

2023年12月7日

# ドローン技術の最新事情

ディープラーニングで空飛ぶロボットに進化したドローン

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

澤田 雅之

# 【 目 次 】

- I ドローンの基本的な飛行性能
- II ドローンを飛行させる方法
- III ドローンで用いられる無線技術
- IV 世界市場を席巻した中国DJI社のドローン
- V 空の産業革命とは？
- VI ドローンのフェイルセーフ機能
- VII 空飛ぶロボットに進化した米国Skydio社とAmazon社のドローン



# I

## ドローンの基本的な飛行性能

# ドローンが飛行する仕組み

*\* 機体の向き・傾き・動き・周囲監視 \**

地磁気・ジャイロ・加速度・イメージ等のセンサー

*\* 現在位置 \**

操縦信号

フライト  
コントローラ

GPS等の  
衛星測位

*\* 目的地 \**

各ローターの回転数を制御して飛行

# GPS・各種センサーとフライトコントローラが ドローンの高度な飛行性能を実現

従来型の無線操縦ヘリ  
と決定的に異なる点！



Airpeak S1 (出典：SonyのHP)  
最高速度90km/h、最大風圧抵抗20m/s  
最大飛行時間約30分、最大伝送距離2km

安定したホバリング

障害物探知回避機能

フェイルセーフ機能


# 安定したホバリング

## 【従来型の無線操縦ヘリのホバリング】

空中の一点に留まるには、風に流されないよう、無線操縦用スティックから指を離さず、操縦し続ける必要  さもなければ確実に墜落

 **運転支援機能の無い自動車と同じ！**

## 【ドローンのホバリング】

無線操縦用スティックから指を離れた途端に、フライトコントローラの働きにより、風に流されることなく空中の一点に留まり続ける。  ドローン  
のフライトコントローラが自動的に操縦支援

 **運転支援機能付きの自動車と同じ！**

# 障害物探知回避機能

各種のセンサー情報をフライトコントローラが一元的に処理して、  
高度な障害物探知回避機能を実現



Inspire 2 : 機体重量約3.5kg、最高速度94km/h (出典 : 中国DJI社のHP)

# フェイルセーフ機能

飛行の継続に支障を来す不具合（操縦用電波の受信不能やバッテリーの消耗など）が生じた場合には、**フライトコントローラに設定されたフェイルセーフモードを自動的に実行**

**障害物探知回避機能を**  **有するドローンでは、**

**発進地点に自動的に帰還するモードが一般的**

他には、ホバリングして空中の一点に留まるモードや、徐々に下降して着陸するモードなど

# テレメトリによる飛行状態の把握

テレメトリとは、ドローンの現在位置・飛行方向・飛行速度、バッテリーの残量、操縦用電波・GPS測位信号用電波の受信強度など、

## ドローンの飛行状態に関する情報



「FPVによる無線操縦」や「GPSによる自律航行」に基づき、操縦者から直視できない遠方まで飛行できるドローンは、その飛行中、操縦者の無線操縦装置にテレメトリを無線伝送し続ける。

# Ⅱ

## ドローンを飛行させる方法



# ドローンの操縦は難しくない。



ソニー Airpeak S1の無線操縦装置  
(出典：ソニーのHP)

右スティックを上倒す → 前進

右スティックを下倒す → 後退

右スティックを左倒す → 左に進行

右スティックを右倒す → 右に進行

左スティックを上倒す → 上昇

左スティックを下倒す → 下降

左スティックを左倒す → 左に回転

左スティックを右倒す → 右に回転

# ドローンの飛行原理（前進と後退）

DJI Matrice 200



前進する時は、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

## 【前進】

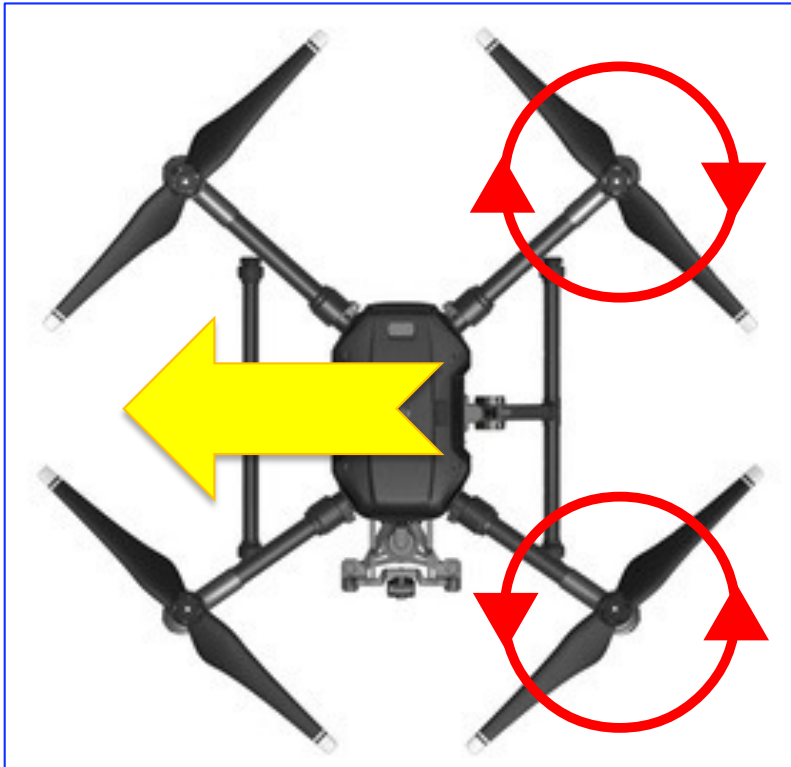
右スティックを上に倒せば、前方のローターの回転数が減少して後方のローターの回転数が増加することにより、ドローンは前のめりになって水平に前進

## 【後退】

右スティックを下に倒せば、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水平に後退

# ドローンの飛行原理(左右への進行)

DJI Matrice 200



左に進む時は、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

## 【左への進行】

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ため、ドローンは右側を上げて左方向に水平に進行

## 【右への進行】

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ため、ドローンは左側を上げて右方向に水平に進行

# ドローンの飛行原理(上昇と下降)

DJI Matrice 200



上昇する時は、全てのローターの回転数が増加

## 【上昇】

左スティックを上に倒せば、全てのローターの回転数が増加するため、ドローンは垂直に上昇

## 【下降】

左スティックを下に倒せば、全てのローターの回転数が減少するため、ドローンは垂直に下降

# ドローンの飛行原理(機首の左右への回転)

DJI Matrice 200



機首を左に回転する時は、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

## 【左に回転】

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

## 【右に回転】

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

# 1 直視による無線操縦

従来型の無線操縦ヘリコプターや無線操縦飛行機と同様に、操縦者がドローンの飛行状況を直視し、無線操縦装置でドローンを遠隔操作して飛行させる方法



直視によりドローンを無線操縦するには、ドローンの機首の向きを操縦者が見分けられる必要

➡ 直視による無線操縦の限界距離は、数百m程度

## 2 FPVによる無線操縦

ドローンのFPV(First Person View)とは、ドローン搭載のビデオカメラが撮影したライブ映像のこと

➡ FPVによる無線操縦とは、ドローンから無線伝送されるライブ映像を操縦者が見ながら(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)、無線操縦装置でドローンを遠隔操作して飛行させる方法

これには、

ドローンと操縦者との間に電波を遮る建物等が無い見通し状態であって、ドローンからのライブ映像伝送用電波が操縦者まで届くことと、操縦者からの操縦用電波がドローンまで届くことが必要

➡ ISMバンド(2.4GHz)を使用した場合には、都心部では見通し状態であっても1kmも届かない。

しかし、  
これからは、

携帯電話(4G、5G)をドローンの操縦・テレメトリ伝送・映像伝送に使用すれば、都心部の見通し外であっても、遠隔地からのFPVによる無線操縦が可能となる。



### 3 GPSによる自律航行

#### \*\* GPSによるナビゲーション \*\*

ドローンは、GPS衛星から送信される測位信号に基づき、現在の位置(緯度、経度、高度)を瞬時に判別  
別 → ドローンのフライトコントローラが、設定された経路をたどって目的地までド  
ローンを自動的に誘導 → GPSの測位誤差は10m程度。Galileo衛星(欧州)や  
BeiDou衛星(中国)等からの測位信号の併用により、ドローンは測位誤差を1~2m程度に抑制

#### \*\* “みちびき”が測位誤差を大幅に低減 \*\*




準天頂衛星システム“みちびき”が本格運用開始(2018年11月)  
→ “みちびき”が送信する「cm級測位補強信号」を使用すれば、GPS測位誤差はm単位からcm単位に激減



# Ⅲ


## ドローンで用いられる無線技術


# ドローンは、“無線による操り人形”

従来型の無線操縦ヘリには、**フライトコントローラが無い。**  **飛行方法は「直視による無線操縦」**に限られ、操縦者の目の届かない遠方までの飛行は不可能

飛行方法は「直視による無線操縦」

しかし、

ドローンには、**フライトコントローラが有る。**  飛行方法は、「**直視による無線操縦**」の他に、「**FPVによる無線操縦**」と「**GPSによる自律航行**」の2つの方法により、操縦者の目の届かない遠方までの飛行が可能

 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送信

つまり、

ドローンは、操縦用電波とGPS等の衛星測位用電波を受信しつつ、テレメトリ伝送用電波と映像伝送用電波を送信しつつ、飛行するのが一般的

 いわば、ドローンは、“**無線による操り人形**”

# ドローンの操縦・テレメトリ伝送・映像伝送に用いる電波

グローバルには、

2.4GHzのISMバンド(2,400~2,483.5MHz)と5.8GHzのISMバンド(5,725~5,850MHz)を主に使用

➡ ISMバンド(Industrial, Scientific and Medical Band)とは、高周波電磁エネルギーを無線通信以外の産業・科学・医療の目的に使用するために、国際電気通信連合によって決められた周波数帯であり、**Wi-FiやBluetoothも使用**

わが国では、

5.8GHzのISMバンド(5,725~5,850MHz)をドローンに用いることは不可であり、2.4GHzのISMバンド(2,400~2,483.5MHz)を主に使用 ➡ 最大出力は、**周波数ホッピング方式の場合には3mW/1MHz**、**OFDM方式の場合には10mW/1MHz**

加えて、+

無人移動体画像伝送システム専用バンド(2,483.5~2,494MHzと5,650~5,755MHz)が、ドローンの操縦・テレメトリ伝送・映像伝送に2016年の夏から使用可能 ➡ 最大出力は1Wであり、使用するには**無線局免許と無線従事者資格が必要**

# ドローンの無線通信における問題点

**\* 我が国で主に利用されるのは、2.4GHz帯のISMバンド \***

2つの大きな問題点



## 1 見通し外では通信が途絶

見通し外、つまり、ビルや山などに遮蔽されて操縦者からドローンを見通せなくなった途端に、無線操縦装置とドローンとの間の無線通信は途絶する。



無人移動体画像伝送システム専用バンドを用いてもこの問題は解決されない。

## 2 見通し内でも長距離の通信が困難

見通し内、つまり、操縦者からドローンを見通せる場合であっても、長距離の通信は困難であり、電気的な雑音が少ない田園地帯での通信可能距離は数km程度、電気的な雑音が多い都市部での通信可能距離は1kmに満たない。



無人移動体画像伝送システム専用バンドを用いれば、都市部での電気的な雑音の影響を受けなくなるが、それでも通信可能距離は5km程度である。

抜本的な解決策は、




携帯電話を、ドローンの無線通信に利用すること

# 携帯電話の上空利用の動向


**\*\* ドローンでの携帯電話の活用を阻んだ要因 \*\***


## 1 携帯電話は「陸上移動局」

携帯電話は、無線局としての種別が、「陸上を移動中又はその特定しない地点に停止中運用する無線局」として規定される「陸上移動局」  携帯電話が「陸上移動局」のままでは、ドローンに搭載して上空で利用することは禁じられていた。

## 2 地上の携帯電話網を妨害する恐れ

携帯電話をドローンで利用した場合には、上空の携帯電話からの電波が広範囲に届く。

 近傍のエリアで運用中の携帯電話網(特に、同じ周波数を繰り返し使用している他の地上基地局)に妨害などの悪影響を及ぼす恐れがあった。

しかし、

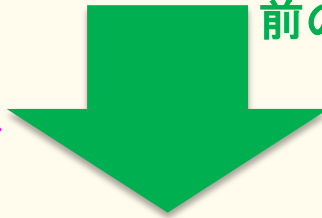
これからの“空の産業革命”で長距離物流などを担うドローンは、サービスエリアが広く、高速・大容量のデータ伝送が可能な携帯電話を利用することが欠かせない。

そこで、

次のページへ

前のページから

そこで、



**【 2016年7月、携帯電話の上空利用に向けた「実用化試験局制度」が開始 】**

他の地上基地局への干渉(妨害などの悪影響)を避けるために、ドローンの飛行エリアや飛行台数などを制限して監理する「試験計画」を作成し、総務省での審査を経た上で、**「実用化試験局」の免許(有効期間は2年、免許人は携帯電話事業者)**を受けた通信モジュールをドローンの無線通信(操縦、テレメトリ伝送、映像伝送)に用いることにより、携帯電話の上空利用に向けた試験的な運用が可能となった。

その結果、



「実用化試験局制度」により、離島や山間部などへのドローンによる長距離荷物輸送の試験運用が全国各地で実施されるようになった。



ドローン搭載用4G通信モジュール  
(出典：NTTドコモのHP)

そして、



次のページへ

そして、 前のページから

**【 2018年6月、携帯電話の上空利用に向けた「国際的な標準仕様」が策定 】**

ドローン搭載の携帯電話からの電波が他の地上基地局へ干渉する問題を解決するため、3GPP (Third Generation Partnership Project : 携帯電話の国際的な標準仕様を策定するプロジェクト) が、ドローンに搭載した通信モジュールごとに送信電力を抑える仕組みを、標準仕様「3GPP Release 15」において規定

これを受けて、

**【 2020年12月、「携帯電話の上空利用を拡大する制度」が整備 】**

ドローン搭載の携帯電話からの電波が他の地上基地局等へ干渉しないよう、上空での送信電力制御や、上空で利用する周波数帯の限定などを条件として本制度が整備された。

これを受けて、

**【 2021年7月、NTTドコモは、ドローン向け「LTE 上空利用プラン」の提供を開始 】**

月額49,800円(税込)で月間データ容量120GBまでのLTE通信を、本プラン対応のSIMカードを装着したドローンで利用可能。同一の空域・時間でのLTE上空利用が集中しないよう、本プラン契約者専用の「LTE上空利用予約サイト」で利用日時、高度などを事前予約する。

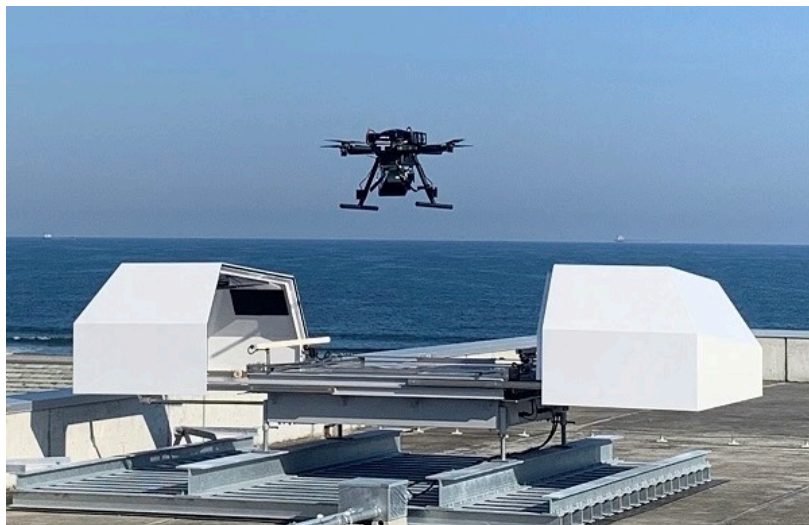


## 【参考】 仙台市の津波避難広報ドローン

\*\*\* 2022年10月17日から本格運用開始 \*\*\*

### 【世界初となる2つの特徴】

- Jアラート(全国瞬時警報システム)による津波警報等を受けて、ドローン格納庫から2機のドローン(スピーカとカメラを搭載)が自動的に発進 → 予め設定された経路に沿って自律飛行しつつ、スピーカで避難広報を実施するとともに、カメラで撮影した現場映像を災害対策本部にリアルタイムに伝送 → ドローン格納庫に帰還して、自動的に着陸(その後、自動的に給電)
- 最大4km遠方まで飛行するドローンとの無線通信(ドローンの操縦、テレメトリ伝送、映像伝送)を確保するため、プライベートLTE基地局を設置してLTE専用通信網を構築



(出典は仙台市のHP)

### ドローンの安全対策

- 気象状況に応じて自律的に飛行可否の判断を行う。
- 飛行中に異常が認められた場合には、自動でドローン格納庫への帰投や不時着等を行う。
- 着陸の際、規定以上の風速を観測した場合には、安全のためドローン格納庫周辺に緊急着陸する。



# 飛行ルート



(出典は仙台市のHP)

# 【参考】

## ドローン高精細映像のローカル5G伝送による 災害初動対応の迅速化を目指す実証事業

総務省の「令和4年度課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証」に、2022年12月に採択された事業 → 愛媛県と7社によるコンソーシアムが、2023年1月から3月まで、愛媛県大洲市の河川敷(2018年7月の豪雨災害現場)で実証事業を実施

具体的には、

災害発生を仮定して、災害現場最寄りの愛媛県分庁舎にローカル5G臨時基地局を設置し、災害現場一帯をローカル5Gのサービスエリアとする。 → ドローンで撮影した災害現場映像をローカル5Gで災害対策本部までリアルタイム伝送して、災害対策本部で3Dモデル解析を行うなど、災害対策初動判断材料に活用することにより初動対応の迅速化を図る。

これまでの問題点が解決

これまでのキャリア4G・LTEによる災害現場映像伝送では、山間部等の被災地がサービスエリア外となる恐れや、4G・LTEの帯域制限により高精細映像のリアルタイム伝送に支障を来す恐れが払拭できなかった。

# IV

世界市場を席巻した中国DJI社のドローン  
卓越した無線技術とフェイルセーフ機能

# 中国DJI社製ドローンの機能と性能

\* DJI社製ドローンが有する2つの技術的な優位性 \*

- 1 卓越したドローン無線技術
- 2 他に類を見ない障害物探知回避機能



Matrice 300 RTK(出典：中国DJI社のHP)  
最高速度82km/h、最大風圧抵抗12m/s  
最大飛行時間約55分、最大伝送距離8km  
機体保護等級IP45

大量生産による低価格を実現し、抜きん出たコストパフォーマンスにより、我が国を含め世界の民生用ドローン市場を席卷

# 1

## 中国DJI社製ドローンの 卓越したドローン無線技術

ISMバンド(2,400~2,483.5MHz)における無線局免許や無線従事者資格を要しない低出力(10mW/MHz)

(注) ISMバンド(Industrial, Scientific and Medical Band)とは、高周波電磁エネルギーを無線通信以外の産業・科学・医療の目的に使用するために、国際電気通信連合によって決められた周波数帯であり、Wi-FiやBluetooth等にも利用されている。

抜群の性能



操縦・テレメトリ伝送・HDライブ映像伝送のいずれの信号も、**干渉が無い見通し状態であれば、120~130msの低遅延で、5~8km程の長距離伝送が可能**



都市部ではWi-Fi等と干渉するため、見通し状態であっても届く距離は1kmに満たなくなる。

# 2

## 中国DJI社製ドローンの 他に類を見ない障害物探知回避機能

ドローンの前後・左右・上下に、ステレオビデオカメラ・赤外線・超音波等のセンサーを備え、**フライトコントローラ**で一元的にデータ処理して各ローターの**回転数を調整**することにより、障害物探知回避機能を実現

具体的には、



### 【自動帰還中】

進行方向前方にある高木や建物等の障害物を数十m手前で探知して急停止し、障害物の高さを超えるまで上昇した後に自動帰還を再開する。

### 【自動着陸時】

着陸しようとする場所が着陸に適するか否かを、フライトコントローラがセンサーデータに基づき判断して、適する場合には自動的に着陸する。



適さない場合にはホバリング状態となり、操縦者の判断を待つ。



# V

## 空の産業革命とは？

ドローンの飛行を規制する航空法

## 法規制の発端は、首相官邸ドローン落下事件

2015年4月9日午前3時半頃、機体を黒塗りした対角径約40cmの小型ドローン(DJI社のPhantom2)が、FPVにより赤坂方面から首相官邸敷地内に飛来して、官邸屋上に落下。

➡ 外周警戒中の警視庁機動隊員は、ドローンの飛来に誰も気付かなかった。

➡ 4月22日の午前10時半頃、官邸職員により発見された。



出典：首相官邸のHP



出典：YAHOO! 地図



# 2015年の航空法の改正



## 無人航空機(ドローン・ラジコン機等)の飛行を規制



模型航空機(ドローン・ラジコン機等)は、  
規制の対象外

### 【 模型航空機とは？ 】

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未満のドローン等

➡ 2022年6月20日から、機体重量が100g未満に規制が強化された。



Mavic Mini(機体重量199g)  
(出典：中国DJI社のHP)

# 2015年の航空法の改正による 無人航空機の飛行に関する規制 (1/3)

## \*\*\*\*\* 飛行の禁止空域 \*\*\*\*\*

- ・空港の周辺
- ・地上から150m以上の上空
- ・人家の密集地域

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

### 【緊急用務空域】

消防、救助、警察業務その他の緊急用務を行うための航空機の飛行の安全を確保する必要があるものとして、国土交通大臣が指定しインターネット等で公示する空域

2021年の航空法施行規則の改正による追加(許可の対象外)

# 2015年の航空法の改正による 無人航空機の飛行に関する規制 (2/3)

## \*\*\*\*\* 飛行の方法 \*\*\*\*\*

- ・日中に飛行させること
- ・**目視の範囲内で飛行させること**
- ・他の人や物から30m以上離して飛行させること
- ・催し場所では飛行させないこと
- ・危険物を輸送しないこと
- ・物を投下しないこと



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



FPV等による目視外飛行は、**事故・災害への対応を目的とする飛行**でなければ承認は得られなかった。

- ・飲酒時の飛行禁止
- ・飛行前確認の実施
- ・他の航空機等との衝突を予防
- ・危険な飛行禁止



2019年の航空法の改正による追加(承認の対象外)

## 2015年の航空法の改正による 無人航空機の飛行に関する規制 (3/3)

### \*\*\* 検索・救助のための特例 \*\*\*

無人航空機の飛行に関する規制(飛行の禁止空域についての規制と飛行の方法についての規制)は、都道府県警察その他の国土交通省令(航空法施行規則)で定める者(国若しくは地方公共団体又はこれらの者の依頼により検索若しくは救助を行う者)が航空機の事故その他の事故に際し検索、救助その他の緊急性があるものとして国土交通省令(航空法施行規則)で定める目的(検索又は救助)のために行う無人航空機の飛行については、適用しない。

つまり、



都道府県警察、国、地方公共団体又はこれらの者の依頼を受けた者が、検索又は救助のために行う無人航空機の飛行については、飛行の禁止空域についての規制と飛行の方法についての規制は適用されない。

# 空の産業革命のロードマップ

2017年から毎年  作成し公表

\* 小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会 \*

## 【ドローンの利活用の4段階】

レベル1 : 操縦による目視内飛行

レベル2 : 自動・自律による目視内飛行

レベル3 : 無人地帯(山、海水域、河川、森林等)での補助者なし目視外飛行

【2018年9月～】  離島や山間部への荷物配送等が主目的

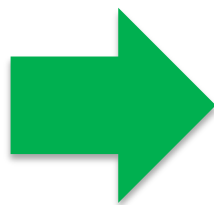
レベル4 : 有人地帯(都市等の第三者上空)での補助者なし目視外飛行

【2022年12月～】  都市部の物流、警備等が主目的

# 『無人航空機の飛行に関する許可・承認の 審査要領』の改正(2018年9月14日)

**＊ ＊ 無人地帯での補助者なし目視外飛行の実現 ＊ ＊**  
**～ “空の産業革命” のレベル3 ～**

**補助者  
の役割**



- ・ 第三者の立入管理
- ・ 有人機等の監視
- ・ 自機の監視
- ・ 自機周辺の気象状況の監視

**補助者を**  **代替するには**

- ・ ドローンの周辺を監視するカメラ・センサー機能の充実強化
- ・ “みちびき”による高精度衛星測位
- ・ 5Gによる操縦・テレメトリ伝送・ライブ映像伝送

# 2020年の航空法の改正

## \* 無人航空機の登録制度の創設 \*

### 【 無人航空機の登録制度とは？ 】

機体重量が100g以上の無人航空機は、国土交通大臣が定める「無人航空機登録原簿」に、機体の種類・製造者・型式等および所有者・使用者の氏名・住所等に関する情報を登録（有効期間は3年、つまり、3年ごとの更新登録が必要）して、通知された「登録記号」を当該機体に表示しなければ飛行させることができなくなった。

➡ 登録せずに飛行させた場合には、1年以下の懲役又は50万円以下の罰金

### 【 2022年6月20日、無人航空機の登録制度が運用開始 】

2022年6月20日以降に登録する機体には、リモートIDの搭載が義務付けられた。リモートIDとは、【登録原簿に登録した情報】+【GPS測位による位置情報】+【時刻情報】を、WiFiやBluetoothにより、1秒間隔で無線送信し続ける仕組みである。 ➡ 経過措置として、2021年12月20日から2022年6月19日までの、無人航空機の事前登録期間内に登録した機体については、リモートIDの搭載が免除された。 ➡ 今後3年間は、リモートIDの搭載機と未搭載機が混在する。



# 2021年の航空法の改正（無人航空機関連その1）

## ＊ ＊ 無人航空機のレベル4実現に向けた制度整備 ＊ ＊

### 【 無人航空機の機体認証制度の創設 】

- 国土交通大臣は、第一種機体認証と第二種機体認証の区分を設けて、国土交通省の「無人航空機の型式認証等における安全基準及び均一性基準に対する検査要領」に基づき検査し、**合格した機体に機体認証**を行う。
- 国土交通大臣は、第一種型式認証と第二種型式認証の区分を設けて、国土交通省の「無人航空機の型式認証等における安全基準及び均一性基準に対する検査要領」に基づき検査し、**合格した機種に型式認証**を行う。

### 【 無人航空機操縦者技能証明制度の創設 】

国土交通大臣は、一等無人航空機操縦士と二等無人航空機操縦士の資格区分を設けて、試験（身体検査、学科試験、実地試験：16歳未満は受験できない。）の合格者に技能証明を行う。



技能証明の有効期間は3年で、無人航空機更新講習の受講修了により更新できる。



第三者上空での補助者なし目視外飛行（レベル4）は、一等無人航空機操縦士の資格保有者が第一種機体認証（第一種型式認証）を受けた機体を飛行させる場合に、国土交通大臣の許可・承認（運行管理方法の確認等）を受けた上で可能となる。

＊ ＊ ＊ いずれも 2022年12月5日に制度運用開始 ＊ ＊ ＊

## 【参考】我が国初の第一種型式認証を取得したドローン

\* 2023年3月13日、ACSL社のPF2-CAT3が国土交通省から第一種型式認証を取得 \*



第一種型式認証を取得したPF2-CAT3  
(出典は我が国のACSL社のHP)



PF2-CAT3のパラシュートが開いた様子  
(出典は我が国のACSL社のHP)

### 【 PF2-CAT3のスペック 】

外寸: 1,174mm × 1,068mm × 601mm (プロペラ含む)

重量: 機体: 5.5kg、バッテリー: 3.3kg、最大ペイロード: 1.0kg、最大離陸重量 9.8kg

最高速度: 水平: 10m/s、上昇: 3m/s、下降: 2m/s

最大飛行時間: 20分 (最低離陸重量時)、17.5分 (最大離陸重量時)

機体保護等級IP55、補助安全装置: 日本化薬社製パラシュート搭載

日本郵便がPF2-CAT3を用いて  
レベル4の試験配送を実施



次のページへ

## 【参考】 日本郵便が我が国初のレベル4の試験配送を実施

\* 2023年3月24日、PF2-CAT3を用いて奥多摩地域で荷物を試験配送 \*

試験配送に向けた許可の取得




### 【 第一種機体認証とレベル4飛行の許可の取得 】

- 日本郵便は、試験配送に用いるPF2-CAT3(3月13日付で第一種型式認証を取得済)について、第一種機体認証を3月15日付で国土交通省から取得
- 日本郵便は、奥多摩地域での荷物の試験配送に向けたレベル4飛行の許可を、3月17日付で国土交通省から取得

試験配送の具体的な内容




日本郵便は3月24日(当初予定した23日は雨天のため順延)に、**我が国初となるレベル4の飛行(補助者無しで第三者上空を飛行)を試験的に実施**  奥多摩郵便局を離陸したドローン(PF2-CAT3)が、約2km離れた住宅の軒先に着陸し、荷物を置いた後に奥多摩郵便局へ帰還

## 2021年の航空法の改正（無人航空機関連その2）

### \*\* 無人航空機の許可・承認の合理化・簡略化 \*\*



これまで国土交通大臣の許可・承認を必要としていた飛行は、技能証明を有する者が機体認証（型式認証）を受けた機体を飛行させ、飛行経路下の第三者の立入りを管理する措置の実施等の運行ルールに従う場合には、原則として、**国土交通大臣の許可・承認は不要**とする。

無人航空機を飛行させる者に対し、**事故（人の死傷、物件の損壊、航空機との衝突・接触等）発生時の国への報告を義務付ける。**  運輸安全委員会が調査対象とする航空機事故に無人航空機に係る事故のうち重大なものを追加（2021年の運輸安全委員会設置法の改正）



**\*\*\* いずれも 2022年12月5日に制度運用開始 \*\*\***

## レベル4の実現に向けた制度整備



- 無人航空機の登録制度の創設(2020年改正航空法)
- 無人航空機の機体認証制度の創設(2021年改正航空法)
- 無人航空機操縦者技能証明制度の創設(2021年改正航空法)
- 飛行空域管理などを担う「運行管理システム」の構築

加えて、



有人地帯を目視外飛行するドローンの墜落や衝突などの危険を、「人」が察知して回避することは困難 → 「人」に危害を及ぼさないよう、ドローン側に墜落や衝突などを防止する堅固な安全確保策が必要 → ソフトウェアで自律航行中のドローンが「人」を死傷させた場合、「業務上過失致死傷罪」の責を負うのは、一等無人航空機操縦士？ それとも型式認証を受けた業者？ → 車の「自動運行装置」の保安基準の如くに、第三者上空をソフトウェアで目視外自律航行するドローンについては保安基準が必要

# VI

## ドローンのフェイルセーフ機能

空の産業革命のレベル4を広く展開していく上で必須

# “空の産業革命”の レベル4

主目的は、



第三者の上空を、ドローンが補助者なしで目視外飛行して、都市部における物流や警備などを日常的に行うこと

レベル3と



比較すれば、

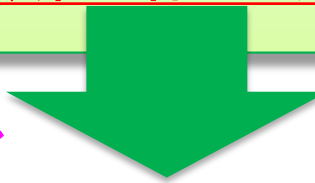
## 【レベル3】

無人地帯が前提であるため、ドローンの墜落事故が発生した場合でも、第三者に危害を及ぼす恐れはほとんど無い。

## 【レベル4】

ドローンの墜落事故は、第三者への危害に直結しかねない。

つまり、




レベル4で第三者の上空を飛行するドローンには、堅固な墜落防止策が必要




# 墜落防止の要はフェイルセーフ機能

## \*\*\* ドローンの目視外飛行に必須の機能 \*\*\*

FPVによる無線操縦やGPSによる自律航行ができるドローンは、操縦者の目が届かない遠方への飛行(目視外飛行)が可能  ドローンは、現在の飛行状態についてのテレメトリを、リアルタイムに操縦者の無線操縦装置に伝送する。しかし、ドローンとの無線通信が途絶した途端に、操縦者はテレメトリによる飛行状態把握と操縦が不能となる。

そこで、

ドローンは、飛行の継続が危ぶまれる状態に陥った場合(操縦用電波の受信不能やバッテリー残量の著しい低下)に備えて、自律的な安全確保策として、墜落を避けるためのフェイルセーフ機能を具備  飛行の継続が危ぶまれる状態に陥れば、テレメトリとして操縦者の無線操縦装置に伝送され警報表示されるとともに、一定の時間(数秒程度)が経過すれば、ドローンのフライトコントローラは自動的にフェイルセーフ機能を起動

起動後の挙動は、

次のページへ

前のページから

起動後の挙動は、




障害物探知回避機能(ドローンの飛行ルート前方にある高木や建物などの障害物を、搭載したセンサーを用いて探知して停止し、衝突を回避できる高度まで上昇した後に飛行を再開するといった機能)を、ドローンが備えているか否かによって異なる。


具体的には、



### 【 障害物探知回避機能を備えたドローンのフェイルセーフ機能 】


フェイルセーフ機能の起動後ただちに飛行を急停止して、GPSによる自律航行で発進地点(ドローンは、GPSで発進地点を記憶している。)に向けて帰還  障害物探知回避機能により帰路の途中での衝突事故を避けられる自動帰還は、ドローンを無事に回収する上で最も効果的な方法

### 【 障害物探知回避機能を備えていないドローンのフェイルセーフ機能 】

フェイルセーフ機能の起動後ただちに飛行を急停止して、その場に自動的に着陸する、あるいは、ホバリング状態を保ち、バッテリーの残量が尽きる前に自動的に着陸  障害物探知回避機能が無いため、自動帰還中に高木や建物などに衝突する恐れ

# 究極の墜落防止策は、空飛ぶロボットへの進化

## \*\*\* 「AIの目」による障害物回避飛行の実現 \*\*\*

レベル4が進展して、都市部における物流や警備などをドローンが日常的に担うようになった暁には、**自動運転車のような衝突回避機能がドローンに必要**となる。  つまり、ドローン自体が周囲のリスク要因(近傍の建物、煙突、鉄塔、電線などの静止物や、近傍を飛び交って衝突の恐れがある他のドローン等)をリアルタイムに掌握し、**危険が迫った場合には自律的に回避できる高度な能力**が、ドローンには不可欠となる。

これには、



自動運転車と同様に、**3次元センサーによる「高度な目」とAIによる「高度な頭脳」**を併せ持った“**空飛ぶロボット**”に、ドローンを進化させていく必要



このような機能を備えたフライトコントローラのアルゴリズムは、車の自動運転のアルゴリズムと同様に、**AI(ディープラーニング)を用いてニューラルネットワークの中に暗示的に生成する手法を用いなければ実現は困難**である。

# “自律型の空飛ぶロボット”への進化

“空の産業革命”のレベル4では、都市部の物流等を担う「空の大動脈」を形成

➡ この場合に、補助者なしの「無線操縦による目視外飛行」では、衝突と墜落の危険を払拭することが困難



出典：Wikipedia「都市的地域」

そこで、 ドローンは、

“無線による操り人形”から  
“自律型の空飛ぶロボット”に進化

つまり、

“みちびき”の高精度衛星測位が産み出す仮想的な「空のハイウェイ」上を、「飛行管理センター」から速度等の指示を受けて、「AIの目」で危険を予測・回避しながら、ドローンは自律航行

# VII

空飛ぶロボットに進化した  
米国Skydio社とAmazon社のドローン

# 「AIの目」で危険を予測・回避できるドローン

有人地帯でのドローンの墜落事故は、重大な人身事故に繋がりがねない。

そこで、



建物や木立、送電線などの静止物体への衝突を自律的に予測・回避する機能に加えて、前方を飛行中の航空機などの移動物体への衝突を自律的に予測・回避する機能が、ドローンに必要となる。

つまり、



## 【「AIの目」で危険を予測・回避して飛行できるドローンが必要】

このようなドローンは、レベル4の自動運転車と同様に、AI(ディープラーニング)を用いてニューラルネットワークの中に暗示的にアルゴリズムを生成する手法が必要不可欠

➡ 米国のSkydio社では、建物や木立、送電線などの静止物体への衝突を自律的に予測・回避して飛行できるドローンを既に実用化

➡ 米国のAmazon社では、建物や木立、送電線などの静止物体や、前方を飛行中の航空機などの移動物体への衝突を自律的に予測・回避して飛行できるドローンを既に実用化



# 「AIの目」で危険を予測・回避できるドローン(米国Skydio社)

**\*\* 静止物に対する画期的な障害物回避飛行が実現 \*\***



Skydio 2 (出典：米国Skydio社のHP)

## 【機体重量800g弱の小型ドローン】

機体の上面と下面に3個ずつ計6個搭載したナビゲーション専用4Kカメラに基づくVisual-SLAMにより、機体の360度全方位の三次元空間状況を把握し、障害物を回避する飛行ルートをリアルタイムに算出して、最高速度58km/hで飛行

## 参考【これまでの障害物探知回避方法】

ドローンの前後・左右・上下に、ステレオビデオカメラ・赤外線・超音波等のセンサーを備え、進行方向前方にある高木や建物等の障害物を数十m手前で探知して急停止し、障害物の高さを超えるまで上昇した後に進行を再開する。



# 「AIの目」で危険を予測・回避できるドローン(米国Skydio社)

**\*\* 静止物に対する画期的な障害物回避飛行が実現 \*\***



Skydio 2 (出典：米国Skydio社のHP)

## 【機体重量800g弱の小型ドローン】

機体の上面と下面に3個ずつ計6個搭載したナビゲーション専用4Kカメラに基づくVisual-SLAMにより、機体の360度全方位の三次元空間状況を把握し、障害物を回避する飛行ルートをリアルタイムに算出して、最高速度58km/hで飛行

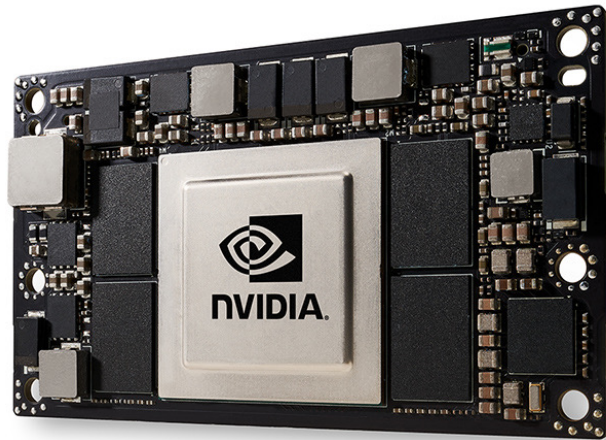
## 【キーテクノロジーはAI(ディープラーニング)】

ドローン前面の撮影用4Kカメラを用いて、その映像の中から追尾対象(人や自動車)を識別して、森の中を疾走する対象であっても、Visual-SLAMにより木立との衝突を避けつつ、対象を見失わないように追尾撮影できる。

← **全て、ディープラーニングの手法で実現している。具体的には、ドローンに搭載した組み込みAIコンピュータ上で、9つのディープニューラルネットワークを同時に稼働させている。**

# Skydio社のドローンに搭載された組み込みAIコンピュータ

**\* GPUで複数のディープニューラルネットワークを高速処理 \***



NVIDIA Jetson TX2 (出典：米国NVIDIA社のHP)

## 【Skydio 2に搭載された組み込みAIコンピュータ】

- ・ AIプラットフォームとして必要なGPU、CPU、メモリ、入出力インタフェースなどで構成
- ・ 256個の演算器(コア)を持つGPUを搭載
  - ※ GPUとはGraphics Processing Unitの略称
- ・ サイズは50mm × 87mm(クレジットカード大)
- ・ 消費電力は7.5W

ディープニューラルネットワーク(DNN)とは、人の頭脳での神経回路網の仕組みと働きを、コンピュータ上で数学的に模したものであり、人のニューロン(神経細胞)に相当する多数のノードが、人のシナプス(神経細胞間を結ぶ接合部)に相当する信号回路でネットワーク化されている。このため、コンピュータ上でDNNを働かせるには、**多数のノードの各々における信号の入出力について、大規模な行列の積和演算を行う必要がある**。このような演算では、多くの演算器(コア)を用いて一斉に並列処理した方が効率的であり高速化できるため、演算器(コア)が多くても数個のCPU(Central Processing Unit)よりも、**演算器(コア)が数百個から数千個に及ぶGPUの方が断然に適している**。

## Skydio社のドローンを専用ドローンポート(Skydio Dock)と組み合わせて完全遠隔運用



Skydio X2とSkydio Dock  
(出典：米国Skydio社のHP)

「AIの目」で障害物回避飛行ができるSkydio社のドローンは、リモートオペレーションソフトウェアを搭載したドローンポート(Skydio Dock)と組み合わせることにより、遠隔にいる1人のオペレータによる運行、もしくは、**予め計画された自律飛行による完全自動運行**が可能

その効果は、



工事現場での進捗状況の把握、倉庫内の巡回点検、セキュリティ境界の監視、**自然災害発生後のインフラ点検**などで、ドローンの運行負担を大幅に**減少**できる。

# 夜間の障害物回避飛行ができる次世代機 Skydio X10



Skydio X10  
(出典：米国Skydio社のHP)

## 【 Skydio X10のスペック 】

機体の長さ：約35cm      機体の重量：約2kg  
最高速度：72km/h      最大飛行時間：40分  
機体保護等級：IP55

最大の特徴は、



## 【 夜間の障害物回避飛行を実現 】

機体に計6個搭載したナビゲーション専用カメラに基づくVisual-SLAMにより、機体の360度全方位の三次元空間状況を把握して、**障害物を自律的に回避できる飛行が、NightSenseモードの実現により、可視光照明または赤外線照明を使用して暗闇の中でも可能**となった。



暗闇の中を障害物回避飛行するSkydio X10  
(出典：米国Skydio社のHP)

# 「AIの目」で危険を予測・回避できるドローン(米国Amazon社)

*\* Sense and Avoid Systemを搭載した完全自律型ドローン \**



Mk27-2 (出典：米国Amazon社のブログ)

**【機体重量36kgの大型ドローン】**  
カメラ映像に基づくSense and Avoid Systemを搭載して、静止物体や移動物体を判別して自動的に回避することができる。

*Amazon Prime Airで利用*

## 【 Amazon Prime Air 】

目視による監視者を必要としない完全自律型ドローンによる商品配送サービス

*商品配送方法は、*

*次のページへ*



前のページから

商品配送方法は、



### 【 Sense and Avoid Systemを搭載した完全自律型ドローンによる商品配送方法 】

- 1 「グラウンドステーション」が飛行経路と配送先の地点を指定
- 2 配送先までの自律航行中は、Sense and Avoid Systemを用いて、煙突などの静止物体や航空機などの移動物体を検知して、衝突しないように飛行経路を自律的に変更する。
- 3 配送先の「裏庭」に到着した後は、Sense and Avoid Systemを用いて、電線、人、ペット、その他の障害物を避けるように降下して安全な高さでホバリングし、商品を自動的に投下する。その後、高度を上げて帰投する。

2022年サービス開始までの経緯



次のページへ

## 2022年サービス開始までの経緯



### 【 Amazon Prime Airのサービス開始までの経緯 】

2013年、Amazon Prime Airを提唱

2016年、英国で実証実験

2020年、航空輸送事業者認証をFAA(米連邦航空局)から取得  
Sense and Avoid Systemがこの認証取得に大きく寄与  
→ 複数の機体を目視外で自律飛行可能となった。

2022年、米国カリフォルニア州ロックフォードとテキサス州カレッジステーションでサービス開始  
→ 両地域にあるAmazon社の配送拠点から半径3マイル(約4.8km)のエリアにおいて、Amazon社のサブスクリプションサービス「Amazon Prime」の会員であれば、重さ5ポンド(約2.2kg)以内の商品が注文から1時間以内にドローンで届けられる。  
→ これまでに1000回以上の配達を、100%の確率で実施できた。

2024年、次世代機MK30(現行機MK27-2と比べて、航続距離は約2倍で、小雨でも飛行でき、Sense and Avoid Systemの能力をアップして安全性を高めて、狭い裏庭にも配送が可能)により、米国内の他都市や、英国、イタリアにもサービスを拡充する予定。



2023年12月7日

終

# ドローン技術の最新事情

ディープラーニングで空飛ぶロボットに進化したドローン

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

澤田 雅之