

マルチコプタ型ドローンの 組込み技術と運用

徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部

徳島大学工学部機械工学科

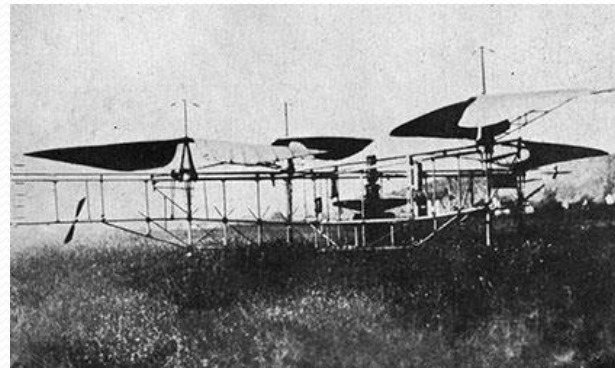
三輪 昌史

マルチコプタとは

- ヘリコプタの一種です。
- マルチロータヘリコプタ、の略です。
- ヘリコプタといえば、シングロータが一般的ですが、世界最初のヘリコプタはマルチコプタです。



ベル47G
1946/3/8
民間証明を取得した
最初の民間商用ヘリコプター



エーミシエン2号
4発ロータ機
1922/11/11

マルチコプタとは

- 基本的に、無人航空機がほとんどです。
- 無人航空機：人が乗って操縦しない航空機
- ラジコン飛行機、ラジコンヘリコプタも広い意味でUAV



ドローンとは？

- 無人機 (UAV) などや地上の車両を含む無人機を指す名称。自動操縦及び遠隔操縦を含む。
- 1939年に販売されたデニー模型飛行機をアメリカ陸軍が標的機ターゲットドローンとして採用。
この時からドローンという名称がつかわれ始める。
- もともと英語で雄の蜂や蜂の発する音を指す言葉。
模型飛行機の音からか？

無人機(UAV)の汎用化に伴う防衛機器産業への影響調査報告書 平成18年3月

ドローンとは？



無人機とドローン

ドローン

UAV

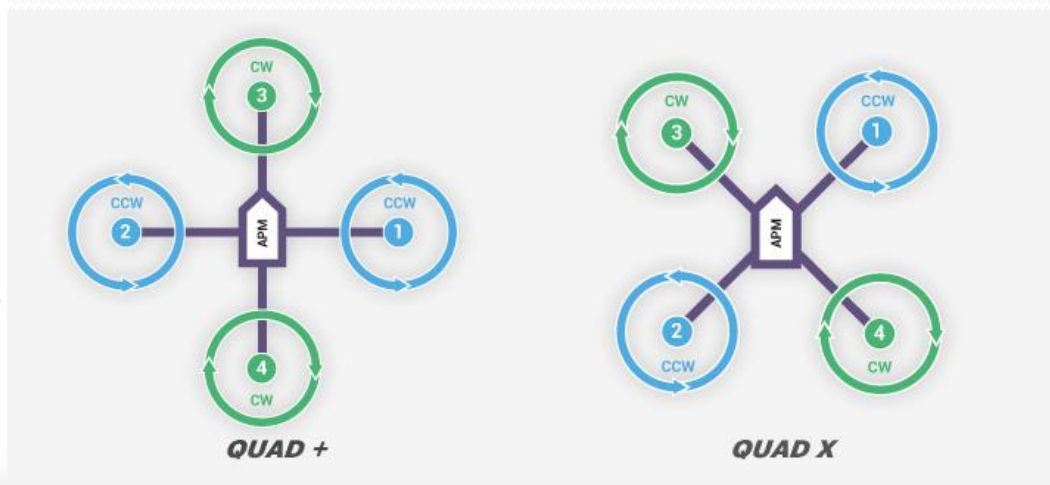


マルチコプタ？ドローン？

- 報道のドローンは、ほとんどマルチコプタのこと
- 偶にマルチコプタ型ドローンをドローンとしている。
- 市販されているマルチコプタ、マルチコプタ型ドローンはラジコンヘリコプタ型無人機の範疇。
- ラジコンヘリコプタとして扱う必要がある。

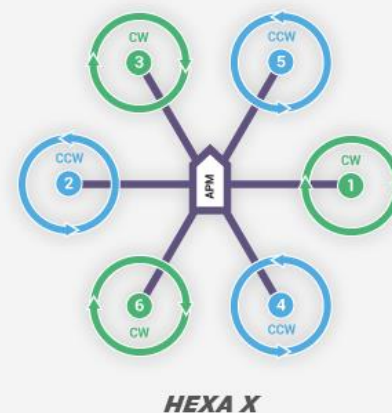
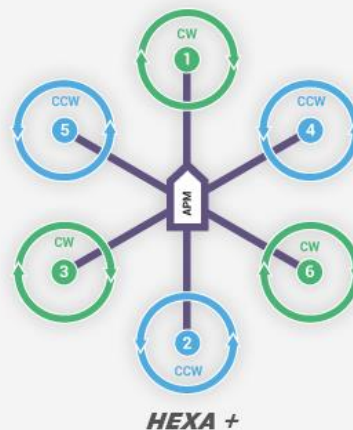
マルチコプタの構造

- 複数のロータプロペラがある。

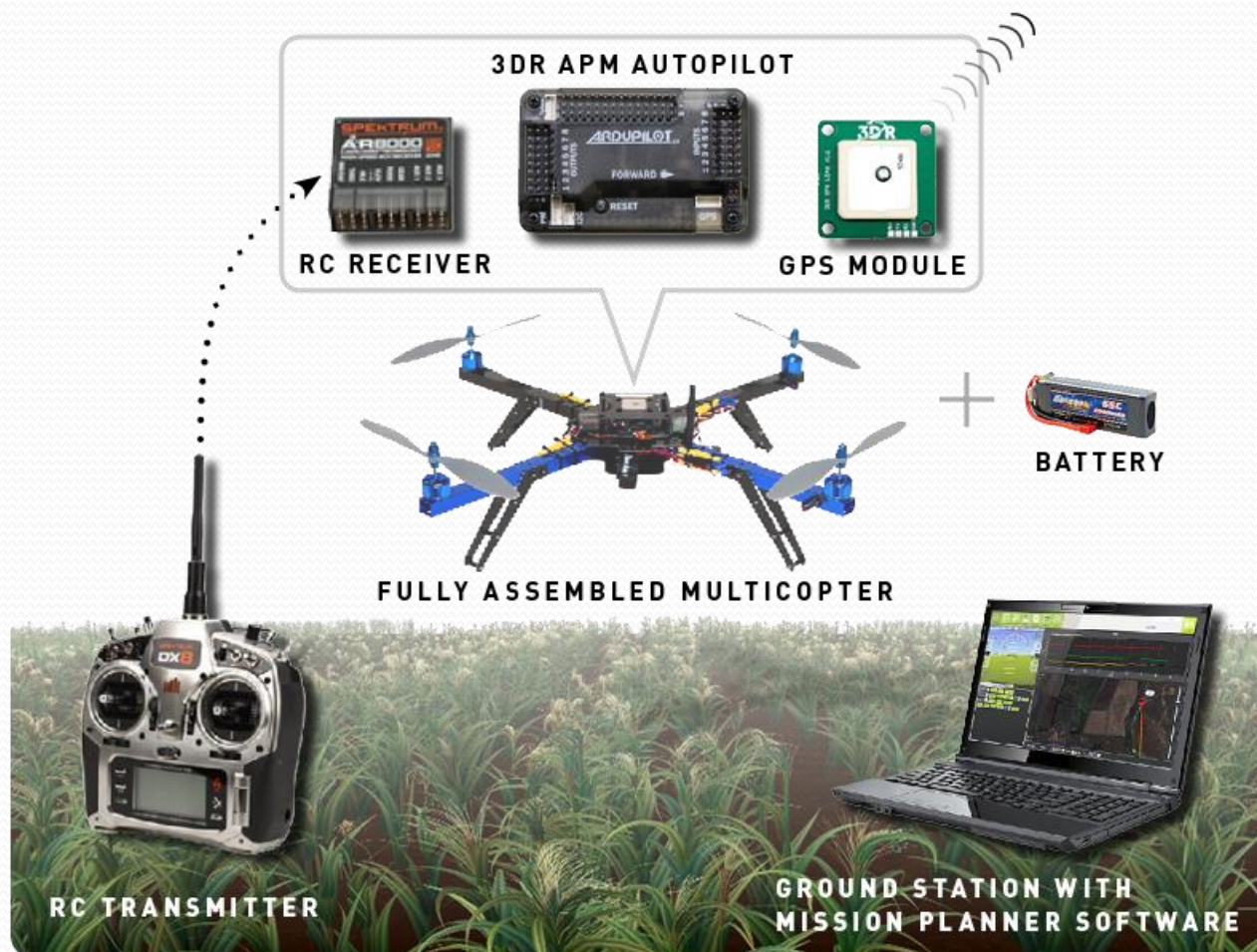


マルチコプタの構造

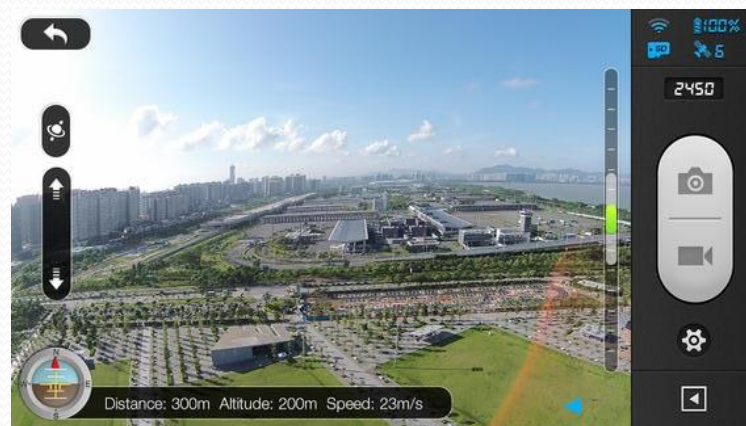
- 複数のロータプロペラがある。



マルチコプタシステム



マルチコプタ型ドローンの例



マルチコプタだけでは、ドローンではない。
マルチコプタ+カメラ+映像転送システムでドローンの要件を満たしている。
また、マルチコプタ型ドローンは、ラジコンヘリコプタの一種

マルチコプタ型ドローンの例



マルチコプタだけでは、ドローンではない。

左:マルチコプタ+カメラ+映像転送システムでドローンの要件を満たしている。

右:マルチコプタ+カメラでドローンの要件を満たしていない。

4発ロータの機体特性

各推力を F_1 から F_4 で表す。

X軸を中心とした回転角度をRoll角 ϕ ,

Y軸を中心とした回転角をPitch角 θ とし,

Z軸を中心とした回転角をYaw角 ψ とする。

Z軸方向の直線運動, 各軸周りの回転の運動
方程式は

$$m\ddot{Z} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - mg$$

$$J_X\ddot{\phi} = \frac{1}{\sqrt{2}}r(-F_1 + F_2 + F_3 - F_4)$$

$$J_Y\ddot{\theta} = \frac{1}{\sqrt{2}}r(F_1 - F_2 + F_3 - F_4)$$

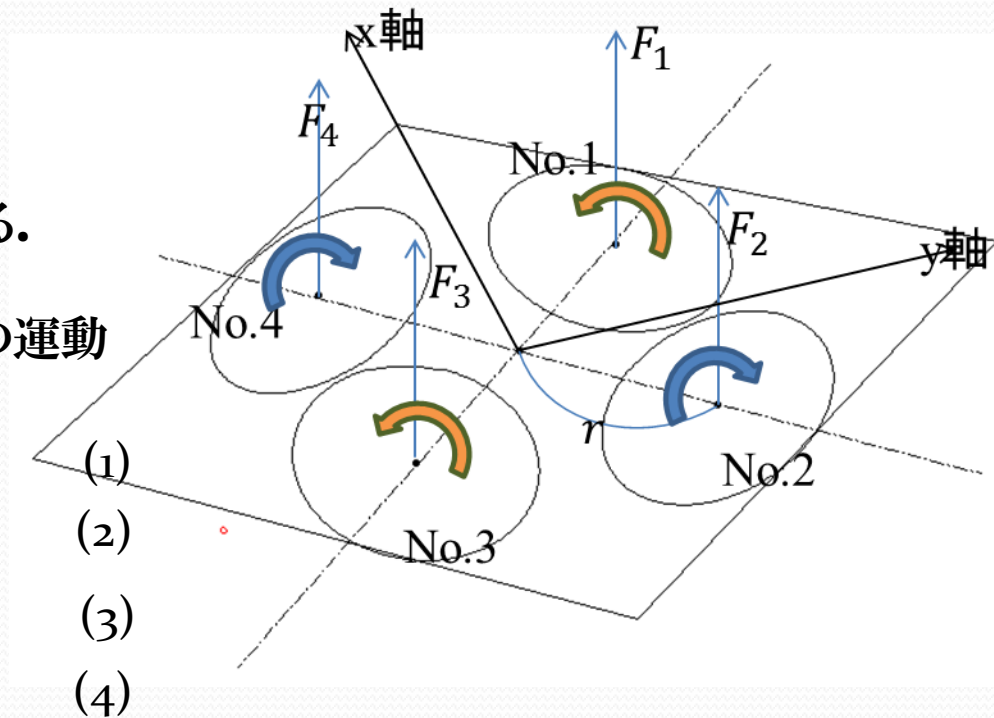
$$J_Z\ddot{\psi} = \mu(F_1 + F_2 - F_3 - F_4)$$

m は機体質量である。

J_X, J_Y, J_Z はそれぞれ, X, Y, Z軸周りの慣性モーメントを表す。

r は, 各ロータの軸とZ軸の距離である。

μ はロータの推力と反動トルクの関係を表す係数である



4発ロータの機体特性

整理すると、

$$F_1 = \frac{1}{4} \left(m\ddot{Z} - \frac{\sqrt{2}}{r} J_X \ddot{\phi} + \frac{\sqrt{2}}{r} J_Y \ddot{\theta} + \frac{1}{\mu} J_Z \ddot{\psi} + mg \right) \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{1}{4} \left(m\ddot{Z} + \frac{\sqrt{2}}{r} J_X \ddot{\phi} - \frac{\sqrt{2}}{r} J_Y \ddot{\theta} + \frac{1}{\mu} J_Z \ddot{\psi} + mg \right) \quad (6)$$

$$F_3 = \frac{1}{4} \left(m\ddot{Z} + \frac{\sqrt{2}}{r} J_X \ddot{\phi} + \frac{\sqrt{2}}{r} J_Y \ddot{\theta} - \frac{1}{\mu} J_Z \ddot{\psi} + mg \right) \quad (7)$$

$$F_4 = \frac{1}{4} \left(m\ddot{Z} - \frac{\sqrt{2}}{r} J_X \ddot{\phi} - \frac{\sqrt{2}}{r} J_Y \ddot{\theta} - \frac{1}{\mu} J_Z \ddot{\psi} + mg \right) \quad (8)$$

となり、姿勢と各ロータの推力の関係が求まる

4発ロータの機体特性

i 番のロータへの操作量 U_i を求めると、

$$U_1 = U_b + K_Z(\dot{Z}_d - \dot{Z}) - K_\phi(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + K_\theta(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_\psi(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) \quad (9)$$

$$U_2 = U_b + K_Z(\dot{Z}_d - \dot{Z}) + K_\phi(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) - K_\theta(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_\psi(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) \quad (10)$$

$$U_3 = U_b + K_Z(\dot{Z}_d - \dot{Z}) + K_\phi(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + K_\theta(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) - K_\psi(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) \quad (11)$$

$$U_4 = U_b + K_Z(\dot{Z}_d - \dot{Z}) - K_\phi(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) - K_\theta(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) - K_\psi(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) \quad (12)$$

ここで、 U_b は機体質量を補償する項

$\dot{Z}_d, \dot{\phi}_d, \dot{\theta}_d, \dot{\psi}_d$ はそれぞれ機体のZ軸方向の目標速度, 目標Roll角速度, 目標Pitch角速度, 目標Yaw角速度

$K_Z, K_\phi, K_\theta, K_\psi$ は, 各要素における誤差を操作量に変換するゲイン

操作量 U_i と推力 F_i には比例関係があると仮定し、

$$F_i = AU_i$$

とする。

4発ロータの機体特性

式(9)から(12)を推力に変換して式(1)から(4)に代入すると

$$m\ddot{Z} = 4A(U_b + K_Z(\dot{Z}_d - \dot{Z})) - mg \quad (13)$$

$$J_X\ddot{\phi} = 2\sqrt{2}rAK_\phi(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) \quad (14)$$

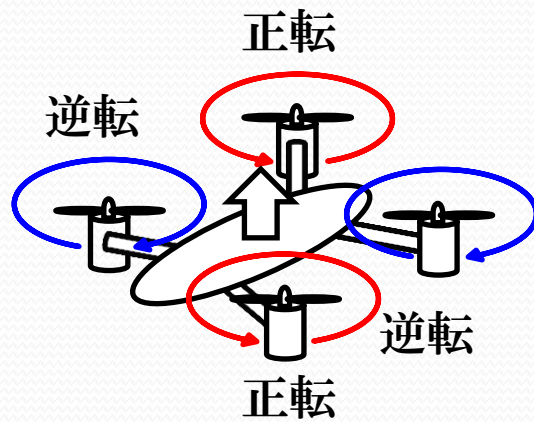
$$J_Y\ddot{\theta} = 2\sqrt{2}rAK_\theta(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (15)$$

$$J_Z\ddot{\psi} = 2\sqrt{2}rAK_\psi(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) \quad (16)$$

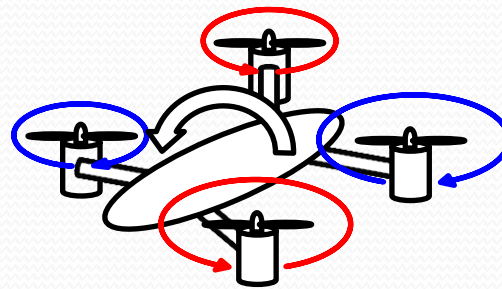
となる。

各軸は、希望の速度(角速度)と実際の速度(角速度)の誤差より、制御できる。

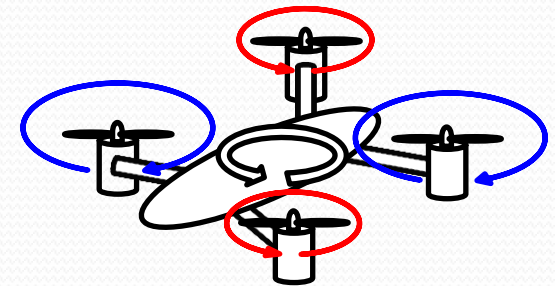
マルチローターヘリコプタの制御



高度の制御



機体の傾きの制御
(Roll, Pitch)



機体方向の制御
(Yaw)

機体の傾きの制御, 及び高度の制御に推力を
機体方向の制御に反トルクを使用している.

無人航空機 ヘリコプタタイプの制御

- 基本は姿勢制御
 - 水平を維持すると、その場でホバリング
 - 機首を上げると後退
 - 機首を下げると前進
 - 右に傾くと右にスライド
 - 左に傾くと左にスライド



HIROBO社カタログより

送信機のスティックと舵



エレベータ:ピッチ軸の回転
前後の移動

スロットル:機体の上下



ラダー:ヨー軸の回転
左右の回転

エルロン:ロール軸の回転
左右の移動

舵について

- スロットル モータの回転を変化させる
→ 離着陸、機体の上下
- エルロン 機体をロール軸回りに回転させる
姿勢制御により、スティックの傾きに
機体が追従して左右に傾く → 左右の移動
- エレベータ 機体をロール軸回りに回転させる
姿勢制御により、スティックの傾きに
機体が追従して前後に傾く → 前後の移動
- ラダー 機体をヨー軸回りに回転させる
→ 左右の回転

マルチコプタの制御

- 姿勢を傾けることで、機体は移動する。
- 姿勢制御系に適切な目標姿勢を与えることで、機体を移動させることができる。

この特性を利用すると・・・

- 姿勢制御系を構成することで、無人航空機の操縦が簡単になる。
- GPSを用いて目標位置と現在位置の誤差を計算し、誤差に応じた目標姿勢を姿勢制御系にあたえると、自動航行ができる。

無人機の運用に関する法律

関連するのは・・・

- 航空法
- 電波法
- 道路交通法
- 民法
- ほかには、地上自治体の条例など

航空法における航空機

- 航空機：
 - 人が乗って航空の用に供することができる
 - 飛行機
 - 回転翼機
 - 滑空機
 - 飛行船
 - その他政令で定める航空の用に供することができる機器
(ただし、今の所政令で定められたものはない)
- 無人機は人が乗っていないので、航空機でない？！

電波法による規制

無線操縦用電波

周波数帯	送信出力	伝送速度	通信距離	無線局免許	備考
73MHz	※	5kbps	1～5km	不要	ラジコン専用波
350MHz	1W	5kbps	2～10km	登録	簡易無線局
400MHz	10mW	5kbps	500m～3km	不要	特定小電力無線
920MHz	20mW	～1Mbps	1～3km	不要	特定小電力無線
1.2GHz	10mW	20kbps	500m～2km	不要	特定小電力無線
2.4GHz	10mW/MHz	200kbps	500m～3km	不要	小電力データ通信システム
150MHz	50W	9.6kbps	～10km以上	要	携帯局(狭帯域デジタル無線)
400MHz	50W	9.6kbps	～10km以上	要	携帯局(狭帯域デジタル無線)

※500mの距離において、電界強度が $200\mu\text{V/m}$ 以下

電波法による規制

データ通信(画像、センサ出力)

業務に使用できるもの。

5.8GHzはアマチュア無線のため、業務に使えない。

周波数帯域	送信出力	伝送速度	通信距離	無線局免許	備考
200MHz	5W以下		～10km	要	陸上移動局
1.2GHz	1W	アナログ	1～3km	要	携帯局
2.4GHz	10mW/MHz	3Mbps	～300m	不要	小電力データ通信システム
50GHz	30mW	アナログ	1～5km	要	簡易無線局

道路交通法による規制

- 道路交通法第77条

四 前各号に掲げるもののほか、道路において祭礼行事をし、又はロケーションをする等一般交通に著しい影響を及ぼすような通行の形態若しくは方法により道路を使用する行為又は道路に人が集まり一般交通に著しい影響を及ぼすような行為で、公安委員会が、その土地の道路又は交通の状況により、道路における危険を防止し、その他交通の安全と円滑を図るため必要と認めて定めたものをしようとする者

道路交通法上、UAVが公道上空を飛行する場合における明確な規定はないが、第四項に該当するかもしれない。

民法による規制

(土地所有権の範囲)

第二百七条 土地の所有権は、法令の制限内において、その土地の上下に及ぶ。

土地の所有権は、法令の制限内において、その土地の上下に及ぶこととされているため、UAVについては、
(承諾を得ない限り) 他人の私有地上を飛行することができない。

マルチコプタの運用に関する法律

- 航空法

飛行機の安全運用のための法律。
飛行機の邪魔をするな。

- 電波法

電波は正しく使いましょう。
他の機器に迷惑をかけない。
免許や周波数、出力とかに注意!

- 道路交通法

道路の上は飛んじゃダメ。

- 民法

私有地の上にはいっちゃダメ

- 条例等

公園で飛ばしたら、他の人が危ないよね。

航空法の改正について

7月14日の閣議において航空法改正案が承認され決定されました。本延長国会にて審議議決されます。

1. 1平方キロメートルあたりの人口が4千人以上の地区は国土交通省令でいうところの、人または家屋の密集している地域に該当するために、飛行禁止空域となる。

<http://www.stat.go.jp/data/chiri/gis/did.htm>

例：東京23区はすべて飛行禁止空域

例：徳島大のグラウンドも飛行禁止空域

航空法の改正について

7月14日の閣議において航空法改正案が承認され決定されました。本延長国会にて審議議決されます。

2. ただし、国土交通大臣が安全が損なわれるおそれがないと判断した場合はそのかぎりではない。

国交省航空局の考えではミニサーベイヤーコンソーシアム会員のように安全ガイドラインを設けて、技能検定も厳格に実施している団体所属の会員は申請すれば飛行禁止空域でも飛行許可を取得できるとのこと。

航空法の改正について

7月14日の閣議において航空法改正案が承認され決定されました。本延長国会にて審議議決されます。

3. したがって、飛行を予定している者は、飛行許可の申請をする必要がある。1回承認されると最大1年間有効である。それ以降は再度許可申請を行う(期間延長も検討中)。これに違反した場合は罰則が適用され、50万円以下の罰金が科される。

航空法改正案が国会で可決されると、3か月の猶予期間を経て、施行される。この3か月の間に飛行許可申請が必要。

ホビーと業務で分ける可能性がある。

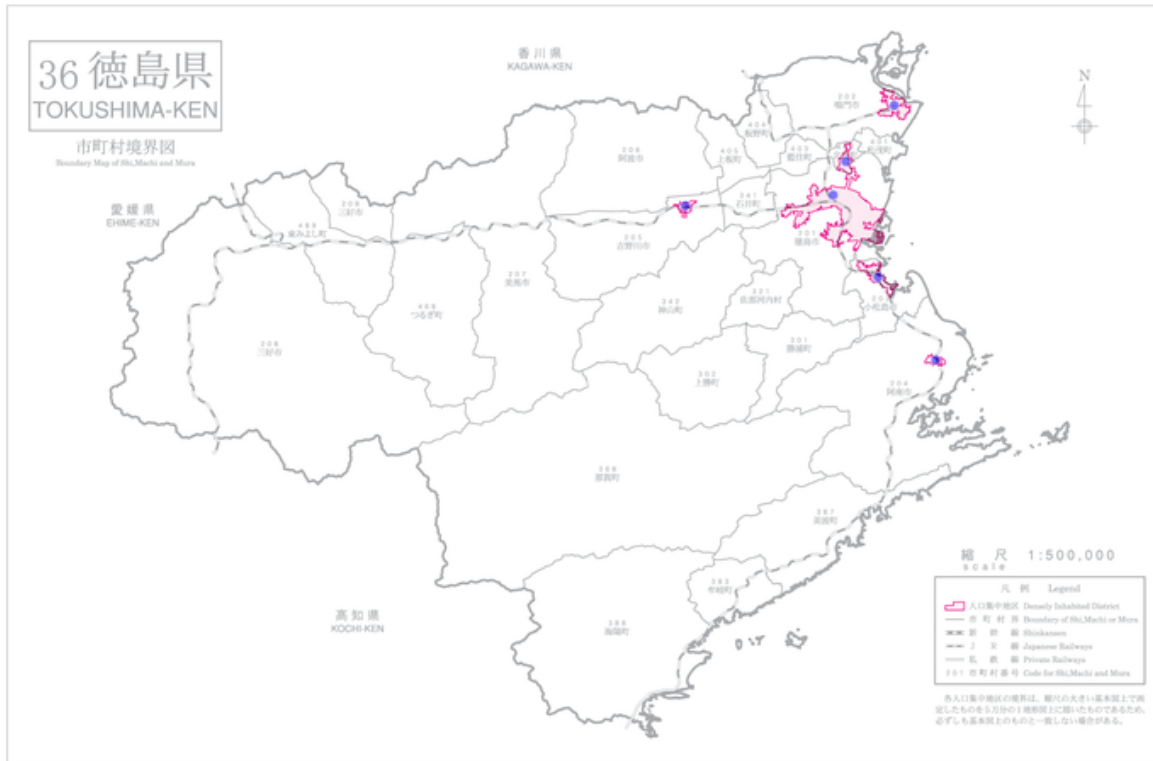
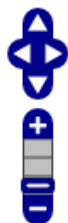
徳島県の場合

平成22年国勢調査人口集中地区境界図

都道府県選択

人口集中地区検索

操作説明



徳島市の場合

調査人口集中地区境界図

検索

操作説明



マルチコンピュータの使用例

空撮



エアロサービス T.K.Factory

橋梁検査



エアロサービス T.K.Factory

農薬散布

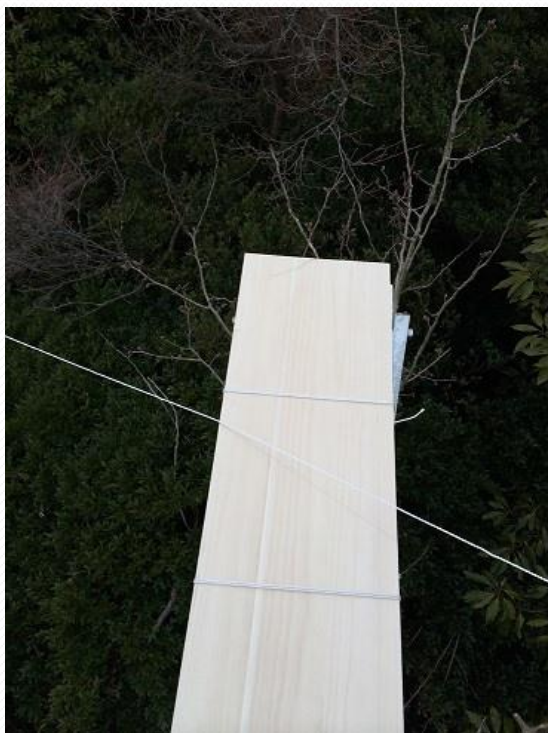


光ファイバーケーブル敷設



写真提供;株式会社空撮技研

光ファイバーケーブル敷設



写真提供;株式会社空撮技研

安全運用に関して

無人機のリスク

空を飛ぶものは、落ちます。

落ちる前に降ろすから安全。

落ちても問題ない場所なら安全(?)

マルチコプタも同じです。

保険

- 趣味なら
 - ラジコン保険
 - 基本的にラジコン飛行場で飛ばしているの事故が前提
 - 状況によっては出ないこともある
- 業務なら
 - 損害賠償保険
 - 産業用無人ヘリコプター総合保険
 - 東京海上日動火災保険4月から発売

墜落例



モータとアンプの適合性

モータの要求電流に対しアンプが対応できなかった。

FETの破損・発火を防ぐために停止→墜落のコンボ

マルチコプタ運用での問題点

マルチコプタ用FCの高性能化、低価格

操縦が簡単になったため、
経験・知識・技量がなくても運用可能に



無茶な飛行が増加

- 名古屋でのテレビ塔付近での空撮と墜落
- お台場 観光客頭上でのガンダム空撮
- 吉野川花火大会での花火開花半径内での空撮
- マラソン大会空撮での墜落

危険な撮影



危険性を認識していない人:インフラに対する被害額は膨大

マルチコプタの運用に関する法律

- 航空法
飛行機の安全運用のための法律。
飛行機の邪魔をするな。
- 電波法
電波は正しく使いましょう。
他の機器に迷惑をかけない。
免許や周波数、出力とかに注意!
- 道路交通法
道路の上は飛んじゃダメ。
- 民法
私有地の上にはいっちゃダメ
- 条例等
公園で飛ばしたら、他の人が危ないよね。

マルチコプタの運用に関する法律

んじゃあ、どうするか？

例₁:大学のグラウンドでの実験

大学の設備なので、大学の許可でOK
安全対策は必要

マルチコプタの運用に関する法律

んじゃあ、どうするか？

例₂:公園で行われるイベントの撮影

イベント主催者からの依頼

開催場所:徳島市新町川公園

主催者の他に、管理者の許可が必要

徳島市公園緑地課:公園の一部は？

離着陸は許可

徳島県警:橋の上の一部は？

歩行者の邪魔になるからダメ

徳島県河川管理課:川の上は飛んでいい？

OK!

マルチコプタの運用に関する法律

んじゃあ、どうするか？

例₂:公園で行われるイベントの撮影
安全対策は？

飛行計画の製作と提出

→イベント保険もOKに

事前に市役所の方に確認してもらった
ロープによる繫留

マルチコプタの運用に関する法律

んじゃあ、どうするか？

例2:公園で行われるイベントの撮影



安全性に対する意識

ホビーとしてのラジコン飛行機、ラジコンヘリコプタ:

訓練しないと飛ばない

基本的に決まった場所を実施。

→自然にルールを学び、守る

安全対策 ○

安全性に対する意識

ホビーとしてのマルチコプタ:

習熟が不要

どこでも飛んでしまおう

→ルールを学ぶ機会がすくない

安全対策

“なにそれ、おいしいの?”状態になりがち。

安全性に対する意識

業務としての空撮：

撮影対象は不特定の場所。

ホビー以上に安全対策が必要。

事前の通報や許可申請等が必要。

まとめ

依頼者は、たいてい危険性を認識しない、できない。
運用者は、自己防衛も兼ねて安全管理する必要があります。
また、運用者の方から、依頼者に危険性の指摘をする必要があります。

ルールをまもって、安全に運用しましょう！

UAV関連団体

- 一般社団法人 日本ラジコン電波安全協会
<http://www.rck.or.jp/contents/index.html>
- 日本産業用無人航空機協会
<http://www.juav.org/>
- ミニサーベイヤーコンソーシアム
<http://mini-surveyor.com/>
- 一般社団法人 日本UAS産業振興協議会
<http://uas-japan.org/>