノードとの縦方向の連携を意識したマルチオービット構想がより強く押し出されている。

本論文の構成は次のとおりである。2. では、HAPS とほかの NTN ノードの比較について述べ、3. では周波数割当の観点から、近年の HAPS に対する期待の高まりについて述べた後に、これまでの研究開発の変遷、実用化に向けた動向を概説する。4. では、想定される HAPS のサービスタイプについて分類及び説明する。5. では、HAPS に

[†] 国立研究開発法人情報通信研究機構, 小金井市
National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Koganei-shi, 184-8795 Japan

^{††} 国立研究開発法人情報通信研究機構, 横須賀市
NICT, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan

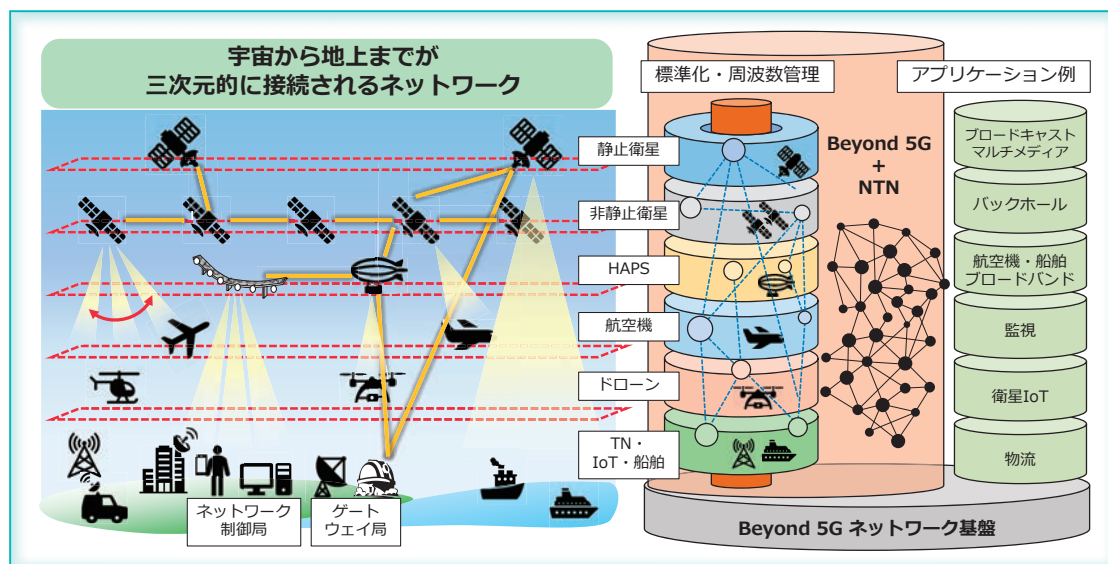
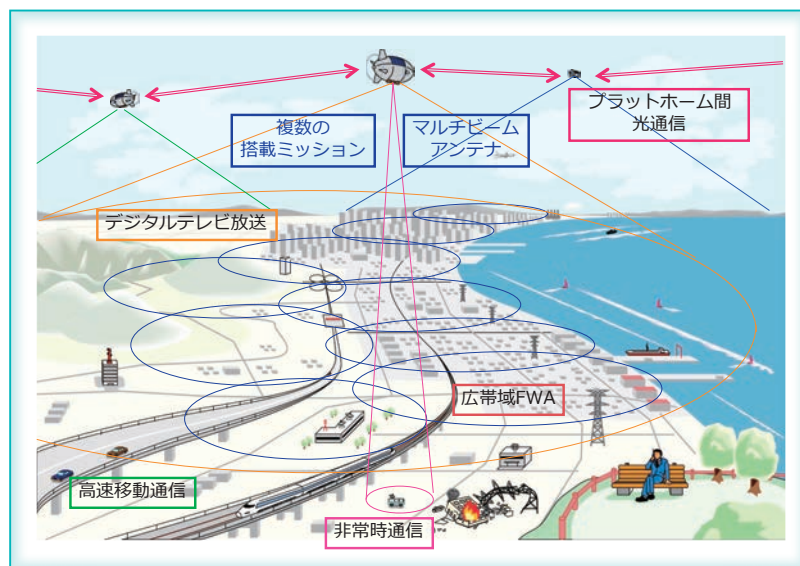
図 1 Beyond 5G における非地上系ネットワークの構想⁽³⁾

図 2 2000 年頃に想定された HAPS のユースケース

期待される要素技術，6. では，最新の研究開発事例について紹介し，7. で本論をまとめる。

2 ほかの NTN ノードとの比較

表 1 に，HAPS を含む無人航空機システム（UAS: Unmanned Aircraft System）とほかの通信ノードとの比較を示す。通常の UAS では，頻繁に離着陸を繰り返し，短期間の飛行を行うものが多い。一方で，HAPS は，ユースケースやアプリケーションの観点から，成層圏において定点に長時間滞空することが求められ，太陽光発電や水素燃料などを用いた継続的な運用が設計に組み込まれている。また，UAS の中では，高い高度に位置するプラットフォームであることから，そのカバレッジがほかの UAS と比較して広いことが利点として挙げられる。

表 1 HAPS と NTN におけるほかの通信ノードとの比較^{(5)~(7)}

NTN ノード	高度	伝搬遅延	カバレッジ
GEO 衛星	約 36,000 km	約 550 ms	200-3,500 km
MEO 衛星	7,000-25,000 km	約 200 ms (高度 10,000 km)	100-1,000 km
LEO 衛星	300-1,500 km	約 20 ms (高度 1,500 km)	100-1,000 km
UAS (HAPS 含む)	8-50 km	1 ms 以下 (高度 20 km)	5-200 km

NTN においては，衛星や HAPS などの NTN ノードと移動端末や固定局といったユーザ間の無線リンクであるサービスリンクと，NTN ノードと地上局間の無線リンクであるフィードリンクが存在している。

HAPS のアドバンテージとして，LEO 衛星や GEO 衛星と比較して低高度に位置しているために，

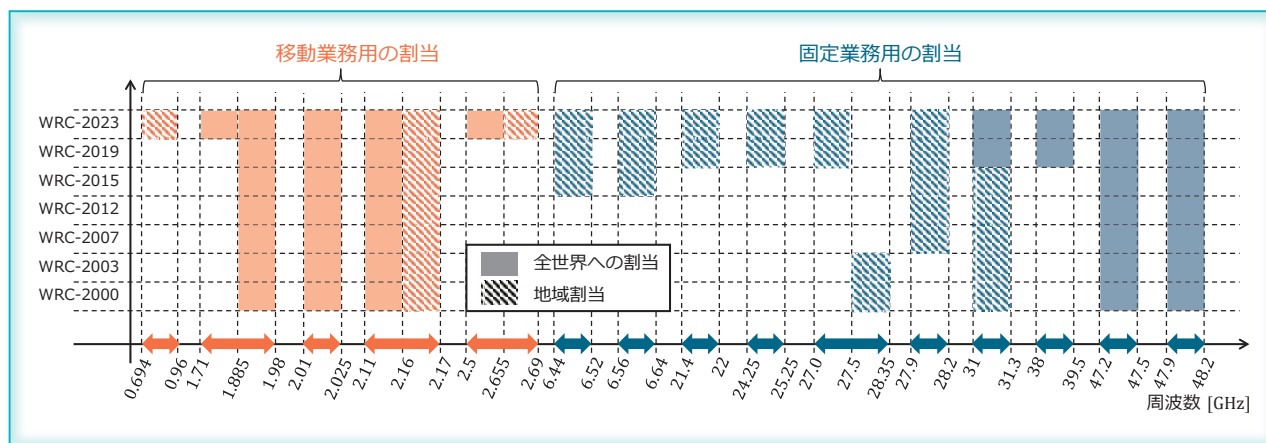


図3 HAPSに対する周波数割当^{(8)~(16)}

サービスリンクやフィードリンクにおける地上の移動端末や固定局との通信において、そのほかのNTN ノードよりも高い信号強度が得られる^{(5)~(7)}。特に、サービスリンクにおいて無指向、若しくは指向性の低い移動端末と NTN ノードが直接通信するユースケースにおいては、その優位性が顕著である。伝搬距離が抑えられることから、往復の伝搬遅延に関しても有利であり低遅延通信を実現できる。また、HAPS には運用上の利点も存在している。LEO 衛星を用いたサービスを展開するためには、多数の衛星により全球を覆うコンステレーションを構築する必要があるが、HAPS は、たとえ少数であったとしても、トラヒック需要の変動に合わせた即応的な運用を行うことが可能である。更に、衛星は一度打ち上げると整備困難であるが、HAPS は故障や障害が発生した場合には、地上に着陸して整備可能であるため、高いメンテナンス性を持つ。

一方で、HAPS は衛星と比較するとカバレッジが狭く、衛星相当のサービスリンクのカバレッジを確保するためには、複数機での運用が求められることになる。また、狭いカバレッジでは、フィードリンクにおける地上局との接続が限定されるため、HAPS と地上局間を直接結ぶフィードリンクが確保できないエリアにおける運用には、HAPS 間通信やほかの NTN ノードとの接続などのマルチホップ通信が必要となる。固定業務向けの通信においては、広帯域を確保できるミリ波帯が用いられるが、この帯域では降雨減衰の影響を強く受ける。また、気象条件により HAPS 機体に対して振動や動揺が生じるため、これらの要因に由来した瞬断や通信品質の低下に対応することが求められる。そのため、天候予測も含めたサイトダイバーシチ技術やほかの NTN ノードとの接続による冗長経路の確保などが必要になると考えられる。

3

HAPS の歴史

3.1 HAPS に対する周波数割当

国際電気通信連合 (ITU: International Telecommunication Union) において、HAPS が明記されたのは 1997 年に開催された世界無線通信会議 (WRC: World Radiocommunication Conference) であり、“High Altitude Platform Station” 若しくは “Stratospheric Repeater” として表記され、高度 20~50 km に滞留する局として定義されている⁽⁸⁾。この WRC-97 において、HAPS の固定業務用として、47.2-47.5 GHz 及び 47.9-48.2 GHz の周波数割当の検討が開始された。図 3 は HAPS に対する周波数割当を示しており、横軸に周波数 (幅は一定)、縦軸にその割当が行われた WRC を記載している。2000 年に開催された WRC-2000 において、WRC-97 で検討された帯域とともに、移動業務用として IMT-2000 (International Mobile Telecommunication 2000, いわゆる 3G) 端末との直接通信向けに 2 GHz 帯が HAPS に対して初めて割り当てられた⁽⁹⁾。また、WRC-2000 では、日本を含むアジア・太平洋電気通信共同体 (Asia-Pacific Telecommunity) が中心となり、HAPS の固定業務用に 27.5-28.35 GHz の HAPS-to-ground 方向 (以下、下り方向) と、31.0-31.3 GHz の ground-to-HAPS 方向 (以下、上り方向) の地域分配を得た。その後、後述する技術的課題により、HAPS の実用化に向けた動きが下火になった背景から、新たな周波数はしばらく割り当てられなかった。しかし近年、HAPS に対する期待が再度高まりつつあり、2015 年に開催された WRC-15 において、HAPS 固定業務用に 6.44-6.52 GHz が下り方向、6.56-6.64 GHz が上り方向として割り当てられ⁽¹³⁾、2019 年に開催された

WRC-19においては、更に多くの周波数がHAPSの固定業務向けに割り当てられた⁽¹⁴⁾。また、WRC-19においては、移動業務に対する需要の高まりに伴い、IMT 基地局としてのHAPS (HIBS: HAPS as IMT Base Station) が定義され、携帯電話やスマートフォンと直接通信を行う“空飛ぶ基地局”としての役割がより強く打ち出された。これらの割当において、日本は大きな役割を果たしている。更に、2023年に開催されたWRC-23では、日本が中心となり携帯電話向けの周波数として、698-960 MHz への新たな割当や、1.7 GHz 帯及び2.5 GHz 帯の追加割当を得ており、HAPS や HIBS の実用化に向けた国際的な動きが活発化している⁽¹⁵⁾。

3.2 HAPS に関する研究開発の変遷

HAPS は1997年にITU-Rにおいて定義されて以来、30年近く実用化に向けた研究開発が進められてきた。2000年代においては、飛行船をプラットフォームとして用いるユースケースが主軸であり、主なアプリケーションは、観測・通信・放送が検討されていたが、HAPS 機体に対する要求条件の厳しさから研究開発は下火になった。その後、バッテリーや太陽光発電技術の発展に伴い、再度注目を集めるようになった。携帯電話の爆発的な普及や利用形態の多様化により、NTNにおけるHAPSの重要性が見直され、2010年代以降は、携帯電話との直接通信が主要なアプリケーションとして挙げられており、現在の研究開発に至っている。以降で、その具体的な変遷について述べる。

国内におけるHAPSに対する研究開発は、1998年から2004年までの7年の歳月をかけて実施した「成層圏プラットフォームプロジェクト」が先駆的存在である(図4)。このプロジェクトでは、高度約20 kmの成層圏に、ヘリウムガスを利用して浮力を得る飛行船を滞空させることで、通信や放送、更には地球観測などの多様なユースケースに利用することを狙いとしていた^{(17), (18)}。航空宇宙技術研究所(現・宇宙航空研究開発機構、以下JAXA)が飛行船全体システムを、宇宙開発事業団(現JAXA)及び海洋科学技術センター(現・海洋研究開発機構)が地球観測ミッションを、通信・放送機構(TAO, 現・情報通信研究機構、以下NICT)及び通信総合研究所(CRL, 現NICT)が追跡管制システム及び通信・放送ミッションを担当していた。本研究開発の成果として、図5に示すように、2004年秋に全長68.4 mにも及ぶ大形の無人飛行船を用いた高度4 kmでの定点滞空飛行試験を



図4 成層圏プラットフォームコンセプト(文献(18)から引用)

JAXA と NICT が共同で実施し、飛行運用・制御及び通信・放送ミッションに関する目標データを取得した。通信・放送ミッションに関しては、広域放送による地上でのハイビジョン映像の受信、当時から着目はされていたが、実用化には至っていなかった空間光通信に関する捕捉追尾の成功などが含まれている⁽¹⁸⁾。

また、NICT (旧 CRL 及び TAO) では、独自にアメリカ航空宇宙局(NASA: National Aeronautics and Space Administration)との共同研究を通して、図6に示すように、2002年には、AeroVironment社が開発した固定翼型のソーラー無人機であるPathfinder Plusを用いて、世界初の高度20 kmの成層圏からのIMT-2000携帯端末との直接通信及び地上デジタル放送波の直接受信に成功している⁽¹⁹⁾。その後、成層圏プラットフォームプロジェクトにおいて、Pathfinder Plusの後継機であり、ペイロードの積載量が向上したHeliosを用いた実験が計画されたが、日米の共同実験前にNASAが実施した燃料電池試験時に機体が破損したため、実験は中止された。

また、当時、海外においてもHAPSに関する多数の研究開発が存在していた。例えば、欧州委員会の出資を受けて2003年から2006年までの約4年間で実施されたCAPANINAプロジェクトでは、2005年に気球を用いて高度23 kmから1.25 Gbit/sのダウンリンク光通信に成功している⁽²⁰⁾。



図5 成層圏プラットフォームプロジェクトにおける通信・放送ミッション (文献(18)を基に作成)



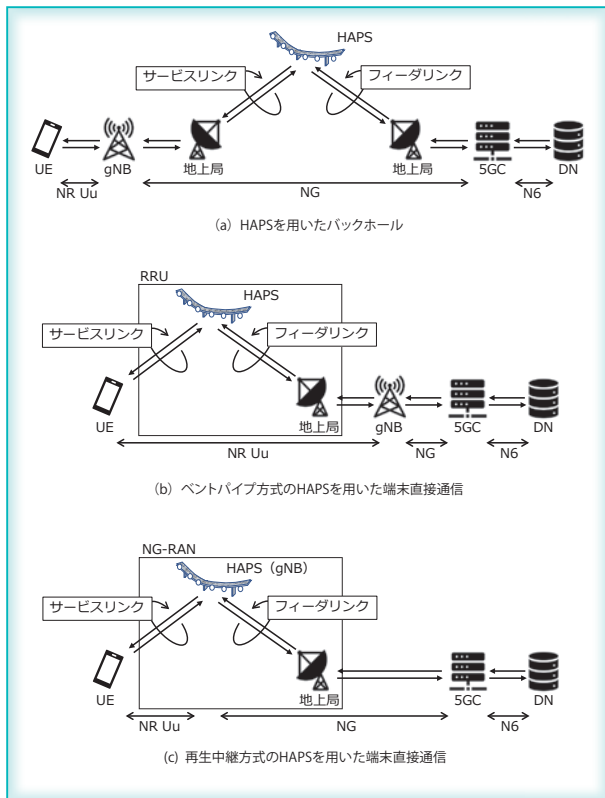
図6 Pathfinder Plus を用いた通信ミッション (文献(18), (19)を基に作成)

このような1990年代から2000年代にかけて得られた一定の成果の一方で、機体開発やバッテリー及び再生型燃料電池などの電源技術に課題を残しており、成層圏で長期間滞空して、サービスを提供することが求められるHAPSのプラットフォームとしての要件を満たすものではなかった。また、地上の携帯電話網の開発スピードに追い付けなかったこともあり、世界的にもHAPS研究開発に関する盛り上がりは次第に収束していった。国内では、それまでのプロジェクトのコンセプトを継承した航空機ミリ波通信システムや、小形UAVによる無線中継システム、小形ドローン用通信システムなどの研究開発に移行していった。海外では、軍事技術から民生転用により、小形UAVやドローン技術が急速に発達し、市場が拡大した。このような研究開発の停滞期におけるバッテリーやソーラーパネル技術における技術的進歩を経て、NTN技術の一つとして、HAPSに対して注目が再び高まるに至った。

近年では、2016年にソフトバンク株式会社（以下、ソフトバンク）がAeroVironment社との合併でHAPSモバイル株式会社を設立し（2023年にソフトバンクに吸収合併）、2020年9月には、固定翼型のHAPS機体であるSunliderを用いて成層圏からLTEでスマートフォンとの直接通信に成功している⁽²¹⁾。また、(株)NTTドコモ（以下、NTTドコモ）は、成層圏で長期間の連続飛行実績を有する固定翼型のAirbus社製のHAPS機体であるZephyrを用いて、携帯電話向けの2GHz帯を用いた電波伝搬試験を2021年11月に実施している⁽²²⁾。NTTドコモは(株)Space Compass（以下、Space Compass）とともに、AirbusとAALTO HAPS Limitedに対して最大1億ドルの出資を行い、2026年にはHAPSを用いた通信サービスの実用化を目指すとして発表している⁽²³⁾。ソフトバンクもまた、2026年にHAPS-LEO衛星間の実証実験を計画しており、2027年に機体の量産及び商用化の加速を目指すとしている^{(24), (25)}。

4 HAPSを用いたサービスタイプ及びユースケース

HAPSを用いたNTNのサービスには幾つかの構成が想定される。図7に示すのは、5GネットワークにおけるHAPSを用いた通信サービス構成例である。ここでは、UEとgNB（Next Generation NodeB）の間のアクセスリンクに相当する無線インタフェースであるNR Uuインタフェース、gNBと5GC（5G Core）の間のバックホールを担うインタフェースであるNGインタフェース、UPF

図7 HAPSを用いたサービスタイプ^{(6), (7)}

(User Plane Function) とDN (Data Network) の間の外部ネットワークとのインタフェースであるN6インタフェースに着目したアーキテクチャ例を示している。図7(a)に示すのは、HAPSをgNBと5GCとの間のバックホール回線として用いた構成である。本構成においては、フィーダリンク及びサービスリンクでともに固定業務用の周波数を用いた広帯域通信を提供することが想定される。

図7(b), (c)に示すのは、HAPSと携帯電話端末が直接通信するユースケースである。サービスリンクにおいては携帯電話と直接通信可能な移動業務用の周波数を用いてマルチビームを形成し、フィーダリンクにおいては、それらを束ねる固定業務用の広帯域通信を地上局との間で確立している。図7(b)

と図7(c)間の違いは、HAPSの役割であり、図7(b)ではHAPSは単なるリピータとして動作し、ベントパイプ方式で通信する構成となっている。これにより、HAPS機体に対する電力や通信ペイロードの積載量などの要求が抑えられることから、実用化時の初期段階におけるサービス形態であると考えられる。図7(c)では、HAPSはgNBとしての機能を有している。この構成の場合、HAPSの高機能化により、RTDの低減などを含む高性能化や柔軟な制御が実現される一方で、HAPS機体に対する電力や通信ペイロードの積載量などの要求が厳しくなるため、HAPSの機体開発の更なる進展が不可欠であると考えられる。

表2に示すように、災害時における冗長回線や遠隔地に対する通信以外にも、HAPS含むNTNには多様なユースケースが期待されている。ITU-R TR 38.821においては、このようなNTNに対する各シナリオに対して、厳密な要件ではないものの、表2に示すような値がAnnexとして与えられている。6 GHz以上の広帯域通信のダウンリンクにおいては、静止物体や車両などがVSAT (Very Small Aperture Terminal) などの指向性の強いアンテナを備えていること想定し、50 Mbit/sから数Gbit/sの伝送速度となっているが、6 GHz以下の狭帯域通信のダウンリンクにおいては無指向性、若しくは指向性の弱いモバイル端末を想定しており、2 Mbit/s以下の伝送速度となっている⁽⁵⁾。

5 HAPS に対して期待される技術

5.1 HAPS 機体

前章においても触れたように、電力や通信ペイロードの搭載量、飛行期間といったHAPS機体に依存する要件が、HAPSの取り得るサービス形態にもたらす影響は大きい。また、特に太陽光発電により長期間の飛行を目指す固定翼型HAPSにおいて

表2 NTNのユースケースごとに期待される通信品質⁽⁶⁾

シナリオ	体感伝送速度		1km ² 当りのUE数密度	UEのアクティブ率	最大移動速度	UE種別
	DL	UL				
歩行者	2 Mbit/s	60-250 Mbit/s	100	1.50 %	3 km/h	モバイル端末
車両接続	50 Mbit/s	25 Mbit/s	—	—	250 km/h	車両搭載端末
静止物体	50 Mbit/s	25 Mbit/s	—	—	0 km/h	建物設置端末
航空機接続	360 Mbit/s	180 Mbit/s	—	—	1,000 km/h	航空機搭載端末
IoT接続	2 kbit/s	10 kbit/s	400	1.00 %	0 km/h	IoT 端末
公共安全	3.5 Mbit/s	3.5 Mbit/s	—	—	100-250 km/h	モバイル端末／車両搭載端末

は、高緯度地域の冬季における短い日照時間による夜間のサービス継続性に課題があるため、HAPS 機体及びバッテリーの大容量化や太陽光パネルの高効率化及び軽量化といった各コンポーネントの進化、運用技術の成熟などが求められる。

5.2 通信ペイロード

HAPS 機体における厳しい電力・搭載量の制約のため、通信ペイロードにおいても低消費電力化は重要な要件であると言える。また、風やプロペラの振動などの環境に起因した機体動揺に対応するために、デジタル信号処理を用いることで、デジタルビームフォーミングによる地上に対して固定されたセル形成や、ドップラーシフト補償、アレーアンテナ素子の自動校正などの研究開発が行われている^{(26), (27)}。

また、更なる大容量化を実現するために、電波による無線通信のみならず、レーザ光による空間光通信の研究開発が進められている。空間光通信は大気の影響が少ない HAPS-HAPS 間や HAPS-衛星間のリンクとして期待されているほか、大気揺らぎの影響を受ける HAPS-地上局間についても、適用に向けた研究開発が進められている。図 8 に示すように、NICT では、HAPS を含むほかの NTN ノードに搭載可能な小形・高速な光通信端末に関する研究開発を実施している⁽²⁸⁾。

5.3 地上局

バックホール回線や直接通信時におけるフィードリンクでは、HAPS と地上局間において、固定業務用に割り当てられたミリ波帯を用いることで広帯

域通信を実現する。しかしながら、ミリ波帯は伝搬損失が大きいことに加えて、電力制約や地上システムへの観点から HAPS 搭載局側において高い利得を得ることが困難であるため、地上局側には、高利得かつ他のシステムの干渉を抑える低サイドローブ特性が求められる。また、高い利得を得るためには先鋭なビームを形成する必要がある、安定した通信リンクの確立のためには、捕捉追尾技術の高度化も必要である。

5.4 ネットワーク制御技術

図 7 では、HAPS と地上携帯電話網との間を単一ホップで接続する構成について示したが、将来的な NTN 像においては、異なる高度やモビリティを有する多種多様な NTN ノードと連携したマルチホップやマルチオービットが想定されるため、ネットワークとしての制御が不可欠となる。各 NTN ノードの移動に由来した遅延やスループットなどの通信品質の変動を考慮した制御に加えて、降雨減衰の大きなミリ波を含む無線通信と、雲による遮蔽や大気揺らぎの影響を受ける空間光通信を適切に使い分けることが求められる。このような動的な環境下においては、ユーザの要求を満足させるための適切なリンク形成や経路決定、リソース割当などのネットワーク最適化が、全体のシステム性能に大きく影響する。

6

最新の研究開発事例

6.1 HAPS からの 5G による直接通信の実証

2023 年 9 月に、ソフトバンクがルワンダ領空に

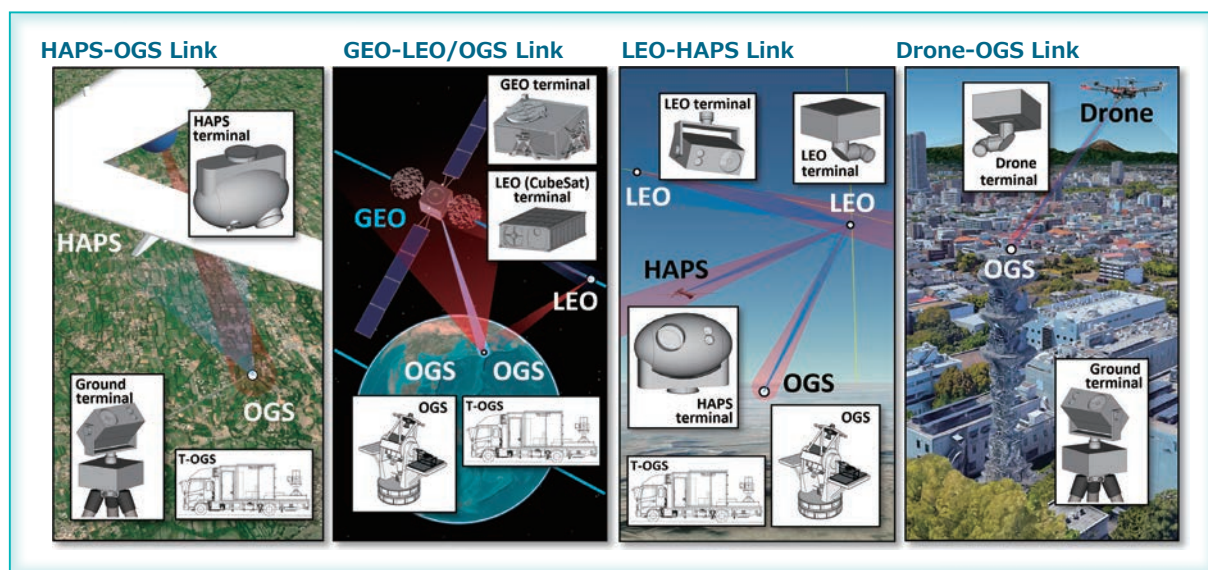


図 8 光通信端末の適用シナリオ例 (文献 (28) から引用)

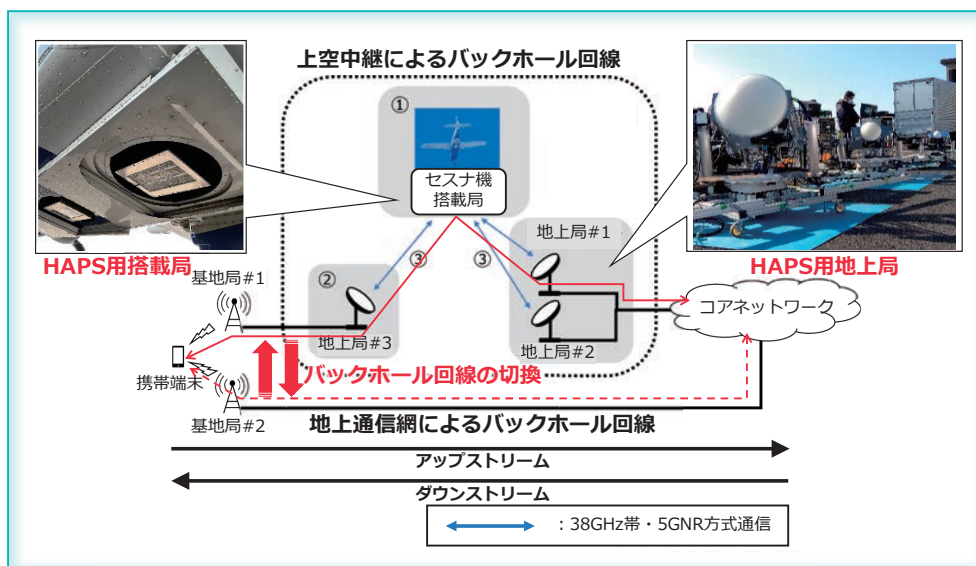


図9 38 GHz 帯電波を用いた上空からの 5G NR 方式の通信確立（文献(31)を基に作成）

において、成層圏を飛行する HAPS と市販の 5G 対応スマートフォンとの間で、5G での直接通信に世界で初めて成功している⁽²⁹⁾。なお、2022 年にはサウジアラビアにおいて、有人航空機を用いて高度 14 km からの 5G 通信実験が既に行われているが、実際に HAPS への搭載は行われていない⁽³⁰⁾。ルワンダで実施された試験においては、ソフトバンクが開発した 5G 対応の通信ペイロードを HAPS に搭載し、移動端末に対して割り当てられた既存の周波数を用いた 73 分間の連続通信において、ビデオ通話による実アプリケーションも利用されており、HAPS と端末との直接通信におけるサービスリンクの確立が実証されている。

6.2 ミリ波帯を用いた固定リンクに関する実証

図9に示すように、2024年3月に、スカパーJSAT株式会社（以下、スカパーJSAT）、パナソニックホールディングス株式会社、NTTドコモ、NICTから成るコンソーシアムが、高度約4 kmを飛行する小形セスナ機と地上局との間で、WRC-19においてHAPSに対して固定業務用に割り当てられた38 GHz電波を用いた5G NR（New Radio）方式での通信を世界で初めて確立しており、端末直接通信におけるフィードリンクや、バックホール回線としてユースケースについても、実用化に向けた技術実証が進展している⁽³¹⁾。また、本実験においては、上空中継回線と地上通信網回線の異なるバックホール回線によって形成されるセルラ間で、一般的な携帯端末を用いたハンドオーバーを行う実証実験に成功しており、TN-NTN統合に向けた成果としても有意であると考えられる。

6.3 サービスリンクにおける周波数共用及びフィードリンク大容量化

ソフトバンクは、HAPSに搭載する通信ペイロードの大容量化や、周波数利用効率の向上を狙ったサービスリンクにおけるセルの高密度化、更にはTNとの周波数共用及びフィードリンクの大容量化に向けた研究開発を2023年から実施しており、本研究開発では、通信容量の倍増や周波数利用効率の1.5倍向上を目指すとしている⁽³²⁾。

6.4 国内の成層圏におけるHAPS実証による早期実用化に向けた研究開発

Space Compass、NTTドコモ、日本電信電話株式会社、スカパーJSATは、端末との直接通信システムの早期実用化に向けた開発の促進、及び高速大容量化に向けた研究開発を2023年から実施しており、本研究開発では、これまで実証実績のない国内の成層圏環境におけるHAPS通信実験を計画しており、2025年度中のHAPSの早期実用化に貢献するとしている⁽³³⁾。

6.5 HAPSによるリモートセンシングを想定した機体・運行管理技術に関する研究開発

Space Compassと新明和工業株式会社（以下、新明和工業）、（株）三菱総合研究所は、HAPSによるリモートセンシングを用いた海洋状況把握システムと、その運行管理技術の開発・実証に向けて、2024年から研究開発を実施しており、本研究開発では、センシング技術や運行管理システムの開発を行うとともに、成層圏における実証環境構築のために、固定翼型のUAS機体であるXU-Sの研究開発

を行っている新明和工業が、HAPS 機体の設計及び開発を行うとしている^{(34), (35)}。

7 結言

実用化に向けた動きが加速し、注目を集める HAPS に関して、ユースケースや特徴・研究開発の歴史を概説するとともに、HAPS 機体や通信ペイロード、地上局やネットワーク制御技術など次世代の HAPS に期待される技術についてまとめた。

HAPS は NTN の中で地表に近い通信プラットフォームであることから、地上と HAPS 間のリンクにおいては、携帯電話と直接通信する基地局として非常に有望視されている。更には、雲の上に滞空していることから、衛星と HAPS 間リンクにおいては大気揺らぎの影響が少なく、大容量な空間光通信を適用することも可能である。このように、HAPS は高度 20 km の成層圏に滞留するという位置関係から、NTN と TN をつなげるプラットフォームとしての重要な役割を担う。HAPS の本格的な実用化までには、通信技術だけでなく、機体技術、電源技術、運用技術、運航管理技術、法制面の整備、周波数の更なる拡大などの課題があるが、これらを順次乗り越え、それほど遠くないうちに我々の身近な存在になっているであろう。

謝辞 本稿の一部は総務省「電波資源拡大のための研究開発 (JPJ000254)」によって実施したものである。

文献

- (1) 総務省 (編), 令和 2 年度版 情報通信白書, 2020.
- (2) 総務省 (編), 令和 6 年度版 情報通信白書, 2024.
- (3) 三浦 周, 関口真理子, 大倉拓也, 小竹秀明, 白玉公一, 斉藤嘉彦, カラスコ-カサド アルベルト, 阿部侑真, 辻 宏之, “衛星通信/NTN と 5G/Beyond 5G の連携の動向と研究開発の取組み,” 信学論 (C), vol. J106-C, no. 9, pp. 344-353, Sept. 2023.
- (4) 三浦 龍, “空に浮かぶ新しい通信インフラ「成層圏プラットフォーム」,” 計測制御, vol. 43, no. 6, pp. 496-501, June 2004.
- (5) ITU-R, “Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (release 15),” 3GPP, TR 38. 811, V15. 4. 0, Sept. 2020.
- (6) ITU-R, “Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (release 16),” 3GPP, TR 38. 821, V16. 2. 0, March 2023.
- (7) M. A. Salas-Natera, G. L. Mace-n, and R. M. Rodriguez-Orsorio, “On the design of HAPs high throughput and flexible 5G communication payloads,” 16th European Conf. Antennas Propag. (EuCAP), March 2022.
- (8) ITU-R, “Final Acts WRC-97,” World

- Radiocommunication conf., 1997.
- (9) ITU-R, “Final Acts WRC-2000,” World Radiocommunication conf., 2000.
- (10) ITU-R, “Final Acts WRC-03,” World Radiocommunication conf., 2003.
- (11) ITU-R, “Final Acts WRC-07,” World Radiocommunication Conf., 2007.
- (12) ITU-R, “Final Acts WRC-12,” World Radiocommunication Conf., 2012.
- (13) ITU-R, “Final Acts WRC-15,” World Radiocommunication Conf., 2015.
- (14) ITU-R, “World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19) Final Acts,” World Radiocommunication Conf., 2019.
- (15) ITU, “World Radio Communication 2023 (WRC-23) Final Acts,” World Radiocommunication Conf., 2023.
- (16) G. K. Kurt, G. Khoshkholgh, S. Alfattani, A. Ibrahim, T. S. J. Darwish, M. S. Alam, H. Yanikomeroglu, and A. Yongacoglu, “A vision and framework for the high altitude platform station (HAPS) networks of the future,” IEEE Commun. Surv. & Tutor., vol. 23, no. 2, pp. 729-779, March 2021.
- (17) 竹田繁一, “成層圏プラットフォームプロジェクトについて,” 日本航空宇宙学会誌, vol. 54, no. 629, pp. 168-174, June 2006.
- (18) 独立研究開発法人情報通信研究機構 (編), 成層圏無線プラットフォーム研究開発最終報告書, 2005.
- (19) M. Oodo, H. Tsuji, R. Miura, M. Maruyama, M. Suzuki, Y. Nishi, and H. Sasamoto, “Experiments on IMT-2000 using unmanned solar powered aircraft at an altitude of 20 km,” IEEE Trans. Vehicular Technol., vol. 54, no. 4, pp. 1278-1294, July 2005.
- (20) J. Horwath, N. Perlot, M. Knappek, and F. Moll, “Experimental verification of optical backhaul links for high-altitude platform networks: atmospheric turbulence and downlink availability,” International J. Satellite Commun. and Netw., vol. 25, pp. 501-528, 2007.
- (21) ソフトバンク, “雲の上の基地局「HAPS」. 無人航空機の成層圏テスト飛行とスマホ同士の通信に世界で初めて成功,” ソフトバンクニュース, 2020 年 10 月 13 日. https://www.softbank.jp/sbnews/entry/20201013_01
- (22) NTT ドコモ, “ドコモとエアバス, 18 日間の飛行で HAPS から電波伝搬実験に成功,” 2021 年 11 月 15 日プレスリリース. https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2021/topics_211115_00.pdf
- (23) NTT ドコモ, “NTT ドコモ, Space Compass が AALTO, エアバスと資本業務提携, AALTO に最大 1 億ドルを出資,” 2024 年 6 月 3 日プレスリリース. https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2024/06/03_01.html
- (24) ソフトバンク, “成層圏から広がる通信ネットワーク: ギジュツノチカラ-HAPS 技術の進化編-,” 2024 年 5 月 22 日. <https://www.softbank.jp/corp/technology/research/story-event/049/?adid=sbn>
- (25) HAPS Alliance, “成層圏航空機が挑むデジタルデバイド解消,” 2021. https://hapsalliance.org/wp-content/uploads/formidable/12/SpA_Flight_

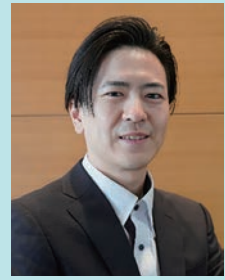
Communication_Tests_White_Paper_Japanese_Final_2021.pdf

- (26) M. Ouchi, T. Kimura, and Y. Chinda, "Study on full digital beamforming for HAPS backhaul system with base station on-board using 38 GHz band frequency," 24th International Symposium on Wirel. Personal Multimedia Commun. (WPMC), Dec. 2021.
- (27) K. Hoshino, S. Sudo, and Y. Ohta, "A study on antenna beamforming method considering movement of solar plane in HAPS system," IEEE 90th Vehicular Technol. Conf., Sept. 2019.
- (28) A. Carrasco-Casado, K. Shiratama, D. Kolev, F. Ono, H. Tsuji, and M. Toyoshima, "Miniaturized multi-platform free-space laser-communication terminals for beyond-5G networks and space applications," Photonics, vol. 11, no. 6, 545, June 2024.
- (29) ソフトバンク, "ソフトバンク, ルワンダ政府と協力して世界で初めて成層圏からの5G通信試験に成功," 2023年10月17日プレスリリース. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20231017_02/
- (30) Saudi Press Agency, "World-first trial of 5G HAPS technology takes place in saudi arabia in the Red Sea project," 2022年3月3日. <https://www.spa.gov.sa/2334089>
- (31) NICT, "世界初, 高度約4 km 上空から38 GHz 帯電波での5G通信の実証実験に成功," 2024年5月28日プレスリリース. <https://www.nict.go.jp/press/2024/05/28-1.html>
- (32) ソフトバンク, "NICTの「Beyond 5G 研究開発促進事業(電波有効利用型)」および「革新的情報通信技術(Beyond 5G (6G))基金事業」に係る令和5年度新規委託研究課題に採択," 2023年11月6日プレスリリース. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20231106_02/
- (33) NTTドコモ, "HAPSを介した携帯端末向け直接通信システムの早期実用化に向けた開発の加速と実用化後の利用拡大を見据えた高速大容量化技術の研究開発を開始," 2023年12月7日プレスリリース. https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_231207_00.pdf
- (34) Space Compass, "NEDO 公募「経済安全保障重要技術育成プログラム」における「HAPSによるリモートセンシングを用いたMDAシステムと運航管理技術の開発・実証」プロジェクトの採択について," 2024年7月30日プレスリリース. <https://space-compass.com/news/000070.html>
- (35) 新明和工業 HP, "固定翼型無人航空機「XU-S」の研究開発." <https://www.shinmaywa.co.jp/rd/rd03.html>

(2024年11月6日受付, 2025年2月21日再受付)

大津留 豪 (正員)

平31 慶大・理工・電気電子卒. 令2 同大学院修士課程了. 同年国立研究開発法人情報通信研究機構入構. 以来, 非地上系ネットワークに関するリソース/ネットワーク制御の研究・開発に従事. 現在, 同機構ネットワーク研究所ワイヤレスネットワーク研究センター宇宙通信システム研究室研究員. 博士(工学).



辻 宏之 (正員:フェロー)

昭62 慶大・理工・電気卒. 平元同大学院修士課程了. 平4 同大学院博士課程了. 同年郵政省通信総合研究所(現情報通信研究機構)入所, 現在に至る. 以来, 非地上系通信等の研究に従事. 現在, ワイヤレスネットワーク研究センター宇宙通信システム研究室上席研究員. 平8 本会学術奨励賞受賞. 平22 第58回電気科学技術奨励賞. 博士(工学).



宗正 康 (正員)

平21 東京理科大学大学院工学研究科(電気工学専攻)博士後期課程了. 平21 (株)IHI マリンユナイテッド, 船舶電気システムの基本設計に従事. 平24 東北大研究員, 光MEMSデバイスの研究開発に従事. 平25 国立研究開発法人情報通信研究機構, 令4 総務省総合通信基盤局, Beyond5G 推進に従事. 令6 情報通信研究機構に復帰, 衛星通信, 特に光衛星通信システムの研究開発に従事. 平25 電気学会論文誌E 英文特集号優秀論文賞受賞. 現在, 同機構ネットワーク研究所ワイヤレスネットワーク研究センター宇宙通信システム研究室主任研究員. 博士(工学).



大倉拓也 (正員)

平28 横浜国大大学院博士課程了. 平29 国立研究開発法人情報通信研究機構入構. 以来, 非地上系通信用アンテナに関する研究開発に従事. 現在, 同機構ネットワーク研究所ワイヤレスネットワーク研究センター宇宙通信システム研究室研究員. 博士(工学).



三浦 龍 (正員)

昭59 横浜国大大学院修士課程了. 同年郵政省電波研究所(現情報通信研究機構)入所. 以来, 衛星通信, 成層圏中継, ITS, 無人航空機用通信等の研究に従事. 途中, 旧郵政省, 豪州 AUSSAT (現在の Optus), ATR に出向. 令2 上席研究員を最後に定年退職し, 現在 NICT ワイヤレスネットワーク研究センターワイヤレスシステム研究室主任研究員(非常勤). 博士(工学).



B5G/6Gに向けた 成層圏通信プラットフォーム(HAPS)の研究開発

R&D of High Altitude Platform Station (HAPS) towards B5G/6G

長手厚史 Atsushi Nagate[†] 表 英毅 Hideki Omote[†]
太田喜元 Yoshichika Ohta[†] 星野兼次 Kenji Hoshino[†]

Summary

2023年11～12月に開催されたWRC-23 (World Radiocommunication Conference 2023)においてHAPS (High Altitude Platform Station) の携帯電話基地局向け周波数帯の追加が決定され、HAPSへの注目が世界的に高まっている。ITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector)においても、6G (6th Generation mobile communication system) に向けて2023年11月にIMT-2030 フレームワーク勧告 (Recommendation ITU-R M.2160) が完成した。本勧告においてはデジタルディバイド解消のためのコネクティビティ強化がその包括的な要素として期待されている。HAPSは高度約20 kmの成層圏から最大で半径100 kmの超広域のエリアをカバーする通信プラットフォームであり、コネクティビティ強化の実現に向けて期待される。本稿では、成層圏通信プラットフォームの概要、WRC-23における周波数帯追加のための干渉調整や通信システム開発、エリア設計に不可欠となるHAPS電波伝搬モデルの研究開発、超広域のカバーエリアを実現するためのHAPS移動通信システムの研究開発、また、2023年9月に実施した世界初となる成層圏環境での5G実証実験について解説する。

Key Words

Beyond 5G, 6G, HAPS, 成層圏, 移動通信システム

1 はじめに

2023年11～12月に開催されたWRC-23 (World Radiocommunication Conference 2023) においてHAPS (High Altitude Platform Station) の携帯電話基地局向け周波数帯の追加が決定され、HAPSへの注目が世界的に高まっている⁽¹⁾。ITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector) が規定する無線通信規則において従来、携帯電話向け周波数の電波の利用が国際的に認められている2 GHz帯に加え、WRC-23において新たに700-900 MHz帯、1.7 GHz帯、及び2.5 GHz帯の追加が決定した。これにより、各国・地域でHAPSによるモバイルブロードバンド通信を導入する際に、周波数帯の柔軟な選択が可能となる。

6G (6th Generation mobile communication system) に向けても、ITU-Rにおいて2023年11月にIMT-2030 (6G) のフレームワーク勧告 (Recommendation ITU-R M.2160) が完成した⁽²⁾。図1にIMT-2030の利用シナリオを示す。IMT-2020 (5G) における利用シナリオであるeMBB (enhanced Mobile BroadBand), URLLC

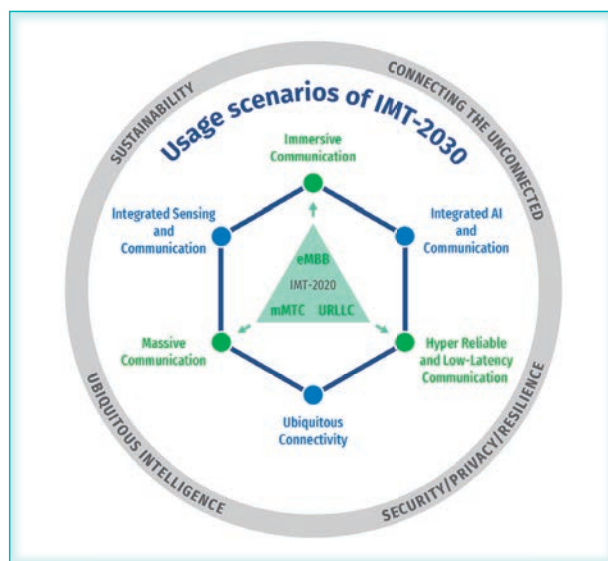


図1 6Gの利用シナリオ

(Ultra-Reliable and Low Latency Communications), mMTC (massive Machine Type Communications) をそれぞれ更に発展させる Immersive Communication, Hyper Reliable

* 本B-plusでは、用語は①文部省 (文部科学省) 学術用語集 電気工学編, ②本会編の改訂電子情報通信用語辞典, ③本会編のエンサイクロペディア電子情報通信ハンドブック、に基づき統一している。

本稿中の「プラットフォーム」は、上記①に従うと「プラットフォーム」であるが、ここでは著者の希望により「プラットフォーム」で掲載した。

[†] ソフトバンク株式会社, 東京都
SoftBank Corp., Tokyo, 135-0064 Japan

and Low-Latency Communication (HRLLC), Massive Communication の三つの利用シナリオに加え、分散コンピューティング、AI アプリケーションのサポートや AI の活用による IMT-2030 の高度化を目指す AI and Communication, センシングによる新たなアプリケーションやサービスの実現を目指す Integrated Sensing and Communication, 現在、十分にカバーされていないエリアの接続性の向上を目指す Ubiquitous Connectivity の新たな三つの利用シナリオを含む、計六つの利用シナリオが示されている。また、その包括的要素として、Sustainability, Ubiquitous Intelligence, Security and Resilience とともに Connecting the Unconnected が掲げられ、デジタルディバイド解消のための接続性強化が期待されている。

HAPS は高度約 20 km の成層圏から最大で半径 100 km の超広域のエリアをカバーする通信プラットフォームであり、6G で目指す接続性強化の実現に向けて期待されており、我が国の Beyond 5G (6G) の実現に向けた戦略においても、通信カバレッジの拡張性を実現する手段として位置付けられている⁽³⁾。

本稿ではまず成層圏通信プラットフォームの概要を述べた後に、HAPS 設計、開発の基盤となる成層圏からの電波伝搬、及び国際標準化動向を、次に HAPS 移動通信システムの全体像を現在の研究開発状況も踏まえて述べ、最後に 2023 年 9 月に実施した成層圏通信実証実験の概要を述べる。

2 成層圏通信プラットフォーム

HAPS は気流の安定している高度約 20 km の成層圏を飛行する気球、飛行船、飛行機などのプラットフォームに搭載される無線中継局である。図 2 に示すとおり、成層圏 (Stratosphere) は我々の生

活する対流圏 (Troposphere) のすぐ上に位置する。36,000 km 上空の静止衛星 (GEO Satellite: Geostationary Earth Orbit Satellite) はもとより、高度約 1,000 km に位置する低軌道衛星 (LEO Satellite: Low Earth Orbit Satellite) と比較してもはるかに低高度にある。また、成層圏は 1 年を通して風速が比較的低速であり、機体の安定した運用にも適している。

成層圏で長期間連続的なサービスを提供するためには機体として無人機が望ましい。無人機は軽航空機 (Lighter than air aircraft), 重航空機 (Heavier than air aircraft) に分類される。軽航空機としてはヘリウムガスによる浮力を利用する気球や飛行船があり、重航空機としては固定翼のソーラープレーンが代表的である。サイズや重量、通信装置などのペイロードへの許容重量や消費電力、機動性、定点滞空性能、コストなどについては機体ごとにそれぞれ特徴がある⁽⁴⁾。気球や飛行船は大形化により搭載可能な通信装置を大形化しやすい利点がある一方で、離着陸時やサービス提供場所への移動時に機体制御が容易ではなく、時間を要する点が課題である。これに対してソーラープレーンは災害時などに求められる機動性が高く、旋回飛行により半径数 km での定点滞空が可能である。機体サイズ (翼長) はおよそ 20 m から 80 m であり、機体サイズに応じて小形から大形まで様々なペイロードを搭載可能である。このような特徴から、ソーラープレーン型の成層圏プラットフォームには特に高い期待が寄せられており、多数の機体開発が行われている^{(4), (5)}。

成層圏は高高度であり、遠方に対しても高仰角となることから地上への見通しが良好である。このため、超広域のカバーエリアを期待できる。高度 20 km では、水平距離 50 km, 100 km における仰角はそれぞれ 22 度, 11 度であり、このような広域においても良好な見通し特性が得られることが分かる。一方、高高度ではあるが高々 20 km 程度

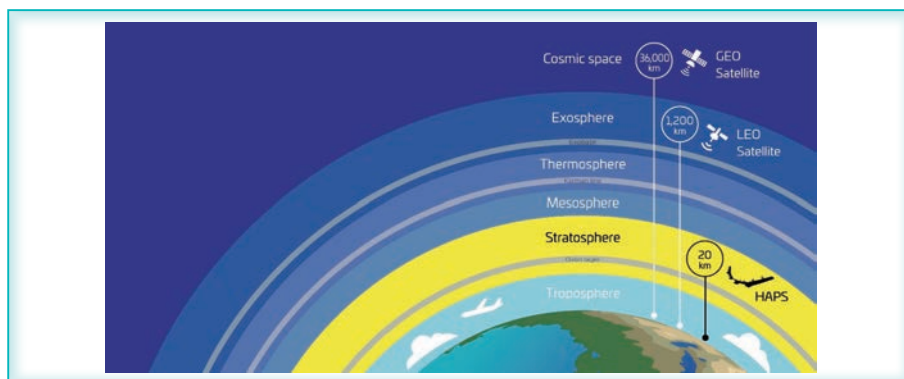


図 2 成層圏 (Stratosphere)

であることから、衛星通信とは異なり伝搬遅延時間は短い。特に、広域をカバーする場合には高度よりも水平距離の影響が大きくなり、地上移動通信とほぼ同等の遅延特性となる。このため、5G以降で期待される高信頼低遅延通信である URLLC、それを更に発展させる HRLLC を広域で実現するためのプラットフォームとしても有望である。

また、伝搬遅延時間と同様に伝搬損についても衛星通信と比較して小さい。低軌道衛星、静止衛星との伝搬距離の違いはそれぞれ約 30 倍、約 1,000 倍であり、自由空間伝搬損で約 30 dB、約 60 dB もの差が生じる。これらのことから、HAPS は最大 100 km と広域をカバーすることが可能でありながら、高度は高々 20 km と衛星通信と比較して地上に近く、低遅延通信や、低伝搬損に伴う高速大容量通信の実現が容易な上空プラットフォームであると言える。更に、多数の移動衛星から成る衛星コンステレーションによりサービス展開を行う低軌道衛星と異なり、HAPS は最小 1 機体からエリア展開を行うことが可能であり、カバーエリアやトラヒックのニーズに応じた柔軟な展開が可能であることも特徴である。

3 HAPS 電波伝搬モデル

本章では、まず HAPS で想定される電波伝搬環境と HAPS に必要な電波伝搬モデルとして、干渉検討用電波伝搬モデルとシステムデザイン用電波伝搬モデルについて述べる。次に、その国際標準化の状況について、昨今の進捗と併せて述べる。

3.1 HAPS で想定される電波伝搬環境と電波伝搬モデル

図 3 は HAPS ー地上間で想定される電波伝搬環境を示す⁽⁶⁾。まず大気ガス吸収や降雨減衰等の対流圏での電波伝搬特性が必要不可欠である。また、

HAPS のカバーエリアには、山岳地帯、森林地帯、市街地、郊外地、開放地等様々な電波伝搬環境が含まれるため、これらの電波伝搬環境に対応した電波伝搬モデルが必要不可欠である^{(7)~(10)}。

HAPS を通信ネットワークインフラとして運用する場合、成層圏から発信する電波伝搬特性を正確に推定する必要がある。その推定に必要な手法として HAPS 向けの「電波伝搬推定法」があり、この推定法は、主に「干渉検討用電波伝搬推定法」と「システムデザイン用電波伝搬推定法」で構成されている。これらの推定法は、図 3 に示した HAPS で想定される電波伝搬環境に応じて考慮される必要がある⁽¹¹⁾。

干渉検討用電波伝搬推定法は、隣国間や異なる無線通信システム間の電波干渉を調整するために不可欠な推定法である。隣国やほかの無線システム等へ与える影響を定量的に評価する干渉量は、主に場所率や時間率で評価されることが多いため、干渉検討用電波伝搬推定法は伝搬損特性を場所率や時間率で表す「干渉検討用伝搬損失モデル」で構成される⁽⁶⁾。一方、システムデザイン用電波伝搬推定法は、HAPS の通信エリアの設計を行う際に、機体数や配置を詳細に検討するための重要な推定法であり、主に送受信のポイントを特定して、その間の伝搬損特性を高精度に表す「システムデザイン用伝搬損失モデル」と電波伝搬遅延特性や電波到来角特性を表す「システムデザイン用時空間伝搬モデル」から構成されている。

3.2 HAPS 電波伝搬モデルの国際標準化状況

干渉検討用電波伝搬推定法は、2023 年の世界無線通信会議 (WRC-23) の議題検討のため、2019 年の世界無線通信会議 (WRC-19) において 2021 年 7 月までの完成が求められていたことから、筆者らは、HAPS 対応電波伝搬推定法の開発と国際標準化活動に取り組んできた。そして、2021 年 6 月に開催された電波伝搬を所掌する ITU-R SG3

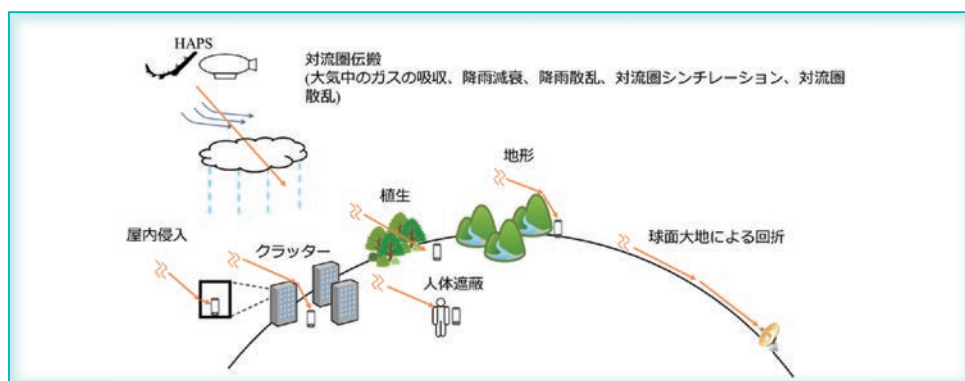


図 3 HAPS で想定される電波伝搬環境

ITU-R SG3	ベースライン	オプション (これらの減衰要因がある環境に対して適用可能)			
	対流圏+地形	クラッタ	屋内侵入	植生	人体遮蔽
干渉検討用 伝搬損失モデル 標準化進捗範囲	使用条件を整理 して標準化達成	新規追加(提案モデル 議長報告記載) 日本提案モデル	新規追加 (既存勧告参照)	新規追加(提案モデル 標準化達成) 日本提案モデル	
システムデザイン用 伝搬損失モデル	継続検討	新規追加(提案モデル 標準化達成) (今後周波数拡張予定) 日本提案モデル	将来の勧告化へ向けて 提案モデル議長報告 記載 (新勧告の策定予定) 日本提案モデル	新規追加(提案モデル 標準化達成) 日本提案モデル	新規追加(提案モデル 標準化達成)
システムデザイン 用時空間伝搬 モデル	測定・モデル 開発推進中	新規追加(提案モデル 一部標準化達成) (今後他の特性追加予定) 日本提案モデル	勧告改訂、新報告 作成に向けた 議長報告へ記載	測定・モデル 開発推進中	新規追加(提案モデル 一部標準化達成) (今後他の特性追加予定) 日本提案モデル

図4 HAPS 電波伝搬モデルの国際標準化状況 (2024 年 7 月時点)

(Study Group 3) 関連会合において干渉検討用電波伝搬推定法の国際標準化を達成した⁽¹²⁾。また、システムデザイン用電波伝搬推定法の一部についても国際標準化を達成した。なお、本成果はWRC-23でHAPS向け新周波数帯を追加する一助となった⁽¹⁾。その後も、主にシステムデザイン用電波伝搬推定法の国際標準化活動を推進している。図4は2024年7月時点でのHAPS電波伝搬モデルの国際標準化の状況を示す。日本は、HAPSで想定される各電波伝搬環境における各電波伝搬モデルの開発と国際標準化活動を主導しており、筆者らは残るシステムデザイン用電波伝搬推定法の研究開発と国際標準化活動を進めている。次に、その研究開発の一例を示す。

3.3 HAPS 電波伝搬モデルの研究開発の一例

植生環境におけるシステムデザイン用時空間電波伝搬モデルを開発するために、ヘリコプター（基地局）と森に囲まれた道路内にある電測車（移動局）の間で電波伝搬測定を実施し、移動局側電波到来角特性を取得した⁽¹³⁾。図5(a)に、測定結果の一例を示す。図5(a)の横軸は到来角度を示しており、その角度は図5(b)の立面図と一致している。0度は真下方向、180度は真上方向、90度は基地局と反対方向の水平方向、270度は基地局方向の水平方向を示す。図5(a)では基地局の方向は240度(270度-30度)であり、基地局の水平方向と移動局がある道路方向との間の道路角は90度である。また、図5(c)は測定結果から推察される電波の到来方向である。図5(a)から、基地局方向(240度)と基地局と反対方向(120度)から電波が到来していることが分かる。これらは、それぞれ図5(c)

の透過波と後方の植生による反射波または散乱波であると考えられる。また、上空(120度~240度の間)からも広く電波が到来している。これらは図5(c)における樹冠による散乱波であると考えられ、都市部などでは観測されない到来波である。今後、追加測定を実施して、これらの測定結果から得られた知見を基に植生環境における時空間電波伝搬モデルを開発し、国際標準化活動を推進する。また、ほかの環境における時空間電波伝搬特性も併せて解明する。

4 HAPS 移動通信システム

HAPSは1機で最大半径100kmの超広域エリアをカバーすることから、移動通信システムへの利用に向けては単位面積当りの通信容量の向上や端末収容能力の改善が求められる。本章では、HAPSの大容量化に向けて、デジタルビームフォーミング技術やMassive MIMO (Multiple Input and Multiple Output) 技術を応用した筆者らの取り組みについて説明する。

HAPS移動通信システムの構成例を図6に示す。HAPS移動通信システムはHAPSとゲートウェイ局(GW局)間のフィードリンク回線と、HAPSと端末(UE: User Equipment)間のサービスリンク回線から成る。端末は最大半径100kmで通信可能なLTEや5G NRに準拠した端末を使用できる。フィードリンクは広帯域なミリ波帯を用いるため大容量化が比較的容易である一方、サービスリンクは6GHz以下の狭い帯域で広域エリアをカバーするため大容量化が課題となる。サービスリンクにおいて単位面積当りの通信容量を改善する方法として、

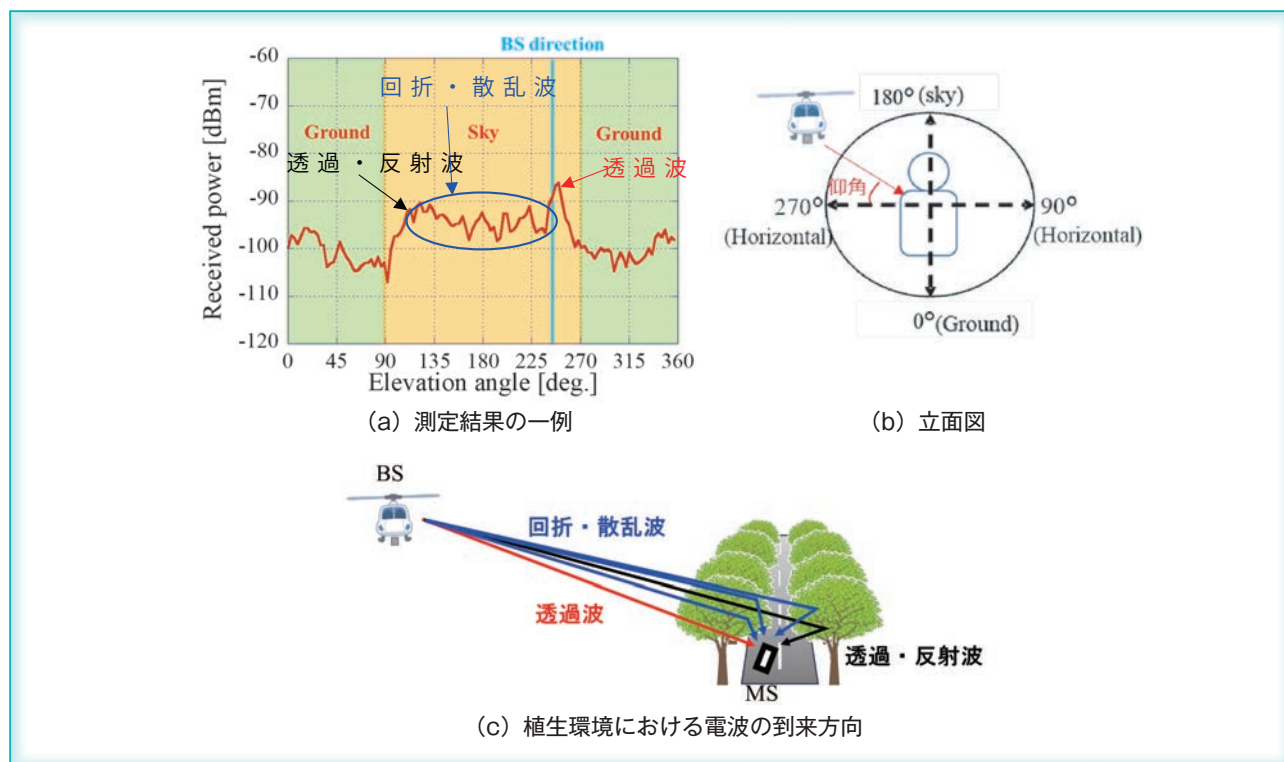


図5 植生環境における電波伝搬測定

地上基地局システムにおける複数セクタ局と同様にマルチセル構成が有効である。図6は7セル構成の例であるが、セル数を更に増やして1セル周波数繰り返しとすることで、周波数利用効率及び通信容量の向上が見込める。また、更なる大容量化に向けてはMassive MIMO技術の利用（マルチユーザ構成）も考えられる。端末のチャネル情報や位置情報等を用いてマルチユーザMIMO伝送を行うことで、アンテナ利得の向上とユーザ間干渉の低減により大幅な通信容量の改善も期待できる。

これらの構成を前提としたサービスリンクにおける高度化の取組みとして、筆者らは、主にマルチセル構成を対象として安定したエリア形成を行うフットプリント固定技術（4.1）、セル配置の最適化によりエリア内の通信容量等を最適化するビーム最適化制御技術（4.2）、マルチセル及びマルチユーザ構成を対象としてHAPSの柔軟な展開を実現する周波数共用技術（4.3）の研究開発を行っている。本章では、以降それぞれの取組みについて説明する。

4.1 フットプリント固定技術

HAPSの機体はソーラープレーン、気球、飛行船等、様々検討されているが、いずれの機体においても鉄塔やビルの屋上に固定設置される地上基地局とは異なり、飛行に伴って位置や姿勢が変化する。こ

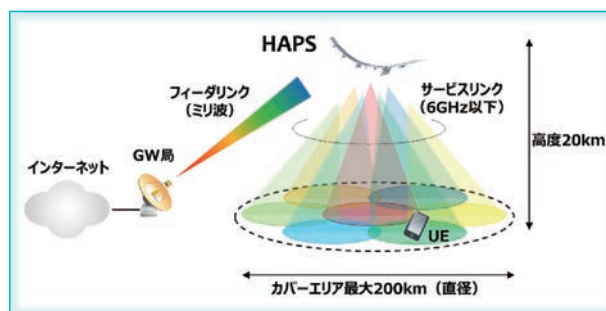


図6 HAPS 移動通信システムの構成例

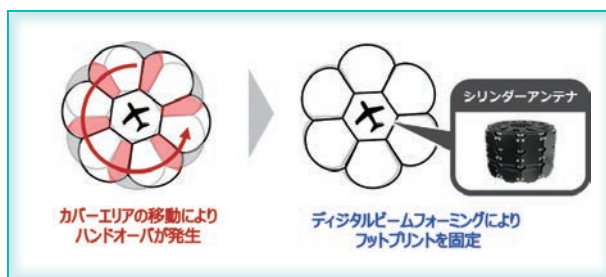


図7 フットプリント固定技術

れにより、地上の受信レベル等が大きく変動し、サービスエリア（フットプリント）が安定しないことが課題となる。また、マルチセル構成においては、在圏セルが頻繁に変わることでハンドオーバーが頻発することが課題となる。

この課題に対し、図7に示すシリンダ形状の多素子フェイズドアレーアンテナ（シリンダアンテナ）



(a) 係留気球



(b) アンテナ搭載の様子

図 8 上空プラットフォームを用いた屋外実証試験

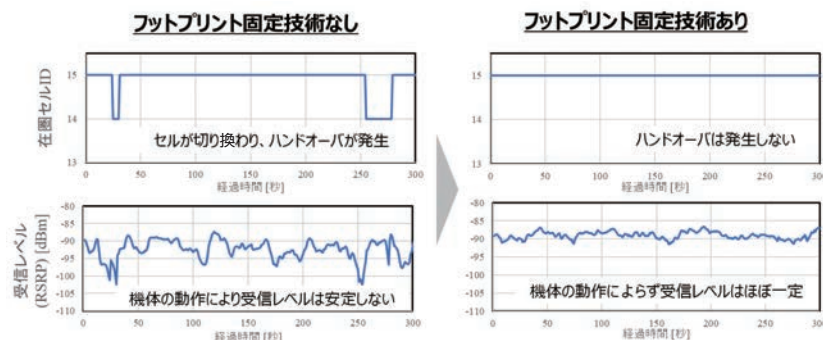


図 9 フットプリント固定制御の実験結果の一例

を用いて機体の旋回に応じたビームステアリング制御を行うフットプリント固定制御法を提案している⁽¹⁴⁾。同図は機体が方位角方向に左回転した場合の一例であるが、垂直及び水平方向の三次元的なビームステアリング制御により方位角の回転のみならず、移動や仰角方向の回転にも対応が可能である。

提案方式の有効性を確かめるため、試作装置を用いた屋外実証試験も行っている⁽¹⁵⁾。実証試験では図 8 に示すようにシリンダアンテナの試作装置を係留気球に搭載し、高度約 250 m まで上昇させて半径数十 km のカバーエリア内の通信品質の安定性を検証した。エリア内の定点での在圏セル ID 及び受信レベルの一例を図 9 に示す。上空の風の影響により機体が常に回転及び移動する環境下でも、フットプリント固定制御によりハンドオーバーの発生を防ぎ、受信レベルも安定化できることを確認した。

4.2 ビーム最適化制御技術

HAPS のカバーエリア内は人口密集地や人が少ない山間部等、ユーザやトラヒックの分布が地理的・時間的に偏在することが想定される。マルチセル構成において、この偏りを考慮して各セルの配置（水平・垂直ビーム方向及びビーム幅）を最適化するこ

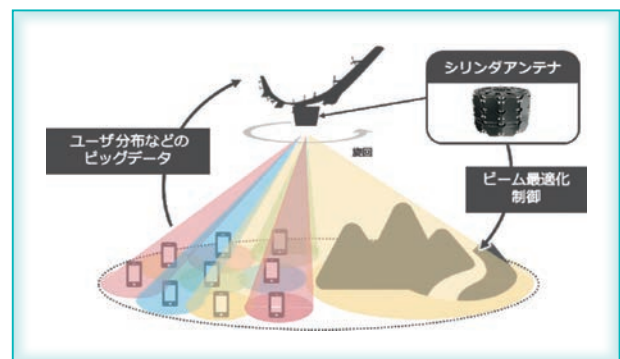


図 10 ビーム最適化制御技術

とにより、一様に配置する場合に対して大幅に通信容量を増大できる（図 10）。しかし、最適化対象のセル数が増えると制御すべきパラメータの組合せが指数関数的に増大し、現実的な時間内でのパラメータの探索が困難となる。

本課題に対し、遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を用いた低演算量のビーム最適化法を提案している。例えば、文献 (16) では複数のセルをグループ化してグループごとに GA による最適化を行う共進化アルゴリズムを組み合わせることにより、20 セルを超えるセル数でも効率的に最適化が可能であることを明らかにした。

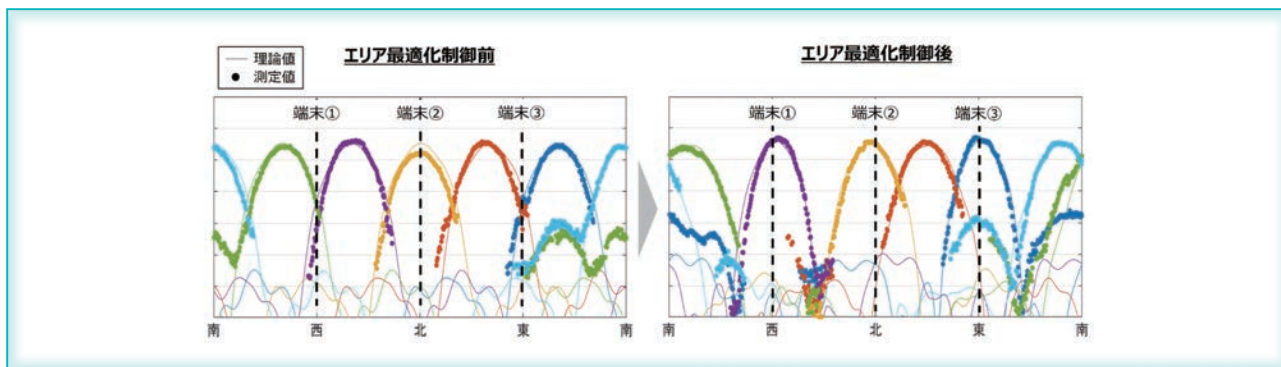


図 11 エリア最適化制御の実験結果の一例

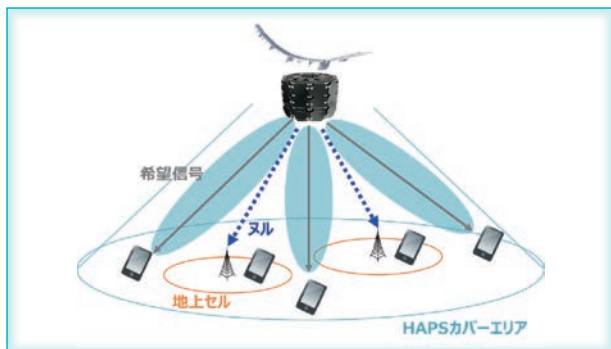


図 12 ヌルフォーミングによる HAPS－地上間周波数共用

ユーザの位置情報に基づくビーム最適化制御の基本検証を屋外にて行った⁽¹⁷⁾．ここではシリンダアンテナを高さ 20 m の高所作業車の作業床に搭載し、アンテナを中心に 3 台の端末をそれぞれ西、北、東に配置した．エリア最適化前後における 6 セルのビームパターンを一例を図 11 に示す．合計スループットを目的関数として最適化制御を行ったところ、端末の位置情報に基づいて自動的に各ビームが端末方向を向き、合計スループットが大幅に改善することを確認した．

4.3 HAPS－地上システム間周波数共用技術

現在 HAPS 向け周波数として地上システムで広

く利用されている周波数帯が ITU-R において特定されている⁽¹⁾．この一部を HAPS 専用の周波数として割当ができれば HAPS 及び地上システムとで独立したエリア展開が可能だが、周波数有効利用の観点では同一の周波数帯域を使用することが望ましい．この場合、HAPS－地上システム間の同一周波数干渉による周波数利用効率の劣化が課題となる．そこで、同一周波数干渉を抑圧または回避することで周波数利用効率の劣化を抑える周波数共用技術の検討を行っている．

マルチセル構成においては、前節で示したビーム最適化方式を拡張して、地上システムに対する SI 比の劣化量等を制約条件に加えることで、地上システムと HAPS エリアの共存を図る方式を提案している⁽¹⁸⁾．一方、マルチユーザ構成向けには、図 12 に示すようにマルチユーザ MIMO 伝送と地上基地局の方向に対するヌル点の形成(ヌルフォーミング)を同時に行うことで、地上セルへの干渉を抑圧しつつ、高い周波数利用効率を実現する周波数共用方式を提案している⁽¹⁹⁾．

ヌルフォーミングを用いた HAPS－地上システム間の周波数共用の実証試験を 4.1 と同様の上空プラットフォーム及び高度で行った⁽²⁰⁾．図 13 の実験結果に示すとおり、ヌルフォーミング制御によ

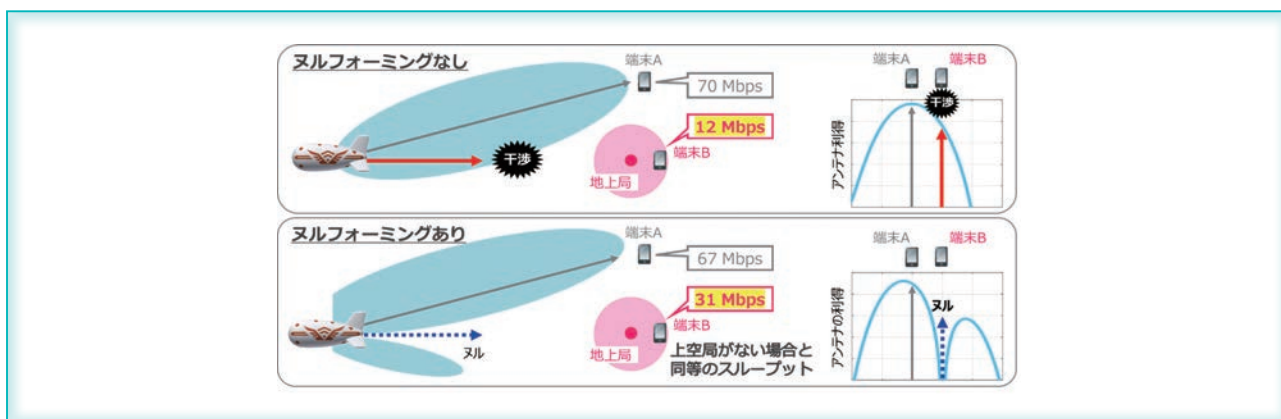


図 13 ヌルフォーミング制御の実験結果の一例

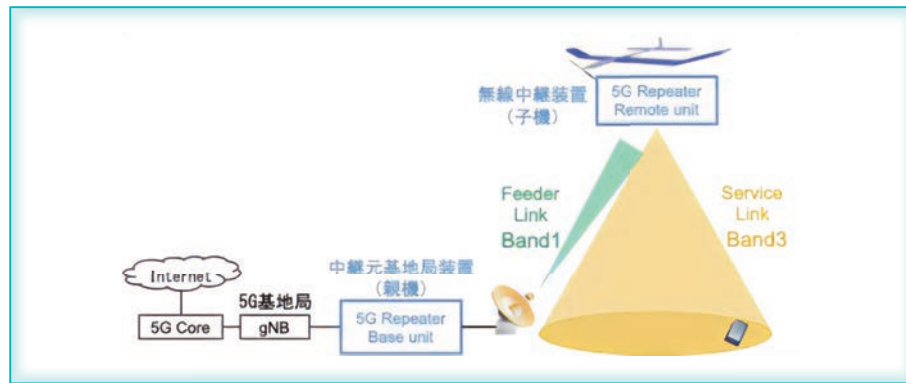


図 14 システム全体構成

り地上局エリアに対する干渉を抑圧することで、地上局在圏端末のスループットの劣化を回避し、HAPSー地上システム間で周波数共用が可能であることを確認した。

5 成層圏環境での 5G 実証実験

本章では 2023 年 9 月に実施した成層圏環境での HAPS 無線中継システムによる 5G 実証実験について説明する。

5.1 HAPS 無線中継システム

筆者らは、小形 HAPS に搭載可能な軽量・低消費電力の 5G NR 対応の HAPS 無線中継システムを開発し、高度約 16 km の成層圏において、HAPS と携帯端末との 5G モバイルダイレクト通信を実証した^{(21),(22)}。

図 14 に HAPS 無線中継システムの全体構成を示す。HAPS 無線中継システムは HAPS と携帯端末間を接続するサービスリンクと、HAPS と地上システム間を接続するフィーダリンクの二つの無線回線を有する。HAPS 無線中継装置は地上の 5G 基地局（gNB: next Generation NodeB）に有線接続された中継元基地局装置（親機）と HAPS に搭載された無線中継装置（子機）で構成される。親機では 5G 基地局から送信された 5G NR 信号（1.8 GHz 帯）を 2 GHz 帯のフィーダリンク周波数に周波数変換し、HAPS の子機に向けて送信する。子機では受信した 2 GHz 帯の信号を 1.8 GHz 帯の元の送信周波数に変換後、増幅して地上エリアに送信する。なお、HAPS は上空で傾き・旋回しながら定点滞空することから受信レベル変動が発生する。そのため、子機では 5G NR の同期信号（PSS）を相関処理することでフィーダリンクの受信レベル変動を検出し、中継利得を補正している⁽²³⁾。

表 1 に HAPS 無線中継システムを構成する各装置の諸元を示す。本装置は 5 MHz 帯域の 5G NR

表 1 実験諸元

項目	中継元基地局装置（親機）	無線中継装置（子機）対親機	
		対親機	対端末
通信システム	5G NR		
送信周波数	1,965-1,970 MHz	2,155-2,160 MHz	1,845-1,850 MHz
受信周波数	2,155-2,160 MHz	1,965-1,970 MHz	1,750-1,755 MHz
信号帯域幅	5 MHz		
送信電力	5 W × 2 port	1 W × 2 port	5 W × 2 port
アンテナ種別	パッチアレーアンテナ	パッチアンテナ	
アンテナ利得	18 dBi	6 dBi	9 dBi

信号をそのまま周波数変換して中継する非再生周波数変換方式のリピータである。親機及び子機に中継器を 2 系統実装することで、2×2MIMO 伝送に対応し、送信 2port の送信電力は各 5 W である。また、子機は成層圏環境で動作することから、複数の温度センサとヒータにより温度管理・制御を行っている。親機のアンテナは利得が約 18 dBi の VH 偏波共用パッチアレーアンテナを用い、HAPS に搭載する子機のアンテナは対親機向けと地上エリア向けにそれぞれ利得が約 9 dBi と 6 dBi の VH 偏波共用パッチアンテナを用いた。

5.2 実証実験

実証実験はアフリカのルワンダで実施した。HAPS 無線中継システムの地上局（GCS: Ground Control Station）は Butare 空港の敷地内に設置し、HAPS は通信試験中、高度約 16 km の GCS 上空を旋回飛行した。HAPS は早朝に離陸し、約 4 時間 40 分かけて高度 16 km の成層圏に到達した。この日の Butare 空港上空の成層圏界面高度は、同時に実施した観測気球試験から 16.123 km であった。成層圏到達後は GCS を中心とした半径 2.5 km の円周上をおよそ 1 周 12 分の速度で旋回飛行を続け、

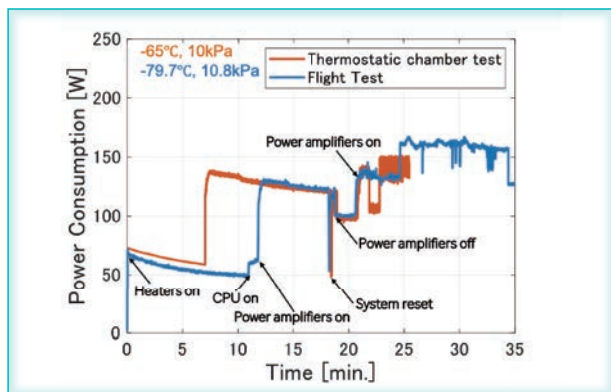


図 15 HAPS ペイロードの消費電力

約 73 分間、無線中継装置（子機）に電源供給を行い、その間コールドスタート試験や通信試験を実施した。

5.2.1 コールドスタート試験

HAPS 搭載機器（子機）への電力供給は電力消費低減のため、成層圏到達後に実施した。このときの外気温は約 -80°C 、気圧は 10 kPa 程度であった。子機では温度センサとヒータによる温度管理と各種制御を行っており、ヒータで装置各部を温め、各部の温度センサが動作温度に到達後、各部への電源供給を行っている。図 15 に成層圏での電源投入時間に対する子機の消費電力の推移を示す。図から、ヒータ動作後 11 分で CPU が動作し、12 分で電力増幅器、18 分で全ての温度センサが動作温度に到達しシステムを再起動後、21 分で起動完了している。その後、通信試験を実施することで消費電力が 160 W 程度に上昇していることが確認できる。また、同図には恒温槽（Thermostatic chamber）試験での子機の消費電力の推移も併せて示す。図から温度条件が異なるため CPU の動作開始時間は異なるが、電源投入 12 分後以降は消費電力の推移が成層圏環境と恒温槽試験環境でほぼ同一となっていることから、恒温槽試験の妥当性が確認できた。

5.2.2 通信試験

通信試験では HAPS 無線中継システムを用いて中心周波数 1847.5 MHz の 5G NR 信号（5 MHz 帯域幅）の無線中継を行い、通常の 5G NR 対応の携帯端末でデータ通信や Zoom 会議が良好に行えることを確認した。測定結果の一例として、図 16 に HAPS 旋回時における端末の受信スループット特性を示す。同図から 5 MHz 帯域幅、 2×2 MIMO 使用時のシステム上限となる 32 Mbit/s に対して平均 22 Mbit/s のスループットが得られており、 2×2 MIMO の 64 QAM で期待どおりに通信できてい

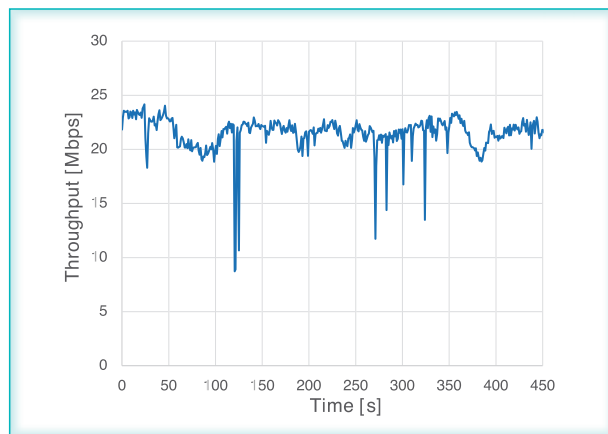


図 16 HAPS 旋回時のスループット

たことが確認できた。

6 まとめ

本稿では、WRC-23 における新規周波数の追加、6G におけるデジタルディバイド解消のためのコネクティビティ強化への期待を背景に、注目を集める HAPS について成層圏通信プラットフォームの概要、HAPS 電波伝搬モデルの研究開発と国際標準化、HAPS 移動通信システムの研究開発、及び成層圏環境における 5G 実証実験について述べた。HAPS の研究開発は着実に進められており、今後は早期の実用化によりデジタルディバイドの解消や迅速な災害対応の実現など社会課題の解決に貢献することが期待される。

謝辞 本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究（JPJ012368C07701）により得られたものです。

文献

- (1) ソフトバンク，“2023 年世界無線通信会議（WRC-23）において HAPS の携帯電話基地局向け周波数帯の追加が正式決定～各国・地域で HAPS の導入時における周波数帯の柔軟な選択が可能に、” Dec. 2023. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20231228_01/
- (2) Rec. ITU-R M.2160-0, “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond,” Nov. 2023.
- (3) 総務省，“令和 5 年版情報通信白書。”
- (4) S. Karapantazis and F. Pavlidou, “Broadband communications via high-altitude platforms: A survey,” IEEE Commun. Surv. Tutorials, vol. 7, no. 1, pp. 2-31, March 2005.
- (5) G. K. Kurt, M. G. Khoshkholgh, S. Alfattani, A. Ibrahim, T. S. J. Darwish, M. S. Alam, h. h. Yanikomeroglu, and A. Yonacoglu, “A vision and framework for the high altitude platform station

- (HAPS) networks of the future,” arXiv preprint arXiv:2007.15088, July 2020.
- (16) 表 英毅, 佐藤彰弘, 木村 翔, 田中翔馬, 林 合祐, 日景 隆, 山里敬也, “HAPS 対応電波伝搬モデルの開発と国際標準化,” 信学論 (B), vol. J106-B, no. 11, pp. 677-695, Aug. 2023.
- (17) Rec. ITU-R P.1812-4, “A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands,” 2015.
- (18) M. Ghoraiishi, J. Takada, C. Phakasoum, T. Imai, and K. Kitao, “Azimuth and delay dispersion of mobile radio wave propagation through vegetation,” Proc. 4th European Conf. Antennas propag., April 2010.
- (19) 中村光貴, 佐々木元晴, 鷹取泰司, “4.7 GHz と 66.5 GHz 帯における複数人体遮蔽時の屋内伝搬損失推定式,” 信学技報, AP2018-20, pp. 19-22, May 2019.
- (10) 伊藤優希, 岩井誠人, 笹岡秀一, “室内環境におけるフレネルゾーンに基づく人体遮蔽損失特性の評価,” 信学論 (B), vol. J101-B, no. 9, pp. 696-705, Sept. 2018.
- (11) ワイヤレス電力伝送と 5G 通信の連携・融合に向けた干渉対策と今後の展望, 橋本 修 (監修), 16 章, シーエムシー出版, 2023.
- (12) Rec. ITU-R P.1409-2, “Propagation data and prediction methods for systems using high altitude platform stations and other elevated stations in the stratosphere at frequencies greater than about 0.7 GHz,” 2021.
- (13) S. Kimura, A. Sato, and H. Omote, “Arrival angle characteristics at MS in high BS and vegetation environment,” ISAP2024, Nov. 2024.
- (14) K. Hoshino, S. Sudo, and Y. Ohta, “A study on antenna beamforming method considering movement of solar plane in HAPS system,” IEEE VTC2019-Fall, Sept. 2019.
- (15) ソフトバンク株式会社, “フットプリント固定技術を活用した高高度係留気球基地局の実証に成功 (プレスリリース),” 2022 年 6 月 22 日. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2022/20220622_01/
- (16) Y. Shibata, W. Takabatake, K. Hoshino, A. Nagata, and T. Ohtsuki, “Two-step dynamic cell optimization algorithm for HAPS mobile communications,” IEEE Access, vol. 10, pp. 68085-68098, June 2022.
- (17) ソフトバンク株式会社, “HAPS の通信容量の最大化を実現するエリア最適化技術の実証実験に成功 (プレスリリース),” 2023 年 12 月 20 日. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20231220_01/
- (18) Y. Shibata, W. Takabatake, K. Hoshino, A. Nagata, and T. Ohtsuki, “HAPS cell design method for coverage extension considering coexistence on terrestrial mobile networks,” IEEE Access, vol. 12, pp. 55506-55520, April 2024.
- (19) K. Tashiro, K. Hoshino, and A. Nagate, “Nullforming-based precoder for spectrum sharing between HAPS and terrestrial mobile networks,” IEEE Access, vol. 10, pp. 55675-55693, May 2022.
- (20) ソフトバンク株式会社, “HAPS と地上基地局との周波数共用を実現するヌルフォーミング技術の実証実

験に成功 (プレスリリース),” 2024 年 6 月 26 日. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2024/20240626_01/

- (21) ソフトバンク株式会社, “ソフトバンク, ルワンダ政府と協力して世界で初めて成層圏からの 5G の通信試験に成功,” 2023 年 10 月. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20231017_02/
- (22) 太田喜元, 小西光邦, 松浦一樹, 高木裕貴, 長谷川拓哉, 長手厚史, “HAPS 無線通信システムの成層圏実証実験,” 信学技報, AP2024-25, pp. 19-24, July 2024.
- (23) T. Hasegawa, M. Konishi, Y. Ohta, and A. Nagate, “An experimental study on automatic gain control in HAPS wireless repeater system,” Wirel. Commun. Netw. Conf., March 2023.

(2024 年 10 月 29 日受付, 2025 年 1 月 17 日再受付)

長手厚史 (正員)

2001 阪大大学院基礎工学研究科博士前期課程了。同年日本テレコム株式会社 (現ソフトバンク株式会社) 入社, 情報通信研究所配属。以来, 4G, 5G, HAPS の無線伝送方式, 無線回線制御方式の研究開発に従事。2016 阪大大学院情報科学研究科博士後期課程了。現在, ソフトバンク株式会社基盤技術研究室室長。IEEE 会員。博士 (情報科学)。



表 英毅 (正員)

1997 名大・理卒。1999 同大学院理学研究科博士前期課程了。同年日本テレコム株式会社 (現ソフトバンク株式会社) 入社。移動体通信システムの電波伝搬に関する研究に従事。ITU-R SG3 にて移動体通信の電波伝搬の標準化にも携わる。2009 早大大学院スポーツ科学研究科博士前期課程了。2023 名大大学院工学研究科博士後期課程了。現在, ソフトバンク株式会社基盤技術研究室新技術研究開発部部長。平 17 年度本会学術奨励賞, 第 33 回電波産業会電波功績賞各受賞。博士 (工学)。



太田喜元 (正員)

2000 室蘭工大・工・電気電子卒。2002 同大学院修士課程了。同年日本テレコム株式会社 (現ソフトバンク株式会社) 入社。以来, 移動通信システム, 移動伝搬, 無線中継システム, 干渉キャンセラ, HAPS 無線通信システム, 無線電力伝送の研究開発に従事。現在, ソフトバンク株式会社基盤技術研究室システムデザイン研究開発部部長。2023 東工大 (現東京科学大) 特任准教授兼任。平 20 年度本会学術奨励賞受賞。



星野兼次 (正員)

2007 芝浦工大大学院工学研究科修士課程了。同年ソフトバンクテレコム株式会社 (現ソフトバンク株式会社) 入社。以来, 4G, 5G システムにおける無線伝送技術の研究開発, 及び HAPS 移動通信システムにおける通信ペイロードの研究開発に従事。2021 東工大大学院博士課程了。2023 ソフトバンク株式会社基盤技術研究室無線技術研究開発部部長, 現在に至る。平 23 年度本会学術奨励賞受賞。博士 (工学)。



ドローンの仕組みと飛行のメカニズム

Drone Mechanisms and Flight

三輪昌史 Masafumi Miwa[†]

Summary

ドローンとは無人機の総称であるが、現在は「マルチコプタ」を示すことがほとんどである。マルチコプタは多発型ヘリコプタのことであり、正多角形の頂点にプロペラロータを持つ形状をしている。各プロペラロータの回転数を制御することで、上下方向の移動、機体姿勢の変化とそれに伴う水平移動が可能である。そのため、ほかの航空機よりも制御が容易、製作費が比較的安いという特徴がある。マルチコプタ型ドローンは、搭載されたカメラから転送された映像を見ながら操縦したり、上空からの映像を楽しむといったホビー用途のほかに、撮影した画像やドローン搭載の機器を用いた計測、物資の運搬といった実務運用にもその用途が広がっている。しかし、用途や実飛行の増加に伴い、事故事例の報告も増加傾向にある。本稿ではドローンとしてマルチコプタを題材とし、ドローンに関する研究に関心がある方、新しくドローン関連研究の開始を検討している方に向けて、ドローンシステムの構成、飛行のメカニズム、ドローンの飛行に関する制御方法、ドローン運用に関する法規、ドローンの認定制度、ドローンの運用例について解説した。

Key Words

ドローン、UAV、UGV、UMV、フライトコントローラ

1 はじめに

現在、ドローンとして広く認知されているのはマルチコプタ（多発型ヘリコプタ）である。このドローンは駆動部が全て電動モータであり、機体構造も簡単なので制御もやりやすい。そのためコストも抑えることができて広まっている。マルチコプタ以外にも、シングルロータヘリコプタや固定翼の飛行機タイプなど、いろいろな飛行ドローン UAV (Unmanned Aerial Vehicle) がある。また、地上を走行する UGV (Unmanned Ground Vehicle) や水上を走行する UMV (Unmanned Marine Vehicle)、有線式水中機もドローンと呼ばれることがある。いずれの形式においても、自動的に姿勢制御や位置制御、自動操縦ができることが特徴となっている。本稿ではこれらドローンに共通する仕組みを、マルチコプタ型ドローンを例として解説する。また筆者が行った実験についても紹介する。

2 各種ドローン

以下に各種ドローンの例を示す。図1は4発型のマルチコプタ型ドローンである⁽¹⁾。マルチコプ

タは4, 6, 8と偶数の頂点を持つ正多角形をしており、各頂点にモータに取り付けられたロータを配置している。ロータは「時計回り」と「反時計回り」のものが同数取り付けられている。これは反動トルクの相殺・制御のためである。例外的に3発機であるトライコプタもあるが、この場合はサーボモータでロータを傾斜させることで、シングルロータヘリコプタのように反動トルクを相殺・制御する。

図2はシングルロータ型ドローンの例である⁽²⁾。いわゆる「ラジコンヘリコプタ」に制御を行うフライトコントローラを取り付けたものになる。図3は飛行機型（固定翼機型）ドローンの例である⁽³⁾。これもラジコン飛行機にフライトコントローラを取り付けたものである。図4はエアボート型の水上



図1 4発型ロータマルチコプタ RTK-GPS, LTE 通信装置を搭載した運搬用大形機。

[†] 徳島大学, 徳島県
Tokushima University, Tokushima-ken, 770-8506 Japan

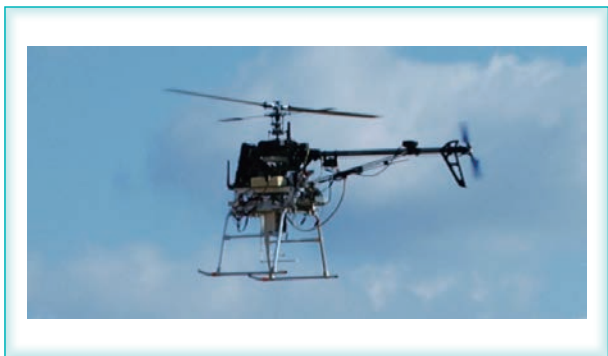


図2 シングルロータ型ヘリコプタ



図3 飛行機型ドローン 機上に地上との通信機とRTK-GPSのアンテナを搭載している。

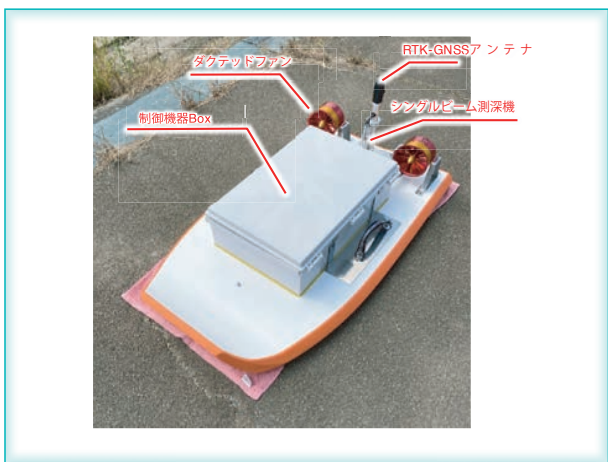


図4 エアボート型ドローン

ドローンである⁽⁴⁾。水中の浮遊物によるスラストの損傷を避けるために、船上にダクトファンを設置している。このように、いろいろなタイプのドローンがある。

3 ドローンシステム概要

3.1 ドローンの構成例

ここではマルチコプタを例としてドローンシステムの概要を説明する。図5はマルチコプタ型ドローンシステムの構成例を示す。まず、ドローン进行操作する装置としてラジコン送信機とGCS (Ground Control Station, 地上管制局) がある。ラジコン送信機とGCSは一体化したものもある。GCSはノートパソコンやタブレット、スマートフォン上で動作するアプリケーションソフトとして実装されることが多い。ラジコン送信機とドローンは専用電波や2.4 GHz帯で通信が行われる。GCSとドローンも専用電波や2.4 GHz帯, LTEを使った通信が行われる。これらの通信により自動操縦を含めた操作が行われる。

図6にマルチコプタ型ドローン内部の構成例を示す。ラジコン送信機からの操作はラジコン受信機からSBUS信号(双葉電子工業が開発したラジコン装置用のシリアル通信規格)としてFC (Flight Controller 4, フライトコントローラ) に伝えられる。FCはマイコンと3軸ジャイロセンサ, 3軸加速度センサ, 3軸コンパスなどから構成されており, 機体姿勢の検出とそれを用いた姿勢制御を行う。更に気圧センサ等を用いた高度制御やGPSを用いた位置制御を行う。また, フライトコントローラはXBeeといった無線通信機やLTE通信機を通じてGCSと通信する。フライトコントローラにはESC (Electric Speed Controller, モータドライバの別名) を介してモータが接続されており, モータには



図5 ドローンシステムの構成例

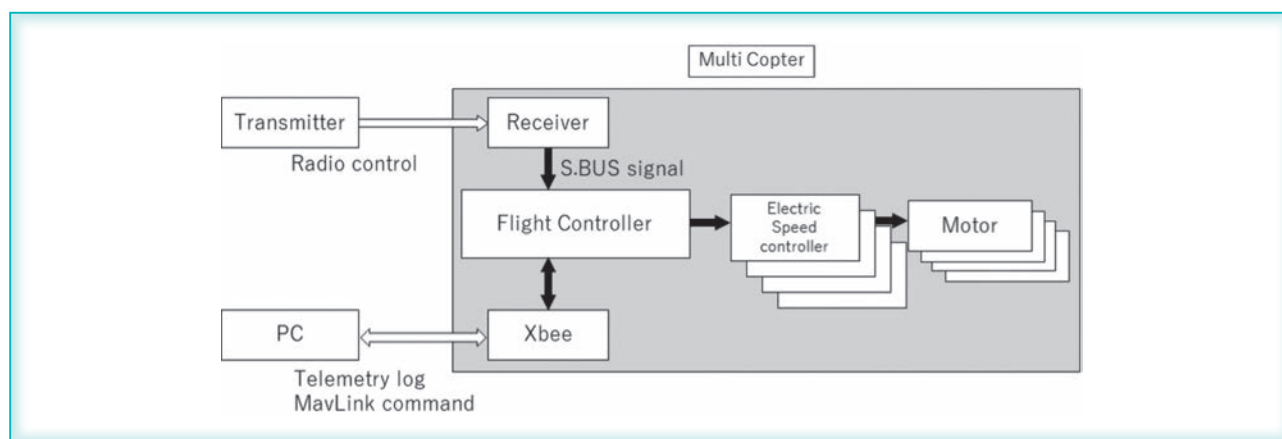


図6 マルチコプタの内部構成例



図7 ドローンの構成要素例

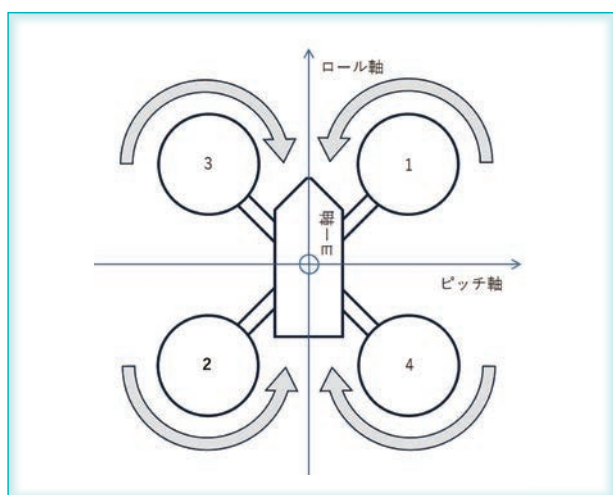


図8 クアッドコプタ（4発ロータ）のプロペラ回転方向

プロペラが取り付けられている。フライトコントローラはラジコン送信機や GCS からの操作と、姿勢や位置の情報から各モータの回転速度を決定し、PWM 信号として ESC に送信してモータを回転させ、推力を発揮して飛行する。図7に構成要素の例

を示す。

3.2 マルチコプタの飛行方法

3.2.1 マルチコプタの力学特性

図8に4発ロータマルチコプタのモデルを示す。機体の前後方向の軸をロール軸、機体の左右方向の軸を「ピッチ軸」、機体の上下方向の軸を「ヨー軸」と呼ぶ。

図中のプロペラは、上から見て1, 2がCCW（反時計方向）、3, 4がCW（時計方向）に回転する。プロペラの推力は、回転速度の二乗に比例する。図9(a)のように四つのプロペラの回転を同調させ、回転数を上げることで機体が上昇、回転数を下げると機体が降下する。四つのプロペラの推力の合力 F がドローンの重量と釣り合うと、ドローンは空中でホバリングする。

次に、姿勢制御について述べる。図9(b)のように機体の右側のプロペラの回転数を上げ、左側の回転数を下げる。このとき、推力の合力 F の大きさ

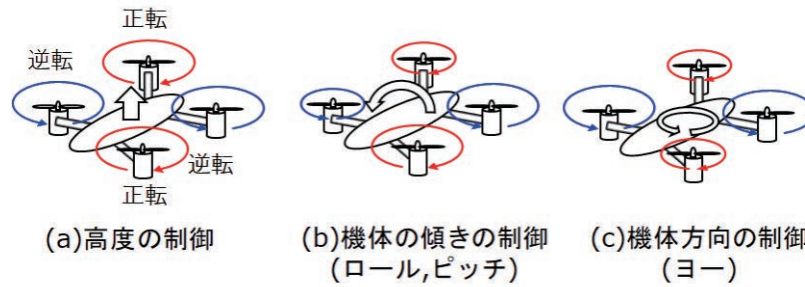


図9 マルチコプタの姿勢制御

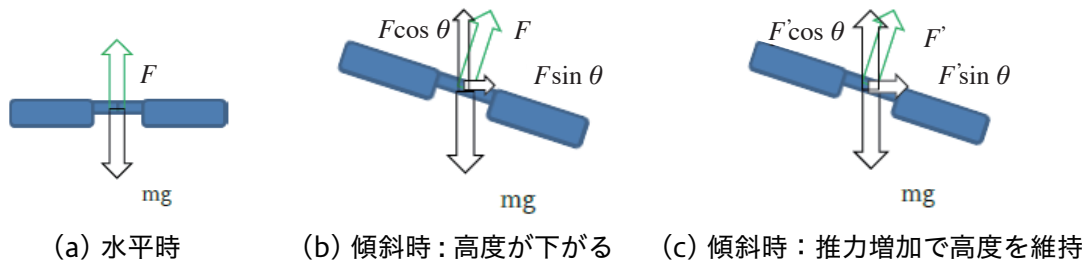


図10 機体の傾斜と水平移動

が変わらないように、例えば、右側のプロペラ回転数を上げて推力を Δf 上げ、左側のプロペラ回転数を下げて推力を Δf 下げる。そうすると、この推力の差分で機体はロール軸周りに左に回転する。逆に差分を付けると、ロール軸周りに右に回転する。同様に前後のプロペラの回転数に差動を付けることで、ピッチ軸周りの回転ができる。

次に、図9(c)に示すように、対角のプロペラをペアとして回転速度に差分を与える。このとき、推力の合力 F が変わらないように差動を付ける。右前と左後ろのプロペラの回転数を上げ、左前と右後ろのプロペラの回転数を下げる。前者のペアは回転方向がCCWなので、機体に働く反動トルクはCWである。後者は回転方向がCWなので、反動トルクはCCWである。回転数が一致しているときは、反動トルクは相殺しており、機体のヨー軸周りの回転は停止している。そして事例のように回転数に差動を与えると、CWの反動トルクが優位になり、機体はCWに回転する。反対にCCWの回転数を下げ、CWの回転数を上げると、機体はCCWに回転する。

次に、機体が θ だけロール軸周りに回転したところで左右の推力を同じにする。すると、機体は θ の傾斜を維持する。図10では、機体が θ 傾いているので、推力の合力 F も θ だけ傾く。その結果、

機体の左方向に $F \sin \theta$ の水平方向成分が発生し、それにより機体は左方向に移動し始め、最終的に空気抵抗と釣り合って一定速度で移動する。つまり、機体の傾きに移動速度が比例することになる。このとき、垂直方向成分は $F \cos \theta$ となる。 $F \cos \theta$ は機体重量より小さいため、機体は徐々に降下する。そこで、 $F \cos \theta$ が機体重量と等しくなるように、回転数を上げて F が大きくなるようにすることで、高度を保ちながら水平移動ができる。同様に、左側の推力を上げれば右方向に移動する。また、前後の推力に差動を与えれば前後方向に移動できる。このように、任意の方向に機体を傾斜させることで、その方向に機体は移動する。

以上、上下方向、ロール軸・ピッチ軸周りの回転、ヨー軸周りの回転、水平移動の方法について説明した。いずれも、プロペラの回転数により実現されている機動であり、モータ制御で実現できるのが、マルチコプタの特徴である。

3.2.2 マルチコプタの姿勢制御と高度制御

マルチコプタの姿勢制御について、PID制御を用いるブロック線図の例を図11に示す。ロール軸、ピッチ軸、ヨー軸の回転運動はそれぞれ独立だと考え、軸ごとに同様の制御系が組まれている。いずれの軸に関する回転も単純な回転角度に関する2階

微分の方程式で近似できる。

$$I\ddot{\theta} = T \quad (1)$$

ここで、 I は各軸周りの慣性モーメント、 θ は各軸周りの回転角度、 T は機体に作用するトルクであり、各プロペラ回転数の差動で生じるものである。

姿勢制御系は、現在の姿勢と目標姿勢との誤差を基に、まずはP制御で目標角速度を決定し、次に目標角速度と現在の角速度との誤差からPID制御にて出力を決定する。その出力からミキサと呼ばれるプログラムが各モータに配分する量を決定し、それにより機体（図中ではBody）の姿勢を制御している。ヨー軸に関しては、目標値が角度の場合と角速度の場合の二種類が用意されている。

以上の姿勢制御系により、マルチコプタの姿勢が安定化され、また目標値を与えることで操縦が可能となる。このとき機体の姿勢は安定するが、高度に

ついては手動操縦が必要である。

次に、同様の制御系を高度について行うことで、高度を維持することが可能になる。高度に関する運動も単純な2階微分の方程式で近似できる。

$$M\ddot{z} = F - Mg \quad (2)$$

ここで、 M は機体の質量、 z は高度、 F は機体に作用する推力、 Mg は機体に作用する重力、 g は重力加速度である。

図12に高度制御系のブロック線図の例を示す。この高度制御を姿勢制御と組み合わせることで、操縦が非常に楽になる。自転車に例えると、補助輪が付いた状態である。

3.2.3 マルチコプタの位置制御と自動操縦

姿勢制御と高度制御を同時に行うことで、マルチコプタの姿勢と高度は安定する。しかし、風などの

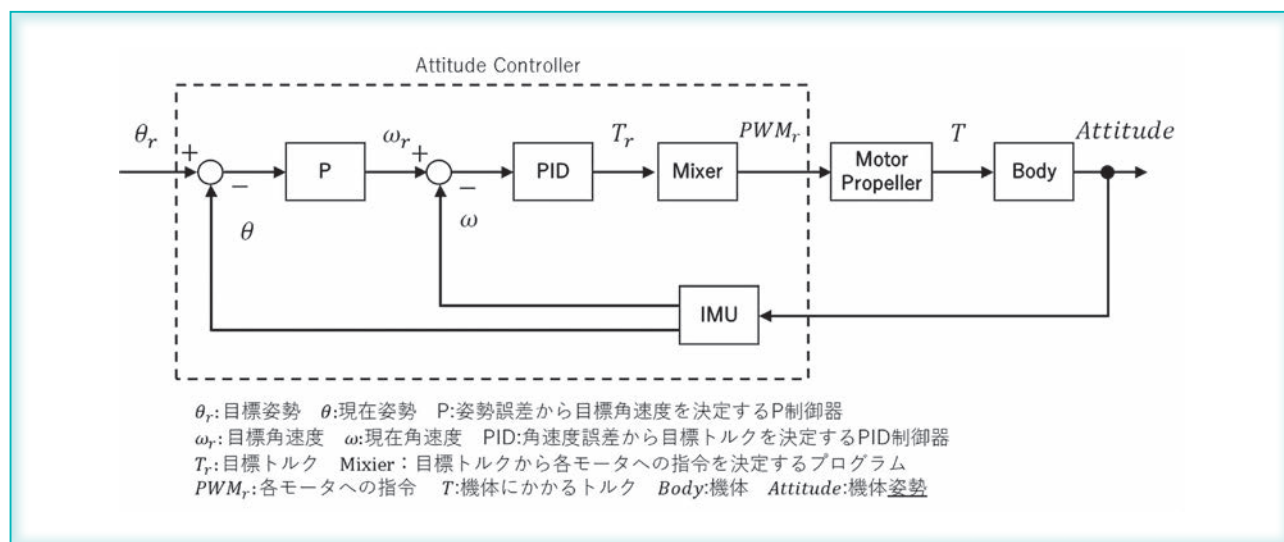


図 11 姿勢に関する制御系のブロック線図

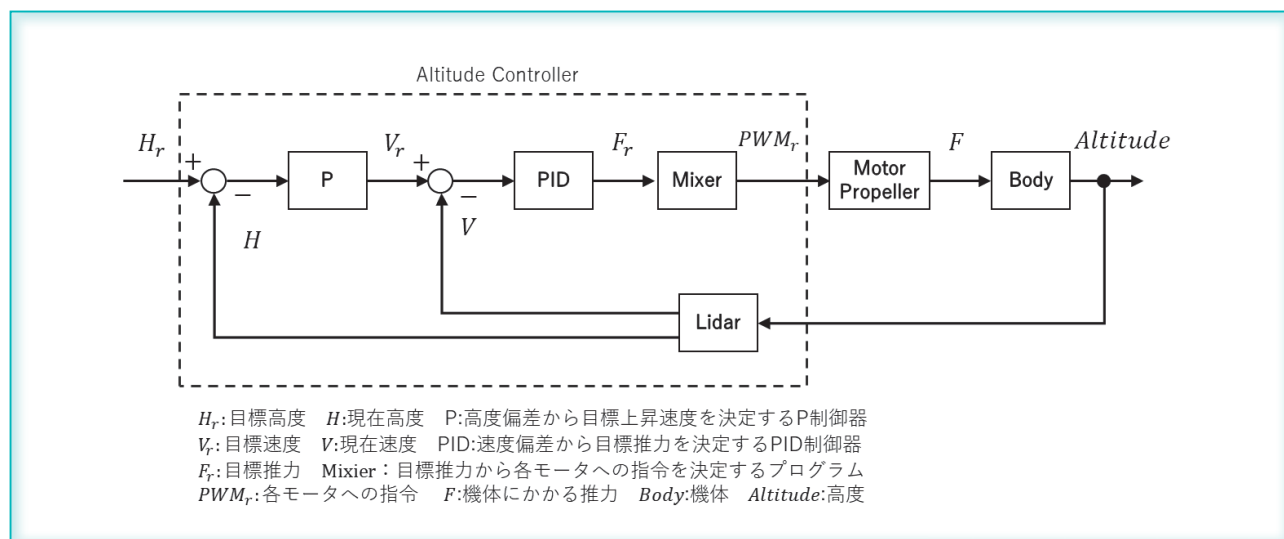


図 12 高度に関する制御系のブロック線図

外乱の影響で機体は流されるため、位置に関する補正が必要である。そこで、GPSを用いた位置制御系が構成されている。各軸の操作指令がニュートラルになったときの位置・高度をGPSや高度センサで測りし原点とする。次に、外乱による移動で発生した誤差をキャンセルするために、誤差に比例した目標速度をP制御で決定する。目標速度と現在速度（これもGPSで計測する）の誤差速度から目標加速度を決定し、これを前後方向（つまりピッチ軸・ロール軸周り）の目標姿勢角度として姿勢制御系に与えることで、位置を保持する位置制御が実施できる。図13に位置制御系のブロック線図例を示す。

次に、通過地点（WP: WayPoint）をリストとして、位置制御系に目標地点を渡していくことで、自

動操縦が可能となる。MavLink*コマンドでは、WPの緯度・経度・高度だけでなく、通過地点で停止、待機する時間なども設定することができる。WayPointの例を図14に示す。

以上述べたように、姿勢制御及び高度制御を基本とし、それに対して目標位置との誤差から目標角度を算出して与えることで、位置制御や自動操縦が実現できる。

* MavLink: Micro Air Vehicle Link. 小形無人機との通信プロトコル。主に地上管制局（GCS）と無人機間の通信、及び無人機のサブシステム間の通信に使用される。機体の向き、GPS位置情報、速度などの状態の通知やコマンドの送信に使用する。

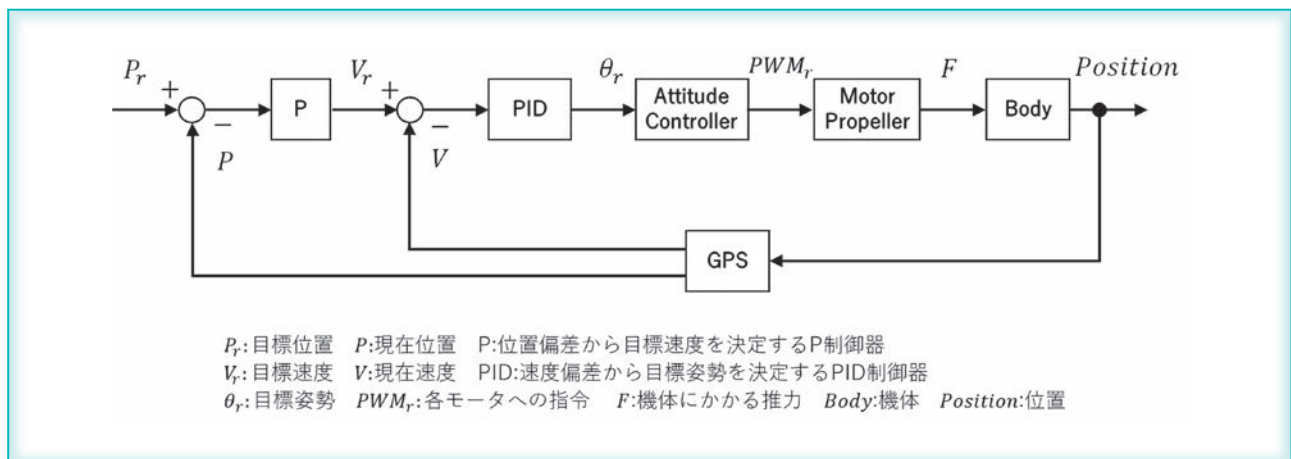


図13 位置制御系のブロック線図



図14 WayPointデータの例

徳島県立三好病院屋上ヘリポート〜ウマバコテージ運動場間の飛行コース。緯度・経度・高度で指定している。図中の緑のマークは、設定したWayPoint（通過点）、黄色の実線はWayPoint間を結んだ飛行コース、黄色の点線は離陸地点と着陸地点を結ぶ直線を示している。

3.3 フライトコントローラ

マルチコプタ、シングルロータヘリコプタ、固定翼機、VTOL機、車、船、潜水艦等において、ドローン化したものにはフライトコントローラが使用されている。フライトコントローラには、企業で製造・販売されているクローズドソースのものと、オープンソースで提供されているものがある。クローズドソースの例としては、DJI社のドローンがある。オープンソースの例としては、ArduPilot⁽⁵⁾やPX4AutoPilot⁽⁶⁾、BetaFlight⁽⁷⁾がある。オープンソースの場合、機体の製作方法から情報が公開されているので、参考にして頂きたい。

4 ドローン関係法規

飛行するドローンに関しては、電波法、航空法、地方自治体の条例といった法規が関連する。これらについて簡単に解説する。

飛行するドローンは、その操縦やモニタリングに電波機器が使用される。ドローンに使用できる電波としては、まず操縦用に2.4 GHz帯（特定小電力機器）や40, 72, 73, 920 MHz帯（特定小電力機器の飛行用ラジコン電波、73 MHzは産業用）が

用意されている。ドローンに搭載されたカメラの映像の伝送には、2.4 GHz帯（特定小電力機器）や5.8 MHz帯（専用波）が用意されている。データ通信には、920 MHz（特定小電力機器）や2.4 GHz（特定小電力機器）が用意されている（表1）。特定小電力機器を使用する場合は、使用者には免許が不要である。一方、5.8 MHz帯を使用するには、使用者の免許（例えば、陸上特殊無線技士3級以上）と使用機器についての携帯局無線局免許開設が必要である。また、開設にはJUTM（日本無人機運行管理コンソーシアム）に加入することが必要となっている。このように、使用する電波には制約があるので、気を付ける必要がある。違反した場合、電波法の規定に基づき「1年以下の懲役又は100万円以下の罰金」の罪に問われる。更に、重要な無線局に妨害を与えると、「5年以下の懲役又は250万円以下の罰金」に処せられることになる。

次に航空法について説明する。航空法では重量が100 g以上の機体を飛行させるためには、事前の機体登録が必要である。また、登録した機体には識別のためにRFIDを搭載することが定められている。（一部のメーカ品は内蔵している場合がある。）100 g未満の機体については機体登録が必要ないが、小

表1 ドローンに使用できる電波⁽⁸⁾

分類	無線局免許	周波数帯	最大送信出力	主な利用形態	備考	無線従事者資格
免許または登録を要しない無線局	不要	73MHz 帯等	※ 1	操縦用	ラジコン用微弱無線局	不要
	不要※ 2	920MHz 帯	20mW	操縦用	920MHz 帯テレメータ用、テレコントロール用特定小電力無線局	
		2.4GHz 帯	10mW/MHz ※ 3	操縦用、画像伝送用、データ伝送用	2.4GHz 帯 小電力データ通信システム	
携帯局	要※ 4	169MHz 帯	10mW ※ 5	操縦用、画像伝送用、データ伝送用	無人移動体画像伝送システム(平成28年8月に制度整備)	第三級陸上特殊無線技士以上の資格
		2.4GHz 帯	1W	操縦用、画像伝送用、データ伝送用		
		5.7GHz 帯	1W	操縦用、画像伝送用、データ伝送用		
その他	不要※ 6	800MHz 帯等	※ 7	操縦用、画像伝送用、データ伝送用	携帯電話（4 G, 5 G）	不要
※ 1： 500m の距離において、電界強度が 200 μ V/m 以下のもの。	※ 2： 技術基準適合証明等（技術基準適合証明及び工事設計認証）を受けた適合表示無線設備であることが必要。	※ 3： 変調方式や占有周波数帯幅によって出力の上限は異なる。	※ 4： 運用に際しては、運用調整を行うこと。	※ 5： 地上から電波発射を行う無線局の場合は最大 1W。	※ 6： 携帯電話事業者の包括免許により運用。	※ 7： 基地局によって制御される。

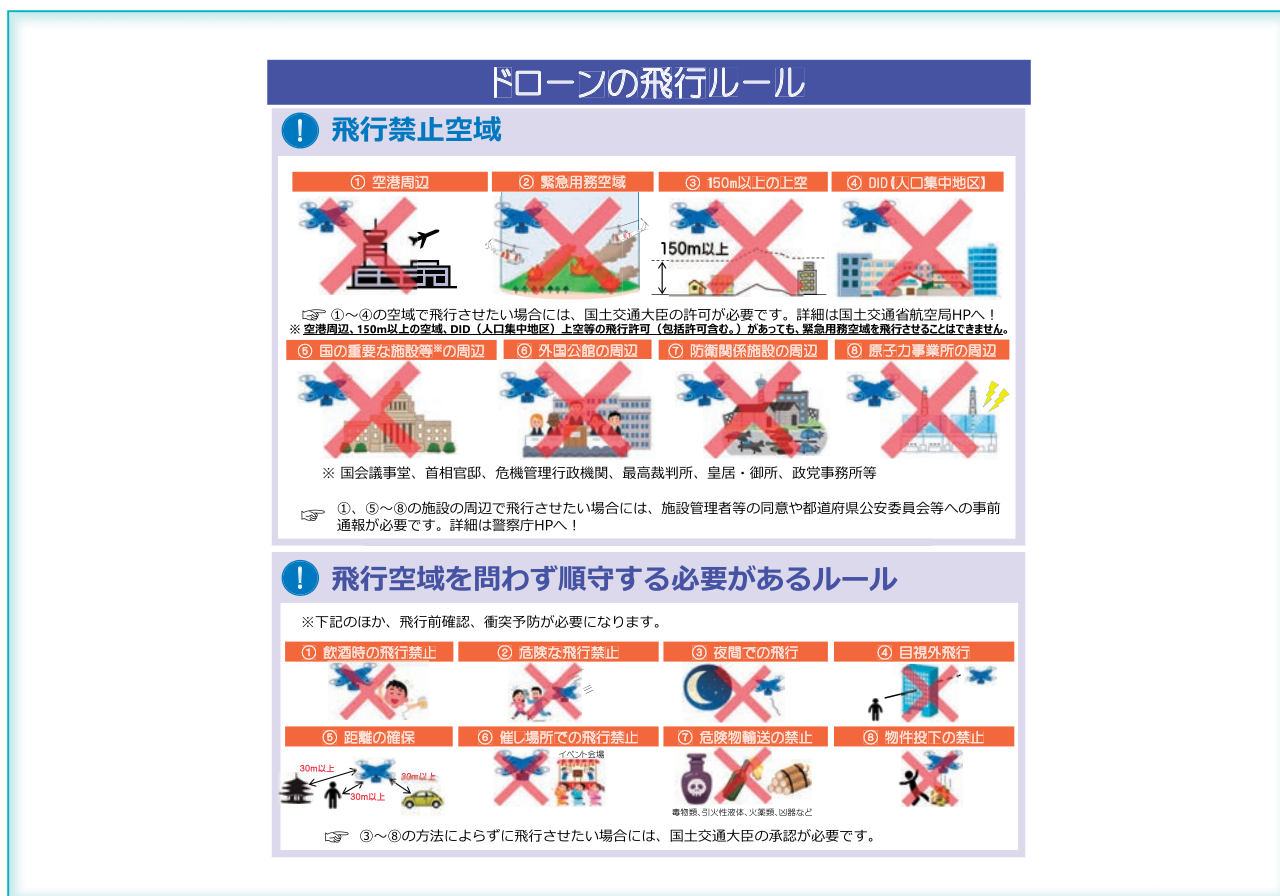


図 15 無人航空機の飛行ルール⁽⁹⁾ <https://www.mlit.go.jp/common/001303822.pdf> から抜粋

型無人機等飛行禁止法により空港周辺など重要施設付近での飛行は禁止されている。

さて、登録された機体は、飛行条件に応じて許可申請をする必要がある。飛行の方法・場所(図15)により、許可が必要になる特定飛行が設定されている。例としては、夜間飛行や人口密集地での飛行がある。

特定飛行の条件は参考文献を参照されたい。また、飛行のカテゴリーも定義されている。カテゴリーI以外は、許可申請が必要になる⁽¹⁰⁾。

また許可を申請して特定飛行を行う場合、飛行前に飛行計画の通報と飛行日誌の作成が求められている⁽¹¹⁾。

機体登録・許可申請・飛行計画登録については、ドローン情報基盤システム2.0⁽¹²⁾から行うことになっている。機体を強固なロープ(長さ30m未満)で係留した場合、飛行範囲内への第三者の立入り管理等の措置を講じて飛行させる場合は、一部の飛行許可・承認申請が不要となる。

許可申請制度以外に、試験飛行登録制度がある。これは試作機などの実験飛行の実施で使用する制度である。筆者の場合、研究で使用する機体はほとんどハンドメイド機かカスタム機であり、ハード、ソ

フト面での改良を常に行っており、市販機向けの機体登録制度では対応できない。そこで試験飛行登録制度を使用している。この制度で機体を登録するが、このときに飛行場所を限定する。また、実験での飛行が特定飛行に相当する場合は、試験飛行登録番号を用いて許可申請を行う。これにより、試験飛行登録機体を用いた特定飛行が可能となる。また、試験飛行は飛行場所が特定されており、RFIDの登録は不要である。

さて、ここまではドローンに関する法規・制度を説明した。次は操縦者の資格制度について述べる。

基本的にドローンの操縦に資格は不要である。しかし、特定飛行を行う場合は許可申請を行うための条件として、10時間以上の飛行経験が必要である。

また、技能認定制度⁽¹³⁾が用意されており、型式認証制度及び機体認証制度⁽¹⁴⁾と合わせることで、特定飛行においても事前の許可申請が不要になる条件がある。しかし、従来の許可申請や試験飛行登録でも特定飛行は実施可能であり、技能認定が必須であるわけではない。ただし、技能認定を受ける過程で個々の操縦技量の向上や安全管理方法・法規に関する知識の習得ができるので、これからドローンの運用を考えている方には、よい訓練になると思う。

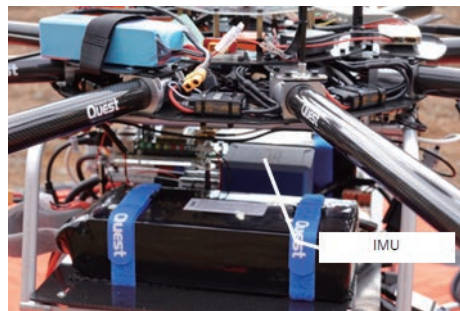


図 16 IMU を搭載した精密飛行ドローン「サルタヒコ」

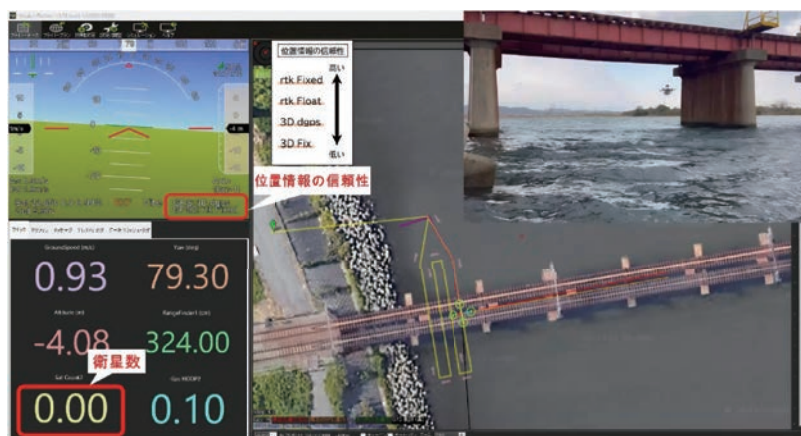


図 17 鉄橋直下を飛行中の「サルタヒコ」

筆者の場合、ラジコンも含めると 25 年以上無人機を扱っているため、今のところ技能認定の必要は余り感じていないが、資格の一つとして取っておいてもいいかな、という評価である。

5 運用例

ここでは筆者が関連したドローン関連の実験結果について説明する。

図 16 はインフラ点検用に試作した写真撮影用ドローンの「サルタヒコ」である⁽¹⁵⁾。この機体は RTK-GPS を搭載することで位置制御の精度を数 cm 以下まで向上させた機体である。更に、高精度 IMU を搭載している。高精度 IMU は常に RTK-GPS での計測結果を参照して自己位置推定の結果を修正している。この機体が橋りょうなどの下を飛行し、RTK-GPS が使用不可能になったときは、高精度 IMU が出力する推定位置で自動航行を継続する。この仕組みにより、約 1 分程度 RTK-GPS での計測が不能になったときでも、その推定誤差は 2

m 以内であり、安全に飛行を継続することができた。図 17 に鉄橋直下を飛行中の様子を示す。

同様に RTK-GPS を搭載することで、比較的長距離の自動航行による運搬実験も実施できた。実験では図 1 のドローンを使用した。この実験では、徳島県立三好病院の屋上ヘリポートから馬場集落の運動場までの約 4 km、高低差約 300 m の往復を自動航行で行った。このとき、RTK-GPS の計測結果を高度にも使用することで、安全な自動航行が実現できた。図 18 に飛行中の機体搭載カメラの映像と GCS でのモニタリングの様子を示す。飛行中の機体の維持・状態と機体搭載カメラの映像は LTE 回線を通じて GCS 上でモニタリングした。この実験では、離陸地点・中継地点・着陸地点の 3 か所に GCS を設置し、同時にモニタリングを行った。

6 おわりに

ドローンはフライトコントローラが姿勢制御、高度制御、位置制御で飛行をアシストするため、従来



図 18 運搬実験の様子

のラジコンに比べて容易に操作できる。今後、ドローンの用途は増えていき、身近で飛行を見掛けることも増えてくると思う。しかし、その容易さに慣れ、安全管理を忘れた操作・飛行での事故が続いている。

現在のドローンの発展は、2006 年頃に DIY で開発された 3 発機トライコプタが基になっている。その後 2015 年頃にはカメラ付きの 4 発機クアッドコプタが製品として発売されて一気に広まった。それから 10 年ほどたち、ホビーから本格的な産業まで用途が広まってきた。これらドローンの本質は空中での三次元機動であり、それをどう使うかが、今後の発展の方向になるであろう。しかし、空気よりも重いものを飛ばしているため、本質的にドローンには墜落の危険が伴う。安全に飛行させていても、バッテリーの消耗により飛行は終了する。そのとき機体が空中にあれば墜落につながる。この本質を忘れず、“ドローンは落ちるもの”“落ちる前に降ろす”“落ちて問題ない飛ばし方をする”といった安全に配慮した運用が必要である。

■ 文献

- (1) 三輪昌史, 白丸雅貴, 西川啓一, 荒木寿徳, “ドローンを用いた空中作業における精密飛行の重要性,” 第 32 回インテリジェント・システム・シンポジウム, 18, Sept. 2024.
- (2) M. Sonobe, M. Miwa, and J. Hino, “Effectiveness of delayed feedback control applied to a small-size helicopter with a suspended load system,” J. Robotics and Mechatronics, vol. 28, no. 3, pp. 351-360, June 2016.
- (3) 出原英幸, 三輪昌史, “力学的エネルギーに基づいた固定翼 UAV の最適経路飛行の検討,” 第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3F4-02, Dec. 2023.
- (4) M. Miwa, M. Shiromaru, K. Nishikawa, and T. Yamaguchi, “Automation of sediment surveying operations by unmanned boats equipped with RTK-GNSS,” SICE Festival 2024 with Annual Conf., ThAT7.1, 2024.
- (5) <https://ardupilot.org/ardupilot/index.html>
- (6) <https://px4.io/>
- (7) <https://betaflight.com/>
- (8) 総務省, “ドローン等に用いられる無線設備について .” <https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/>
- (9) 国土交通省, “無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール.” https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.htm
- (10) 国土交通省, “無人航空機の飛行許可・承認手続.” https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000042.html
- (11) 国土交通省, “飛行計画の通報・飛行日誌の作成.” <https://www.mlit.go.jp/koku/operation.html>
- (12) 国土交通省, “ドローン情報基盤システム 2.0.” <https://www.ossportal.dips.mlit.go.jp/portal/top/>
- (13) 国土交通省, “無人航空機操縦者技能証明等.” <https://www.mlit.go.jp/koku/license.html>
- (14) 国土交通省, “機体認証等.” <https://www.mlit.go.jp/koku/certification.html>
- (15) 白丸雅貴, 三輪昌史, 荒木寿徳, 西川啓一, “写真測量のための IMU+RTK-GNSS を使用した UAV の精密自動飛行,” 第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3F4-06, Dec. 2023.

(2024 年 10 月 31 日受付, 2025 年 1 月 14 日再受付)

三輪昌史

徳島大大学院社会産業理工学研究部准教授。
1996 和歌山大・システム工・助手。
2007 徳島大大学院ソシオテクノサイエンス研究部講師。2016 同大学院理工学研究部准教授。2017 から現職。
1999 頃から無人航空機に関する研究に従事。



無線マルチホップネットワークによる UAV航行経路制御

UAV Navigation Route Control Using Wireless Multi-hop Network

上田清志 Kiyoshi Ueda[†] 三好 匠 Takumi Miyoshi^{††}

山崎 託 Taku Yamazaki^{††} 山本 嶺 Ryo Yamamoto^{†††}

Summary

無人航空機 (UAV: Unmanned aerial vehicle) は、配送サービスなど様々な場面で活用が期待されている。それら様々なサービスが混在し UAV の密度が高い環境となった場合、航空機と同様に航空保安無線施設を用いた UAV 管制システムが必要になる。これに対し、パケット交換網に着想を得た、各家屋に設置した無線デバイスによる無線マルチホップネットワークを用いた UAV 分散管理方式について解説する。本方式の核となる、モバイルアドホックネットワーク (MANET) プロトコルをベースに、住宅が密集した危険な地区の上空 (集中地区) を極力避け、安全で効率的な航行経路を構築するルーチングプロトコルを示す。サービスが普及し複数 UAV が同時に航行する場合に対応し、経路の重複による衝突の危険性をなくす、構築した経路で使用するリンクを、他 UAV の経路に利用できないようにロックする方式を示す。本方式は、経路が占有されることによるリンク不足を解消するために、リンクが階層化されている。更にサービスが普及し大量の UAV が同時に航行する場合に対応し、送信先までの経路候補を複数構築し、動的に次ホップを選択することで空域の混雑を緩和し、空域の混雑に応じて UAV の流入を制限することで利用者間の公平性を担保する方式を示す。

Key Words

UAV 航行経路制御, 無線マルチホップネットワーク, MANET, ルーチングプロトコル

1 はじめに

近年、配送サービスやセンシング、災害対応など様々な場面で、無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) の利用が期待されている。UAV は地上の交通網における渋滞などの制約を受けることなく、空域を有効に利用できる。

現状は UAV の数も少ないので、許可された空域を各機体が GPS で現在位置の緯度・経度を把握しつつ、送信先位置への設定されたルートで航行している。Dissanayaka らは、UAV のナビゲーションをレビューし、ビデオのリアルタイム処理に基づく Visual Lidar Odometry And Mapping (VLOAM) を使用した UAV のナビゲーション制御システムを提案した⁽¹⁾。しかし、この方法には、消費電力とリアルタイムでの大量の演算処理能力という大きな問題がある。そこで、Chen らは、地図の計算プロセスを認知、ローカル、グローバルの三つのレイヤに分割することで、計算プロセスと消費電力を最適化

することを提案している⁽²⁾。Rakesh らは、6G ネットワーク技術を活用した UAV 交通管理システムについて、大規模な UAV 運用における課題と解決策を提示している。特に、通信インフラとネットワーク設計の役割が強調されている⁽³⁾。Abdeljawed らは、複数の UAV を使用した配送ルートの最適化について論じている。UAV の経済性と環境負荷利用効率に焦点を当てている⁽⁴⁾。Hao らは、3D 環境における UAV のルート最適化のための Hybrid Differential Evolution (HDE) アルゴリズムを提案している⁽⁵⁾。

Yang らは、制約条件下で経路効率と適応性を最適化するために、経由地を個別に展開させる UAV のための新しい経路計画法を提案した⁽⁶⁾。Huang らは、UAV の経路計画効率を高めるために、全体最適経路の競争メカニズムを備えた改良型粒子群最適化アルゴリズムを導入した⁽⁷⁾。Roberge らは、固定翼の UAV の高速経路計画用に GPU 加速型の遺伝的アルゴリズムを開発し、計算性能と経路計画の質を最適化した⁽⁸⁾。Chen らは、UAV の 3D 経路計画問題を効率的に解決するために改良型 Wolf Pack Search アルゴリズムを提案し、障害物を回避しエネルギー効率を向上させた⁽⁹⁾。Yu らは、屋外ロボットや UAV に適用可能な、レーザ測定距計データと拡張サポートベクトルマシン (SVM) を組み合わせた動的ローカル経路計画手法を導入した⁽¹⁰⁾。

[†] 日本大学, 郡山市
Nihon Univ., Koriyama-shi, 963-8642 Japan

^{††} 芝浦工業大学, さいたま市
Shibaura Inst. of Tech., Saitama-shi, 337-8570 Japan

^{†††} 電気通信大学, 調布市
The Univ. of Elec.-Commun., Chufu-shi, 182-8585 Japan

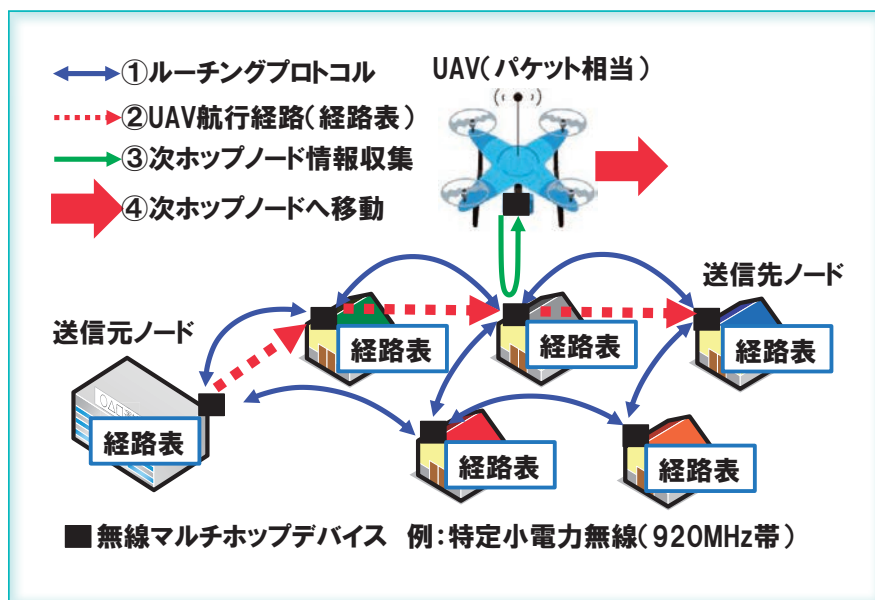


図1 無線マルチホップネットワークによる UAV 経路ナビゲーション

Wang らは、UAV の 3D 経路計画用に改良された バットアルゴリズムを示した。このアルゴリズムは、適応性と障害物回避に重点を置いている⁽¹¹⁾。Gautam らは、効率的な 3D UAV 経路計画のために遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワークを組み合わせ、複雑な環境下での適応性を強化した⁽¹²⁾。Goncharenko らは、様々な制約条件下で効率的な UAV ルート構築を行うために、複数の手法を統合したハイブリッドアルゴリズムを提案した⁽¹³⁾。Ozlem らは、航空ナビゲーションシステムにおける飛行効率を改善するための到着ルート of 最適化手法を示している⁽¹⁴⁾。Schouwenaars らは、効率的な複数車両の経路計画のために混合整数計画法を適用し、経路最適化と衝突回避に取り組んでいる⁽¹⁵⁾。Evdokimenkov らは、協調ミッションのための分散制御システムに焦点を当て、UAV 群の飛行前計画アルゴリズムを調査した⁽¹⁶⁾。Ramesh らは、UAV ナビゲーションアルゴリズムの包括的なレビューを行い、傾向、課題を示した⁽¹⁷⁾。Sivakumar らは、農業、監視、災害管理における UAV の役割に焦点を当て、UAV の多様な民間利用について調査した⁽¹⁸⁾。Fu らは、経路の効率性と適応性に焦点を当て、UAV の経路計画に特化したヒューリスティックな進化アルゴリズムを提案した⁽¹⁹⁾。Danancier らは、脅威の多い環境における UAV の様々な経路計画アルゴリズムを比較し、その性能と堅ろう性を評価した⁽²⁰⁾。Hodge らは、UAV のナビゲーションに深層強化学習技術を適用し、センサデータを利用して知能意思決定を可能にした⁽²¹⁾。

将来的に UAV の本格的な利用が始まると、様々

なサービスが混在し高密度に UAV が飛行する環境が想定される。そのような環境では、航空機の通常の航空路のように航空保安無線施設を結んだ経路を航行する、各 UAV を管制するためのシステムが必要になる。これに対し、多数の UAV が飛行する空域を管制するシステム⁽²²⁾が提案されているが、事前にシステムへの参加を登録した事業者のみの利用を前提としており、個人や UAV の新規利用者などによるシステムへの自由かつ柔軟な参加は難しいと考えられる。

筆者らは、パケット交換網のバーチャルサーキット方式とデータグラム方式から着想を得た、UAV の分散管理システムを確立した⁽²³⁾。本システムでは、図1に示すように、各家屋に設置した無線デバイスで構成される無線マルチホップネットワークを用いて、各 UAV を自律分散的に制御する。その際、UAV をネットワークにおけるパケット、地上の無線デバイスをルータ、無線デバイス間の接続関係をリンクとして扱うことで、パケット交換網における制御を UAV の飛行経路制御に応用している。

(1) モバイルアドホックネットワーク (MANET) をベースにした最適経路構築方式

全ての家が UAV 配送サービスを利用しており、宛先 (荷物などの宅配先) になる必要があることを想定している。したがって、住宅が密集した危険な地区 (集中地区) の家屋のノードも含む無線マルチホップネットワークを構築する。従来の MANET 技術では最短経路が構築されるため、この方式で経路を構築すると、UAV の航行の安全性が考慮され

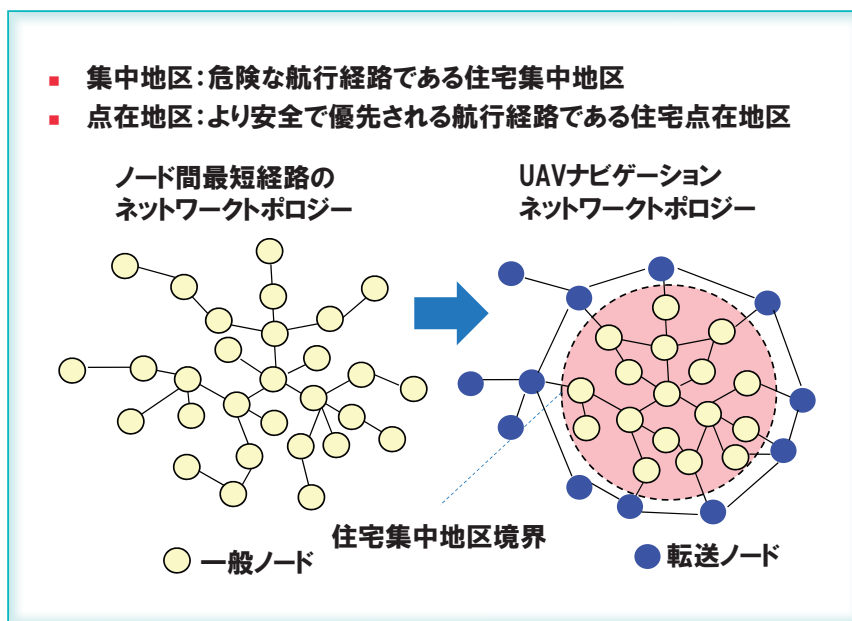


図2 UAV 経路となるネットワークトポロジー

なくなる。したがって、図2に示すように、住宅が密集した危険な集中地区の上空を極力避け、電池切れの危険を避ける移動時間が長過ぎない、安全で効率的な無線マルチホップネットワークを構築する必要がある⁽²³⁾。

(2) 高密度 UAV が安全に飛行する衝突回避経路構築方式

様々なサービスが混在し高密度に UAV が飛行する環境で、経路の重複（経路コンフリクト）による衝突の危険性をなくす必要がある。そのため、UAV が使用する経路のリンクを、ほかの UAV の経路に利用しない制御を行う。また、経路が占有されることによるリンク不足を解消するために、リンクを仮想階層化する。

(3) 空域の混雑に応じ利用者に公平な UAV の流入制限方式

空域の混雑と利用者の公平性を考慮し、送信先までの経路候補を複数構築し動的に次ホップを選択することで空域の混雑を緩和し、空域の混雑に応じて UAV の流入を制限し、利用者間の公平性を担保する。

2 MANET をベースにした最適経路構築方式

MANET のリアクティブ型プロトコルの代表例である Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing⁽²⁴⁾ とプロアクティブ型プロトコルの代表例である Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)⁽²⁵⁾ をベースに、集中地区を極力避けた安

全で効率的な経路を構築する。

2.1 AODV ベース最適 UAV 経路構築方式

送信元ノードが発信し、各ノードが受信した i 番目の RREQ メッセージを図3の式(1)で評価し、最適な RREQ メッセージを求める。集中地区上と点在地区上を移動する際の UAV の速度 v_1 , v_2 をあらかじめ設定し、ノード間ごとの移動時間を加算するため RREQ ヘッダに追加した集中距離と点在距離を割り移動時間を求める。 α は移動時間と安全性のバランスを調整する係数 ($0 \leq \alpha \leq 1$) であり、各ノード間の移動時間に重み付けすることにより、集中地区を避ける安全性の観点と移動時間が長過ぎない観点の両方を総合的に判断する。同時に得られた複数の RREQ を式(1)で評価した結果から、安全性を考慮した最適なルート選択方式が確立された⁽²⁶⁾, ⁽²⁷⁾。本経路構築の流れを図3に示す。

- (1) 送信元ノードは RREQ をブロードキャスト送信する。
- (2) RREQ を受け取ったノードは、自身が所属している地区と送ってきたノードの地区を確認する。
- (3) (2)で確認した地区により RREQ の集中距離、点在距離を加算する。また、事前に設定されている速度 v_1 , v_2 を用いて、移動時間を求める。
- (4) (3)の時間から、重み α を用いてコストを求める。
- (5) (4)で求めたコストが自ノードで保持するコストより小さければ最適 RREQ として記憶し転送する。
- (6) 送信先ノードは送られてきた複数の RREQ から

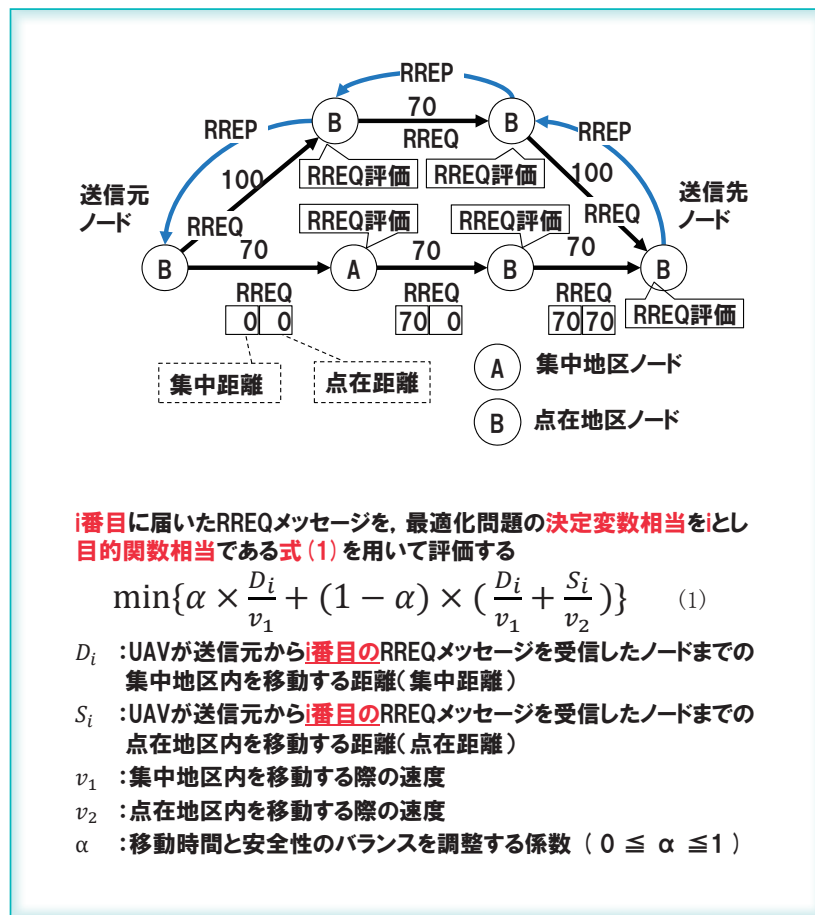


図3 AODV ベース最適 UAV 経路構築方式

最適ルートを選択する。

- (7) (6)をタイムアウトまで行い、タイムアウト時に送信先ノードが最適ルートを RREP として送信元ノードにユニキャスト送信する。
- (8) 送信元ノードに RREP が届き、最適ルートが構築される。

2.2 OLSR ベース最適 UAV 経路構築方式

OLSR では、各ノードで経路表が事前に作成される。そのため、OLSR は HELLO メッセージ・TC メッセージを定期的に送信し合い、ローカルリンク情報の更新を行う。

従来の OLSR ではホップ数を基に経路を選択するため、物理的に UAV が移動する距離を基にした最適経路にはならない。本方式では、最短経路探索アルゴリズムであるダイクストラ法⁽²⁸⁾を用いることで、UAV の移動距離を考慮した経路構築を行う。また、距離にリンク間の安全度合いの重みを付けることで、最短距離ではなく、集中地区を避け安全で、電池切れを避けられるよう移動距離が長過ぎない経路が確立できるような経路構築方式が確立されている⁽²⁹⁾。

あらかじめ、全てのノードに UAV が安全に移動できる点在地区か、航行が危険な集中地区かの情報を与えておく。各制御メッセージを受信したノードは、リンクの安全度によって重み付けされた距離をリンクコストとしたダイクストラ法により、各ノードの経路表を作成する。各ノードでの経路構築の処理の流れを図4に示す。

- (1) スタートノードの値(最小コスト候補)を0、他のノードの値を未確定(または ∞)に設定する。
- (2) 全ノードが確定ノードとなるまで以下を繰り返す。
 - ・未確定ノードのうち、最小の ID 値を持つノードを「確定ノード」とする。(確定フラグを立てる。)
 - ・確定ノードに接続するノードへのリンクコストを、集中地区へ向かうリンクは距離の3倍、点在地区へ向かうリンクは距離の0.6倍の重み付けを行う。
 - ・確定ノードに接続するノードに対して「確定ノードまでのコスト+接続リンクコスト」を計算し、そのノードのコスト値よりも小さければ

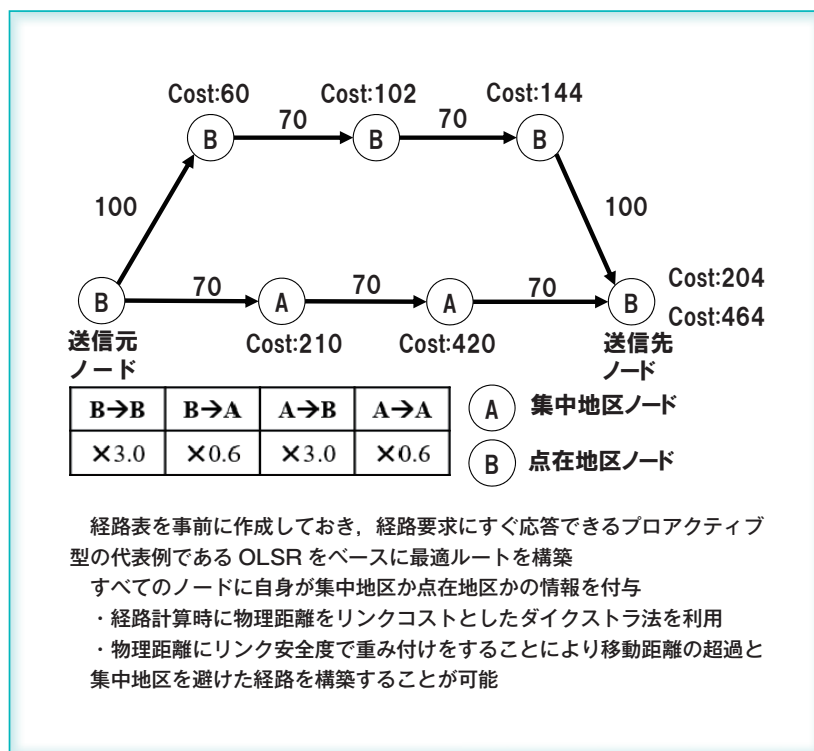


図4 OLSR ベース最適 UAV 経路構築方式

更新する。

- (3) 図4の場合、距離210でコスト464の集中地区ノードを通る経路よりも、距離340でコスト204の点在地区ノードを通る経路が選択される。

2.3 最適 UAV 経路構築方式による送信元から送信先への総移動距離と集中地区上の移動距離

送信元から送信先への経路の総距離と集中地区上の距離を、従来方式の AODV、OLSR と最適経路構築方式とで比較し、従来方式からの経路短縮率を確認した。

実環境に近いモデルで実験するために、NS-3⁽³⁰⁾ を利用してシミュレーションを実施した。図5に示すように、ノードの配置を3×3の9マスとして、中心に集中地区を配置する。中心以外は点在地区とした。各マスのノード数は集中地区が40個、点在地区は20個でランダムに配置し、ノードの通信可能距離を120mとし、1マスのサイズは縦333m×横333mとした。ノードの移動・追加・削除は行わない。実験を100回繰り返し、構築された経路の総距離と集中地区距離の平均を求めた。集中地区をまたぐように点在地区ノードから送信元・送信先を選択し、集中地区をう回する経路が構築できるかを検証した^{(26), (29)}。

総距離と集中距離の短縮率を図5に示す。最適経路構築方式は、AODV ベースも OLSR ベースも、

従来方式と比べて総距離が20%程度増加していることが確認できる。これに対して、集中地区距離の比較では約98%の改善が確認できた。集中地区ノードをう回して経路を構築した結果、総距離は伸びたものの大幅に危険領域の航行を削減できた。

3

UAV 衝突を回避する階層化 UAV 経路リンクロック方式

複数の UAV で経路構築を行うと、同じノード間のリンクが使用されることで UAV 同士が衝突する危険がある。そのため、図6に示すように、パケット交換網のバーチャルサーキット方式を応用し、同じリンクを使用しない、経路コンフリクトが発生しない経路を構築する方式が確立された。

また、同じリンクを使用しない経路構築方式では、試用できるリンクが減少し経路構築に失敗する確率が上がってしまう。そこで、航行高度の多階層ネットワーク構築方式が確立された。

3.1 AODV ベースの階層化 UAV 経路リンクロック方式

リアクティブ型の AODV ベースの経路構築手順を以下に示す。①, ②, ③, ④の手順を図7に、⑤, ⑥, ⑦の手順を図8に示す。各リンクの上空に UAV が同時に存在できる許容数（以下、階層高

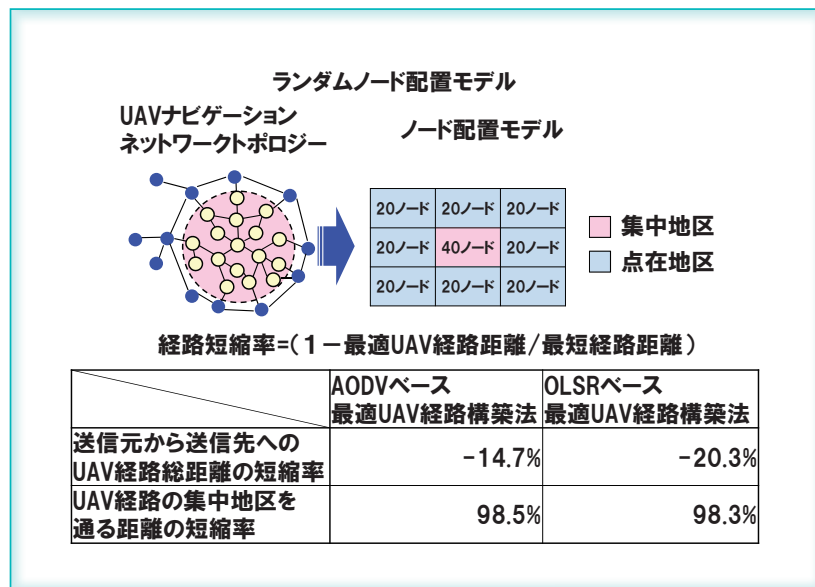


図5 最適 UAV 経路構築法による送信元から送信先への総距離と集中地区上の距離

度数)の情報を追加する。このリンクの両端ノードがリンク空塞表として管理する⁽²⁶⁾。

- (1) 送信元ノードは RREQ をブロードキャスト送信する。RREQ 送信時には高度を指定しない (図 7 ②)。
- (2) RREQ を受け取った中継ノードは経路表の作成、更新を行う。同時に空塞表を確認し、使用できる階層があるか確認する。式 (1) の評価式で最適な RREQ であれば送信する (図 7 ③, ④)。
- (3) 2. の経路構築の手順で送信先ノードに届くまで(2)を繰り返す (図 7 ⑤, ⑥)。
- (4) 2. の経路構築の手順で送信先ノードが最適な経路 RREQ を選択する (図 7 ⑦)。
- (5) 送信先ノードが RREP を送信元ノードにユニ

キャスト送信する (図 8 ②)。

- (6) 中継ノードは RREP を受信した際、空き階層を確認して使用階層を決め、ノード自身の経路表と空塞表に記入しその階層をロックする (図 8 ③)。
- (7) 経路表に従い RREP を転送する。これを送信元ノードが受信するまで行う (図 8 ④, ⑤, ⑥, ⑦)。

3.2 OLSR ベースの階層化 UAV 経路リンクロック方式

プロアクティブ型の OLSR をベースにしたプロトコルに、リンクをロックする Route Keep (RK) メッセージを追加し、多階層の仮想リンクを各ノ

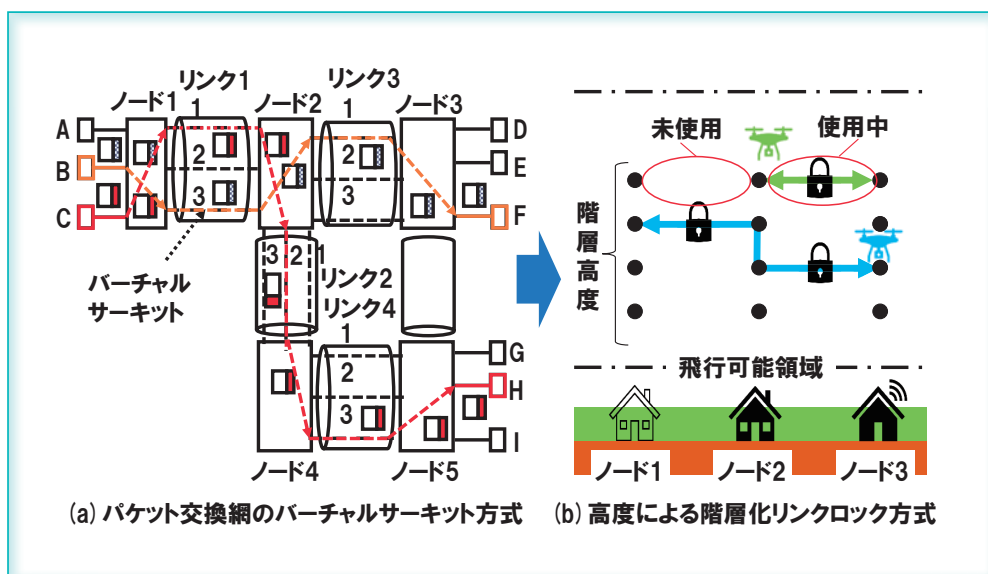


図6 パケット交換網のバーチャルサーキット方式を応用した階層化 UAV 経路リンクロック方式

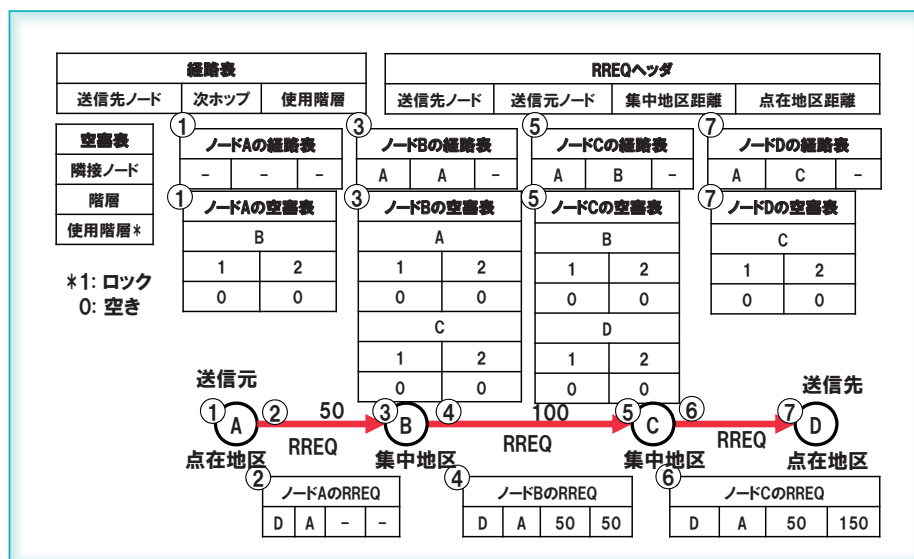


図7 各ノードのRREQ受信時の処理

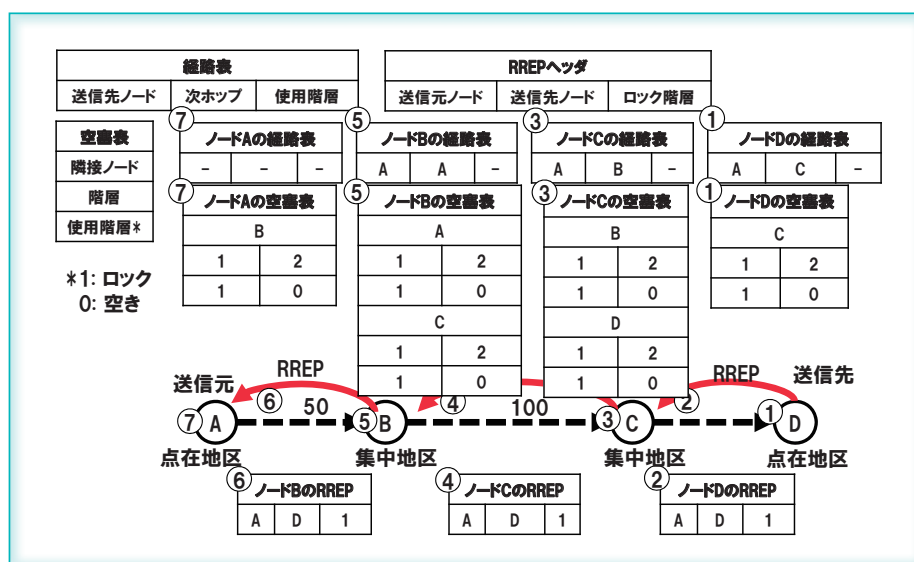


図8 各ノードのRREP受信時の処理

ドが管理する方式が確立された⁽³¹⁾。RK 要求と RK 応答メッセージを使い分ける。RK メッセージによるリンクロック手順を図9に示す。

- (1) 送信元ノードから送信先ノードへ RK 要求メッセージをユニキャスト送信する。RK メッセージは既存の経路表を基に転送される (図9①)。
- (2) 中継ノードが RK 要求メッセージを受信した場合、リンクで空いている階層にロックフラグを立てる。その後、RK 応答メッセージを転送するための経路表を保存する (図9②)。
- (3) 送信先ノードが RK 要求メッセージを受信した場合、リンクで空いている階層にロックフラグを立てる。RK 応答を送信元ノードへユニキャスト送信する。その際に RK 応答メッセージヘッダの“使用する階層 (Lock)”に RK 要求メッセージ受信時にロックフラグを立てた階層を入

れる (図9③)。

- (4) 中継ノードが RK 応答メッセージを受信した場合、以下を繰り返す (図9④, ⑤)。
- ・受信したノードは、ヘッダにある“使用する階層 (Lock)”と同じ階層のリンクに空きがあるかを確認し、空きがあれば(2)によって保存された経路表を基に RK メッセージを転送する。その後、(2)で保存された経路表を UAV が使用する経路表に更新する。
 - ・RK メッセージの転送時、次の“使用する階層 (Lock)”を保存済み経路表と空塞表から指定する。RK メッセージの転送後に空いている階層がなくなった場合、TC メッセージを送信してリンクに空きがないことをネットワーク全体に広告する。TC メッセージを受信した各ノードは経路を再計算する。

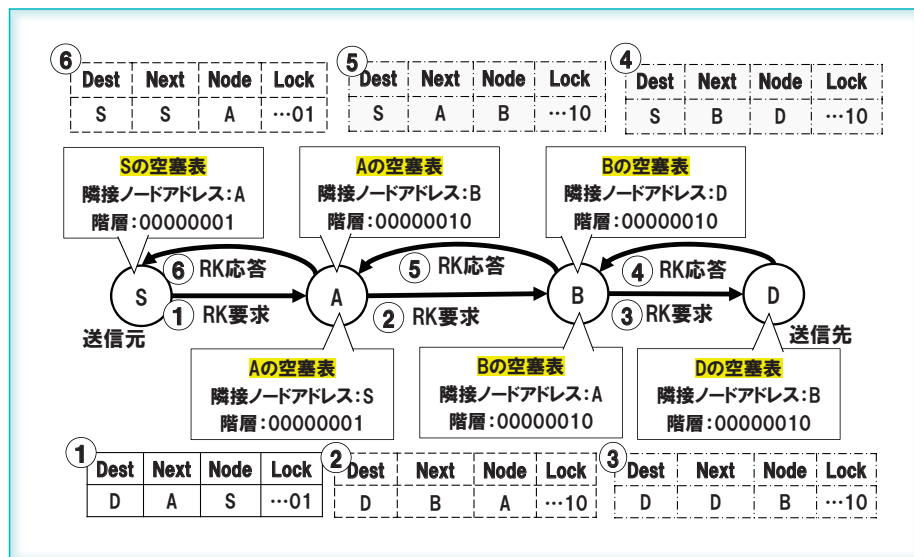


図9 Route Keep (RK) メッセージによる経路の確保

(5) 送信元ノードがRK 応答メッセージを受信した場合、ヘッダの“使用する階層 (Lock)”と同じに階層のリンクに空きがあるかを確認し、空きがあれば送信先ノードへの経路表を保存する(図9 ⑥)。

3.3 階層化リンクロック方式の有効性評価

リンクロックと階層化を用いない従来方式によって構築された経路を確認し、他 UAV と同一リンクを使用する経路コンフリクト率を求める。リンクロック方式で経路コンフリクト率が0となるので、リンクロックでの改善度合いを確認する。

また、リンクロックにより経路移動時に UAV の衝突が回避できる一方で、複数台の UAV が存在した場合に、使用できるリンクが減少することで経路が構築できなくなるデメリットも予想される。そこで、リンクロックのみを導入した際、経路構築に失敗する UAV 台数の指標である経路構築失敗率を評価した。また、経路階層化を用いたリンクロック方式での経路構築失敗率の改善を評価した⁽³²⁾。

ネットワークシミュレータの NS-3 に階層化リンクロック方式の信号処理、情報リポジトリを追加変更し、実際の福島県内の地域などをモデルにシミュレーション実験を行った。約 100 家屋を 1 クラスタとして、1 クラスタにつき 1 ノードが中継機能を有するとした。使用したノード配置モデルを図 10 に示す。各ノードの電波範囲は 1,500 m でノードの追加・削除、移動はない。送信元と送信先の組合せは点在地区ノードからランダムに決定し、同一ノードは複数回送信元には選ばれないようにした。10, 20, 30, 40 台で経路構築を行い、同条件の実

験を 100 回繰り返し経路構築失敗率の平均値を求めた。

リンクロック方式による経路コンフリクトの抑制効果の実験結果を図 11 に示す。10 台の実験でも、経路コンフリクトが発生しており、少ない UAV 台数であっても衝突の危険性があることが分かった。経路コンフリクト率はリンクロック方式の導入によって 0 % となるため、大幅なコンフリクト率の改善が確認できた。

ランダムノード配置モデルを用いて、AODV 及び OLSR ベースリンクロック方式における階層化の有無による経路構築失敗率を比較したグラフを図 12 に示す⁽²⁶⁾。階層化方式では全ての UAV 台数で経路構築失敗率が改善されていることが確認できた。

図 12 から、OLSR ベースの経路構築失敗率の方が AODV ベースの経路構築失敗率より低いことが分かる。AODV はリアクティブ型、OLSR はプロアクティブ型のプロトコルであるため、OLSRの方がロックされているリンクをう回する経路を発見しやすいと考えられる。一方、1 台当りの経路構築を行う時間は AODVの方が短い。そのため、UAV が少ない場合や即座に経路が欲しい場合は AODV を使用し、安全性の確保を優先する場合は OLSR のプロトコルを使用の方がよいと考えられる。

UAV の経路となる全てのリンクをロックする階層化 UAV 経路リンクロック方式は、トラヒック量、つまり UAV の交通量がより高密度となった場合、経路として使用可能なリンクが減少し、経路構築に失敗する可能性が非常に高くなることが懸念され

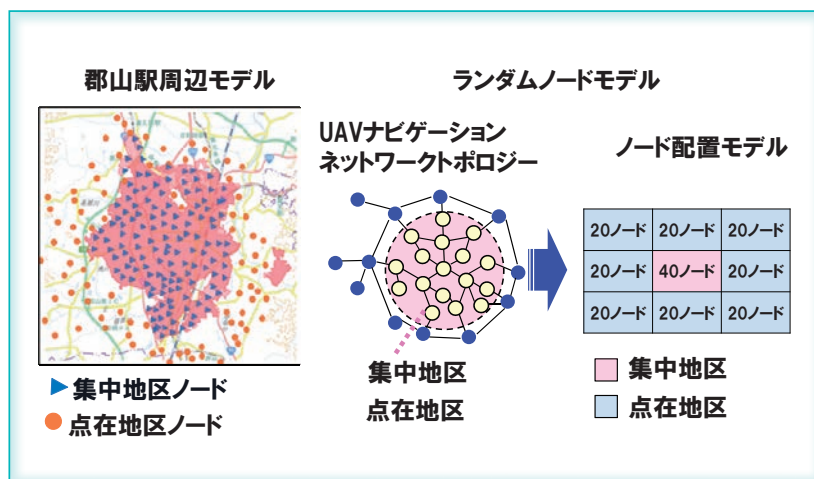


図 10 シミュレーション実験のノード配置モデル

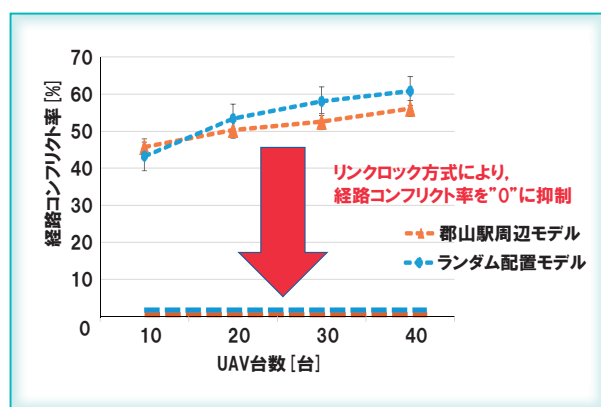


図 11 リンクロック方式による経路コンフリクトの抑制

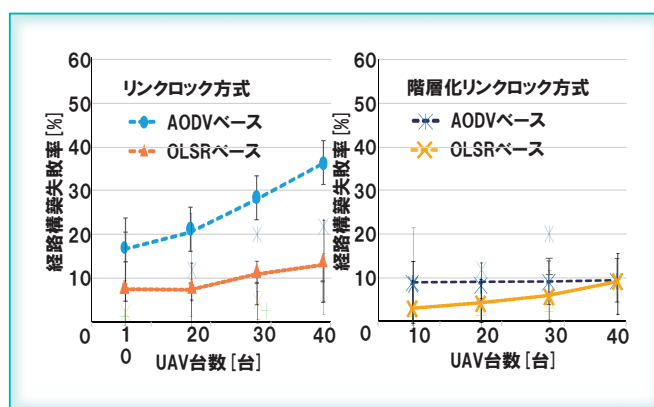


図 12 階層化リンクロック方式による経路構築失敗の抑制効果

る。UAV が航行中のリンクのみをロックする経路構築法などが必要である。

4 UAV の混雑を回避する UAV 管制制御方式

更に高密度な UAV 環境となると、図 13 に示すように、パケット交換網をより効率的に利用できるデータグラム方式を応用した UAV 管制制御が必要と考えられる。空域における UAV の混雑と利用者間における公平性を考え、複数経路候補を構築し動的に次ホップを選択する方式と、ルータが利用者による空域への UAV の流入を制限する方式が確立された⁽³³⁾。

4.1 複数経路候補構築方式

まず、ダイクストラ法⁽²⁸⁾を用いて各ルータ間の最短経路を一つ構築する。次に、このホップ数に基づく最短経路を 1 番目の経路とし、1 番目の経路を基にマルチパスアルゴリズムを用いて 2 番目以降の経路を構築する。ここでは、マルチパスアルゴリ

ズムに、ノード素な経路を構築するアルゴリズム、リンク素な経路を構築するアルゴリズム⁽³⁴⁾、Yen のアルゴリズム⁽³⁵⁾のいずれかを用いる。

4.2 次ホップ選択方式

ある UAV がある送信先 rd まで飛行するとき、UAV の現在地であるルータ ri に送信先 rd の情報を送信し、次ホップルータへの飛行許可を要求する。UAV から送信先 rd の情報を受信したルータ ri は、次ホップ候補となるルータ群 $N(ri)$ を経路表から抽出する。ここで、UAV の現在地が送信元ルータである場合は、ルータ群 $N(ri)$ から経路候補における 1 番目の経路に対応する次ホップルータの情報と、送信先ルータまでのホップ数を取得し、これらの情報を UAV に送信する。UAV は、送信先ルータまでのホップ数を保持しており、ルータが保持する送信先までのホップ数を用いて各ノードを経由する度に更新する。UAV の現在地が送信元以外である場合、ルータは次ホップ候補となるルータ群 (ri) に占有率 $crj(t)$ ($rj \in N(ri)$) を問い合わせる。占有率 $crj(t)$ は、ルータ rj 上空の混雑度を示す指標で、ルータの滞

留可能台数と、ルータの滞留台数 $qr_j(t)$ 及び隣接ルータから自身に向けてリンクを飛行中の台数 $brk, r_j(t)$ ($rk \in N(r_j)$) から、式 (2) により導出する。

$$c_{r_j}(t) = \frac{qr_j(t) + \sum_{rk \in N(r_j)} b_{rk, r_j}(t)}{q_{r_j}^{\max}} \quad (2)$$

4.3 UAV の流入制御方式

空域の混雑に応じてルータが UAV の流入を制限することで、利用者間における公平性を担保する方式が確立されている。

パケット交換網のデータグラム方式における TCP (Transmission Control Protocol)⁽³⁶⁾ Reno におけるふくそう制御手順から着想を得ており、ふくそう制御におけるウィンドウサイズの動的な制御を、各利用者の同時飛行可能台数の制御に応用する。ここで、同時飛行可能台数とは、ルータが持つ情報で、自身を送信元とする利用者がある時刻において空域内を飛行可能な台数を指す。同時飛行可能台数の初期値は 1 台とし、送信先を経由し送信元までの往復を完了した UAV の連続台数が同時飛行可能台数と一致した場合にこれを増加させる。最初は 2 倍ずつ指数的に同時飛行可能台数を増やし、送信元における離陸中止と空域の混雑による UAV の不時着を確認した場合に、同時飛行可能台数を半分に減少させる。その後、各ルータは、同時飛行可能台数分連続で UAV の往復完了を確認した場合に、同時飛行可能台数を 1 台ずつ線形的に増加させる。UAV が往復を完了した連続台数と空域の混雑が原因で発生する UAV の不時着に応じて、各ルータが各利用者の同時飛行可能台数を増減させることで、

空域の混雑状況に応じた UAV の流入制限を行う。

これにより、システム利用者間で飛行させることが可能な UAV の台数が不公平となる状況を抑制できるようになると考えられる。

4.4 シミュレーションによる性能評価

複数経路の構築と次ホップの選択制御が空域内の UAV の飛行に与える影響を評価するため、一定の領域に複数台のルータを配置しシミュレーションを行った。シミュレーション環境を図 14 に示す。ここでは、芝浦工大犬宮キャンパスを中心とした 5 km 四方の領域に、132 個のルータを固定配置することを想定する。また、各ルータは、自身の通信可能範囲内に存在する、ほかのルータとリンクで接続しているものとする。ここで、各ルータやリンクは、地理的な要素を考慮し、鉄道路線や幹線道路に沿うように配置した。各ルータの通信可能範囲は 500 m、ルータの滞留可能台数は 4 台とし、リンクの通信方式は全て、常に双方向に UAV の移動が可能な全二重方式とした。UAV やルータの通信には、920 MHz 帯の通信規格 LPWA (Low Power Wide Area) を用いることを仮定し、伝送速度は 100 kbit/s とする。本シミュレーションでは、計 400 台の UAV をシミュレーション開始から 600 秒の間でランダムに生成し、送信元と送信先もランダムに設定する。ここで、各 UAV は送信先に到達後、即座に送信元を次の送信先とすることで、送信元と送信先間を往復するものとする。UAV は 10 m/s でリンクを移動し、電池の持続時間は 30 分、UAV 間の飛行間隔距離を 30 m とした。

UAV 流入制御方式の有無によるネットワークの混雑状況と利用者間の公平性を評価した。なお、UAV 流入制御方式を導入しない場合においては、

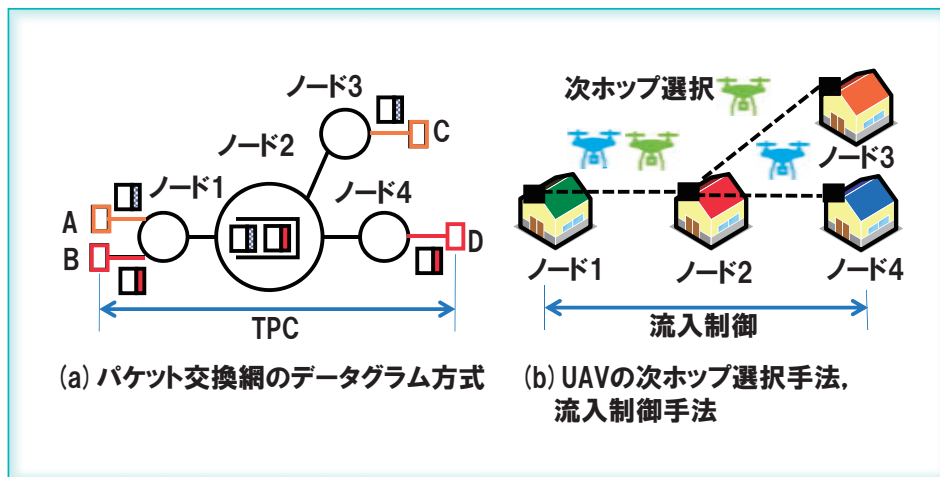


図 13 UAV の混雑を回避する UAV 管制制御方式

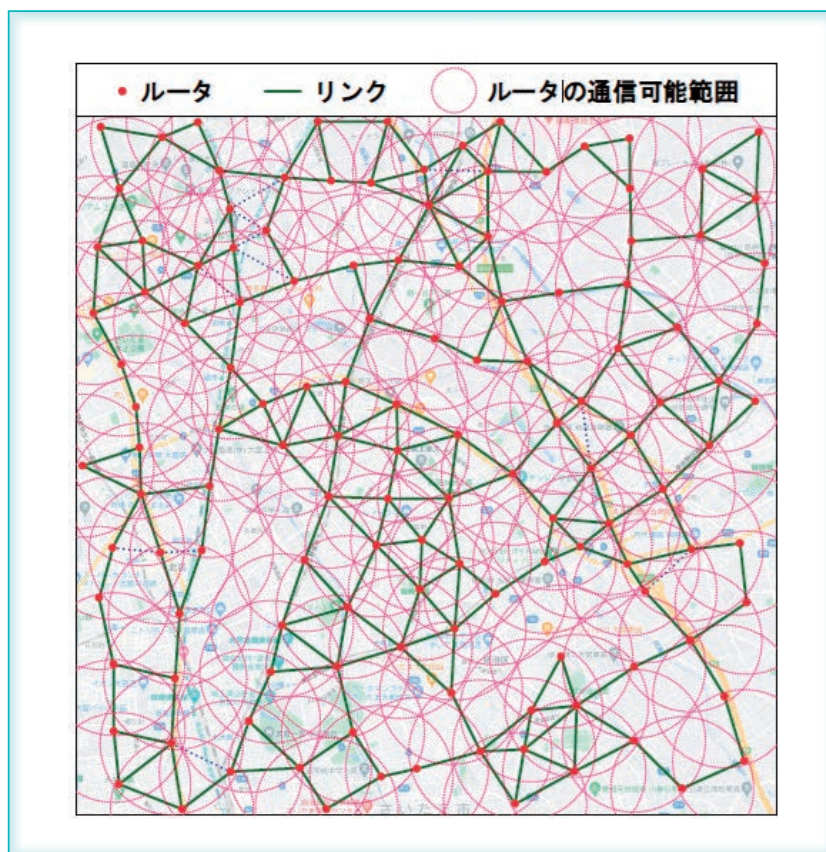


図 14 シミュレーションネットワークトポロジー

利用者は、UAV が送信元から次ホップへの移動を開始、若しくは空域の混雑による送信元での不時着を確認した場合に新たな UAV の飛行を開始するものとする。本シミュレーションでは、各ルータが持つ経路候補は Yen のアルゴリズムを用いて構築し、ルータが持つ各送信先までの最大経路候補数は 3 本とした。また、サービス利用者数が変化した場合においても、UAV 流入制御が機能するかを検証するため、利用者数を 40 人、60 人の 2 通りで変化させた。各利用者は、シミュレーション開始と同時に UAV の飛行を開始させ、UAV は送信元とランダムに設定した送信先間を往復する。なお、UAV は往復に要する十分な電池容量を持つと仮定する。

シミュレーション開始から 60 分の間で、各利用者がネットワークに流入させた UAV 台数の累積分布と送信元と送信先間の往復を完了した UAV 台数について、利用者数 40 人の場合を図 15、利用者数 60 人の場合を図 16 に示す。なお、この図では、累積分布と往復完了台数のプロットを制限の有無と利用者ごとに横軸方向で対応付けしている。結果から、UAV 流入制御方式を導入することで、各利用者がネットワークに流入させた UAV の台数が大きく減少している一方、往復を完了した UAV の台数が大きく増加している。したがって、空域への過剰

な UAV の流入を防ぐことで、空域の混雑に起因した UAV が往復に失敗することを抑制できていることが分かる。また、利用者間での UAV の往復台数を比較すると、UAV 流入制御方式の導入前に比べて、UAV の往復台数を増加させながら、その台数差を抑制することができており、公平性が担保できていると考えられる。

5 おわりに

筆者らは、パケット交換網に着想を得て、各家屋に設置した無線デバイスによる無線マルチホップネットワークを用いた UAV 分散管理方式を解説した。本方式の核となる、モバイルアドホックネットワーク (MANET) プロトコルをベースに、住宅が密集した危険な地区上空 (集中地区) を極力避けた、安全で効率的な航行経路を構築するルーティングプロトコルを示した。サービスが普及し複数 UAV 同時航行時に、経路の重複による衝突の危険性をなくすため、構築した経路で使用するリンクを、ほかの UAV の経路に利用できないようにロックする方式を示した。本方式は、経路が占有されることによるリンク不足を解消するために、リンクが階層化されている。更にサービスが普及し大量の UAV が同

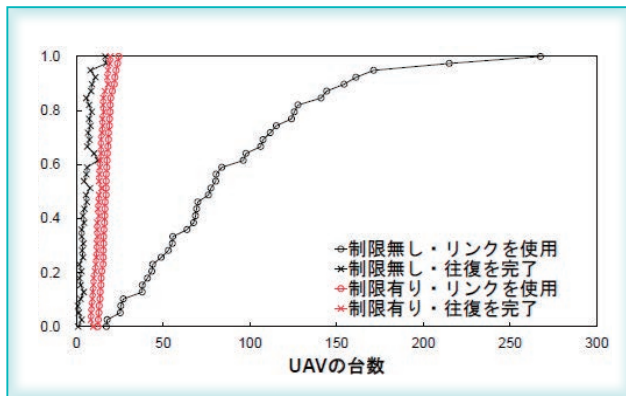


図 15 リンクの使用と往復を完了した UAV の台数（サービス利用者数 40）

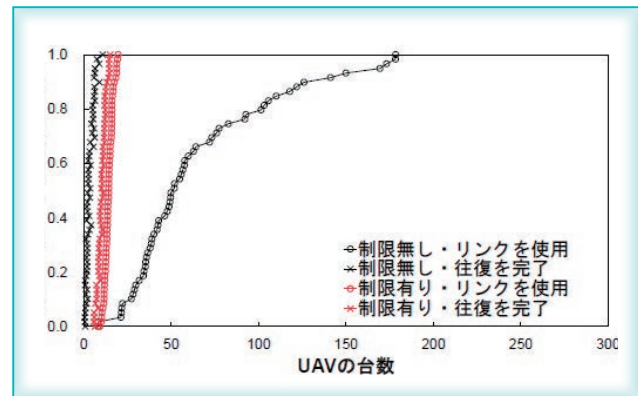


図 16 リンクの使用と往復を完了した UAV の台数（サービス利用者数 60）

時に航行する場合に対応し、送信先までの経路候補を複数構築し動的に次ホップを選択することで空域の混雑を緩和する。空域の混雑に応じて UAV の流入を制限して利用者間の公平性を担保する方式を示した。

様々なサービスでの運ぶ‘もの’、情報に応じて、最適な経路選択が変わってくると考えられ、地上系・非地上系を統合的に考慮したネットワークシステム・経路制御への発展が期待される。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP24K14922 の助成を受けたものです。

文献

- (1) D. Dissanayaka, R. T. Wanasinghe, D. O. Silva, A. Jayasiri, and K. I. G. Mann, "Review of navigation methods for UAV-based parcel delivery," *IEEE Trans. Auto. Sci. and Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 1068-1082, Jan. 2024.
- (2) S. Chen, H. Chen, C. W. Chang, and C. Y. Wen, "Multilayer mapping kit for autonomous UAV navigation," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 31493-31503, Jan. 2021.
- (3) S. Rakesh, B. Rojeena, and K. Shiho, "6G enabled UAV traffic management: a perspective," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 91119-91136, June 2021.
- (4) S. Abdeljawed, E. Jalel, and S. Patrick, "Vehicle routing with multiple UAVs for the last-mile logistics distribution problem: hybrid distributed optimization," Springer Nature, Berlin/Heidelberg, Germany, May 2024.
- (5) Z. Hao, D. Lihua, C. Chunxiao, and X. Bin, "Three-dimensional unmanned aerial vehicle route planning using hybrid differential evolution," *J. Advanced Comput. Intell. and Intelligent Informatics*, vol. 24, no. 7, pp. 820-828, Dec. 2020.
- (6) P. Yang, K. Tang, J. A. Lozano, and X. Cao, "Path planning for single unmanned aerial vehicle by separately evolving waypoints," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 31, no. 5, pp. 1130-1146,

Aug. 2015.

- (7) C. Huang and J. Y. Fei, "UAV path planning based on particle swarm optimization with global best path competition," *Int. J. Pattern Recognition and Artif. Intell.*, vol. 32, no. 6, 2018.
- (8) V. Roberge, M. Tarbouchi, and G. Labonté, "Fast genetic algorithm path planner for fixed-wing military UAV using GPU," *IEEE Trans. Aerosp. and Electron. Syst.*, vol. 54, no. 5, pp. 2105-2117, Feb. 2018.
- (9) Y. Chen, Y. Mei, J. Yu, X. Su, and N. Xu, "Three-dimensional unmanned aerial vehicle path planning using modified wolf pack search algorithm," *Neurocomputing*, vol. 266, pp. 445-457, May 2017.
- (10) L. Yu and K. Zhou, "A dynamic local path planning method for outdoor robot based on characteristics extraction of laser rangefinder and extended support vector machine," *Int. J. Pattern Recognit. and Artificial Intell.*, vol. 30, no. 2, pp. 1-23, 2016.
- (11) G. Wang, H. C. E. Chu, and S. Mirjalili, "Three-dimensional path planning for UCAV using an improved bat algorithm," *Aerosp. Sci. and Technol.*, vol. 49, pp. 231-238, Feb. 2016.
- (12) S. A. Gautam and N. Verma, "Path planning for unmanned aerial vehicle based on genetic algorithm and artificial neural network in 3D," *Proc. 2014 Int. Conf. Data Mining and Comput. (ICDMIC)*, pp. 1-5, Feb. 2014.
- (13) V. I. Goncharenko and A. A. Dzekalo, "The algorithm for constructing the UAV route based on the combined method," *7th Int. Conf. Info., Cont., and Commun. Tech. (ICCT)*, Oct. 2023.
- (14) S. M. Ozlem, "Optimum arrival routes for flight efficiency," *J. Power and Energy Eng.*, vol. 3, pp. 449-452, Jan. 2015.
- (15) T. Schouwenaars, B. D. Moor, and E. Feron, "How J, Mixed integer programming for multi-vehicle path planning," *Proc. the European Control Conf*, pp. 2603-2608, Jan. 2001.
- (16) V. N. Evdokimenkov, M. N. Krasilshchikov, and D. A. Kozorez, "Development of pre-flight planning algorithms for the functional-program prototype of a distributed intellectual control system of unmanned flying vehicle groups,"

- INCAS Bulletin, vol. 11, no. 1, pp. 75-88, Aug. 2019.
- (17) A. Ramesh, P. Suseendhar, E. Venugopal, and V. Sivakumar, "An overview of navigation algorithms for unmanned aerial vehicle," Int. Conf. Intell. Data Commun. Tech. and Internet of Things(IDCIoT), Jan. 2023.
 - (18) M. Sivakumar and N. Malleswari, "A literature survey of unmanned aerial vehicle usage for civil applications," J. Aerospace Technol. and Management, Jan. 2021.
 - (19) Z. Fu, J. Yu, G. Xie, Y. Chen, and Y. Mao, "A heuristic evolutionary algorithm of UAV path planning," Wirel. Commun. and Mob. Comput., Jan. 2018.
 - (20) K. Danancier, D. Ruvio, I. Sung, and P. Nielsen, "Comparison of path planning algorithms for an unmanned aerial vehicle deployment under threats," IFAC-Papers On Line, vol. 52, no. 13, pp. 1978-1983, Jan. 2019.
 - (21) V. J. Hodge, R. Hawkins, and R. Alexander, "Deep reinforcement learning for drone navigation using sensor data," Neural Comput. and Appl., pp. 2015-2033, March 2020.
 - (22) "ISO 23629-5 UAS traffic management (UTM) – part 5:UTM functional structure," ISO 23629-5:2023, pp. 1-14, April 2023.
 - (23) K. Ueda and T. Miyoshi, "Autonomous navigation control of UAV using wireless smart meter devices," J. Telecommun. and Inf. Technol. (JTIT), The National Institute of Telecommunications, Republic of Poland, no.2, pp.64-72, July 2019.
 - (24) C. E. Perkins, E. M. B.-Royer, and S. R. Das, "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) Routing," IETF, RFC3561, July 2003.
 - (25) T. H. Clausen, and P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol (OLSR)," IETF, RFC3626, Oct. 2003.
 - (26) Y. Kokubun, T. Yamazaki, R. Yamamoto, T. Miyoshi, and K. Ueda, "Reactive route construction for UAV delivery considering travel time and safety using wireless multi-hop network," IEICE Commun. Express, vol. 11, no. 7, pp. 405-410, April 2022.
 - (27) Y. Kokubun, T. Yamazaki, R. Yamamoto, T. Miyoshi, and K. Ueda, "AODV-based routing methods for UAVs travel time and safety," IEICE Commun. Express, vol. 12, no. 4, pp. 157-163, April 2023.
 - (28) E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," in Numerische Mathematik, vol. 1, no. 1, pp. 269-271, 1959.
 - (29) H. Gunji, T. Yamazaki, R. Yamamoto, T. Miyoshi, and K. Ueda, "Proactive route construction for UAV delivery considering distance and safety using wireless multi-hop network," IEICE Commun. Express, vol. 11, no. 7, pp. 411-416, April 2022.
 - (30) ns-3, "a discrete-event network simulator for internet systems." <https://www.nsnam.org/>
 - (31) H. Gunji, T. Yamazaki, R. Yamamoto, T. Miyoshi, and K. Ueda, "Methods for constructing collision avoidance route for multiple unmanned aerial vehicles using OLSR-based link hierarchization," IEICE Commun. Express, vol. 12, no. 1, pp. 7-12, Jan. 2023.
 - (32) S. Ohkawa, T. Yamazaki, R. Yamamoto, T. Miyoshi, and K. Ueda, "Method for constructing collision avoidance route for multiple UAVs using AODV-based link hierarchization," Proc. IEEE Int. Conf. Consumer Electron. - Asia 2023 (ICCE-Asia2023), IEEE, pp. 311-314, Oct. 2023.
 - (33) T. Haraguchi, H. Katada, T. Yamazaki, T. Miyoshi, R. Yamamoto, and K. Ueda, "A distributed UAV management system inspired by packet-switched networks," IEICE Commun. Express, vol. 13, no. 9, pp. 389-392, Sept. 2024.
 - (34) C.-L. Li, S. T. McCormick, and D. Simchi-Levi, "Finding disjoint paths with different path-costs: Complexity and algorithms," Networks, vol. 22, no. 7, pp. 653-667, Dec. 1992.
 - (35) J. Y. Yen, "Finding the K shortest loopless paths in a network," Manag. Sci., vol. 17, no. 11, pp. 712-716, July 1971.
 - (36) W. Eddy, Ed., "Transmission control protocol (TCP) ," IETF RFC 9293, Aug. 2022.

(2024 年 10 月 31 日受付, 2025 年 1 月 4 日再受付)

上田清志 (正員：シニア会員)

昭 62 慶大・理工・電気工卒，平元同大学院理工学研究科修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来，交換システムソフト，特に分散交換ノード管理ソフト，P2P ネットワークサービスソフトの研究開発に従事。ITU-T SG11, SG4 にて TMN の標準化に貢献。平 26 年度から日大・工・教授，現在に至る。博士（工学，平 22 九大）。本会通信ソサイエティ優秀論文賞（平 20 年度），通信ソサイエティ活動功労賞（平 27 年度），IEICE ComEX Top Downloaded Letter Award（令 4 年度），IEEE ICCE Best Regional Paper Award（令 6 年度），IEEE ICCCT Best Presentation Award（令 6 年度）各受賞。

**三好 匠** (正員：シニア会員)

平 6 東大・工・電子卒，平 11 同大学院博士課程了。博士（工学）。平 11 ～ 13 早大国際情報通信研究センター助手を経て，現在，芝浦工大・システム理工・電子情報システム教授。主に，トラフィック分析，オーバーレイネットワーク，アドホック・センサネットワーク，スマートシティ，デジタルツインに関する研究に従事。東大・生研リサーチフェロー。平 22 ～ 23 仏ソルボンヌ大情報学研究所（LIP6）客員研究員。本会ネットワークシステム研専委員長，東京支部学生会顧問。平 16 本会学術奨励賞，平 22, 26, 令 3 本会ネットワークシステム研究賞，平 13, 16, 18 本会情報ネットワーク研究賞，平 23 本会コミュニケーションオリティ研究賞，平 31, 令 3 本会情報通信マネジメント研究賞，平 18, 19, 21, 22, 26, 令 2 本会通信ソサイエティ活動功労賞，平 26 CANDAR Best Paper Award of ASON Workshop, 平 28, 令 2 APNOMS Best Paper Award, 令 2 ICETC Best Short Paper Award, 令 6 IEEE ICCE Best Regional Paper Award, 令 2 ヒューマンインタフェース学会論文賞，令 4 関東工教賞（業績賞），平 29 日工教 JSEE Award, 平 14 エリクソン・ヤング・サイエンティスト・アワード各受賞。

**山崎 託** (正員)

平 24 芝浦工大・システム工・電子情報システム卒，平 26 同大学院修士課程了，平 29 早大大学院博士課程了。博士（工学）。平 28 ～ 30 早大・情報通信・助手を経て，現在，芝浦工大・システム理工・電子情報システム准教授。主に，IoT，スマートシティ，無線ネットワークに関する研究に従事。平 26 本会ネットワークシステム研究賞，平 26 CANDAR/ASON Best Paper Award, 平 27 本会学術奨励賞，平 28 本会ネットワークソフトウェア研究会優秀ポスター賞，平 30 本会ネットワークシステム研究会若手研究奨励賞，平 30 本会ネットワークシステム研究会活動功労賞，平 31 ICACCT Outstanding Paper Award, 令 2, 4, 6 本会通信ソサイエティ活動功労賞，令 2 APNOMS Best Paper Award, 令 2 ICETC Best Short Paper Award, 令 6 IEEE ICCE Best Regional Paper Award 各受賞。

**山本 嶺** (正員)

平 19 芝浦工大・システム工学・電子情報システム卒，平 21 同大学院修士課程了。平 24 早大大学院博士後期課程退学，同研究科助手。平 26 電通大大学院情報システム学研究科助教，平 31 同准教授。通信ネットワークに関する研究に従事。博士（国際情報通信学）。平 22 本会学術奨励賞，平 26 本会ネットワークシステム研究賞，令 6 本会情報通信マネジメント研究賞，平 29, 令元, 2, 5 本会通信ソサイエティ活動功労賞，平 26 CANDAR Best Paper Award of ASON Workshop, 令 6 IEEE ICCE Best Regional Paper Award 各受賞。



複数のドローンや無線機の連携による 空の安全運航支援のための無線通信

Air-to-Air Link for Safety Operation of Drones

三浦 龍 Ryu Miura[†] 松田隆志 Takashi Matsuda[†]
越川三保 Miho Koshikawa[†] 松村 武 Takeshi Matsumura[†]

Summary

ドローンの運航における無線通信の主な課題と国内制度の現状について整理するとともに、通信インフラに依存しない従来の自営網による制御用通信を拡張した方式として、複数のドローン同士や無線機を連携させ、より長距離で障害物を越えてドローンの飛行を把握し制御する技術、並びに地上を経由しない機体間相互の直接通信を自律追従スウォーム（群）飛行や自律衝突回避に应用する技術の取組みについて述べる。本稿は主に、ビジネスや災害対策の分野でドローンの活用を検討するサービス事業者やドローンメーカー及び関連する業界団体や自治体関係者、ドローン用無線通信機器の開発メーカー、ドローンの普及促進やその電波に関連した法制度整備に係る行政担当者、並びにこれからこうした業界での活躍を目指す若きエンジニア等を対象とする。

Key Words

ドローン、無人航空機、マルチホップ中継、機体間通信、スウォーム飛行、自律衝突回避

1 はじめに

空撮・災害調査・測量・設備点検・運送など幅広い分野での小形ドローン（UAV: Unmanned Aerial Vehicle, または Uncrewed Aerial Vehicle, 直訳は無人航空機）の活用や技術開発、実証実験が進んでおり、更なる普及とビジネスの拡大、安全性の確保に向け、「空の産業革命 レベル4 飛行の実現」など国による制度整備・規制緩和^{(1),(2)}も進められている。

こうした中、操縦者から見える範囲で地上局とドローンの間で直接無線リンクをつないでドローンを飛行させる方法には、通信範囲が1~2 km 以内にとどまるという課題があった。その後、電波法の改正に伴い、携帯電話網の通信インフラを経由することにより、サービス圏内であれば通信距離の制約から解放される方法が普及することとなった⁽³⁾。

ところが、ドローンの運用ニーズが高まるにつれ、山間部上空などでサービス圏外になる、災害時には通信障害で利用不能になる、また平時であっても周囲の通信混雑状況によって通信が不安定になる、などの問題が顕在化するようになってきた。

本稿では、こうしたドローンの運航における無線通信の主な課題と国内制度の現状について整理する

とともに、これまで情報通信研究機構（NICT）で取り組んできたテーマである、通信インフラには依存しない従来の自営網による通信を拡張した方式として、複数のドローン同士や無線機を連携させ、より長距離で障害物を越えてドローンの飛行を把握し制御する技術、並びに機体間相互の直接通信を、自律追従スウォーム（群）飛行や自律衝突回避に应用する技術の取組みについて述べる。

2 ドローンに使われる無線通信の課題

屋外を飛行するドローンは基本的に無線通信がなくても、GNSS（全地球航法衛星システム）による位置情報を頼りに自律的に予定されたプログラムどおりに飛行する機能を有している。しかし、操縦者から直接視認できない目視外飛行の場合、より安全な運航を図るためにはリアルタイムで飛行位置や飛行状態を確認し、必要なときにいつでも制御介入ができるようにするための無線通信が必要となる。ドローンの無線方式で最も普及しているのは無線 LAN と同じ 2.4 GHz 帯（ISM バンド）の帯域を使うもので、地上局からドローンに送る制御データであるコマンド、ドローンから地上局に送られる各種ステータスデータであるテレメトリー、並びにドローン搭載のカメラで撮影される画像の伝送に用いられる。免許が不要でコストも安く、ほぼ全てのドローンがデフォルトで備えている。

しかし、こうした自営無線系の制御通信を長距離

[†] 情報通信研究機構、横須賀市
National Institute of Information and
Communications Technology, Yokosuka-shi,
239-0847 Japan

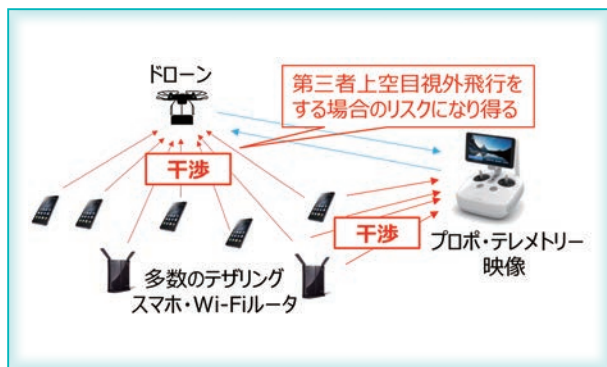


図1 2.4 GHz 帯における無線 LAN からの電波干渉

目視外飛行で使う場合、以下のような問題が課題として考えられ、飛行安全に直結する可能性がある。

(1) 他の無線機器との電波干渉の問題

ドローン側が同一または隣接チャネル干渉を受けると、操縦者からの制御信号が届かずコントロールができなくなり、ドローンは自動帰還や自動着陸モードに入ってしまうことがある。また、操縦者側ではドローンからの位置情報や映像信号がフリーズしたり途中で切れたりする。特に、2.4 GHz 帯は地上の無線 LAN 機器等の他システムからの干渉を受けやすく、都市部上空などで目視外飛行に使う上では必ずしも安全な周波数とは言えない（図1）。

(2) 電波の到達距離の問題

ドローンが遠方まで飛行し、ドローン側と操縦者側の双方、あるいは一方で受信電力が受信機の感度を下回ると当然ながら通信は途絶する。通常、2.4 GHz 帯等の無線局免許が不要な帯域の電波は送信出力が小さく制限されているため、長距離の無線通信は難しい。

(3) 障害物による電波途絶の問題

ドローンと操縦者の間に山、建物、樹木などの障害物があると、電波は大きく減衰して見通し外（BLOS: Beyond Line-of-Sight）となり、通信が途絶する確率が高くなる。特に周波数が1 GHz 以上になるとほぼ確実に障害物で電波が途絶する。

(4) 収容台数の問題

同時に同一の空域を飛行するドローンの数と密度が増えてくると、ドローンの電波同士が衝突する確率が増すため、飛行できるドローンの機体数が制限される。収容可能な機体数を越えた場合は、(1)と同じ電波干渉の問題が発生する。2.4 GHz 帯で20 MHz の帯域幅を用いて映像伝送を行う場合、同一空域で安全に飛行できるドローンは3機程度までと言われている。

(5) 電磁干渉の問題

カメラ、小形コンピュータ、電源分配回路等の電

子機器がドローンに搭載されると、その電磁干渉を無線機器が受けて通信可能な距離が著しく短くなり、あるいは、キャリアセンス機能を備えている場合には送信を止めてしまうことがある。また携帯電話の基地局や送電鉄塔などに近づき過ぎても、無線機感度抑圧の影響を受け、コマンド信号が受信できなくなることがある。

(6) ハッキング、なりすましの問題

正規の操縦者から送信される制御信号と同じ周波数・形式の信号が、非正規の操縦者から送信されると、そのドローンが正規・非正規の信号識別機能を持たない場合には、非正規の操縦者にコントロールを奪われハッキングされるリスクがある。なお、特殊なケースとして、非正規に飛行する、あるいは悪意のあるドローンを故意にハッキングして安全な場所に誘導することがある。

以上の自営系無線の制約は、免許が不要な無線局で課題になることが多く、これらを解決する手段として、携帯電話網の上空利用が2020年12月に全面解禁となった。携帯電話のサービス圏内においてはこれを利用する方法が一般的になってきている。しかし、2024年1月1日に発生した能登半島地震において、国内で初めて多数の民間ドローンが現地入りして被災状況の把握や物資の輸送を担った際、携帯電話網は途絶して使用できず、結局、目視内のみの飛行に限定されたと報告されている。平時においても、後述する山間部は依然として携帯電話のサービス圏外のため、安全なドローン運航ができない場所が多い。また、時間帯によって地上での携帯電話トラヒックが増加し、上空での通信が不安定になるといった現象も確認されている。更に将来、上空を飛行するドローンの数が増加したり、一つの事業者が一度に多数のドローンを飛行させたりする場合、地上ユーザへの影響を避けるため、携帯電話網につなげるドローンの数が制限される可能性もある。

今後はサービスエリアに制約のない低軌道衛星通信（LEO）等による通信インフラが手軽に使えるようになるという期待もある。そうなれば画期的だが、通信機器の重量や通信コストなどの面で課題があり、特に民生分野では全てのドローンに掲載されるにはまだかなりのハードルがあるものと考えられる。

以降の章では、我が国の地理的な特徴を考慮し、山間部でも利用できて災害にも強い自営系無線通信の実現を目指し、上記の課題のうち(1)～(4)の問題に対処する制度と技術の取組みについて述べる。(5)、(6)に関しては別の機会に譲ることとする。

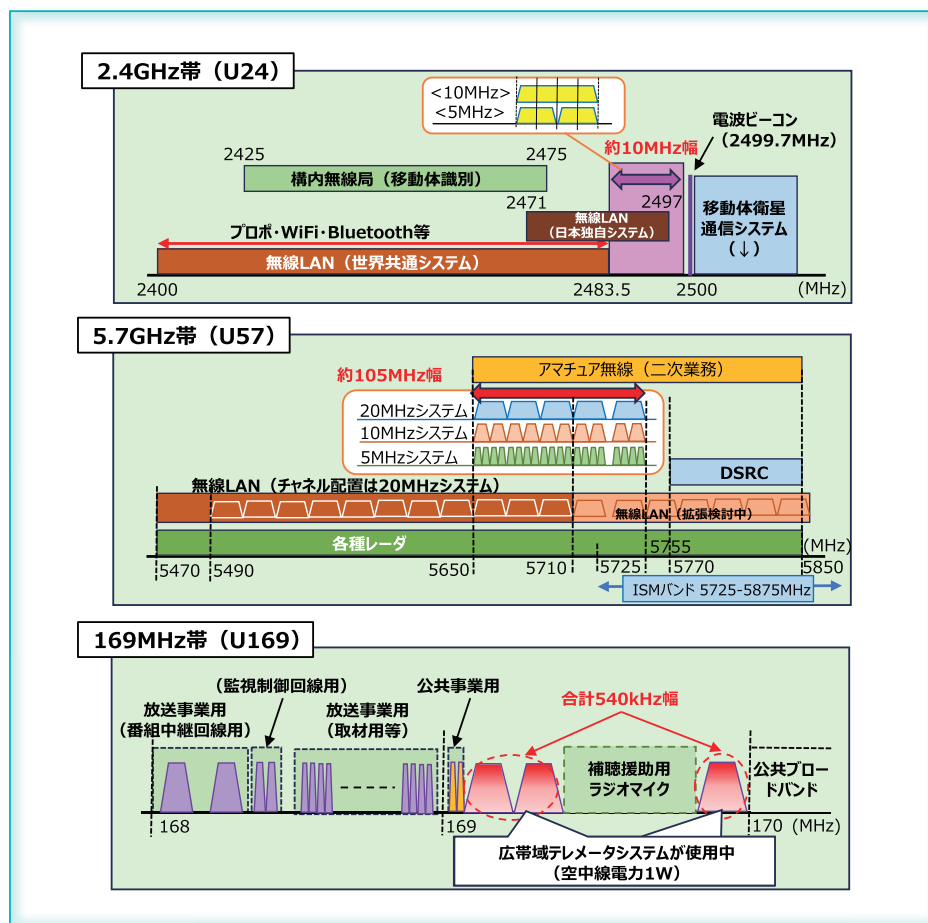


図2 無人移動体画像伝送システムの周波数帯⁽⁴⁾

3 ロボット用電波 「無人移動体画像伝送システム」

「無人移動体画像伝送システム」は、ドローンやロボット用の周波数割当に関するニーズの増大に対応し、総務省が2016年8月に制度化した自営系無線通信のための事業用周波数であり、通称「ロボット用電波」とも呼ばれている⁽⁴⁾(図2)。169MHz帯、2.4GHz帯、5.7GHz帯の三つのバンドがあり、ここではそれぞれ、U169、U24、U57と呼ぶこととする。コマンド・テレメトリ通信と画像伝送に使うことができ、地上局、上空局ともに送信出力は1Wまで許容されている。(ただし、U169のみ上空局は原則10mW以下。)このため、各バンドとも5km以上の通信距離の確保が可能であり、2.で述べた課題(2)(到達距離)への対応を図ることができる。

これらのバンドは、無線従事者免許(第三級陸上特殊無線技士以上)と無線局免許の取得が必要であり、ホビー用としては使えない。使用する前に免許人の間で運用調整を行うことが義務づけられており、他のユーザから干渉を受けることなく、一つのチャネルを申告した時間と場所で占有して利用できるこ

とを特徴としている。このためキャリアセンスなどは規定されていない。ただし、一部無線LAN等との共用バンドとなっている。利用可能なチャネル数はU169で4チャネルまで、U24で2チャネルまで、U57で20チャネルまで確保が可能のため、まだ十分ではないものの、前章で述べた課題(1)(干渉)、(4)(収容台数)への対応を図ることができる。

この無人移動体画像伝送システムを運用調整する団体は特に指定はされていないが、現在は実質的に日本無人機運航管理コンソーシアム(JUTM)がその役割を担っており、会員数は2024年8月時点で844団体となっている⁽⁵⁾。会員には、国内メーカー・運用事業者、海外メーカーの日本法人、警察・消防・自衛隊等の公的機関、研究開発機関、大学などが含まれている。無人移動体画像伝送システムの利用者(免許人)は、これを使ってドローンやロボットを運用する際、事前にJUTMのポータルサイトにログインして、地上局とロボット局の場所、使用日時、周波数、送信EIRP、免許番号等を入力し、会員相互間で競合がない場合にはそのままそのチャネルを利用できる。もし競合があった場合には自動的に利用者側にメールで連絡がいき、当事者同士で送信時間や送信チャネル等を調整することになってい

る。これにより、利用者は申告したチャネルを占有して干渉なく利用することができる。

なお、この運用調整システムは、今後のユーザ数増大に対応するため、詳細な地上局やロボット局の移動範囲、EIRP、与干渉局と被干渉局の受信電力比 (D/U 比) 及び地形などによる影響も考慮して高度化するための開発も始まっている。

4 複数のドローンや無線機を連携させる無線通信システム

本章では、2. で述べた自営系無線通信の課題 (3) (障害物による電波途絶) に対処するとともに、空の安全を確保し、更に長距離運用の場合の課題 (4) (収容台数) に対応するために NICT で開発と実証を行っている制御・監視用の通信技術として、複数のドローンや無線機を連携させるシステムについて述べる。なお、長距離・見通し外での画像伝送に関する取組みも一部行っているが、その報告は別の機会に譲ることとする。

4.1 マルチホップ中継制御通信システム

携帯電話網が届かない山間部上空や被災地等でドローンの長距離運用を行う際、従来の自営系無線通信で行われている地上局とドローンを直接つなぐ方法では、途中で障害物がある場合には2. に述べた (3) (障害物) の問題によって運用範囲が制限されることとなる。これに対処するため、中継局を経由してドローンに搭載した無線局 (端末局) と地上局の間でコマンド・テレメトリーの双方向リンクを時分割 (TDD) でつなぐマルチホップ中継制御通信システムを開発し、「コマンドホッパー」と名付け、その適用に関心を持つ将来のユーザとともに実証実験と性能改善を続けている (図3, 4)⁽⁶⁾。中継局は中継用のドローンに搭載して適切な場所にホバリングさせてもよいし (上空リレー)、地上の見通しの良

い鉄塔等に設置してもよい (鉄塔リレー)。周波数は、伝送速度は小さいが長距離伝搬が可能な U169 を使用しており、2. の課題 (2) (到達距離) への対応も図っている。なお、U169 は占有帯域幅 50 kHz で用いているため、画像伝送は行っていない。

各局の送信出力は、技術基準に従い、地上局が 0.5 W (制度上は最大 1 W が可能)、上空を飛行する端末局は 10 mW である。中継局については地上設置の場合は 0.5 W、ドローンに載せて飛行させる場合には 10 mW に設定する。

マルチホップの通信は地上局から発信されるビーコンで同期されたスーパーフレームの周期に従って双方向で行われ、その通信経路は 1 ホップ (直接通信) ~2 ホップ (中継局を一つ経由) ~3 ホップ (中継局を二つ経由) と通信状況によって自動的に切り換わる方式となっており、その状況は地上局に接続された PC でリアルタイムにモニタすることができる (図5)。また、データの通信レイテンシはスーパーフレーム周期に収まることが保証されており、データの鮮度を保つため、再送制御は行わない。

本無線機は 920 MHz 帯インタフェース (特定小電力無線通信システム、免許不要) も備えており、169 MHz 帯との間で地上局からのコマンドで切り換えることができる。この 920 MHz 帯インタ

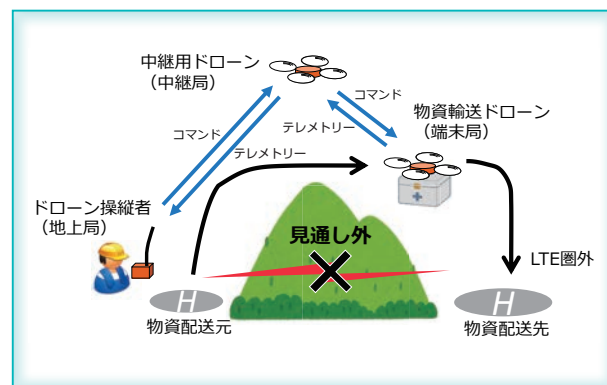


図3 障害物を越えてドローンをつなぐ
(救援物資配送ミッションでの上空リレーの例)

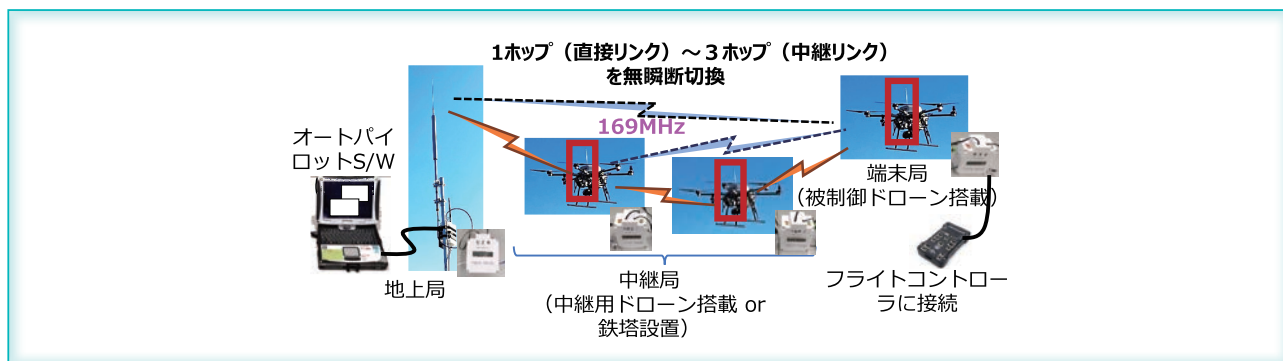


図4 マルチホップ中継制御通信システム「コマンドホッパー」



図5 地上局での通信状況モニタ画面の例

フェースは、200 kHz の単位チャネルを五つ束ね、帯域 1 MHz で利用できるようになっており、169 MHz 帯よりは到達距離が短いですが、伝送速度が速いため、主に比較的大きなデータ転送速度が必要なドローン搭載のフライトコントローラとの初期接続に使用している。

以下、U169 によるコマンドホッパーのフィールドでの三つの性能評価事例について述べる。

4.1.1 山間部での飛行への上空リレーの適用評価

人の立入りが制限される活火山調査のため、見通しの悪い場所で飛行させるドローンにコマンドホッパー端末局を搭載し、中継局を搭載したドローン 1

台を対地高度約 100 m にホバリングさせて 2 ホップ上空リレーを行った⁽⁶⁾ (図 6)。

図 7 は端末局を載せたドローンの飛行軌跡と中継局の位置、飛行区間の地形プロファイル Google Earth で示したものである。ドローンは発着地点を離陸後、対地高度を約 100 m に保持して上部の目標地点まで飛行し、そこで一旦着陸した後、同じルートをたどって発着地点に戻る。飛行軌跡上の各ドットは中継局を経由した 2 ホップのときの端末局での受信点と受信電力を示しており、目標地点での着陸時も含めて約 1 km の全区間にわたりリンクが維持されている。

図 8 では 1 ホップ (中継なし) と 2 ホップ (中継あり) で端末局の受信電力の変化を比較している。1 ホップの場合は目標地点での着陸時にリンクはロストしているが、2 ホップでは維持されていることが分かる。

このほか、携帯電話網が利用できない山中の沢筋 (尾根と尾根の間のくぼ地) に設けられている砂防ダムを点検するために見通しの悪い沢筋 (図 9) に沿って飛行するドローンでも評価を行い、1 台の中継ドローンを経由して約 4 km の全飛行区間で制御通信リンクが途絶せずに維持できることも確認して

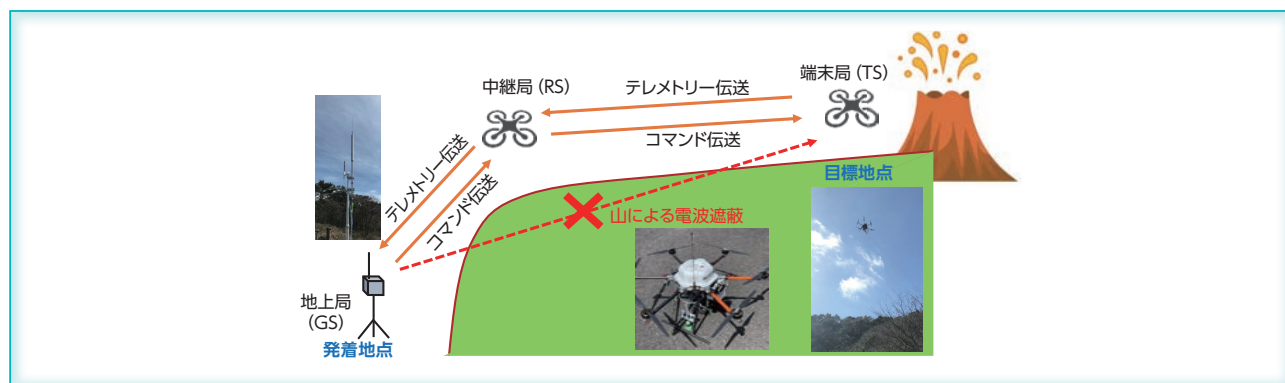


図6 活火山調査のための上空リレー飛行 (2022 年 4 月, 霧島山新燃岳にて)

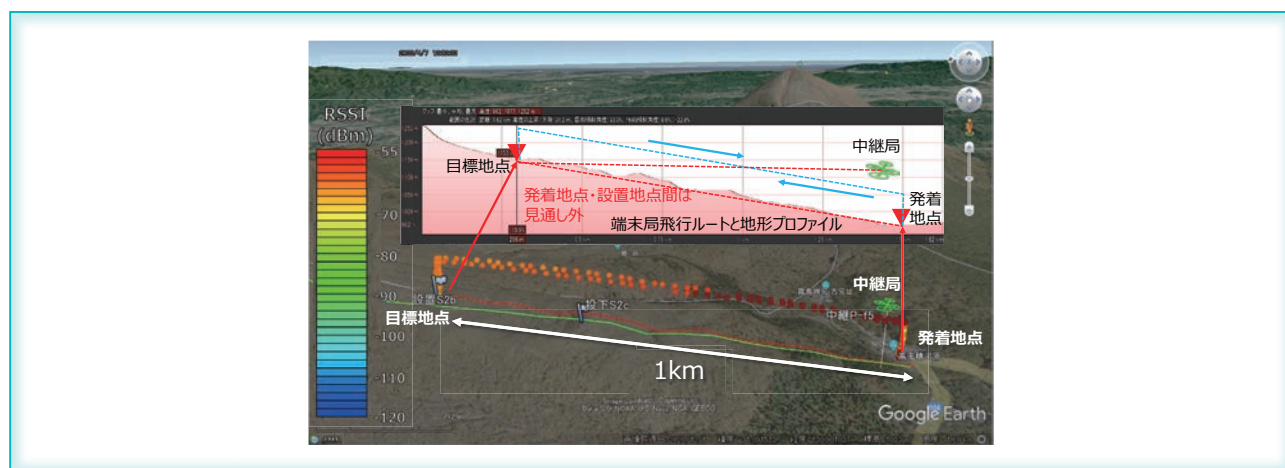


図7 上空リレーによる飛行軌跡と地形プロファイル

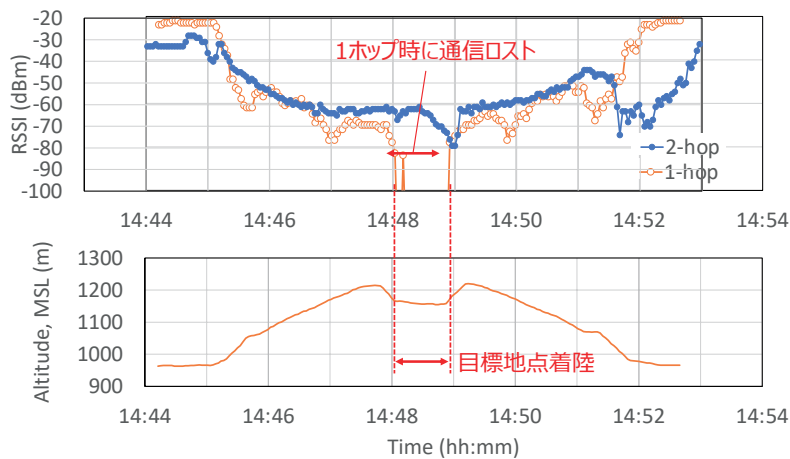


図8 1ホップと2ホップでの端末局受信電力の比較



図9 山中の沢筋に沿った飛行経路での検証

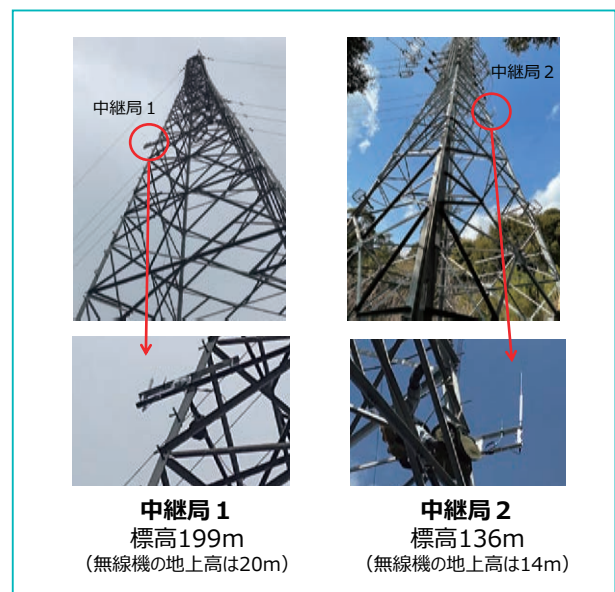


図10 送電鉄塔への中継局の設置

いる⁽⁷⁾が、詳細は別の機会に報告する。

4.1.2 山間部での飛行への鉄塔リレーの適用評価

山間部のインフラ設備等を点検するためのドローンを飛行させる場合、飛行経路の周辺に鉄塔などがある場合には、それを活用して中継局を固定設置して通信中継することも可能である。鉄塔に無線機を設置した場合は地上局として扱えるため、規則上は最大1Wまでの出力が可能である。

図10は、山中の送電線の点検を想定して実施した通信評価実験⁽⁸⁾において、飛行経路の途中、山の頂上付近にある2本の送電鉄塔にそれぞれ中継局を1局ずつ固定した様子である。実験ではこの二つの中継局により、最大3ホップの接続が構成できるようにした。

図11は、片道の飛行経路に沿って飛行するド

ローンが通信に成功した飛行位置と、そのときの端末局受信のRSSIの推移を表すヒートマップ、並びに離陸地点から着陸地点までの直線上の地形プロファイルである。飛行経路は送電線に沿って設定されている。中継局1付近から先は地上局からは完全に見通し外となり、山の背後にある着陸地点まで2km強の飛行となっている。図11から、見通し内から見通し外までほぼ全ルートで通信リンクが維持されていることが示されている。

4.1.3 洋上での長距離伝搬評価

コマンドホッパーの最後の事例は、長距離の測定が可能な洋上において、長時間飛行が可能な固定翼エンジンドローン2台に中継局と端末局をそれぞれ搭載して行った試験である⁽⁹⁾(図12)。

図13は端末局、中継局をそれぞれ搭載したド

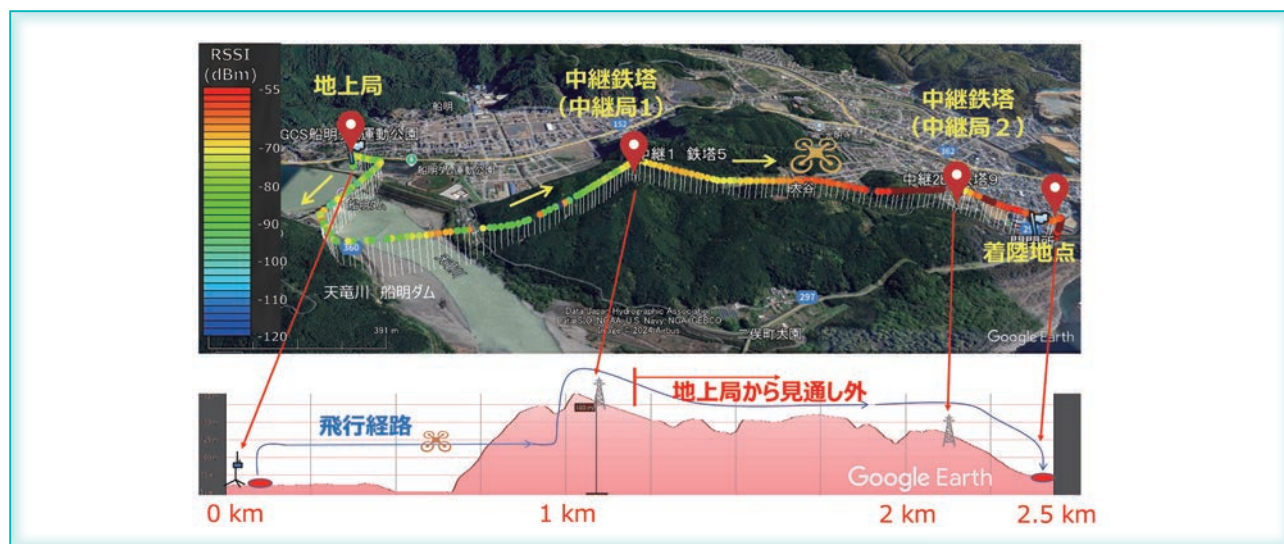


図 11 鉄塔リレーによる飛行の経路と端末局受信 RSSI のヒートマップ、並びに地形プロファイル
(浜松市天竜区船明ダム付近)

ローンの飛行軌跡と受信電力のヒートマップである。端末局搭載ドローンは地上局から最大 10 km ほどまで飛行しているが、U169 によるコマンド・テレメトリ通信の接続には成功していることが分かる。ただし、そのほとんどは地上局と端末局が直接つながる 1 ホップリンクであり、中継局は経由していない。また頻繁に短時間のリンクロストが発生している。この理由としては、ドローン機体内部の電源及びエンジンが発する雑音による受信感度低下によるものと推測されている。図 14 は、ドローンの電源オン、エンジンオンのときに胴体近傍で計測した雑音スペクトルを示しており、169 MHz 帯

近傍で約 9 dB ほどの雑音フロア上昇が見られている。この雑音フロアの上昇により上空局の受信条件が厳しくなっており、中継局と端末局の間の上空・上空間リンクの通信距離も 2 km 前後まで低下してしまっていることが確認されている。

図 15 は、1 ホップ接続時の端末局 (TS) 及び地上局 (GS) の各受信 RSSI の距離減衰特性である。ほぼ自由空間減衰となっており、ここでは海面反射によるフェージングの影響はほとんどなく、主にアンテナパターンによるレベル低下が見られている。グラフの下方に伸びている線は雑音の影響に伴う通信ロストを表している。端末局受信と地上局受信の

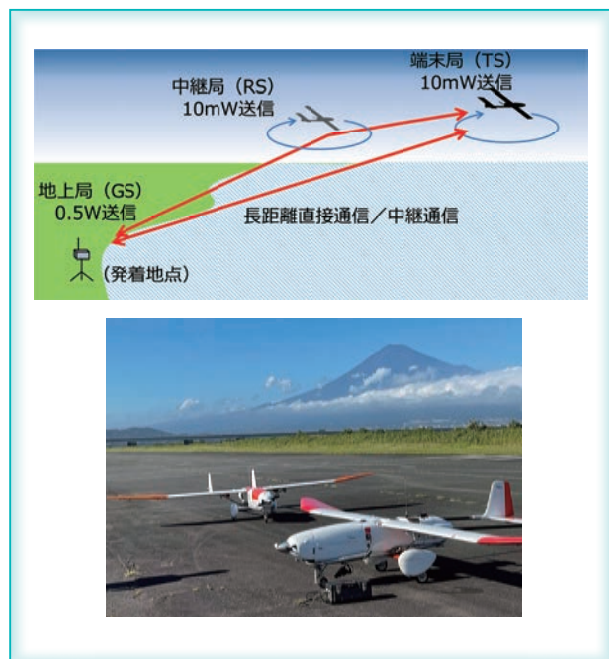


図 12 洋上での長距離伝搬試験と使用した固定翼エンジンドローン (2022 年、静岡県富士川滑空場)

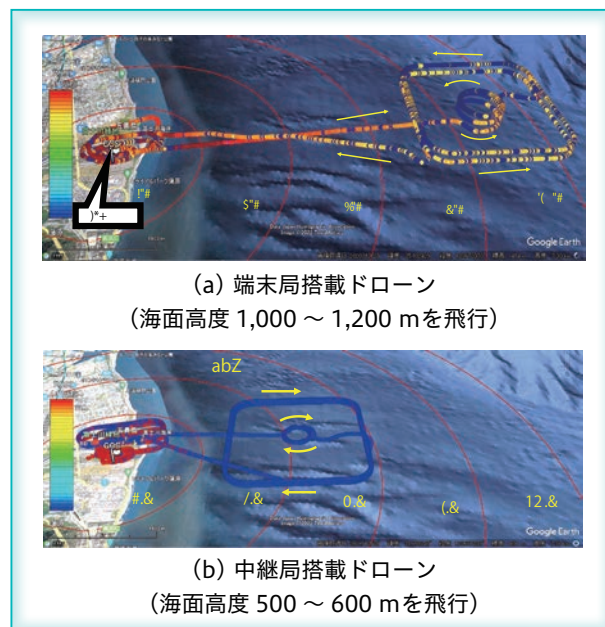


図 13 端末局及び中継局の各搭載ドローンの飛行軌跡と受信 RSSI ヒートマップ
(濃い色のドットはリンクロストを示す.)

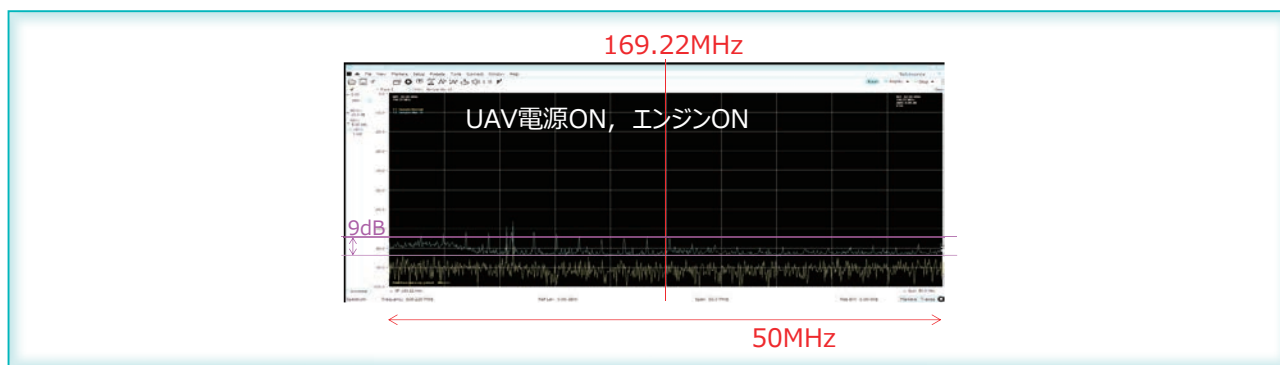


図 14 ドローン機体内部の雑音スペクトル

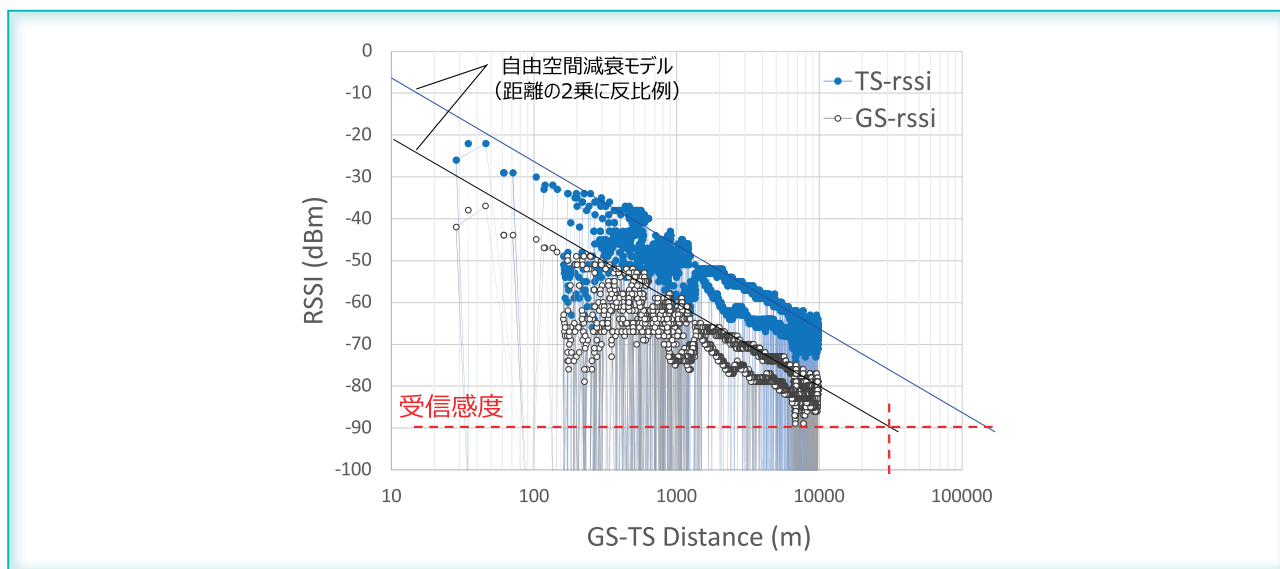


図 15 端末局と地上局の各受信 RSSI の距離減衰特性

RSSI の差は、送信電力の差によるものである。この減衰カーブを延ばしていくと、雑音の影響が排除できれば、無線機の受信感度は -90 dBm 程度と推定されているので、地上局－中継局、中継局－端末局の各通信到達距離は $20\sim 30$ km 程度が期待できることが分かる。

4.2 機体間通信 (V2V) リンクとその連携制御への応用

上空－上空間の連携に関するもう一つの技術として、地上局を経由せずに上空局同士 (V2V) で互いの位置情報等を共有する通信リンクを直接結び、これをドローン同士の自律的な連携制御に応用するシステム (図 16) の開発と実証について述べる。

NICT において開発した V2V 通信システム (「ドローンマッパー*」と呼んでいる。) ⁽¹⁰⁾ は、免許が不要な特定小電力無線局である 920 MHz 帯を利用しており、LPWA (Low Power Wide Area) 方式

の一つであるチャープ変調信号 (LoRa) あるいは従来の変調方式である FSK (Frequency Shift Keying) を通信距離やデータ速度の要求に応じて選択することができる。LoRa の場合、小形の端末でかつ送信電力も 20 mW ながら、電波の見通しが良ければ 10 km 程度以上届く能力を持つ。FSK でも 1 km 程度届く。この電波により、GNSS に同期した固定あるいはランダムな送信タイミングで、1 秒間に $1\sim 4$ 回の頻度で自機の位置情報等を周囲にブロードキャストし、周囲のほかの機体がそれをそれぞれ受信する。1 台の通信端末における送信と受信はタイミングをずらして行うため、相互に干渉 (自家中毒) することはなく、同一の周波数で行え、周波数利用効率が高い。

この V2V 通信システムをドローン間の連携制御に利用するため、ドローン上において V2V 通信端末を別の補助コンピュータを経由してドローンのフライトコントローラにシリアル接続する (図 17)。この補助コンピュータは、所定の連携飛行制御を行わせるため、V2V 通信端末で受信された他機の位

* ドローンマッパーは登録商標。

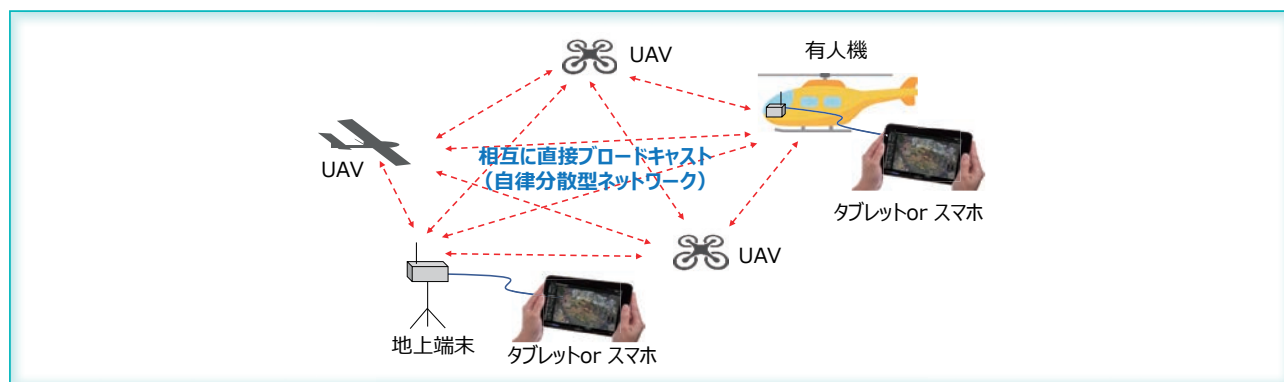


図 16 機体間 (V2V) 通信システム「ドローンマッパー*」

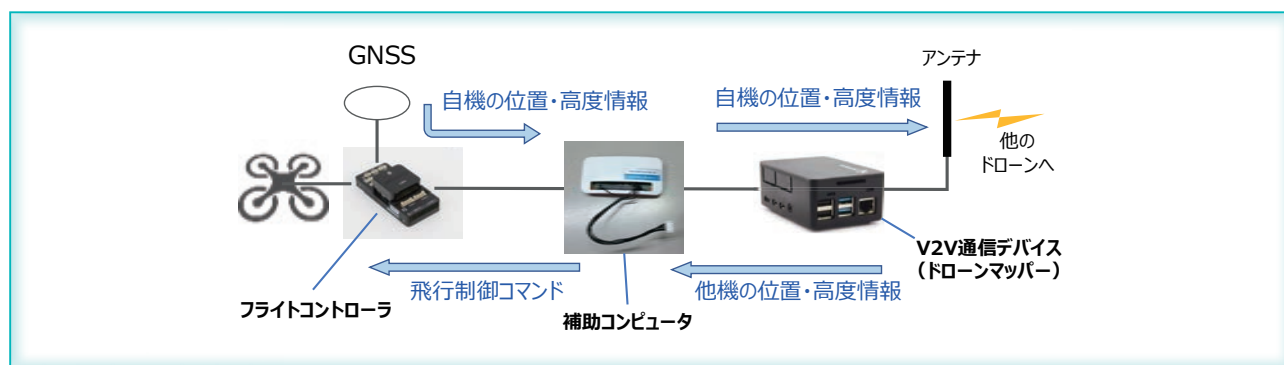


図 17 V2V 通信端末とドローンとの接続

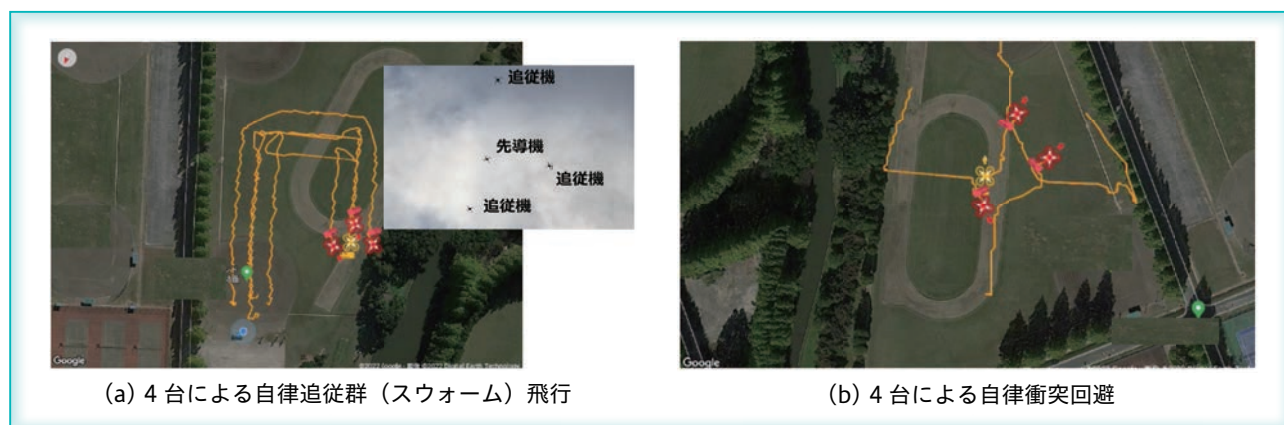


図 18 ドローン間の連携制御実験

(位置更新頻度 2 回 / 秒, 飛行速度 1 ~ 3 m / 秒, 2022 年, 大宮けんぽグラウンド)

置情報と自機の位置情報とから自機と他機の相対位置を計算し、適切な飛行制御コマンドを生成して自機のフライトコンピュータに与える役割を果たす。その飛行制御コマンドの内容によって、自律追従フォーメーション飛行や自律衝突回避等の機体間での協調連携飛行を行わせることができる。

このシステムを各ドローンに実装し、自律追従群 (スウォーム) 飛行と自律衝突回避に成功したコンセプト実証実験⁽¹¹⁾の飛行軌跡を図 18 に示す。

図 18 (a) はドローン 4 台による自律追従群 (スウォーム) 飛行を示し、地上からの制御は先導機のみに行い、追従機は先導機に一定の相対位置を保つ

て追従するプログラムを実装している。図 18 (b) は同じく 4 台による自律衝突回避を示し、他機に一定の距離まで接近したら、停止するか右に避けるかの選択を行い、地上の操縦者を介さずにドローンが自分で判断して自律的に衝突を回避するプログラムを実装している。

このシステムはドローン同士だけでなく、ドローンと有人ヘリの間の安全確保にも適用できる。まだドローンの上限速度、対応台数、様々な状況に対応できる柔軟性などに課題があり、引き続き機能向上に取り組んでいる。

このような複数機体の連携制御は、より多くのド

ローンが高密度かつ遠方まで飛行する等の状況において、空の安全性向上と地上側との無線リンクの数を減らして、周波数やコストを節減するために役立つものと期待される。

5 おわりに

ドローンを安全に飛行させるための制御通信に関して、課題と制度の現状を述べるとともに、課題解決に向けた取組みの一つとして、ドローン同士、無線局同士を連携させる技術と、そのフィールド試験評価で得られた性能について述べた。しかし、まだ雑音による干渉や飛行制御アルゴリズムなどに課題があり、引き続き今後のドローンの普及と社会貢献を目指して、無線通信の観点から取組みを進めていきたいと考えている。

謝辞 本研究の一部は、内閣府「革新的研究開発プログラム」、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP17004）の結果得られたものである。また、霧島での実験と砂防ダム点検を想定した実験は株式会社建設技術研究所、浜松での実験は中部電力、中部電力パワーグリッド及び日立製作所、固定翼ドローンによる実験は航空自衛隊航空開発実験集団との共同によるものである。

■ 文献

- (1) 国土交通省，“無人航空機レベル4 飛行ポータルサイト.” <https://www.mlit.go.jp/koku/level4/>
- (2) 国土交通省，“ドローンのレベル3.5 飛行制度の新設について,” 2023年12月26日. <https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/content/001716111.pdf>
- (3) 総務省，“無人航空機等における携帯電話等の端末の利 用.” <https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/uav/index.htm>
- (4) 総務省情報通信審議会情報通信技術分科会陸上無線通信委員会（第28回）資料，“ロボットにおける電波利用の高度化に関する技術的条件（案）,” 2016年1月26日. https://www.soumu.go.jp/main_content/000397015.pdf
- (5) JUTM ホームページ. <https://jutm.org/>
- (6) R. Miura, T. Matsuda, F. Ono, L. Shan, and T. Matsumura, “Performance of multi-hop command and telemetry communication system in 169 MHz band for operation of drones beyond line-of-sight,” J. ARME, vol. 3, no. 5, pp. 468-479, Sept. 2022. <https://lupinepublishers.com/robotics-mechanical-engineering-journal/special-issue/ARME.MS.ID.000175.pdf>
- (7) NICT, “見通し外を飛行するドローンを安全に制御する実証実験に成功,” 2024年1月25日. <https://www.nict.go.jp/press/2024/01/25-1.html>
- (8) 三浦 龍, 松田隆志, 单 麟, 越川三保, 松村 武, 追良瀬利也, 小林健悟, 谷村和彦, “山中の送電鉄塔を中継する UAV の 169 MHz 帯通信実験,” 2022 信学ソ大, A-16-2, Sept. 2022.
- (9) 三浦 龍, 松田隆志, 越川三保, 松村 武, 古川 徹, 青木信磨, 菅沼好恵, “洋上飛行する UAV エンジン機との 169 MHz 帯長距離 C2 リンク実験,” 2024 信学ソ大, A-16-01, Sept. 2024.
- (10) L. Shan, R. Miura, T. Kagawa, F. Ono, H. B. Lee, F. Kojima, and S. Kato, “Field tests on ‘Drone Mapper’-location information and remote ID sharing network in the 920 MHz band for drones-,” WPMC2018, Nov. 2018.
- (11) NICT, “世界初, ドローン同士の直接通信で自動追従群飛行と自律接近回避に成功,” 2022 年 4 月 11 日. <https://www.nict.go.jp/press/2022/04/11-1.html>.

(2024 年 11 月 1 日受付, 2025 年 1 月 15 日再受付)

三浦 龍 (正員)

1984 横浜国大・院・修士課程了。同年郵政省電波研究所（現在の情報通信研究機構）入所。途中、ATR 等に出向。帰任後上席研究員を経て 2020 年定年退職。現在ワイヤレスシステム研究室主任研究員（非常勤）。無人航空機用の通信の研究や団体活動に従事。博士（工学）。



松田隆志 (正員)

2010 神戸大・院・博士課程了。情報通信研究機構入所。シート媒体通信、ワイヤレス給電、端末間通信、海中における電波通信に関する研究に従事。2024 ワイヤレスネットワーク研究センターワイヤレスシステム研究室研究マネージャ。無人航空機との通信に関する研究に従事。博士（工学）。



越川三保

2004 情報通信研究機構入所。以来、旧横須賀無線通信研究センター、ワイヤレスネットワーク研究センター等において電波伝搬、無人航空機及びサイバネティックアパタの通信に関する研究・実験支援に従事。現在同センターワイヤレスシステム研究室研究技術員。



松村 武 (正員)

1998 東北大・院・修士課程了。複数の企業で無線通信機器開発に従事。2007 情報通信研究機構入構。2010 東北大・院・博士課程了。2016 京大・院・情報学研究科准教授。帰任後 2021 からワイヤレスシステム研究室室長。B5G、ワイヤレスエミュレータ、サイバネティックアパタ遠隔操作高信頼化等の研究に従事。博士（工学）。



ドローンの運航管理システム

Unmanned Aircraft System Traffic Management

西沢俊広 Toshihiro Nishizawa†

Summary

本解説論文では、ドローンを安全に運用するために必要な情報共有や調整を円滑にするドローン運航管理システム（UTM: Unmanned Aircraft System Traffic Management）について、その必要性・目的、機能構造、研究開発状況及び制度整備状況を解説する。また、ドローンに加えて高高度プラットフォームシステム（HAPS: High Altitude Platform System）等の様々な航空機の運用についても取り上げ、複数種別の航空機の運航管理の課題について論じる。

Key Words

ドローン、無人航空機、運航管理、UTM、ドローン航路

1 はじめに

航空法では「人が搭乗しない航空機で、遠隔操作または自動操縦によって飛行するもの」を無人航空機と定義している。本論文では無人航空機のうち、100 g 以上 25 kg 未満の小形の無人航空機をドローンとして定義し、解説をする。

現在ドローンの利活用が進んでいる。農薬散布、測量、点検などの分野では、管理された土地の上空で利用することで普及が進んでいる。一方で、物流や警備、巡視といった分野では、長距離のドローンの活用となり、日本全国で実証が取り組まれている。

ドローンの普及には、次の三つの課題が挙げられる。一つ目は、ドローン運航者の情報共有や調整を円滑にし、安全な運航を実現することである。二つ目は、ドローンの機体自体の安全性を向上させることである。三つ目は、ドローンを活用したビジネスの経済的合理性を確立することである。これら三つの課題が解決されることで、ドローンが普及し、様々な分野で利活用が進むこととなる。空を見上げれば、至るところでドローンが飛行しているのを見るのが日常になると想定される。

将来、高密度に多数のドローンを安心・安全に運航するためには、ドローンの運航者に対し、安全にドローンを運航するために必要な情報を提供し、ドローンの飛行計画を管理し、ドローンが正常に飛行

しているかを管理する必要がある。そのため、ドローンの運航者に対して、ドローンを安全に運航するための情報提供やサービス提供をするシステムがドローン運航管理システム（UTM: Unmanned Aircraft System Traffic Management）である。

2 UTM の機能構造

UTM の機能構造については、標準化団体である国際標準化機構（ISO: International Organization for Standardization）において、筆者がプロジェクトリーダーとなり、世界のドローン分野のエキスパートと議論を重ね、規格文書「ISO 23629-5:2023 UAS traffic management (UTM) Part 5: UTM functional structure」としてまとめた⁽¹⁾。

UTM の機能構造を国際標準化したことで、世界各国のドローンに関わるステークホルダーが、運航管理に必要な機能を共通的に定義された言葉で議論できるようになる。UTM はドローンの運航を管理するための基盤となるシステムである。そのため、ドローンを活用したシステムに求められる具体的なサービス・機能要件や、システム全体のアーキテクチャの検討、ステークホルダー間の機能実装分担、システムの調達などの調整を齟齬なく実施できるようになる。本規格文書では UTM の機能を大きく六つに整理した、機能構造のブロック図を図 1 に示す⁽²⁾。以下にそれぞれの機能を説明する。

2.1 空域情報管理機能

ドローンが飛行可能な空域を設定し、関係者に情報を共有する機能を提供する。また、航空機の管制

† 公立はこだて未来大学、函館市
Future University Hakodate, Hakodate-shi,
041-8655 Japan

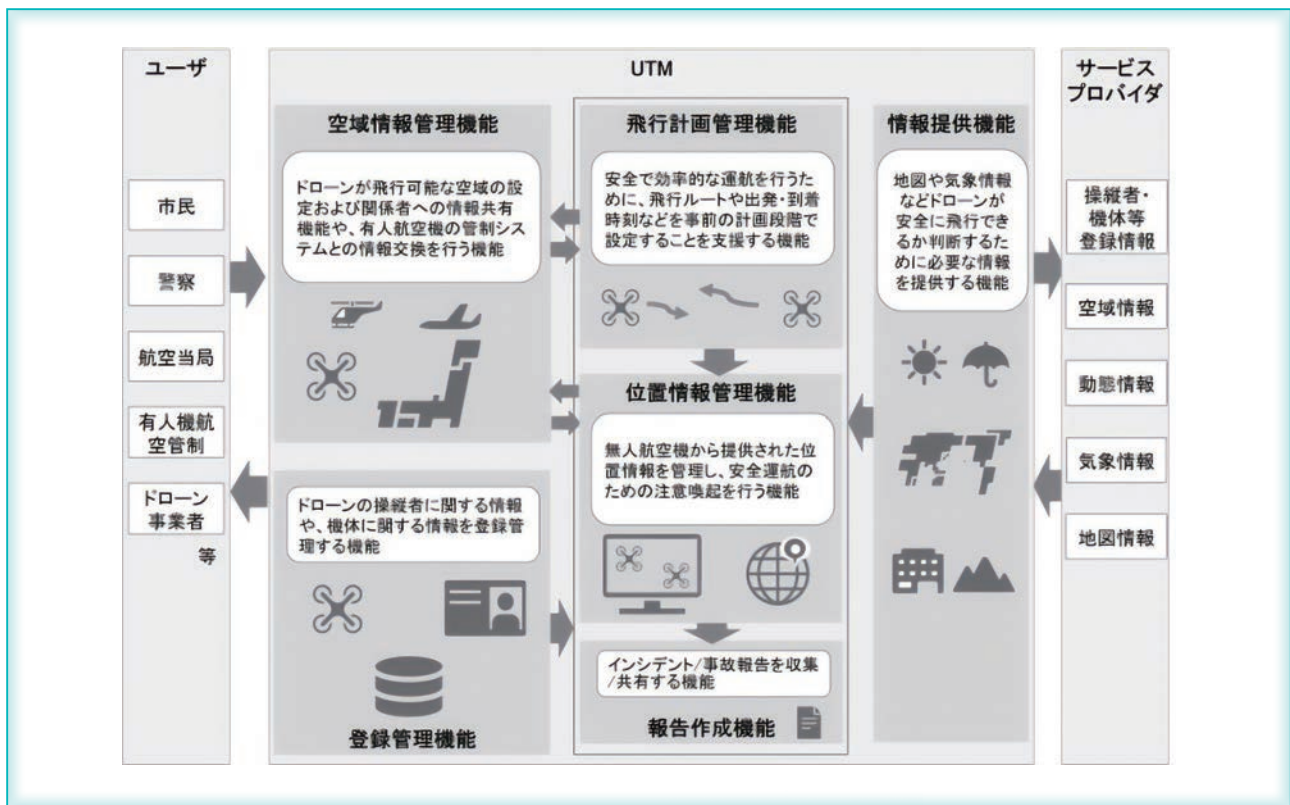


図1 UTMの機能構造 (NEDO プレスリリースから) (1), (2)

システムとの情報交換を可能にする機能も備える。

2.2 飛行計画管理機能

ドローンの安全かつ効率的な運航を実現するため、飛行ルートや飛行開始時刻・終了時刻を計画段階で設定することを支援する機能を提供する。

2.3 位置情報管理機能

飛行中のドローンから提供された位置情報を管理し、安全運航のための注意喚起を行う機能を提供する。

2.4 情報提供機能

地図や気象に関する情報など、ドローンを安全に飛行でき得るかを判断するために必要な情報を提供する。

2.5 登録管理機能

ドローンの操縦者や、機体に関する情報を登録管理する機能を提供する。

2.6 報告作成機能

ドローン運航中のインシデントや事故の報告を収集・共有する機能を提供する。

3 UTMの研究開発の動向

UTMの研究開発は日本においては国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト（DRESS プロジェクト）」を2017年から2022年まで実施した^{(3), (4)}。更に2022年からドローンだけでなく「空飛ぶクルマ」も統合する形で、NEDOが「次世代空モビリティの社会実装に向けた実現プロジェクト（ReAMo プロジェクト）」を5年計画で実施中である。

関連する技術としてドローン航路の整備について、NEDOが「産業DXのためのデジタルインフラ整備事業／デジタルライフラインの先行実装に資する基盤に関する研究開発」の一環で推進している。2024年度にドローンの特定のユースケースで、先行実装地域においてドローン航路の実証及び有効性の検証に取り組んだ。

これらのプロジェクトに関して研究開発の動向を解説する。

3.1 ドローン運航管理システムの相互接続試験

DRESS プロジェクトでは、2019年10月に、福島ロボットテストフィールド（福島県南相馬市、浪江町）において、ドローン事業者29社が参加した



図 2 2019 年に実施された NEDO の運航管理システムの実証 (NEDO プレスリリースから)⁽³⁾

ドローン運航管理システムの相互接続試験を実施した。筆者は本実証試験の責任者を務めた。

福島ロボットテストフィールド周辺で飛行したドローンの利用シーン及び飛行密度を図2に示す。同一空域で複数の事業者がドローンを安全に運航するためにUTMに相互接続し、1時間、1km²に100フライト以上の高密度のドローン飛行試験を成功させた。福島ロボットテストフィールドの総合管制室に、複数のドローン事業者が情報共有するための「運航管理統合機能」のサーバを設置した。運航管理システムのAPI及びAPI接続支援サービスを利用して、ドローン運航管理システムの相互接続試験を実施し、運航管理システムの実用性や相互接続に関するセキュリティ対策の有効性を実証した。

運航管理システムのうち、運航管理統合機能は複数のドローン事業者間で飛行計画（飛行を計画する経路やエリアの情報）や飛行状況（飛行させているドローンの位置、高度、速度などのリアルタイム情報）、空域情報（飛行禁止空域や地表障害物などの空域の安全に関する情報）などの情報を共有する

サービスを提供する。ドローン事業者により運用される「運航管理機能」は、運航管理統合機能が提供するサービスを活用しドローンの運航を管理する。これにより、同一空域で複数のドローン事業者がドローンを飛行させる場合でも、相互の情報を共有することができ、安全にドローンを運用することが可能となった。また、「情報提供機能」が地図情報、気象情報等、ドローンを安全に飛行させるのに必要な情報を提供した。

相互接続試験では一般のドローン事業者が参加できるように、ネットワークを介して運航管理統合機能と情報提供機能に接続可能とした。そのため、ネットワークの安全性を向上させるため、ファイアウォールとIDS（侵入検知システム）を設置し、接続する事業者には認証キーを配布し、認証された事業者のみが接続した。また、複数ドローンによる気象観測、複数ドローンを隊列飛行させた物流など、複数のドローンを同時に運用するケースを想定した飛行計画や飛行状態の管理を可能にするとともに、これらのドローンを安全に運用するための空域利用



図3 2021年に実施されたNEDOの運航管理システムの実証（NEDOプレスリリースから）⁽⁴⁾

方法や運航ルールについて、運航管理シミュレーションによる検証・評価を行った。

3.2 複数地域で同時飛行する運航の管理実証

DRESS プロジェクトにおいて、2021年10月に全国13地域で、合計52機を同時に飛行させる運航管理の実証実験を実施した⁽⁴⁾。

本実証では、東京都港区虎ノ門のKDDI株式会社のオフィス内に設置したドローン運航管理室から運航管理を行った。実際にドローンが飛行した地域は、北海道稚内市、宮城県仙台市、福島県南相馬市、石川県白山市、岐阜県美濃加茂市、静岡県富士市、三重県志摩市、兵庫県洲本市・姫路市・赤穂郡上郡町、高知県高岡郡四万十町、長崎県五島市・対馬市、大分県杵築市、宮崎県東臼杵郡美郷町の13か所であった。それぞれの地域で、物資配送、インフラ点検、災害を想定した被害の把握、スポーツの空撮等の利用シーンでドローンが活用された。

本実証により、遠隔地に設置した運航管理システムが機能・オペレーションの両面から全国で運用可能であり、複数のドローンが飛び交う上空で衝突回避などの運航管理業務を行えることが確認できた。また、各地域の抱える様々なニーズとドローンの活用方法についても検証した。

全国で実施されたドローンの実証の様子を図3に示す。

3.3 デジタルライフラインの先行実装に資する基盤に関する研究開発（ドローン航路）

NEDOは2024年7月に「産業DXのためのデ

ジタルインフラ整備事業／デジタルライフラインの先行実装に資する基盤に関する研究開発」の実施事業者の採択結果を公表した⁽⁵⁾。日本電気、KDDIスマートドローン、Intent Exchange、宇宙サービスイノベーションラボ事業協同組合、グリッドスカイウェイ有限責任事業組合、(株)トラジェクトリー、東大、(株)フジヤマの提案が採択された。

現在、ドローンを長距離にわたって飛行させる運用をする場合には、その飛行経路の安全管理をドローンを運航する事業者が実施する必要がある。そのコストを削減することが課題となっている。ドローン航路は、ドローンを安全に運航するための航路をあらかじめ設計し、複数の事業者がその航路を共用することで、コストの削減を目指すものである。更にドローン航路はUTMと連携し、ドローンを安全に運航するためのインフラとして整備されるものである。

ドローン航路システムは、地上及び上空のリスク等の制約要因に基づいて立体的な空域の航路を画定し、航路内部の安全かつ簡便な運航に必要な情報を配信するとともに、安全管理の支援を統合的に行う。本事業ではドローン航路システム、及びドローン関連のデータを流通するシステム等を構築する。更に、ドローン航路内の安全、効率的な運航のためのドローン航路に係る管理手法やルールの調査研究をする。

本稿執筆時点では、埼玉県秩父市と静岡県浜松市を先行実装地域として選定し、ドローンのマルチユースでの利用シーンで実証を行い、ドローン航路の有効性を検証する計画である。秩父市では送配電

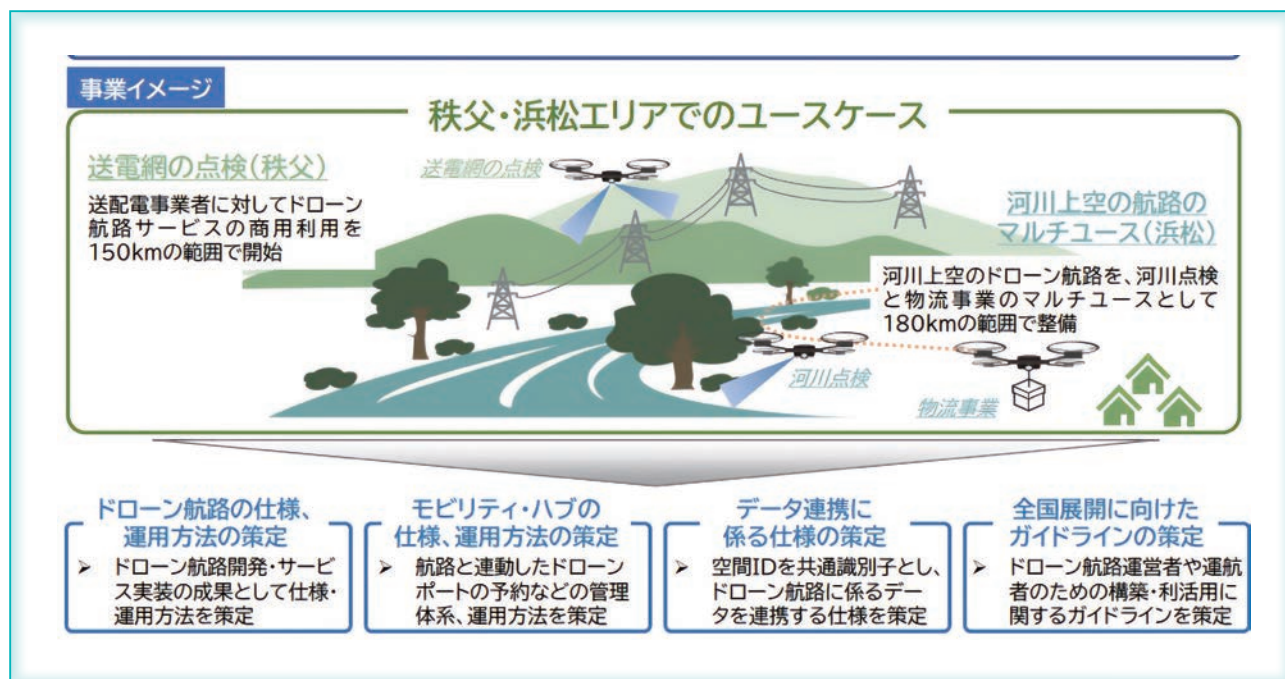


図4 NEDO ドローン航路の先行実装に関する研究開発（NEDO プレスリリースから）⁽⁵⁾

事業者に対してドローン航路サービスの商用利用を想定し、150 km のドローン航路を整備する。また、浜松市では天竜川水系の河川上空に 180 km のドローン航路を整備し、河川点検と物流のマルチユースの実証をする（図4）。

4 UTM に関する制度の動向

ドローンに関する制度については、政府が「小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会」を2015年12月に設置し、現在までに、航空法の改正に伴う飛行の許可・承認制度、機体の登録制度、機体認証制度、操縦ライセンス制度を整備してきた。更に、ドローン情報基盤システム（以下、DIPS）が構築され、現在、ドローンの運航者に利用されている。

UTM についての制度の議論については、2022年8月に開催された「小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会」第18回場で、国土交通省から空域の混雑度や運航形態に応じて、UTM の段階的導入を検討することが示された⁽⁶⁾。図5に空域の混雑度や運航形態に応じた UTM の段階的導入に関するスライドを示す。当面、空域の混雑度が低いことが想定されるため、STEP 1 としては単一の運航者がリスクの高い飛行を実施する際に UTM の利用を推奨としている。具体的な例として災害時の UTM の利用を想定している。STEP 2 の段階では、航空局が認めた UTM プロバイダ（以下、

USP）によるサービスを利用することにより、同一空域に複数の運航者がリスクの高い飛行を実施可能になることを目指す。更に空域の混雑度が高まる STEP 3 の段階では、指定空域内において、全てのドローンが航空局の認めた USP を利用することにより、高密度運航を可能にする。更に指定空域を飛行する有人機の位置情報の共有も可能にする。

現在、NEDO の ReAMo プロジェクトでドローン運航管理システムの研究開発が実施されている。これらの研究開発の動きに合わせ、UTM の制度整備に関する議論、合意形成が進められた。2024年4月に開催された小形無人機に係る環境整備に向けた官民協議会第19回場で、国土交通省から、無人航空機の運航管理（UTM）に関する制度整備の方針が示された⁽⁷⁾。

現状は STEP 1 として、USP のサービスの利用は限定的であり、航空局が整備した DIPS によりドローン運航者は飛行計画を通報し、飛行計画情報を共有する運用がされている状況である。

そこで、STEP 2 では国による USP の認定制度を整備し、UTM を利用してドローンの安全・効率的な運航管理が実施されることを目指す。UTM により飛行計画の重複の解消や、飛行中のドローンの位置情報を共有する。更に、飛行計画と実際の運航状況の適合性をモニタリングし、不適合が起きた場合や機体同士の干渉が発生したときにアラートがされるような機能が具備されることが望ましいと考えられている。また、USP の利用を一律に義務とせ

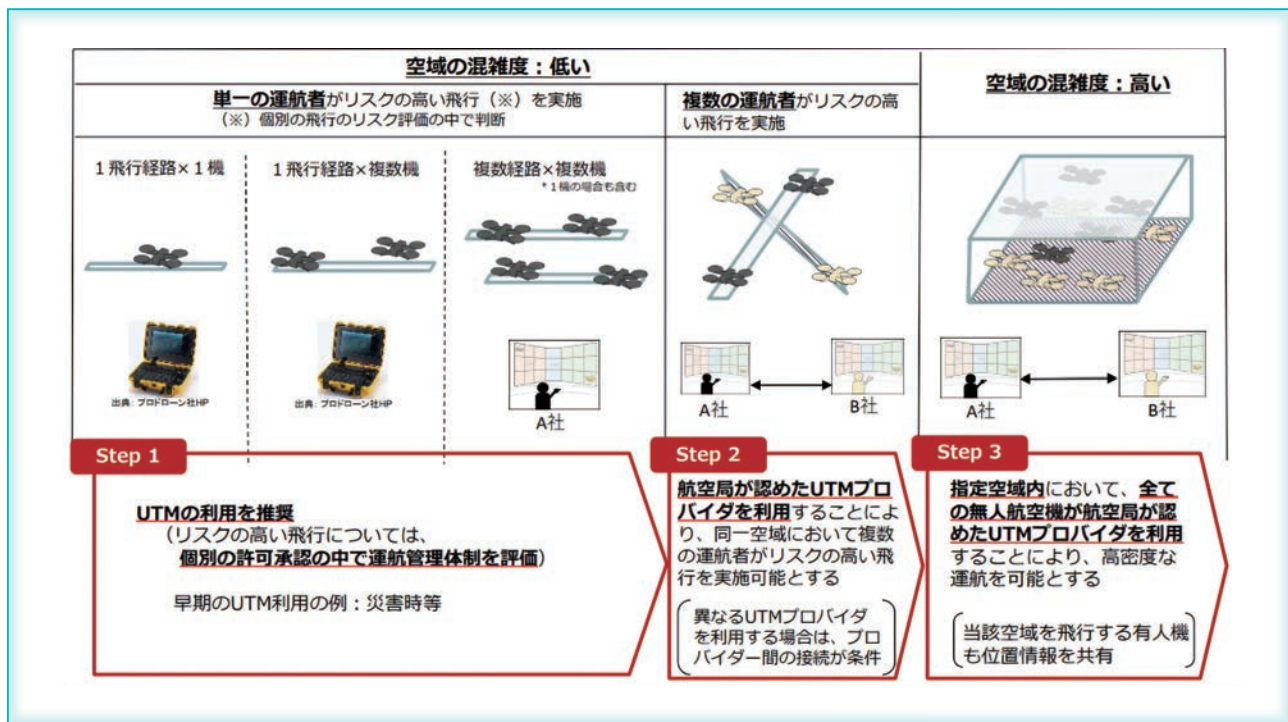


図 5 空域の混雑度や運航形態に応じた UTM の段階的導入
(小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会 第 18 回 国土交通省配布資料から ⁽⁶⁾)

ず、運航者が任意で利用することを想定している。

更に STEP 3 では、ドローンの運航頻度の一段の増加や、空飛ぶクルマの実用化による低高度飛行有人機の増加により航空機の衝突リスクが高くなることから、特定の空域を指定し、その空域で国が認定した USP の利用を義務化することが考えられている。

USP 認定制度の検討に当たり、ドローンの運航者、USP、航空局の役割分担に関する議論も進んでいる。ドローン運航者はドローンの安全な運航の責任を負い、USP は安全な運航を支援する情報提供などのサービスの提供に責任を負う。そして、航空局は航空法に基づき、機体登録、飛行の許可・承認、飛行計画の重複判定、飛行計画変更指示、事故調査を担うと整理された。

システムのアーキテクチャに関する検討も進んでいる。複数の USP が運用される場合には、USP 間の情報共有が課題となる。この実現のため、航空局が提供する DIPS を介して情報共有をする DIPS 拡張型、国が権限を与えた民間組織によるドローン飛行情報システムによる情報共有を実現するドローン飛行情報システム活用型のパターンが検討されている。

5 ドローンと他の航空機の安全な運用

本章では、ドローンとほかの航空機の安全な運用について、航空機の種別ごとの運用高度や管理方法を説明する。更に機体種別ごとの運航管理システムの連携について説明する。

5.1 航空機の運用高度と管理方法

航空機は種別に応じて運用高度を設定し、空域を分離することで航空機同士の衝突などの事故を防止している。図 6 に航空機の機体種別ごとの運用高度と管理方式を示す。

5.1.1 ドローン

航空法ではドローンは「150 m 未満」の低高度で運用するルールが定められており、それ以上の高度で運用する場合は個別に航空局の許可を得る必要がある。運航を管理するための UTM については 4. で述べたように研究及び制度設計が進んでいる。また、機体や操縦者の登録管理、飛行計画の共有などの機能については、航空局が提供する DIPS が運用されている。ほかの航空機との空域を分離するため、空港などの近辺でのドローンの利用は制限されている。また、ほかの航空機が接近した場合、運航者はドローンを直ちに安全な場所へ着陸させるか、飛行を中断する必要がある。

運用高度	機体種別	説明	管理システム	状況	イメージ
20,000m 付近	HAPS (High-Altitude Platform System)	成層圏で運用される。通信基地局などの応用に期待されている。	HATM (High Altitude Traffic Management)	研究中	
12,000m ～ 900m	計器飛行方式 (Instrument Flight Rules) で飛行する航空機 旅客機等	巡航高度は約 10,000m。	ATM (Air Traffic Management)	運用中	
900m ～ 300m	目視飛行方式 (Visual Flight Rules) で飛行する航空機 ヘリコプター、小型機等	航空法で300m以上で巡航することが求められる。	パイロットの責任で運用。管制空域ではATMに従う。	運用中	
600m ～ 150m	空飛ぶクルマ、UAM (Urban Air Mobility)	運用高度などのルールについて議論中。	UATM (Urban Air Mobility Traffic Management)	研究中	
150 m ～ 0m	ドローン	航空法で150m未満の高度で飛行することが求められる。	UTM (UAS Traffic Management) / DIPS (Drone Information Platform System)	研究中 ※一部機能はDIPSで運用中 登録管理、飛行計画共有等	

図6 航空機の運用高度と管理方法 (イラストは Google Imagen3 を用いて AI により生成した)

5.1.2 空飛ぶクルマ

空飛ぶクルマは少人数が搭乗できる電動のマルチロータ機や VTOL 機（垂直離着陸機）である。制度設計に関しては政府が「空の移動革命に向けた官民協議会」を 2018 年に設置し、空飛ぶクルマの実用化に向けた運用ルールの策定や安全基準の整備等を検討している。更に NEDO ReAMo プロジェクトの「低高度空域共有に向けた運航管理技術の研究開発」において UATM (Urban Air Mobility Traffic Management) が研究されている。空飛ぶクルマの運用高度については、ドローンの運用高度より高い「150 m 以上 600 m 未満」の低高度空域を飛行することが検討されている。

5.1.3 目視飛行方式で飛行する航空機

目視飛行方式で飛行する航空機にはヘリコプターやセスナ等の小形航空機がある。パイロットが自身の責任で目視により安全確認を行いながら機体を運用する。航空法により巡航時の高度は「300 m 以上」で、離着陸時には「150 m 未満」の低高度空域に一時的に侵入することがある。特にドクターヘリは要救助者に合わせて、学校の校庭や河川敷等に緊急着陸をする運用がされる。空港近辺などの管制空域では ATM (Air Traffic Management) の指示に基づき飛行する。

5.1.4 計器飛行方式で飛行する航空機

計器飛行方式で飛行する航空機は一般的なジェット旅客機等の航空機である。国家をまたいで運用されるため、国際的なルールに基づき、機体には無線機やセンサなどが搭載され、ATM の管理下で運用される。主に「8,000 m から 10,000 m」の高度で巡航する。計器飛行方式に対応した設備が整備されている空港や飛行場に離着陸する。

5.1.5 HAPS

高高度プラットフォームシステムを HAPS と呼ぶ。HAPS は約 20,000 m の高度で長期間にわたり運用される航空機である。HAPS は通信サービスを提供し、1 機当たり直径 100～200 km の広いエリアをカバーする大容量・低遅延の通信を実現する。HAPS については NEDO の「経済安全保障重要技術育成プログラム／高高度無人機による海洋状況把握技術の開発・実証」が 2024 年 7 月にスタートした。本研究で HATM (High Altitude Traffic Management) の開発に取り組んでいる。

5.2 航空機種別ごとの管理システムの連携

航空機の安全な運用のためには、機体種別ごとの管理システムや航空管制システムを連携させることが重要である。2. の UTM の機能構造で述べたとおり、ドローンの運航を管理する重要な機能とし

て、飛行計画管理機能と位置情報管理機能がある。これらはドローンのみならず、ほかの種別の航空機でも管理される情報であり、これらの情報を連携することで安全な航空機の運航が実現できる。

例えば HAPS は離陸後、ドローンや空飛ぶクルマ、目視飛行方式及び計器飛行方式の航空機が運用される高度を通過し、最終的に約 20,000 m の高度に到達する。不慮の事故で墜落となると、ほかの航空機が運用される高度に落下することとなる。

また、空飛ぶクルマは都市部や郊外にポートが多数設置され、短距離での離着陸が頻繁に行われる運用が想定される。このため、離着陸時にドローンが運用される低高度空域に侵入する機会が多い。

ドローン、空飛ぶクルマ、目視飛行方式や計器飛行方式の航空機、HAPS を安全に運航するためには、各運航者が飛行計画や位置情報を共有する必要がある。更に、飛行計画の調整や、互いのリアルタイムの位置情報を活用した衝突回避が求められる。航空機種別ごとの管理システムが有する飛行計画や位置情報を共有する仕組みの構築が急務である。

6 まとめ

本解説論文ではドローンを安全に運用するために、ドローン運航者の情報共有や調整を円滑にする UTM について、その必要性、目的、機能構造、及び研究開発や制度整備の進捗状況について解説した。更に、ドローンとほかの航空機に関する運航管理の課題について解説した。

今後、UTM が整備されることで、物流や災害対応、農業など多様な分野でドローンが活用され、多数・高密度の運航が実現し、安心・安全かつ効率的な社会の実現が期待される。

謝辞 本解説論文の成果の一部は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP17004, JPNP22002, JPNP22006）の結果として得られたものである。

■ 文献

- (1) ISO, “ISO 23629-5:2023 UAS traffic management (UTM) Part 5: UTM functional structure,” April 2023. <https://www.iso.org/standard/78961.html>
- (2) NEDO, “ドローンの社会実装に向けてドローン運航管理システムの機能構造を国際規格化,” プレスリリース, 2023 年 4 月 27 日. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101645.html
- (3) NEDO, “一般のドローン事業者も参画したドローン運航管理システムの相互接続試験に成功,” プレスリリース, 2019 年 10 月 30 日. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101228.html
- (4) NEDO, “全国 13 地域で同時に飛行するドローンの運航管理に成功,” プレスリリース, 2021 年 11 月 24 日. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101494.html
- (5) NEDO, “産業 DX のためのデジタルインフラ整備事業／デジタルライフラインの先行実装に資する基盤に関する研究開発に係る実施体制の決定について,” プレスリリース, 2024 年 7 月 23 日. https://www.nedo.go.jp/koubo/IT3_100319.html
- (6) 内閣官房小型無人機対策推進室 “レベル 4 の実現に向けた新たな制度整備等,” 小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会（第 18 回）配布資料 1, 2022 年 8 月 3 日. https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyougi_dai18/gijisidai.html
- (7) 国土交通省航空局安全部安全企画室, 経済産業省製造産業局次世代空モビリティ政策室, “無人航空機の運航管理 (UTM) に関する制度整備の方針,” 小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会（第 19 回）, 2024 年 4 月 5 日. https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyougi_dai19/gijisidai.html

（2024 年 11 月 17 日受付, 2025 年 1 月 30 日再受付）

西沢俊広（正員）

公立はこだて未来大・システム情報科学・複雑系知能学科准教授, Intent Exchange 株式会社兼務。1996 筑波大大学院理工学研究科修了後、日本電気にてロボット・ドローンの研究開発及び事業開発に従事。NEDO のドローン運航管理システムに関するプロジェクトの研究責任者, 国際規格 [ISO 23629-5: UTM functional structure] 作成プロジェクトリーダーを歴任。2020 から独立行政法人情報処理推進機構に出向し、ドローン利活用社会、ドローン航路のアーキテクチャ設計を担当。2024-04 から現職。博士（工学）。

