

無人移動体画像伝送システム対応無線機の開発

羽田 靖史・北原 成郎

我々は i-Construction を加速させる一つの手段として、平成 28 年 8 月の電波法改正で利用可能となった周波数帯「無人移動体画像伝送システム」を利用する、無人建設機械／ドローン／ロボット用無線 LAN の開発を行なっている。具体的には、5 種類の無線 LAN 機器を開発し、これまで携帯電話が利用できず意思疎通が困難であった、山間部等での大規模土木工事等での通信システム技術を確認した。本研究開発により、土木工事や災害復旧・復興工事の安全性、施工品質、生産性などの向上が実現できる。本稿では周波数と無線機の概要、実証実験等について述べる。

キーワード：無線機、無人移動体画像伝送システム、遠隔制御、ロボット、ドローン、無人建設機械

1. はじめに

現在、i-Construction の段階的な実用化が進んでおり、無人航空機（ドローン）や無人建機の無線遠隔操縦が行われている。ドローンが取得した大量のデータの解析・利用は、現在は人間が介在し時間をかけて行うことが多いが、今後は情報機器間で直接連携し自動化していくことが予想される（図—1）。このような遠隔操縦、機器間の連携などの自動システム化には確実な無線ネットワークが必要不可欠である。しかし、現状の i-Construction で用いられている無線電波は、一般の電子機器や電子レンジ等と同じ 2.4 GHz が多く、輻輳や遅延、距離の不足などの問題があり、不確実かつ i-Construction のニーズを満たさない。また携帯電話網も用いられるが、山間部や島しょ部、トンネル内などの通信可能圏外での施工も多い。

そこで我々は、近年利用可能となった無線周波数「無人移動体画像伝送システム」を利用した、i-Construction のための無線 LAN システムの開発を行っている。本稿では周波数と無線 LAN 機器の概要、実証実験等について述べる。



図—1 i-Construction での機器間連携

2. 無人移動体画像伝送システム

(1) 無人移動体画像伝送システムの概要

平成 26 年 6 月に閣議決定された日本再興戦略に基づき平成 27 年 1 月に策定されたロボット新戦略では、多様な分野でロボットの利用が期待されており、多様化するロボットの電波活用ニーズに応えることが必要とされている。ここで述べられているロボットは、情報化施工や無人化施工、ドローン等を含む。これを受け平成 28 年 8 月 31 日には電波法関係省令が改正され、「無人移動体画像伝送システム」が利用可能となった¹⁾。

無人移動体画像伝送システムは三種類に分かれ、その概要は表—1 の通りである。本稿では全てを述べることは出来ないため、詳細は文献^{1)~3)}を参照いただきたい。無線は免許局であり、第三級陸上特殊無線技士の資格が必要である。当然、利用は必要最小の電波発射に限り、また後述する運用調整が必要である。なお名称は「画像伝送」とあるが、他のセンサデータや動作命令の伝送を妨げるものではない。無人移動体画像伝送システムの特長は以下のとおりである。

- ・ 等価等方放射出力 4 W で、既存無線 LAN の 4～5 倍であり遠方まで電波が届く。
- ・ 遅延の少ないアナログ回線を利用可能である。
- ・ 連続送信可能であり、輻輳（混雑）による遅延が生じにくい。
- ・ 169 MHz 帯は 2.4 GHz 帯、5.7 GHz 帯の切断時でも利用可能が見込まれる。

表一 無人移動体画像伝送システムの概要

2.4 GHz 帯	
周波数帯	2483.5 MHz ~ 2494 MHz
空中線電力	1 W 以下 (等価等方輻射電力 4 W 以下)
帯域幅	5 MHz または 10 MHz 以内
概要	画像等の大容量データを伝送可能な周波数帯である。周波数幅は 10 MHz なので、例えば 5 MHz 幅の無線を 2 ch 利用することが出来る。
5.7 GHz 帯	
周波数帯	5650 MHz ~ 5755 MHz
空中線電力	1 W 以下 (等価等方輻射電力 4 W 以下)
帯域幅	5 MHz, 10 MHz, または 20 MHz 以内
概要	画像等の大容量データを伝送可能な周波数帯である。周波数幅は 105 MHz なので、例えば 5 MHz 幅の無線を 21 ch 利用することが出来る。
169 MHz 帯	
周波数帯	169.050 MHz ~ 169.3975 MHz または 169.8075 MHz ~ 170.000 MHz
空中線電力	1 W 以下 (等価等方輻射電力 3.25 W 以下, 上空では 10 mW 以下)
帯域幅	300 kHz 以内
概要	2.4 GHz, 5.7 GHz の無線通信が利用不可能となった際のバックアップ用途を想定している。例えば帯域幅を 150 kHz としたときには 3 ch を利用可能である。

- ・ 免許制で無秩序な利用による輻輳を防げる。

(2) 利用方法と運用調整

通常の無線 LAN が CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) を用いて技術的に同時運用可能であるのに対し、無人移動体画像伝送システムは連続送信可能であるため、運用は排他的に下記の社会的手法を用いて調整される。

無人移動体画像伝送システム相互間、または他の共用無線等の運用調整を円滑にするため、2016 年 7 月に日本無人機運航管理コンソーシアム (JUTM)⁴⁾ が設立され、無人移動体画像伝送システムの運用ルールを策定し、運用調整システムを提供した。あくまでも運用調整主体は運用者であるが、そのために必要な情報を提供することがシステムの目的である。運用者は運用毎にその情報を Web に登録する必要がある。他の運用者が既に同じ場所で同じ周波数を使っている場合、運用調整システムが調整の必要性を促す。そのために運用者は JUTM の会員となり、他の免許人と運用調整可能であることを各地方整備局へ明らかにすることが、無線局開設の条件となっている。

まとめると、図一 2 のようになる。

- 手順 1) 無線機を購入または開発する。
- 手順 2) JUTM に会員登録する。会員となることで運用調整が可能となる。
- 手順 3) 総務省の各地方総合通信局に申請し、無線局の免許を受ける。技術基準適合証明がある無線機の場合



図一 2 無人移動体画像伝送システム無線局利用のフロー

合は簡易な免許手続が行われる。免許手続の際に JUTM の入会証明を行うことで、申請者は運用調整可能であることを証明する。またこのとき、無線従事者登録も併せて行う。

手順 4) 実際の運用 (電波を出す) 毎に、運用者は事前に JUTM の Web 運用調整システムに運用情報を登録する。同一場所で同一周波数を利用する他の運用者がいた場合、JUTM から、運用調整の必要性と共に、他の運用者の連絡先等の情報を伝える。得られた情報から、他の運用者に連絡を取ることによって調整を行う。

手順 5) 実際に無線機を運用する。運用は第三級陸上特殊無線技士以上の資格を持ち、無線従事者として登録されている者に限られる。

3. 対応無線機の開発

(1) i-Construction に必要な無線機の条件

無線 LAN の実現には、定められた周波数を送受信する機能のみならず、その機能が環境で正しく働くことが重要である。i-Construction で無人移動体画像伝送システムを用いるには、以下を現場検証する必要がある。

- ・映像やテレメトリ、位置などの通信が、多様な現場で正しく通信可能であること
- ・建設機械のみならず、車両、ドローン、測量機など多種多数台と通信可能であること
- ・車両、耐震、耐環境性など、過酷な i-Construction 環境で動作し続けること

我々は上記条件に対応した試作機を開発し、現場検証を通して i-Construction で実用するための技術開発を行った。我々が開発した機器を含めた、現状利用可能な無線機の一覧を図一3に示す。我々が開発した無線機は無人移動体画像伝送システムに対応した無線機としては第一号であり、運用実績についても上記実証実験は電波法改正後初の運用となった。現在は各社から無線機が販売されているが、他の無線機は仕様がドローン用に特化しているのに対し、我々の無線機は IP ネットワークによる多対多接続に対応しており、より i-Construction 向けであるといえる。



図一3 無人移動体画像伝送システム対応無線機一覧

(2) 開発した無線機

(a) 2.4 GHz 無線機 DLB2-R

本無線機は、Ligowave 社 LigoDLB 2 を元に無線機のファームウェアを改造し、出力の増大（放熱の問題から 400 mW 出力）、中心周波数と帯域幅の変更を行なったものである。2種類のアンテナが接続可能であり、i-Construction の多様なニーズに対応している。IP ネットワーク対応である。防水・防塵機能を有しており、IP65 相当である。防振対策はされていない。

(b) 5.7 GHz 無線機 DLB5-R

本無線機は、Ligowave 社 LigoDLB 5 を元に無線

機のファームウェアを改造し中心周波数と帯域幅の変更を行なったものである。出力は 50 mW と低いが、19 dBi のアンテナを接続することで等価等方輻射電力 (EIRP) 4 W を実現する。4種類のアンテナが接続可能であり、i-Construction の多様なニーズに対応している。IP ネットワーク対応である。防水・防塵機能を有しており、IP65 相当である。防振対策はされていない。

(c) 5.7 GHz 無線機 MPU5

本無線機は DLB5-R で得た知見をもとに、通信スループット、通信距離、防水、防塵性能などが向上した 5.7 GHz 帯無線機である。PERSISTENT SYSTEMS 社製 MPU5 をもとに、出力の変更、中心周波数と帯域幅の変更を行なったものである。DLB5-R と比較して、出力の増大 (50 mW → 規格上の上限 1 W、等価等方放射出力 4 W)、連続送信が可能、防振機能、動作温度幅などが強化されており、より実践的な i-Construction 環境に対応した。また、メッシュネットワーク機能、バッテリー駆動、DFS 無効化機能、GPS、動画エンコード機能などが新たに加えられており、i-Construction の多様なニーズに対応している。また、ドローンのように軽薄短小が求められるニーズに対して、モジュール単体でも利用可能である。その場合は大幅に小型化するが、耐環境性能などは搭載時に追加する必要がある。

(d) 169 MHz 無線機

無人移動体画像伝送システムの 169 MHz に対応した無線機であり、ハードウェアも含めた全体を開発した。1 W 出力可能であるが、現在は基礎的な動作の確認を行った状態であり、まだ実用することは出来ない。MPU5 などの他の無線機と併用することでバックアップ回線の機能を実現する予定である。

4. 実証実験

(1) 実証実験の目的と概要

開発した無線機を用いて、ドローンやクローラダンプなど多数の機器を接続した、i-Construction ネットワークを構築、実証した。また多数の企業や研究団体と協力し、阿蘇大橋地区斜面防災対策工事、雲仙普賢岳、群馬県片蓋川砂防堰堤工事現場、南相馬市、新宿地下通路など様々な現場で実証実験を行い、中でも阿蘇大橋地区斜面防災対策工事現場では、約 3 か月の長期間実用に供することでその有効性を実証した。本稿では主な 3 つの実験について述べる。

(2) 地上近くでの通信距離の確認実験

ドローンが低空飛行した際にどの程度通信距離が取れるのかを調べるため、群馬県片蓋川砂防堰堤工事現場において通信実験を行った。使用した通信機はDLB2-RとDLB5-Rである。現場はS字の経路でいったん見通しが利かなくなり、その後見通しが復活する。DLB2-Rを利用したところ、地上局から580mの地点でいったん見通しが利かなくなると共に通信が切断され、その後841m地点で通信が復活し、試験範囲の終点である887m地点まで通信が可能であった。このことからDLB2-Rは地上近くにおいても広い通信可能範囲を持っていることがわかった。対してDLB5-Rでは見通しが利かなくなった542mで見通しが利かなくなり、その後見通しが復活しても通信は復活しなかった。原因としてはDLB5-Rの出力が弱いこと、5.7GHzがより高周波であり減衰が大きいことなどが考えられる(図-4, 5)。

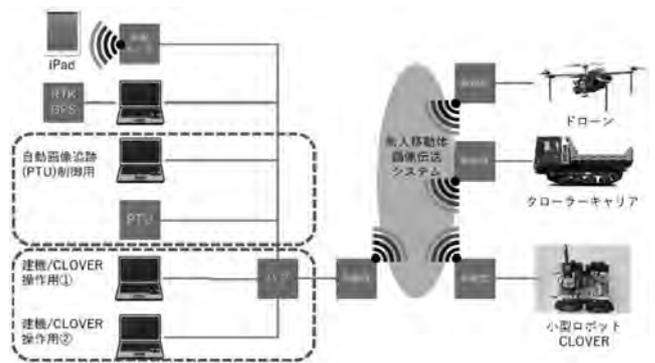


図-6 統合実験で構成した i-Construction ネットワーク



図-7 最終統合実験の利用機器概要



図-4 地表付近でのドローンの通信可能距離 (DLB2-R)



図-5 地表付近でのドローンの通信可能距離 (DLB5-R)

(3) 統合ネットワーク実験

平成30年3月に熊谷組技術研究所において、統合ネットワーク実験を行った。これは、クローラダンプ、ドローン、小型カメラ車、RTK-GPS基準局、自

動追尾カメラ雲台 (PTU)、各種操作PC、監視用iPadなどの各種IP機器を全て単一のネットワークに接続した大規模な i-Construction ネットワークである。この際に構築したネットワークを図-6、実験の風景を図-7に示す。利用した無線機は4台のDLB5-Rであり、各機器は有線LANケーブルで無線機に接続されている。有線LANを持たないiPadに関してはルータを介して通常の無線LANにブリッジ接続している。この手法により一般の無線LAN機器もネットワークに参加可能である。なお、クローラダンプは熊谷組が所有するもの、小型カメラ車、自動追尾カメラ雲台はNEDOインフラ点検プロジェクトで開発したもの^{5), 6)}、ドローンは(株)イムズラボが開発したものを利用した。

実験の結果相互の接続を確認し、各機器からの映像、静止画、GPSデータ、雲台の角度データ、各機器の操作信号等を通信することが出来た。これにより10台以上の大規模な i-Construction ネットワークが実現できたといえる。

(4) 阿蘇大橋地区斜面防災対策工事での基礎実験

平成28年4月16日に発生した熊本地震により阿蘇大橋地区の斜面が崩壊した。阿蘇大橋地区斜面防災対策工事は崩壊地上部に残る不安定土砂の除去と崩壊地

上部からの土砂や落石を補足する土堰堤(土留盛土工)を築堤する工事である⁷⁾。不安定土砂の除去はセーフティクライマー工法により崩壊地下部の方へ落とすように排土した。しかし、排土した土砂や岩塊は崩壊地中央部分に崩積土として残っていたため、平成29年7月から10月にかけてロッククライミング工法で、更に下部の方へ落とし込んだ。開発したDLB2-RならびにDLB-5Rをこのロッククライミング工法で使用したロッククライミングマシン(写真-1, 図-8)の遠隔操縦に利用した結果、特に問題なく3か月間継続して利用可能であった。これにより実用上の耐久性や耐環境性に問題がないことが確認できた。



写真-1 ロッククライミングマシン



図-8 ロッククライミングマシン上の無線機

5. おわりに

本稿では、i-Constructionでの機器間連携を支える、無人移動体画像伝送システム対応無線LAN機器の開発と実証実験について述べた。これらの無線機は、他の無線LAN機器と周波数が異なり、かつ出力が大きいため、混信が少なく、より遠くまで通信を行うことができる。またJUTMで行っている運用調整についても述べた。無線従事者免許と運用調整が必要であることは煩雑ではあるが、無秩序な無線利用により通信の不安定になることを防ぐことができる。実証実験では、無人建機、ドローン、各種計測器等を含めた10台以上のi-Constructionネットワークを実現し、また3か月以上の実運用も行った。現状でこれらの無線機は販売可能であり、今後これらの無線機が浸透することで、より高度なi-Constructionが実現することを望んでいる。

JCMA

《参考文献》

- 1) 官報, 平成28年8月31日付(号外第192号), http://kanpou.npb.go.jp/20160831_old/20160831g00192/20160831g001920000f.html
- 2) 陸上無線通信委員会報告(案), 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28-2-1, http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/idou/02kiban09_03000316.html
- 3) 陸上無線通信委員会報告(案)概要, 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28-2-2, http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/idou/02kiban09_03000316.html
- 4) 日本無人機運行管理コンソーシアム(JUTM), <https://jutm-imgtransuv.org/index.html>
- 5) Keiji Nagatani, et. AL, Micro-unmanned aerial vehicle-based volcano observation system for debris flow evacuation warning, journal of field robotics, Vol.35, Issue 8, pp.1222-1241, 2018.
- 6) 藤ノ木凌, 羽田靖史, オプティカルフローを用いて無人航空機を自動追跡するカメラシステムの開発, 第18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(SI2017), 3E4-07, 2017.
- 7) 阿蘇大橋地区斜面防災対策工事, <http://www.kumagaigumi-aso.com/>

【筆者紹介】

羽田 靖史 (はだ やすし)
工学院大学
機械システム工学科
准教授



北原 成郎 (きたはら しげお)
㈱熊谷組
ICT推進室
室長

