

2019年11月29日

# みちびきとセキュアなドローン社会の実現

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

# ドローンが担う“空の移動革命”と“空の産業革命”

“空の革命”には  必須の基盤！

“みちびき”の高精度測位が産み出す「空のハイウェイ」



← **空飛ぶタクシー(VoloCity)** : 二人乗り  
最高速度110km/h、航続距離35km



← **空飛ぶトラック(VoloDrone)** : 最大積載200kg  
最高速度110km/h、航続距離40km



出典 : 3枚の画像はVolocopter社(独)のHP

# これからの進化の系譜

空飛ぶロボット

空飛ぶクルマ

電動航空機

電気自動車の技術

自動運転車の技術

空の産業革命

(無人機)

空の移動革命

(有人機)

今日のドローン

# 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【実現済み】

レベル2 : 自動・自律による目視内飛行【実現済み】

レベル3 : 無人地帯(山、海水域、河川、森林等)での目視外飛行(補助者なし)【2018年頃~】  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)での目視外飛行(補助者なし)【2022年度~】  都市の物流、警備等が主目的

# これからのドローン社会

**\*\* “空の産業革命”の進展は、ドローン次第 \*\***



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

**➡** その先には、都市の上空(つまり、第三者の頭上)を、進化したドローンが飛び交う時代が到来



**その大前提は、セキュリティの確保**

ドローンによる事故が発生しないよう、発生した場合でも人身の安全を確保できるよう、ルールに従わないドローンやテロドローンを迅速・的確に発見・対処できるよう、セキュリティを幅広く確保

**➡ ”みちびき”の高精度測位が欠かせない!**

**今日のドローン**

**中国製が抜群の高性能**

# 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

操縦信号

フライト  
コントローラー

\* 現在位置 \*

GPS

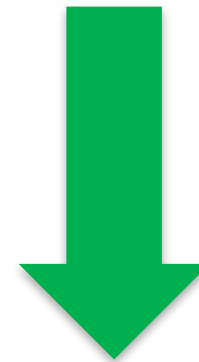
\* 目的地 \*

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ーが ドローンの高度な飛行性能を実現



従来型のラジコンヘリと  
決定的に異なる点！



安定したホバリング

障害物回避機能

フェイルセーフ機能



DJI Matrice 210



# テレメトリ情報の伝送

テレメトリ情報とは、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、コントロール用電波・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



GPSによる自律航行中のドローンを含めて、ドローンは飛行中にテレメトリ情報を操縦者に無線伝送し続けるのが一般的



テレメトリを受信・解析すれば、ドローンの機種・現在位置・飛行方向などが判明

**\*\*\* ドローンの飛来探知に有用 \*\*\***

# 最先端のドローンの機能と性能

**\*\* 中国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



**\*\* 我が国を含め世界の民生用ドローン市場を席卷 \*\***

# 1

## 中国製ドローンの 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取り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



コントロール・テレメトリ・HDライブ映像のいずれの信号も、干渉が無い見通し状態であれば、120～130msの低遅延で、4～5km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ー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、障害物等の探知・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。

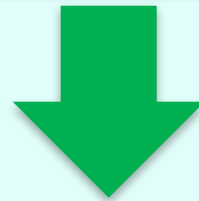
### 【自動着陸時】

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ー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。

# ドローンの3種類の飛行方法

# 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、操縦者からのコントロール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。

ところが、

無人移動体画像伝送システム専用バンド(2016年8月に新規割当)を使用すれば、都心部でも見通し状態では、FPVによる無線操縦の限界距離は5km超

### 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、経度及び高度)を瞬時に判別 → ドローンのフライトコントローラーが、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。GLONASS衛星(ロシア)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



# “空の産業革命”と航空法

航空法の改正法  
(2015年12月10日施行)



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

# 航空法の改正法による 無人航空機の飛行に関する規制

## ＊＊ 飛行禁止空域 ＊＊

- ・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

## ＊＊ 飛行の方法 ＊＊

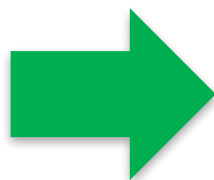
- ・日中に飛行させること
- ・目視の範囲内で飛行させること
- ・他の人や物から30m以上離して飛行させること
- ・催し場所では飛行させないこと
- ・危険物を輸送しないこと
- ・物を投下しないこと

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

# 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)

＊ ＊ 山間僻地等における補助者なしの目視外飛行の実現 ＊ ＊  
～ “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”による高精度測位
- ・ 5Gによるコントロール・テレメトリ・映像伝送

# ドローン対策の最新事例

飛行禁止エリアに飛来したドローンを  
ジャミング(電波妨害)で阻止

# 2018年平昌冬季五輪のドローン対策

2018年2月～3月に開催された韓国平昌オリンピック・パラリンピックでは、韓国警察は、テロ対策部隊にドローン警備隊を組織して、ドローンテロ対策を講じている。



**\*\*\* 2次元レーダーで、ドローンの飛来を探知 \*\*\***



出典：LOWRANCE社のHP



2次元レーダー(Xバンドで出力165mW、周囲360度と上下50度をカバー)を50式使用 → **対角径数十cmの小型ドローンを、約300m遠方で探知可能**  
→ 2次元レーダーでは、飛来したドローンの方角と距離は判別できるが、高度は判別不可能



**ドローンへの対処には**

## 前ページから

### ドローンへ の対処には

ドローン捕獲ドローン、ショットガン、ジャミングガンの三重の備えにより万全を期している。  ジャミングガンは、妨害電波を発生してドローンが操縦信号用電波等を受信できなくするマシンガンタイプの機器  有効射程は約1km、連続30分のジャミングが可能



出典 : South Korean Counter-Terrorism Center



出典 : DRONESHIELD社(オーストラリア)のHP

# 2018年英国ロイヤルウェディングのドローン対策

2018年5月19日の英国ロイヤルウェディングでは、ロンドン近郊のウィンザー城内礼拝堂で挙式後、馬車によりウィンザー市内をパレード → ドローン対策は、英国空軍が保有する探知・確認・対処システムを使用



出典 : Blighter Surveillance Systems社(英国)のHP

システムの  機能と性能



前ページから



システムの機能と性能

3次元レーダー(Kuバンドで出力4W)でドローンの飛来を探知 → サーマルカメラ(冷却型でVGA画質)やハイビジョンカメラ(日中のみ)の映像でドローンであることを確認 → ジャミング装置で妨害電波を発して航行を阻止



レーダーは、水平180度・垂直20度の探知範囲で、対角径数十cmの小型ドローンでも約2km遠方で探知可能 → レーダーが探知した方向に、カメラとジャミング装置を秒速60度の角速度で自動的に振り向け、ドローンの確認と対処を迅速に実行可能

# 英国ガトウィック国際空港におけるドローン対策

2018年12月19日夜から12月20日夜にかけて、ロンドンのガトウィック国際空港に複数のドローンが侵入を反復 → 空港は長時間閉鎖され、十数万人に影響 → 英国陸軍が保有する強力なドローン対策機器を空港に投入した結果、ドローンの侵入が止み、12月21日朝に空港は再開



3次元レーダー(Sバンド、4個で全天をカバー)と広帯域(20MHz~6GHz)SIGINTセンサーで、数km遠方の小型ドローンを探知 → サーマルカメラ等でドローンであることを確認 → ドローンの方向にビームを絞った妨害電波をフェーズドアレイアンテナから送信して、数km遠方のドローンの航行を阻止

# ジャミングしないドローン対策

“空の産業革命”が進展すれば、  
ドローンの飛行禁止や、  
ジャミングによる阻止が困難化

**＊ ＊ 山間僻地等における補助者なしの目視外飛行の実現 ＊ ＊**  
**～ “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”による高精度測位
- ・ 5Gによるコントロール・テレメトリ・映像伝送

**＊ ＊ ＊ 5Gは、ジャミングできない! ＊ ＊ ＊**

## ジャミングせずにドローンを阻止する電波装置(1/2)



出典 : DEPARTMENT13社(米国)のHP

## ジャミングせずにドローンを阻止する電波装置(2/2)

### \* ソフトウェア無線技術により、ドローンのコントロールを奪取 \*

攻撃者の無線操縦装置とドローンが送受信する電波を受信・解析して機種を判別 → 攻撃者の無線操縦装置から送信されるコントロール用電波に同期させて、「着陸命令の信号」をドローンに送信 → 他に干渉・混信・妨害を及ぼさずにドローンの遠隔操作を乗っ取り、ドローンを強制的に着陸



飛行を許可されたドローンの機種とIDを登録しておけば、許可登録されていないドローンに対してのみ、侵入を自動的に阻止 → 高所に設置すれば、半径1km程度の仮想的な侵入阻止バリアーを生成 → 許可登録されていないドローンは、バリアー内では飛び立たせることも困難



事前に解析できた機種は、飛来したドローンの探知・確認・阻止が可能  
事前に解析できていない機種は、飛来したドローンの探知も不可能

## 高速ドローンを捕獲できる長射程ネット砲(1/2)



出典 : OpenWorks Engineering社(英国)のHP

## 高速ドローンを捕獲できる長射程ネット砲(2/2)

\* 300m遠方を100km/h超で横断飛行するドローンを捕獲可能 \*

8㎡の捕獲用ネットを収めた「砲弾」を、圧縮空気の膨張力で発射

➡ ドローンの直前でネットを展開してドローンを捕獲し、地上の安全を確保するため1.8㎡のパラシュートで降下



スマートスコープによる照準時に、ドローンまでの距離を計測しドローンの動きを予測 ➡ ドローンまでの距離をインプットした「砲弾」を、捕獲地点までの弾道計算に基づき発射 ➡ 遠方を横切るように高速飛行するドローンにも有効



レーダーとの連動やサーマルカメラ等での捕捉・追尾により夜間対応も可能



**これからの“空の産業革命”**

**セキュアなドローン社会の実現が鍵**

**\* 小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会 \***

2017年から毎年作成し公表

## 空の産業革命のロードマップ

### 【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【実現済み】

レベル2 : 自動・自律による目視内飛行【実現済み】

レベル3 : 無人地帯(山、海水域、河川、森林等)での目視外飛行(補助者なし)【2018年頃~】 ← 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(第三者上空)での目視外飛行(補助者なし)【2022年度~】 ← 都市の物流、警備等が主目的

# “空の産業革命”の レベル3

目標は、



山、海水域、河川、森林等の無人地帯を、ドローンが補助者なし  
で飛行して、離島や山間部に荷物配送等を日常的に行うこと

これには、



## 【“FPVによる無線操縦”による飛行の場合】

ドローンと操縦者との間で、コントロール・テレメトリ・ライブ映像の無線伝送機能が常に働いていなければならない。

## 【“GPSによる自律航行”による飛行の場合】

自律航行中のドローンに不具合が発生した際に、操縦者はコントロール介入して、ドローンを安全に着陸させなければならない。これには、自律航行中のドローンと操縦者との間で、コントロール・テレメトリの無線伝送機能が常に働いている必要がある。

ところが、



次のページへ

前のページから

ところが、

最先端のドローンでも5km超の無線伝送能力は備えておらず、また、山影等でドローンが操縦者から見通せなくなった途端に無線伝送は途絶する。 → これでは、レベル3を広く日常的に展開するのは極めて困難！

つまり、

最先端ドローンの機能・性能でも未だ不十分 → 5Gによる“コネクティッド・ドローン”の実現 が、レベル3を広く日常的に展開する上で必須！

# 5Gによる“コネクティッド・ドローン”の実現

## \* \* 5Gをドローンで用いる3つのメリット \* \*



1

4Gと比べて桁違いとなる高速大容量・低遅延・多接続が期待される5G

➔ ドローンと操縦者との間のコントロール・テレメトリ・ライブ映像の  
伝送手段として最適

2

今日の卓越した「ドローン無線技術」でも克服できない「無線伝送距離が  
限られる問題」と「山影やビル影で無線伝送が途絶する問題」が、5Gでは  
いずれも解決

3

ドローン・飛行管理センター・操縦者等の間でのリアルタイムな情報共有  
が5Gでは可能 ➔ “空の産業革命”を支える“コネクティッド・ドロー  
ン”が、5Gで実現

# “空の産業革命”の レベル3

\* 5Gによるコネクティッド・ドローンの実現が鍵 \*

視点を  変えれば、

コントロール・テレメトリ・映像伝送に用いる「ドローン無線技術」の優劣を競うのではなく、“空飛ぶロボット”としての機能・性能の優劣を競う時代に突入

➡ ロボット大国・日本の本領発揮が期待されるところ

5Gでコントロールされるドローンは、ジャミング(電波妨害)ができなくなり、コントロールを遮断して急停止させるのが困難になる恐れ

➡ ジャミングに代わる効果的なドローン対策技術の開発が、喫緊の課題!

# “空の産業革命”の レベル3

\* “みちびき”の高精度測位が信頼性確保の鍵 \*



【伊那市を流れる三峰川】

出典：土木・環境しなの技術支援センターのHP

飛行ルート  が河川の場合

山間部への荷物配送等が日常化すれば、河川の上空をドローンが頻繁に往復飛行

この場合、 

衝突のリスクを減らすには、上りと下りの飛行ルートを河川の上空で物理的に確実に分離する必要

つまり、 

ピンポイント着陸と併せて、“みちびき”の高精度測位が大きな効果を発揮

# “空の産業革命”の レベル4

目標は、

有人地帯(つまり、第三者の上空)を、ドローンが補助者なしで飛行して、都市における物流や警備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、

次のページへ



前のページから

つまり、

レベル3とレベル4では、ドローンの飛行の安全性に関して、全くの別次元

- ➔ レベル4では、ドローン自体が周囲のリスク要因(例えば、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するなどの高度な能力が、ドローンには不可欠

レベル4を広く日常的に展開していくには、

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

- ➔ 今日の最先端ドローンの機能・性能でも、全く不十分

# “空飛ぶロボット”への進化

“空の産業革命”のレベル4では、**都市の物流を担う「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」の指示を受けて、「法定速度」でドローンは自律航行

これに加えて、 次のページへ

前のページから

これに加えて、

他のドローンとの接触や衝突の恐れなど、航行中に生じた危険を即座に察知して、自律的に回避できる高度な能力が、ドローンには必須！

具体的には、

- ステレオビデオカメラやLiDAR(レーザーレーダー)など、空間を3次元でリアルタイムに認識できるセンサーを、ドローンに搭載
- 3次元センサーで捉えた他のドローンや鳥などを判別して行動予測し、事故防止のための自律的な回避行動ができるよう、ニューラルネットワークを用いたディープラーニングによるAIを、ドローンに搭載

要するに、

都市の物流を担う「空の大動脈」として、第三者の上空を自律航行で飛行するためには、“空飛ぶクルマ”と同等の空間認識能力と危険回避能力が、“空飛ぶロボット”としてのドローンにも必要不可欠

# “空の産業革命”の レベル4

**\* セキュアなドローン社会の実現が鍵 \***

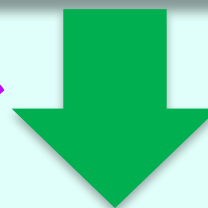
レベル4を実現する上での大前提は、ルールに従わないドローンを確実に取り締まることや、ドローンによるテロ攻撃を防止できること

これには、



現場の要員には、都市の上空を飛び交うドローンの中から不審なドローンを瞬時に見分けられる、「インテリジェント化した目」が必要 → MR(複合現実)の技術を活用したスマートグラスを通して、仮想的な「空のハイウェイ」上を飛行するドローンの機体IDやオペレータID等を識別

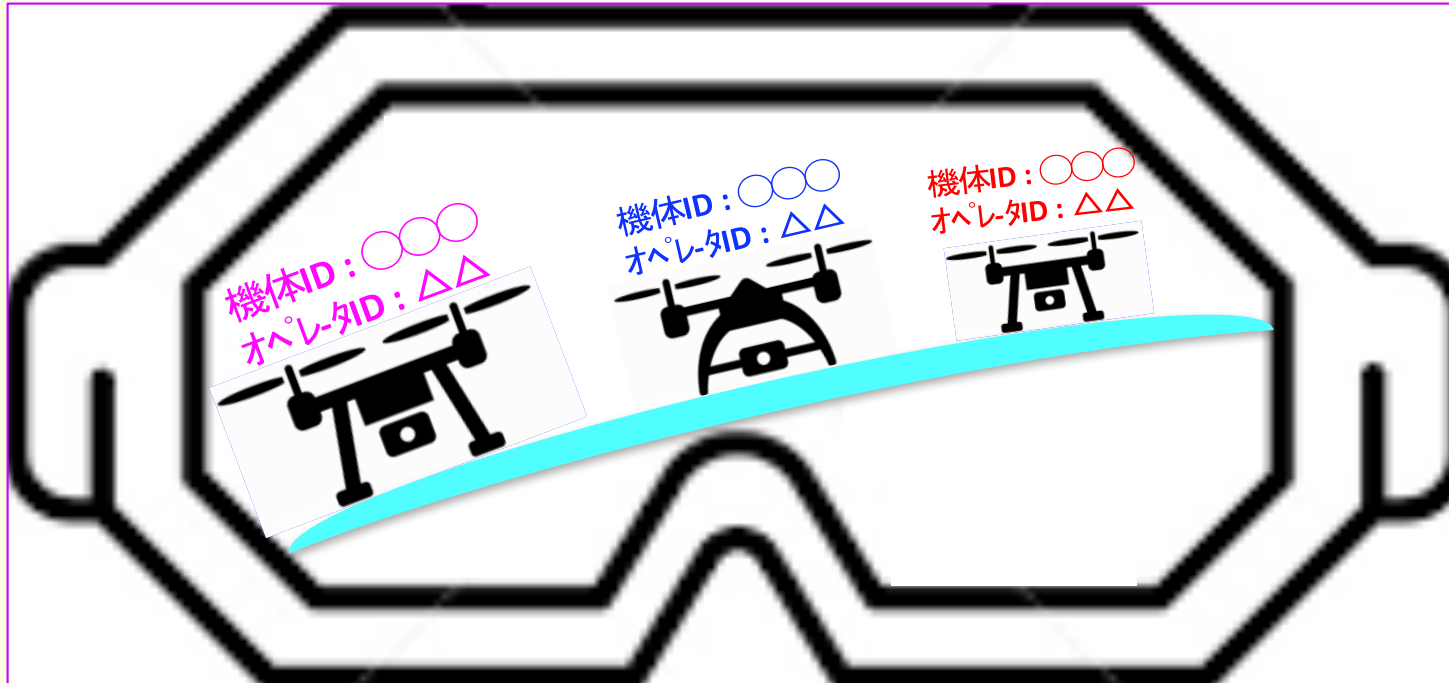
そのイメージは、



次のページへ

前のページから

そのイメージは、



ここでも、

実際のドローンの位置とそのIDを示す位置との間に、**メートル単位の“ズレ”**が発生すれば**誤認の原因** → この“ズレ”を無くすには、**“みちびき”の高精度測位の活用が唯一の解決策!**

2019年11月29日

みちびきとセキュアなドローン社会の実現

終

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