

官民連携新技術研究開発事業

農業水利施設及び海岸保全施設の
ストックマネジメントのための無人航空機（UAV）
の活用の手引き(案)

平成 29 年 3 月

国際航業株式会社
国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
公立大学法人 秋田県立大学

目 次

1. 手引きの目的と適用	1
1.1 手引きの目的	1
1.2 手引きの適用	2
1.3 UAV の概要(回転翼のマルチコプターと限定).....	2
1.3.1 代表的な種類	2
1.3.2 機器構成	4
1.4 用語の定義	4
2. 実施方針	6
2.1 手順.....	6
2.2 目標の設定	7
2.2.1 参照手引き	7
2.2.2 目標設定	7
2.2.3 安全管理方針	8
3. 事前準備	9
3.1 事前調査	9
3.1.1 現地踏査	9
3.1.2 関連法規 概説と一覧表	12
3.2 使用機器	14
3.2.1 UAV	14
3.2.2 デジタルカメラ	15
3.2.3 写真測量ソフトウェア	16
3.3 作業計画	17
3.3.1 検討項目	17
3.3.2 地元説明及び調整	22
4. 画像撮影	23
4.1 基準点の整備	23
4.2 UAV 撮影計画	23
4.2.1 地上解像度	23
4.2.2 画像間ラップ率	24
4.2.3 飛行方法	24
4.2.4 撮影インターバル	25
4.2.5 画質調整	25
4.2.6 水利施設における撮影方法	27
4.3 UAV 操作時の確認事項	29
4.3.1 機体の点検	29
4.3.2 現地の状況	29
4.3.3 撮影計画と現地の整合性	30
4.3.4 人員配置および操縦者の技量	30
4.3.5 チェックシート	30
4.4 撮影後の画像点検	31
4.4.1 撮影画像の状況点検	31
4.4.2 撮影画像の品質点検	31
5. 画像処理	33

5.1 SfM 処理	33
5.1.2 入出力のデータフォーマット	34
5.2 主要成果品と活用方法	35
5.2.1 データ活用方法	35
5.2.2 画像データ	36
5.2.3 三次元点群データ	40
5.3 SfM 処理の留意事項	47
5.3.1 撮影範囲	47
5.3.2 キーポイントマッチング処理	47
5.3.3 画像の位置情報	48
6. 画像処理による施設変状への活用方法	49
6.1 コンクリートのひび割れ	49
6.1.1 ひび割れの判読	49
6.1.2 ひび割れの計測	50
6.2 不同沈下	51
6.2.1 不同沈下の計測方法	51
6.2.2 三次元モデルの標高精度	52
6.2.3 留意事項	52
6.3 その他変状	54
6.3.1 材料劣化	54
6.3.2 目地の劣化	54
6.3.3 周辺地盤	54
6.3.4 雑草・堆積	54
7. 調査事例	55
7.1 作業計画書の記載例	55
7.2 UAV 撮影による施設点検事例	60
7.2.1 海岸堤防	60
7.2.2 開水路の変状検出	71

1. 手引きの目的と適用

本手引は、平成 26 年度官民連携新技術研究開発事業において開発した、無人航空機（UAV: Unmanned Aerial Vehicle）を活用した農業水利施設及び海岸堤防の点検効率化技術を、ストックマネジメントの事業現場において効果的また事故のないよう適切に利用してもらうために取りまとめたものである。UAV 及びその利用技術は急速に進歩しており、更に今後も技術開発が進められることは間違いない。このため、ストックマネジメントにおける UAV の活用にあたっては、本手引にこだわらず最新の技術情報を収集し対応することが重要である。

1.1 手引きの目的

現在、農業用水を供給する農業水利施設のうち、基幹的な農業用排水路の延長は約 5 万 km、ダム、頭首工、用排水機場等は約 7 千箇所、その資産価値は 18 兆円と推計されている。また、全国約 1.4 万 km の海岸保全施設のうち、約 1,600km を農地海岸として農村振興局が所管している。これらの農業水利施設や海岸保全施設の相当数は戦後集中的に整備されてきたことから、老朽化が進行し更新を必要とする時期を迎える施設が近年増加してきている。

増加する更新需要に対して、施設の長寿命化を図ることによって財政負担を平準化しつつ施設の有効活用を図ることが重要となり、そのための機能保全コストの一層の節減が求められている。農林水産省では、平成 19 年度から、予防保全の手法を取り入れた長寿命化等の取組として、農業水利施設整備事業等によってストックマネジメントを実施しているところである。

ストックマネジメントのサイクルは、施設管理者等による日常管理（継続的な施設監視を含む）、施設の状態を継続的に把握するために施設造成者等が定期的に行う機能診断、診断結果に基づく劣化予測、効率的な対策工法の比較検討、これらを取りまとめた機能保全計画の策定、施設監視並びに機能保全計画及び施設監視結果を踏まえた適時適切な対策工事の実施によって構成されている。このうち、日常管理や定期点検によって施設の劣化状態を把握することが、ストックマネジメントの起点となり、施設の全てが対象となる。

施設の点検の多くは、目視、打音検査、測量等で行われるが、農業水利施設や海岸保全施設の中には、人のアクセスが困難な場所や、測量では十分な情報が得られない場合がある。平成 27 年 3 月に農林水産技術会議において決定された農林水産研究基本計画では、農業水利施設の難アクセス区間の省力診断技術の開発を、今後 5 年間程度で技術開発と実用化を図るべき研究開発の重点目標の一つとして掲げている。

このようななか、UAV の移動体を使った新たな点検手法は、人のアクセスが困難な場所への点検を可能にするとともに、点検作業の飛躍的な効率化と低コスト化を図る有望なものとなる。UAV は、対象物に接近して画像を撮影し、単に目視による点検の代替手段となるだけでなく、上空から俯瞰した画像から三次元形状データを取得することができるため、構造物の沈下や傾きなどの施設全体

の変状把握にも利用できる。

本手引では、このような UAV の特長を活用した、開水路の不同沈下・海岸堤防の不同沈下と、アクセス困難な区間のひび割れ等の劣化の検出技術を中心に解説したものである。また、これらの技術は、難アクセス区間のある大規模なコンクリート構造物のひび割れや剥離・剥落、水準測量では捉えにくい農道や農地の不同沈下等に対しても適用できるものが多いため、UAV のストックマネジメントへの活用のきっかけとなることも本手引の目的である。

1.2 手引きの適用

本手引きは、農業水利施設および海岸保全施設である堤防・護岸を対象に、

- ①中長期的に施設の機能を適切に保全する事業等を担う施設造成社
- ②施設の利用と日常管理を行っている施設管理者
- ③地方公共団体などの施設の整備や利用に関係する機関

等の技術者が、「農業水利施設の機能保全の手引き」に従い、ストックマネジメントの点検の全部もしくは一部を UAV にて実施する際に参考として利用するものである。なお、現時点では、UAV による計測のうち、写真測量技術を活用する際に限定するものとする。

1.3 UAV の概要（回転翼のマルチコプターと限定）

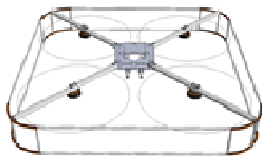
1.3.1 代表的な種類

回転翼の UAV の主な機器を表 1.1 に一覧とする。回転翼は、プロペラの数や大きさによって特徴がある。

プロペラの数が多くなれば安定した飛行やきめ細かな動きをすることが可能であるが、プロペラの駆動数が多いためバッテリーの消費が大きくなり飛行する時間は短くなる。

また、1つのプロペラが故障した場合でも直ぐに落下することを防ぐには、浮力を得る必要があり、そのためには機体の大きさが大きいほど浮力を得やすくなり、安定した飛行が可能となる。ただし、機体が大きくなるにつれて消費電力も増大することから、上述と同様に飛行時間は短くなる。

表1.1 主な UAV 機器

機 種	α-UAV (アミューズ・ワンセルフ社) 	Phantom2 (DJI社) 	Phantom4 (DJI社) 	Zion QC730 (エンルート社) 	Zion PG700 (エンルート社) 
最大航行距離	2,000m	1,000m	1,000m	30km	30km
最長飛行時間	23分	25分	28分	最大40分	最大30分
最大航行速度	6m/s	6m/s	20m/s	10m/s	10m/S
自動航行	○	×	○	○	○
最高到達高さ	250m	150m	600m	250m	250m
手動航行範囲	500m以内	100m以内	100m以内	250m以内	250m以内
測位システムの有無	○ GPS/IMU	○GPS	○GPS	○GPS/IMU	○GPS
機 種	SPIDER (ルーチェサーチ社) 	TORNADO/H920 (YUNEEC社) 	Soleil-8(クリスタルテックUAV社) 	MS-06LA (ミニサーベイヤー) 	Falcon (情報科学テクノシステム社) 
最大航行距離	2.5km	10.0km	15km	2.5km	2.5km
最長飛行時間	約15分	TYPHOON H(22分) TORNADO H920(30分)	Soleil-8(30分) Soleil-6(30分) Soleil-4(15分)	15分	10分～25分
最大航行速度	8m/s	TYPHOON H(10m/s) TORNADO H920(11m/s)	8m/s	8m/s	8m/s
自動航行	○	○	○	○	○
最高到達高さ	250m	122m(400ft)	150m	150m	250m以内
手動航行範囲	500m	250m	250m	250m	250m
測位システムの有無	○GPS/IMU	○	○	○	○

1.3.2 機器構成

UAV は図 1.1 に示す機器により構成されている。本体は、カメラや記録ボード、バッテリーなどを搭載しており、この機体の運航を制御するために操縦装置（プロポ）がある。操縦装置から無線で機体に運航を指示することができる。

また、UAV 機体で撮影した画像を地上局に配信するために、地上モニターセットがある。このセットは、画像を送信するアンテナ（アナログ、デジタル）と撮影画像を確認するためのモニターで構成されている。モニター画像は実際に撮影した画像と比較すると解像度は劣るものの、被写体の対象物を確実に捕らえているかは確認することができる。



UAV 機体



操縦装置（プロポ）



地上モニターセット

図1.1 UAV の機器構成の例

1.4 用語の定義

本手引きでは、次のとおり用語を定義する。

UAV :

(Unmanned Aerial Vehicle) の略称で、人を搭載せず、自律航法か遠隔操作航法で飛行する飛行体のことである。

SfM :

(Structure from Motion) の略称で、動画や静止画等カメラで視点撮影した複数枚の画像から、そのシーンの三次元形状とカメラ位置を同時に復元する要素技術である。

三次元モデル :

一般的には、地形を三次元的に表現した DEM や地表面を計測した DSM に分かれる。近年では、前記の SfM ソフトによって計算される三次元点群データのことを三次元モデルと表現する場合もある。

水準測量 :

水準測量とは、レベル (level : 水準儀ともいう) と標尺 (leveling staff : スタッフともいう) を用いて行う高さを計測するものをいう。レベルとは、望

遠鏡の視準線を水平にし、この水平視準線により、2 点間に鉛直に立てられた標尺の目盛を正確に読み取る器械のことをいう。

GNSS :

GNSS (Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム) とは、GPS、GLONASS、Galileo、準天頂衛星 (QZSS) 等の衛星測位システムの総称をいう。

GCP :

GCP (Ground Control Point) とは、人工衛星画像や航空写真などの正確な位置関係を調べるために測定する地上の点をいう。

CCD :

CCD (Charge-Coupled Device) とは、光をデジタルに変換するセンサー、撮影素子をいい、これに受光素子や微細なレンズなどを組み合わせた撮像素子である CCD イメージセンサーのことを CCD と略することが多い。

CMOS :

CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) とは、CCD と異なる方式の光をデジタルに変換するセンサー、撮影素子をいう。

地上解像度 :

地上解像度とは、デジタル画像を取得する際の、1 画素あたりの地上での一辺の距離をいう。

オーバーラップ (OL) :

本手引きでいうオーバーラップ (OL) とは、ドローンで撮影した写真の進行方向の重なりをいう。

サイドラップ (SL) :

本手引きでいうサイドラップ (SL) とは、ドローンで撮影した写真の側方走行の重なりをいい、オーバーラップ (OL) に対して垂直方向のものをいう。

ストックマネジメント :

施設の管理段階から、機能診断を踏まえた対策の検討・実施とその後の評価、モニタリングまでをデータベースに蓄積された様々なデータを活用しつつ進めることにより、リスク管理を行いつつ施設の長寿命化と L C C の低減を図るための技術体系及び管理手法の総称。

2. 実施方針

2.1 手順

施設構造物の変状把握は、対象物と把握すべき変状及びその精度を明確にしたうえで、対象物及びその周辺環境を事前に調査し、所要精度等を考慮しつつ、UAV その他の適切な機器の選択、飛行のルート及び高度の計画策定、地上基準点の設定を行い、画像撮影（飛行）、三次元モデルの作成、三次元モデルの分析による変状検出の手順で行う。

まず、対象物の不同沈下、ひび割れの検出等の目的を明確にし、取得すべき画像の解像度や三次元モデルの精度を決定する必要がある。目的を達成するために必要な機器やソフトウェア、画像の取得位置等を検討するとともに、対象物周辺の状況や対象物の状態を調査し、UAV の飛行が可能な区域や時間帯、変状検出が可能な画像取得の可能性を考慮して、実施計画を策定する。

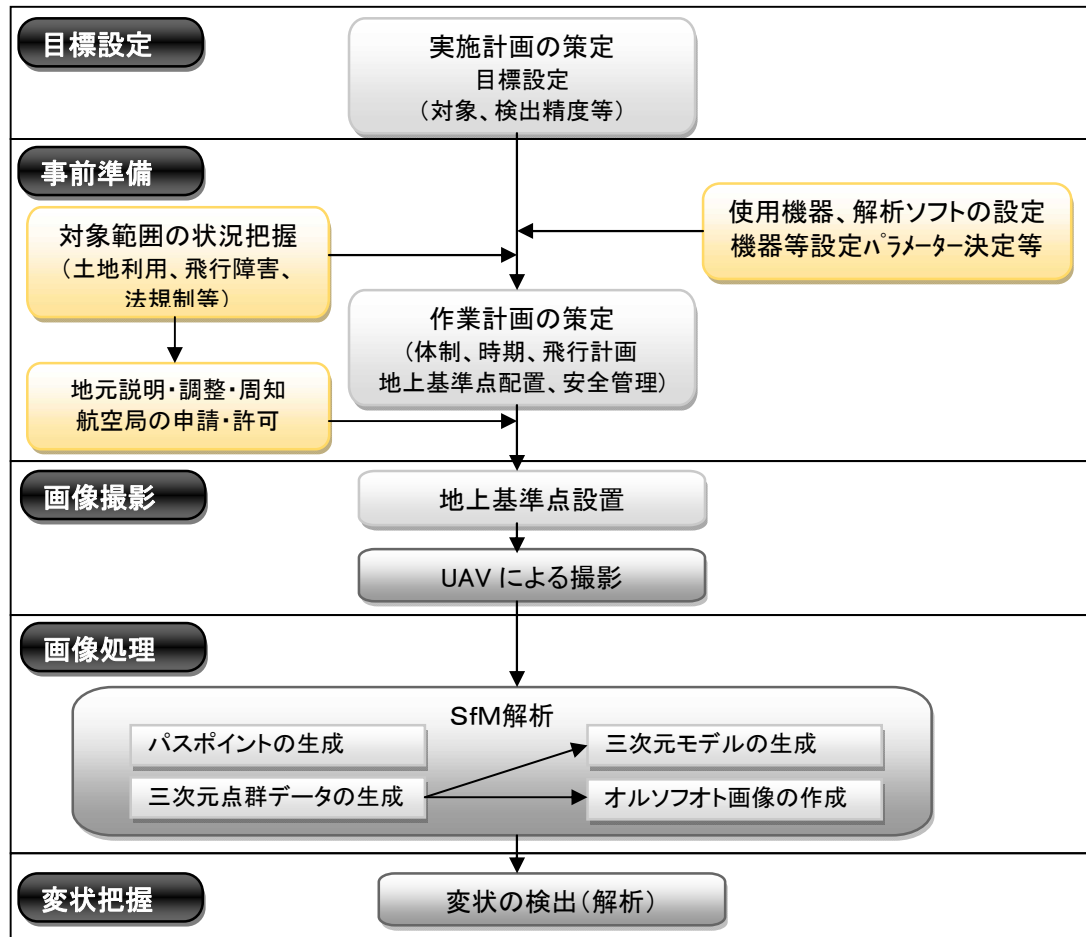


図2.1 UAVによる変状把握の手順

2.2 目標の設定

外的変状の1次的な点検が目的であり、コンクリートのひび割れの検出、構造物の沈下や傾きの程度の把握が対象になる。コンクリートのひび割れの検出精度は、農林水産省が発行するストックマネジメント関連の手引きに従う。また、構造物の沈下や傾きについては、それぞれの構造物の構造、機能、補修方法等を考慮し合理的な精度を設定する。

2.2.1 参照手引き

○水利施設については、以下の手引きを参照する。

- ・農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」（平成28年8月）
- ・農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工」（平成28年8月）
- ・農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工(ゲート設備)」(平成22年6月)
- ・農業水利施設の機能保全の手引き「頭首工(ゴム堰)」（平成25年4月）
- ・農業水利施設の機能保全の手引き「ポンプ場(ポンプ設備)」(平成25年4月)

○海岸保全施設については、以下の手引きを参照する。

- ・海岸保全施設維持管理マニュアル～堤防・護岸・胸壁の点検・評価及び長寿命化計画の立案～（平成26年3月）
- ・ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル（案）～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～（平成20年2月）

2.2.2 目標設定

1次点検及び2次点検の変状検出の目標は、表2.1に示すとおりとする。

表2.1 変状検出の目標

施設	調査項目	1次点検	2次点検 (現地調査)
開水路	欠損、崩壊 不同沈下	有無把握	局所的 or 全体把握
	ひび割れ	1mm 以上	幅 0.2mm 以上 延長を計測
	目地劣化	有無把握	幅等を計測
	周辺地盤	有無把握	局所的 or 全体把握
	雑草・堆砂	有無把握	－
海岸堤防	高さ		測量
	ひび割れ	5mm 程度以上	幅 1mm 以上 基礎工は 0.2mm 延長を計測
	目地	有無把握	幅等を計測
	沈下・陥没	有無把握	深さと範囲を計測
	雑草・堆砂	有無把握	範囲と高さ

* 参考目標は手引きに示す二次点検または詳細点検に準る。

2.2.3 安全管理方針

建物、人の往来、交通状況、空港周辺では、飛行制限区域の確認を行い、関係機関と十分に調整を図るとともに、仮に UAV の落下や予期せぬ妨害に遭遇した場合を想定した対応方策を十分に検討する。

現在、国等の安全性基準が未整備の段階であり、日本写真測量学会から、「測量調査に供する小型無人航空機を安全に運航するための手引き」が策定されている。

飛行を実施するにあたっては、この手引きを十分に理解した上で必要な対応をとる。また、UAV の利用者は、機体の特性を十分に理解し、自らの技量（操縦能力、状況判断能力、問題回避能力等）を適切に認識したうえで安全に運行させることが必要である（UAV の飛行の安全確保については、4.3 に詳述する）。

3. 事前準備

3.1 事前調査

UAV の飛行、画像撮影、画像処理に影響を与える障害物等の状況、周辺の道路、鉄道、高圧線、飛行場等の重要インフラの敷設と運用状況を調査する。特に、人、自動車の往来、建物等の調査は、万一の UAV の落下等を想定した視点で行う。また、UAV の飛行に係る関連法規への対応について措置する。

3.1.1 現地踏査

(1) 飛行周辺環境

UAV は、何らかの理由で墜落する恐れがあるため、対象地区の環境を把握し安全を確保できる対応策を講じる必要がある。下表に示す施設や環境である場合には、UAV が使えないことも考えられるので、第三者で管理したり、UAV を監視したりするために多くの監視員を配置し、飛行の可否を判断しなければいけない。

表3.1 UAV 飛行範囲の注意すべき環境条件等

周辺環境等	想定される施設等	対 応 策
第三者の多い場所及び重要施設	住宅・市街地、観光地、交通施設、集客施設や行事事会場、空港関連施設、発電施設、鉄道、高速道路及び幹線道路、防衛施設等	○鉄道及びその周辺では、UAV の見張員を配置し、列車が走行していない時間帯に行う。 ○高速道路及びその周辺では、UAV の見張員、交通誘導員を配置し、車の走行を規制して行う。 ○集客施設及びその周辺で飛行する場合は、閉鎖あるいは閉鎖している時間帯に行う。
電磁場に影響を与える施設	鉄塔、架線、送電線、電波塔、Wi-Fi 基地局、大規模工場、大規模鉄骨構造物、強力な磁力、電波を反射する施設	これらの施設上空、周辺では飛行を行わない。 (実施する場合は、プロポ使用周波数帯 2.4GHz との電波干渉を事前に検討する) (鉄骨構造物は地球磁場に異常を来たすことがある)
安全な飛行を妨げる生物の存在	集団で営巣している鳥類 子育てをしている鳥類 縄張り意識が強い鳥類 飛行により動揺する家畜	○事前に自然環境調査(環境庁)等資料より鳥類の分布を把握する。 ○飛行中に鳥類が近接してくる場合はマニュアル操縦により回避する。

(2) 衛星測位状況 観測時間帯

UAV は、機体の安定性を保持するため、ケアフリー（C F）機能やポジションホールド（P H）機能が装備されている。これらの機能は、GPS 衛星電波を受信して機体の状態や操作を補助する機能であるが、衛星補足数が低下すると補助機能が効果を発揮せず機体の制御が困難となる。そのため、必ず現地調査では離発着周辺の樹木や起伏を考慮してGNSS 補足数を確認する必要がある。GNSS 補足数は、6 個以上を原則とし、5 個以下となる時間帯では UAV の飛行を回避する。

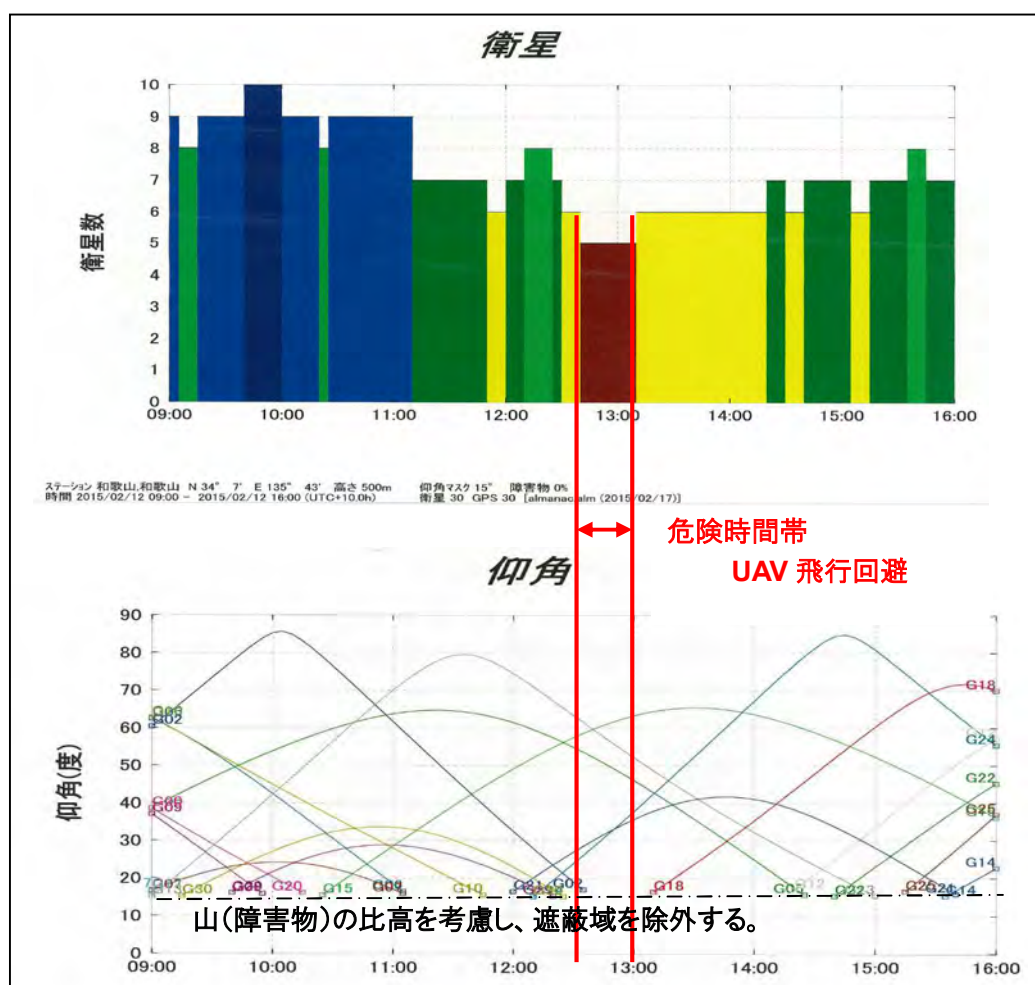


図3.1 GPS 衛星の状況把握例

(3) 撮影障害要因 植生、水面、対象物性状（色、材質など）

対象物と UAV の間の樹木や対象物の近傍又は表面に植生が繁茂・被覆し、構造物の表面形状を捉えることができない場合がある。その場合は、出来るだけ除去しておく必要がある。

対象物の周辺に、噴煙や波などの動くものがあり、それらが含まれている画像は、SfM の完全な自動処理が難しく、良好な結果を得られない場合が多いことが知られている（飛田ら、2014）。対象物周辺の樹木についても同様

な効果があると考えられるため、事前に樹木の種類、樹高及び樹形並びに位置を把握しておくことが重要である。一方、水利構造物や海岸堤防の周辺には水面があり、波の影響は避けられない場合が多い。

(4) 墜落対策

① 飛行コース

やむをえず事故が起こると甚大な被害となるので、施設周辺を飛行させる場合は下図の回避構造物の距離を参考として飛行する。

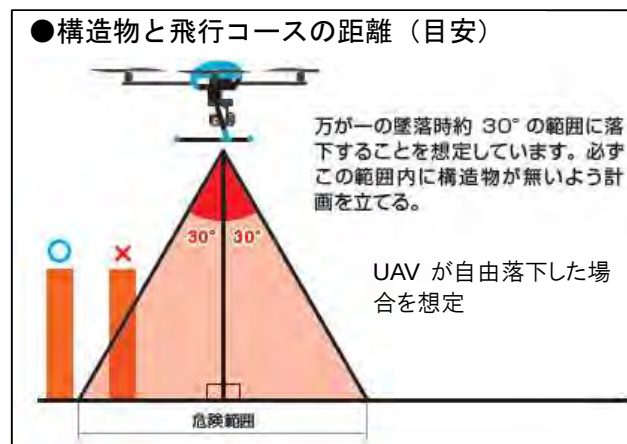


図3.2 地上の構造物と飛行コースの距離

② 緊急時の着陸場所

UAV は、磁場の影響や GNSS の捕捉不足等の原因で挙動が不安定な状態になるため、そのような状態になった場合には緊急に着陸させる必要がある。事態はいつ起こるかわからないので、離発着の場所の他に数箇所は選点しておく必要がある。着陸場所は、できるだけ水平な場所が望ましいが、やむをえない場合もあるので傾斜のある場所も候補地とする。

3.1.2 関連法規 概説と一覧表

法令の効力は強い順に、憲法、条約（シカゴ条約：憲法第98条第2項に規定）、法律（航空法など）、省令（航空法施行規則）、条例（地方自治体）の順で優先される。また、特別法は、一般法より優先される。以下には、無人航空機に関係する主な国内法を列挙する。

(1) 航空法（施行規則）

航空法自体の改正と航空法施行規則の一部を改正した省令により、2015年12月10日施行として、この法律により、無人航空機の定義、飛行禁止空域、飛行方法を制定。これら禁止空域や飛行方法を行う場合は、事前に申請し許可・承認が必要となる。申請は、原則飛行予定の10開庁日前までに提出し、許可期間は原則3ヶ月とし、最長で1年を限度とする。本法律に関する詳細は、国土交通省航空局のホームページを参照してください。

(2) 小型無人航空機飛行禁止法（議員立法）

この議員立法は、首相官邸に小型無人機が飛来した事により、危機感から急遽成立した法律である。内容としては、飛行禁止対象と範囲を具体的に定めている。国の重要施設（国会議事堂、内閣総理大臣官邸、最高裁判所、皇居・東宮御所、対象政党事務所、対象危機管理行政機関（機関、庁舎を政令で規定）、外国公館等、原子力事業所など）と対象施設周辺地域として、対象施設の敷地又は区域の周囲300mを基準とする。

(3) 道路交通法

この法律は、小型無人航空機を離陸着陸する場所を、道路上にて行う場合と、小型無人航空機が道路上空を横切る又は飛行する場合に必要となる。

特に、第七十七条一と四を参考にすること。

過去の事例では、航空局に小型無人航空機の飛行申請を行った時に、道路上を跨ぐ飛行をすると申請した場合、交通規制をするように指導を受けた。この場合は、この道路交通法の道路占有許可申請を行うこととなる。

(4) 個人情報保護法

小型無人航空機の場合、デジタルカメラを搭載し映像や写真を撮影する機能を有するものが多く、撮影した映像や写真上に個人を特定するものがあることが想定される。具体的には、撮影の際に被撮影者の同意を得ることを前提とし、同意を得ることが困難な場合は、以下のような措置を講じる。

- ① 人の顔や車のナンバープレート等はプライバシー侵害の可能性がある
のでボカスなどの配慮が必要。表札、住居の外観、洗濯物その他生活状
況を推測できるような私物もプライバシーとして法的な保護対象となる。
- ② 特に、小型無人航空機による撮影等インターネット上に公開するサービ
スを提供する電気通信事業者は、削除依頼に対する体制を整備すること。

(5) 電波法

電波法で注意しなければならない点は、専門的な言い方をすれば、「無線局の開設」をする者は総務大臣の免許を受けなければならないと言うことが、第4条に記載されている。これは、小型無人航空機に搭載するカメラのファインダー映像を地上で受信して確認するときなどにあたる。この場合も正式には免許を受けなければならない。ただし、第4条の一と三に定める微弱無線局に関しては、その限りでない。また、特定省電力無線局の場合も発信機器に適合表示無線設備として技適マークが貼られたものを使用すること。

(6) 民法

民法においては、非常に重要な土地の所有権に関する法令を理解した上で小型無人航空機を飛行させなければならない。

- ① 第207条：土地の所有権は、法令の制限内において土地の上下におよぶ。
- ② 有人航空機は、航空法において公共性のためこの条項は適用されないとされている。しかし、小型無人航空機に関しては、公共性を謳うことは無理があり、上空を飛行させるのは現状、全ての地権者の承諾が必要となる。

(7) 外為法

小型無人航空機は、最先端技術（飛行制御装置、ジャイロやその他のセンサー等）が集積されたものであり、特定技術を特定国及び特定組織に販売する場合、経済産業相の許可が必要となる。要するに、海外に小型無人航空機を持ち出す場合や販売する場合は注意が必要となる。

(8) 産廃法

産廃物の抑制、処理責任に関する法律に小型無人航空機は関連する。小型無人航空機自体を廃棄する場合、バッテリー等の扱いも含め産廃の対象になるので、むやみに不法投棄をすれば罰則の対象となる。

3.2 使用機器

UAV によって施設構造物の変状を把握するためには、UAV 本体、飛行中に対象物のオーバーラップ画像を取得するため 1～数秒間隔で撮影できるデジタルカメラ、カメラの方向を変えるジグ及びこれらを地上から操作するシステム一式が必要である。また、撮影した画像から三次元形状データ（三次元モデル）を生成するためには、SfM（Structure from Motion）ソフトウェアを使用する。

3.2.1 UAV

UAV は、操縦者が搭乗せずに飛行するように設計された航空機の総称であり、形状や動力によって搭載可能な重量や飛行速度、可搬性、値段、操作性等に違いがある。このため、利用者や目的に応じて、適切なものを選択することが肝要である。

測量分野で利用されている代表的な UAV 数種類について利用上の特性が、表 3.2 のように評価されている（Nex and Remondino, 2014）。凧や気球は、動力を有し自律飛行のできる UAV が登場するまでは、上空から地上の状態を画像で把握する手段として色々な分野で利用されてきた（例えば、三浦ら、2004）。固定翼の UAV は、比較的高速で飛行するため広い面積をカバーすることができ、海岸線の上空からのモニタリングの際に約 20 km を飛行させた実証例がある（熊田ら、2010）。これに対して、回転翼の UAV は、他に比べて自由な飛行が可能であり、近年はいろいろな分野で利用が進められている。回転翼の UAV は、ロータの数によって、単回転翼、同軸二重反転翼及び 3 基以上を装備したマルチコプタがある。既に農業分野で実用的に利用されている農薬散布用の無人ヘリコプターも UAV のひとつである。

表3.2 測量分野で導入されている UAV の評価
（低い方から高い方までを 1～5 で評価）

	凧／気球	固定翼		回転翼	
		電動	エンジン	電動	エンジン
搭載荷重	3	3	4	2	4
耐風性	4	2	3	2	4
最低速度	4	2	2	4	4
自律飛行	—	3	5	2	4
可搬性	3	2	2	3	3
着陸距離	4	3	2	4	4

特に、農業水利施設や海岸堤防のストックマネジメントのなかで UAV を活用する際には、表 3.2 の評価項目以外に、操作性、落下した時の耐久性や発火等の危険性等も選択上の重要な要素となる。このため、土木構造物のストックマネジメントでは、測量等の様々な分野で急速に普及が進んでいる、電動で 4 枚又は 6 枚のロータを備え操作性の高い UAV を中心に、その活用を目指した技術開発が進められている。また、50kg の搭載可能な電動のマルチコ

ータの UAV が開発されており、重量のある様々な機材を搭載することも可能になりつつあり、益々適用範囲が広がることが予想される。

3.2.2 デジタルカメラ

UAV に搭載するデジタルカメラは、レンズ交換が可能な一眼レフカメラで、UAV の飛行高度（対象物までの距離）を考慮しつつ対象物の所要の解像度が得られるような画素数の撮像素子（CCD イメージセンサか CMOS イメージセンサ）を持ったものを使用する。

対象物の解像度と撮像素子の画素数とは次式の関係がある。ただし、色の認識に複数の画素を使う構造のものが多く、色による情報が重要なコンクリートのひび割れの検出のためには、より多くの画素数が必要になる。

$$\frac{P \times f}{C \times x} = 1$$

P = 対象物の解像度、 f = レンズの焦点距離、 C = 撮像素子の画素の大きさ、 x = 対象物までの距離。例えば、サイズ 17.3 mm×13.5 mm で画素数が 4,592×3,448 の撮像素子（4/3 型/LiveMOS センサー）のカメラを使用した時の上空から撮影した画像の解像度と撮影高さとの関係は、図 3.3 のようになる。ただし、総ての画素のうち一部（5%程度）は画像に使用されないものがあるが、図 3.3 はそれを考慮していない。

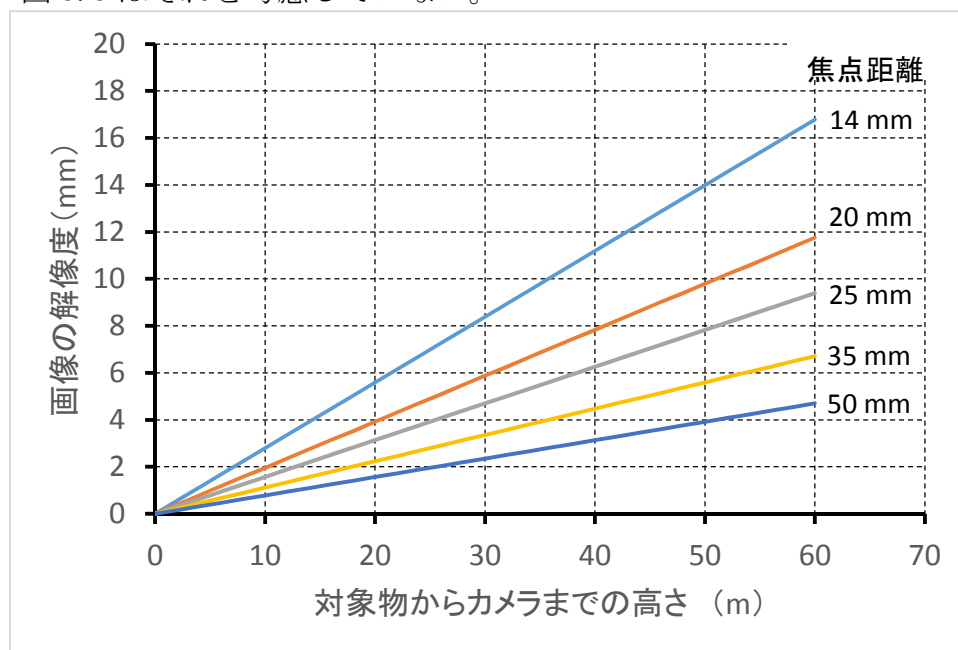


図3.3 4/3 型/LiveMOS センサー（サイズ 17.3 mm×13.5 mm で画素数が 4,592×3,448）の場合の対象物からカメラまでの距離に対する対象物の解像度

3.2.3 写真測量ソフトウェア

写真測量では、動画や静止画からカメラ撮影位置を推定し、三次元形状を復元する技術として SfM (Structure from motion) が使用され、市販のソフトウェアの他オープンソースからも入手できる。表 3.3 に、市販されている SfM ソフトウェアのうちの主な 3 種類の特徴を整理している。

表3.3 国内で使用されている主な写真測量用の SfM ソフトウェア

製品名	PhotoScan	Smart3DCapture	Pix4DMapper
開発社	Agisoft 社	Accute3D 社	Pix4D 社
開発国	ロシア	フランス	スイス
特徴	・最も低価格。 ・カメラレンズのキャリブレーション補正を解析処理時に同時に行わない。	・高い画像の処理能力 ・キャリブレーションを行い、高精度の画像処理。 ・優れた TIN 表示等によりビューワ表示が精細。	・撮影画像を用いた精細なキャリブレーション補正で極めて高精度。 ・国内及び欧米で実績が多い。

3.3 作業計画

作業計画は、現地調査を踏まえ UAV の飛行が可能な範囲や時間を定め、変状検出が可能な画像を取得するための全体の実施内容を立案するとともに、必要な作業体制を確保する。

3.3.1 検討項目

(1) 作業の目的

作業計画書の作成をイメージして追加

(2) 申請が必要な空域

空法で定める飛行ルールでは、下表の赤枠以外の空域で UAV の飛行を実施する場合には、航空局への申請・許可が必要となる。申請は、飛行の目的、日時、経路、高度、飛行禁止区域を飛行させる理由、操縦者の飛行経験・能力や機器機能および性能等に関する事項を記すものである(巻末資料参照)。

なお、許可・承認の申請手続きは、飛行開始予定日の10開庁日前までに申請書類を提出する必要がある。



図3.4 UAV 撮影における空域制限 (国土交通省 HP)

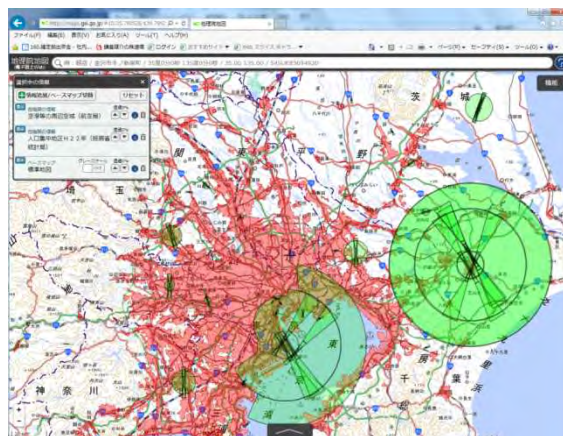


図3.5 地理院地図による人口集中地区・航空等の周辺空域 (国土地理院 HP)

(3) 1日当りの標準撮影等

① 撮影時間

○1 現場での撮影時間は、3 時間以内、4 フライトを目安と考える。

UAV の飛行では、予めプログラミングした飛行コースを機器本体に送信するために P C を利用する。また、プロポの UAV 監視モニターの補助としても利用している。一般的に、P C はバッテリーで稼動しているため、1 現場の撮影時間は P C のバッテリー寿命（約 3 時間）の制約を受ける。また、撮影写真をこのモニター用 P C で確認・処理を行う場合は、さらに制約時間が短縮される。

したがって、1 現場での作業時間は 3 時間以内を標準とするが、P C 用の専用充電器等を準備した場合はこの限りではない。

1 現場を 3 時間以内に設定した場合、1 回のフライトを 10 分、次のフライトまでの準備、安全確認等を 30 分とすると、

「 $180 \text{ 分} \div 40 \text{ 分/回} = 4 \text{ 回フライト}$ 」となる。

このため、撮影範囲は最大 4 回のフライトで計画する。

例) 飛行速度 2m/s (7km/h) で飛行した場合、

「 $2 \text{ m/s} \times 600 \text{ s/回} \times 4 \text{ 回} = \text{総飛行距離 } 4.8 \text{ km}$ 」

となるが、撮影地点までの移動距離、帰還距離、上昇・下降距離を踏まえて有効撮影範囲を設定する必要がある。

(4km の有効延長を仮定すると、500m/コースで 8 コース)

飛行可能時間は上空の風が強いことやフライト中のトラブルを考慮し、バッテリー全容量の 5 割まで使用して着陸するよう計画する。飛行距離を延ばす場合はなるべくリスクを減らすために予備バッテリーを持参し、フライト回数を増やして対応するよう心がける。

② 撮影範囲

○撮影高度 20m で撮影する場合は、1 日約 0.07km² (概ね 0.1km²)

UAV の 1 現場あたりの撮影範囲は、撮影時間の制約から 3 時間以内で撮影できる範囲となる。3 時間以内で撮影できる範囲は、飛行高度に制約を受け飛行高度を高く設定すると撮影範囲は広くなり、飛行高度を低く設定すると撮影範囲は狭くなる。撮影高度と 1 画郭の撮影範囲の関係は、表 3.4 に示すとおりである。

表3.4 撮影高度と 1 画郭の撮影範囲

焦点 距離 (mm)	撮影 高度 (m)	1 ピクセル の長さ (μm)	長辺		短辺		地上 解像度 (cm)
			ピクセル数 (ピクセル)	撮影範囲 (m)	ピクセル数 (ピクセル)	撮影範囲 (m)	
14	100	3.7	4,592	121	3,448	91	2.6
14	80	3.7	4,592	97	3,448	73	2.1
14	50	3.7	4,592	61	3,448	46	1.3
14	30	3.7	4,592	36	3,448	27	0.8
14	20	3.7	4,592	26	3,448	18	0.5
14	10	3.7	4,592	13	3,448	9	0.2

* 例) 標準に設定した対地高度 20m で撮影した場合

- ・ 1 画郭の撮影範囲：(26m×18m)
- ・ 短辺のラップ（オーバーラップ）：80%（有効幅 18m×20%=3.6m）
- ・ コース延長：500m を仮定
- ・ 飛行速度：2m/s を仮定
- ・ 飛行コース数：8 コース
- ・ 撮影幅：8 コース×18m=144m
- ・ 撮影面積：144m×500m=72,000 m² (≒0.07k m²)

(4) 離発着場所

離発着場所は、UAV を始動するために水平な場所とする。ここでは、離陸前のモーター始動直前に加速度とジャイロキャリブレーションを行う。水平でない場所でこのキャリブレーションを行うと、傾いた機体の姿勢を水平時の姿勢に決定してしまうため離陸上昇が斜めになってしまうことと、高度ホールドを ON にしてホバリングすると、傾いた方向へ流れてしまう。(姿勢制御機能への障害：機種による)。

(5) 地上基準点 精度検証

地上基準点は、UAV で撮影した画像から作成する三次元モデルやオルソ画像、変状個所の正確な位置情報（ x 、 y 、 h ）を把握したい場合に利用する。上空のUAVからよく見える場所に、図3.6に示すような明瞭な標識を設置し、その標識の中心位置は、GNSS 測量や TS 測量または水準測量により国家座標（ x 、 y 、 h ）を与える。

地上基準点は、対象範囲の周囲と中間位置に適度に配置することにより、成果となる三次元モデルやオルソ画像の位置情報を正確かつ均一とすることができる。なお、中間位置の地上基準点は、概ね 50m 間隔に設置することが望ましい。

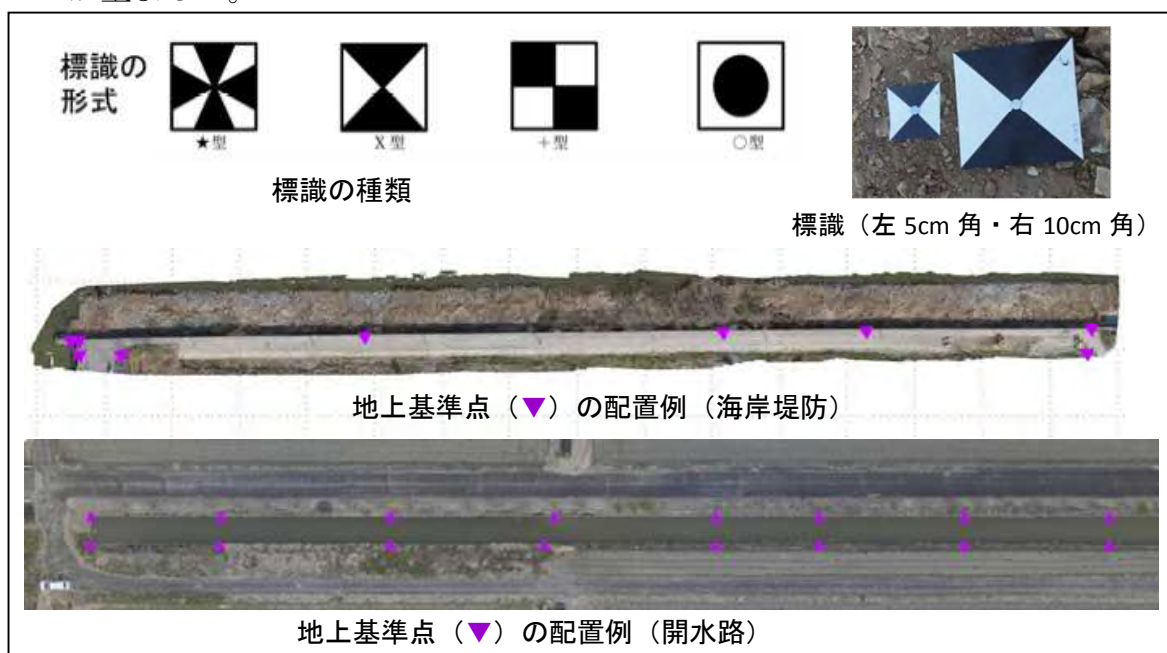


図3.6 標識の種類と配置

(6) 作業実施体制

UAV の安全作業を実施するにあたり、作業体制は、必要となる役割を明確にして一つの役割に専従することが必要である。また、UAV の安全飛行のためには、「周辺状況、気象の安全確認」、「機体の操縦」、「機器状態のモニター」を同時並行で行う必要があるので、下表の実施体制を標準とする。

表3.5 UAV 飛行時の実施体制

作業者	役割
作業責任者(総括)	飛行可否の判断 常に飛行中の機体及び周辺環境、天候を監視する。 第三者に対して注意を払い、離着陸場所及び周囲への侵入を制止するための適切な対応をとる。
操縦者	常に機体、プロポモニターを監視しながら操縦を行う。機体監視者から常に状態の報告を受け、受けた内容を復唱する。
機体監視者	常に飛行中の機体をPC及び目視により監視する。 操縦者から常に実際の飛行状態の報告を受け、受けた内容を復唱する。
* アングル確認者	アングル指定の撮影を行う場合、モニターによりアングルの確認を行い、操縦者にカメラ方向を指示する。
* 見張員	やむをえず注意を要する施設周辺、見通しが悪い場所を飛行する場合は、UAVと障害物との距離、飛行状態を監視する見張員を配置する。

*：必要に応じて担当者を配置

(7) その他

特に海岸施設の汀線付近にて UAV で作業を実施する場合には、海上保安庁や漁業組合などの関係者と連絡を取り、作業内容を周知し実施する必要がある。

3.3.2 地元説明及び調整

UAV 測量は、測量を行うにあたり、対象施設の管理を担当する関係各所に説明するとともに、調査の実施に対する許可を取得する必要がある。主な調査関係者は、次のとおりである。

表3.6 関係機関の一覧

	対象施設の関係者
機関の名称	・農林水産省 ・国土交通省 (道路や河川などで隣接する管理地に立ち入る場合) ・都道府県 ・市町村 ・土地改良区 ・当該地区の区長または代表者

また、申請にあたり、以下の調査内容を示す作業計画書を作成し、関係各所の許可を得るものとする。

- ・目的
- ・調査実施主体
- ・調査内容（日程、使用機器、調査方法、調査範囲など）
- ・安全管理
- ・連絡体制
- ・参考資料（当該地区の飛行制限や DID 地区の有無等）など

4. 画像撮影

UAV の撮影計画は、調査目的を踏まえた上で撮影諸元（画像の解像度、撮影高度、画像間の重複：ラップ率、撮影インターバル等）を決定し、対象となる範囲を網羅する飛行ルートを立案する。

4.1 基準点の整備

UAV 機体保有の GNSS では軌道情報（撮影位置・撮影時の傾斜）が正確でない。正確な位置情報を得るためには地上に基準点を設置する必要がある、その基準点の位置情報から UAV の軌跡を推定することができる。

この基準点は、要求する位置精度によって配置する必要がある。図 4.1 に示す検証結果を参考とされたい。

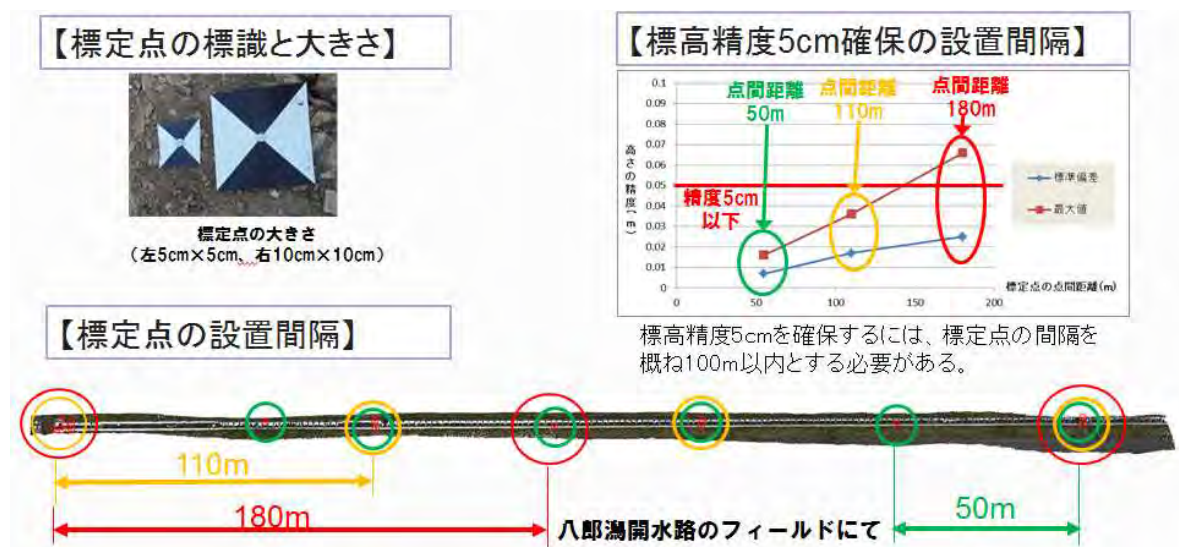


図4.1 基準点の配点例

4.2 UAV 撮影計画

4.2.1 地上解像度

地上解像度は、ひび割れ調査では 1mm 以下で、不陸調査では 5mm を標準とする。

地上解像度は、UAV の対地高度に密接に関係しており対地高度が低いとより細かな写真画像となる。

本調査では、ひび割れや不陸の計測可能な高度を考慮し、対地高度 2.5 m 程度で、地上解像度 4 mm を標準とする。ただし、ひび割れを検証する場合は、そのひび割れ幅に応じて、地上解像度を設定する必要がある。

4.2.2 画像間ラップ率

画像間のオーバーラップ率は、80%以上を確保することを標準とする。

空中写真測量は、地表の垂直写真を飛行コースに沿って重複させながら撮影した航空写真と地上の位置関係を詳細に求め、写真上での像の違いを立体的にかつ精密に測定することによって、正確な三次元計測・地形図作成を行う。そのため、撮影された垂直写真はある一定率で重複している必要がある。

画像の重複は、画像の進行方向に対するオーバーラップ（以下、O L : Over Lap）と、コース間に対するサイドラップ（以下、S L : Side Lap）がある。

UAV の画像から SfM 解析処理を用いる場合は、画像間の重複率が大きいほど出力される三次元モデルの精度が高くなるため、本調査では重複率を以下のように定めることを標準とする。

同一コース内の重複率（O L）：80%以上

隣接コースとの重複率（S L）：60%以上

因みに、「公共測量作業規定の準則」における重複率は下記のように設定されている。

（公共測量作業規定第125条）

同一コース内の重複率（O L）：60%以上

隣接コースとの重複率（S L）：30%以上

4.2.3 飛行方法

UAV 機器は、予めプログラミングした飛行コースに沿ってGPSを利用した自動航行、操縦者が機体を目視しながら操縦レバーにより操縦するマニュアル航行が可能である。それぞれの航行方法の特徴を把握し、航行方法を選択する必要がある。

なお、飛行方法に関係なく、山の斜面や構造物の上を越えず、これらに対峙する方向のフライトは避ける。人間の遠近感とは50mも離れると距離感があいまになるため、UAVと障害物の距離判断が困難となる。このような場合、障害物付近に見張員を配置し、フライト中は無線や電話で速やかに飛行を止められるような確認体制を取る必要がある。

(1) 自動航行

自動航行は、予め飛行コース設定が可能で、三次元モデル作成やオルソ作成等で撮影ラップ率や測量精度が要求される場合は撮影漏れ等を防止できることが有効である。飛行コースの設定にあたっては、飛行範囲内の地形（山、谷、崖等）、障害物（構造物、架空線等）を回避する必要がある。

(2) マニュアル航行

マニュアル航行は、操縦者が機体を目視しながら操縦レバーにより操縦する方法である。事前に飛行コースの設定が困難な場合、撮影場所が事前に特定できない場合はマニュアル操作にて飛行を行う。

この場合、機体との距離が離れると遠近感がなくなるため、障害物と機体との距離が不明瞭となるので障害物との間には十分な距離を確保する必要がある。

4.2.4 撮影インターバル

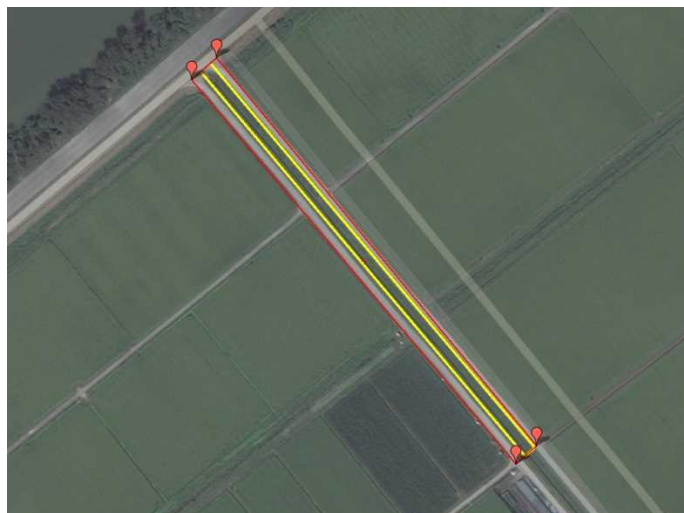
UAV 搭載カメラは、動画撮影モードと静止画撮影モードがあり、利用目的によって設定を変えて利用する。動画はデータ容量が大きく、画像自体も加工が困難なため、ひび割れ抽出のような細かい判読や正確な標高値を算出するには不向きである。したがって、撮影モードは特別の要請がある場合を除き、「静止画」を標準とする。

静止画の撮影は、連射が可能なため撮影インターバルを設定して連射にて撮影する。連射の撮影インターバルは、撮影計画でのオーバーラップを確保する時間、撮影画像のSDカードへの書き込み保存の追従時間、AF（オートフォーカス）追従時間との関連があるため、2秒間隔を標準としている。（試験飛行結果から、撮影インターバル1秒では画像が不鮮明となる）

4.2.5 画質調整

UAV の搭載カメラには、カメラの基本設定項目（ピント、絞り、シャッタースピード、ISO）を自動調整するオートモード機能がある。オートモード機能は、被写体（地盤面）に追従して調整しているが、被写体が動く場合や起伏が大きい場合は調整できない場合がある。試験飛行を行った場合、オートモード機能での画像は手動でカメラ設定した場合に比べて画質が劣る。

このため撮影は、基本項目をマニュアル設定して撮影する。特にオルソ作成や地形解析データとすることを前提とする場合は、手動によるカメラ設定を行う。これは、位置情報と撮影画像を同期させる必要があり（GNSS ロガーとの同期）、撮影間隔が不定期となるオートモード機能を利用すると、撮影のタイミングと位置情報取得のタイミングの間にズレが生じ、撮影位置に誤差が生じるためである。



上図：撮影計画図（平面図：水路を挟んで2コースの撮影）
 下図：撮影計画図（KML を利用して鳥瞰視：水路の上空を2段撮影）

図4.2 撮影計画図例

4.2.6 水利施設における撮影方法

- ・大規模な水利施設は、50m 程度の高度で鉛直撮影を実施する。
- ・5m 以下の小規模な水利施設は、GPS の位置精度や風などの影響から、低空（10～20m 程度）の鉛直撮影のみでターゲットをとらえることは困難である。
- ・低空（10～20m 程度）の鉛直撮影では、水路の壁面のような直壁を撮影することができない。
- ・上記の事から、5m 以下の小規模な水利施設は、斜め撮影を基本とする。
- ・ただし、低空の斜め撮影の場合、草の陰に隠れ基準点が見えないことが考えられるため、撮影高度を上げた鉛直撮影を併用することが望ましい。

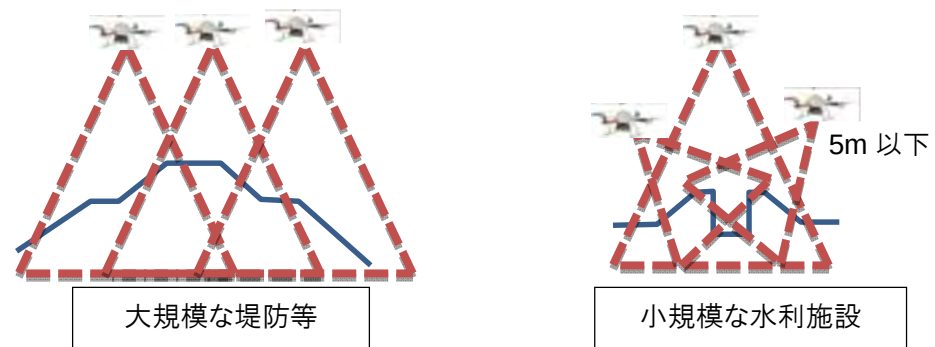
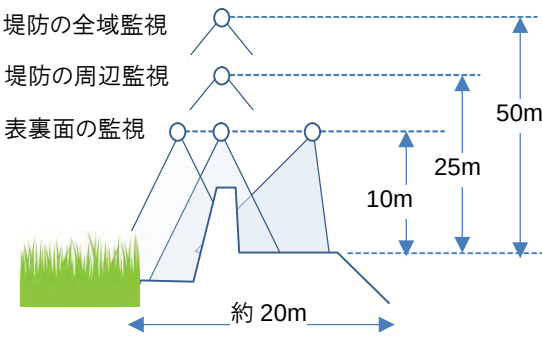
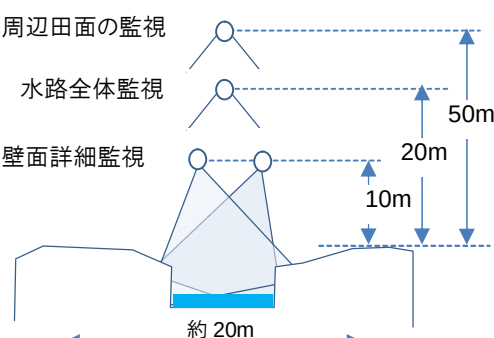
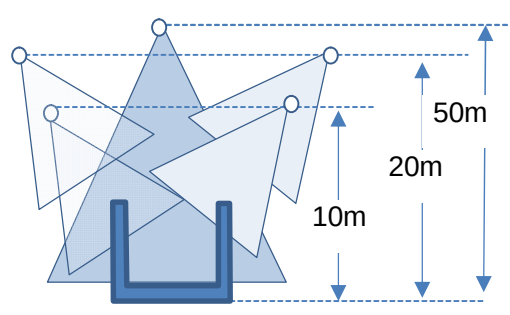


図4.3 農業水利施設における計測手法例

表4.1 水利施設における撮影計画の例

水利施設	撮影計画例	施設の状況写真
①海岸堤防	堤防の全域監視 堤防の周辺監視 表裏面の監視  約 20m	
②開水路Ⅰ	周辺田面の監視 水路全体監視 壁面詳細監視  約 20m	
③開水路Ⅱ		

4.3 UAV 操作時の確認事項

UAV を安全に運用するためには、機体の点検、現地の状況（天気・風等）、撮影計画、人員配置と操縦者の技量を確認する必要がある。

4.3.1 機体の点検

UAV を安全に運用するためには機器の点検が重要となる。日頃からメンテナンスを実施するとともに、フライト当日に注意すべき点を下記に記載する。

① フライト前

- ・各機器は安全に取り付けられているか。
- ・全てのネジ類に緩みはないか。
- ・LED の点灯は正常か。
- ・モーターに異音はないか。
- ・プロペラに傷や摩耗はないか。
- ・バッテリーは満充電となっているか。
- ・積載重量は適正の範囲内か。
- ・プロポとの通信、撮影計画ソフトウェアとの連動は問題ないか。

② フライト中

- ・離陸、着陸共に安定しているか。
- ・ホバリングは安定しているか。
- ・GPS の感度は安定しているか。
- ・全ての動きは正常か。
- ・プロペラはきれいに回転しているか。
- ・バッテリーの残量に余裕はあるか。

③ フライト後

- ・機体に塵、ゴミは付着していないか。
- ・発熱している機器はないか。
- ・プロペラに亀裂や欠けなど損傷はないか。
- ・全てのネジに緩みはないか。

4.3.2 現地の状況

フライトを実施する前に事前に確認しておくべき事項を下記に記載する。

① 天候

現地フライト予定時間の気象情報を確認し、急激な天候の変化がないことを確認する。フライトに適している天候は「晴れ」もしくは「曇り」が好ましいが、光量が多すぎるとハレーションが起こり、少ないと撮影画像が暗くなるため注意が必要である。また、雷が聞こえたら、すみやかにフライトを中止すること。

② 風速

UAV の機体スペックには風速にどの程度耐えられるかが記載されているが、安全面を考慮すると地上風速 5m/s 以上の場合はフライトを中止する。上空では地上よりも風速が強い場合が多々有り、設定している飛行ルートと乖離してしまう可能性があるためである。

③ 離着陸場所

UAV 機体状況の確認、および安全に離陸・着陸が可能である場所を予め選定しておくこと。

4.3.3 撮影計画と現地の整合性

- ・事前に飛行ルートを作成しているか。
- ・作成した飛行ルートは撮影諸元通りか。
- ・作成した飛行ルート上に自動航行を妨げる障害物（樹木・電線等）はないか。

4.3.4 人員配置および操縦者の技量

- ・安全に配慮した人員配置をしているか。
- ・自動航行に問題が生じたときに、手動で安全に操作を行えるか。
- ・操縦者の技量を上回る撮影計画をしていないか。

4.3.5 チェックシート

UAV を安全に運航させるため、UAV を飛行させる前に必ず機体の安全管理を実施するとともに、現地状況を確認する必要がある。

4.4 撮影後の画像点検

画像の撮影は、撮影計画に則り 5.2 で定める UAV 操作にて実施する。撮影した画像は、速やかに品質を確認し、画像や撮影手法に不具合があった場合には再び撮影を実施し、後続作業に影響のない画像を取得する。

4.4.1 撮影画像の状況点検

画像の撮影は、自動運行の場合、予め設定する計画軌跡の情報を UAV 機体に入力して開始する。一方、手動運行の場合は、フライト航路の周辺に車両や人の影響がないかを念入りに確認し、突然の挙動変位が発生した場合に備える。

なお、要求内容や当日の天候に応じて、対象施設やターゲットの向きを考慮した撮影方法を検討する必要がある。例えば、水利施設の側面を計測したい場合は、施設の側面が影で暗くならないような時間帯に撮影を実施しなければならない。



図4.4 撮影時間による対象施設の陰影

4.4.2 撮影画像の品質点検

撮影画像は、撮影が終了したら速やかに品質を点検しなければならない。画像の品質は、画像そのものの品質と運行の影響による点検がある。以下に、点検項目を記載する。

- ・飛行計画と実際の走行ルートが乖離していて対象施設が映っていない。
(特に、撮影高度が低い(10m 程度)場合には撮影する範囲も狭くなるので、正確なフライトができているかを確認する必要がある。)
- ・インターバル撮影が機能せず、連続した撮影画像になっていない。
- ・画像にボケ、ブレがある。
- ・画像が暗いもしくは明るすぎる。



計画通りに水路側面を捉える画像

側面を捉えられない画像

a) 飛行計画との乖離した画像

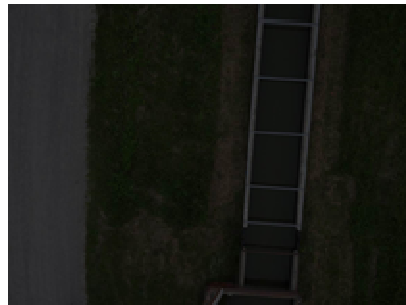


正常画像

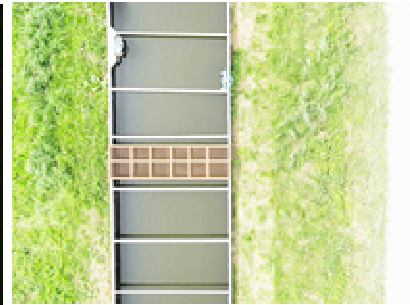


ピンボケあり画像

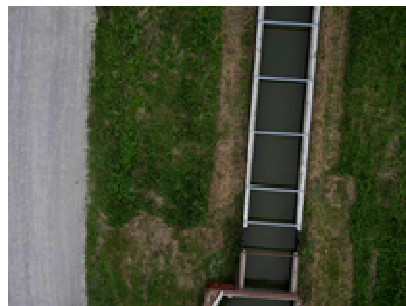
b) 画像のボケの有無



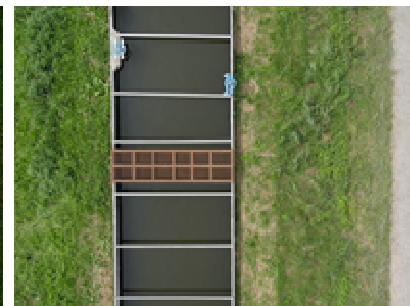
暗い画像



明るい画像



正常画像



正常画像

c) 画像の明るさによる画質の相違

図4.5 撮影画像の画質例