

《論 説》

## テロ敢行手段としてのドローンの脅威と対処方策

澤 田 雅 之

(澤田雅之技術士事務所所長)  
(元警察大学校警察情報  
通信研究センター所長)

### 要 旨

ドローンは、様々な産業分野への活用が進みつつある。これに伴い、ドローンの飛行性能面では、飛行速度、航続距離及びペイロード搭載量が長足の進歩発展を遂げつつある。また、ドローンの飛行制御面では、GPSによる長距離自律航行の他、ドローン搭載カメラのライブ映像に基づく精密な遠隔制御も可能となっている。このように進歩発展が著しいドローンは、重要防護施設への物理的なテロ手段としても巧みに悪用され得るため、2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会の開催に向けて、警備実施上の大きな脅威となりかねないものである。このようなドローンの脅威に対処するには、ドローンの飛来を早期に探知して、重要防護施設へのドローンの突入を阻止する手段を直ちに発動する仕組みが必要となる。そこで、ドローンの飛行性能、飛行制御、飛来探知方法、突入阻止方法等について、具体的に論説する。

キーワード：ドローンの飛行方法、テロ攻撃、ドローンの探知方法

## はじめに

重要防護施設への物理的なテロ手段については、我が国ではこれまで長年にわたって、射程が数 km に及ぶ時限式の飛翔弾発射が主であった。しかし、今日ではドローンの進歩発展が著しいことから、ドローンを用いた重要防護施設への物理的なテロ攻撃を最も警戒しなければならない。

もしも、重要警戒エリアの遙か彼方から夜の闇に紛れて飛来した大型のドローンが、精密に誘導されて高速で要所・要人目掛けて突入してきたならば、正に警備実施上の悪夢と言う他に無い。しかし、今日における無線技術の進歩発展は、このようなドローンによる夜間長距離攻撃の悪夢を現実化し、その脅威を一層増大しつつある。

これに対処するには、都心部等の重要防護施設に夜間に高速で飛来する大型のドローンに対して、突入阻止手段の発動に要する時間の余裕を持ってその飛来を探知できる手段を整えるとともに、効果的な突入阻止手段を適切に発動できる体制を整えることが肝要である。また、飛来探知手段及び突入阻止手段については、ドローンの進歩発展に後れを取らないよう、不断の見直しも欠かせないところである。

### 1 ドローンを用いた3種類のテロ攻撃

ドローンを用いたテロ攻撃は、ターゲットまでドローンを誘導する方法の違いにより、直視による無線操縦による攻撃、FPV による無線操縦による攻撃及び GPS を用いた自律航行による攻撃の3種類に大別される。各攻撃方法の概要とターゲットまでの射程距離は、以下のとおりである。

#### (1) 直視による無線操縦による攻撃（近距離攻撃）

攻撃者がドローンの飛行状況を直視し、無線操縦装置を用いてドローンを遠隔操作することにより、ターゲットを攻撃する方法である。直視によ

無線操縦には、ドローンの機首の向きを見分けられることが欠かせない。このため、攻撃者はドローンとともにターゲットまで数百 m 以内の距離に接近しなければ、効果的な攻撃ができない。

## (2) FPV による無線操縦による攻撃（中距離攻撃）

FPV とは、First Person View の略であり、一人称視点と訳される。ドローンにおける FPV とは、ドローンに搭載したビデオカメラが撮影したライブ映像を指す。このため、FPV による無線操縦による攻撃とは、攻撃者がドローンから送られてくるライブ映像を見ながら、ドローンに搭乗しているかのようなパイロットの視点で、無線操縦装置を用いて、ドローンを遠隔操作することによりターゲットを攻撃する方法である。

ドローンと攻撃者との間に電波を遮る建物等が無く見通せる状態であれば、3の(2)のA項に記載する無人移動体画像伝送システム専用電波（平成28年8月に新規に割り当てられた電波）の使用により、都心部でも5 km 以上遠方からの攻撃が可能である。

また、移動するターゲットに対しても効果的な攻撃方法であることから、屋外での要人警護等では注意を要する。

## (3) GPS を用いた自律航行による攻撃（遠距離攻撃）

GPS とは、Global Positioning System の略であり、カーナビ等に用いられている地球規模の測位システムである。このため、GPS を用いた自律航行による攻撃とは、攻撃者がターゲットの位置情報（緯度・経度・高度）をドローンにセットして発進させることにより、GPS 衛星から受信する測位信号に基づき、ターゲットまで自動的に飛行・到達させて攻撃する方法である。

ドローンの航続距離にほぼ等しい数十 km 以上遠方からの攻撃が可能であるが、移動するターゲットには適さず、施設等の固定されたターゲットに対して効果的な攻撃方法である。

なお、3の(3)項に記載する我が国の準天頂衛星システム「みちびき」が

平成30年中に本格稼働すれば、自律航行によるドローンの到達精度が現在の m 単位から cm 単位に飛躍的に向上するため、重要防護施設の特定の窓ガラスを狙うなど、精密な攻撃が可能となる点に注意を要する。

## 2 ドローンとは？

### (1) 従来型の無線操縦ヘリコプターとの違い

本論説におけるドローンとは、4 個以上の偶数個のローター（プロペラ）を備え、ローターの回転により揚力と推力を生み出し、無線操縦により飛行するマルチコプターを指す。

2 個のローターを備える従来型の無線操縦ヘリコプターと似ているように見えるが、決定的に異なる点は、ドローンが高度なフライトコントローラーを備えていることである。フライトコントローラーは、機体に内蔵されたジャイロ（角速度）センサー、加速度センサー、気圧センサー、超音波センサー、赤外線センサー、イメージセンサー等からのデータや、GPS 衛星から送信される測位信号、操縦者の無線操縦装置から送信される操縦信号等を一元的に処理して、各ローターの回転数を調整する。このようにしてドローンは、高度な飛行性能を実現しているのである。具体的には、安定したホバリング機能、障害物回避機能及びフェイルセーフ機能を備えることにより、操縦者がドローンを「意のままに」操縦できるようにしている。次項以下に、ドローンの高度な飛行性能の概要を記載する。

### (2) 安定したホバリング機能

従来型の無線操縦ヘリコプターでは、ホバリングして空中の一点に留まり続けるには、風に流されないよう、操縦者は無線操縦装置のスティック（操縦桿）を指で前後左右に小刻みに動かして操縦し続けなければならない。

しかし、ドローンでは、何もしなければホバリングして空中の一点に留まり続ける。言い換えれば、操縦者が無線操縦装置のスティックから指を

離しさえすれば、フライトコントローラーの働きにより、ドローンは風に流されることなく空中の一点に留まり続ける。フライトコントローラーは、ジャイロセンサー、加速度センサー、気圧センサー、GPS 測位信号等のデータに基づき、機体の傾きや動き、空中における現在位置を判断して、風に流されないようにドローンを自動操縦するのである。このため、操縦者は、ドローンを飛行させる際に風向や風速を考慮する必要が無いため、操縦が容易である。

### (3) 障害物回避機能

従来型の無線操縦ヘリコプターには、障害物回避機能は無い。

しかし、ドローンでは、超音波センサー、赤外線センサー、イメージセンサー等からのデータをドローンのフライトコントローラーが処理することにより、高度な障害物回避機能を実現している。具体的には、発進地点に自動帰還中のドローンが、進路前方に建物や樹木等の障害物を探知した場合には、進行を一旦中断して、ホバリングしながら上昇することにより障害物を回避した上で、進行を再開することができる。他にも、自動着陸しようとする地点が着陸に適さないとフライトコントローラーが判断した場合には、着陸を中断して一定高度でのホバリングに移行することができる。あるいは、屋内で飛行させる場合には、天井や壁、柱等への衝突を自動的に回避することができる。

### (4) フェイルセーフ機能

ドローンは、操縦用電波の受信不能やバッテリー残量の著しい減少など、飛行の継続に支障を来す不具合が生じた場合には、フライトコントローラーに設定されたフェイルセーフモードを自動的に実行する。このモードは発進地点に自動的に帰還するモードが一般的であるが、他にも、ホバリングしながら徐々に下降して着陸するモードなどがある。

また、フライトコントローラーの働きにより、ロータートラブルへの耐性も向上している。ローターが4個のドローンでは、1個のロータートラ

ブルが致命傷となり、機体のバランスを保てずに墜落する。しかし、ローターが6個以上あるドローンでは、一部のローターがトラブルに見舞われても、残ったローターをフライトコントローラーが緻密に制御して機体のバランスを保つので、飛行を継続することができる。

このようなフェイルセーフ機能は、ドローンの墜落事故防止に大きく貢献する。しかし、ドローンがテロ攻撃に用いられた場合には、フェイルセーフ機能がテロリストに有利に働く結果として、飛来したドローンを飛行不能とする防護手段を講ずることが難しくなる。

#### (5) ドローンの操縦は難しい

ドローンの操縦には、2本のスティック（操縦桿）と複数個の機能ボタンを備えた専用の無線操縦装置を用いるのが一般的である。小型のドローンでは、スティック機能とボタン機能を画面表示したスマートフォンが、無線操縦装置として用いられる。

ドローンを飛び立たせるには、発進準備を整えてから「自動離陸」ボタンを押せばよい。ドローンは垂直に上昇して、一定の高度でホバリングする。ドローンの操縦は、2本のスティックで行う。スティックの上下方向及び左右方向の操作には、前進と後退、左右への進行、上昇と下降、左右への機首の回転が割り当てられているので、スティックの操作方向と操作量に応じて、ドローンを自在に操縦することができる。飛行を終えるには、「発進地点に帰還」ボタンを押せばよい。ドローンは発進地点まで自動的に帰還して着陸する。

ここで、2本のスティックに割り当てられた4種類の操作と、ローター制御によるドローンの応答動作の概要について、以下に記載する。

##### ア 前進と後退（右スティックを上下に倒す）

右スティックを上倒せば、前方のローターの回転数が減少して後方のローターの回転数が増加することにより、ドローンは前のめりになって前進する。

右スティックを下倒せば、前方のローターの回転数が増加して後方

のローターの回転数が減少することにより、ドローンは後部を下げて後退する。

イ 左右への進行（右スティックを左右に倒す）

右スティックを左に倒せば、左側のローターの回転数が減少して右側のローターの回転数が増加することにより、ドローンは右側を上げて左方向に進行する。

右スティックを右に倒せば、右側のローターの回転数が減少して左側のローターの回転数が増加することにより、ドローンは左側を上げて右方向に進行する。

ウ 上昇と下降（左スティックを上下に倒す）

左スティックを上倒せば、全てのローターの回転数が一律に増加することにより、ドローンは垂直に上昇する。

左スティックを下倒せば、全てのローターの回転数が一律に減少することにより、ドローンは垂直に下降する。

エ 左右への機首の回転（左スティックを左右に倒す）

左スティックを左に倒せば、左に回転するローターを減速し、右に回転するローターを加速するので、その反力によりドローンの機首は左に回転する。

左スティックを右に倒せば、右に回転するローターを減速し、左に回転するローターを加速するので、その反力によりドローンの機首は右に回転する。

このようなスティックを備えた無線操縦装置を、一般にはプロポと称する。プロポとは、プロポーショナル制御（比例制御）を意味しており、スティックを動かした度合いに応じた制御ができるものである。ドローンでは高度なフライトコントローラーが常に働いているので、右スティックを操作して前後・左右へ移動させる際にはドローンの高度は一定に保たれ、左スティックを操作して上昇・下降や左右への機首の回転をさせる際にはドローンはその場を離れない。このため、ドローンでは、思い描いたとおりの飛行を容易に実現できる。このことは、ドローンがテロ攻撃に用いら

れた場合には、テロリストが思い描いたとおりの攻撃を容易に実現できることを意味する。

### 3 ドローンを飛行させる方法

従来型の無線操縦ヘリコプターや無線操縦飛行機には、フライトコントローラーが無い。このため、飛行させる方法は「直視による無線操縦」に限られ、目の届かない遠方まで飛行させることはできない。

他方、ドローンにはフライトコントローラーがある。このため、飛行させる方法としては、「直視による無線操縦」の他に、目の届かない遠方まで飛行させることが可能な「FPVによる無線操縦」と「GPSを用いた自律航行」の2つの方法がある。

目の届かない遠方を飛行できるドローンは、テレメトリ情報を操縦者の無線操縦装置に無線伝送する。テレメトリ情報とは、ドローンの現在位置（緯度・経度・高度）やバッテリーの残量、操縦用電波やGPS測位用電波の受信強度等、ドローンの飛行状態に関する情報である。テレメトリ情報を受信した無線操縦装置の画面上では、操縦者からドローンまでの距離や方位、ドローンの高度や水平・垂直方向の速度等として表示される。

ここで、ドローンを飛行させる3通りの方法の詳細について、以下に記載する。

#### (1) 直視による無線操縦

ドローンの機首の向きを目で確認しながら、2の(5)項に記載した無線操縦装置を用いてドローンを遠隔操作する。

我が国では、ドローンの無線操縦には、2.4GHz帯（2400～2483.5MHz）の広い周波数帯域を他と共用する周波数ホッピング技術やOFDM方式のWi-Fi技術を用いるのが一般的である。送信出力の上限については、周波数ホッピング技術を用いる場合には3mW/1MHzであり、OFDM方式のWi-Fi技術を用いる場合には10mW/1MHzである。



いずれも低出力であるが、2.4GHz帯（2400～2483.5MHz）の操縦用電波は、電波干渉や電波を遮る物が無い郊外では、2の(5)項に記載した専用の無線操縦装置を用いて数km離れたドローンを遠隔操作可能である。しかし、都心部では、同じ周波数の2.4GHz帯（2400～2483.5MHz）を共用する他のWi-FiやBluetooth等と干渉するため、専用の無線操縦装置を用いても遠隔操作可能な距離は1kmに満たない。また、無線操縦装置としてスマートフォンを用いた場合には、専用の無線操縦装置と比べて電波が届きにくいいため、都心部での遠隔操作可能な距離は100mに満たない。

## (2) FPVによる無線操縦

ドローンに搭載したビデオカメラから無線伝送されるライブ映像を、操縦者側で受信してモニター画面やゴーグルで見ることにより、2の(5)項に記載した無線操縦装置を用いてドローンを遠隔操作する。

ドローンの無線操縦に用いる電波や遠隔操作可能な距離は、後述する無人移動体画像伝送システム専用電波を利用する場合を除き、前記の(1)項と同じである。

ドローンから操縦者にライブ映像を無線伝送する方式には、「比較的狭い周波数帯域を占有する方式」と、「広い周波数帯域を他と共用する方式」がある。以下に、それぞれの方式について記載する。

### ア 比較的狭い周波数帯域を占有する方式

この方式では、次の各帯域のチャンネルの中からあらかじめ選択した1チャンネルを占有して、FM方式によるアナログ伝送を行う。これらのチャンネルを使用するには、無線局免許と無線従事者資格が必要である。

- (ア) 1.2GHz帯（1281.5MHz、占有帯域幅6MHz、最大出力1W、利用できるのは1チャンネルのみ）
- (イ) 5GHzアマチュア無線帯（5650～5850MHz、出力数百mW、20MHz帯域幅の複数チャンネルが同時利用可能）
- (ウ) 2.4GHz帯無人移動体画像伝送システム（2483.5～2494MHz、最大出力1W、5/10MHz帯域幅、10MHz帯域幅であれば利用できる

のは1チャンネルのみ)

- (エ) 5.7GHz帯無人移動体画像伝送システム(5650~5755MHz、最大出力1W、5/10/20MHz帯域幅、20MHz帯域幅であれば5チャンネルが同時利用可能)

ここで、無人移動体画像伝送システム専用電波について説明する。無人移動体画像伝送システムとは、ドローンやロボットからの高精細な映像を5km以上の長距離にわたって無線伝送可能とするシステムである。平成28年8月31日に、電波法における無線設備規則等が改正され、このシステム専用の電波が新たに割り当てられた。具体的には、上記の2.4GHz帯(2483.5~2494MHz)と5.7GHz帯(5650~5755MHz)に加えて、バックアップ用として169MHz帯(169.05~169.3975MHz及び169.8075~170MHz、100/200/300kHz帯域幅、最大出力は地上1Wで上空10mW)が利用可能となった。いずれも他と混信しないように運用調整した上で一定の帯域を占有して、映像伝送、無線操縦及びテレメトリ伝送に用いることができる。

#### イ 広い周波数帯域を他と共用する方式

この方式では、2.4GHz帯(2400~2483.5MHz)を使用して、広い周波数帯域内で他と混信しないように最大10mW/1MHzの出力で20MHz帯域幅を確保し、OFDM方式によるデジタル伝送を行う。2.4GHz帯(2400~2483.5MHz)を使用した映像伝送は、電波干渉や電波を遮る物が無い郊外では、ドローンから数km離れた地点の操縦者まで届く。しかし、都心部では、同じ周波数の2.4GHz帯(2400~2483.5MHz)を共用する他のWi-FiやBluetooth等と干渉するため、映像伝送できる距離は1kmに満たない。

### (3) GPSを用いた自律航行

ドローンのフライトコントローラーに、経路地や目的地の情報(緯度・経度・高度)を入力して、ドローンを発進させる。ドローンは、GPS衛星が送信する測位信号を受信して、現在の位置(緯度・経度・高度)を瞬

時に割り出すことにより、予定された経路を辿って目的地まで自動的に飛行する。

GPS衛星からの測位信号に基づく自律航行では、10m程度の誤差が生じる。誤差の主な原因は、測位信号を受信できる衛星数が少ない（8基以上が理想であるが、開けた場所でも6基前後であり、都市部や山間部の空があまり開けていない場所では更に少なくなる。）ことと、電離層が原因となる信号電波の遅延である。ドローンでは、GPS衛星数の不足を補うため、ロシアのGLONASS衛星や中国のBeiDou衛星も利用することにより、測位誤差を1～2m程度に抑えている場合が多い。

なお、我が国の準天頂衛星システム「みちびき」が4基体制となって平成30年中に本格稼働すれば、GPSの測位誤差が格段に減少する。すなわち、測位信号を受信できるGPS衛星数の増加に加えて、「みちびき」がGPS測位信号とは別の周波数（このため、GPS受信機とは別の専用受信機が必要となる。）で送信する「センチメートル級測位補強信号」の利用により、GPSの測位誤差はcmの単位に激減する。

#### 4 ドローンの飛行に関する法規制

##### (1) 航空法の改正法（平成27年12月10日施行）

無人航空機（ドローン、無線操縦ヘリコプター等）の飛行を規制するが、模型飛行機（ドローン、無線操縦ヘリコプター等）は、規制の対象外である。ここでの模型飛行機とは、取り外し可能なアタッチメントを除き、機体本体とバッテリーを合わせた機体重量が200g未満のドローン、無線操縦ヘリコプター等である。プロペラガードやFPV用ビデオカメラ等についても、取り外しが可能なアタッチメントであれば機体本体には含めない。

航空法の改正法による無人航空機の飛行に関する規制内容は、以下の2点である。

##### ア 飛行禁止空域

無人航空機の飛行は、以下の空域では禁止されている。

- (ア) 空港等の周辺
- (イ) 地上から150m 以上の上空
- (ウ) 人家の密集地域

なお、飛行禁止空域で飛行させたい場合は、国土交通大臣の許可が必要である。

#### イ 飛行の方法

無人航空機を飛行させる場合には、以下の方法によらなければならない。

- (ア) 日中に飛行させること
- (イ) 目視の範囲内で常時監視して飛行させること
- (ウ) 他の人や物から30m 以上離して飛行させること
- (エ) 催し場所では飛行させないこと
- (オ) 危険物を輸送しないこと
- (カ) 物を投下しないこと

なお、これらの方法によらずに飛行させたい場合は、国土交通大臣の承認が必要である。

## (2) 小型無人機等飛行禁止法（平成28年4月7日施行）

小型無人機等飛行禁止法とは、「国会議事堂、内閣総理大臣官邸その他の国の重要な施設等、外国公館等及び原子力事業所の周辺地域の上空における小型無人機等の飛行の禁止に関する法律」を指す。この法律における小型無人機等には、有人のハンググライダーや、航空法の改正法における模型飛行機も含まれる。

小型無人機等の飛行を禁止する施設の敷地内及び敷地境界から概ね300mの範囲内が、飛行禁止区域として官報で告示される。この飛行禁止区域内に飛来したドローンを発見した警察官は、退去を命じても従わない場合や退去を命ずる暇が無い場合には、危険防止に必要な限度内で当該ドローンの妨害や破損ができる。

このような妨害や破損を適正に執行するには、飛行禁止区域内外の見極

めと効果的な執行手段の確保が欠かせないところである。

### (3) 都道府県の条例による規制

東京都等では、大規模な公園や庭園へのドローンの持ち込みと飛行を、条例により禁止している。この場合のドローンには、航空法の改正法における模型飛行機に該当するドローンも含まれる。

## 5 ドローンの弱点

ドローンの弱点は、風雨に弱いことと飛行時間が短いことである。以下に具体的に記載する。

### (1) 風雨に弱いドローン

ドローンの機体が大きく重くなるほど、風への耐性は高まる。しかし、機体の対角径（対向するローターの軸間距離）が1m超で機体の重量が10kg超の比較的に大型のドローンでも、10m/sを超える風速の中を安定して飛行することは難しい。機体の対角径が10cmに満たない超小型のドローンは、センサー機能が乏しいために風に煽られたり流されやすいことから、屋外での安定した飛行は難しい。

また、防水措置を施した大型の特殊なドローンでない限り、雨の中を飛行することはできない。

### (2) 飛行時間が短いドローン

ドローンの機体が大きいほど、バッテリーを相対的に多く搭載できるため、飛行時間は長くなる傾向にある。しかし、機体の対角径が1m超の比較的に大型のドローンでも、飛行時間は最大で30～40分程度であり、全速で飛行すれば飛行時間は更に短くなる。機体の対角径が10cmに満たない超小型のドローンでは、飛行時間は最大で5～6分程度であり、全速で飛行すれば飛行時間は更に短くなる。

## 6 飛来したドローンを探知するには

### (1) 多様な飛行方法への対応が必要

従来型の無線操縦ヘリコプターや無線操縦飛行機を飛行させる方法は、直視による無線操縦のみであり、遠隔操作が可能な距離は数百 m が限界である。このため、従来型の無線操縦ヘリコプターや無線操縦飛行機の飛来を自動的に探知するには、無線操縦装置から送信される操縦用電波を検出する方法が簡便かつ効果的である。

しかし、ドローンを飛行させる方法には、直視による無線操縦のほか、FPV による無線操縦及び GPS を用いた自律航行がある。中でも、GPS を用いた自律航行により飛来するドローンに対しては、操縦用電波を検出する試みは無意味である。

このように多様な飛行方法により飛来するドローンを自動的に探知するには、レーダーでドローンの機影を捉える方法、音響センサーでドローンの飛行音を捉える方法、ドローンの飛行制御に用いる電波（テレメトリ伝送用電波・操縦用電波・映像伝送用電波）を検出する方法がある。それぞれの特徴や長所・短所を、次項以下に記載する。

### (2) レーダーでドローンの機影を捉える方法

電波を照射してその反射波を捉えるレーダーは、飛行物体の方位・高度・距離を精密かつ即座に計測できる。高出力レーダーでは、数 km 先を飛行する対角径が数十 cm のドローンを探知できるが、より大きな対角径のドローンであれば、より遠方でも探知できる。しかし、レーダーの出力が低くなるほど、探知可能な距離は減少する。このため、無線局免許を必要としない低出力レーダーでは、対角径が数十 cm のドローンを探知可能な距離は100m 程度である。

なお、レーダー画面上では、探知した飛行物体がドローンであるか否かを確認できない。そこで、レーダーが探知した飛行物体の方位・高度・距

離のデータに基づき、サーマルカメラ（あらゆる物体が赤外線として放射する熱を捉えて映像化するカメラ）等を自動的かつ速やかに振り向けることにより、飛行物体を映像として捉えて、ドローンの機影であるか否かを目で確認する必要がある。

### (3) 音響センサーでドローンの飛行音を捉える方法

複数のマイクロフォンを組み合わせた音響センサーを用いる方法と、無指向性のマイクロフォン1個のみを用いる方法がある。いずれの方法も、設置して運用する上での法的規制が無いため、場所を選ばずに使用できる。それぞれの特徴や長所・短所を、以下に記載する。

#### ア 複数のマイクロフォンを組み合わせた音響センサーを用いる方法

この方法では、ドローンの飛行音を探知するとともにその到来方向を判別できる。しかし、方位・高度・距離の判別精度と判別速度は、レーザーに劣る。

比較的静かな環境であれば数百 m 先を飛行する対角径が数十 cm のドローンを探知できる。より大きな飛行音を発するより大型のドローンであれば、より遠方でも探知できる。しかし、都心部等で周囲の雑音が多くなるほど、探知可能な距離は減少する。

ドローンの飛行音の探知やその到来方向の判別は、複数のマイクロフォンそれぞれの受信音の波形パターン解析により行っているため、飛行音の受信からその到来方向の判別までには、やや時間を要する。

探知した音の正体がドローンか否かを確認するには、音の到来方向にサーマルカメラ等を自動的かつ速やかに振り向けることにより、音の到来方向を捉えた映像の中にドローンの機影があるか否かを目で調べる必要がある。

#### イ 無指向性のマイクロフォン1個のみを用いる方法

この方法では、比較的静かな環境であれば百 m 程度の距離に接近してきた対角径が数十 cm のドローンを探知できる。より大きな飛行音を発するより大型のドローンであれば、より遠方でも探知できる。しか

し、都心部等で周囲の雑音が多くなるほど、探知可能な距離は減少する。

無指向性のマイクロフォンが1個のみであるため、音の到来方向を判別することはできないが、受信音の波形を詳細にパターン解析して、ドローンの機種ごとに異なる飛行音の特徴を検出することができる。

#### (4) ドローンの飛行制御に用いる電波を検出する方法

ドローンは、GPSを用いた自律航行を含めて、電波により飛行制御を行う。ドローンが送信する電波には、テレメトリ伝送用電波と映像伝送用電波がある。ドローンが受信する電波には、操縦用電波とGPS測位用電波がある。GPS測位用電波を除き、テレメトリ伝送用電波、映像伝送用電波及び操縦用電波については、送信中の電波を検出することによりドローンの飛来を探知可能である。そこで、それぞれを検出する具体的な方法を以下に記載する。

##### ア テレメトリ伝送用電波を検出する方法

操縦者から数十mの範囲内で飛行させる超小型のドローンを除き、GPSによる自律航行中のドローンを含めて、ドローンは、その飛行中にテレメトリ情報を操縦者の無線操縦装置に無線伝送するのが一般的である。そこで、ドローンがテレメトリ伝送のために送信中の電波を検出すれば、ドローンの飛来を探知することができる。

ドローンからのテレメトリ伝送には、主に920MHz帯(920.6~928MHz)又は2.4GHz帯(2400~2483.5MHz)が用いられる。いずれも、広い帯域内を他と混信しないように共用する。そこで、ドローンからのテレメトリ伝送用電波を検出するには、探知対象とするドローンのリバーシエンジニアリングを行って、ドローンの機種ごとに異なるテレメトリ伝送用受信機の特性を把握することにより、ソフトウェア無線の技術でその受信機特性を再現する方法が効果的である。

ドローンが送信中の電波が920MHz帯(920.6~928MHz)で、かつ、ドローンとの間に電波を遮る物が無ければ、都心部でも数km先のドローンを探知可能である。



ドローンが送信中の電波が2.4GHz帯（2400～2483.5MHz）であれば、都心部では、同じ周波数帯を共用するWi-FiやBluetooth等との干渉のため、ドローンとの間に電波を遮る物が無い場合でも、探知可能な距離は1kmに満たない。

#### イ 操縦用電波を検出する方法

ドローンの無線操縦には、2.4GHz帯（2400～2483.5MHz）を用いるのが一般的である。周波数ホッピング技術やOFDM方式のWi-Fi技術を用いて、広い帯域内を他と混信しないように共用する。920MHz帯（920.6～928MHz）は連続送信ができないため、ドローンの無線操縦には用いられない。

ドローンの操縦用電波を検出するには、探知対象とするドローンのリバースエンジニアリングを行って、ドローンの機種ごとに異なる無線操縦用受信機の特徴を把握することにより、ソフトウェア無線の技術でその受信機特性を再現する方法が効果的である。

2.4GHz帯（2400～2483.5MHz）の電波は、都心部ではWi-FiやBluetooth等と干渉する。このため、操縦者の無線操縦装置との間に電波を遮る物が無い場合でも、探知可能な距離は1kmに満たない。

#### ウ 映像伝送用電波を検出する方法

ドローンの主用途は、空撮である。このため、飛行中のドローンは、操縦者に向けて映像伝送用電波を送信している場合が多い。

ドローンからの映像伝送には、比較的狭い周波数帯域を占有する方式と、広い周波数帯域を他と共用する方式がある。それぞれの方式ごとに、映像伝送用電波を検出する方法を以下に記載する。

##### (ア) 比較的狭い周波数帯域を占有する方式

この方式では、高所に設置した高利得アンテナで受信して、スペクトラムアナライザーで電波の有無を確認する方法が簡便かつ効果的である。映像伝送用電波を1Wの出力で送信しているドローンであれば、高利得アンテナとドローンとの間に電波を遮る物が無ければ、5km以上遠方を飛行するドローンを探知できる。

このような遠方では、サーマルカメラ等を最大限にズームアップしても、ドローンの機影を捉えて目視確認することは難しい。しかし、スペクトラムアナライザーで受信電波の強度変化を監視することにより、ドローンの接近の有無を調べることは可能である。

#### (イ) 広い周波数帯域を他と共用する方式

この方式では、2.4GHz帯（2400～2483.5MHz）を用いるのが一般的である。広い帯域内で他と混信しないように20MHz帯域幅を確保して、OFDM方式によるデジタル伝送を行う。

この方式による映像伝送用電波を検出するには、探知対象とするドローンのリバースエンジニアリングを行って、ドローンの機種ごとに異なる映像伝送用受信機の特性を把握することにより、ソフトウェア無線の技術でその受信機特性を再現する方法が効果的である。

なお、2.4GHz帯（2400～2483.5MHz）の電波は、都心部では他のWi-FiやBluetooth等と干渉する。このため、ドローンとの間に電波を遮る物が無い場合でも、探知可能な距離は1kmに満たない。

## 7 飛来したドローンに対処するには

### (1) ドローンを墜落させることは困難

ドローンは、フライトコントローラーの働きにより飛行の安定性に優れている。

従来型の無線操縦ヘリコプターや無線操縦飛行機であれば、操縦用電波が混信・途絶した途端にコントロールを失い、操縦用電波が速やかに回復しない限り墜落する。しかし、ドローンでは、操縦用電波を受信不能に陥らせても、一定時間経過後には自動的にフェイルセーフモードとなる。そのモードとして「発進地点に帰還」が設定してあれば発進地点に向けて飛び去ってしまうため、墜落させることは容易ではない。

また、ローター数が6個以上のドローンでは、銃で狙撃して一部のローターを破壊しても、残ったローターをフライトコントローラーが緻密に制

御して飛び続けることができるため、墜落させることは容易ではない。

## (2) ネットでの捕獲が肝要

墜落させることが困難なドローンが重要防護施設に突如飛来した場合、そのリスクを完全に除去するには、ドローンをネットで捕獲して飛行不能とすることが肝要である。これには、射程距離、機動性、即応性の観点から、以下の3方式を使い分ける必要がある。

### ア ネットガン

ハンドヘルドタイプであり、炭酸ガスの膨張力で数m四方のネットを発射する。最大射程距離は約20mで、装置の重量は1kg程度、装置の全長は30cm程度である。極めて局所的な運用となるが、ドローンに向けてボタンを押せばネットを発射できるため、即応性に優れる。

高度20mまでの低空を低速で飛行するドローンや、フェイルセーフモードに陥ってゆっくりと下降してきたドローンに対して有効である。また、屋外等における要人警護時に、突如飛来したドローンに対処する「最後の砦」として活用できる。

### イ ネット砲

バズーカ砲のように肩に担いで使用するタイプであり、圧縮空気の膨張力で、ネットを収めた「砲弾」を発射する。最大射程距離は約100mで、装置の重量は10kg強、装置の全長は1m強である。照準時にレーザーで測定したドローンまでの距離を「砲弾」に入力してから発射するため、ドローンの直前でネットを展開することができる。また、ネットで捕獲したドローンは、パラシュートで降下させることができる。

高度100mまでの上空を低速で飛行するドローンや、フェイルセーフモードに陥って上空に滞留したドローンに対して有効である。

### ウ ドローン捕獲ドローン

機体に吊り下げた捕獲用ネットでターゲットのドローンを捕獲するタイプや、複数のネットガンを装備した機体でターゲットのドローンを追尾し、FPVで照準を合わせてネットガンを発射するタイプがある。

ネットガンやネット砲と較べて、対応可能な高度に制限は無く、現場での機動性にも優れるために守備範囲は格段に広い。しかし、高速で飛行するドローンへの対処が容易ではなく、また、発進してから現場に駆けつけるまでに時間を要するため、即応性には難がある。

### (3) 電波対策でドローンを立ち往生

本項で記載する対策は、いずれも電波を送出する仕組みを必要とするものである。このような仕組みの構築と運用には、電波法に違反しないようにする算段が欠かせないことを、ここであらかじめお断りしておく。

さて、進歩発展が著しいドローンは、飛行速度が年を追うごとに高速化している。今日では、インターネットで誰でも購入できる汎用的なドローンでも、最高速度が時速100kmに迫る。このようなドローンは加速力についても、空中に静止した状態から5秒弱で時速80kmに達するなど、極めて俊敏である。

このように高速かつ俊敏なドローンに対して、ネットガン、ネット砲及びドローン捕獲ドローンによるネット捕獲の試みは、いずれも殆ど無力である。

このため、ネットで確実に捕獲するには、ドローンの高速かつ俊敏な動きを封じる対策が欠かせない。このような対策の1つは、高速かつ俊敏な動きを支えている電波信号を受信不能とすることである。もう1つは、ドローンを着陸させる電波信号を送信することである。それぞれの対策の詳細について、以下に記載する。

#### ア 電波信号を受信不能とする対策

3項に記載のとおり、ドローンを飛行させるには、直視による無線操縦、FPVによる無線操縦、GPSを用いた自律航行、の3種類の方法がある。以下に、それぞれの方法ごとに電波信号を受信不能とする対策について記載する。

##### (ア) 直視による無線操縦への対策

直視による無線操縦の場合には、操縦用電波を受信不能とすれば、

ドローンは一定時間経過後に自動的にフェイルセーフモードとなる。「発進地点に帰還するモード」が一般的であることから、フェイルセーフモードとなった途端に殆どのドローンは発進地点に向けて飛び去ってしまうため、ネット捕獲には支障を来す。

この問題を解決する鍵はGPSである。ドローンが発進地点に自動的に帰還するには、GPSによる現在地点の把握が欠かせない。このため、GPS測位用電波を受信不能とすれば、ドローンは現在地点を見失うので発進地点への帰還ができなくなり、立ち往生する。

この結果、フライトコントローラーの働きにより墜落しないように空中の一点に留まり続ける、もしくは、ゆっくりと下降して着陸するので、ネット捕獲が容易になる。

#### (イ) FPVによる無線操縦への対策

FPVによる無線操縦の場合には、ドローンから操縦者に送信する映像伝送用電波を受信不能とすれば、操縦者はライブ映像が見えなくなって操縦不能となり、ドローンは立ち往生する。しかし、操縦者が無線操縦装置を操作して、ドローンに対して「発進地点への帰還」を指示すれば、ドローンは発進地点に向けて飛び去ってしまうため、ネット捕獲には支障を来す。

そこで、上記(ア)項と同様にGPS測位用電波を受信不能とすれば、ドローンは現在地点を見失うので発進地点への帰還ができなくなり、立ち往生したままとなる。

この結果、上記(ア)項と同様にネット捕獲が容易になる

#### (ウ) GPSによる自律航行への対策

GPSによる自律航行の場合には、GPS測位用電波を受信不能とすればドローンは現在地点を見失うので、目的地への飛行を継続できなくなるとともに、フェイルセーフモードによる発進地点への自動帰還もできなくなり、立ち往生する。

この結果、前記(ア)項と同様に、ネット捕獲が容易になる。

以上が、ドローンの3種類の飛行方法ごとに電波信号を受信不能とす

る対策である。しかし、実際に対策を実施する際には、飛来したドローンが、直視による無線操縦による飛行か、FPV による無線操縦による飛行か、あるいは、GPS を用いた自律航行による飛行か、を判断することは難しい。

そこで、実際に対策を実施する際には、映像伝送用電波を検出した場合とそれ以外の場合に分けて、下記①及び②の対策を講じることが効果的である。このような対策は、脅威の度合いが特に大きいと考えられる FPV による中距離攻撃及び GPS を用いた遠距離攻撃に対して、大きな効果が期待できる。また、2.4GHz 帯域 (2400～2483.5MHz) を用いている他の Wi-Fi や Bluetooth 等に及ぼす影響を、極力小さくすることができる対策である。

- ① 映像伝送用電波を検出した場合には、当該電波と GPS 測位用電波を受信不能とする。
- ② ①以外の場合には、GPS 測位用電波を受信不能とする。それでもなお、ドローンが飛行し続ける場合には、2.4GHz 帯域 (2400～2483.5MHz) の電波を受信不能とする。

#### イ 着陸させる電波信号を送信する対策

重要防護施設に突如飛来したドローンに対して、「ゆっくりと下降して着陸」の指示を当該ドローンの操縦用電波で送信することにより、他の通信には全く影響を及ぼすことなく、当該ドローンを着陸に導くことができる対策である。

6の(4)のイ項に記載したリバースエンジニアリングの手法を駆使して、「ゆっくりと下降して着陸」をドローンに指示するコマンドを見出すことにより実現できる。このため、飛来したドローンの操縦用電波の送信を検出してドローンの機種を割り出せることが、この対策を実施できる必要条件である。

#### (4) 夜間対策が重要

夜間に飛来を探知したドローンの確認には、飛来方向の夜空にサーマル

カメラ等を速やかに振り向けて、その映像の中からドローンの機影を確認できる仕組みを整えることが効果的である。

問題は、重要防護施設に夜間に侵入したドローンのネット捕獲である。夜空を飛び回るドローンを裸眼で見つけ出すことは、容易ではない。この点からも、重要防護施設に侵入したドローンを、前記(3)項の電波対策により立ち往生させることは非常に重要である。立ち往生しているドローンであれば、強力な懐中電灯で探し出すことも難しくはなく、懐中電灯で照らし出されたドローンであれば、ネットガン、ネット砲、あるいは、ドローン捕獲ドローンによるネット捕獲も難しくはなくなる。

## 8 2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会に向けて

### (1) あらゆるドローンへの一律の対処は困難

ドローンは、機体の対角径が2m近く重量が数十kgの大型から、機体の対角径が10cmに満たず重量も数十gの超小型まで、千差万別である。前者のドローンは、高速飛行が可能で滞空時間も比較的長く、数km～数十kmの遠方からのFPVによる無線操縦やGPSを用いた自律航行も可能である。しかし、後者のドローンは、飛行速度が遅く滞空時間も短く、操縦者から数十mの範囲内における直視による無線操縦しかできない。

したがって、大きなドローンほど、テロ攻撃に用いられた場合の脅威が増大するのであり、小さなドローンほど、飛来を自動的に探知することが難しくなるのである。このため、ドローンの大小を問わず一律のテロ対策を講ずることは、非常に困難であるとともに効果的ではない。

そこで、ドローンによるテロ攻撃を近距離攻撃と長距離攻撃に分けて、それぞれに適した対策を講ずることが効果的である。ここでの近距離攻撃とは、ドローンの発進地点からターゲットまでの距離が数百m程度の攻撃であり、攻撃方法としては、直視による無線操縦による攻撃の他、都心部では「広い周波数帯域を他と共用する方式」に基づくFPVによる無線操縦による攻撃（以下、「近距離FPV攻撃」と称する。）が含まれる。ま

た、ここでの長距離攻撃とは、ドローンの発進地点からターゲットまでの距離が数 km 以上の攻撃であり、攻撃方法としては、「比較的狭い周波数帯域を占有する方式」に基づく FPV による無線操縦による攻撃（以下、「長距離 FPV 攻撃」と称する。）及び GPS を用いた自律航行による攻撃がある。

## (2) 近距離攻撃は人海戦術で抑止

近距離攻撃を行うには、直視による無線操縦による攻撃及び近距離 FPV 攻撃のいずれについても、攻撃者の無線操縦装置から送信される操縦用電波が、建物等に遮られることなくドローンに届く必要がある。このため、ターゲットまで数百 m の範囲内であってターゲットまで見通せる建物（屋上とは限らず窓越しもあり得る。）や高台等から、攻撃者はドローンを無線操縦する可能性が高い。また、ドローンの発進は、攻撃者から見通せる場所であれば、別の建物の屋上等からでも可能である。

このような近距離攻撃は、人海戦術で抑止するのが効果的である。すなわち、ターゲットの周辺エリアには警戒要員を密に配置するとともに、高所警戒体制を充実強化するのである。夜間の攻撃には特に注意を要するところであるが、ハンディタイプのサーマルカメラ（あらゆる物体が赤外線として放射する熱を捉えて映像化するカメラ）を高所警戒要員の一部に配備すれば、大きな効果が期待できる。

## (3) 長距離攻撃を失敗に終わらせる対策の重要性

長距離 FPV 攻撃を行うには、ドローンと攻撃者との間に電波を遮る建物等が無く、ドローンからの映像伝送用電波が攻撃者まで届くことと、攻撃者からの操縦用電波がドローンまで届くことが必要である。これらの条件さえ満たせば、長距離 FPV 攻撃を行うドローンを、ターゲットまで見通すことができない場所からでも発進させることができる。例えば、ターゲットまでの飛行コースの途中にある高層ビルの窓越しにドローンの発進地点とターゲットの双方を見通すことができれば、攻撃者はそこから



FPVによりドローンが無線操縦してターゲットまで誘導することができる。

GPSを用いた自律航行による攻撃を行う場合には、攻撃者はドローンが無線操縦する必要が無いため、ドローンと攻撃者との間に電波を遮る建物等があったとしても攻撃そのものに支障は無い。攻撃者が攻撃の進行状況を把握するには、ドローンが送信する映像伝送用電波やテレメトリ伝送用電波を受信すれば足りるのであり、ドローンの飛行ルートを見渡せる場所であればどこでも可能である。

このような長距離FPV攻撃及びGPSを用いた自律航行による攻撃に対して、人海戦術による抑止は困難である。このため、ドローンによる長距離攻撃が取行された場合に備えて、攻撃を失敗に終わらせる対策が非常に重要になる。具体的な対策は、次項以下に記載する。

#### (4) 飛行禁止区域への対策

小型無人機等飛行禁止法に基づき官報で告示された飛行禁止区域内では、ドローンの飛来を発見した警察官は、危険防止に必要な限度内で当該ドローンの妨害や破損ができる。この飛行禁止区域はインターネット等で公表されているが、現地には表示が無い。このため、現地で特に分かりにくいのが、対象とする施設の敷地境界から概ね300mの範囲として告示された飛行禁止区域である。

飛行禁止区域外では、航空法の改正法による規制を受けない模型飛行機に該当するドローンは、いつでも自由に飛行させることができる。また、同法による規制を受ける無人航空機に該当するドローンであっても、国土交通大臣の許可・承認を得れば飛行させることができる。しかし、飛行禁止区域内では、あらゆるドローンが飛行禁止である。このように、飛行禁止区域の内外を示す境界線は、警察官の法執行上、極めて大きな意味を持つ。

そこで、このような場合に真価を発揮するのが、6の(2)項に記載したレーダーである。高所に設置したレーダーで飛行禁止区域周辺を探知するこ

とにより、飛行物体が飛行禁止区域に飛び込んだ瞬間に警報を自動的に発することができる。また、レーダーでは、飛行物体の方位・高度・距離を精密かつ瞬時に計測できるので、夜間の警戒監視に適したサーマルカメラ等を自動的に振り向けて飛行物体をズームアップし、ピントを合わせるることができる。このため、飛行物体を映像として捉えて、ドローンであるか否かを目で確認することが容易となる。

映像によりドローンであることが確認できた場合には、7の(3)項に記載した電波対策を直ちに実行してドローンを立ち往生させ、7の(2)項に記載したネット捕獲を行うことが肝要である。

#### (5) ソフトターゲットへの対策

2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会は、長期間にわたって広範なエリアで開催される。このため、飛行禁止区域には該当しない「ソフトターゲット」についても、ドローンによるテロ攻撃から守り抜かなければならない。

問題は、飛行禁止区域ではないことから、前記(4)項と同様なレーダー等を用いた「固定警戒態勢」が執りにくいことである。そこで、ソフトターゲットについては、「流動警戒態勢」が効果的となる。具体的には、7の(3)項に記載した電波対策をハンドヘルドで行える機器を携えた警戒要員とネットガンを携えた警戒要員がペアとなり、ソフトターゲットをパトロールするのである。飛来したドローンによる危険を察知した場合には、電波対策機器を直ちに操作して当該ドローンを立ち往生させ、ネットガンで捕獲するのである。投入する警戒要員数やパトロール頻度の増減により、ソフトターゲットの危険度に応じた臨機応変な対応が可能となる。

また、危険度の高いソフトターゲットについては、近傍に高所警戒要員を配置して6項に記載したドローン探知システムを運用すれば、抑止効果が向上する。ドローン探知システムには各種の方式があり、それぞれに一長一短がある。そこで、複数の方式を異なる場所で秘匿運用すれば、攻撃者が「付け入る隙」を見つけにくくなる効果も期待できる。

## おわりに

今日における無線技術の進歩発展は、ドローンによるテロ攻撃の脅威を著しく増大している。特に、無人移動体画像伝送システム専用電波の実現（平成28年8月）と、準天頂衛星システム「みちびき」の本格稼働（平成30年中）は、ドローンによる長距離攻撃の飛躍的な精度向上に悪用され得るものである。このため、大型で高速なドローンが、重要警戒エリアの遙か彼方から精密に無線誘導され、夜の闇に紛れて要所・要人目掛けて突入してくるテロ攻撃は、既に現実の脅威となっている。

平成27年4月に発生した首相官邸へのドローン落下事件を契機として、航空法の改正法（平成27年12月10日施行）及び小型無人機等飛行禁止法（平成28年4月7日施行）により、ドローンによるテロ攻撃の抑止等に向けた法規制の枠組みは整えられた。

残る課題は、ドローンによるテロ攻撃が敢行された場合に、その攻撃を失敗に終わらせる対策を講じることである。具体的には、ドローンの突入阻止手段の発動に要する時間の余裕を持ってドローンの飛来を探知できる手段を整えるとともに、効果的な突入阻止手段を適切に発動できる体制を整えることである。

そこで、飛来探知手段としては、レーダーでドローンの機影を捉える方法、音響センサーでドローンの飛行音を捉える方法及びドローンの飛行制御に用いる電波を検出する方法について、それぞれの概要や長所・短所を論説した。

また、突入阻止手段としては、ネットガン、ネット砲及びドローン捕獲ドローンについて、それぞれの概要や長所・短所を論説するとともに、効果的なネット捕獲には電波対策や夜間対策が欠かせないことを論説した。

このように、ドローンによるテロ攻撃を失敗に終わらせる対策には、多くの選択肢がある。2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会の開催に向けて、重要防護施設のみならず、いわゆる「ソフトターゲット」

についても、それぞれの地理的・空間的特性に適合する飛来探知手段及び突入阻止手段を選択して配備することにより、ドローンによるテロ攻撃から守り抜くことが大いに期待される場所である。

### 【参考文献】

- 総務省 電波利用ホームページ「ドローン等に用いられる無線設備について」  
(<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/>)
- 一般財団法人 日本ラジコン電波安全協会「ラジコン用電波と電波法」  
([http://www.rck.or.jp/contents/rc\\_denpa/rc\\_denpa0110.html](http://www.rck.or.jp/contents/rc_denpa/rc_denpa0110.html))
- 一般社団法人 日本ドローン無線協会「2.4GHz帯ドローン無線運用の落とし穴」  
(<http://jdri.or.jp/wp/wp-content/uploads/2017/04/12f55db748cfc8f8c0b0bb83f7b1666.pdf>)
- 戸澤洋二「アマチュア無線でRC FPVを楽しむ」  
(<http://sky.geocities.jp/oumeastro/amaradio.html>)
- 一般財団法人 日本無人機運行管理コンソーシアム「無人移動体画像伝送システム運用調整」(<http://www.jutm.org/operation.html>)
- 総務省 総合通信基盤局 電波部 移動通信課「ロボットにおける電波利用の高度化に関する電波政策と今後の取り組み」(<http://www.kiai.gr.jp/jigyoku/h28/PDF/1219p1.pdf>)
- 内閣府 宇宙開発戦略推進事務局「みちびき（準天頂衛星システム）」  
(<http://qzss.go.jp/index.html>)

(さわだ まさゆき)