

2-9 小型無人航空機におけるワイヤレス通信技術の研究開発 ～空のIoT実現に向けて～

三浦 龍 小野文枝 加川敏規 単 麟 辻 宏之 李 還幫 松田隆志 滝沢賢一 児島史秀

小型無人航空機（以下、小型無人機）は、ドローン（本来、“ドローン”は大型・小型を問わず、無人機一般を意味して使われている）とも呼ばれるが、空撮や測量を中心に急速に普及しつつあり、今後はインフラ点検、物流、災害等の分野での活用も見込まれて市場は更に成長すると見られ、「空の産業革命」であるともいわれている。

一方、安全性という観点では、よく利用されているマルチロータ型のドローンはまだまだ未熟であり、その向上は今後の普及のカギを握っているとも言われる。ドローンの安全な操縦や状態監視には信頼性の高い無線が不可欠であるが、現在運用されているドローンの無線のほとんどは、ホビー用のラジコンからきたものであり、高信頼が要求される業務用として適したものではない。

我々のグループでは、4年ほど前から災害時の通信確保のための手段の1つとして、固定翼型の小型無人機を導入し、“空飛ぶ電波タワー”とするための研究開発と実証実験を実施し、その電波伝搬特性の解明を行ってきた。また、その経験とノウハウに基づき、さらに国の電波関連の法制度の改正に合わせ、マルチロータ型も含む小型無人機の産業応用の拡大に不可欠な、高信頼な運用を可能とする無線方式の基本技術の提案と研究開発を行ってきた。今後もこれらの成果を更に拡張・発展させ、空のIoT、空の産業革命の実現に寄与していきたいと考えている。

1 はじめに

地震、津波、洪水などの広域災害では、道路等の破壊による交通マヒだけでなく、通信設備の破壊や停電により、普段当たり前のように使用していた通信網が使えなくなることによって、情報通信の孤立地域が数多く発生する。通信が孤立すると、現地の住民の安否確認ができないだけでなく、被災状況が把握できずに救援活動が遅れたり、不足物資の把握ができないなどの事態が発生する。

このような状況下で、いち早く情報孤立地域との間の臨時通信回線を確認するための手段として、2012年に海外より小型無人機を導入した。当時は、まだ無人航空機(UAV)やドローンという名称・技術は国内ではあまり知られていなかったが、我々が導入したのは滑走路が不要、手軽に持ち運べて必要な時に迅速な展開、2時間程度の長時間飛行、電波がつながった状態での目視外飛行が可能と、その時点で世界の最先端レベルともいえる電動固定翼型の小型無人機であった。これに無線中継器を搭載して飛行させることで、“空飛ぶ電波タワー”として活用する無線中継システムを開発し、全国各地にて自治体等と連携しながら防災等を想定した実証実験を実施するとともに、様々

な飛行環境におけるその電波伝搬や通信品質に関するデータ等を収集し解析を行ってきた。

小型無人機はその後、特にマルチロータ型のものを中心に、ドローンという呼称が一般的となり、ホビー用、業務用の両面においてここ数年で急速に普及してきた。特に空撮、物流、インフラ管理及び災害対策等の分野でのニーズ拡大が著しく、“空の産業革命”ともいわれ、5年後の2022年での国内市場規模は2000億円規模、世界では10兆円規模ともいわれるようになった。

政府のロボット革命実現会議は平成27年1月に「ロボット新戦略」を発表し、また平成27年12月には無人機に関する条文が盛り込まれた改正航空法が施行され、法制面での基盤も強化されるとともに、技術開発と環境整備の両面にわたり産業成長を促進するためのロードマップが策定された。

一方、3次元空間を自由に飛び回る特性をもつ小型無人機は、その制御や状態把握には無線が不可欠であり、これをいかに高信頼化し使いやすくしていくかが上記各産業分野での無人機の安全性向上と普及・拡大にとって重要な課題である。しかし、これまでの小型無人機が用いる無線システムは、業務用であっても主にホビー(ラジコン)の延長線上にあり、安くて手軽

2 地上通信技術の研究開発

であるのとは裏腹に、無線が遠くまで届かない、遮蔽物の影響や電波等の干渉を受けるリスクがある、無線が届かない状態では途中でコントロールが効かない完全自律飛行(オートパイロット)に頼らざるを得ないなど、信頼性の観点で問題があった。

我々のグループでは、これまで小型固定翼型無人機で培ってきた無線の技術やノウハウを生かし、マルチロータ型を含む小型無人機を電波が直接届かない見通し外で制御する技術及び異なる操縦者に属する小型無人機間でそれぞれの位置情報を共有して、安全運航につなげる技術の開発と実証を行い、成果を挙げてきた。こうした活動と並行して、国際民間航空機関(ICAO)やアジア太平洋無線グループ(AWG)等での国際標準化への寄与や、総務省による国内初めての本格的なロボット(無人移動体)のための周波数割当ての活動も支援してきた。本稿では、初めての本格的な小型無人機の導入・運用から最近の成果に至る活動について報告する。

2 災害時の通信確保のための無線中継システムの開発と実証

1. システム概要

我々のグループでは、2011年3月の東日本大震災での甚大な通信インフラの被害と数多くの集落や避難所の通信が孤立した事実を踏まえ、被災直後の一時的かつ部分的な通信確保に役立てることを目指し、2012年、電動固定翼型の米国製小型無人機の1つであるPuma-AE[1]を3機導入し、これに搭載して“空飛ぶ電波タワー”とするための小型軽量な無線中継ユニットと地上局装置とで構成される無線中継システムを開発した[2](図1)。

このシステムは、高度数100mの上空を定点巡回飛行する小型無人機により途中の建物や山などの障害物の影響を受けることなく、地上の離れた2地点を無線で結ぶ。また、小型無人機2機を同時に飛行させて、2機間を上空でリレー中継することで、更に遠くの地点と結ぶことも可能である(図2)。

開発した無人機搭載用の無線中継ユニットは、一辺が約10cm程度の無人機のペイロード用スペースに専用バッテリーとともに収納され、重量は約500g弱(バッテリー含む)である。周波数は2GHz帯(実験試験局免許)、送信出力は2W、変調方式はMSKで、1時間半程度の動作が可能である。1チャンネルをTDMA/TDDで使用し、誤り訂正符号化率は1/2であるため、実効通信速度は400kbps程度であるが、無人機と地上局間の通信距離は15km以上が可能であることを確認している。2つの地上局はいずれもLANインタ

フェースを備えており、一方を無線LANのアクセスポイントとし、もう一方をインターネット回線に接続することにより無人機を介して孤立地域等に臨時的無線LAN(Wi-Fi)ゾーンを手軽に形成することができる。通信内容としては、メール、IP電話や安否確認などのアプリケーションが利用できる。また後述するように、無線LANの代わりに携帯電話ネットワークの超小型基地局である“フェムトセル”との接続による携帯電話バックホール回線中継にも成功している。

Puma-AEは、主翼の長さが2.8m、全長が1.4m、重さは5.9kgの電動固定翼型の小型無人機である。1回の飛行時間は2~3時間で、あらかじめ決められた経路に沿ってゆっくり長時間の自律飛行が可能である。発進・離陸は適当な広さのグラウンドか空き地から手投げで行う(図3)か、スプリング式のランチャーで行う。飛行機や地上局は防水仕様のため、雨天での飛行も問題ない。機体制御用の無線システムは、導入当初は2GHz帯を使用し、制御信号やコマンド信号、テレメトリ信号だけでなく、搭載カメラの映像も30FPSのVGA画質で伝送される。無人機局、地上



図1 導入した小型無人機 Puma-AE と開発した無人機搭載用無線中継ユニットと地上局

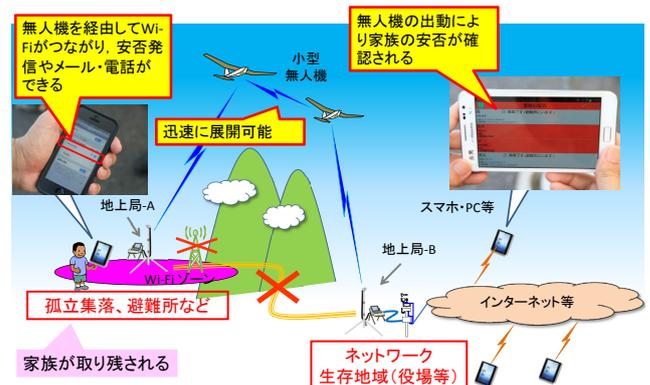


図2 2機の小型無人機のリレーによる無線中継

制御局とも出力1 Wが出せる実験試験局免許で運用しており、コマンド・テレメトリ・映像を伝送する無線の到達距離は、見通し条件であれば15 km以上に達する。ラジコンやマルチロータ型無人機等で最もよく使われている免許不要・小電力の2.4 GHz帯は使用していない。また手元のハンドコントローラには機体のテレメトリ情報や搭載カメラ映像がリアルタイムで表示されるため、操縦者から機体が直接目視できなくても、電波が常につながった状態で、有人航空機という「計器飛行」と同様な目視外飛行が可能である。

一方、無人機を制御するための周波数の1つとして、国際的にはITUの2012年世界無線通信会議(WRC-12)において5 GHz帯(5030～5091 MHz)の利用が合意されている[3]。

しかし、これを実際に利用可能とするためには、その伝搬特性や同一帯域内あるいは隣接帯域間での干渉回避と周波数を共用するための技術開発と技術基準の策定が必要である。この作業に貢献するべく、導入した無人機3機のうちの2機の制御用無線を5 GHz帯(2 GHz帯と同一の出力と帯域)に変更して実験試験局免許を取得、飛行運用しながら伝搬データの取得等を実施している。伝搬距離は8 km程度までと短くな



図3 無線中継用小型無人機の手投げ発進



図4 これまでの主な実証実験実績

るものの、2 GHz帯とほぼ変わらない安定性で飛行している。

近年、民生用として市場に出回っている小型無人機としては、マルチロータ型がほとんどであるが、通信中継に利用する場合はできるだけ長時間上空にとどまる必要があるため、15～20分程度の飛行時間しかもたないものが未だほとんどであるマルチロータ型より2時間以上飛行できる固定翼型が適していると考えられる。

2. 実証実験

開発したシステムの初フライト・初運用は、2013年3月25・26日に仙台で開催された「耐災害ICT研究シンポジウム」において実施した公開実証実験である。この実験では、東北大学キャンパス内に別途設置した「耐災害ワイヤレスメッシュネットワーク」のテストベッドに接続し、遠方にある孤立地域との間の安否情報やメールなどのやりとりが、インターネット接続が失われた状況にあっても無人機を介して可能であることを実証した。以来、2017年3月までの間に各地において200回以上、延べ100時間以上のフライト実験を行い、性能の検証、電波伝搬特性の測定、自治体等へのデモンストレーション、防災訓練への参加、さらには上空における電波環境測定や電波伝搬測定等を行ってきた(図4)。以下、これまで実施した数多くのフライト実験の中から仙台と高知での実験について紹介する。

(a) 長距離通信実験(宮城県仙台市)

この実験では、東北大学の青葉山新キャンパス造成地の上空(海拔高度750 m)にPuma-AEを旋回飛行させ、仙台市街を挟んで、太平洋岸方向のエリアにおいて、地上の受信局を仙台市が避難所に指定する小中学校や病院等の位置に設置し、最大14 kmまでの距離での2 GHz帯の伝搬特性とスループット特性の測定を行った(図5)。この測定では、市街地の建物等による散乱の影響が観測され、単純な自由空間伝搬に比べて通信品質の劣化が確認されており、距離10 kmほどの地点において、3割程度までのスループット低下が確認されている。なお、別途北海道で実施した長距離通信試験(地面は森林や牧草地)では、散乱の影響が減少し、最大20 kmまで通信可能であることを確認している。

(b) フェムトセル・衛星通信と連携した携帯電話中継実験(高知県四万十町)

地上の携帯電話ネットワークが障害を受けたことを想定し、フェムトセルと呼ばれる超小型携帯電話基地局(通話可能エリアは半径数10 m程度)と無人機及び衛星の無線回線(高速インターネット衛星WINDS)を活用して携帯電話を一時的に使用可能

2 地上通信技術の研究開発

にする実験を行った [4] (図 6)。

実験は四国総合通信局が主催し、高知県四万十町の協力の下、携帯電話各社 (NTT ドコモ、KDDI、ソフトバンクモバイル) 及び NICT が 2015 年 2 月に実施した。場所は、典型的な中山間地域である高知県四万十町にある山間部の集落で、実際に携帯電話がまだエリア圏外である場所にフェムトセル基地局や無人機中継地上局、WINDS の車載衛星地球局を配置して行われた。山あいでの刈取り後の田地のわずかなスペースを使い、沢に沿って離陸上昇させるコースを選定した。無線中継を行う飛行旋回場所は、離陸地点からの高度差約 1000 m、水平距離で約 2 km 離れたエリアとした (無線が接続された状態での目視外飛行)。フェムトセル基地局からの信号は、無人機と衛星回線経由で携帯電話のネットワークに接続した。

通信容量が限られ、また無人機の位置や姿勢によって若干回線が不安定ではあったものの、実験では双方向音声通話に成功し、空と宇宙のリレーによって携帯電話による通話が可能であることを世界で初めて技術的に実証した。

以上の実証実験のほか、自治体との協力の下、上空からの有害鳥獣の行動把握のために小型無人機を活用して、イノシシ (福島県) やサル (徳島県) に取り付けた GPS 付小型発信器の信号を上空でとらえて地上にその行動軌跡データを伝送する実験なども実施したが、まだいくつかのシステム上の改善課題が残されており、今後更に検討を進める予定である。

また、福島県南相馬市に災害用ロボットや無人機等の性能評価のための「福島ロボットテストフィールド」の整備を進めている福島県より、(株) 日立ハイテクソリューションズを通じて当該フィールド周辺の海岸線合計約 13 km の区間における上空での電波環境計測作業を受託し、2017 年 2 月、長時間かつ目視外飛行 (無

線は接続された状態での飛行) が可能な Puma-AE を使った電波計測を実施した [5]。この計測では、Puma-AE のペイロードシェルに小型スペクトラムアナライザを搭載し、上記 13 km を 4 km 程度の 3 つの区間に分割して飛行させ、対地高度 100 m 及び 150 m における 169 MHz 帯、920 MHz 帯、2.4 GHz 帯、5.7 GHz 帯の各バンドのノイズレベルを測定し、その結果は福島県のホームページに掲載された [6]。なお、この飛行は、改正航空法に基づく「飛行の方法に寄らない飛行」(すなわち本件の場合には目視外飛行) の飛行承認を国土交通省より得て実施している。後述する総務省からの受託研究での活用も同様であるが、Puma-AE は、このような広域にわたる上空での電波環境計測、電波伝搬特性計測にも適しており、今後も引き続き活用していく予定である。

3 総務省受託研究の実施

無人機の活用に向けた動きが世界的にも高まる中、2012 年の世界無線通信会議 (WRC-12) においては、前節で述べたように、無人機を制御 (コマンド送信)・監視 (テレメトリ受信) するための周波数 (非ペイロード用通信: CNPC リンクあるいは C2 リンク) として 5 GHz 帯 (5030 ~ 5091 MHz) の使用が合意され、また 2015 年の会議 (WRC-15) では無人機と衛星を結ぶ周波数 (Ku/Ka 帯等) の利用が条件付きで承認された。しかしながら、5 GHz 帯は既にひっ迫しており、同一周波数帯の地上の無線アクセスシステムや隣接周波数帯の空港無線アクセスシステム等との共用条件や干渉回避が必要となっているほか、衛星とのリンクについても他の衛星回線との干渉を回避する必要があり、定量的な電波伝搬モデルや干渉状況の把握及び干渉軽減技術の研究開発が喫緊の課題となっていた。また、高信頼かつ周波数資源を効率的に利用可能な無線通信

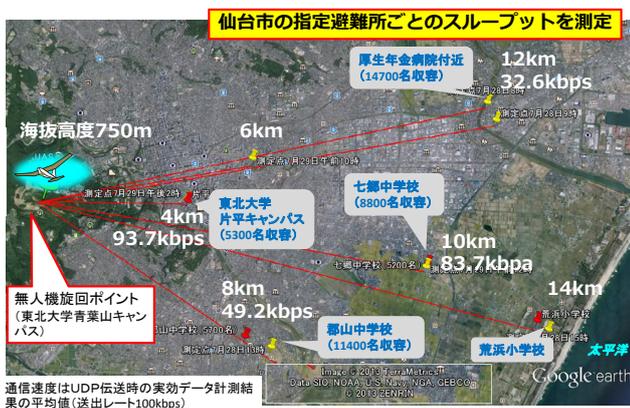


図 5 市街地での長距離通信実験 (2013 年 7 月、宮城県仙台市)



図 6 空と宇宙のリレーによる携帯電話中継実験 (2015 年 2 月、高知県四万十町)

技術の研究開発の必要性が増していた。

こうした背景の下、総務省による「無人航空機を活用した無線中継システムと地上ネットワークとの連携及び共用技術の研究開発」に関する委託研究公募が行われた。

これに対し、NICTが研究代表者となり東北大学、電子航法研究所、(株)KDDI総合研究所、日本電気(株)の5機関でコンソーシアムを組んで共同で受託し、2013～2015年度の3年間、研究開発を実施した。研究開発に当たって想定した無人機を活用した災害時の通信確保の利用シーンを図7に示す。実施した研究課題は多岐にわたっているが、その内容と担当機関は以下のとおりである。

5 GHz帯 CNPC リンクの共用に関して：

- (1) 周波数共用評価のための電波伝搬モデルの確立 (NICT)
- (2) 他の地上用無線業務との周波数共用技術 (電子航法研究所)

衛星経由の CNPC リンクの共用に関して：

- (3) Ku/Ka帯におけるUASと他の衛星通信との周波数共用技術 (NICT)

無人機を用いた災害時等における通信のための周波数有効利用技術に関して：

- (4) 無人機搭載小型サーバによる高度蓄積中継技術 (KDDI総合研究所)
- (5) 遅延許容ネットワークの構成に関する研究開発 (東北大学)
- (6) 複数地上局と複数無人機局からなる巨大MIMO時空間符号化信号中継技術 (東北大学)
- (7) 無人機の利用環境に応じた高度周波数制御技術 (NICT、電子航法研究所)
- (8) ネットワーク故障診断アルゴリズム (NICT)

無人機の CNPC リンクにおける周波数有効利用に関して：

- (9) 地上・無人機連携マルチリンク MIMO 符号化中継技術 (NICT)
- (10) 複数地上局と複数無人機間のハンドオーバー制御アルゴリズムの実装と評価 (日本電気)

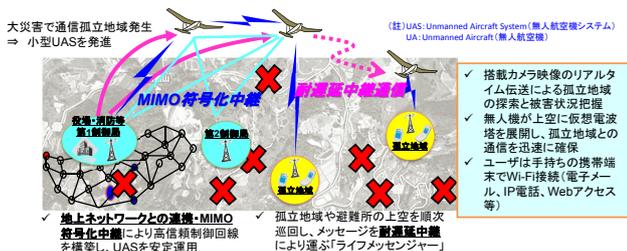


図7 大規模災害時の通信確保に向けて想定される小型無人機の利用シーン

以上は、(3)を除き、地上局と無人機の間、あるいは同時に飛行する複数の無人機間の無線回線(5GHz帯)を対象としている。2015年度後半には、実際に福島県と香川県の試験フィールドにて小型無人機(固定翼機、マルチロータ機)に開発した試作機を搭載して実飛行環境にてその性能評価を行う実験を関係機関合同で実施した(図8)。研究成果の詳細は文献[7]を参照いただきたい。

また、その成果の一部は国際標準化活動にも反映した。2014年度においては、9月に開催されたAWG第17会合(AWG-17)に参加し、本研究開発課題のひとつである「複数地上局間の小型無人機ハンドオーバー制御技術」に関する寄書を行い、APT参加国に対して我が国の取組を反映させてAPT報告書を完成した。さらに、翌年3月に日本にて開催されたAWGの第18会合(AWG-18)では、無人機の公共的な利用についての新たな報告書作成提案を行い、本研究開発の結果の一部を展示、2015年2月に開催された第19会合(AWG-19)では無人機の公共業務用サービスとアプリケーションに関する暫定新報告書の作成に向けた作業文書の提案を行った[8]。その他、ICAOの会合においても5GHz帯における伝搬特性の測定結果や共用技術の提案等を実施した。

一方、本研究開発に関わる研究開発運営委員会の下に国内の大学、国研、民間研究所、通信機メーカ、無人機関連団体等計16機関をメンバーとし、総務省、国交省、経産省等を含む計6省庁をオブザーバとする「無人航空機システムの利用技術に関する関係機関連絡会」(主査：鈴木真二東京大学教授)を設置した。2014～2015年度での計6回の会合を経て、省庁間にまたがる政府側を含む関係機関の間の横連携を図るとともに、無人機に関する国内外の関連動向、利用ケース別の通信要求条件、無線システムの課題等について



図8 総務省受託研究のフィールド実証評価試験の様子

取りまとめ、その結果を本研究開発に反映させた。現在でこそ、無人機関係の委員会や研究会は多数開催されるようになっているが、当時は、まだこうした会議は国内ではほとんどなく、関連機関の横連携を図る先進的な取組となり、当時の人的ネットワークは現在の省庁間にわたる様々な委員会やプロジェクト引き継がれている。

2016年度からは、総務省の新規委託研究「無人航空機システムの周波数効率利用のための通信ネットワーク技術の研究開発」をNICT(研究代表者)、東北大学、(株)日立製作所、日本電気(株)のコンソーシアムで受託し、総務省が2016年に制度化した「無人移動体画像伝送システム」である2.4 GHz帯と5.7 GHz帯(次節参照)を主な対象としてその周波数利用効率の増大を目指した研究開発を3ヵ年計画でスタートしている。

4 小型無人機の制御用無線の現状と新たなロボット用電波の割当て

現在、国内の小型無人機のほとんどは、ホビー用・業務用ともに、その操縦端末(プロポ)に2.4 GHz帯(いわゆるISM帯)を使用している。言うまでもなくこのバンドは無線LAN(Wi-Fi)が多く使っており、それゆえにデバイスは安価で免許も不要であり、作る方も使う方にも大変便利なバンドである。次々と搬送波周波数を切り替えながら通信を行う干渉に強い方式(周波数ホッピング方式)を用いており、複数ユーザが同時に使用しても問題なく、また周辺にWi-Fi機器があっても運用可能である。しかし直接見える範囲でのみ利用するホビー用や一部の業務用はそれで大きな問題はないと考えられるが、送信出力も小さいため、遠方までの飛行に適さないという点に、Wi-Fi機器が多い都市部上空などで飛行させる場合には、他から干渉を受けるリスクが増大する。またこのバンドは制御だけでなくテレメトリや画像伝送などにも混在して使われ、1つの無人機でシステム内干渉を起こすリスクもある。

2.4 GHz帯以外で免許が不要で無人機の制御・テレメトリに使用可能なバンドの1つとしては、産業用無人機(主に農業散布用)に使われている73 MHz帯のほか、特定小電力無線局である920 MHz帯があり、既に一部使用している機種もある。920 MHz帯は地上のセンサネットワークや無線タグにも使われているため、周波数共用手段として、送信出力制限(20 mW、地上局は登録すれば250 mWまで送信可)、チャンネル帯域幅(200 kHz、5チャンネルまで束ねることが可能)及び送信時間率(デューティレート)の制限が規定されており、高精細な映像伝送には適さないが、デバイス価格が廉価な割にまだ2.4 GHz帯ほど混雑はしてい

ない。またある程度の帯域とチャンネル数がとれ、2.4 GHz帯よりは遠くに電波が飛ぶため、主に業務用無人機の制御・テレメトリ用としては適していると考えられ、国際的にもこれに近いバンドをセンサやロボットに使用している国も多いため国際市場への展開もしやすいと考えられ、我々のグループでもこのバンドを活用した技術開発を進めている(後述)。

一方、総務省の情報通信審議会は2016年3月、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等に関して答申し、169 MHz帯、2.4 GHz帯の一部及び5.7 GHz帯の各バンドの合計130 MHz余りをロボットや無人機による移動体画像伝送用として無線局免許を前提として使用できるようにすることを決定し、同年8月より免許制度が開始された[9][10]。

これらのバンドはいずれも業務用で、その運用には無線従事者免許(第3級陸上特殊無線技士以上)が必要となるが、空中線電力はそれぞれのバンドで1 W(169 MHz帯の上空のみ原則10 mW)が可能となるため、5 km以上の通信距離が必要というニーズにこたえるものとなっている。ただし、これらのバンドはいずれも他の無線業務との共用が前提となっている。

これらは主に移動体画像伝送用ということになっているが、もちろん、制御用にも使用することは可能である。しかし共用バンドである以上、他の無線システムから干渉を受けるリスクが発生する。無線LANのように、CSMA方式で互いに干渉を避けながら運用するという方法も考えられるが、周波数の利用効率が高まりすぎず、特に近傍で大きな出力で送信されると、キャリアセンスが働いて送信できなくなることがある。そのため、CSMA方式は前提としておらず、免許人の中で相互に運用調整を行いながら使用することが運用の基本となる。

こうした背景の下、上記の3つの免許バンドの効率的かつ安全な利用を実現するため、これまで無線業務の運用調整に実績のある電波技術協会の助言を受けて適切な運用調整の仕組みを導入し、ロボット自体の運用管理(飛行・運用のエリア、位置、高度、時間、ロボットID等)及び電波管理(電波のチャンネル、帯域幅、空中線電力等)を集中管理で行うサービスの実現が検討され、そのための団体として、平成28年7月11日、利用事業者、通信事業者、大学、国研、企業等で構成される「日本無人機運行管理コンソーシアム(JUTM)」(会長:鈴木真二東大教授)が設立された[11]。目指すシステムのイメージを図9に示す[12]。当初は共通プラットフォーム上での無人機飛行前でのスケジューラ機能の提供にとどまるが、これに地形・構造物のデータや周辺無人機・有人機のリアルタイム飛行位置、気象情報及び3次元電波伝搬シミュレーション結果等を

反映し、かつ将来的には無人機の飛行中でもリアルタイムに無線リソース(送信スロットや周波数、空中線電力等)を変更することが可能なシステムの導入を目指しており、前節に述べた総務省の新規委託研究がそれに対応している。これにより、ロボット、特に業務用小型無人機の安全な運航と周波数の効率的な利用に寄与することができ、その普及と市場の拡大を後押しするものと考えている。

5 電波が直接届かない見通し外での無人機の制御と飛しょう体間の位置情報共有

最後に、現在、国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研)と共同で取り組んでいる技術を2つ紹介する。1. 遅延時間保証型マルチホップ中継制御通信技術、2. 飛しょう体間の位置情報共有技術である。いずれも、内閣府総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)タフ・ロボティクス・チャレンジ(プログラムマネージャ: 田所諭東北大学教授) [13] の中で開発されたものである。

1. 遅延時間保証型マルチホップ中継制御通信技術

この技術は、山や建物等の障害物で直接電波が届かない、いわゆる「直接電波見通し外」になっても制御通信を維持するものであり、法制面においてはまだ強い規制がされている飛行方法である。政府が検討している「小型無人機の利活用と技術開発のロードマップ」 [14] においては、飛行レベルの目安としてレベル1(目視内操縦飛行)、レベル2(目視内の自動飛行)、レベル3(無人地帯での目視外飛行)、レベル4(有人地帯での目視外飛行)の4段階が設定されており、レベル3(2018年頃)とレベル4(2020年代頃以降)では、目視外飛行を実現すべきとされている [15]。目視外飛行には2つあり、1つは、(a)目による目視はできないが、

電波は届く状態での飛行、もう1つは、(b)目による目視もできず、かつ電波も届かない状態での飛行(「直接電波見通し外」)、である。(a)の場合は、電波はつながっているので、直接目視に代わる代替手段があれば、安全な飛行が実現できる。例えば、様々な無人機搭載センサや搭載カメラ映像による運航などである。これは、現在でも技術的には実現できている。(b)は、(a)よりも更に難易度の高い飛行方法であるが、将来、電波遮蔽の多い都市部や山間部での長距離にわたる物流や低高度モニタリングなどでは必ず必要となるものである。現状では、この飛行をする方法として唯一あるのは、無線通信を全く使わず、GPSとプログラムされた経路情報のみにより行う完全自律飛行である。しかし、この方法では、飛行中の無人機の位置や状態は操縦者側で把握することができず、極めて危険である。一般的な小型無人機は、電波が届かなくなると、自動的に操縦者の元に帰還するよう設定されているものが多い(フェールセーフ)。

この「直接電波見通し外」での安全な飛行を実現するための通信経路構築技術としては大きく分けて3通りある(図10)。(1)地上のインフラ経由(例えば携帯電話ネットワーク)、(2)衛星経由、(3)他の無人機やロボットなどの中継局経由、である。現在我々が開発に取り組んでいるのは、(3)であり、複数の無人機やロボットが協力し、中継することで、見通し外での制御通信を維持する。

(1)については、最も簡単に目視外・見通し外飛行が実現できる方法であり、これまで上空の無人機において携帯電話の電波を使用することは法律上できなかったが、総務省が昨年、通信事業者に対し、「実用化試験局免許」を与え、各種試験を行う場合にのみ使用できるようになった [16]。これを利用して各社が試験を開始しているが、地上の携帯電話ネットワークへの影響や、上空でのサービスエリアの分布などに課題

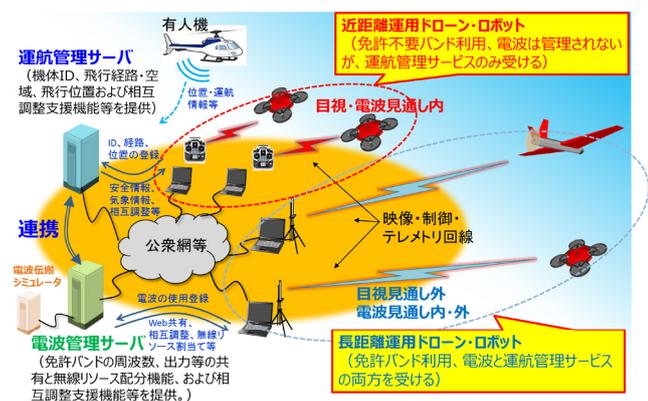


図9 運航管理・電波管理システムイメージ

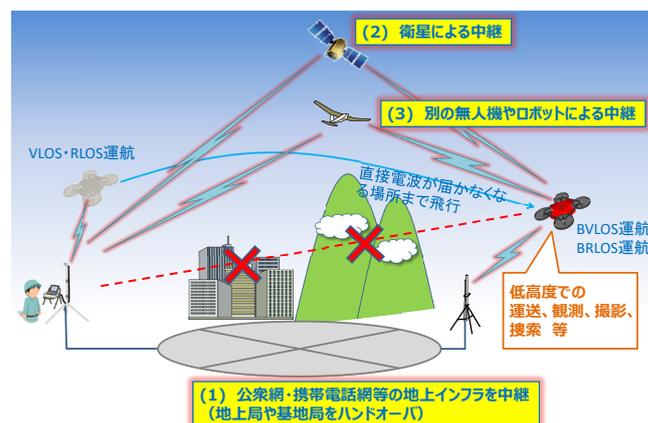


図10 直接電波見通し外での無線リンク維持の方法

2 地上通信技術の研究開発

があり、実用化に当たっては、ある程度飛行エリア等の条件がつく可能性があるとともに、災害時に地上インフラが障害を受けた場合の利用にも課題がある。また当然、通信料金がかかる。

(2)については、すでに一部、インマルサット衛星を使ったシステム等が製品化されており、衛星のカバーエリアであれば、海・山など場所を問わないグローバルな無人機の運用が可能である。ただし、資金の少ないユーザにとってはコストの問題があり、また衛星通信装置を搭載するための無人機も大型のものが必要になる。

(3)については、他の2つの手段に比べて低コストが期待できるものである。これまでも、中継によるロボット制御の技術はあったが、インターネット用として設計された無線 LAN の技術をベースにしているため、ロボット制御に必ずしも適しておらず、中継経路が切り替わるたびに通信が数 100 ミリ秒～1 秒以上切断され、その間制御が一時中断するとともに、制御コマンドを発してからそれをロボット側が受信するまでの応答遅延時間(レイテンシ)が保証されないという問題があった。

本研究では、見通し外のロボットを中継用ロボット経由で制御・監視する状況(図 11)を想定して“ロボットの制御用”であることに特化し、“中継伝送すること”を前提として、レイテンシを一定値以内に保ち、かつ、通信信号どうしが互いに干渉しないことを両立させた新たなアクセス制御プロトコルを設計・開発した[17]。具体的には、制御局—中継局間、中継局—中継局間、あるいは中継局—ロボット局間などの各経路に対し、通信信号をやりとりする時間のスロットをあらかじめ割り振る「時分割多元接続(TDMA)」方式をロボット制御用として採用し、レイテンシを保証した。また、従来の通信方式で行われていた通信開始前の中継経路の探索や設定などの手順をなくし、異なる経路を経由して受信される信号を TDMA 方式の各スロットで常

にすべて受信し、受信側にてどちらか強い信号あるいは決められた優先順位に従った信号だけを受け取るという手法をロボット制御用の中継方式として初めて採用した。

これらの技術により、これまで条件によって変動していた中継局を経由した場合のレイテンシを、今回の開発装置では制御データの送信周期(約 60 ミリ秒)以内に抑え、制御の不安定化の回避を可能にするとともに、中継経路がロボットの移動によって変更された時に発生する通信の切断時間を従来の 1/10 以下に抑えた。すなわち、途中の中継局を経由してもロボットが受信する制御データの“鮮度”を一定以内に保つことを可能にした。我々はこの技術を、電波の遮蔽に強く、かつ災害時にも使えるということで、「タフ・ワイヤレス」と呼んでいる。

開発した無線装置は、920 MHz 帯特定小電力無線局(ARIB STD-T108 準拠)を制御信号とテレメトリ信号の双方向で使用しており、技術基準が許容する範囲内で帯域幅 200 kHz のチャンネルを 5 チャンネルまで束ね、帯域 1 MHz として使用し、さらに干渉への耐性を高めるため、4 つ周波数を順番に切り替えながら使用している。これを用いて実施した屋外におけるフィールド実証実験(2016 年 6・11 月及び 2017 年 6 月)では、操縦者から見て目視外かつ直接電波見通し外にある小型四輪ロボットやマルチロータ型小型無人機の安定な遠隔制御及びそのテレメトリ信号受信に成功した。中継局は、上空約 20～30 m でホバリングする別のマルチロータ機に搭載した。樹木や地形の陰になるまで制御対象となる無人機の高度を下げた後、それを再び上昇させたり、それらの陰から無人機を始動し、離陸上昇させたりできることを確認した(図 12)。なお、本飛行試験は Puma-AE の目視外飛行と同様、改正航空法に基づく飛行承認を得て実施した。

今のところ、まだ見通し外の無人機から映像を伝送するまでには至っておらず、また、920 MHz 帯も映像伝送にはあまり適していないが、低品質・低レートでの映像が伝送できないか、今後試作評価を進める予定である。

現在、無線モジュールには、920 MHz 帯無線装置に加え、総務省が新たに制度化した「無人移動体画像伝送システム」のひとつ、169 MHz 帯の無線装置を搭載しており、2017 年 6 月 14 日に無線局免許を取得した。そして、6 月 17 日には早速これをマルチロータ機に載せ、数 10 m 程度の近距離であったが、169 MHz 帯電波による初めての無人機と地上局との間のコマンド送信・テレメトリ受信の直接通信(1 ホップ)及び中継ドローン経由の通信(2 ホップ)の制御通信リンクによる飛行に成功した。その詳細は別の機会

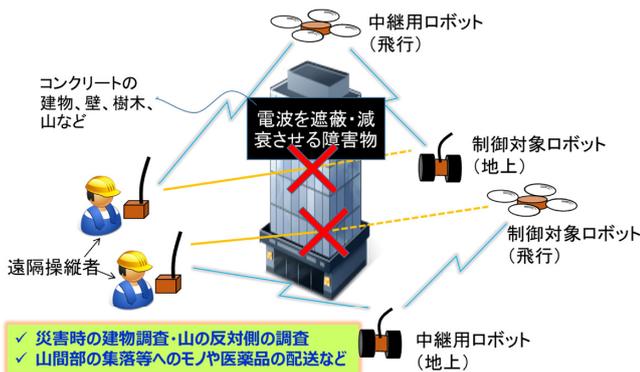


図 11 ドローン・ロボットのマルチホップ中継による見通し外運用

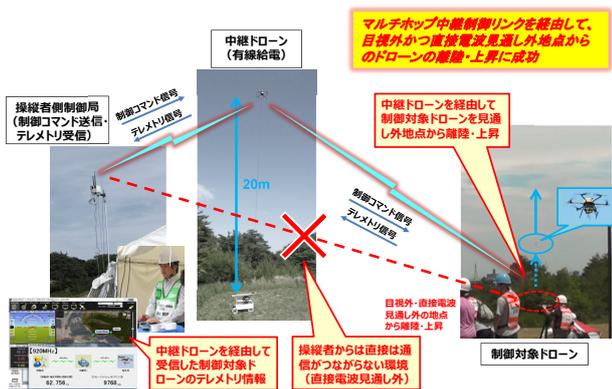


図 12 「タフ・ワイヤレス」による見通し外中継制御のフィールド実証実験 (2016年6・11月、2017年6月、宮城県仙台市東北大学青葉山新キャンパス)

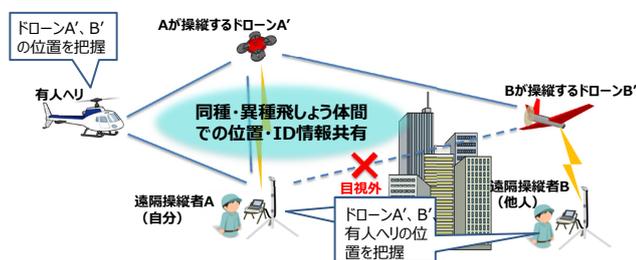


図 13 飛しよう体間位置情報共有システム「ドローンマッパー」



図 14 ドローンマッパーの無人機への搭載とタブレット画面

に報告する予定である。169 MHz帯は、やはり大きな伝送速度は期待できず、使用可能なチャンネル数も4程度しかとれない。しかし、920 MHz帯や2.4 GHz帯よりもはるかに長い地上・上空の自由空間伝搬距離が期待できるため、通常使用する電波が切れたり不安定になった時のバックアップ回線としての利用が想定され、目視外・見通し外での無人機の運航の信頼性をさらに高めるのに役立つものと期待されている。

2. 飛しよう体間位置情報共有技術

最近、小型無人機と有人ヘリとのニアミスが報告されている。もしそれらが接触した場合、小型無人機側

には人的被害はないかもしれないが、ヘリの方は搭乗しているパイロット等の人命にかかわる事故になる可能性がある。また小型無人機の飛行が災害時や物流利用などで将来混み合ってくると、相互の衝突とその墜落による地上の人や設備、事業への被害のリスクも高まる。

こうした状況を踏まえ、我々は、異なる事業者が運用する無人機間、あるいは有人航空機と無人機との衝突の防止に役立つための相互の位置情報を放送型の通信プロトコルを用いて互いに共有するシステムを開発した。前項のシステムと同様、920 MHz帯の特定小電力無線局を用いて試作・実証を行っており、これを「ドローンマッパー」と名付けた[18](図13)。本システムはマルチホップ機能を同様に有しており、例えば図13において、操縦者Aから別の操縦者Bが運用する無人機B'が見通し外にあり、その位置が検知できない場合でも、Aが運用する無人機A'から無人機B'が見通し内であれば、Aは無人機A'を経由して(中継して)無人機B'の位置を検知できる。

技術的には、基地局等の中央制御装置等の通信インフラを用いず、通信端末のみで構成される簡易なシステムで地域情報共有を可能とする技術として開発・実証が進められてきた地上ベースの「端末間通信ネットワーク技術」(2-7参照)をベースとしている。そのMAC層(メディアアクセス制御層)のプロトコルについては、IEEE802.15.8として国際標準化も進められている。

ドローンマッパーを搭載した無人機及び有人ヘリは、無人機の操縦者及びヘリのコックピットにおいて、相互の位置情報がタブレット端末画面に1秒間に2～4回の更新頻度で自身、あるいは自身が操縦する無人機の位置を中心にして、地図上にレーダーチャートのように表示される(図14)。そして水平方向と垂直方向である一定の距離以下に接近する無人機があると、そのアイコンが赤く表示される簡単なアラーム機能を持たせている。このグラフィカルユーザインターフェース(GUI)については、今後、無人機ユーザーや有人機ユーザーの意見を取り入れて改善していく予定である。

なお、ドローンマッパーは前述のタフ・ワイヤレスよりも帯域が狭く、また同報型プロトコルであることもあり、最長電波到達距離は見通しで少なくとも9 km以上であることを確認している。

6 おわりに

我々のグループでは、今日のドローンブームが起る以前から無人機の将来性と無線技術の重要性に着目

2 地上通信技術の研究開発

し、世界的に豊富な運用実績をもつ本格的な小型無人機を運用しながらフィールドでの経験を一つひとつ重ねることで、無人機の無線通信運用に関わるノウハウを蓄積し、課題の解決策を検討してきた。また、固定翼無人機を飛行させる数多くの実証実験の過程において、多くのメディアの取材を受け、一般紙を含む計11以上の新聞に掲載されるとともに、NHK やテレビ東京を含む計5つのTV報道番組で放映された。さらに、そうした経験に基づき、マルチロータ型の無人機をも対象として目視外・電波見通し外飛行やその位置情報共有に関する技術の開発を進めた。

一方、こうした技術の社会での活用を目指し、原子力発電所周辺の無人機による放射線モニタリング方式の開発を目指している研究機関や見通し環境が得られにくい山間部での電力インフラの点検への活用を目指している事業者、さらにはその他ドローンのビジネス拡大をねらっているベンチャー企業等との共同研究もスタート、あるいはその準備が進められている。

また、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託研究(2017年～)も他機関と共同で受託することとなり、本稿で紹介した技術の更なる拡張と実用に耐えるシステムの実現を目指した活動も開始している。こうした活動を通じ、今後拡大が見込まれる無人機の運用技術に関する競争力確保と社会貢献に寄与したいと考えている。

謝辞

本研究開発の一部は、本文にも記載したとおり、総務省の委託研究開発(電波資源拡大のための研究開発)及び内閣府の革新的研究開発プログラム(ImPACT)において実施されたものである。

また、実証実験に協力いただいた関連自治体、関連事業者等の各機関及び防災関連で一部連携して活動しているNICTソーシャルイノベーションユニット耐災害ICT研究センター各位に深く感謝を申し上げる。

【参考文献】

- 1 エアロパイロメント社 HP, <https://www.avinc.com/uas/view/puma>
- 2 三浦, 滝沢, 小野, 鈴木, “大規模災害で孤立した地域を上空からつなく! -小型無人飛行機を活用した無線中継システム-, ” NICT News, 5月号, no.428, <http://www.nict.go.jp/publication/NICT-News/1305/01.html>, (2013年5月)
- 3 H. Tsuji, “Development of Wireless Link Applications for Small UAS in Japan,” ICAO FSMP-WG/4 and Regional Spectrum Seminar, Bangkok, Thailand, Mar. pp.27-28, 2017 (https://www.icao.int/APAC/Meetings/2017%20RPGITUWRC19/WP05_WRC19RPG23_WirelessLinkAppsForSmallUAS_Tsuji_v4.pdf)
- 4 F. Ono, B.P. Jeong, Y. Owada, L. Shan, and R. Miura, “Hybrid multi-hop network by small-unmanned aircraft and satellite telecommunication systems,” Proc. WPMC 2015, Hyderabad, India, Dec. pp.13-16 2015.
- 5 小野, 加川, 単, 三浦, 児島, “小型無人航空機による電波環境計測に関

- する一検討- 2.4 GHz 帯と 5.7 GHz の計測結果,” 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会技術研究報告, 宇都宮, 2017年5月26日
- 6 福島県ロボット産業推進室 HP, <https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/32021/f/kankyokeisoku-kekka.html>
- 7 三浦, 安達, 多田, 米本, 渡辺, “無人航空機を活用した無線中継システムと地上ネットワークとの連携及び共用技術の研究開発,” 電波資源拡大のための研究開発成果発表会予稿集, 東京, 2016年12月2日 (http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/H27_RD01.pdf)
- 8 APT AWG HP, <http://www.apsec.org/APTAWG>
- 9 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報告資料, 平成28年2月
- 10 総務省電波利用 HP, <http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/>
- 11 日本無人機運行管理コンソーシアム HP, <http://www.jutm.org/>
- 12 総務省電波政策 2020 懇談会ワイヤレスビジネススタスクフォース資料, http://www.soumu.go.jp/main_content/000401757.pdf
- 13 タフ・ロボティクス・チャレンジ HP, <http://www.jst.go.jp/impact/program/07.html>
- 14 首相官邸 HP, <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/>
- 15 経済産業省 HP, http://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/robot/drone.html
- 16 総務省電波利用 HP, <http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/uav/>
- 17 加川, 小野, 単, 滝沢, 三浦, 加藤, 児島, “タフ・ロボティクスのためのタフ・ワイヤレス技術の研究開発-伝送遅延時間保証型マルチホップネットワーク-, ” ROBOMECH2017 予稿集, 福島県郡山市, 2017年5月11日
- 18 単, 加川, 三浦, 李, 小野, 滝沢, 児島, “見通し外でのドローン運航のための無線技術ードローンマップードローン間位置情報共有システム,” ROBOMECH2017 予稿集, 福島県郡山市, 2017年5月11日



三浦 龍 (みうら りゅう)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
上席研究員
博士(工学)
移動通信、無線制御通信、無人機通信システム



小野 文枝 (おの ふみえ)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
主任研究員
博士(工学)
移動通信、電波伝搬、無人機通信システム



加川 敏規 (かがわ としのり)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
研究員
博士(工学)
無線制御通信、無人機通信システム、ウルトラワイドバンド



単 麟 (たん りん)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
研究員
博士(情報学)
無線通信、移動通信、端末間通信、無人機通信システム



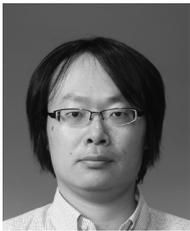
辻 宏之 (つじ ひろゆき)
戦略的プログラムオフィス
研究企画推進室
プランニングマネージャー
博士(工学)
移動通信、信号処理、衛星通信



李 還帮 (り かんほう)
ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
総括研究員
博士(工学)
無線通信、移動通信、端末間通信、ウルトラ
ワイドバンド



松田隆志 (まつだ たかし)
ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
研究員
博士(工学)
センサネットワーク、無線給電、生体通信



滝沢賢一 (たきざわ けんいち)
ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
研究マネージャー
博士(工学)
移動通信、水中通信、生体通信、画像符号化



児島史秀 (こじま ふみひで)
ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
室長
博士(工学)
無線通信、無線アクセス制御