

自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術

井上 公*・内山庄一郎*・鈴木比奈子*

Multicopter Aerial Photography for Natural Disaster Research

Hiroshi INOUE, Shoichiro UCHIYAMA, and Hinako SUZUKI

** Disaster Risk Research Unit,*

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

inoue@bosai.go.jp, uchiyama@bosai.go.jp, hinasuzuki@bosai.go.jp

Abstract

We explain aerial photography techniques using multicopters, small-scale electrical multi-rotor radio controlled helicopters, and show our survey examples. Low-cost multicopters with GPS flight control system, which are easy to fly and can navigate in auto-pilot, became available very recently. In combination with high-resolution compact digital cameras and Structure from motion (SfM) technology to build a 3-D model from pictures, multicopters technology enabled us to take photos of disaster areas from low altitude and to model precise topography of landslides and active faults. This paper describes basic knowledge and techniques necessary for introducing multicopters and their operations, aerial photography techniques, measures for safety operation and notes of caution, related regulations to be observed, followed by some of our survey examples. Multicopter aerial photography will spread rapidly. Safety operation and compliance with regulations are the two highest priorities to avoid accidents.

Key words: Multicopter, UAV, Aerial Photography, Photogrammetry, Disaster survey

1. はじめに

地震・津波・地すべりをはじめとする各種自然災害の記録には低空から撮影した写真がしばしば有用である。低空空撮写真は、人間の視点よりは高く航空機よりは低い、高度 10～100 メートルの位置から撮影された写真であり、地上では得られない広い視界や、高位置からの視点が得られること、航空機からの写真では得られない高い分解能が得られることが特長である(井上・他, 2011)。

近年、マルチコプターと呼ばれるラジコンの電動マルチローターヘリコプターの性能がめざましく向上し、コンパクトデジタルカメラの性能向上と相まって、誰もが比較的容易に高品質の低空空撮写真

を撮影できるようになった。

また、複数の二次元画像から三次元モデルを再構築する SfM (Structure from Motion) 手法を低空空撮写真に適用することにより、地すべり地形や地震断層地形を高精度で三次元モデル化することが可能となり(内山・他, 2014a)、低空空撮の災害調査研究への活用の有効性が大きく広がった。

本論文では災害調査研究を目的としたマルチコプター空撮に必要な機材・運用方法・安全対策等を、我々の調査経験に基づいて解説し、実際に行った地すべり地形調査、豪雨災害調査、海岸地形調査、建物地震被害調査等の例を示す。

* 独立行政法人 防災科学技術研究所 社会防災システム研究領域 災害リスク研究ユニット

2. マルチコプター空撮機材

2.1 マルチコプター

低空空撮にはいくつかの手法があるが、凧や気球は撮影位置の自由度が低く、かつ風の影響を受けやすい。ラジコンヘリやラジコン飛行機は操縦技術さえあれば空中の自由な位置からの撮影が可能である。法令等による飛行場所や高度の制限は後述する。

ラジコンヘリやラジコン飛行機は操縦者から距離 200 ～ 300 メートルの範囲を目視飛行させることができる。小型のものは古くから趣味の道具として使われており、大型のものは農薬散布等の他、災害調査研究の分野では火山研究等の特殊な調査に活用されてきた。ただし、従来のラジコンヘリ・飛行機は初心者には操縦が難しく、安全性と経済性の観点から調査研究への活用は限定的であった。

しかし、最近になって、いわゆるマルチコプター、すなわち電動マルチローターヘリコプターが急速に発達した。背景となっている技術は、強力な電動ブラシレスモーター、軽量大容量のリチウムポリマーバッテリー（通称リポバッテリー）、MEMS 加速度センサーとジャイロによる機体姿勢制御システム、GPS による位置制御と自律航行システムである。特に GPS 位置制御は、手離しでのホバリングや緊急時の自動帰還などを実現し、操縦ミスによる墜落や機体の遺失の危険を大幅に減らすことができる。

GPS 位置制御システムはまた、あらかじめ緯度経度を設定した複数の地点をたどる自律飛行を可能とし、空撮調査をより効率的かつ安全に実施することを可能とする。最近では自律航行機能まで備えたマルチコプターが非常に低価格で入手できるようになってきた。現在のマルチコプターは趣味の道具であるだけでなく、その高性能さゆえ、調査研究の道具としても十分に実用的なツールとなってきた。

2.2 マルチコプターの機体

空撮調査に利用可能なマルチコプターは、現在様々なメーカーから販売されている。4 枚のローターをもつ「クアッドコプター」が最も一般的であるが、ローターが 6 枚あるいは 8 枚といった大型の機体もある。機体が大きくローターの数が多いほどペイロード（搭載重量）が大きくかつ安定した飛行ができるが、価格も墜落時の危険性も大きくなる。

映画などの撮影では、重量のある高性能カメラを高性能のジンバルに取り付けて安定した映像を得る

必要があるため大型のマルチローター機が用いられるが、我々の空撮調査はコンパクトデジタルカメラと固定具を合わせた合計 300 g 程度の機材を搭載して、5 分から 10 分飛行ができればよく、対角ローター軸間 30 ～ 50 センチメートル程度の小型のクアッドコプターで十分である。以下に現在我々が調査に使用している機体のいくつかを紹介する。

DJI 社製 Phantom（対角ローター軸間 35 cm、**図 1**）はクアッドコプター製品の 1 つで、専用の送信機（プロポ）とリポ電池を含めた完成品のセットとして 6 万円前後で売られている。GPS 航行装置 NAZA-M を搭載し、手離しホバリング、自動帰還機能、機体の向きに依らない操縦モード等を備えており、初心者でもすぐに飛行させることができる。我々は近距離の手動操縦による低空空撮では DJI Phantom を多用してきた。



図 1 DJI 社製クアッドコプター Phantom と専用送信機（プロポ）（右）

Fig. 1 DJI Phantom quadcopter and its own controller (right).

DJI Phantom の、電池を除く機体重量は 640 g、飛行時間は付属の 3 セル 2,200 mAh のリポ電池（175 g）と GoPro Hero2 とカメラマウント（120 g）を搭載して、無風時の安全最大飛行時間（電池を完全に使い切って墜落するまでの時間の 80 % と仮定）は 9 分程度、リコー GR とカメラマウント（260 g）を搭載して同 7 分程度である。専用送信機の電波は見通して 300 m かそれ以上到達する。ただし Phantom に限らず、300 m 以上離れると目視による操縦は困難となる。

DJI F450 は Phantom よりも一回り大きく対角ローター軸間 45 cm の機体である (図 2)。メーカーからは、送信機を含めた完成品ではなく、機体・アンプ・モーター・プロペラのセットとして 2 万円程度で販売されており、GPS 飛行制御装置 (3 万円程度)、受信機 (1 万円程度)、送信機 (4 万円程度) を組み合わせて 10 万円程度でシステムを構築できる。組立調整済みの完成品は、ラジコンショップから 20 万円程度で購入することができる。我々は F450 の機体に、後述する 3DRobotix 社の自律飛行システム APM2.6 と、Hitec 社製送受信機および GPS・電圧テレメトリを組み込んで使用している。

我々の F450 の機体重量は 900 g で、これにリポ電池 (3 セル 4,400 mAh, 360 g) とカメラ (リコー GR, 240 g) を搭載して、無風時の安全最大飛行時間は約 12 分である。Phantom と比べて機体が大きい分だけ余裕がある。

我々は同クラスの機体として F450 よりも若干大きい対角ローター軸間 53 cm の 3DRobotix 社製 3DR Quad (図 3) もあわせて空撮調査に用いている。3DR Quad は GPS 自律飛行装置 APM 2.6 を搭載しており、電池を除く機体重量は約 950 g で飛行性能も F450 と同程度である。

DJI 社製 F550 (図 4) は、対角ローター軸間が 55 cm と F450 や 3DR Quad よりも更に大きく、6 枚のローターを有している。我々はこれに当初 DJI 社 Wookong-M 飛行制御装置とフタバ製送受信機を組み合わせて用いたが、その後 APM2.6 自動航行装置と Hitec 社製送受信機に変更した。F550 は一眼レフカメラを搭載することも可能であり、機体が大きな分だけ安定していて風にも強い。なお 6 枚以上のローターを持つマルチコプターはローター 1 個が故障しても直ちに墜落することがないと言われているが、現状の APM2.6 の場合は墜落する。不具合への対応能力は飛行制御装置の性能に依存するため一概には言えない。

どのようなマルチコプター機体を用いるかは搭載するカメラの重量と、調査対象に依存する。たとえば災害後の被害の様子を GoPro Hero や Sony ActionCam のような 100 g 前後の軽量なカメラを用いて、100 m 以内の狭い範囲を手動操縦で撮影する場合は DJI Phantom は最適な機材の 1 つである。一方、もう少し広い 300 m 程度までの範囲を、高分解



図 2 DJI 社製 クアッドコプター F450
Fig. 2 DJI F450 quadcopter.



図 3 3DRobotix 社製 クアッドコプター 3DR Quad
Fig. 3 3DRobotix 3DR Quad quadcopter.



図 4 DJI 製 F550 ヘキサコプター
Fig. 4 DJI F550 hexacopter.

能のリコー GR クラスのカメラを用いて写真測量する場合は、後述する自律航行システムを搭載した、DJI F450 や 3DR Quad クラスの機体が適している。

より高画質の一眼レフカメラを搭載する場合や強風など悪条件でも滑らかな動画を撮影したいなどの場合は F550 以上の機体が望ましいが、我々の空撮ではそのような必要性は高いとはいえ、F450 クラスの機体で通常は十分である。

DJI Phantom のような送受信機も含めた完成品を購入するか、機体・送受信機・飛行制御装置をショップで組み立て調整したものを購入するか、あるいは自分で組むかはそれぞれ一長一短がある。自分で組み立て調整をすることのメリットは選択の幅がひろがることと、トラブルに迅速に対応できることである。マルチコプターの製品は、ここで紹介した機種その他、内外のメーカーやショップからいろいろなものが販売されているが、それらの優劣を評価する情報は我々は持ち合わせていない。なお、本稿執筆時点(2013 年 12 月)で DJI 社より Phantom 2 が発売された。飛行時間は Phantom の 2 倍近く、空撮調査に有用な機種の一つとなる可能性がある。

2.3 送信機(プロポ)

マルチコプターは、他のラジコンヘリや飛行機と同様にプロポと呼ばれる送信機の、左右 2 本のスティックを用いて操縦する。送信機が発出する電波の周波数は現在では殆どが 2.4 GHz で、見通し距離 1 km 程度までの範囲で通信ができる。後述のオートパイロットで航行させる場合も、離着陸時や非常時にマニュアル操縦を行うため、送信機は必ず必要になる。

図 5 に送信機の左右のスティックの役割を、図 6 にはそれらに対応する機体の動きの模式図を示す。ここで説明する各スティックの機能の割り当てはモード 2 と呼ばれるもので、右手の左右の動きが機体の左移動・右移動、右手の前後の動きが機体の前進・後退、左手の左右の動きが機体の左回転・右回転、そして左手の前後の動きが上下移動または加減速の制御を行う。2 本のスティックの各 2 方向の操作は飛行機の操縦に倣ってそれぞれエルロン、エレベータ、ラダー、スロットルと呼ばれている。

モード 2 のスティック割り当ては米欧で一般的なもので、日本ではエレベータとスロットルを入れ替えたモード 1 が一般的である。モード 1 に比べて



図 5 送信機(プロポ)のスティック操作(モード 2)
Fig. 5 Manipulation of transmitter sticks (Mode 2).

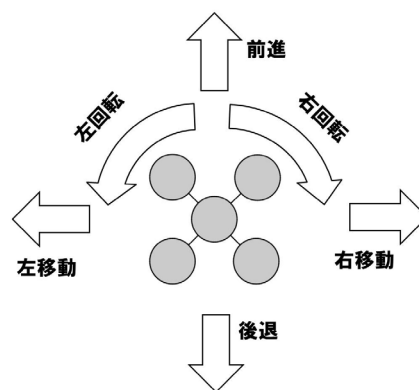


図 6 機体の動き(上から見た図)
Fig. 6 Movement of a quad-copter (top view).

モード 2 は、右手のスティックの動きが機体の前後左右の動きに対応しており直感的でわかりやすいため、初心者でもすぐに操縦を覚えられる。送信機のモード 1 からモード 2 への変更は自分でもできるが、購入時にモード 2 と指定したほうが簡単である。新しくマルチコプターの操縦を覚えるにあたって、モード 1 を用いるメリットは特にないので、本稿では以下モード 2 で説明する。

送信機には 2 本のスティックと電源スイッチ以外にも、いろいろなスイッチやレバーがついている場合が多い。これらは飛行機の車輪を出し入れしたり、煙を吐き出したり、操縦中にスティック感度を変えたりといったことに使われるが、我々の空撮調査で必要となるのは飛行モード(マニュアル、GPS 支援、自律飛行、その他)の切り替えスイッチと非常時の自動帰還スイッチの 2 つのみである。カメラのジンバルやシャッターを操作する場合はそれらのためのスイッチも必要になるが、我々はもっぱらカメラの角度は固定して、連続インターバル撮影をするので、そのようなスイッチの必要性も薄い。

また、2本のスティックのわきにはゼロ点調整のトリムスイッチが4個ついている。GPS制御のマルチコプターの操縦では飛行制御装置が機体を安定化するためトリム操作は殆ど必要ない。そのほかにも液晶画面を使って様々なオプション設定ができる送信機も多いが、我々のマルチコプターの操縦には必要のない機能がほとんどである。

送信機のメーカーは日本では Futaba と JR が有名で、それぞれ6チャンネル程度の下位機種から14チャンネル程度の上位機種までの多くの製品がある。空撮用マルチコプターの操縦には6チャンネルの下位機種で十分で、不必要なスイッチ類がないほうがむしろシンプルで使いやすい。しかし後述するテレメトリ機能はチャンネル数の少ない下位機種には備わっていないことが多い。

我々は、専用のプロポを使う DJI Phantom を除き Hitec 社製の送信機 Aurora9 を主として使用している。この機種は後述するようにオプションで機体に装着した各種センサーのテレメトリができる。特に他の機種ではできない GPS 位置情報の GoogleEarth 上のリアルタイム表示できることが特長である。

2.4 受信機と飛行制御装置

受信機は、機体に搭載されて送信機からの電波を受信し、その情報を機体の制御装置に渡す役目をする。送信機のスティックとレバーの位置に対応する各チャンネルの信号は一般的な受信機の場合、約 $1,500 \pm \text{約 } 500 \mu\text{秒}$ のパルス幅に変換される。ラジコン飛行機ではこれらの信号が直接プロペラを回すモーターのコントローラーや舵を動かすサーボに入力され機体が制御されるが、マルチコプターの場合は受信機の実出力信号は、まず飛行制御装置が受け取る。図7に例として我々の用いている Hitec Optima7 受信機と、DJI Phantom にも用いられている NAZA M 飛行制御装置を示す。

飛行制御装置は、受信機からの操縦信号と、自らに内蔵されたジャイロ・加速度センサー・GPS・地磁気コンパス・気圧高度計等の信号をあわせて処理し、各ローターの回転速度を制御する。図8にマルチコプターの制御信号の流れを示す。マルチコプターの機体、送受信機、飛行制御装置を自分で組立てる場合に必要な配線は、基本的にはこの図にある10本の信号線と電源のみである。コネクタの規格はほぼ統一されている。

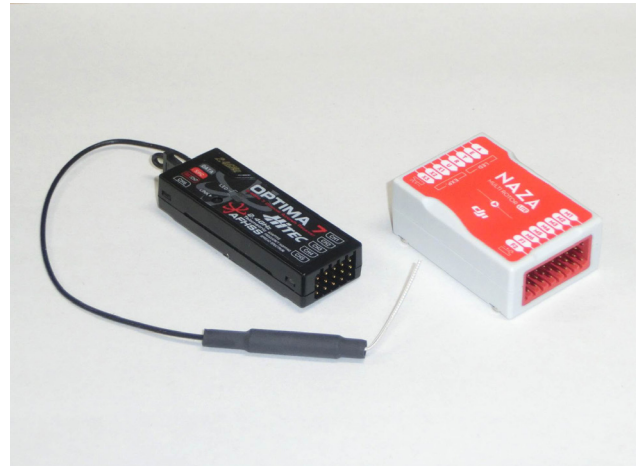


図7 Hitec Optima7 受信機 (左) と DJI NAZA-M 飛行制御装置 (右)

Fig. 7 Hitec Optima7 receiver (left) and DJI NAZA-M flight controller (right), equipped with DJI Phantom.

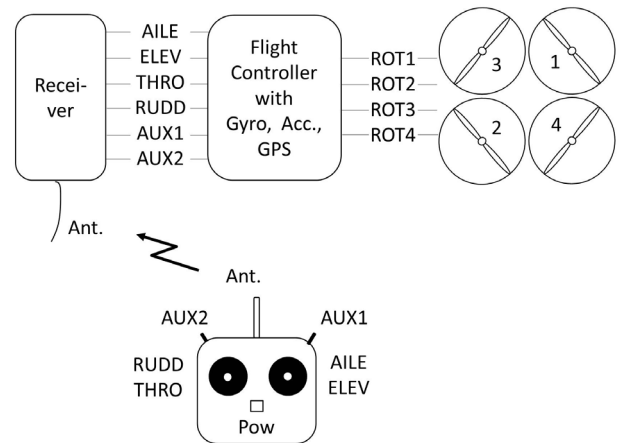


図8 マルチコプターの飛行制御システム
Fig. 8 Multicopter flight control system.

2.5 カメラ

マルチコプター空撮に用いるカメラは、高解像度であることのほか、軽量であること、インターバル静止画撮影ができることが要求される。軽量であれば同じ機体でも飛行時間が長くなり、調査の効率が向上する。インターバル撮影機能があれば離陸から着陸まで一定時間間隔で連続的に写真を撮り続けられればよく、シャッターを押す機構が不要で、軽量化が図れる。メモリーカードの大容量化でこのような連続撮影も可能となった。

我々は地形モデリングを目的とした空撮調査には、高解像度コンパクトデジタルカメラの代表ともいえるリコー GR を、また災害調査を目的とした機

動的な記録写真の撮影には GoPro を用いている (図 9)。リコー GR と GoProHero3 Black Edition の諸元を表 1 に示す。



図 9 リコー GR (左) と GoProHero3 (右)
Fig. 9 Ricoh GR (left) and GoProHero3 (right).

表 1 リコー GR と GoPro Hero3 Black Edition の諸元
Table 1 Specifications of Ricoh GR and GoPro Hero3.

	Ricoh GR	GoProHero3 Black Edition
Resolution	16.9 Mpixel	12.4 Mpixel
Image Sensor	CMOS (3:2) 23.7 × 15.7 mm	CMOS (4:3) 6.3 × 4.7 mm
Angle of view (diagonal)	75 deg	170 deg
Shutter Interval (sec)	1, 2, 5, 10, 15,.. (10+5n)	0.5, 1, 2, 5, 10, 60
Lens f	f2.8	f2.8
Weight incl. bat+card	245 g	73 g
File format	JPEG, RAW	JPEG

リコー GR は大きなイメージセンサーを有し、高画質を追求した仕様となっている一方、GoProHero3 は超広角レンズと軽さがその特長である。どちらもオーバーラップした真下写真を撮影するために十分な速さのインターバル撮影ができる。

ソニーのアクションカム HDR-AS30V は GoProHero3 と同程度に軽量で (90 g)、GPS を搭載しているが、静止画の最小インターバルが 5 秒と少し長い。カメラに搭載された GPS の位置座標は記録写真の整理には便利であるが、写真測量の目的には精度が不十分で使えない。

2.6 撮影高度・飛行速度・インターバル

オルソ画像や詳細地形図作成を目的として複数の航跡で真下写真を撮影する場合、飛行高度と航跡間隔、飛行速度とシャッター間隔を適切に選択する必要がある。リコー GR に代表される 35 mm フィルム換算の焦点距離 28 mm (対角 75 度, 左右 65 度, 上下 46 度) を用いてオーバーラップ率 65 % で撮影する場合の、飛行高度ごとの撮影範囲と撮影距離間隔を表 2 の上半分に、飛行高度と飛行速度ごとの撮影時間間隔を表 2 の下半分に太字で示す。

表 2 飛行高度・速度と撮影間隔 (太字)。焦点距離 28 mm (35 mm フィルム換算), 65 % 重複, 短辺方向に飛行を仮定

Table 2 Shot intervals (bold letters) for various flight heights and flight speeds assuming 28 mm lens (equivalent to 35 mm film size), 65 % overlap, head-forward camera orientation.

Flight height (m)	10	20	50	100	150	
Left-Right size (m)	12.9	25.9	64.7	129.4	194.1	
Front-Back size (m)	8.6	17.1	42.8	85.7	128.5	
L-R shot interval (m)	4.5	9.1	22.6	45.3	67.9	
F-B shot interval (m)	3	6	15	30	45	
Flight Speed (m/s)	2	1.5	3	7.5	15	22.5
	3	1.0	2	5	10	15.0
	4	0.8	1.5	3.8	7.5	11.3
	5	0.6	1.2	3.0	6.0	9.0
	6	0.5	1.0	2.5	5.0	7.5
	7	0.4	0.9	2.1	4.3	6.4
	8	0.4	0.8	1.9	3.8	5.6
	9	0.3	0.7	1.7	3.3	5.0
	10	0.3	0.6	1.5	3.0	4.5

手動で操縦する場合は、決められた航跡間隔や速度を正確に保持することは難しいので、抜けが生じないように、航跡間隔とシャッター間隔の両方をこの表の値の半分程度として飛行させる必要がある。

マルチコプターの標準的な速度は毎秒 5 メートル (分速 300 m, 時速 18 km) 程度のため、1 秒インターバルが可能なカメラならば、ほぼいかなる場合でも十分に狭い撮影間隔が得られるが、5 秒インターバルのカメラ (旧型リコー GR やソニーアクションカム HDR-AS30V) の場合は、50 m 以下の低空での撮影の際は飛行速度を十分落とす必要がある。

GoPro のような超広角カメラの場合は、同じ間隔でも大きなオーバーラップが得られるが、周辺部は歪が大きく解像度も落ちる。したがって写真測量を行う場合は画面中央部のみを切り出して使うことになるため、やはり表 2 に示す 35 mm フィルム換算焦点距離 28 mm レンズの場合のパラメータを採用しておくのが無難である。

2.7 ジンバルとピカベイ

カメラを機体に装着する際、完全に固定してしまうとモーターの振動がカメラに伝わって画像の品質が低下する。デジタルカメラに一般に採用されている CMOS センサーは、画面の一方から他方にイメージを走査するため、被写体が高速で動くとき画面上で変形して見える、いわゆる「ローリングシャッター現象」が生じる。我々の空撮の場合は被写体が高速で動くことはないが、カメラに高速の振動が加わって光軸にブレが生じると、被写体が高速に動くことと等価になる。マルチコプターのモーターは 10,000 rpm (毎秒 167 回) 程度で回転しており、それが百～数百 Hz の機体の振動を励起する。

動画の場合は画面全体が縞状にゆらゆら揺れる「コンニャク現象」あるいは「ジェロ現象」と呼ばれる映像となる。一方静止画では一見目立たないが、画面全体あるいは帯状の部分がひずむ。レンズ特性の補正では解決しないこのようなひずみが画像に含まれると写真測量の結果に誤差となって現れる。これを防ぐためには、モーターによる振動を吸収するために、機体とカメラのマウント機構を柔らかなゴム製のダンパーで接続する。

カメラを機体に固定してしまうことによるもう 1 つの問題は機体の傾きである。マルチコプターの機体は進行方向に傾き、停止時には逆方向に傾く。向かい風が吹いている場合は更に傾く。飛行に伴うこのようなカメラの傾きは、ジャイロセンサーを内蔵した能動的なジンバルで補正することができる。

図 10 に GoProHero3 カメラ用のジンバル、Tarot T-2D の例を示す。ジャイロと加速度センサーによって制御された 2 個のモーターが、カメラの姿勢を常に一定に保つ。ジンバルは 4 個のゴムのダンパーで機体に吊られており、高周波振動が抑制されている。カメラの伏角は自由に設定でき、また送信機による遠隔制御も可能である。



図 10 GoPro Hero3 用 2 軸 ブラシレス ジンバル Tarot T-2D. 機体の姿勢によらず常に真下を向くように設定してある。

Fig. 10 Tarot T-2D two-axis brushless gimbal for GoProHero3, configured to have vertical view angle regardless of multicopter's pitch and roll.

ただし、ジンバルを装着するとペイロードが増加する。Tarot T-2D は 200 g の重量があり、GoProHero の 2 倍以上である。また、カメラの位置が下がるため離着陸時に注意を要する。リコー GR を装着できるジンバルは更に大きく 300 g を超えるため飛行時間が大幅に減ってしまう。重量が増加すると飛行の安定性も損なわれる。映画の撮影のように、人の目にとって美しい映像を撮影するにはジンバルは有効だが、我々の目的は高画質の静止画による地形測量や災害記録であるため、カメラの傾きはさほど影響はない。

そこで我々は重量増加を伴うジンバルの代わりにカイト写真で用いられるピカベイと呼ばれる機構をマルチコプター空撮に応用した。ピカベイは十字に固定した棒の先端に着けた 4 個のリングに糸を通し、それを風の道糸の 2 カ所から吊るす。道糸の傾きが変わっても、カメラは重力で常に一番安定した位置にとどまる。糸の摩擦によって適度に制動がかかり振動も抑制される。マルチコプターに応用した場合は糸の伸縮性によって機体の高周波振動が吸収され、ジェロ現象が抑制される。

図 11 は DJI Phantom に GoProHero2 を装着するために 1 mm 厚のアルミ板と 3 mm 径の小型アイボルトを用いて製作したピカベイである。糸には釣り用のポリエチレン編糸を用いた。摩擦の少ない化学繊維であれば他の材質でもよい。



図 11 GoPro カメラ用ピカベイ
Fig. 11 Picavet for GoPro camera.



図 12 リコー GR 用ピカベイ
Fig. 12 Picavet for Ricoh GR camera.

図 12 は同様にリコー GR 用のピカベイである。もはや固い機構部品はなく、カメラ本体を輪ゴムで巻いて糸とカラビナで吊しただけのシンプルなもの、工作も必要ない。

ピカベイは機体が等速運動をしていれば、機体が傾いてもカメラの向きを一定に保つことができるが、ジャイロで制御されたジンバルと異なり、機体の加減速によるカメラの動きを抑制することはできない。また振り子の復元力が小さく糸の摩擦がゼロではないため等速運動時でもカメラを完全に水平に保つことはできない。このようにピカベイはジンバルに比べると姿勢制御能力は低い、マッピングや災害記録のための静止画撮影には十分であり、軽量さゆえ飛行時間と安定性を犠牲にすることがなく、しかも安価である。

2.8 バッテリー

電動マルチコプターはリポバッテリーを動力として飛行する。我々が空撮調査に用いるクラスのマルチコプターは、3.7 V の起電力を持つセルを直列接続した 3 セル (11.1 V) の電池が使われることが多い。図 13 に容量 2,200 mAh (175 g)、3,300 mAh (275 g)、4,400 mAh (360 g) の 3 セルのリポバッテリーを示す。DJI Phantom は 2,200 mAh の電池のみが本体に装着できるようになっているが、一般的には任意の容量の電池を選択することができる。



図 13 リポバッテリー。いずれも 3 セル 11.1 V、左から 2,200 mAh (175 g)、3,300 mAh (275 g)、4,400 mAh (360 g)

Fig. 13 Lithium polymer (Lipo) battery with 3 cells (11.1 V), 2,200 mAh (175 g), 3,300 mAh (275 g), 4,400 mAh (360 g) from left to right.

図 14 に DJI Phantom の、ペイロードの違いによるバッテリー電圧と飛行時間の関係を示す。いずれも標準の 2,200 mAh のバッテリーを搭載し、満充電電圧 12.5 V で離陸し、直後に 11.5 V 程度まで低下し、11.4 ~ 10.7 V の安定した電圧レベルを経て、その後 10.6 V を下回ると急激に動力が低下して墜落する。リコー GR (240 g) あるいは GoProHero3 とジンバル (合計 280 g) を搭載した場合の墜落時間は約 9 分で、その 80 % もしくは 2 分前の短いほうを安全飛行限界時間とすると約 7 分となる。同様に裸の GoProHero3 (73 g) の場合は約 9.5 分である。ただしこれは無風の条件下の場合であり、一般の場合はそれぞれ約 6 分、約 8 分程度とするのが安全である。

飛行時間は搭載する電池の容量にも大きく依存する。図 15 に DJI F450 にリコー GR を搭載した場合のバッテリー容量と電圧・飛行時間の関係を示す。

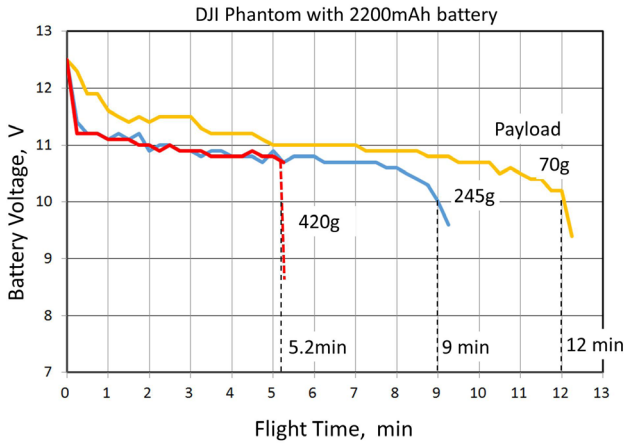


図 14 DJI Phantom のバッテリー電圧・最大飛行時間・ペイロードの関係

Fig. 14 Battery voltage, maximum flight time and payload for DJI Phantom.

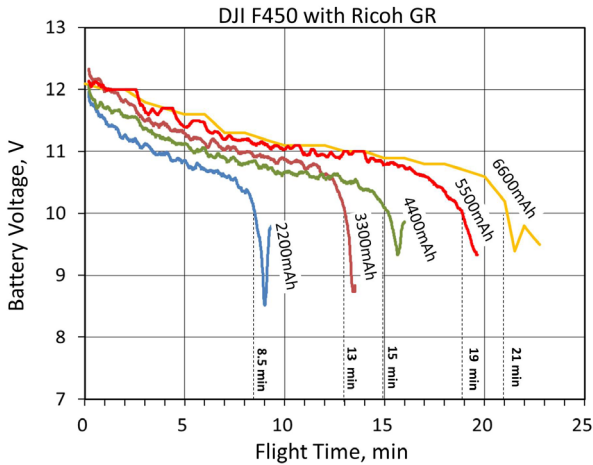


図 15 DJI F450 にリコー GR を搭載した場合の電池容量毎の飛行時間とバッテリー電圧の関係

Fig. 15 Battery voltage vs. flight time with different battery capacities for DJI F450 with Ricoh GR camera.

搭載した 2,200 mAh, 3,300 mAh, 4,400 mAh, 5,500 mAh, 6,600 mAh のリポ電池に対応する墜落時間はそれぞれ 8.5 分, 13 分, 15 分, 19 分, 21 分であった。安全飛行時間はその 80 % もしくは 2 分前の短いほうとして, それぞれ 6.5 分, 10 分, 12 分, 15 分, 17 分である。

電池の容量が大きいほど飛行時間は長い, 重量の増加によって飛行は不安定となる。この図の 5,500 mAh および 6,600 mAh の実験は無風下で実施されたが, 風速 3 ~ 4 m のときは 6,600 mAh の場合は実際には姿勢が不安定で飛行することができなかった。飛行の安定性は飛行時間以上に重要なので, い

たずらに容量の大きなバッテリーを積載して飛行時間を長くするよりも, フライトを複数に分けて軽いバッテリーで飛行させるほうが安全でよい。

バッテリー切れによる墜落事故を防ぐためには, バッテリーの管理が必要である。リポバッテリーは満充電状態や放電状態で保管すると劣化するため, 使用後は, 放電機能を備えた充電器で充電または放電して 11.2 ~ 11.6 V 程度の保管電圧に保つ。使用時はなるべく直前に充電する。充電忘れや放電忘れを防ぐために, 我々は図 16 のようにバッテリーに養生テープを貼り, その形状で充放電状態を区別している。



図 16 テープによるリポバッテリーの充電状態の区別, 上: 満充電, 中: 半充電(保管電圧), 下: 使用済み

Fig. 16 Distinguishing fully charged (top), half-charged for storage (middle) and discharged (bottom) batteries by adhesive tapes.

2.9 テレメトリ

ここまでで, マルチコプター空撮に最低限必要な基本機材を説明したが, より安全で効率的な撮影調査のために有効な機材を以下に紹介する。そのひとつはテレメトリである。テレメトリは機体の様々な情報を地上の操縦者にリアルタイムで送信するシステムであり, 空撮調査の際に特に重要なのはバッテリー電圧と機体の GPS 位置情報である。テレメトリは高級機種を送信機(プロポ)と受信機にオプション機能として備えられている。操縦のための送受信機とは独立したテレメトリシステムも存在する。

前節で述べたようにマルチコプターの最大飛行時間はペイロードと電池容量からおよその値を経験的に知ることができるが, 実際の調査では風の強さ,

バッテリーの使用歴，あるいは，計測ミスなどで想定していた時間より早くバッテリーを使い切ってしまうことがある．そのためバッテリー電圧の監視が不可欠である．目視で電圧低下を確認するための低電圧アラーム LED を機体に装着することも有用だが，機体が遠くへ離れると視認が難しくなるためテレメトリは不可欠である．

もうひとつの有用なテレメトリの情報が GPS 位置情報である．飛行中の機体の位置をリアルタイムで知ることによって，手動操縦であっても撮影すべき地点に正確に機体を誘導することや，安全な経路で機体を飛行させることができる．また万一機体が墜落した場合は機体の捜索が必要になるが，地上からの目視では墜落地点を正確に知ることは難しいのに対し，GPS 位置情報テレメトリがあれば，電波の到達範囲の約 1 km 以下であればピンポイントで機体の墜落地点に到達することができる．

後述する自律飛行の場合，バッテリー電圧低下時に自動帰還あるいは着陸させることができるが，テレメトリが無ければ何が起こったかがすぐに把握できない．また GPS テレメトリがあれば視認の困難な距離を飛行しているときも機体の位置が確認できて安心であり，万一の墜落時の捜索も迅速になる．

我々はテレメトリ機能をオプション機能として有する送受信機の 1 つである Hitec 社製 Aurora9 送受信機および Optima7 受信機を用いている．バッテリー電圧のテレメトリ機能を有する製品は他にもあるが GPS 位置情報のテレメトリが可能な製品はまだ少なく，さらにリアルタイムで地図表示ができるのは，国内で認可されている製品としては，現時点では Hitec 社製品のみである．

Hitec Aurora9 のテレメトリシステムを図 17 に示す．通常の受信機以外に機体に追加して搭載するのは電圧や GPS などのセンサーとテレメトリステーションと呼ばれるユニットのみである．テレメトリ情報は受信機のデータポートに入力され，地上の送信機に送られる．つまり操縦のための「受信機と送信機」は，それぞれテレメトリのための「送信機と受信機」の機能を有している．電圧と GPS テレメトリを行うために機体に追加搭載する装備の重量はわずか約 25 g である．

機体からプロポに送られたデータは，プロポの液晶画面に数字で表示される．バッテリー電圧があら

かじめ指定した値を下回るとプロポ本体からアラーム音が発せられる．また，同じ情報を有線もしくは無線でパソコンの USB ポートに送り，パソコンの画面上でテレメトリデータを確認し，また，パソコン上にログを取ることができる．GPS 位置情報は緯度・経度・標高の他，出発地点からの距離・比高および速度・飛行方位として表示される．さらに，現在の機体の位置を GoogleEarth 地図の上に表示することもできる (図 18)．

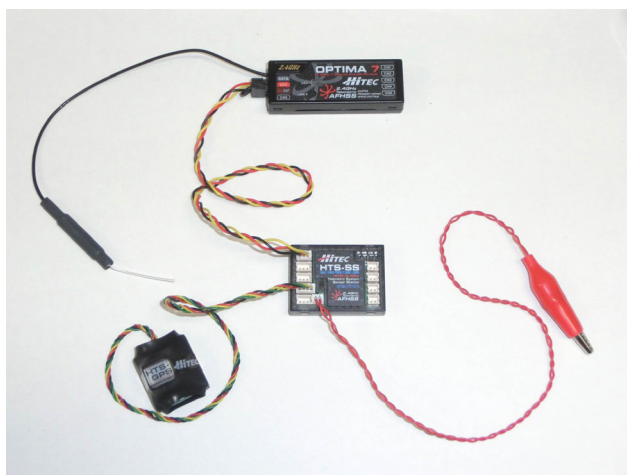


図 17 Hitec Aurora9 テレメトリシステム．GPS (左下)，電圧プローブ (右)，センサステーション (中央)，受信機 (+テレメトリ送信機) (上)

Fig. 17 Hitec Aurola9 telemetry system. GPS (lower left), Sensor Probe (right), SensorStation (middle), Receiver (+telemetry transmitter) (top).

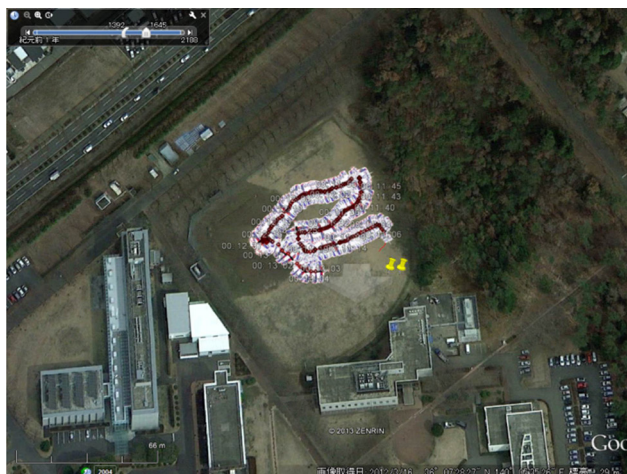


図 18 HitecAurora9 の GPS 位置情報テレメトリの GoogleEarth による表示の例

Fig. 18 GoogleEarth map display of Hitec Aurola9 GPS telemetry.

2.10 FPV

マルチコプター空撮の飛行支援に有用なもうひとつの道具がFPV (First Person's View) と呼ばれるリアルタイム映像伝送装置である。FPV を用いるとパイロット視点で操縦ができるため、遠い地上からの操縦に比べると容易である。特に建物や構造物の被害や斜面災害の撮影など、被写体に近づいて撮影する必要がある場合は、遠隔からでは機体と被写体との距離感がつかみにくく衝突の危険があるが、FPV ならばそのような危険を容易に回避できる。

図 19 は我々がフィリピンにおける空撮調査で用いた FPV システム、FatShark TeleporterV3 である。映像の解像度は 320×200 ピクセル、カメラが 40 g、送信機が 30 g と軽量で、5.8 GHz、250 mW の電波を用い、見通し 200 m 程度まで信号が届く普及タイプの製品である。電源はリポ電池のバランス端子から取る。カメラと送信機の消費電流は約 600 mA と比較的大きいが、機体の消費電流の 10 分の 1 なので問題にはならない。FPV システムの中には、より高解像度で、距離も 1 キロメートル以上届く製品もある。



図 19 FPV システム (FatSharkTeleporterV3) とデモフライトの様子

Fig. 19 FPV system FatSharkTeleporter V3 (left) and a demo flight.

しかし、こういった FPV 製品の殆どは外国製で我が国の電波法の技術適合証明を受けていないため、国内では使用できない。わが国では画像伝送専用割り当てられた 1.2 GHz、1 W までの周波数を用いた本格的な製品はあるが、無線局開設の免許が必要で機材も高価なため、我々の空撮用途には現実的でない。一方 Wi-Fi カメラやスマートフォンによ

る画像伝送も可能だが、伝送距離が短いか遅延が大きいため FPV による操縦には適していない。

ラジコン用ではなく防犯カメラ等の汎用の画像伝送システムは国内向けの製品がいくつかあり、我々はその中の (株) 塚本無線製 WTW-TR23 を FPV として試用した (図 20)。伝送画像データは 720×480 ピクセル、30 fps と十分な解像度と応答で、電波は最大 200 m 程度到達するため、FPV として使用可能である。消費電力は $12 \text{ V} \cdot 0.15 \text{ A}$ と十分に小さい。ビデオ送信機はラジコン機に搭載するように設計されていないため 130 g とやや重い、十分搭載可能な重量である。ただし付属のケーブルは軽量化のために必要最小限の長さに加工する必要がある。



図 20 FPV 用に試用した WTW-TR23 ビデオ画像伝送装置とそれをを用いたデモフライト

Fig. 20 Video transmission system WTW-TR23 for FPV and its demo flight.

我々はこの装置を DJI F450 に搭載して、前方斜め写真撮影用の GoProHero2 のビデオ同時出力を入力・伝送して、地上で受信・表示し、FPV 映像を見ながらの操縦が十分実用になることを確認した。

リコー GR もビデオ信号出力を持っているためこの送信機に接続することができるが、リコー GR の領分である写真測量目的の真下写真撮影では FPV の必要性はあまり高くない。FPV は被害状況の空撮調査により有用である。なお前述のテレメトリと同様の機体の情報を画面に表示する OSD (On Screen Display) 機能を備えた FPV 装置は、さらに便利で、販売もされているが国内で合法的に使える製品かどうかの確認が必要である。

2.11 その他の機材

1) GPS ロガー

災害記録などの空撮調査ではカメラの位置情報が必要になる。GPS 付きのカメラを搭載する場合は自

動的に Exif 情報に記録されるが、我々の用いているリコー GR および GoPro はいずれも GPS は搭載されていない。また DJI Phantom に搭載されている GPS 飛行制御装置はログをとることができない。したがって機体の GPS 位置情報を記録するためには別途 GPS ロガーが必要になる。我々は必要に応じて TranSystem 社製の小型 GPS ロガー PhotoMate 887 (45×25×15 mm, 20 g) を DJI Phantom の機体に張り付けて飛行させている。

2) レーザー距離計

手動操縦の空撮では機体の位置の確認と衝突防止のためにゴルフ用のレーザー距離計が有用である(図 21 左)。レーザー距離計はファインダーで狙った点までの直線距離、水平距離、比高を数字で表示してくれる。機体の後方に山肌や樹木がある場合は、近距離優先・遠距離優先のモードを使い分けることで両方の距離を知ることができる。

ゴルフ用レーザー距離計のカタログ上の最大測定距離は 500 ~ 1,000 m であるが、マルチコプターの機体は 200 m 程度が限界である。しかし機体に反射テープ(3M ダイヤモンドグレード反射シート PV9110N)を張り付けると(図 21 右) 600 m まで測定することが可能となる。600 m は目視操縦の限界距離を超えているので、距離計の性能としては十分である。またレーザー距離計のファインダーは 5 倍前後の倍率をもつため、遠方の機体を視認しやすい。それ以上の倍率のものは逆に機体を見失いやすい。



図 21 ゴルフ用レーザー距離計(左)および DJI Phantom の機体に貼った反射テープ(右)

Fig. 21 Laser range finder(left) and reflector tape on DJI Phantom(right).

3) 予備バッテリーと充電機

調査範囲が広い場合は多くのフライト数が必要になる。1回のフライト時間を 5 ~ 10 分として、準備時間を含めて 15 分程度の間隔で次々に撮影することになる。一方バッテリーの充電は 1 本 1 時間(1C 充電と呼ばれる)が基本なので、予備のバッテリー 4 本と充電器 4 個がないと、充電待ちの時間が生じる。バッテリーは合計 8 本程度あると事前に十分な数の充電済みバッテリーが用意できるため作業効率が上がる。リポバッテリーは、傷つけるなど取り扱いを誤ると発火の危険があるため、不燃材料でできたセーフティバッグに入れる。幸い我々は発火事故の経験はまだない。

送信機に付属のバッテリーは通常ニッケル水素 Ni-MH で、経験的には満充電でも 3 ~ 4 時間程度しか持たない。空撮調査では長時間連続使用することも多いため、送信機にも予備のバッテリーが必要となる。ニッケル水素電池が使われている場合は、容量の大きいリポバッテリーに交換したほうが便利である。ただしリポバッテリーは過放電対策などの管理が必要となる。バッテリーの電圧測定にはテスターよりも専用のバッテリーチェッカーを使うのが便利である。スイッチはなく、バッテリーのバランス端子を挿すだけで、トータルの電圧やセルごとの電圧を表示してくれる。

4) ストップウォッチまたはキッチンタイマー

助手による飛行時間の管理にストップウォッチが必要である。スマートフォンの時計など、時間を計測できるものなら何を利用してもよいが、設定した時間でベルが鳴るキッチンタイマーはシンプルで確実に便利である。

5) 機体収納ケース兼離陸台

マルチコプターの機体はデリケートなので運搬時はハードケースに収納する必要がある。ただで小さなケースに入れるよりも、大きめのケースにたたまずに入れたほうが準備・撤収が早い。ケースの隙間にはプロポ、電池、小物類、工具を入れれば全体の荷物の嵩が増えることはない。専ら車での移動ならば適当な大きさのプラスチックコンテナでもよい。

機体収納ケースは離陸用の台としても便利である。地面からの離陸はプロペラの下降流で機体不安定になりやすく、またプロペラが草にあたった

り、カメラやレンズを傷つけたりする可能性もあるので、台の上から離陸させるのが容易で安全である。一方着陸は、小さな台の上に正確にかつ静かに下すのは難しいので、後述のように助手によるハンドキャッチが安全、かつ効率的である。

6) 機体回収用伸縮ポール

操縦ミスや飛行制御システムのトラブルで機体が樹上に不時着することがある。樹上への墜落では樹木も機体も傷がつくことはないが、機体の回収は困難になるため要注意である。我々は樹上の機体の回収用に長さ 10 m の電気工事用のカーボンファイバー製伸縮ポール「カーボンキャッチャー」を用いている(図 22)。先端に上向きのフックを取り付け、木にひっかかった機体を回収する。長さ 10 m 以上のカーボン製品はなく、仮にあっても重く長いので操作が難しすぎて実用的でない。



図 22 樹上不時着機体回収用の長さ 10 m の伸縮ポール
Fig. 22 10 m long extension rod for retrieving multicopter landed on a tree.

7) 工具・パーツ類

現場での機体の破損や故障修理のために工具一式とパーツ類が必要である。大きな工具は必要ないので、持ち運びの容易な小さな工具カバン程度が便利である。また、バッテリーや補助機材の機体への取り付けや、ちょっとした修理、保護などに、強度と粘着力がほどよい養生テープは非常に重宝する。また小さいタイラップや強力両面テープも用意しておくことで修理等に便利である。

8) 予備機体

空撮調査は安全第一で実施するが、機体のトラブルや墜落事故を完全に防ぐことは難しい。準備した

機体が使えなくなり出直しの調査が必要になると、時間と経費の大きな損失が発生する。そのため予備の機材を用意する必要がある。マルチコプターの価格は現在では調査チームの 1 回の出張旅費と同程度かそれ以下のため、予備を 1 機または 2 機用意することは十分に合理的である。

3. 手動操縦技術

本節では基本となるマルチコプターの手動操縦方法を解説する。GPS 飛行制御装置を搭載したマルチコプターの操縦は容易で、目の前での上昇・下降、ホバリング、前後左右の水平移動は初心者でもすぐにはできるようになる。ただし機体の向きを変えながら自由に遠くまで飛行させ、さらには複雑な地形や障害物、風などの条件下で安全に飛行させるためには相応の訓練を要する。後述する自動操縦の場合でも離着陸は手動操縦が基本である。自動帰還などの様々な飛行支援やフェールセーフ機能があるとはいえ、急激な条件の変化やトラブルに対応して事故なく調査を遂行するためには最低限の手動飛行技術を身に付けておくことが必要である。

以下では初めての飛行になぞらえて基本的な操縦技術を説明するが、後述するように、試験飛行であっても事故防止のために、安全な場所の選択、機体・機材の準備、運用人員の確保、法令の遵守、保険の加入を行い、安全のための条件を整える必要がある。

3.1 基本飛行技術

3.1.1 飛行場所

最初のフライト試験や操縦訓練は、無風または弱風の日、運動場や河川敷などの、十分に広くかつ人のいない場所で行う。土地所有者の許可を得ることは前提である。墜落することもあるので、機体を傷つけないためには芝や草地の空地が理想である。実際の空撮調査でも離着陸にはある程度広さの平らで開けた場所が必要だが、慣れれば狭い場所や平らでない場所でも離着陸が可能になる。

3.1.2 飛行準備

離陸時は機体を地面に水平に置く必要がある。離陸直後は機体が不安定なため、草や石に足が引っ掛かって転倒することがある。平らなマットや台の上から離陸させるとより容易である。

送信機のスロットルスティックを一番下まで下げ(DJI Phantom は中位)、飛行モードのレバーを GPS

にしてから送信機の電源スイッチを入れる。次に機体にリポバッテリーを装着する。その後、通常 1～2 分以内には機体に搭載された GPS 受信機が複数の衛星をとらえ、フライトコントローラがそれを LED で知らせてくれる。

3.1.3 離陸・上昇・下降・ホバリング

はじめてのフライトでは、まずスロットルの上下操作のみで離陸・上昇・下降・ホバリング・着陸を行う。機体を離陸場所に操縦者と同じ向きに置いて、2～3 メートル離れて立つ。プロペラを起動するには左右のスティックを最下位置の左右どちらかに押し付け保持する(この操作は機種に依存)。左手のスロットルスティックをゆっくり上げるとプロペラの回転が徐々に早まり、やがて機体は地面を離れて上昇を始める。離陸の瞬間は足と地面との摩擦、および自らのプロペラが起こす乱気流とで姿勢が不安定となりやすいため、機体が浮き始めたらスロットルは思い切って上げるほうがスムーズに離陸できる。スロットルを中位に保てばその場でホバリングする(図 23)。スロットルを上げ続ければ上昇を続け、下げれば下降する。飛行モードが GPS (後述の ArduCopter の場合は Loiter) になっていれば水平位置も高度も安定している。



図 23 ホバリングの練習
Fig. 23 Practicing hovering.

3.1.4 着陸

ホバリングの状態からスロットルを少し下げてゆっくり下降させれば機体は着陸する。着陸したらプロペラを停止させるためにスロットルを下まで下げ、さらにモーターのスイッチを切るための操作をする(機種に依存)。離陸に比べると着陸は少し難し

く練習が必要である。広い草地ならばどこに着陸してもよいが、実際の調査現場は不整地に降ろすと機体に吊り下げたカメラやレンズが傷ついたり、転倒して機体やプロペラを損傷する恐れがある。そのため我々は通常着陸は、助手によるハンドキャッチを採用している(図 24)。なお離陸は任意の場所を選べることで、機体が水平でないとモーターが起動しないこと、不用意にプロペラが回ると危険なこと等から、水平に置いたマットや箱の上から離陸させるほうがよい。



図 24 マルチコプターのハンドキャッチ(伊豆大島地すべり地)

Fig. 24 Hand catch of multicopter (at Izu Oshima landslide).

3.1.5 左右回転(ラダー)

次は機体の向きを左右に振るラダー(左手左右)である。ラダーを使って前進しながら縦横に飛び回るのはまだ先のステップで、まずホバリング状態で機体の向きを任意に変えることだけを練習する。マルチコプターは次に解説するように、前後左右への平行移動と停止は、モード 2 の場合は右手一本で簡単にでき、飛行機のように前進で向きを変えながら飛ぶよりも簡単に自由に空を移動できる。ただし、簡単なのは機体が自分と同じ前を向いているときであり、そうでないとスティックの動きと機体の動きが一致せず、操縦は難しくなる。ラダーの操作をここで最初に覚える目的は、変わってしまった機体の向きを自分と同じ前向きに戻し並行移動の操縦を容易にすることである。

機体の左右回転だけの操作は簡単で、ホバリングの状態ではラダーを右に打てば右回転、左に打てば左

回転する。ラダー操作のコツは、機体の現在の向きには関係なく「機体の向う側(＝自分から遠い側)をラダーのスティックで回す」という感覚で操作することである。この感覚に慣れると後で説明するように自由自在に前進で飛行することができるようになる。

マルチコプターはテールローターのある普通のヘリと異なり、形が対称形なので機体の向きが分かりにくい。機体の色やLEDライトによって、向きを区別している機種もあるが、操縦者から離れると識別も難しくなる。機体を前後左右いずれかに大きく移動させれば、動きの方向から機体の向きが判断できるが、障害物に接近している場合はそれも難しい。機体の向きをわかりやすくするには「テールフラッグ」が有効である(図25)。我々は、重量の増加と空気抵抗の増加を抑えるために、細いアルミパイプと6センチ幅の赤い粘着紙テープを用いている。



図 25 遠方から機体の向きを認識するためのテールフラッグ

Fig. 25 Tail flag to identify heading direction from distances.

3.1.6 水平移動

離着陸・ホバリング・左右回転を習得した次は、並行移動である。まずホバリング状態でラダーを使って機体を自分と同じ前向きにする。その状態で右スティックを右に倒せば機体は右に、左へ倒せば左に、前へ倒せば前に、後ろに倒せば後ろに移動する。

最初は狭い範囲を高度数メートル以下で自由に移動できるようになるまで練習する。風の影響やラダースティックに触れてしまうなどして機体の向きが変わるので、常に機体が自分と同じ方向を向くようにラダーを調節する。慣れたらだんだんに高度や距離を大きくして練習する。

写真測量目的でもつばら真下写真を撮影する場合は、こうして最初から最後まで機体の向きを変えずに調査領域の上を前後左右に飛行すればよい。後述する伊豆大島の地すべり調査の例ではこのような方法で撮影した。

3.1.7 前進飛行

一方、被害写真や急傾斜の地すべりを記録するような場合はカメラを前方に向けて斜め写真を撮ることが多くなるので、機体の向きを変えながら前進で飛行する技術が必要となる。前進飛行の操縦を自動車の運転に例えると、アクセルとブレーキはエレベータ(右手の上下)、ハンドルはラダー(左手の左右)になる。自分が機体に乗って操作するわけではないのでラダーの操作は若干難しく、特に機体と自分とが対面している場合はラダーを打つ方向と機体が向く方向が逆になり混乱する。しかし、先に紹介したように「機体の向う側をラダーのスティックで回す」という感覚で機体を操作すると混乱しない。エレベータ(右手上下)は機体の前後移動というより、アクセルとブレーキと思えばよい。この感覚に慣れると前進飛行も容易になり、右手だけによる並行移動と同じ程度に操縦しやすくなる。



図 26 ラダー操作による前進飛行

Fig. 26 Rudder control for forward flight.

3.2 フライトモード

ここまでは、GPS制御による安定したフライトモードを仮定して操縦を解説した。GPSフライトコントローラを装備したマルチコプターは、そのほかマニュアル操縦モード(DJIではAttitude mode, ArduCopterではStabilized mode)、機体の向きに依

らない操縦を可能にする飛行モード (DJI では Home Lock/ Course Lock, APM では Simple mode, Super Simple Mode)がある。

3.2.1 マニュアルモード

このモードは、操縦者の指の動きに機体が最も敏感に反応するモードで最高速度も大きい。マニュアルといっても、GPS による位置補正には依存しないというだけであり、加速度センサーとジャイロによって機体の姿勢は常に安定化されている。それゆえ DJI では Attitude (飛行姿勢) モード, APM では Stabilized (安定化) モードと呼ばれている。

マニュアルモードが必要になるのは、飛行中に GPS 受信状態が悪化した場合と、何らかの理由で高速な移動・離着陸が必要な場合である。マニュアルモードでは機体の姿勢は安定しているが、位置を保持する機構がないので、風が強いときは操作が難しい。筆者らは自律飛行時や GPS モードの飛行時に、GPS 信号をロストして機体の挙動が不安定になり、マニュアルモードで機体を安全な場所へ移動させる必要が生じた経験が何度かある。

3.2.2 機体の向きに依らない飛行モード

これは機体がどちらを向いていても右手 (エルロンとエレベータ) スティックの決まった方向の操作で機体はその方向に移動する飛行モードである。

DJI Phantom (NAZA) の Home Lock および APM の Super Simple Mode は機体の移動方向は起点 (通常は離陸点) を中心とした極座標で決まる。すなわち、例えばエルロン (右手) を右へ倒し続ければ自分の周りを右方向にぐるぐる回り、エレベータ (右手) を手前へ倒せばどこからでも自分の方に戻ってくる。このモードは空撮調査では帰還時に機体の向きが分からなくなったときに便利であるが、その場合は後述する自動帰還モードのほうが更に簡便である。

DJI Phantom (NAZA) の Course Lock と APM の Simple Mode は、その時の機体の向きによらず、起点で記憶した機体の方位に固定された直角座標で飛行してくれるモードである。この飛行モードは長方形領域をスキャンして撮影したり、斜面の走向に沿って撮影したりする場合に有用である。ただし長方形領域をスキャンする撮影には後述のオートパイロットのほうが更に有用である。

3.3 自動帰還

非常時に機体を離陸場所に自動的に帰還させるのが自動帰還モードである。このモードは DJI では GoHome, Arducopter では RTL (ReturnToLaunch) と呼ばれ、スイッチ 1 つで離陸地点 (正確には電源投入後最初に GPS 位置座標が得られた地点) に自動帰還してくれる。プロポの電源スイッチを切ることで自動帰還が起動される。遠くへ飛ばしすぎてプロポの電波が届かなくなった場合も自動帰還モードに切り替わる。自動帰還モードに入ると、障害物を避けるために、まずその場で上昇して、そこから離陸地点の上空までゆっくり戻り、その後、下降・着陸する。帰還位置の誤差は経験的に 2～3 メートル以下である。

遠くへ飛ばしすぎたり見失ったりして操作ができなくなった場合や、混乱して操作が分からなくなってしまった場合などにこの機能は有用で、墜落事故や機体を失う危険性を大幅に減らすことができる。この機能のおかげで初心者もマルチコプターを安心して飛ばせると言っても過言ではない。

3.4 FPV を使った操縦

先に述べたように、建物被害調査のような、被写体に接近する必要がある撮影や、機体を遠方に飛ばす必要がある撮影では FPV が有効である。FPV のカメラは常に機体の前方を見ているため、前進で進む限りは障害物への衝突は未然に防ぐことができる。地上からの操縦では機体が対面すると逆舵になって操縦が難しいが、FPV ではそのようなことはなく、地上から機体を見て操縦するよりもずっと容易である (図 27)。



図 27 FPV による飛行実験 (図 19, 20 再掲)
Fig. 27 FPV flight test (same as Fig.19 and 20).

FPV の難点の 1 つは視野が狭いことである。広角レンズのカメラであっても、基本的には前しか見えないので横への移動や後ろへの移動は危険である。離着陸は FPV でなく目視飛行が安全である。離陸後、ある程度高度が上がったところで目視から FPV に切り替える。その後は電波の届く範囲であれば FPV で自由に飛び回ることができる。

FPV のもう 1 つの欠点は、操縦者と機体との空間的位置関係が分からなくなりやすいことである。そのため全体の地形や街並みをよく把握することが重要で、現在地が分からなくなったら一度高く上昇して周囲を見渡すことも必要となる。いよいよわからなくなったら無理をせずに自動帰還させたほうがよい。

3.5 シミュレーターとトイラジコンによる訓練

マルチコプターは GPS による飛行制御システムのおかげで初心者でも容易に飛ばせるようになったとはいえ、空撮調査に適用するためには一定の練習を積んで手動操縦技術を身に付ける必要がある。実際の調査現場は、運動場とは異なり、狭かったり障害物があったり風が強かったりする。操縦者のミスも含めてさまざまな障害が待ち受けており、十分な技術がないと少しの障害で操縦困難となり事故を起こすことになる。そのためには繰り返しの操縦練習は不可欠であるが、実機を用いて飛行訓練を行うと、広い運動グラウンドであっても墜落で機体を損傷する可能性が高い。しかし衝突や墜落を恐れずに思い切り飛ばすことは上達への早道でもあり、それを可能にする道具がシミュレーターとトイラジコンである。

3.5.1 シミュレーター

ラジコンヘリや飛行機は、まずパソコンの上で動くシミュレーターで練習するのが常道になっている。シミュレータでは USB 接続の専用プロポを操作してパソコン画面上を飛ぶ機体を操縦する。ソフトウェアには、無料のものも含めて色々なものが出回っているが、マルチコプター空撮のために我々が用いているのは HELI-X (www.heli-x.net, 50 ユーロ) である。シミュレーターには一般にいろいろな機体が用意されているが Heli-X は DJI Phantom を選ぶことができる。見た目は本物の Phantom とそっくりで飛び方もかなり本物に近い(図 28)。

飛行する場所には、何も無い草原や障害物の多い



図 28 シミュレータ (Heli-X) の画面(上)と USB コントローラー(下右)

Fig. 28 Simulator (Heli-X) screen (top) and the USB controller (bottom right).

市街地などいろいろな環境を選ぶことができる。離着陸台や障害物なども置ける。風速や風の乱れ方の指定など条件を色々変えての練習が可能である。地上に固定された視点だけでなく操縦席や機体を背後から追いかける視点も選ぶことができ、スティックの動きに応じた機体の動きを理解する助けとなる。シミュレーターを使って訓練を重ね、調査の現場では墜落させることなく操縦できるようになることは調査の安全性・効率・経済性のために重要である。

3.5.2 トイラジコン

手のひらに乗る小さなマルチコプターが玩具店で売られており、これも操縦の練習に用いることができる。我々が用いている童友社のスパイダーという製品(図 29)は対角ローター軸間 9 センチメートル、3.7V 240 mAh のリポバッテリーで 5 分以上飛行する。ジャイロと加速度センサーが搭載されており、



図 29 練習用小型マルチコプター(童友社スパイダー)

Fig. 29 Toy multicopter (Doyusha Spider) for practice.

本物と同様にモード 2 の 2 本のスティック操作で飛行させる。慣れれば狭い室内で飛ばすことも可能であるが、練習は広い体育館や屋外がよい。プロペラガードを付けると物に衝突しても壊れにくく、人にも安全である。

トイラジコンには GPS と気圧高度計・コンパスは装備されていないので、飛行安定性は本物のマルチコプターには及ばない。したがってトイラジコンを自由に操縦できるようになれば本物のマルチコプターの操縦もできると言える。

4. 自律航行システム

目視・手動操縦によるマルチコプターの飛行範囲は半径 300 m 程度が限界で、それ以上の距離になると操縦者による機体の視認も助手による距離・比高測定も難しくなる。操縦が困難になると墜落事故も起きやすい。またオルソ画像・地形図・DSM 作成目的の空撮では、なるべく等間隔で平行な航跡に沿って定められた速度で飛行させることが作業効率の点で望ましいが、手動操縦ではそれは難しい。GPS 位置情報を用いた自律航行（オートパイロット）システムがそれらの問題を解決する。

4.1 ArduCopter

現在、国内外のいろいろな UAV メーカーが GPS 自律航行機能を持ったフライトコントローラーと、それを搭載したマルチコプターを開発・製造・販売しているが、我々は米国 3DRobotics 社の APM 2.6 (図 30) を搭載した自律航行マルチコプター (ArduCopter) を空撮調査に使用している。

APM フライトコントローラーは、DIY Drones という、個人が利用できる UAV の開発を目指すエンジニアのコミュニティが、Arduino というオープンソースのマイクロコントローラーを用いて製作している自律航行システムで、マルチコプター・飛行機・四輪車を、あらかじめ設定したルート (Waypoint) で飛行・走行させたり遠隔制御したりするための装置である。

APM は「2.4 受信機と飛行制御装置」の図 8 で説明した、マルチコプターの構成要素の中の飛行制御装置の部分であり、基本的には手動操縦のマルチコプターでも飛行制御装置を APM に載せ替えれば自律航行システムになる。

APM を組み込む際の各種設定や、APM に

Waypoint をはじめとする飛行パラメタを覚えさせたり、飛行ログを取り出したりするには、同じく DIY Drone コミュニティーが開発した Mission Planner というフリーソフトウェアを使う。Mission Planner は Ardupilot のホームページ (<http://ardupilot.com/downloads/>) からダウンロードしてインストールすることができる。

APM を搭載したマルチコプターは完成品、あるいは組み立て用のパーツとして市販されている。プロポも含めた完成品機体をそれらのショップから購入する方法と、機体、送受信機、APM を別々に購入して自分で組み立て調整をする方法の 2 通りを選べる。

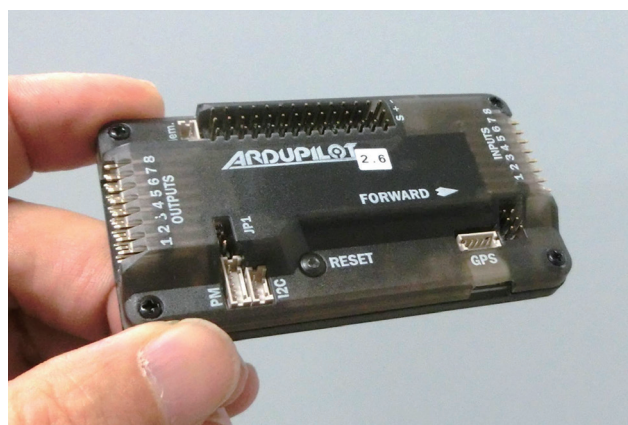


図 30 APM 2.6 フライトコントローラー
Fig. 30 APM 2.6 Flight controller.

APM の最新バージョンは 2.6 で、これ以上のアップデートは無く、今後は、より高速の CPU を用いた多機能のフライトコントローラーである Pixhawk に徐々に移行していくようであるが、本稿では現在もっとも多く使われていて、かつ我々が使用経験を積んでいる APM についてのみ説明する。

4.2 APM の組み込み

ここでは APM の機体への組み込みとプロポ・機体の調整の概要を説明する。組み込み済みの完成品を購入する場合はこの作業は必要ないが、この工程を理解することによって、現場での迅速なメンテナンスが可能となり、経済性も高まる。

接続が必要な信号線は APM への受信機からの入力、プロペラを駆動するアンプへの出力、外付 GPS・コンパスユニットからの入力である。そのほか各種センサーの入力とテレメトリー用無線機のインターフェースがあるが、ここでは使用しない(図 31)。

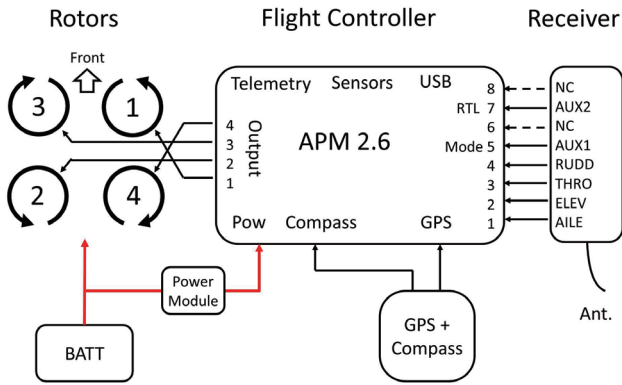


図 31 APM フライトコントローラーの接続
Fig. 31 Connection of APM flight controller.

APM と受信機およびアンプとの接続には一般的な 3 芯のラジコン用サーボケーブルを用いる。受信機のエルロン、エレベータ、スロットル、ラダーを APM の Input 1, 2, 3, 4 にそれぞれ接続し、プロポのスイッチのうち飛行モードの切り替えに使う受信機のチャンネルを APM の Input 5 に、自動帰還に使うスイッチに対応するチャンネルを APM の Input 7 に接続する。

APM の Output 1, 2, 3, 4 はそれぞれ機体の右前、左後、左前、右後のプロペラのアンプに接続する。APM の電源は、リポに接続されたパワーモジュールから供給される。受信機の電源は APM から供給する。APM の Input の電源ピンおよび受信機の出力の電源ピンはいずれも共通なので最低どれか 1 つのチャンネルで接続されていればよい。

図 32 にこうして接続した APM と受信機、電源ユニットを示す。分かりやすいように手前側の 2 本の腕とトップカバーは外してある。ここでは Hitec Optima7 受信機にテレメトリーステーションも接続されている。図 33 はトップカバーの上に取り付けられた APM 2.6 用の GPS・コンパスユニットと、Hitec のテレメトリー用の GPS センサーである。モーターの駆動電流が磁気センサー(コンパス)に影響を与えないように、GPS・コンパスユニットは、もっと高い位置に固定するほうが、より望ましい。

APM 飛行制御装置に過大な加速度が加わると、内蔵された加速度計に誤差が生じて飛行が不安定になることがある。APM 本体の機体への取り付けには、高周波振動を減衰させるためにダンパーを敷く必要がある。筆者らは厚さ 1 cm の固めのスポンジをダンパーに用いている。

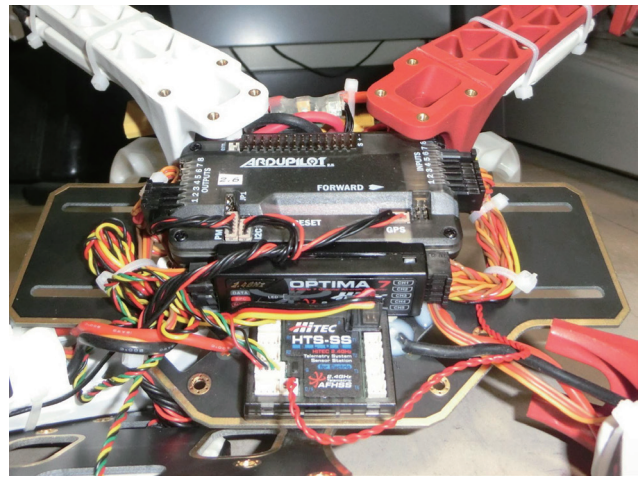


図 32 DJI F450 に組み込まれた APM2.6 フライトコントローラ、Hitec Optima7 受信機、Hitec HTS-SS テレメトリーステーション(手前の腕 2 本とトップカバーを外したところ)

Fig. 32 APM 2.6 Flight controller, Hitec Optima7 Receiver, and Hitec HTS-SS telemetry station equipped on DJI F450. Near side two arms and the top cover are detached.

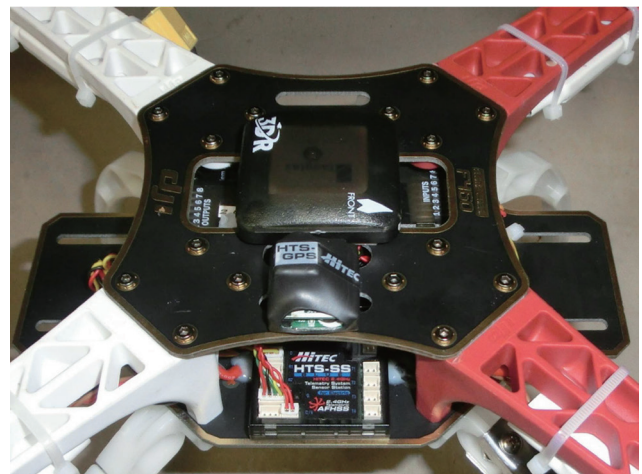


図 33 DJI F450 のトップカバー上の APM2.6 用 GPS・コンパス(中央)と Hitec HIS-GPS ユニット(手前)
Fig. 33 GPS and compass unit (center) and Hitec HTS-GPS sensor (near side) on the top cover of DJI F450.

受信機の AUX チャンネルとプロポのスイッチの割り当ては、プロポのマニュアルに従ってプロポを操作することによって行う。フライトモードの選択には 3 ポジションのスイッチを割り当てる必要がある。どのスイッチが 3 ポジションスイッチかはプロポの機種に依存する。図 34 にはフライトモード変更と自動帰還を 2 つのスイッチのそれぞれに割り当てた Hitec Aurora9 のプロポを示す。

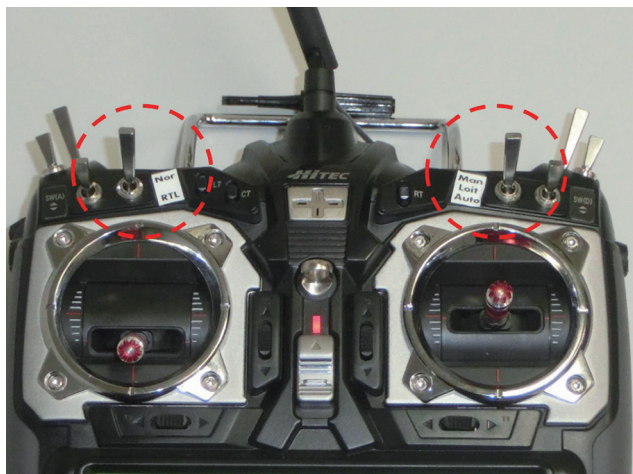


図 34 自動帰還 (RTL) およびフライトモードスイッチとそれらのラベル

Fig. 34 RTL (ReturnToLaunch) and Flight mode switches and their labels.

以上の準備ができたら APM とパソコンを USB ケーブルで接続し、MissionPlanner を起動する。FLIGHT DATA 画面を表示して(図 35)、右上の Connect ボタンを押すと、APM との通信が始まり接続される。機体を持ったときに画面左上の水平線表示が機体の動きに合わせて動けば正常である。機体の水平を表示しているツールは Attitude Director Indicator(ADI)と呼ばれる。

APM の GPS 受信機が正常に働いていれば、GoogleEarth 地図上に機体を示すマルチコプターのアイコンが表示され、機体を回すとアイコンもそれに合わせて回転する。なお GoogleEarth 画面を表示するために PC はインターネットに接続されている必要があるが、インターネットが使えない環境でも



図 35 MissionPlanner の FLIGHT DATA 画面
Fig. 35 FLIGHT DATA screen of Mission Planner.

動作させるために、GoogleEarth の地図データを一時的にダウンロードして保持する Fetch 機能がある。

次に Mission Planner の Initial Setup メニューで最新のファームウェアを機体にインストールする。4 ローター、6 ローター等、自分の機体に合わせたファームウェアを選択する。続いて Mission Planner のウィザードに従って、APM の加速度センサーとコンパスのキャリブレーションを行う。次にプロポのスティックとスイッチのキャリブレーション、スロットルフェイルセーフとバッテリーフェイルセーフの設定、フライトモード (Stabilized, Loiter, Auto) のスイッチへの割り当て、自動帰還 (RTL) のスイッチへの割り当てを行う(図 36)。



図 36 MissionPlanner の Radio Calibration 画面
Fig. 36 Radio Calibration screen of Mission Planner.

スロットルフェイルセーフとは、通信が途切れた場合に自動帰還または着陸させる機能である。この機能を設定しておかないと、通信エリア外へ飛び続けて墜落や衝突事故を引き起こしたり、機体を失ったりすることになる。設定は、プロポ側のスロットルフェイルセーフ機能で、通信断絶時の受信機のスロットル値をレバー最下位置の値よりさらに下げた値に設定し、次に APM のスロットルフェイルセーフを、それらの間の値に設定する。なお通信が途切れるほどの遠距離 (1 km 以上) まで自律飛行させる場合は、スロットルフェイルセーフ機能をオフに設定する必要がある。さもないと、プロポとの通信断絶によってスロットルフェイルセーフが働き、ミッションの途中で帰還してしまう。ただし、現在の我々のマルチコプター空撮調査では、そのような遠距離に機体を飛行させる使い方はしていない。

バッテリーフェイルセーフは機体の電源電圧が下がった場合に自動帰還または着陸させる機能で、安

全のため3セルのリポ電池ならば余裕をみて10.6V以上に設定する。遠くまで飛行するミッション、パイロードが大きい場合、風が強い場合などは、安全を見てさらに高い値をフェイルセーフ電圧に設定する必要がある。

次にプロペラの回転方向を確認する。リポを接続してスロットルスティックを右下端に5秒間保持すると赤色LEDの点滅が点灯に変わり準備完了(Armed)となって、ローターが回り出す。最初の飛行の時はこの時点でローターの回転方向を確認する。右前と左後ろが左回転で左前と右後ろが右回転ならば正常である。次にスロットルスティックを左下に5秒間保持して終了する(Disarm)。逆回りのローターがあったらモーターの結線3本のうちのいずれか2本を入れ替えれば正しい回転方向となる。

次に飛行試験を行う。安全のための注意事項や離陸までの手順は基本的には手動操縦の場合と同じである。トラブルに備えて慎重に離陸させ、飛行モード切り替えスイッチを操作してStabilized(マニュアル)モードとLoiter(GPS)モードの両方で手動操縦機能を確認する。RTL(自動帰還)スイッチおよび電源スイッチでフェイルセーフ機能を確認する。

手動操縦のマルチコプターとしてのチェックは以上で完了である。

4.3 フライトプランの作成

フライトプランの作成は、MissionPlannerのFLIGHT PLAN画面で行う。プラン作成時には機体のAPMがPCに接続されている必要はない。APMはミッションの書き込み時に接続されていればよい。MissionPlannerには非常に多くの機能があるがここでは前節と同様に、我々の空撮調査に最低限必要な基本的な機能と注意点のみを述べる。

フライトプラン画面にはGoogleEarth地図が表示されている。まず調査対象領域を地図に表示する。もしHomeと名付けられたピンが遠方にあったら、調査対象領域の中まで手で移動する。次に機体を離陸させる地点を選んで、そこにHomeを移動する。次に、地図上をクリックしてWaypointを順番に設置し、飛行経路を作る。設定したWaypointの移動・削除・追加も簡単にできる。

図37はつくば市の防災科学技術研究所の野球グラウンドに設定された、4角形のルートを飛行するミッションの例である。デフォルトの高さ(Homeか

らの相対高度)は20mで、20m上空で閉じた四角形を描くようにWaypoint1とWaypoint5をHomeの近くに設定してある。もしWaypoint1とWaypoint5を省略すると、Homeから斜めにWaypoint2に行き、Waypoint4で終わって停止するミッションとなる。



図 37 MissionPlanner の FLIGHT PLAN 画面。四角形のテスト用ミッション

Fig. 37 FLIGHT PLAN screen of Mission Planner. Square mission for test flight.

画面の一番下の緑色のバーの上端を持ち上げるとWaypointリストが表示され、Waypointごとの緯度経度・高度・傾斜・上昇角・距離を知ることができる。高度は一点一点あるいは一括で変更することができる。デフォルトの高度も変更できる。飛行速度はデフォルトで5m/s(300m/min)に設定されているが、目指すWaypoint付近に近づくと減速するため、実際の平均速度は設定値以下になる。画面左上には総距離が表示されており、事前に機体の最大飛行距離を把握しておくことにより、安全に飛行可能なプラン(飛行距離)かどうかの確認ができる。

飛行高度はAPMに内蔵されている気圧高度計の情報で制御される。起伏の多い場所で飛行させるときは、地形図もしくはレーザー測距機等による実測を元に、Waypointの比高を適切な飛行高度になるように設定する。MissionPlannerのVerifyHeightオプションを選択しておくともHomeを基準としたGoogleEarthの比高が各Waypointに加算されるので地形に沿った飛行が可能となる。ただし現状ではGoogleEarthの標高の誤差は数メートルから、場合によっては山地では数十メートルに及ぶことがあるので注意を要する。

作成したミッションを APM に記憶させるためには、APM を PC に接続した状態で WriteWP (Waypoints) ボタンを押す。次に確かに記憶されているかどうかを確認するために、一度 MissionPlanner 画面で ClearMission して(右クリックメニュー)、AMP から ReadWP でミッションを読み出して表示する。作成したミッションはテキストファイルまたは kml ファイルとして PC 上に保存できる。

4.4 自動 Waypoint 生成

写真測量を目的とした真下写真の撮影では、対象領域全体を撮影画像のオーバーラップ率を維持しながら、かつできるだけ無駄なく撮影する必要がある。多くの Waypoint を正確に手で設定するのは難しく、手間もかかる。MissionPlanner には写真調査用の飛行ルートを生効率よく自動的に作成する AutoWaypoint 機能がある。

まず準備として自分の用いるカメラの情報(焦点距離、イメージセンサーのサイズ、ピクセル数・他を事前に登録する。次に地図上で対象領域のポリゴンを作成し、登録したカメラ名と向き・飛行高度・飛行方位・縦横それぞれのオーバーラップ率を指定すると、自動的に Waypoints を生成してくれる(図 38)。画面の下には面積・総距離・撮影距離間隔・分解能・撮影枚数・セクションの数・フットプリントのサイズ・セクション間距離がその都度表示される。画像のフットプリントも確認できる(図 39)。

4.5 フライトプランによる飛行

次に作成して書き込んだフライトプランに沿って飛行させる。機体を Home の位置に置いて、電源を入れ、GPS のロックを待って Arm する。機体を手動の Stabilized または Loiter モードで離陸させ安定性を確認する。次に Auto に切り替えると自律飛行が始まる。Auto になるとまず Waypoint1 に向かい、Waypoint ごとに向きを変えて順番に飛行して、最後の Waypoint で停止する。ここで手動操縦に切り替えて着陸させる。

自律飛行ミッションを何らかの理由で中断したい場合はプロポのスイッチを Auto から手動操縦に切り替える。一旦切り替えるとミッションはクリアされ、再度 Auto に切り替えると Waypoint1 からの飛行が開始される。

4.6 フライトログ

APM は飛行中に様々な情報のログを内部のメモ



図 38 写真調査用自動 Waypoint 生成機能
Fig. 38 Auto Waypoint generation for photo survey.

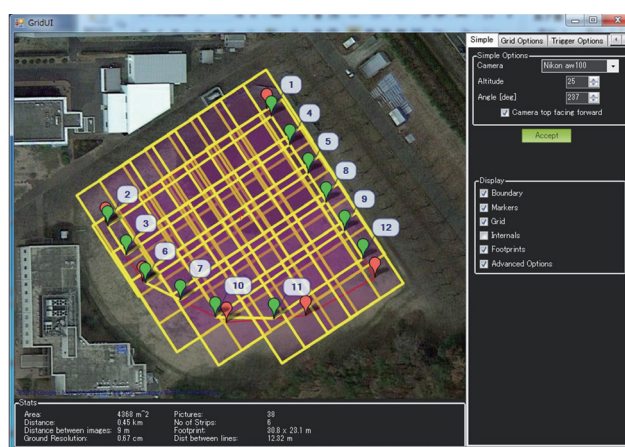


図 39 自動 Waypoint による画像のフットプリントの確認
Fig. 39 Confirmation of photo footprint by AutoWaypoints.

リーに記録する。記録されたログは MissionPlanner の Terminal メニューを用いて、ダウンロードできる。航跡は kml ファイルとして記録され、GoogleEarth で表示することができる(図 40)。ログは MissionPlanner で表示でき、またテキストファイルとして保存されるため、エクセル等を用いて解析することができる(図 41)。

4.7 その他の機能

上記の例では離陸と着陸は手動で行ったが、これを Mission の中に含めて自動で行うこともできる。図 42 は Waypoint1 の前と最後の Waypoint6 の後にそれぞれ離陸(TAKEOFF)と着陸(LAND)の命令を挿入したものである。これにより、Arm 後に飛行モードを Auto に切り替えると機体は離陸し、最後の Waypoint に到着後、着陸する。この自動離着陸により、更なる調査の簡便化が進むことが期待される

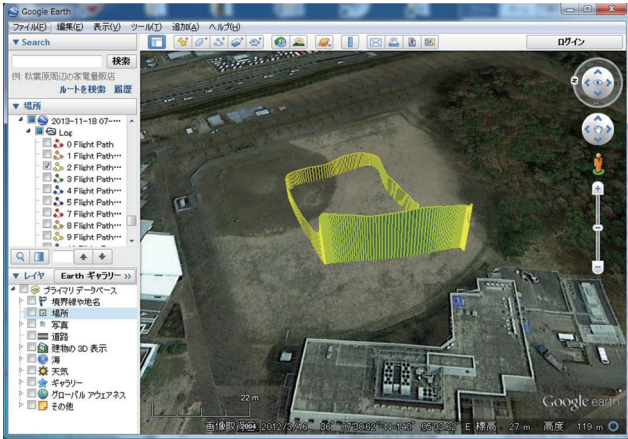


図 40 飛行後 APM からダウンロードした航跡の kml ファイル GoogleEarth 上の表示

Fig. 40 GoogleEarth plot of a downloaded kml file from APM after a flight.

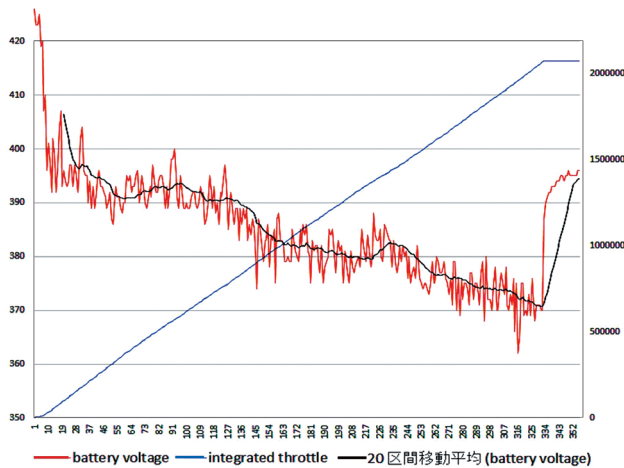


図 41 APM ミッションログの解析例(電源電圧)

Fig. 41 Example of APM mission log (battery voltage).

が、着陸は状況の変化に対応するために、少なくとも一時停止・再開をプロポから指示できる必要がある。現時点では着陸は手動操縦のほうが安全である。

フライトプランにはその他にも様々な命令を埋め込むことができる。インターバル連続撮影では、Config メニューの初期パラメタ設定における WPNAV_SPEED, および Waypoints 設定における DO_CHANGE_SPEED コマンドで飛行速度を変更することでオーバーラップ率の調節を行う。飛行速度はデフォルトで秒速 5 m (分速 300 m, 時速 18 km) であるが、1 秒間隔で撮影できるリコー GR や GoPro を使用する場合は、撮影範囲が 50 m 四方より狭い場合や飛行高度が 20 m 以下の場合以外は秒速 10 m 程度で飛行させたほうが撮影能率が上がる。そのほか飛行中に機体を一定方位または一点に向け

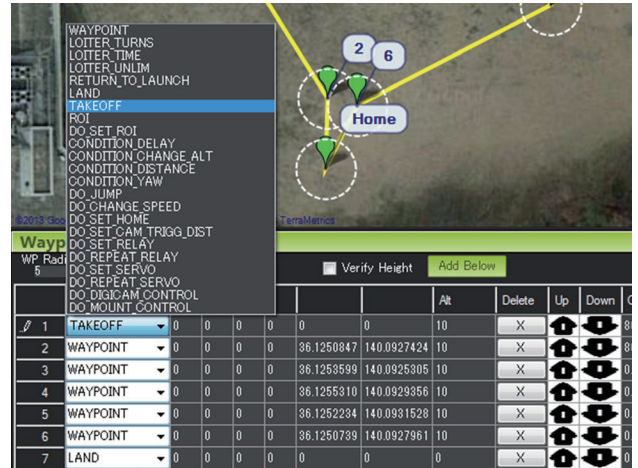


図 42 自動離陸と自動着陸の設定

Fig. 42 Auto take off and auto landing mission.

る機能 DO_SET_ROI, 遠方まで飛ぶミッションで非常帰還場所を変更するための DO_SET_HOME 機能なども用意されている。

Mission Planner はミッションの設定だけでなく、先に説明した操縦システムの各種パラメタの設定、フライアウェイを防ぐ GeoFence, APM のファームウェアのアップデートなど多くの機能を有している。完成品として流通している製品とは異なり、マニュアル通りの機能が無かったり、機能に不具合があったりすることもある。開発者は DIY Drones コミュニティーからのフィードバックを受けて常に改良しているので、更新情報をチェックし、必要なアップデートを行う必要がある。

5. 安全運用

マルチコプターに代表される小型 UAV は、その手軽さと安定性から、調査研究ツールとして今後急速に普及するものと思われる。しかし機体は小型とは言え、固定翼機とは異なって滑空能力がなく、密度は大きく、固いため、もし操縦を誤って上空から落下すれば人や物を大きく傷つけかねない。マルチコプターの事故が多発するようになると、社会の迷惑となるだけでなく、規制の強化等によってせっかくの優れた技術の活用が難しくなる恐れがある。そこで本章では、我々の経験した事故例とマルチコプターの危険性を示し、我々の取っている安全対策を紹介する。最後に安全対策の基本としての関連法規とその遵守方法、ならびに万が一の事故に備えての保険について述べる。

5.1 事故例

我々は、これまで実施してきた空撮調査や試験飛行で、不本意ながら何回かの墜落事故を経験した。幸い人間や第三者の器物を傷つけるようなことはなかったが、一步まちがえばという事例もいくつかあった。安全対策は過去の事故から学ぶことが最も効果的なので、我々の経験を以下に紹介する。

1) 操縦ミスで崩壊地の壁に衝突・墜落

操縦者 1 名のみで大井川の崩壊地である赤崩において急傾斜の斜面を DJI Phantom で撮影していたところ、機体が斜面に近づき過ぎ、慌てて回避操作をしたものの、機体の向きを見失って操縦困難となり壁に衝突した。機体は斜面を谷底まで数百メートル転落し、回収不能となった。

この事故は不慣れによる単純な操縦ミスが原因である。教訓は斜面に近づきすぎないことのほか、機体の向きを見失い斜面や樹木などの障害物に衝突する危険が高まった場合はスロットル思い切り上げて上昇することである。機体の上方には通常は障害物は無いので、一旦上昇してからゆっくり体勢を立てなおせばよい。またこの事故の際は衝突した後、斜面を転落してゆく機体を眺めていただけだったが、転落中にスロットルを最大に上げれば離陸できた可能性がある。また、操縦中はストレスが高い状態が継続するため、空撮調査は操縦者と助手の最低 2 名体制で実施すべきである。

2) 助手との意思疎通のミスによる墜落

同じ赤崩で、操縦者と助手とで、斜面に見える露岩までの距離を確認して、露岩に 20 m まで近づく撮影を試みた。しかし操縦者と助手とが距離の異なる別の露岩を見ていたため、機体が露岩に衝突し転落した。しかしこのときは前記の衝突転落事故の経験があったため、とっさにスロットルを一杯に上げたところ、幸い機体は浮上して難を逃れることができた。

教訓は、飛行プランの確認に念をいれること、衝突の危険の高い撮影では助手と操縦者が視点を共有して意思疎通を図ることである。また斜面衝突の際の急上昇による機器回避操作が有効なことが証明できた。立ち入り不可能な裸地の急斜面を撮影する場合、機体は万一衝突した場合に転がりやすい形状にしておくことと有利である。機体が裏向きや横倒しの状態で停止したり、プロペラが何かに引っ掛かった状

態で停止してしまうと再び浮上することはできない。

3) 操縦ミスで機体を見失う

同じ大井川の赤崩下部の崖錐で、100 m ほど離れた位置にある DJI Phantom を樹林の中から操縦中に、機体が樹木の陰に一瞬隠れ、そのまま見失った。自動帰還させるべく送信機の電源を切ったところ数分後に無事帰還した。しかし離陸させた場所が足場の悪いところだったため自動帰還した機体をハンドキャッチする時に危険を感じた。この事故で学んだことは、目視飛行は一瞬でも機体が見えなくなると操縦が困難になるため、物陰に入らないように十分注意すること、足場の悪い場所では最後まで自動帰還させずに手動操縦に戻すべきであったこと、危機回避には自動帰還が有効なことである。

4) 操縦ミスで樹上に不時着

研究所構内で空撮の試験を実施中、操縦ミスで高さ 18 m の松の木の上に不時着し、回収不能となった。幸い翌日の台風による強風で機体は落下し回収することができた。

樹上への不時着では機体が損傷することはないが、背の高い木の場合は回収が困難となる。この事故以来、調査には長さ 10 m の伸縮ポールの先にフックを付けた「機体回収竿」を携行している。10 m を超える場合はフックのついたロープを投てきするなどの別の回収手段が必要となる。

5) プロペラの脱落による墜落

研究所構内での試験飛行で、プロペラの 1 枚が外れて墜落する事故が 2 回あった。機体は 5 ~ 10 m の高さから突然ほぼ垂直に落下した。プロペラの破損ではなくナットの緩みが原因であった。

4 枚ローターのマルチコプターは 1 枚のプロペラを失うと瞬時に墜落する。揚力を完全に失って落下するため高所を飛行している場合は危険である。この事故以来、調査あるいは試験飛行の開始時にプロペラナットの増し締めを励行している。

6) 強風による墜落

風の強い日に高さ 6 ~ 7 m の堤防に囲まれた海岸の駐車場で飛行試験中に、バッテリー残量が低下したため自動帰還モードに切り替えたところ、機体がプログラム通りに上昇したため、堤防の高さを超えて風速が更に増加し、風下に流されて墜落した。幸い低木の上に不時着したため大事には至らなかった。

電池残量が低下すると無風・弱風では飛行できて

も、強風では推力が不足することがあるため、強風時には早めに帰還させなければならない。風の強い日には飛行しないことが最善であるが、雨とは異なり撮影は可能であるため、安全な範囲で調査を実施したいと考えるのが普通である。強風の日に安全な場所で飛行実験を行い、どの程度の風速に耐えられるのかをあらかじめ把握することには意味がある。

7) 原因の不明確な制御不安定

これまでの空撮調査と試験飛行で、原因が必ずしも明らかではない飛行の不安定さを何度か経験している。そのうち2回は DJI Phantom の手動操縦中で、墜落に至っている。それ以外は APM2.6 を搭載した DJI F450 と 3DR Quad の自律飛行中で、いずれも突然ふらふらと別の方向に動き出すという現象である。すぐに直ることもあれば、危険を感じて急きよ手動操縦に切り替えて回復したこともある。

異常が発生してからも継続して飛行しているの、単にバッテリー切れによる墜落ではない。自動的に回復したケースは一時的な GPS 受信状態の悪化が原因の可能性はあるが、現象はいずれもフライトの後半に発生しているため、電圧の低下が制御系に何らかの影響を及ぼしている可能性も高い。飛行中のバッテリー電圧の監視を励行するとともに、GPS 飛行制御システムが必ずしも 100% 信頼できないことを認識しておく必要がある。

機体の高度は、誤差の大きな GPS の高度ではなく気圧計により制御されている。強風下では風の力による機体の不安定さに加えて、気圧計の誤差による高度の不安定が生じていると推測される。フライトコントローラーを風から守ることによって不安定さが減少することが知られている。さらに、APM フライトコントローラーの気圧計は光に敏感で、光にあたることで高度制御が不安定になるという報告もある。

5.2 墜落の衝撃および機体の安全対策

上記の墜落例のひとつでは、DJI Phantom の機体が高さ 20 m 程度を飛行中に制御不能となり、浅い角度で墜落して、建物の壁に取り付けてある空調機器の冷媒の配管に衝突した(図 43)。この配管は断熱材の外側をステンレスの薄板で覆った構造になっている。ちょうど1本の腕の先端で直撃した形になりパイプは最大 1 cm 凹み、また全体が最大 1 cm 程度曲がった。もし衝突した相手が配管でなく人間であったならば、相当大きなけがをしていた可能性がある。

図 44 は 3DR Quad が 5 m 程度の高さからコンクリートの床に落ちて生じた機体の損傷である。厚さ 1 mm、20 mm 角のアルミ角パイプ製の腕の先端が約 5 mm つぶれている。この例でも、もし衝突した相手が人間であったならば、大けがを負わせていた可能性が高い。



図 43 墜落による空調配管(直径 75 mm, ステンレス外皮)の損傷

Fig. 43 Damaged air-con duct pipe (75 mm diameter) with stainless cover by a crash.

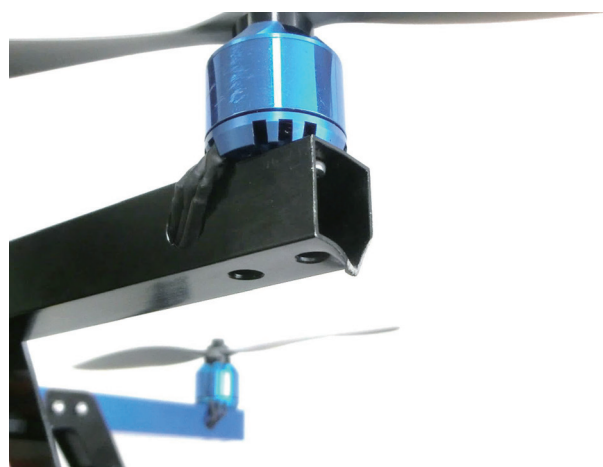


図 44 3DR Quad の墜落による腕の先端の損傷

Fig. 44 Damage on 3DR Quad arm end by a crash.

また図 45 は研究所構内での DJI F550 の安定性試験中の墜落による機体の損傷である。写真のフレームの先端が鉛直に下を向いた状態で約 4 m の高さから土の地面に落下した。DJI F550 のフレームは強度の高いプラスチック製であるが、わずか 4 m の高さから、かつ土の上に落下した場合でも、腕が折れてしまうほど衝撃力が大きかったことがわかる。もし数十メートルの高さから同様に落下した場合の衝撃力は更に大きなものになる。



図 45 DJI F550 の墜落による腕の先端の損傷
Fig. 45 Damage on DJI F550's arm end by a crash.

我々の使用しているマルチコプターは小型とはいえ、材質は固く密度が大きいため、墜落時の衝撃は小さくない。山の中で撮影する場合の危険性は比較的小さいが、災害調査などで人家が近い場合は、万一墜落すれば人や物を傷つける可能性がある。対策のひとつはプロペラガードの装着である(図 46)。



図 46 DJI Phantom のプロペラガード
Fig. 46 Propeller guard of DJI Phantom.

DJI Phantom などの一部の機種にはプロペラガードをオプションとして購入できるが、他の多くのマルチコプターにはプロペラガードは用意されていないため、ショップに特注するか自分で製作しなければならない。図 47 にアルミフラットバー(幅 10 mm, 厚さ 2 mm, 長さ各 50 cm)およびナイロンテープ(幅 15 mm)を用いて製作したプロペラガード(130 g)を示す。同じ材料(長さ各 25 cm)で製作したスキッド(52 g)は標準のプラスチックスキッド(76 g)



図 47 アルミフラットバー(幅 10 mm × 厚さ 2)で製作した DJI F450 のプロペラガード(130 g)とスキッド(52 g)
Fig. 47 Propeller guards (130 g) and skids (52 g) for DJI F450 made by aluminum flat bar (10 mm width × 2 mm thick).

より軽量である。いずれも衝突・墜落時に変形・破損して衝撃を吸収する。変形・破損部分は現場で修理できる。

プロペラガードを装着すると重量が増え、効率も若干低下するため飛行時間がその分だけ減少する。また付け外しに時間を要するか運搬時にかさばるといったデメリットもある。しかし調査場所によっては安全対策として必須の装備であり、今後は各メーカーがプロペラガードを標準付属品として用意することが期待される。

衝突時の安全対策の他、飛行の不安定を減らすための工夫も必要である。我々のテスト飛行においてフライトコントローラの搭載された F450 のフレームの中心部を、包装用の透明ラップでくるんで風を

当たらないようにしたところ、それまで不安定だった高度が安定した。DJI Phantom の制御システムは機体に格納されていて、飛行の不安定の原因となり得る衝撃や風圧、光の変化等からある程度守られている。DJI F450 等の一般的なむき出しのフレームの場合も、フライトコントローラーや受信機だけはケースに格納し、光も遮断するなどして、不安定化の要因を極力減らすことが必要である。

5.3 安全運用手順

マルチコプター空撮調査は操縦者の負担軽減と安全確保の観点から2名以上で行うことを原則とする。以下に事前準備、現場到着後飛行前まで、飛行中、飛行後、調査終了後の作業を時間順に述べる。

1) 事前の作業

調査地域の住宅・道路の位置と高度、送電線等の飛行の障害になる物体の有無、航空法による飛行制限地域(後述)か否か等を確認する。離着陸場所は人の往来が無かつ十分な視界が確保できる場所を事前に複数選定しておく。写真測量の場合は手動・自動によらず事前に飛行ルート・高度・速度・シャッター間隔等を決めておく。自動操縦の場合はフライトミッションを作成しPCに保存するとともに、最初のミッションを機体書き込んでおく。

機体・送信機・その他の機材を準備する。飛行用および送信機のリポバッテリーは調査の前日に充電する。また使用予定のバッテリー残量を確認する。機体と送受信機が正常に動作することを確認する。降雨・降雪・強風が予想される場合は調査の延期を検討する。

2) 現場到着後の作業

現場に到着したら離着陸場所に十分な広さと視界があるかどうか、人が近寄らないかどうかを確認する。必要に応じて管理者の許可を得る。飛行ルート上に地図にない人家や障害物等が存在していないかどうかを確認する。

機材を組立て、飛行の準備を行う。特にプロペラナットをはじめとする飛行に重大な影響を及ぼす部分はしっかり確認する。飛行制御装置の加速度計およびコンパスのキャリブレーションを行う。自律飛行の場合はミッションの書き込み・確認を行う。カメラの電池・カードの装着と時計合わせ、インターバルの設定を確認する。最近の大容量のSDカードは1,000枚以上の画像を記録できるが、墜落すれば

すべてを失う可能性がある。万一に備えてフライト毎にPCにコピーできるように複数のカードを用意する。送信機(プロポ)の電池電圧をチェックする。テレメトリシステムのモニタPCを起動する。

3) 各フライト前の作業

毎回の飛行ルートについて、安全な飛行距離、飛行予定時間内にフライトが完了することを確認する。飛行計画は操縦者と助手による二重チェックを行う。重大な見落とし、地形や障害物に関する認識の相違がないようにする。また、飛行ルート上に障害物がある場合は事前に位置を距離計で確認する。また、気象条件とペイロードに応じた最低バッテリー電圧と限界飛行時間とを安全率を考慮し設定する。

以降、操縦者は機体の操縦に専念し、助手はそれ以外の作業を担当する。バッテリーが満充電であること(3Sなら12.5V)をチェックして機体に装着する。カメラのスイッチをオンにしてインターバル撮影を開始する。このとき周囲の様子も数枚撮影しておく。カメラのスタート忘れは最もよくある失敗なので注意する。機体を離陸場所に置いてGPSのロックをLEDで確認し、操縦者に準備完了を告げる。

4) 飛行中の作業

飛行中は、操縦以外の仕事の一切は助手が行う。操縦者は機体から目を離さない。操縦者はプロポの画面に表示されたバッテリー電圧や時計を見ることすら難しいことがある。

操縦者は、離陸する、どこへ向かう、飛行モードを切り替える、帰還させる、着陸させるなどの機体の操作を逐一声を出して助手に告げる。助手は離陸後、飛行時間・ウェイポイント・バッテリー電圧等を適宜の間隔で操縦者に伝える。助手も基本的には機体から目を離してはならないが、同時に人や車が近づいてこないかなど、周囲にも注意する。機体から目を離すときは再度機体を視認できるように地上の目印を記憶する。機体が障害物に近づく危険がある場合は、その旨を距離とともに伝える。飛行時間およびバッテリー電圧が限界に近づいた場合はそのことを数字とともに伝える。

機体が頭上まで帰還したら着陸準備を整える。助手が着陸地点へ行き、操縦者は助手が見やすい位置に機体を操縦し、最後はゆっくり助手の頭上に降ろす。助手が機体をキャッチしたら速やかにプロペラを停止する。

5) 各フライト後の作業

機体を着陸させたら撮影データ (SD カード) を回収する。SD カード上の DCIM フォルダ名をフライト番号等の名前に変更してから PC にコピーすると、フライト毎に新しいフォルダが作成されて整理が容易である。

バッテリーを充電済みのものに交換し、使用済みバッテリーには目印をつける。少しでも使用したバッテリーは使用済みバッテリーとして扱う。使用済みバッテリーは撮影が継続される場合は直ちに充電を開始する。充電が完了したら満充電の目印をつける。

6) 調査終了後の作業

使用済みおよび未使用のリポバッテリーは充放電器を用いてストレージ電圧 (11.2-11.6V 程度) に充電または放電し、安全のためリポ電池専用バッグに入れて保管する。送信機にリポ電池を用いている場合は、これについてもストレージ電圧に充放電した後、保管する。機体についた泥や草などを除去し、機体を点検する。次回の撮影調査に備えて、必要な消耗品を補充しておく。

5.4 関連法規と保険

本節では、マルチコプターを含む UAV の運用に関連する法令のうち航空法、電波法とその遵守、ならびに UAV の墜落等によって人的、物的損害を生じた際に必要となる賠償保険について述べる。

5.4.1 航空法

UAV は航空法第 99 条の 2 により「(航空機の) 飛行に影響を及ぼすおそれのある行為」としてその飛行高度が制限されている。小型 UAV は、航空法施行規則第 209 条の 3 および 4 の「模型飛行機」に該当する。模型飛行機のほかロケット、花火、気球、ハンググライダーなども同様に制限されている。以下ではこれらの法令による飛行高度の制限を解説するが、概略であって厳密なものではない。また、法律および航空交通管制の専門家の解釈が本稿の解釈に優先する。

UAV の飛行が禁止されている空域は、空港ごとに定められた「制限表面」の高度以上の空域、航空交通管制圏・情報圏 (通常半径 9 km) と航空路内の高度 150 メートル以上の空域、およびそれら以外の地域の高度 250 メートル以上の空域である。空港の位置、管制圏・情報圏、航空路は地方ごとの

区分航空図 (図 48) で、また最新の情報は電子航空路誌 <https://aisjapan.mlit.go.jp> で知ることができる。



図 48 区分航空図の例
Fig. 48 Examples of Sectional Aeronautical Chart.

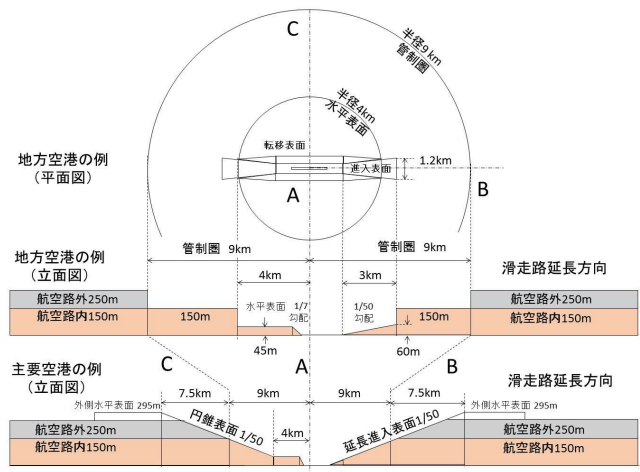


図 49 UAV の飛行可能空域の模式図
Fig. 49 Schematic diagram of airspace permitted for UAV.

図 49 に UAV の飛行可能な空域を模式的に示す。水平距離は例であり、空港毎に異なる。制限表面は、一般に地方空港や航空基地では距離 4 キロメートルまで、全国の主要な空港では距離 24 キロメートルまでの範囲で定められている。大きさや形状は空港毎に異なるため、国土交通省やそれぞれの空港のホームページ等で確認する必要がある。

UAV を空港近傍の制限表面以上の高度、もしくは管制圏内、他一部の定められた空域の高度 150 メートル以上の高度で飛行させたい場合は事前に各管制区の空港事務所に申請して国土交通大臣の許可を得る必要がある。それ以外の空域では航空路内の 150 メートル以上の高度または航空路外の

250メートル以上の高度でUAVを飛行させたい場合は、同様に飛行通報書を提出しなければならない。

しかし我々のマルチコプター空撮調査では、150メートル以上の高度から撮影する必要性は稀である。また実機の航空機は、居住地で300メートル、非居住地で150メートルに定められた「最低安全高度」まで下りてくる可能性があるため、UAVが150メートル以上の高度で飛行すると実機との衝突の可能性が出てくる。したがってマルチコプター空撮調査は基本的に高度150メートル以下、また空港が近い場合は制限表面を調べて、それ以下を飛行高度とし、事故の可能性と、調査毎の申請・通報手続きの煩雑さを避けるのが賢明である。なお、調査地における制限高度等が不明で、規則に触れる心配がある場合は最寄りの空港事務所に問い合わせること。

5.4.2 電波法

マルチコプターの操縦に用いる送信機(プロポ)、テレメトリーシステムの送信機、FPVシステムの送信機はいずれも無線通信機器であり、国内で運用する場合は日本の電波法の適用を受ける。

現在ラジコン機器に一般に用いられている無線送信機は2.4GHzの特定小電力無線局に分類され、日本国内で販売されていて、日本の電波法の定める技術基準に適合した電波を送信する特定小電力無線局の送信機には「技術基準適合証明」のマーク、いわゆる「技適マーク」が貼られている。「技適マーク」の貼られている特定小電力無線送信機は免許不要で使うことができる。図50にテレメトリ送信機能をもつ受信機に貼られた技適マークの例を示す。同じマークは携帯電話や無線LANを有するノートパソコン等にも必ず表示されている。

市中には技適マークのない外国製の無線機器もしばしば販売されている。これらの無線機器は、売買は合法であるが、購入後、個別に無線局免許を取得することなしに使用すると電波法違反となる。技適マークのない無線送信機には、日本の電波法に定められた技術基準に適合している電波しか出さないものと、割り当てられていない周波数や規定以上の出力などの、いわゆる違法電波を出すものがある。技術基準に適合しない電波を出す機器はいかなる方法でも使用は許されない。一方適合している機器は、



図50 テレメトリデータ送信機能をもつ受信機に表示された「技適」マーク

Fig. 50 Type Approved mark shown on a wireless receiver with a built-in function of telemetry data transmission.

そのことを証明する技術資料を添えて個別に無線局の開設を申請して免許を取得することが制度上は可能であるが、手間がかかるため現実的ではない。免許を取得しないまま使用すると電波法違反となる。

したがって電波法を遵守するために我々が行うべき現実的な手段は、技適マークのついた無線機器以外は使用しないことである。なお技適マークのついた無線機器であっても、軽量化のためにケースを取り外すなど、改造を施すと技適マークは無効となり、使用すると電波法違反となる。

5.4.3 第三者賠償責任保険

マルチコプターは未熟な操作、機体の不具合、電池の不具合、通信障害、突風、障害物への接触など、様々な原因で墜落する可能性がある。マルチコプターが上空から墜落した場合の衝撃力は大きく、運悪く人や物に衝突した場合は大きな事故になる恐れがある。事前にテストを繰り返して機体の特性を把握し、実際の調査では細心の注意を払って運用することが不可欠であるが、それでも墜落の可能性をゼロにすることは難しい。したがって万が一墜落事故が発生して人や物を傷つけた場合に備えて、操縦者は必ず第三者賠償責任保険に加入して加害者に対する補償に備える必要がある。

(財)日本ラジコン電波安全協会の会員となって加入できる「ラジコン保険」は業務使用時の事故は補償の対象にならない。我々が研究業務の一環として実施するマルチコプター空撮の事故も対象外である。業務上の事故に対しては損害保険各社が提供する第

三者賠償責任保険に加入する必要がある。契約条件は、機体を特定する契約、操縦者を特定する契約など、保険会社によって様々である。各保険会社に条件を問い合わせ、マルチコプターの運用を開始する前に加入しておく必要がある。なお所属組織が団体に加入している一般の賠償責任保険が適用できる場合もあるので、まず所属組織に確認する必要がある。

6. 空撮調査の実例

最後に我々がこれまでに実施したマルチコプター空撮調査の実例を紹介する。なお我々はこれらの調査の経験を通じて利用技術・安全運航のノウハウを蓄積してきたため、初期の事例では最適な機材が用いられていなかったり、十分な安全対策が取られておらずに墜落や墜落寸前の事故が発生したものである。

6.1 大井川赤崩 崩壊地形調査

赤崩(あかくずれ)は静岡県葵区田代東俣林道畑薙橋付近にある大崩壊地の1つで、崩壊は現在も進行し、大井川左岸に崩壊砂礫を供給している。受け盤の崩壊斜面は北向きの斜面に発達し、四万十帯の白亜紀の砂岩泥岩互層の地層は南に傾斜している。我々は赤崩の崩壊地の詳細な地形図作成を目的とし、平成25年8月に2回にわけてマルチコプター空撮を行った。使用機材はDJI PhantomとGoPro Hero2である。

大井川の畑薙橋下流にある青薙山(2,406 m)登山口から約3時間の登りで崩壊の冠頂部(図51)に至る。マルチコプターによる撮影は図51のA点付近を離着陸場所として実施した。空撮エリアおよびマルチコプターのGPS航跡を図51に示す。図52に撮影時の様子を示す。なお操縦者は転落防止のため命綱を装着している。図53に赤崩最上流部の空撮画像を示す。

なお、本調査の実施時点では機材の選定および撮影ノウハウが十分ではなく、調査で得られた撮影画像の品質、撮影枚数では十分な精度の詳細地形図の作成には至らなかったため、再調査を計画している。

6.2 山口・島根豪雨災害調査

平成25年7月28日に山口県と島根県において非常に強い雨が降り、山口県山口市では最大1時間降水量143ミリ、萩市須佐では同138.5ミリが観測された。マルチコプター空撮調査は平成25年8月

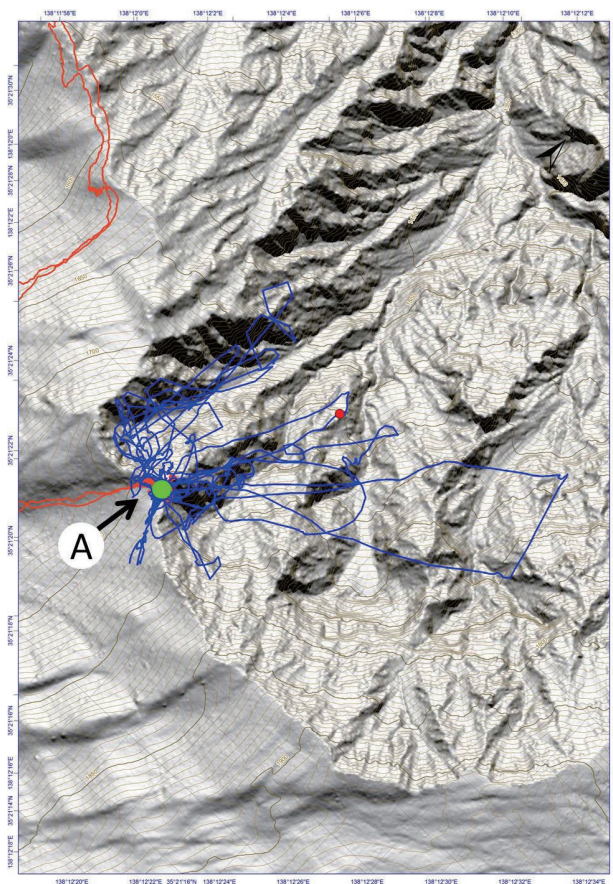


図 51 静岡県大井川上流赤崩の空撮調査の離着陸地点(A)とGPS航跡(陰影図LPデータは筑波大学農林技術センター井川演習林提供)

Fig. 51 GPS tracks and take-off and landing point(A) of multi-copter aerial photo survey at Akakuzure, upstream of Ooigawa River, Shizuoka prefecture (LP data by Agricultural and Forestry Research Center, Tsukuba University).



図 52 赤崩におけるマルチコプターの操縦
Fig. 52 Controlling multi-copter at Akakuzure.



図 53 赤崩最上流部の空撮画像
Fig. 53 Photograph of the scarp of Akakuzure.

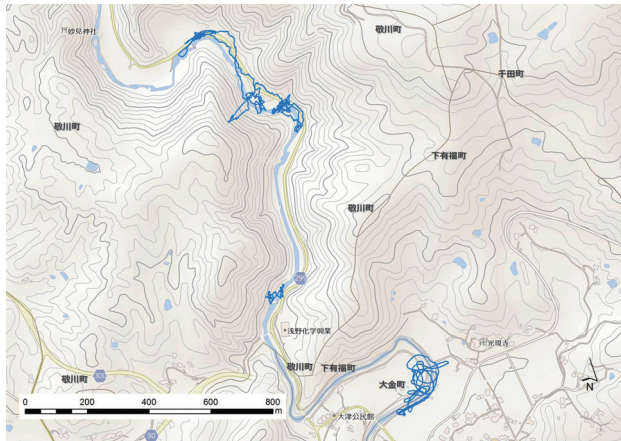


図 54 山口島根豪雨災害マルチコプター空撮調査の GPS 航跡図 1(敬川)
Fig. 54 GPS tracks of multicopter aerial photo survey of Yamaguchi-Shimane heavy rainfall disaster along Uyagawa river.

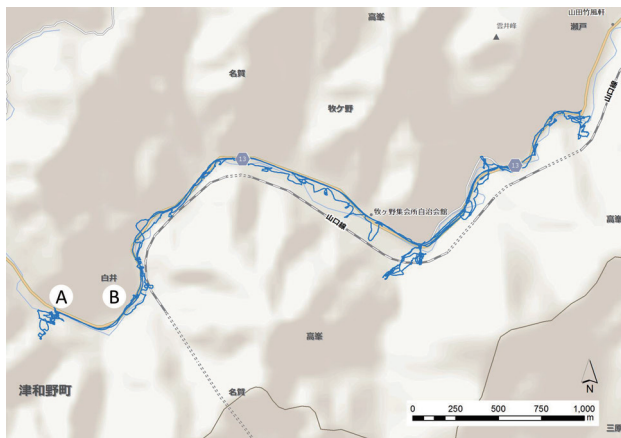


図 55 山口島根豪雨災害マルチコプター空撮調査の GPS 航跡図 2(名賀川)
Fig. 55 GPS tracks of multicopter aerial photo survey of Yamaguchi-Shimane heavy rainfall disaster along Nayoshi-gawa river.

27 日に島根県江津市の敬川沿い(図 54), および平成 25 年 8 月 28 日に島根県鹿足郡津和野町において津和野川支流の名賀川沿い(図 55)で実施した. 本調査は, 災害後の被災状況をアーカイブすることを目的として実施した. 使用機材は DJI Phantom と GoProHero2 である. 図 54 および図 55 にマルチコプターによる空撮の航跡図を示す. この調査ではマルチコプターに装着した GPS デバイスの電源を切らずに複数のフライトを実施したため, 飛行航跡に加えて調査者の移動経路も描画されている. 曲線的な軌跡がマルチコプターの撮影航跡である. 図 56 に現地での撮影の様子を, 図 57 にマルチコプターから撮影した写真を示す. 撮影場所は図 55 のそれぞれ A 点および B 点付近である.



図 56 山口・島根豪雨災害空撮調査. 名賀川における表層崩壊の撮影(図 55 の A 点)
Fig. 56 Aerial photo survey of Yamaguchi-Shimane flood/landslide disasters along Nayoshi river (at point A in Fig. 55).



図 57 山口・島根豪雨災害空撮調査. 名賀川の河床氾濫(図 55 の点 B)
Fig. 57 Aerial photo of a Naoyosih-river flood area caused by 2013 Yamaguchi-Shimane heavy rainfalls (at point B in Fig. 55).

6.3 フィリピンボホール島地震被害調査

2013 年 10 月 15 日にフィリピン中部のボホール島でマグニチュード (Mw) 7.2 の地震が発生し、200 人を超える犠牲者と多くの建物・構造物被害が発生した。我々は同年 11 月上旬に、現地を訪問して、教会をはじめとする建物被害、地すべり、海岸隆起、地表断層についてマルチコプター空撮を用いて調査を実施した。使用機材は DJI Phantom と GoProHero3 である。本調査では操縦に FPV システムを用いた。

図 58 は、同島南部にある 18 世紀に建造されたフィリピンで最も古いバクラヨン教会の倒壊した鐘楼の空撮写真である。約 20 m の高さで飛行するマルチコプターから倒壊した塔とその周辺を撮影した。このような背の高い建物の被害状況の撮影は、被写体に近接する必要があるため FPV が特に有用である。



図 58 2013 年フィリピンボホール地震で倒壊したバクラヨン教会の鐘楼

Fig. 58 Bell tower of Baclayon Church damaged by 2013 Bohol Earthquake in the Philippines.

図 59 はボホール島のチョコレートヒルの地すべりの空撮画像である。ボホール島には第三紀の大理石が風化してできた高さ 30 ~ 50 m のチョコレートヒルと呼ばれる地形が 1,200 以上存在し、2013 年の地震でそのうちのいくつかが崩壊した。この調査でも崩壊した斜面に接近した写真を撮影するために FPV が有効であった。

図 60 は、2013 年 10 月のボホール地震で 1 m を超える隆起を示した島西部のマリボホック海岸の段丘地形である。地震による隆起で海岸線が 50 ~ 100 m 後退し、広大なサンゴ礁テラスが露出した。我々は半島の先端の高さ 40 m 付近からマルチコプターで



図 59 フィリピンボホール島チョコレートヒルの 2013 年ボホール地震 (M7.2) による地すべりの空撮

Fig. 59 Aerial photography of a landslide of a Chocolate hill caused by 2013 M7.2 Bohol Earthquake.

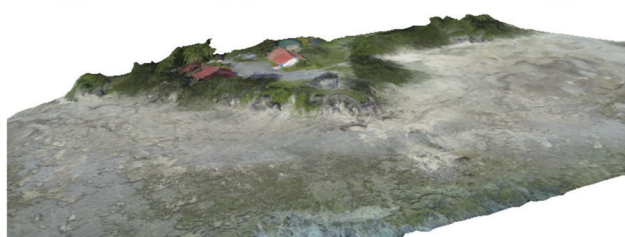


図 60 フィリピンボホール島マリボホック海岸の地震による隆起の空撮写真および三次元地形モデル

Fig. 60 Aerial photos and 3-D topography model of uplifted coastal terrace of Maribojoc, Bohol, Philippines.

写真を撮影した。得られた写真 (図 60 上) を SfM ソフトウェアの PhotoScan で処理して三次元モデルを生成した (図 60 下)。

6.4 伊豆大島地すべり地形調査

2013 年の台風第 26 号が 10 月 16 日に東京都大島町の西部地域 (以下伊豆大島) に記録的な豪雨とそれともなう斜面崩壊をもたらした。我々は斜面崩壊による詳細な地形変化を調べるためにマルチコプター空撮を実施した (図 61)。

撮影は太陽光線の角度を考慮して 0:10 頃より開始し、5 フライトで合計 578 枚の写真を撮影し 0:45 頃に完了した。撮影領域の幅は東西、南北ともに約

450 m, 撮影面積は約 12 ha, 飛行高度は対地 40 ~ 50 m, カメラはリコー GR を使用し, 1 秒インターバルで垂直写真を撮影した. この画像をもとに SfM によって 0.09 m メッシュの DSM, および 0.02 m メッシュのオルソフォトを生成した. 図 62 に撮影された画像から PhotoScan によって生成した地形モデル (DSM) と, 0.5 m 間隔の等高線図を示す.



図 61 平成 25 年第 26 号台風による伊豆大島の斜面崩壊地のマルチコプター空撮

Fig. 61 Multicopter aerial photographing of land slides of Izu-Oshima Island caused by the 26th Typhoon (Wipha), 2013.

6.5 江の島隆起海岸地形調査

江の島は神奈川県藤沢市片瀬にある相模湾に突き出した陸繋島の 1 つで, 最高地点は標高 60.4 m, 面積は 0.38 平方キロメートル, 地質は第三紀凝灰砂岩の上に関東ローム層が載る. 島の南部は岩屋と呼ばれる海食洞と波食棚が卓越し, 1923 年大正関東地震によって島全体が 1 m 隆起したといわれており, 満潮時にも波食棚が海面上に姿を現わすようになった.

我々は大正関東地震による海岸の隆起量を明らかにするための詳細地形図の作成を目的に, 平成 25 年 11 月 27 日の早朝に江ノ島南部および江ノ島西部稚児ヶ淵, 江ノ島山頂付近でマルチコプター空撮調査を実施した. 図 63 に空撮エリアと調査者の移動経路を示す.

使用機材は 3DRobotics 社製 3DR Quad とリコー GR で, 同機に搭載の APM2.6 による自動操縦で飛行を行った. 図 64 に標高約 30 m の台地上の亀ヶ岡広場における撮影準備の様子, 図 65 にオートパイロットのミッションマップの 1 つを示す. 各ミッションでは海岸テラス上空の高度 60 m から撮影を行った.

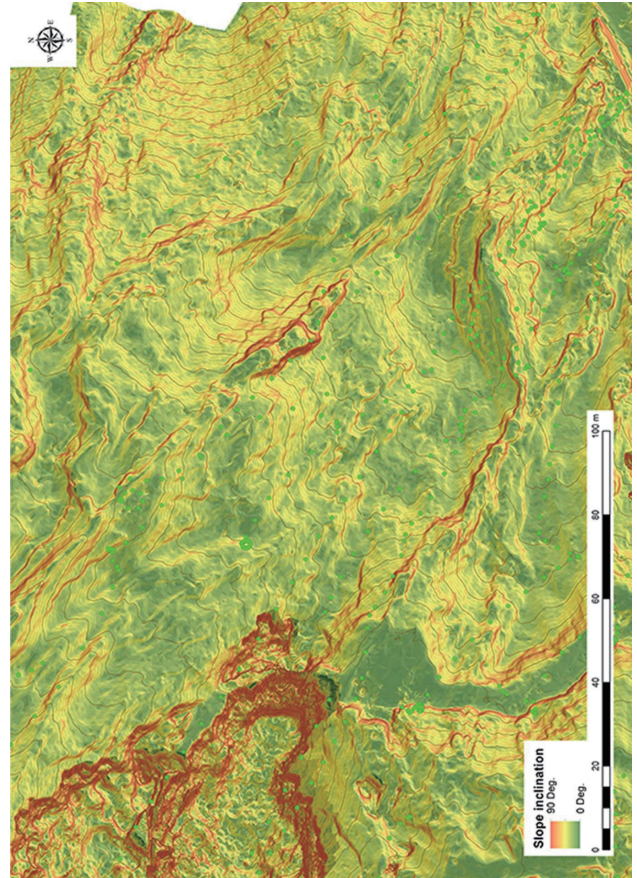


図 62 平成 25 年第 26 号台風で生じた伊豆大島西部の地すべり地形の, マルチコプター空撮画像から得られた詳細地形図 (コンター間隔 0.5 m)

Fig. 62 Digital Surface Model with 0.5 m contour interval of a land slide area of western Izu-Oshima caused by the 2013 Typhoon Wipha (#26) obtained by multicopter aerial photographs.

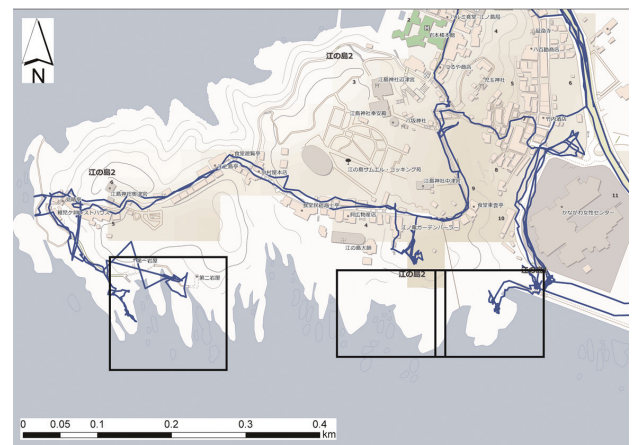


図 63 神奈川県江の島の海岸段丘の空撮調査領域 (四角形) および調査者の徒歩移動経路 (青線)

Fig. 63 Aerial photo survey areas (rectangles) and surveyers' walk trail (blue lines) at coastal terraces of Enoshima, Kanagawa prefecture.



図 64 江の島の亀ヶ岡広場における空撮準備 (ミッションの 3DR Quad 機体への書き込みとバッテリー電圧チェック)
Fig. 64 Flight preparation (writing mission to 3DR Quad multicopter and battery voltage check) at Kamegaoka-Hiroba (park) of Enoshima.



図 66 江の島の海岸段丘におけるマルチコプターのハンドローンチ
Fig. 66 Hand-launching of multicopter at Enoshima coastal terrace.

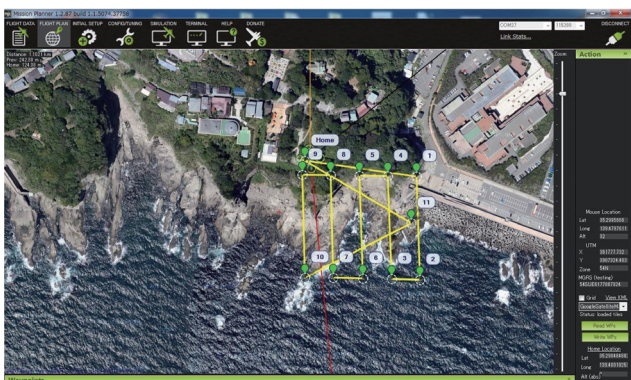


図 65 江の島海岸段丘の空撮ミッションマップの例
Fig. 65 Example mission map of aerial photographing at Enoshima coastal terrace.



図 67 江の島の海岸段丘を高度 60 m からマルチコプターで撮影した連続画像の一部
Fig. 67 Sample of continuous aerial photos taken from 60 m above the ground level at Enoshima coastal terrace.

江の島の調査ではマルチコプターの離着陸は海岸テラス上から行った。テラスは一部が浸水しており離陸時の機体不安定による転倒・水没を避けるため離陸は助手によるハンドローンチとした(図 66)。

図 67 に上記の図 65 のミッション(高度 60 m)の右端部分のルートで得られた空撮画像の一部を示す。また図 68 には同ミッションでえられた 52 枚の空撮画像を PhotoScan で処理して得られたオルソモザイク画像を示す。

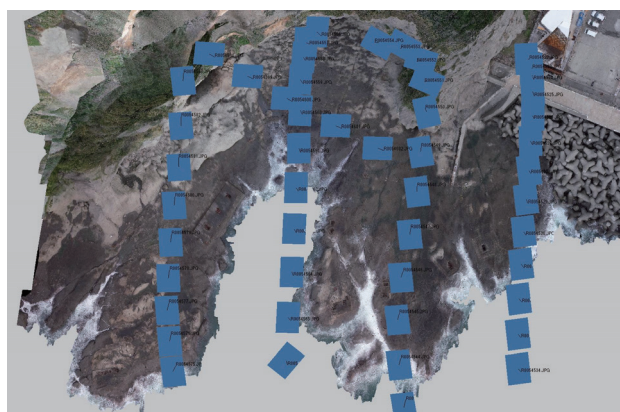


図 68 52 枚の空撮画像を PhotoScan で処理して得られたオルソモザイク画像とカメラ位置(青色四角)
Fig. 68 Orthophoto obtained by PhotoScan applied to the 522 aerial photos of Enoshima coastal terrace. Camera positions are also shown by blue rectangles.

6.6 つくば市小田宝篋山麓空撮調査実験

マルチコプターの飛行・空撮および SfM 技法による詳細地形図作成の実験を、筑波山に近いつくば市小田の宝篋(きょう)山の山麓地域で実施した。この場所は防災科学技術研究所から約 7 km、車で 15 分の至近距離にあり、数百メートル四方の領域に山地、丘陵地、水田、用水池等があって、人家はなく比較的 안전한ため空撮調査の実験に適している。

図 69 に実験用に設定した高度 100 m、飛行距離 2 km のミッションを示す。平行した直線の一辺は約 220 m である。

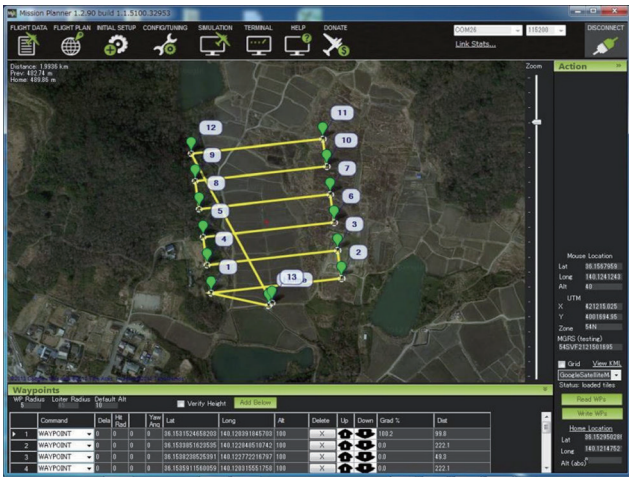


図 69 つくば市小田、宝篋(ほうきょう)山麓の空撮実験用飛行ルート
 Fig. 69 Flight route for experimental aerial photography at a foot of Mt.Hokyo, Oda, Tsukuba.

実験に使用したマルチコプター機材は APM2.6 と HitecGPS・電圧テレメトリーを搭載した DJI F450、カメラは GoProHero3 (画角 Medium) で、カメラはブラシレスジンバルを用いて真下に向けた(図 70)。飛行速度は 5 m/秒と 10 km/秒の 2 回、シャッター間隔はそれぞれ 5 秒および 2 秒とした。図 71 に離着陸地点と離陸時の様子を示す。

飛行中の機体の位置とリポバッテリー電圧は Hitec のテレメトリーシステムを用いて地上でモニタした。図 72 は間もなく離陸地点に帰還するという瞬間のリアルタイム GPS 航跡図である。

飛行速度 5 m/s で 100 m 上空から撮影された 66 枚の画像のうち、最初の 8 枚を図 73 に示す。この例では十分に遅い速度で飛行しているため各画像間は約 80% のオーバーラップ率が確保されている。



図 70 宝篋山麓の空撮実験に用いたマルチコプター DJI F450 と GoPro Hero3 および TarotT-2D ジンバル
 Fig. 70 Multicopter DJI F450 with GoPro Hero3 attached by Tarot T-2D gimbal.



図 71 宝篋山麓の空撮実験におけるマルチコプターの離陸の様子
 Fig. 71 Launching multicopter during a photo survey test at a foot of Mt.Hokyo.

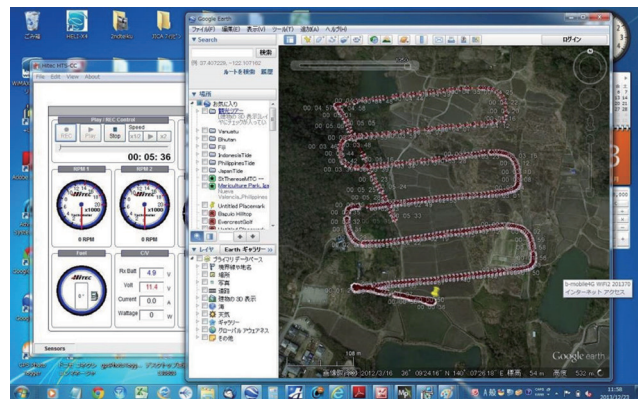


図 72 宝篋山麓の空撮実験の際のリアルタイム GPS 航跡図
 Fig. 72 Realtime GPS route map of aerial photo survey test at a foot of Mt. Hokyo.

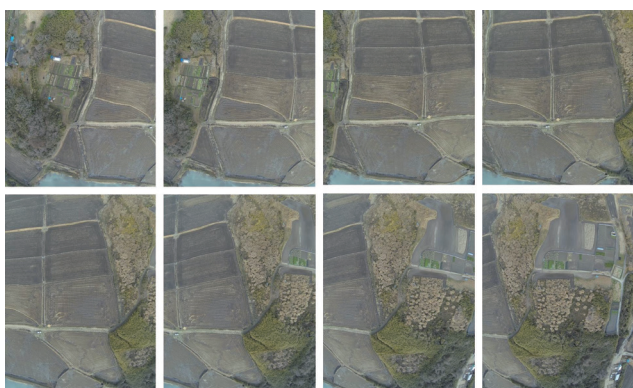


図 73 宝篋山麓の上空 100 m から中画角の GoPro Hero3 で撮影した 8 枚の空撮写真. 隣接する画像のオーバーラップ率は 80 %

Fig. 73 Aerial photos taken from 100 m above the ground with GoProHero3 (medium FOV) at a foot of Mt.Hokyo. Each photo overlaps 80 % to the adjacent photos.

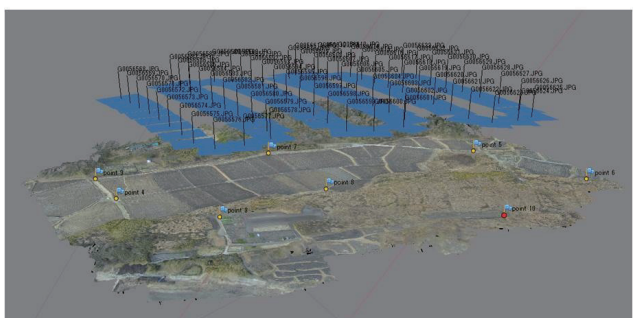


図 74 宝篋山麓の高度 100 m からミッションのルート沿いに撮影された 66 枚の写真を PhotoScan で処理して得られたオルソモザイク写真

Fig. 74 Orthophoto obtained by PhotoScan applied to the 66 aerial photos taken from 100 m above, along the predefined route of the mission at a foot of Mt.Hokyo. Camera positions are also shown by blue rectangles.

次にこうして得られた 66 枚の画像の PhotoScan による処理結果を示す. 図 74 の上下は, 再構成された三次元モデルに写真のテクスチャを張り付けたオルソ画像および各写真の撮影位置を真上および斜め横から見た図である. この時点ではスケールも GCP (Ground Control Point) も指定されていないオルソモザイク写真である.

次にオルソモザイク写真上で適当に 6 カ所の GCP (Ground Control Point) 地点を選び, それぞれに Google Earth から読み取った位置座標 (緯度, 経度, 標高) を与え, 地形モデルとして Geo-Tiff ファイルに保存した. この地形モデルを GIS ソフトウェアの GlobalMapper 上で処理し, 0.5 m 間隔のコンターマップを作成したものが図 75 である. 今回設定した GCP は十分な位置精度を持つものではないが, 隣り合う田の 0.5 m 程度の段差までもが明瞭に再現されていることがわかる. ただし樹木に覆われた場所は, 地表面ではなく樹冠表面がモデル化されている. すなわち得られたモデルは DTM (Digital Terrain Model) ではなく DSM (Digital Surface Model) である点に注意を要する. 今後国土地理院の標高点および現場での測量による正確な GCP を設定し, 高精度の地形図を作成する予定である.

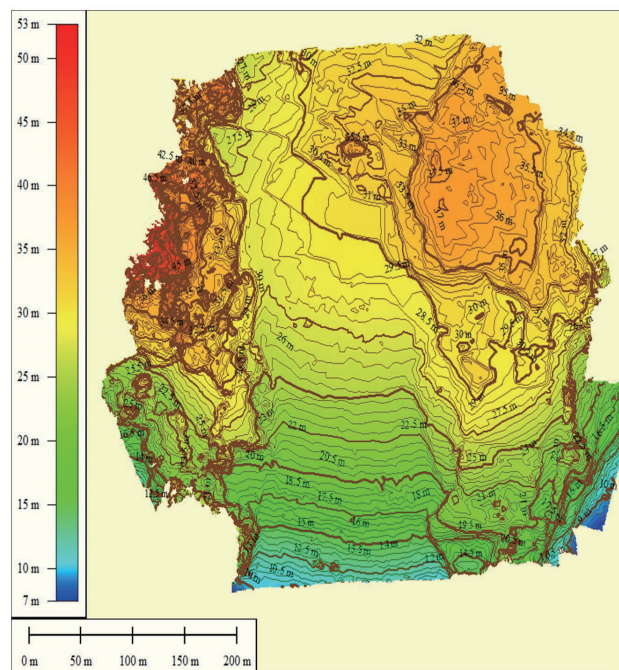


図 75 PhotoScan によって作成された宝篋山麓の調査地域の DSM を GlobalMapper で等高線間隔 0.5 m でプロットした図

Fig. 75 Digital Surface Model of the survey area at a foot of Mt.Hokyo generated by PhotoScan and plotted by GlobalMapper at 0.5 m contour interval.

本例ではマルチコプター空撮と SfM 技術を利用した DSM ソフトウェア (PhotoScan) を用いて、高精度な地形図 (DSM) が簡単に作成できることを示した。SfM を用いた地形図作成技術の詳細に関しては内山・他 (2014a) に、その具体的な活断層地形図作成への適用が内山・他 (2014b) に解説されている。

7. 議論とまとめ

本論文ではマルチコプター空撮調査に必要とされる機材、手動操縦方法、自律飛行装置、安全対策と関連法規、ならびに調査の事例を示した。マルチコプターは近年の性能向上と低価格化により、今後各種災害調査研究のための標準的なツールとして急速に普及が進むことが期待される。一方、現在のマルチコプターはシステムの不具合や人為的なミス等の様々な要因による墜落の可能性を無視できず、人や物に衝突した場合は大きな事故となり得る。現状の機材が持つ安全性のまま広く普及した場合には事故の多発は不可避である。機械的な安全性や飛行制御装置の信頼性を向上させることはメーカーの役割であるが、安全運行に必要な運用技術の向上、つまり安全管理、調査プロセスや各種法令の遵守、保険への加入、ならびにより安全な機材の選択は我々利用者の役割である。

6 枚以上のローターをもつ大型の機体は大きなカメラを搭載することができ、風に対する安定性が高く、1 個のローターの故障ではすぐには墜落しないというメリットがある一方、重量が大きいため墜落時の衝撃も大きい。むしろ調査の目的に応じた必要最小限・最軽量のカメラと機体を用いることにより、事故の際の危険性を減ずるべきであろう。人家や道路の近くを飛行させざるを得ない災害調査等の場合は、飛行時間を犠牲にしてでもプロベラガードを装着し、かつ十分安全なバッテリー電圧・飛行時間の範囲内で運用するべきである。また、本格的な撮影調査を行う場合はバッテリー電圧のテレメトリは必須である。

現状のマルチコプターの飛行制御装置の機能と信頼性のレベルでは、手動操縦に習熟していることも不可欠である。シミュレーターやトイラジコンもあり、必要な技術レベルに達することは容易になった。またプロポのスティック操作に対する習熟だけでなく、自動帰還や自動操縦などの機能の理解と、自動

操縦中に発生する非常事態に臨機応変に対応する技術についても習熟が必要である。

本格的な写真測量調査を安全かつ効率的に実施するためには自律航行システムは不可欠と言える。手動操縦で無駄のない正確な航跡で飛ばすことは難しく、操縦者は緊張の持続を要求されるため事故の確率も高くなる。自律飛行システムでは無駄のない効率的な飛行ルートが取れるため、トータルの飛行時間が減り、事故の確率を下げるができる。本論文で紹介した APM および Mission Planner にはカメラの画角に応じて自動的に航行ルートを設定するなど、空撮調査に便利な機能も多くある。一方で現状では未完成の部分やシステムの不具合もあるため 100 % の信頼を置くことはできない。使用する機能を十分テストした上で調査に活用しなければならない。

安全性確保の観点から我々が実施すべきことのひとつに事故例の共有がある。本論文では我々の経験した事故例をいくつか紹介した。これらの事故を経験しなければ事前の事故対策を考えることもなく、実際の大きな人身事故等に至っていた可能性もある。実機の航空機と同様に、事故原因を分析して対策を講ずることが、将来にわたり事故を減らすために重要である。単独のグループによる事故の経験は限られるため、マルチコプター空撮調査を行うコミュニティが事故例とその分析を共有することが望まれる。

小型 UAV にはマルチコプターのほか、本論文では扱わなかった固定翼機がある。固定翼機は速度が大きく、同容量のバッテリーでも長時間・長距離の飛行が可能で、広範囲の調査により適している。マルチコプターのような低速の飛行はできないが、現在のカメラは固定翼機でも十分な枚数の撮影ができるだけの短い時間間隔での撮影が可能である。固定翼機の最大のメリットは機体が発泡スチロール製であることによる、より高い安全性である。現在 sensFly 社の eBee (sensFly online: ebee.html) など、航空地形測量用に開発された固定翼機が市販されているが、高価である点と、使われている無線通信機器が必ずしも日本の電波法に適合していない点に課題がある。しかし、固定翼の機体自体は安価に入手可能なため、本論文で紹介したマルチコプターと同様に、自律航行装置を組み込んだ安価で簡便な写真測

量用固定翼機の製作・利用技術の向上が望まれる。

以上見てきたように、GPS 飛行制御装置を備えたマルチコプター、小型高解像度のデジタルカメラ、写真から立体モデルを再構築する SfM ソフトウェアの 3 つの技術の統合により、従来は困難だった高精度の地形測量や空からの災害調査が容易にできるようになった。今後はこの技術の普及のための安全対策の徹底と、さらなる活用のための、固定翼を含めた利用技術の向上が望まれる。

謝辞

様々な情報を提供していただいた中田高広島大学名誉教授をはじめとする「低空空撮技術活用研究会」のメンバーならびに赤崩空撮調査に協力していただいた防災科学技術研究所の土志田正二氏に謝意を表します。また、第 7 章の赤崩の LP データは筑波大学が 2007 年に撮影したものである。同大の西井稔子氏にはデータの提供および赤崩の調査におけるご協力をいただいた。合わせて筑波大学農林技術センター井川演習林に謝意を表します。

参考文献

- 1) 井上 公・今井 弘・佐藤正義 (2012) : 東日本大震災による津波被災地の低空空撮. 防災科学技術研究所主要災害調査, **48**, 105-110.
- 2) 内山庄一郎・井上 公・鈴木比奈子 (2014a) : SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査へ

の活用可能性に関する研究. 防災科学技術研究所 研究報告, **81**, 37-60.

- 3) 内山庄一郎・中田 高・井上 公・熊原康博・杉田 暁・井筒 潤・後藤秀昭・福井弘道・鈴木比奈子・谷口 薫 (2014b) : 小型 UAV と SfM ソフトウェアを用いた断層変位地形把握の試みー根尾谷断層水鳥断層崖を例にー. 活断層研究, 印刷中.
- 4) DJI Phantom
<http://www.dji.com/phantom-all/>, 2014.1.5
- 5) DJI F450/F550
<http://www.dji.com/product/flame-wheel-arf/>, 2014.1.5
- 6) 3DR Quad, APM2.6
<http://3drobotics.com/>, 2014.1.5
- 7) APM Copter ArduCopter
<http://copter.ardupilot.com/>, 2014.1.5
- 8) sensFly, eBee,
<https://www.sensefly.com/drones/ebee.html>, 2014.1.5
- 9) 国土交通省東京航空局より「制限表面概略図」
<http://www.cab.mlit.go.jp/tcab/info/02.html> 2014.2.15

(2014 年 1 月 6 日原稿受付,
2014 年 2 月 25 日改稿受付,
2014 年 3 月 10 日原稿受理)

要 旨

本論文は、小型ラジコン電動マルチローターヘリコプター(マルチコプター)を用いた空撮技術を解説し、いくつかの調査の実例を示した。最近安価なマルチコプターにも GPS 位置制御装置が搭載されて操縦が格段に容易になり、自動帰還や自律航行も可能となった。さらに、コンパクトデジタルカメラの小型高性能化と、写真による三次元モデル再構成技術により、低空空撮による災害記録や、地震断層や地すべりなどの高精度の地形測量が可能となった。本報告では、マルチコプターの導入と運用に必要な基本技術、マルチコプターを用いた空撮技術、安全な運用のための対策と注意点、遵守すべき関連法規、ならびに実際の調査事例を解説した。マルチコプター空撮技術は今後急速に普及することが予想されるため、安全な運用と法令順守が最優先とされることを期待する。

キーワード : マルチコプター, UAV, 空撮, 写真測量, 災害調査