

# UAV を用いた公共測量マニュアル（案）

平成 28 年 3 月

国土交通省国土地理院



## 目 次

【序】概説	1
1. はじめに	1
2. UAV を用いた測量 とは	2
1) UAV を用いた空中写真測量	2
2) UAV を用いた空中写真による三次元点群測量	3
3. UAV を用いた公共測量マニュアル	4
1) 本マニュアルの目的	4
2) 本マニュアルの構成	4
3) 本マニュアルの適用範囲と利用上の注意点	5
第1編 総則	7
第2編 UAV を用いた地形測量及び写真測量	10
第1章 概説	10
第2章 UAV を用いた空中写真測量	12
第1節 要旨	12
第2節 作業計画	12
第3節 標定点の設置	12
第4節 対空標識の設置	15
第5節 撮影	17
第6節 空中三角測量	27
第7節 現地調査	29
第3編 UAV を用いた応用測量	31
第1章 概説	31
第2章 UAV を用いた空中写真による三次元点群測量	33
第1節 要旨	33
第2節 作業計画	33
第3節 標定点及び検証点の設置	33
第4節 対空標識の設置	38
第5節 撮影	39
第6節 三次元形状復元	45
第7節 数値編集	47
第8節 三次元点群データファイルの作成	48
第9節 成果等の整理	48
第4編 資料	50
標準様式等	50
参考資料	50



## 【序】概説

### 1. はじめに

昨今の UAV(Unmanned Aerial Vehicle、無人航空機)を取り巻く状況は、局地的な範囲で、土木工事現場のような UAV の落下に対する安全の確保が可能な場所では、低高度からの空中写真の撮影が実用的に行えるようになってきている。

また、コンピュータの発達によるデジタル化の進展により、劣化の問題から地図が解放され、経年変化部の修正測量のみにより地図を更新することができるようになった。つまり、従来の地図はポリエステルフィルム等のアナログ媒体に線画で記録されていたため、アナログ媒体の劣化に伴って地図も劣化していた。現在の地図は、電子記録媒体に座標値で記録されているため、経年により座標値が変わるといった劣化は生じない。そのため地形・地物の経年変化が生じた地図は、その部分の座標値を入れ替えていくという局地的な修正によって使い続けることが可能となる。また、地図として表現する地形・地物の経年変化は、工事や災害等によって局地的に発生する。このような局地的な範囲の地図作成は UAV の得意とするところである。

公共事業においては、社会環境の変化により企画から測量・調査、設計、施工、維持管理といった事業全体を最適化することが進められており、その一環として三次元データの活用も試行されている。現在、土木工事における土量管理は、平均断面法や地上レーザ測量による三次元データ等が利用されている。平均断面法は、地形の形状が複雑だと実際の土量との差異が大きくなる可能性が高い。地上レーザ測量では、レーザスキャナを設置する適当な場所がなければ、必要な箇所を計測できない可能性が生じる。また、作業員が危険な場所に入らなければならなかったり、現場での作業に時間を要したりしている。このような場所においては、UAV を用いることにより工事現場全体を危険な場所に立ち入ることなく短時間で撮影し、撮影した空中写真から三次元点群測量を行うことにより土量管理が行えるようになる。

このような社会的状況を踏まえ、国土地理院では、数値地形図データを作成するための測量手法である「UAV を用いた空中写真測量」及び三次元点群データを作成するための測量手法である「UAV を用いた空中写真による三次元点群測量」を規定した『UAV を用いた公共測量マニュアル（案）』（以下「本マニュアル」という。）を整備した。

UAV や空中写真の撮影に用いるデジタルカメラのほか、空中写真から高密度に特徴点を抽出し、三次元点群を作成するソフトウェアを測量に用いる本マニュアルでは、現在の技術を勘案した手法や許容範囲を設定している。

今後、本マニュアルを使用した測量が行われることで検証データが蓄積されていき、また、機器や処理ソフトウェアの性能も向上していくことが見込まれることから、本マニュアルはより適切な内容へと改善されることが期待できる。また、「UAV を用いた空中写真による三次元点群測量」の裸地以外への適用も検討されることになると思われる。

なお、UAV を利用するにあたっては安全面への配慮が重要となるが、安全面への配慮は本

マニュアルでは別途、国土地理院が作成した「公共測量における UAV の使用に関する安全基準（案）」に準拠することとしている。

## 2. UAV を用いた測量 とは

### 1) UAV を用いた空中写真測量

UAV を用いた空中写真測量による数値地形図データ作成の工程別作業区分及び順序は、有人機を用いた場合（「作業規程の準則」（以下「準則」という。）第 3 編第 3 章「空中写真測量」）とほぼ同じである（図 1）。

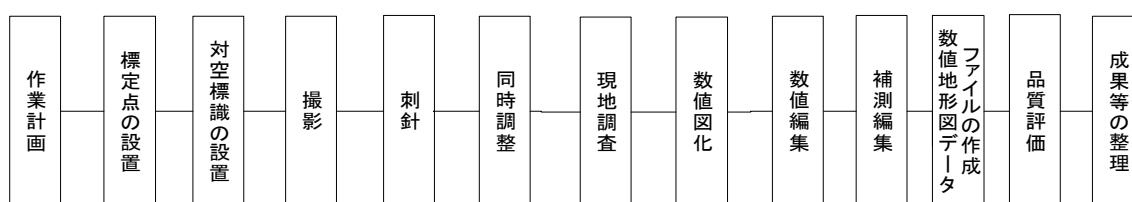


図 1 準則第 3 編第 3 章空中写真測量における工程別作業区分及び順序

しかしながら各工程の技術内容においては、次のとおり大きな違いがあるところもある。

撮影においては、有人機に装備されている GNSS/IMU 装置と同等の仕組みが、UAV で実用化するには少し時間を有するものと思われる。したがって UAV による空中写真の撮影は、GNSS/IMU が装備される前の有人機による撮影と同等の規定としている。

刺針は、対空標識の設置後、撮影が行われるまでの間に、何らかの原因により対空標識がなくなったり、空中写真に写っていなかったりした場合に、標定点の位置を現地で調査して空中写真に明示する作業であるが、UAV による空中写真撮影では、撮影直前に対空標識の有無を確認できるために規定していない。

同時調整は、GNSS/IMU 装置で得られたデータも含めて空中三角測量を行う工程であるが、UAV では GNSS/IMU 装置で得られるデータと同等のデータが実用的に得られるようになるには時間を要するとの判断から、GNSS/IMU 装置を用いない空中三角測量を、空中三角測量という名称で規定している。

現地調査は、UAV を用いた空中写真測量の適用範囲が局地的であることから、調査内容は限定されると判断し、簡略化した内容で規定している。

この他、民生用デジタルカメラを使用すること、1 枚の空中写真が捉える範囲も狭くなること、建物などの立体構造を持つ地物の対地高度に対する高さの割合が大きくなることなどから、細部においては有人機を用いた空中写真測量とは異なる場合も多い。これらの相違において精度や経済性の確保に重要となるところは精一杯配慮した。実績も少なく、機器やソフトの発達も急速で十分な配慮となっていない可能性があるため、情勢に応じた今後の本マニュアルの見直しを注視することが必要である。

## 2) UAV を用いた空中写真による三次元点群測量

UAV を用いた空中写真による三次元点群測量は、準則第 3 編第 6 章に規定する写真地図作成と同類の技術で、どちらも空中写真測量に分類される技術であるが、処理の仕方は大きく異なる。図 2 は、本マニュアルで規定した UAV を用いた空中写真測量による三次元点群測量における工程別作業区分及び順序である。

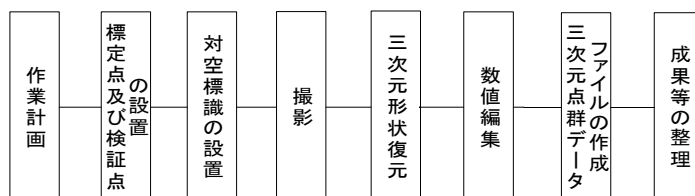


図 2 UAV を用いた空中写真による三次元点群測量における工程別作業区分及び順序

写真地図作成で規定されている同時調整、数値地形モデルの作成、正射変換、モザイクといった一連の工程は、三次元形状復元という一工程に集約され、かつ三次元形状復元は自動処理により行うことを前提としている。また、写真地図作成では、数値地形モデルと写真地図データファイルが成果として作成されるが、UAV を用いた空中写真による三次元点群測量では、数値地形モデルと写真地図データが一体となったともいえる空中写真の色を属性とする三次元の座標、いわゆる三次元点群データを成果とし、必要に応じて三次元点群データからグリッド形式、テクスチャー付きの不整三角網(TIN; Triangulated Irregular Network)、写真地図を作成することも規定している。

三次元形状復元では、最初に同時調整に相当する処理が行われる。つまり、パスポイント・タイポイントに変わるものとして、地形・地物の特徴的な場所が特徴点として自動抽出され、重複する空中写真間で同一となる特徴点の対応付けが行われ、空中写真の外部標定要素が計算される。次に、外部標定要素によって明確になった空中写真間の関係を利用し、特徴的な場所以外でも重複する空中写真間で同一となる場所の対応付けが行われ、外部標定要素を用いて三次元座標に変換されるとともに、その場所の空中写真の色が属性として付与される。さらに、三次元座標を何らかの基準に従って品質を評価し、誤対応しているものを除去するいわゆるフィルタリングを行うソフトもあると思われる。

このように重複する空中写真間で同一場所を自動的に対応付けするには、地形・地物の写り込み方の違いが少ない接近して撮影された空中写真、つまり重複度が大きい空中写真ほど容易となる。従って撮影では、空中写真測量でオーバーラップと呼ばれる UAV の進行方向（以下「コース」という。）に撮影された空中写真間の重複、サイドラップと呼ばれる隣接する UAV の撮影コース間の重複は、空中写真測量に較べて非常に大きくしている。

また、自動処理によって同一場所が対応付けられた空中写真を地上と関係付けるために、水平位置と標高を持つ標定点を設置するとともに、その位置が分かるように対空標識が設置

される。このとき同一場所の対応付けがどのくらい堅ろうに行われているかの判断が困難なため、堅ろうさに欠ける場所における空中写真の連結度合の弱さを補うためにも標定点を設置することを規定している。

同一場所の対応付けの弱さは、異常な三次元点群データを生成することにもなるため、異常な三次元点群データを除去するための数値編集を規定している。

この他、民生用デジタルカメラを使用すること、空中写真測量では分割されている工程を自動処理で一挙に処理してくれるソフトを使用することから、これらに精一杯配慮した規定としているが、実績も少なく、機器やソフトの発達も急速で、十分な配慮となっていない可能性があるため、本マニュアルを利用する際には注意が必要である。

### 3. UAV を用いた公共測量マニュアル

#### 1) 本マニュアルの目的

本マニュアルは、準則第 17 条（機器等及び作業方法に関する特例）を適用し、公共測量において UAV とそれに搭載された民生用デジタルカメラで撮影された空中写真を用いて測量を実施する場合の標準的な作業方法を定め、その規格の統一、成果の標準化及び必要な精度の確保に資することを目的とする。

##### ① 公共測量を実施する場合

国又は公共団体において、準則を準用している場合、準則第 17 条（機器等及び作業方法に関する特例）を適用し、測量法第 36 条（計画書についての助言）に基づく国土地理院の技術的助言により、本マニュアルを準用することができる。

##### ② 基本測量及び公共測量以外の測量を実施する場合

基本測量及び公共測量以外の測量を実施する場合にも、本マニュアルを利用することができる。

#### 2) 本マニュアルの構成

本マニュアルは、UAV を用いた測量を実施する際の標準的な作業方法、使用する機器等の必要な事項について規定している。

また、測量技術としての UAV を用いた測量に対する理解を深め、その利用の普及・促進を図るため、条文、運用基準のほかに解説を加えている。なお、本マニュアルの全体構成は、以下のとおりである。

##### ① 【序】概説

UAV を用いた測量についての概説、マニュアルの構成等について説明している。

##### ② 第 1 編 総則

本マニュアルの目的、UAV を用いた測量を実施するにあたっての条件及びデータの取り扱い等について規定している。



### ③ 第 2 編 UAV を用いた地形測量及び写真測量

準則の第 3 編「地形測量及び写真測量」に対応するものとして第 2 編「UAV を用いた地形測量及び写真測量」を設け、この編の中の位置付けとして「UAV を用いた空中写真測量」を規定することとし、その実施するにあたっての工程別作業区分及び順序、作成手法、主な測量記録等の規格について規定している。

### ④ 第 3 編 UAV を用いた応用測量

準則の第 4 編「応用測量」に対応するものとして第 3 編「UAV を用いた応用測量」を設け、この編の中の位置付けとして「UAV を用いた空中写真による三次元点群測量」を規定することとし、その実施にあたっての工程別作業区分及び順序、作成手法、主な測量記録等の規格について規定している。

なお、タイトルに「空中写真による」を入れたのは、近い将来、マニュアルが作成されると予想されるレーザスキャナによる三次元点群測量との区別を意識したためである。

### ⑤ 第 4 編 資料

UAV を用いた測量のための精度管理表の標準様式を規定している。

また、本マニュアルによる測量成果等を「国土交通省測量成果電子納品要領（平成 28 年 3 月）」を準用してデジタルデータとして納品する際の、標準的な格納フォルダ名やファイル命名規則は、巻末の標準様式等に規定している。

## 3) 本マニュアルの適用範囲と利用上の注意点

本マニュアルでは、UAV を用いた空中写真測量及び UAV を用いた空中写真による三次元点群測量の二つの測量方法を規定している。

UAV を用いた空中写真測量では、原則として地図情報レベル 250 から 500 の数値地形図データの整備を目的として実施する公共測量に利用することを前提としている。一般的には、地図情報レベルの大きい数値地形図データの整備は、より広範囲を効率的に測量することが可能である有人機による方法が優位であり、同等の地図情報レベルの数値地形図データの整備においても、地物が少なかったり、視通がよかったりする場合には、TS による方法が優位である場合もある。従って、経費、作業効率、精度等を考慮して測量方法を選択する必要がある。また、UAV を用いた空中写真測量で作成される測量成果は、この測量成果の利用を意図として実施される事業のみならず、社会基盤としてさまざまな事業に利用されることが想定されているため、品質の確保は重要な要素となっている。

UAV を用いた空中写真による三次元点群測量では、原則として土木工事現場での土量管理に用いることを前提としている。一般的には、土木工事の現場はさまざまで、その状況によって土量管理に求められる要求精度は変わってくるが、本マニュアルでは平面位置及び高さの精度ともに最大 0.05m 以内とし、必要に応じて変更できるようにしている。現在、土量管理のための測量には TS やレーザスキャナ等が使用されているが、地形の形状によっては TS やレーザスキャナによって行う三次元点群測量の方が優れている場合もある。従って、経費、

作業効率、精度等を考慮して測量方法を選択する必要がある。

一方、本マニュアルで規定する民生用デジタルカメラや、三次元点群測量で規定する三次元形状復元ソフトは、どちらも測量を目的として開発された製品ではない。例えば民生用デジタルカメラにおいては、手振れやピンボケ補正といった機能のために測量用として望まれる堅ろう性が確保されていないところもあるとともに、民生用という性質上、モデルチェンジの期間が短く、常に新たなモデルへの対応を続けていかなければならない。三次元形状復元ソフトにおいては、インターネット上に公開されている写真のような多様な写真に対応できるといった性質のため、測量用として望まれる正確さが確保できるかは不確定な部分もあり、また、重複して撮影された空中写真間における同一点の対応付けを自動的に検出するという方法を採用していることから、点検が困難なほど多量に対応点が検出され、その中に誤検出が含まれることが危惧される。

以上のように民生用デジタルカメラや三次元形状復元ソフトの測量への適用については、これまで国土地理院が整備してきた公共測量マニュアルとは異なり、取扱いには細心の注意が必要である。特に不適切なカメラの使用は空中三角測量の処理が破綻するため、不良品の作成を防げる空中写真測量と異なり、三次元形状復元ソフトでは何らかの成果が作られるものの、そこに生じたカメラや土地被覆状態といった問題から生じた不良を取り除いて改善することは難しいと推測される。従って、写真測量の知識を高め、使用機器や飛行条件、処理方法等が使用目的に応じた測量に適しているかを十分に検証し、測量を行う必要がある。

## 第 1 編 総則

### (目 的)

第 1 条 本マニュアルは、公共測量における UAV を用いた数値地形図データ作成及び三次元点群データ作成について、その標準的な作業方法等を定めることにより、その規格の統一、標準化及び必要な精度の確保に資することを目的とする。

### <第 1 条 運用基準>

測量計画機関（以下「計画機関」という。）は、本マニュアルを、保有する公共測量作業規程の条文（準則では第 17 条「機器等及び作業方法に関する特例」）に基づき使用する場合、使用する民生用デジタルカメラや写真測量ソフトについて、測量作業機関（以下「作業機関」という。）等から精度検証結果を提出させて、本マニュアル及び公共測量作業規程に規定されている精度を確保できていることを確認する。

### 【解 説】

現行の準則において、UAV を用いた測量の利用について規定されていないが、準則第 17 条において、計画機関は、必要な精度の確保及び作業能率の維持に支障がないと認められる場合には、準則に定めていない機器等及び作業方法を用いることができるとされている。

準則第 17 条を適用するにあたって、計画機関は、使用する資料、機器、測量方法等により、精度が確保できることを作業機関等からの検証結果に基づいて確認する必要がある。なお、確認にあたっては、あらかじめ国土地理院の長の意見を求めることができるとされている。

また、国土地理院が新しい測量技術による測量方法に関するマニュアルを定めた場合は、当該マニュアルが前述の確認にあたって、確認のための資料として使用することができる規定されている。本マニュアルは、これに該当するものであり、計画機関は本マニュアルにより、この新しい UAV を用いた測量技術を使用することについて判断することになる。

#### (準則の準用)

第2条 本マニュアルに定めるもの以外は、準則を準用する。

#### (安全の確保)

第3条 作業機関は、UAVの飛行における安全の確保について適切な措置を講じなければならない。

2 作業機関は、UAVを飛行させるにあたり、航空法第132条及び第132条の2に基づき必要な許可もしくは承認を得るとともに、国土交通省航空局が定める無人航空機(UAV、ラジコン機等)の安全な飛行のためのガイドラインに則ってUAVを取り扱うものとする。

#### <第3条 運用基準>

UAVの飛行は、国土地理院が定める公共測量におけるUAVの使用に関する安全の基準に従って飛行させなければならないものとする。

#### 【解説】

本マニュアルでは、準則第10条(安全の確保)に準拠して規定するとともに、航空法及び航空局が定めるガイドラインにも準拠するように規定している。したがって、本マニュアル内では機器の点検などで安全に関わるところもあるが、基本的には安全に関する規定はしていない。

なお、公共測量におけるUAVの使用に関する安全の基準は、公共測量を対象とし、UAVの性能(最大運航重量、連続航続可能時間、最高運航速度、運航可能最大風速など)、作業員の体制整備(作業班長、操縦者、機体監視者等の役割など)、運航に当たっての留意事項(機体の点検、中止の条件など)等について記載されている。

#### (作業計画)

第4条 作業機関は、作業着手前に作業の方法、使用する主要な機器、要員、日程等について適切な作業計画を立案し、これを計画機関に提出して、その承認を得なければならない。作業計画を変更しようとする場合も同様とする。

#### (工程管理)

第5条 作業機関は、前条の作業計画に基づき、適切な工程管理を行わなければならない。  
2 作業機関は、測量作業の進捗状況を適宜計画機関に報告しなければならない。

**(精度管理)**

第6条 作業機関は、測定の正確さを確保するため、適切な精度管理を行い、その結果に基づいて精度管理表を作成し、これを計画機関に提出しなければならない。

2 作業機関は、各工程別作業の終了時、その他適切な時期に所要の点検を行わなければならない。

3 作業機関は、作業の終了後速やかに点検測量を行わなければならない。

**(測量成果の検定)**

第7条 作業機関は、基盤地図情報に該当する測量成果等の高精度を要する測量成果又は利用度の高い測量成果で計画機関が指定するものについては、準則付録3に基づく検定に関する技術を有する第三者機関による検定を受けなければならない。

**(成果及び資料等の様式)**

第8条 UAV を用いた測量における成果、資料等は、標準的な様式で作成するものとする。ただし、成果等の使用、保存等に支障がないと認めて計画機関が指示し、又は承認した場合に限り、異なる様式により作成することができる。

**<第8条 運用基準>**

UAV を用いた測量に関連する標準的な様式は、本マニュアルに規定する。

**(運用基準)**

第9条 本マニュアルの運用に関し必要な事項については、本マニュアルの中に運用基準として定める。

## 第2編 UAVを用いた地形測量及び写真測量

### 第1章 概説

#### (要 旨)

第10条 本編は UAV を用いた地形測量及び写真測量の作業方法等を定める。

2 「UAV を用いた地形測量及び写真測量」とは、UAV を用いて数値地形図データを作成する作業をいう。

3 「数値地形図データ」とは、地形、地物等に係る地図情報を位置、形状を表す座標データ、内容を表す属性データ等として、計算処理が可能な状態で表現したものをいう。

#### (工程別作業区分及び順序)

第11条 工程別作業区分及び順序は、次のとおりとする。

- 一 作業計画
- 二 標定点の設置
- 三 対空標識の設置
- 四 撮影
- 五 空中三角測量
- 六 現地調査
- 七 数値図化
- 八 数値編集
- 九 補測編集
- 十 数値地形図データファイルの作成
- 十一 品質評価
- 十二 成果等の整理

2 第七号から第十二号は、準則第3編第3章第2節、第9節から第14節を準用する。

#### (数値地形図データの地図情報レベル)

第12条 数値地形図データの地図情報レベルは、250 及び 500 を標準とする。

2 地図情報レベル 1000 以上に適用する場合は、前条第五号までの工程は地図情報レベル 500 で行い、第六号以降の工程を地図情報レベル 1000 以上で行うものとする。

#### <第12条 運用基準>

1 数値地形図データの位置精度及び地図情報レベルは、準則第80条（数値地形図データの精度）に準じ次表を標準とする。

地図情報レベル	水平位置の標準偏差	標高点の標準偏差	等高線の標準偏差
250	0.12m 以内	0.25m 以内	0.5m 以内
500	0.25m 以内	0.25m 以内	0.5m 以内

- 2 「地図情報レベル」とは、数値地形図データの地図表現精度を表し、数値地形図における図郭内のデータの平均的な総合精度を示す指標をいう。
- 3 地図情報レベルと地形図縮尺の関係は、次表のとおりである。

地図情報レベル	相当縮尺
250	1/250
500	1/500

### 【解 説】

UAV の飛行可能高度は航空法で制限されるため、適用できる地図情報レベルは実質的に制限される。

より低い精度の地図情報レベルで数値地形図データを作成する場合でも、UAV の飛行高度を限界よりも上げることができないため、第二項の適用は費用対効果の面から一般に奨められない。

なお、地図情報レベル 250 より高い精度での公共測量が行われるようになれば、それに応じて本章の見直しを行っていく。

#### (数値地形図データの図式)

- 第 13 条 数値地形図データの図式は、目的及び地図情報レベルに応じて適切に定めるものとする。
- 2 地図情報レベル 250 は、準則付録 7 に準拠するものとする。
- 3 地図情報レベル 500 は、準則付録 7 を標準とする。
- 4 地図情報レベルごとの地図項目の取得分類基準、数値地形図データのファイル仕様、数値地形図データファイル説明書、分類コード等は、準則付録 7 を適用することができる。

### 【解 説】

地図情報レベル 250 は局地的にあらゆる地物を形状で取得しており、地図編集には使い難く、図式は規定されてこなかったため、業務に応じて準則の付録 7 に準拠して定めることとした。

## 第2章 UAV を用いた空中写真測量

### 第1節 要旨

#### (要旨)

第14条 「UAV を用いた空中写真測量」とは、UAV を用いて撮影した空中写真から空中写真測量により数値地形図データファイルを作成する作業をいう。

#### 【解説】

本章で規定する UAV を用いた空中写真測量は、GNSS/IMU 装置を搭載した UAV による公共測量の実績がないことから、準則第3章の空中写真測量での規定とは異なっている。しかしながら、近い将来には装備されるものと考えられる。その場合は、準則で規定しているものと同様以上の精度が得られると確認された場合には、準則第3章の空中写真測量と規定と同じ規定で利用可能となる。

修正測量に適用する場合には、既存の数値地形図データとの整合に配慮し、標定点の配置や撮影の方法などを検討する必要がある。

### 第2節 作業計画

#### (要旨)

第15条 作業計画は、第4条の規定によるほか、工程別に作成するものとする。

### 第3節 標定点の設置

#### (要旨)

第16条 標定点設置とは、空中三角測量に必要となる水平位置及び標高の基準となる点（以下「標定点」という。）を設置する作業をいう。

#### (標定点の精度)

第17条 標定点の精度は、数値地形図データの地図情報レベルに応じ、次表を標準とする。

地図情報レベル \ 精度	水平位置 (標準偏差)	標高 (標準偏差)
250	0.05m 以内	0.1m 以内
500	0.1m 以内	0.1m 以内



## 【解 説】

地図情報レベル 500 における標定点の精度は、準則での規程に準拠している。

地図情報レベル 250 における標定点の精度は、水平位置では地図情報レベル 500 での規定の半分に、標高では地図情報レベル 500 や 1000 での規定と同じにしている。標高が地図情報レベル 500 や 1000 と同じなのは、樹木等の被覆によって空中写真で地形を直接測量することが困難で、精度の向上が図れないという考えに従っている。

### (方 法)

第 18 条 標定点の設置は、次の各号のとおりとする。ただし、前条に規定する精度を確保し得る範囲内において、既知点間の距離、標定点間の距離、路線長等は、この限りでない。

- 一 水平位置は、準則第 2 編第 2 章の基準点測量に準じた観測で行い、単点観測法を用いることができる。なお、単点観測法の観測は、準則第 94 条の規定を準用する。
- 二 標高は、準則第 2 編第 3 章で規定する簡易水準測量に準じた観測で行うものとする。

2 空中写真上で周辺地物との色調差が明瞭な構造物が測定できる場合は、その構造物上に標定点の設置を行い対空標識に代えることができる。

## 【解 説】

既知点間の距離、標定点間の距離、路線長などは、UAV のような低高度から撮影する場合には空中写真測量の精度が非常に高くなることを考慮する必要がある。

### (標定点の配置)

第 19 条 標定点は、作業範囲の形状、撮影コースの設定、作業範囲及びその周辺の土地被覆を考慮して配置するものとする。

#### <第 19 条 運用基準>

1 撮影が単コースの場合には、標定点は次の条件を満たすように配置することを原則とする。

- (1) 標定点の配置は、コースの両端のモデルに上下各 1 点及び両端のモデル以外では、コース内に均等に配置することを標準とする。
- (2) 水平位置 (NH) 及び標高 (NV) の標定点数は、次の式を標準とする。

$$NH = NV = \lceil n / 2 \rceil + 2$$

ここで、n はモデル数とし、 $\lceil \quad \rceil$  中の計算終了時の小数部は切り上げるものとする。

2 撮影が複数コースの場合には、標定点は次の条件を満たすように配置することを原則

とする。

(1) 水平位置の標定点の配置は、ブロックの四隅に必ず配置するとともに、両端のコースについては6モデルに1点、その他のコースについては3コースごとの両端のモデルに1点、ブロック内の精度を考慮して30モデルに1点を均等の割合で配置することを標準とする。

(2) 水平位置の標定点数(NH)は、次の式を標準とする。

$$NH = 4 + 2 \left[ \frac{(n-6)}{6} \right] + 2 \left[ \frac{(c-3)}{3} \right] + \left[ \frac{(n-6)(c-3)}{30} \right]$$

ここで、nは1コース当たりの平均モデル数、cはコース数、[ ]の中の計算終了時の小数部は切り上げ、負になる場合は0とする。

標高の標定点の配置は、2コースごとの両端モデルに1点ずつ配置するほか、12モデルに1点の割合で各コースに均一に配置することを標準とする。

標高の標定点数は、次の式を標準とする。

$$NV = \left[ \frac{n}{12} \right] c + 2 \left[ \frac{c}{2} \right]$$

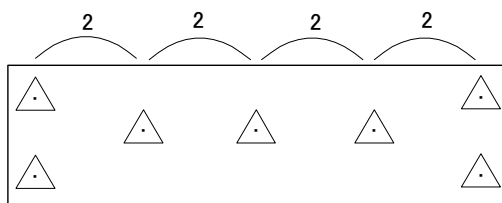
ここで、nは1コース当たりの平均モデル数、cはコース数、[ ]の中の計算終了時の小数部は切り上げ、計算されたNVが①で計算されたNHより小さい場合は、NVはNHと同数とする。

3 標定点の配置計画は、撮影計画図の上に作成するものとする。

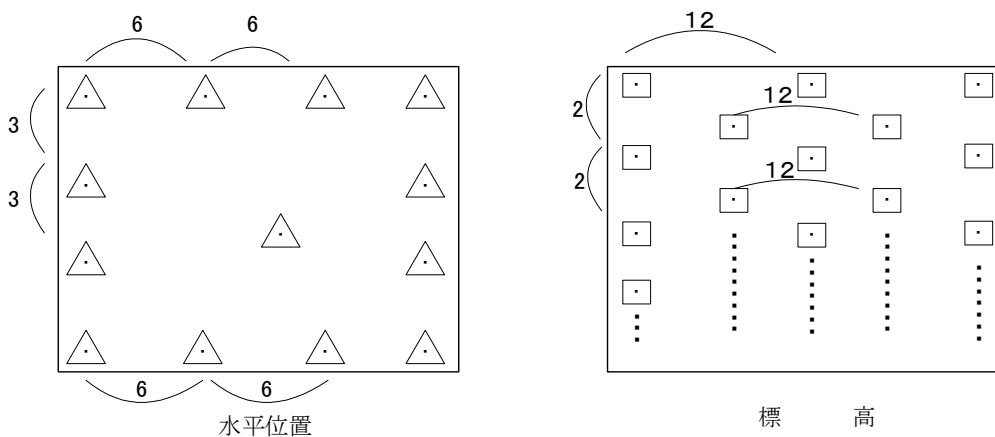
## 【解説】

本条文は、昭和60年10月5日付けで建設省国地発292号をもって建設大臣の承認を得て、各地方建設局長及び土木研究所長宛てに通知された建設省の公共測量作業規程から引用しているものである(図3)。本条文が規定された時点と異なり、本マニュアルで規定する民生用デジタルカメラや撮像素子(当時は航空フィルム)の性能、レンズの画面距離や撮影の対地高度等、諸条件が異なっている。これらの諸条件を考慮して、条件に合った配置にする必要がある。過去の研究から、バンドル調整による空中三角測量での標定点の配置は、次のような知見が得られている(秋山、2001)

- (1) 平面位置の精度は平面位置の標定点のみに依存し、標高精度は標高標定点のみに依存する。
- (2) 平面位置標定点は、撮影範囲の周辺部に配置するのが効果的である。
- (3) 標高標定点はコース方向に直交して列状に配置するのが効果的である。この列は、コースの終始端の列及びコース内5~6モデル間隔に配置するのが効果的である。



(a) 単コース撮影のための標定点配置 (撮影方向：左右)



(b) 複数コース撮影のための標定点配置 (撮影方向：左右)

図 3 標定点の配置

**(成果等)**

第 20 条 成果等は、次の各号のとおりとする。

- 一 標定点成果表
- 二 標定点配置図及び水準路線図
- 三 標定点測量簿及び同明細簿
- 四 精度管理表
- 五 その他の資料

**第 4 節 対空標識の設置**

**(要 旨)**

第 21 条 「対空標識の設置」とは、標定点の写真座標を測定するため、標定点に一時標識を設置する作業をいう。

(対空標識の規格及び設置等)

第22条 対空標識は、拡大された空中写真上で確認できるように形状、寸法、色等を選定するものとする。

<第22条 運用基準>

- 1 対空標識の形状は、次を標準とする。



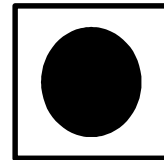
★型



X型



+型



○型

- 2 対空標識の辺長あるいは円形の直径は5画素以上とする。
- 3 対空標識の色は白黒を標準とし、状況により黄色や黒色とする。
- 4 対空標識の設置に当たっては、次に定める事項に留意する。
  - (1) あらかじめ土地の所有者又は管理者の許可を得る。
  - (2) 天頂からおおむね45度以上の上空視界を確保する。
  - (3) 堅固に設置する。
  - (4) 背景との色調差が明瞭な地点を選ぶか、明瞭となる措置をとる。
  - (5) 一定の期間設置が必要な場合、保全等のために標識板上、あるいは樹上等に設置する場合は標示杭に、標識板1枚の3分の1以下の大きさで、次の事項を標示することを原則とする。
    - ① 公共測量
    - ② 計画機関名
    - ③ 作業機関名
    - ④ 保存期限(年月日まで)
- 5 設置した対空標識は、撮影作業完了後、速やかに原状を回復するものとする。
- 6 樹上等に設置した対空標識の判読が困難になるとされる箇所では、背景より50cm程度高くするものとする。

【解説】

対空標識の形状は、要求精度以上に高い解像度で撮影されると考えられることから、より標定点位置が明瞭に特定できるもの及び自動処理での計測が可能なもの(円形)が望ましい。

この他、自動抽出のために特殊な形状を用いる場合には、自動抽出を損なわないように地上画素寸法にも配慮する必要がある。

対空標識の辺長は、準則を参考に規定しているが、標定点位置が特定できることを前提とし、空中写真上で探し出し易いこと、交通の邪魔にならないこと、空中写真の地上画素寸法等を考慮して決定する必要がある。

標識は、白色の膨張、黒色の収縮、さらには極端な拡大表示によって標定点位置が直接は特定し難くなるため、実際には色の境界線の延長の交点によって特定するよう設計されている。なお、膨張と収縮を抑える色の見直しも考えられるが、コントラストの低下に注意する必要がある。反対に極端に光が反射する素材も、ハレーションを起こして模様を壊してしまうので注意する必要がある。

標識への諸事項の標示は、白部に記載するが、空中写真上では白色が膨張するので判読に支障を来すことはない。なお、管理された作業範囲等においては、必ずしも標示の必要はなく、また原状回復の必要もない。

#### (成果等)

第23条 成果等は、次の各号のとおりとする。

- 一 対空標識点明細票
- 二 対空標識点一覧図
- 三 精度管理表
- 四 その他の資料

### 第5節 撮影

#### (要旨)

第24条 撮影とは、UAVを用いて測量用の空中写真を撮影する作業をいい、後続作業に必要な写真処理工程を含むものとする。

#### (撮影計画)

第25条 撮影計画は、撮影地域ごとに、要求精度、使用機器、地形形状、土地被覆、気象条件等を考慮して立案するものとする。

#### <第25条 運用基準>

- 1 撮影高度は、対地高度に撮影地域内の撮影基準面高を加えたものとする。
- 2 対地高度は、 $[(\text{要求精度}) \times (\text{撮像素子上での基線長}) / (\text{読み取り精度})]$ 以下とし、地形や土地被覆、使用デジタルカメラ等を考慮して決定するものとする。なお、要求精度は下表のとおりとする。

地図情報レベル	250	500
要求精度	0.06m	0.12m

- 3 撮影基準面は、原則として、撮影地域に対して一つを定めるが、比高の大きい地域にあっては、数コース単位に設定することができる。
- 4 画面距離は、レンズの特性や地形等の状況によって決定するものとする。決定した画面距離は、撮影終了まで固定するものとする。
- 5 デジタルカメラは、レンズも含め同じものを使用するものとする。
- 6 巡航速度は、空中写真が記録できる時間以上に露光間隔がとれる速度とする。
- 7 同一コースは、直線かつ等対地高度で撮影することを原則とする。
- 8 同一コース内の隣接空中写真との重複度は60%、隣接コースの空中写真との重複度は30%を標準とする。
- 9 コースの位置及び隣接空中写真との重複度は、次の各号に配慮するものとする。
  - (1) 実体空白部を生じさせない
  - (2) 隠蔽部ができる限り少なくなるようにする
  - (3) パスポイント及びタイポイントが選点しがたい土地被覆がない
- 10 コースの始めと終わりの地域外に1モデル以上撮影する。
- 11 撮影計画は、撮影時の明るさや風速、風向あるいは地形・地物の経年変化等により、現場での見直しが生じることを考慮しておく。

## 【解 説】

読み取り精度とは、空中写真上で地形・地物をどの程度の精度で読み取れるかの指標で、明瞭な形状を持つものは画素の10分の1程度が期待できる。一般には、空中写真の画質や地形・地物の明瞭さにもよるが、数分の1と考えられる。なお、機器の性能や撮影の環境は全く異なるが準則では、デジタル航空カメラで撮影した空中写真の読み取り精度は0.5画素としている。

対地高度は、写真測量の奥行き(高さ)精度の理論式を対地高度が求まるように変形し、要求精度は数値地形図データの精度の最小値つまり地図情報レベル250の水平位置の標準偏差の半分とした。本来なら標高点の標準偏差を用いるべきところであるが、空中写真測量では樹木等の被覆により、撮影高度が低くなくても実質的な精度が向上しないため、標高点の標準偏差は地図情報レベル250と500は同じ値としてあり、空中三角測量用の精度基準としては使用できないためである。

パスポイント及びタイポイントを選点しがたい土地被覆としては、濃淡の少ない砂地や裸地、実体視を困難とする枝葉の状態にある樹木、風で揺れる丈の草地等がある。

写真測量の精度は、一般には次のように表現される。

$$\text{水平位置の精度} = \frac{\text{対地高度}}{\text{画面距離}} \times \text{読み取り精度}$$

$$\text{標高の精度} = \frac{\text{対地高度}}{\text{画面距離}} \times \frac{\text{対地高度}}{\text{基線長}} \times \text{読み取り精度}$$

水平位置と標高の精度の違いは  $\frac{\text{対地高度}}{\text{基線長}}$ 、いわゆる基線高度比の逆数の違いであり、空中写真測量では基線高度比は 1 以下の値を取るため、標高は水平位置より精度が低くなる。従って、写真測量の諸元を決める際には、標高の精度が基準となる。

また、基線高度比は  $\frac{\text{画面距離}}{\text{撮像素子上での基線長}}$  と同値であるため、標高の精度は次のようにも書ける。

$$\text{標高の精度} = \frac{\text{対地高度}}{\text{画面距離}} \times \frac{\text{画面距離}}{\text{撮像素子上の基線長}} \times \text{読み取り精度}$$

この式を変形することで、カメラの諸元から対地高度を求める次式が導ける。

$$\text{対地高度} = \frac{\text{標高の精度} \times \text{撮像素子上の基線長}}{\text{読み取り精度}}$$

#### (UAV)

第 26 条 UAV は、所要の性能を有するものを使用しなければならない。

#### <第 26 条 運用基準>

UAV の性能は、次のとおりとする。

- (1) 手動飛行機能及び自律飛行機能、異常時の自動帰還機能等を装備しているものとする。
- (2) 航行能力は、利用が想定される飛行域の地表風に耐えることができるものとする。
- (3) 撮影時の飛行姿勢、デジタルカメラの水平規正及び写角が確保できるものとする。

#### 【解説】

航行能力は機体によって異なり、耐風能力も異なってくる。従って、ここでは具体的な規定としてはいない。

(デジタルカメラ)

第27条 デジタルカメラを構成する本体、レンズ、撮像素子は、所要の性能を有するものを使用しなければならない。

<第27条 運用基準>

- 1 デジタルカメラ本体の性能は、次のとおりとする。
  - (1) 焦点位置、露光時間、絞り、ISO感度が手動で設定できる。
  - (2) レンズの焦点を調整したり、レンズのブレ等を補正したりする自動処理機能を解除できる。
  - (3) RAW画像を記録できる。
  - (4) 画面距離や露光時間等の情報が確認できる。
  - (5) 十分な記録容量を確保できる。
- 2 レンズの性能は、次のとおりとする。
  - (1) 単焦点である。
  - (2) 色収差が補正されている。
  - (3) 歪曲収差は系統的である。
- 3 撮像素子の性能は、次のとおりとする。
  - (1) CCDもしくはCMOS構造である。
  - (2) 素子(ピクセル)の形状は正方形とみなせる。
  - (3) 素子(ピクセル)の数と設置間隔がわかる。
  - (4) グローバルシャッターもしくは同等の機能を有する。

【解説】

本章では、共線条件がなりたたないレンズを装備したカメラや歪みが系統的でないカメラは対象としていない。カメラの良否は空中写真測量に大きな影響を与えるため、どのようなカメラを採用するかは実際の測量に従って検証するなど、慎重に行う必要がある。

空中写真の記録形式は、RAW画像とし、非圧縮でTIF等の形式に変換して空中三角測量等に利用されることを前提としている。なお、RAW画像にはExifと呼ばれる露光時間や絞り、ISO等の情報が格納されており、これらの情報も変換した画像に保持させる必要がある。



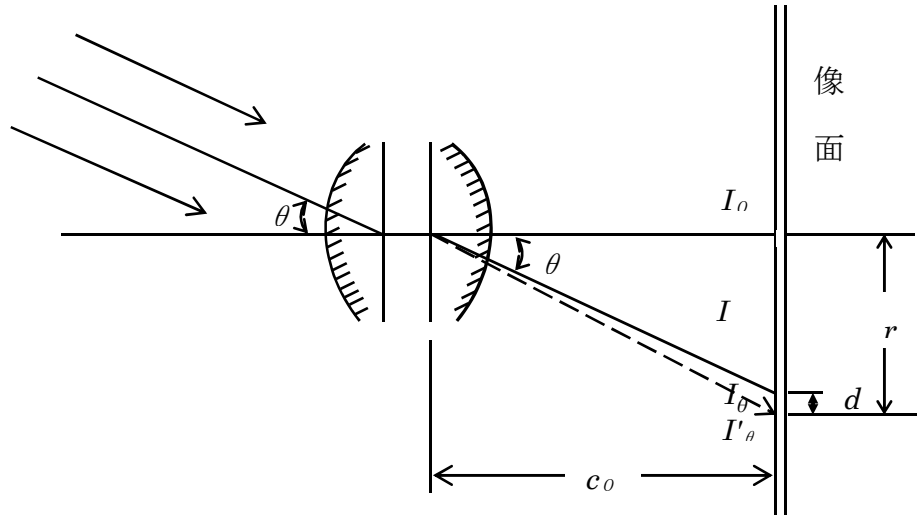


図 4 レンズの構造

理想的なレンズでは、入射角  $\theta$  の平行光は、像面上の光軸点  $I_0$  から  $c_0 \tan \theta$  だけ離れた点  $I_\theta$  に像を結ぶ。たが、実際のレンズでは、歪曲収差のため点  $I_0$  から  $d$  だけ離れた点  $I_\theta$  に像を結像される、このズレ  $d$  は入射角  $\theta$  での平行光の放射方向歪曲収差（ラジアルディストーション）とよばれ、カメラにおける代表的な歪みである。この他、歪みには接線方向歪曲収差（タンジェンシャルディストーション）や画面距離、主点位置のズレ等があり、これらの量が大きく、そのままでは要求精度を得られない場合には、その量を求め（キャリブレーション）、後処理で補正しなければならない。

民生用デジタルカメラであってもキャリブレーションを行って画面距離やレンズ収差、主点のズレ等を解析し、これらの値を使って空中三角測量や空中写真の標定の補正を行うことによって、計測カメラとして使用できるといわれている。その際、カメラのキャリブレーション時の状態で保持する必要があるとともに、レンズや撮像素子等のカメラの内部の機構が動かないようにしておかなければならない。内部機構が動かない対策のひとつとして、レンズは単焦点としている。また、ビニールテープ等でフォーカスリングを固定するなどの対策が必要となる。ズームレンズは、内部の機構を固定できる保証がないため、本章では規定していない。

撮像素子とは CCD や CMOS センサ自体をいい、素子とは撮像素子を構成する光の受光する電極をいう。

本マニュアルでは、現状の UAV の積載量などを考慮して民生用デジタルカメラの利用を想定しているが、産業用などのカメラであっても軽量化や露光制御等の UAV への対応が進んで搭載が可能となるとともに所定の精度が得られれば利用は可能となる。

**(空中写真の地上画素寸法)**

第28条 空中写真の地上画素寸法は、地図情報レベル等に応じて定める。

**<第28条 運用基準>**

- 1 空中写真の地上画素寸法と地図情報レベルとの関連は、次表に掲げるものを標準とする。なお、式中の $\alpha$ は読み取り精度[画素]の逆数、 $b$ :撮像素子上の基線長[mm]、 $c$ :画面距離[mm]とし、 $\alpha$ は使用するデジタルカメラと撮影時の設定によって決定するものとする。

地図情報レベル	地上画素寸法[mm]
250	$90 \times \alpha \times b \div c \sim 120 \times \alpha \times b \div c$
500	$180 \times \alpha \times b \div c \sim 240 \times \alpha \times b \div c$

- 2 読み取り精度は、対地高度、使用機器、土地被覆あるいは測量対象等によって決定するものとする。

**【解説】**

空中写真の地上画素寸法は、地図情報レベル毎に規定された数値地形図データの要求精度から決定するのが基本であるが、安全面に配慮する必要もある。

地上画素寸法を求める計算式は、準則の規程に準拠している。ただし、基線高度比( $b \div c$ )はカメラ側で求めるように変形している。

読み取り精度は、対地高度や素子寸法、色の作り方、画像の圧縮率、土地被覆あるいは測量対象等によって変わり、撮影の対地高度が低くなるほど、素子寸法は小さいほど、色の作り方は複雑になるほど、画像の圧縮率が高くなるほど、土地被覆の濃淡が少ないあるいは測量対象が不明瞭なほど、悪くなる。

**(撮影時期)**

第29条 撮影は、原則として、撮影に適した時期及び時間で、気象状態が良好なときに行うものとする。

**<第29条 運用基準>**

撮影は、次の各号に留意して行うものとする。

- (1) 強風がない
- (2) 明るい
- (3) 陰が濃くない

**【解説】**

撮影は飛行しながら行なわれるため、安定して飛行できる環境が求められる。つまり、

風は強くないことが望ましい。

飛行しながらの撮影では、画像のブレをできるだけ少なくするため、露光時間は短くすることが望ましい。露光時間を短くするためには、明るさが必要となる。

十分に明るい状況であっても、太陽の位置が低くて陽の当たる場所と陰になる場所のコントラストが大きいと影が濃くなって、その部分の写りが悪くなる。

この他、撮影が好ましくない条件としては、突風の恐れがある場合、降雨や降雪等がある。

風の強さを確認する方法には、気象庁が出しているビューフォート風力階級表がある。

#### (カメラキャリブレーション)

第30条 デジタルカメラは、カメラキャリブレーションを行ったものでなければならない。

- 2 カメラキャリブレーションは、三次元のターゲットを用いて行うことを原則とする。
- 3 デジタルカメラは撮影が終了するまで、カメラキャリブレーションをした状態を維持するものとする。
- 4 カメラキャリブレーションで作成する誤差モデルは、これを使用するソフトに適合していなければならない。

#### <第30条 運用基準>

- 1 カメラキャリブレーションにより求める値は、画面距離、画像中心からの主点位置のズレ、放射方向の歪み量、接線方向の歪み量を原則とする。
- 2 カメラキャリブレーション結果における画像座標の残差は、0.1画素以内とする。
- 3 誤差モデルは、バンドル調整プログラムに適したものでなければならない。
- 4 カメラキャリブレーションは、撮影前あるいは撮影後のいずれかに実施する。
- 5 二次元ターゲットを用いてカメラキャリブレーションを行う場合は、三次元ターゲットと同様に異なる方向からターゲットを撮影し、画面距離を正しく補正しなければならない。

#### 【解説】

民生用デジタルカメラを測量に利用するには、画面距離や画像中心からの主点位置のズレ、レンズの歪みといった内部定位を固定し、これらの値を把握し、後処理で使用されるソフトで利用できるようにしなければならない。これらの値を求めることをカメラキャリブレーションという。

二次元ターゲットを用いてカメラキャリブレーションを行う場合は、二次元ターゲットに歪みを生じさせないなど、二次元ターゲット自体の取扱いにも注意が必要である。

内部定位を固定するには、オートフォーカスや手ぶれ補正等、内部の機構を動かす機能

を解除するとともに、フォーカスリングといったレンズを動かす機構をテープ止めしたりしなければならぬ。

カメラキャリブレーション結果は、カメラがテープ止め等により内部定位が固定されれば繰り返し撮影に利用できるが、撮影時の振動などの影響も受けたり、誤って内部の機構を動かす操作を行ったりすることも考えられる。従って、カメラキャリブレーション結果の有効期間は規定していない。細心の注意を払って利用する必要がある。

誤差モデルは、Brown が 1971 年に発表したもっとも一般的に使われている式をはじめ、Ebner、EL-Hakim、村井他等多くの式が存在する。これらは多くが、測量用の航空カメラを対象として開発されたものである。

#### (機器の点検と撮影計画の確認)

第 3 1 条 飛行させるにあたっては、撮影計画の実際への適合性を確認する飛行を行い、機器の点検と撮影計画の確認を行うものとする。

#### <第 3 1 条 運用基準>

- 1 機器の点検は、次の各号について行う。
  - (1) バッテリー
  - (2) モータ
  - (3) アンプ
  - (4) ネジの締め付け
  - (5) 機体のバランス
  - (6) 送信機のバッテリー容量
  - (7) デジタルカメラの設定
  - (8) レンズ表面へのゴミの付着
- 2 撮影計画の較正は次の各号について行う。
  - (1) 撮影高度
  - (2) 露光時間
  - (3) 感度
  - (4) 自動機能の解除
  - (5) 画像記録の設定
  - (6) 経年変化による撮影コース、対地高度の見直し

#### 【解説】

撮影を行うにあたっては、いきなり飛行させるのではなく、機器の調子や設定の状況、計画と実際の違い等を確認する簡単な飛行を行う。機器は、気温や移動中の振動の影響を受けたりしている可能性がある。機体や飛行計画やカメラの設定項目は多く存在すると

もに、常に同じ状態とはならない。計画に用いた地図情報が、現地の状況を正確に表しているとは限らない。確認飛行は、バッテリーや風速の状態が逐次変わっていくため、撮影飛行の直前に毎回行うものとした。

バッテリーは見かけ上と実際の蓄電容量が異なることがある。

撮影高度は、標高に対地高度を加えて決定される。標高は、撮影計画に使われる Web 配信の地図では、精度が低いこともあり、適切な撮影高度での飛行とならない場合がある。また、UAV による撮影は低高度からの僅かな範囲の撮影であるため、僅かな高度の違いが重複度に大きく影響を与える。

露光時間は、明るさによって決定する必要がある。また、露光時間の設定によっては、画像へのブレの混入を防ぐために、飛行速度を調整する必要もある。

感度（ISO 感度の数値）を上げることは、撮像素子から読み出される信号を増幅させることに相当し、増幅させすぎると信号に含まれるノイズも顕著となり、画像にざらつきが生じることとなる。なお、発生するノイズの量はカメラごとに異なるため、事前に実際の撮影条件と同じ条件でテストを行い、ノイズの発生量を確認して感度を決めておくことが望ましい。

#### （撮影飛行）

第 3 2 条 撮影飛行は、次の各号に従って行うものとする。

- 一 計画撮影高度及び計画撮影コースを保持するものとする。
- 二 離着陸以外は、自律飛行で行うことを原則とする。
- 三 機体に異常が見られた場合は、ただちに撮影飛行を中止する。
- 四 他の UAV 等の接近が確認された場合には、ただちに撮影飛行を中止する。

#### <第 3 2 条 運用基準>

撮影した画像は、RAW 画像で記録することを原則とする。

#### （撮影結果の点検）

第 3 3 条 撮影の直後に、撮影結果の点検を行うものとする。

2 撮影結果の点検は、次の各号について行うものとする。

- 一 撮影範囲
- 二 空中写真の画質
- 三 隣接空中写真間の重複度
- 四 隣接空中写真間の地上画素寸法較差
- 五 隠蔽部の範囲
- 六 対空標識の有無

### <第33条 運用基準>

- 1 空中写真の画質は、露光不足、露光過多、ボケ、ブレについて行うものとする。
- 2 空中写真間の重複度は、空中写真を撮影された関係で並べて点検するものとする。
- 3 隠蔽部の有無は、立体図化に障害がないかを点検するものとする。
- 4 光輝暗影は、図化に必要となる項目が判読できるかを点検するものとする。

#### 【解説】

RAW 画像はメーカー独自の画像形式で記録されるため、点検や空中写真測量に使用するには TIF 等の形式に変換する必要がある。

空中写真間の重複度を点検することにより、空中写真の落ちや立体空白部も明らかになる。また、重複度が満たされていれば、コースや主点位置のズレは許容できることとなる。

立体モデルを構成する空中写真間において地上画素寸法の差が大きいと、図化がしづらくなる。

#### (再撮影)

第34条 立体空白部や現地調査で補えない隠蔽部・暗影光輝が存在する場合には、それらの箇所を再撮影するものとする。

- 2 再撮影は、次の各号によるものとする。
  - 一 撮影コースは、隠蔽・暗影光輝が生じない位置とする。
  - 二 撮影範囲は、当該箇所の前後に1モデル以上を加えたものとする。

### <第34条 運用基準>

再撮影の撮影方向は、隠蔽部あるいは暗影光輝が最も緩和される方向に設定するものとする。

#### (成果等)

第35条 成果等は、次の各号のとおりとする。

- 一 カメラキャリブレーションデータファイル
- 二 空中写真
- 三 撮影記録
- 四 撮影標定図
- 五 精度管理表
- 六 その他の資料

### <第35条 運用基準>

カメラキャリブレーションデータには、誤差モデルの記述が含まれるものとする。

## 第 6 節 空中三角測量

### (要 旨)

第 36 条 空中三角測量とは、標定点、パスポイント及びタイポイントの写真座標、カメラキャリブレーションデータを用いて、空中写真の外部標定要素及びパスポイント、タイポイントの水平位置と標高を決定する作業をいう。

### (パスポイント及びタイポイントの選点)

第 37 条 パスポイントは、同一コースで連続する空中写真間を連結する点、タイポイントは隣接コースの空中写真間を連結する点に分けて選定するものとする。

2 パスポイント及びタイポイントの選定は、空中写真間の連結が理論的に最も堅ろうとなる配置で、空中写真上で明瞭に認められる位置とすることを原則とする。

### <第 37 条 運用基準>

- 1 パスポイントの配置は、次の各号によるものとする。
  - (1) 主点付近及び主点基線に直角な両方向の 3 箇所以上を標準とする。
  - (2) 主点基線に直角な方向は、上下端付近の等距離に配置することを標準とする。
- 2 タイポイントの配置は、次の各号によるものとする。
  - (1) 1 モデル毎に等間隔かつジグザグに配置することを標準とする。
  - (2) パスポイントで兼ねることができる。

### (標定点とパスポイント及びタイポイントの観測)

第 38 条 標定点、パスポイント及びタイポイントの写真座標は、立体視で観測することを原則とする。

### <第 38 条 運用基準>

パスポイント及びタイポイントは、その点が写っている全ての空中写真で観測することを原則とする。

### 【解 説】

空中写真を堅固に連結するには、前条に規定する配置でパスポイント及びタイポイントを取得する必要がある。しかしながらパスポイント及びタイポイントを取得する位置に、明瞭な地物が存在するとは限らない。このような状況で取得するには、立体視をしながら手で観測する必要がある。自動で取得した場合には、立体視による確認や空中三角測量ソフトの異常値検索機能などにより、点検する必要がある。

パスポイント及びタイポイントは、写っている全ての空中写真で観測することによって自由度をなくし、堅固なモデルを作れることになる。

**(調整計算)**

第39条 カメラキャリブレーションデータ及び標定点、パスポイント及びタイポイントの写真座標を用い、バンドル法により調整計算を行い、各空中写真の外部標定要素及びパスポイント及びタイポイントの水平位置と標高を求めるものとする。

**<第39条 運用基準>**

- 1 調整計算を行う前には、多項式法あるいはバンドル調整法の異常値検索機能により過誤を検出し、観測値を点検するものとする。
- 2 調整計算では、原則として、セルフキャリブレーションは行わないことを原則とする。
- 3 標定点の水平位置及び標高の残差は、どちらも標準偏差及び最大値ともに次表の値以内とする。

地図情報レベル	標準偏差[m]	最大値[m]
250	0.06	0.12
500	0.12	0.24

- 4 パスポイント及びタイポイントの交会残差は、標準偏差が1.5画素以内、最大値が3.0画素以内とする。
- 5 大気屈折及び地球曲率の影響の補正は、行わないものとする。
- 6 セルフキャリブレーション付きの調整計算を行った場合には、セルフキャリブレーションデータを更新し、数値図化時のステレオモデル構築に再現できるようにしなければならない。
- 7 調整計算は、原則として、単一ブロックとして行うことを原則とする。

**【解説】**

大気屈折及び地球曲率の影響の補正は、撮影範囲が狭いこと、対地高度が低いことから、必要とはしない。

標定点残差の標準偏差及び最大値は、準則で規定するフィルム航空カメラの規程（対地高度に対し標準偏差は0.02%、最大値は0.04%）としている。これらの結果を踏まえ、空中写真測量で規定されていない地図情報レベル250は、地図情報レベル500の半分としている。

地図情報レベル	撮影縮尺の分母			対地高度(150mmレンズ)			0.02%			0.04%		
	最大	～	最小	最小 [m]	～	最大 [m]	最小 [m]	～	最大 [m]	最小 [m]	～	最大 [m]
250	-	～	-	-	～	-	0.05	～	0.06	0.09	～	0.12
500	3,000	～	4,000	450	～	600	0.09	～	0.12	0.18	～	0.24

調整計算が収束しない場合には、理由としてはカメラやカメラキャリブレーション、標定点、パスポイント・タイポイントなどに問題があると考えられる。したがって、例えばパスポイント・タイポイントの観測精度を上げるなどの見直しが必要となる。ただし、調



整計算を収束させるためにセルフキャリブレーションを導入したり、標定点の配置を見直したりしても、見かけ上の精度が向上だけのこともあるため、注意が必要である。

#### **(成果等)**

第40条 成果等は、次の各号のとおりとする。

- 一 外部標定要素成果表
- 二 パスポイント、タイポイント成果表
- 三 空中三角測量作業計画、実施一覧図
- 四 写真座標測定簿
- 五 調整計算簿
- 六 精度管理表
- 七 その他の資料

### **第7節 現地調査**

#### **(要 旨)**

第41条 現地調査とは、空中写真で判読が困難な各種表現事項、名称等、他の地物に隠蔽された箇所を、現地にて調査する作業をいう。

- 2 現地調査を行うにあたっては、現地調査の着手前に撮影計画や各種既存資料を元に、予察を行うものとする。

#### **【解 説】**

現地調査には、撮影した空中写真をモザイクしたり正射変換して使用することもできるが、画像が変形して誤判読とならないように作成する必要がある

#### **(現地調査の実施)**

第42条 現地調査は、予察の結果に基づいて空中写真及び各種資料を活用し、次に掲げるものについて実施するものとする。

- 一 予察結果
- 二 空中写真上で判読困難な箇所の地図項目
- 三 空中写真上で判読不能な地図項目
- 四 標定点

### **<第42条 運用基準>**

- 1 現地調査を行うにあたっては、次の事項に留意するものとする。
  - (1) コントラストが低い地物間の境界

- (2) 接触する建物の区画
  - (3) 空中写真上で不明瞭な植生及び植生界
  - (4) 凹地、がけ、岩等の表現上誤り易い地形
- 2 記号や注記は、ステレオモデルの向きに合わせて整理するものとする。
- 3 現地調査を分割して行う場合には、接合のやり取りを予め取り決めておくものとする。

**(整 理)**

第43条 調査結果は、数値図化及び数値編集作業時に参照しやすいように整理するものとする。

**<第43条 運用基準>**

現地調査の結果は、相互関係がわかるように整理することを原則とする。

**(成果等)**

第44条 成果等は、次の各号のとおりとする。

- 一 現地調査結果を整理した空中写真
- 二 その他の資料

## 第3編 UAVを用いた応用測量

### 第1章 概説

#### (要 旨)

第45条 本編は UAV を用いた応用測量の作業方法等を定める。

- 2 「UAV を用いた応用測量」とは、UAV を用いて三次元点群データ等を作成する作業をいう。
- 3 「三次元点群データ」とは、地形に係わる情報の水平位置、標高に加え、作成された時点での土地被覆の色を属性として、計算処理が可能な状態として表現したものをいう。

#### 【解 説】

- 1 UAV 等を用いた公共測量から作成した三次元データを活用して、準則第4編第2章路線測量及び第3章河川測量の縦断面図データファイル及び横断面図データファイルを作成することができる。なお、許容範囲等の精度は、準則第4編第2章路線測量及び第3章河川測量による。
- 2 路線測量において UAV を用いる場合には、標定点の設置をもって主要点と中心点の設置に代えることができる。また、縦断測量のための標杭及び横断測量のための見通杭は省略することができる。
- 3 河川測量において UAV を用いる場合には、標定点の設置をもって距離標の設置に代えることができる。

#### (工程別作業区分及び順序)

第46条 工程別作業区分及び順序は、次のとおりとする。

- 一 作業計画
- 二 標定点及び検証点の設置
- 三 対空標識の設置
- 四 撮影
- 五 三次元形状復元
- 六 数値編集
- 七 三次元点群データファイルの作成
- 八 成果等の整理

### (三次元点群データの精度)

第47条 三次元点群の平面位置及び高さの要求精度は、誤差が最大でも0.05mを超えないものとする。

2 これ以外の要求精度で三次元点群データを作成する場合は、その精度に応じて標定点間隔や標定点の残差及び検証点の誤差、地上画素寸法等を適宜読み替えるものとする。

### 【解説】

本マニュアルの第3編では、誤差が最大でも0.05mを超えない三次元点群データを必要とする場合の撮影画像の地上画素寸法や標定点・検証点について記載している。

より高い精度の三次元点群データを必要とする場合は、地上画素寸法も細くなるため撮影高度は低くなる。また、標定点・検証点の点数も増加する。より低い精度とする場合は、各許容範囲の値は緩和される。

### (適用地区)

第48条 UAVを用いた応用測量は、土工現場における裸地等、特徴点や標高を自動抽出しやすいと考えられる地区に適用することを原則とする。

### <第48条 運用基準>

特徴点や標高の自動抽出が困難な場合は適切な措置をとるものとする。

### 【解説】

具体的な適用地区は、土木工事現場等が想定されている。

濃淡の少ない被覆の土地や土地被覆の形状が変化する土地では、対空標識を設置することなどにより自動抽出の性能を向上させることができる。このような措置がとれば、濃淡の少ない土地でも三次元形状復元ソフトによる三次元点群データの作成性能は向上する。

濃淡の少ない土地とは、一概には言えないが、状況に応じて真っ新な砂地や打設直後のアスファルト面等が該当することがあると考えられる。

土地被覆の形状が変化する土地とは、丈の揃った同一植生が風に揺れている状況等が該当する。

また、水面は、均質に濁った状態では濃淡の少ない土地のように写り、さざ波が立っていたり流れている状態では光の反射が異なり変化しているように写る。

## 第2章 UAVを用いた空中写真による三次元点群測量

### 第1節 要旨

#### (要旨)

第49条 「UAVを用いた空中写真による三次元点群測量」とは、無人航空機を用いて撮影した空中写真から三次元形状復元ソフトにより三次元点群データファイルを作成する作業をいう。

#### 【解説】

本章で規定する UAV を用いた空中写真による三次元点群測量では、現状の三次元点群測量への UAV の適用状況を踏まえ、GNSS/IMU 装置は装備されていないものとして規定している。しかしながら、近い将来には装備されれば、三次元形状復元の性能は大きく向上するものと思われるため、それに応じた測量方法に見直していく必要がある。

三次元形状復元ソフトとは、空中写真から SfM (Structure from Motion) により特徴点を抽出して撮影状態を求めるとともに、撮影状態に基づき MVS(Multi View Stereo)により空中写真から高密度に三次元点群を抽出し、三次元形状を復元するものである。

### 第2節 作業計画

#### (要旨)

第50条 作業計画は、第4条の規定によるほか、工程別に作成するものとする。

### 第3節 標定点及び検証点の設置

#### (要旨)

第51条 標定点及び検証点の設置とは、空中写真の撮影状態の再現に必要となる点（以下「標定点」という。）及び三次元点群データの検証に必要となる点（以下「検証点」という。）を設置する作業をいう。

2 標定点及び検証点は、水平位置及び標高を保持するものとする。

#### 【解説】

標定点と検証点は、配置と役割は異なるが、仕様は全く同じである。

通常の測量においては、精度検証後に、検証点を標定点に変更して再計算することにより、精度が向上する。しかしながら、三次元形状復元ソフトでは、精度が低下する場合もあり、このような処理は、三次元形状復元ソフトの性質、作業時間等を考慮して行わなければならない。

## (方 法)

第52条 標定点及び検証点は、基本測量又は公共測量の基準点に従って設置された基準点（以下「既知点」という。）から次の各号のうち、いずれかの観測方法により設置することを原則とする。

- 一 TSによる放射法
- 二 キネマティック法
- 三 RTK法（直接観測法又は間接観測法）
- 四 ネットワーク型RTK法（直接観測法又は間接観測法）

### <第52条 運用基準>

観測方法、観測回数、データ取得間隔等は、準則第92条に規定されたTS点の設置方法により行うものとするが、標定点と検証点の精度が確保できる場合は、これらを変更してもよい。

### 【解 説】

TSによる放射法は、既知点にトータルステーションを設置し、標定点あるいは検証点の水平角、鉛直角、距離を測定する方法である。標定点あるいは検証点にトータルステーションを設置する必要はない。準則第92条（TS等を用いるTS点の設置）では、「観測は第37条第2項第一号の4級基準点測量の規定を準用して放射法又は同等の精度を確保できる方法（以下「放射法等」という。）により行うものとする。」と規定されている。しかし、4級基準点測量の観測方法をそのまま用いると、既知点と標定点等との距離が短い場合、過大な観測が行われる場合が多いと想定されるため、本マニュアルの運用基準で「精度が確保できる場合は、これらを変更してもよい。」としている。

なお、4級基準点測量では、角度の読定単位が20"、距離の読定単位が1mmである4級以上のトータルステーションを使用し、下記の観測を行うと規定している。

- (1) 水平角の観測は、水平目盛位置の0°と90°の2対回により行う。
- (2) 鉛直角の観測は、1対回により行う。
- (3) 距離の測定は、2セットにより行う。

キネマティック法は、基準となるGNSS測量機を整置する観測点（以下「固定局」という。）及び移動する観測点（以下「移動局」という。）で、同時にGNSS衛星からの信号を受信して初期化（整数値バイアスの決定）等に必要の観測を行う。その後、移動局を複数の観測点に次々と移動して観測を行い、それに基づき固定局と移動局の間の基線ベクトルを求める観測方法である。

RTK法は、固定局及び移動局で同時にGNSS衛星からの信号を受信し、固定局で取得した信号を、無線装置等を用いて移動局に転送し、移動局側において即時に基線解析を行うことで、固定局と移動局の間の基線ベクトルを求める。その後、移動局を複数の観測点

に次々と移動して、固定局と移動局の間の基線ベクトルを即時に求める観測方法である。

ネットワーク型 RTK 法は、配信事業者（国土地理院の電子基準点網の観測データ配信を受けている者又は、3 点以上の電子基準点を基に、測量に利用できる形式でデータを配信している者をいう。以下同じ。）で算出された補正データ等又は面補正パラメータを、携帯電話等の通信回線を介して移動局で受信すると同時に、移動局で GNSS 衛星からの信号を受信し、移動局側において即時に解析処理を行って位置を求める。その後、複数の観測点に次々と移動して移動局の位置を即時に求める観測方法である。

なお、RTK 法及びネットワーク型 RTK 法は、これらの観測方法である直接観測法あるいは間接観測法のいずれかで行う。

直接観測法及び間接観測法は、準則第 37 条で次のとおり規定している。

- (1) 直接観測法は、配信事業者で算出された移動局近傍の任意地点の補正データ等と移動局の観測データを用いて、基線解析により基線ベクトルを求める観測方法である。
- (2) 間接観測法は、次の方式により基線ベクトルを求める観測方法である。
  - (i) 2 台同時観測方式による間接観測法は、2 か所の移動局で同時観測を行い、得られたそれぞれの三次元直交座標の差から移動局間の基線ベクトルを求める。
  - (ii) 1 台準同時観測方式による間接観測法は、移動局で得られた三次元直交座標とその後、速やかに移動局を他の観測点に移動して観測を行い、得られたそれぞれの三次元直交座標の差から移動局間の基線ベクトルを求める。なお、観測は、速やかに行うとともに、必ず往復観測（同方向の観測も可）を行い、重複による基線ベクトルの点検を実施する。

#### （標定点及び検証点の配置）

第 5 3 条 標定点は、三次元点群データの精度の低下を避けるため、計測対象範囲の形状、比高が大きく変化するような箇所、地表面の粒度を考慮し、空中写真が標定点を介して既知点と堅ろうに結びつくように配置するものとする。

2 標定点とは別に計測データを点検するための検証点を配置する。

#### <第 5 3 条 運用基準>

- 1 標定点の配置は、次のとおりとする。
  - (1) 標定点は、三次元点群データを必要とする範囲を囲むように配置する。また、外部標定点、内部標定点、高高度標定点、低高度標定点で構成される。
  - (2) 外部標定点は、計測対象範囲を包括するように、概ね辺長 100m 以内で結んで構成される多角形の内側に入るように配置することを標準とする。
  - (3) 内部標定点は、計測対象範囲内に配置する。外部標定点と内部標定点から適切に構成された三角網の全ての辺長は概ね 200m 以内であること。
  - (4) 高高度標定点は、計測対象範囲の標高の高い部分に 1 点、低高度標定点は、低い部

分に1点配置する。なお、これらの標定点は、外部標定点、内部標定点と兼ねることができる。

(5) 傾斜の急な法面等の比高が大きく変化する部分は、計測精度が低下する可能性があるため、上段及び下段、あるいはいずれかに配置する。また、地表面の粒度が細かく、模様の変化が乏しい部分も計測精度が低下する可能性があるため配置する。なお、これらの標定点は、外部標定点、内部標定点と兼ねることができる。

(6) 標定点の総数は、最低4点とする。

## 2 検証点の配置は、次のとおりとする。

(1) 検証点は、外部検証点、内部検証点からなる。

(2) 外部検証点は隣接する外部標定点を結ぶ線分（以下、単に「線分」という）の中間付近に、線分1つおきに1点を配置する。なお、特に精度を検証すべき部分がある場合等は、概ね線分に直交する方向に位置を適宜ずらすことができ、計測対象範囲の内側に配置してもよい。

(3) 内部検証点は標定点から離れた場所に配置する。

(4) 内部検証点は0.04 km<sup>2</sup>あたり1点を配置する。ただし、点数の端数は、四捨五入する。

(5) 内部検証点は計測対象範囲の内側にできるだけ均等に配置する。ただし、特に精度を確認する必要がある場所に配置することもできる。

(6) 検証点の総数は、最低2点とする。

(7) 検証点は、原則として、平坦な場所又は傾斜が一様な場所に配置する。

## 3 三次元点群データの要求精度を第47条の規程としない場合は、下記の例を参考とする。

要求精度	最大誤差 0.05 m 以内	最大誤差 0.1 m 以内	最大誤差 0.2m 以内
運用基準 1(2) : 外部標定点	概ね辺長 100 m 以内	概ね辺長 100 m 以内	概ね辺長 200 m 以内
運用基準 1(3) : 内部標定点	概ね辺長 200 m 以内	概ね辺長 400 m 以内	概ね辺長 600 m 以内
運用基準 2(4) : 内部検証点	0.04 km <sup>2</sup> あたり 1 点	0.16 km <sup>2</sup> あたり 1 点	0.36 km <sup>2</sup> あたり 1 点

### 【解 説】

粒度とは、写真の画素ではなく施工面を覆う地物の砂等を想定している。

5 に標定点の配置の事例を示す。全ての例で、高高度標定点、低高度標定点、高高度検証点、低高度検証点は、他の標定点、検証点と兼ねているものとする。

撮影範囲は、計測対象範囲を内包し、全ての標定点及び検証点を撮影できるように設定される。計測対象範囲は、最終成果である三次元点群データファイルを必要とする範囲で



ある。

なお、内部検証点は、三次元点群データを必要とする範囲が  $0.01 \text{ km}^2$  より広い場合、面積に比例して点数は増加する。

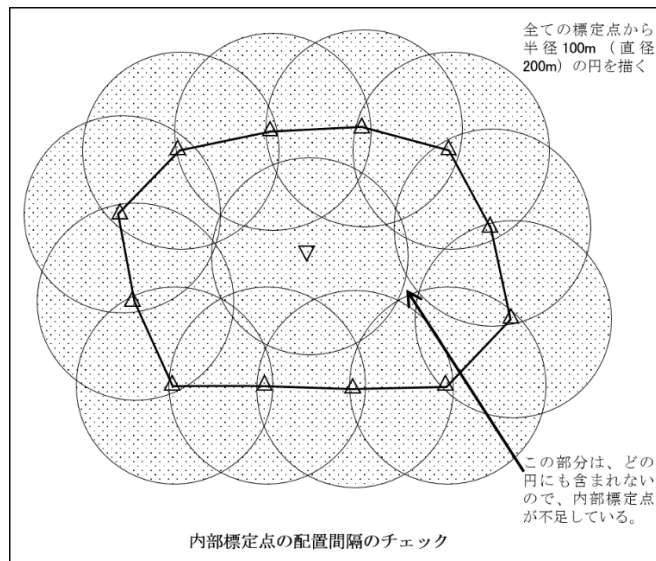
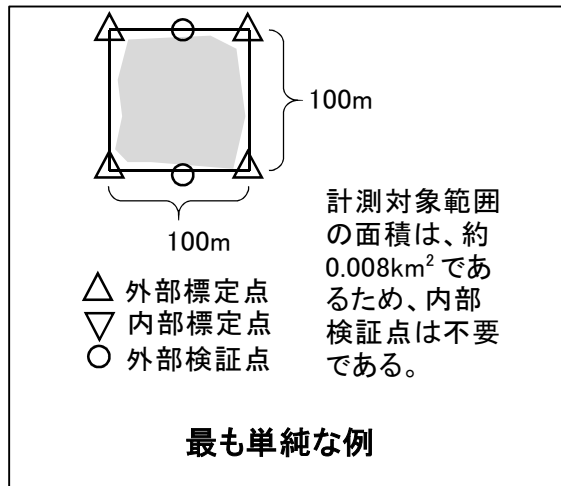
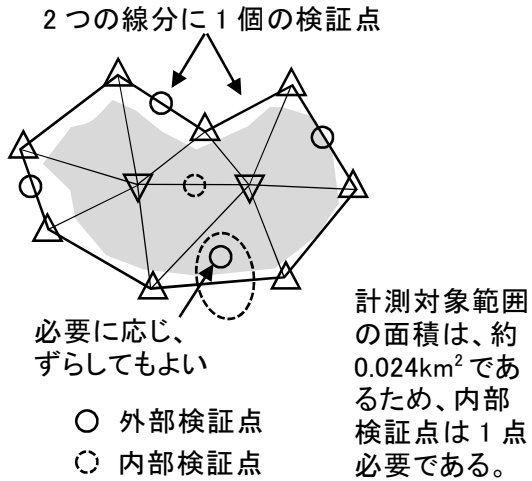
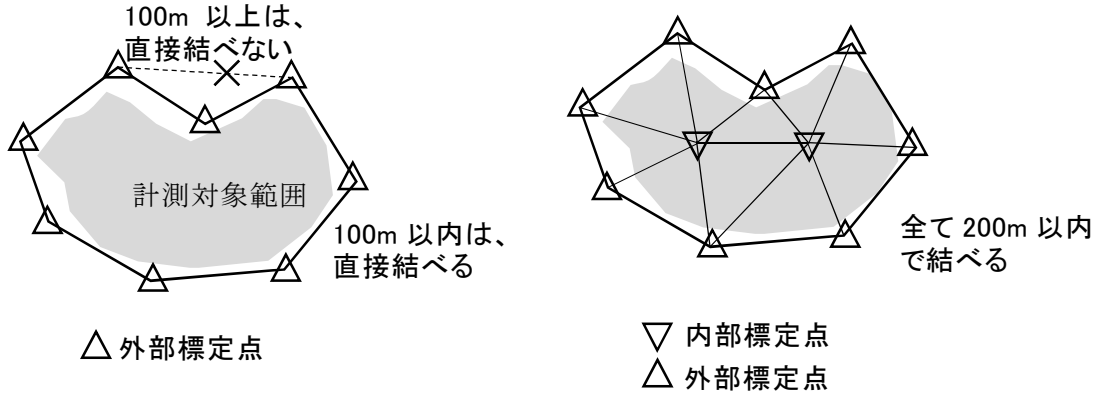


図 5 標定点の配置の事例

**(成果等)**

第54条 成果等は、次の各号のとおりとする。

- 一 標定点及び検証点の成果表
- 二 標定点及び検証点の配置図
- 三 標定点及び検証点の測量簿及び同明細簿
- 四 精度管理表
- 五 その他の資料

**【解説】**

成果等の様式は、準則第3編第3章第3節に規定されている標定点の設置に用いられるものを使用する。

**第4節 対空標識の設置**

**(要 旨)**

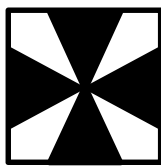
第55条 「対空標識の設置」とは、標定点及び検証点の写真座標を測定するため、標定点及び検証点に一時標識を設置する作業をいう。

**(対空標識の規格及び設置等)**

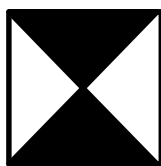
第56条 対空標識は、拡大された空中写真上で確認できるように形状、寸法、色等を選定するものとする。

**<第56条 運用基準>**

- 1 対空標識は、次の形状を標準とする。



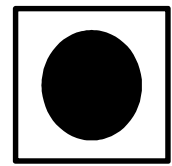
★型



X型



+型



○型

- 2 対空標識の辺長あるいは円形の直径は5画素以上とする。
- 3 対空標識は白黒を標準とし、状況により変更することができる。
- 4 対空標識の上空は、天頂からおおむね45度以上の視界が確保されていなければならない。
- 5 検証点の対空標識は、地表面に設置することを原則する。

**【解説】**

標定点及び検証点位置を、頂点で示した三角や矩形模様の対空標識は手動で、円の中心

で示した円形の対空標識は自動で、それぞれ観測されることを原則としている。この他、自動抽出のために特殊な形状を用いる場合には、自動抽出を損なわないように地上画素寸法にも配慮する必要がある。

対空標識の辺長や直径は、空中写真上で認識できる最低限の大きさを想定している。これらはより大きいほど観測しやすくなるが、経済性や足場の安全確保に考慮して決定する必要がある。

#### (成果等)

第57条 成果等は、次の各号のとおりとする。

- 一 対空標識点明細票
- 二 対空標識点一覧図
- 三 精度管理表
- 四 その他の資料

#### 【解説】

成果等の様式は、準則第3編第3章第4節に規定されている対空標識の設置に用いられるものを使用する。

### 第5節 撮影

#### (要旨)

第58条 撮影とは、UAVを用いて三次元形状復元用の空中写真を撮影する作業をいい、後続作業に必要な写真処理工程を含むものとする。

#### (撮影計画)

第59条 撮影計画は、撮影地域ごとに、撮影基準面、撮影高度、空中写真の重複度、撮影コースの方向、コース数等を決定する。その際、三次元点群データの要求精度、使用機器、地形形状、土地被覆、気象条件等を考慮して立案するものとする。

2 撮影高度は、撮影基準面からの高度をいう。三次元点群データの高さの誤差が最大でも0.05mを超えないものとするとき、地上画素寸法が0.01mとなるように、使用するカメラの画素サイズと焦点距離から決定する。

3 空中写真の重複度は、空中写真間の整合処理の確実さに影響するため、同一コース内の隣接空中写真間で90%以上、隣接コースの空中写真間で60%以上とする。

#### <第59条 運用基準>

1 撮影基準面は、原則として、撮影地域に対して一つを定めるが、比高の大きい地域に

あつては、撮影高度を一定とするために、数コース単位に異なる高さで設定することができる。

- 2 撮影高度は、三次元点群データの高さ精度によって決定される地上画素寸法と使用するカメラの1画素のサイズとの比例関係に対応して、使用するカメラの焦点距離から決定する。なお、焦点距離は、レンズの特性や地形等の状況によって決定するものとする。
- 3 UAVの飛行速度は、空中写真の記録に要する時間以上の露光間隔が設定できる速度とする。
- 4 重複する空中写真間の地上画素寸法の差は極端に大きくしないものとする。
- 5 撮影計画は、撮影時の明るさや風速、風向あるいは地形・地物の経年変化等により、現場での見直しが生じることを考慮しておくものとする。
- 6 計測対象範囲外に、少なくとも1枚分の空中写真が撮影されるものとする。
- 7 三次元点群データの要求精度を第47条の規程としない場合は、下記の例を参考とする。

要求精度	最大 0.05 m 以内	最大 0.1 m 以内	最大 0.2 m 以内
地上画素寸法	0.01 m	0.02 m	0.03 m

#### 【解 説】

撮影基準面は、計測対象地域を代表する水平面であり、撮影高度、地上画素寸法、重複度を計算する際の基準となる高さを示す面である。すなわち、ここでの撮影高度は撮影基準面からの高度を、地上画素寸法は撮影基準面上での画素寸法を示す。

撮影高度を求める計算式は、次のとおりである。

$$\text{「撮影高度} = (\text{地上画素寸法} / \text{使用カメラの1画素あたりのサイズ}) \times \text{焦点距離} \text{」}$$

例として、地上画素寸法 0.01 m、使用カメラの1画素あたりのサイズ 0.000006m、焦点距離 0.035mの場合は、撮影高度は約 60m となる。

空中写真を重複させることで、高さデータを得るための演算処理を行うため、重複の生じない部分（実体空白部）がないように配慮する。また、三次元形状復元ソフトは、精度の向上、あるいは精度安定のために、特徴点の観測数を増やすことが戦略として取り入れられている。そのため、低い高度から撮影して空中写真の地上画素寸法を小さくしたり、重複度を増やして特徴点の数を増やしたりすることが、精度向上などに有効である。

撮影コースの方向は、計測対象範囲の形状を鑑みて、コース数の少ない方向を選定するが、比高の大きい場合や撮影日の風向にも影響される。

撮影のイメージを図6に示す。空中写真は、計測対象範囲の全てを網羅する必要があるため、運用基準第6項に従い、計測対象範囲外に1枚分の空中写真が撮影されるように計画されている。

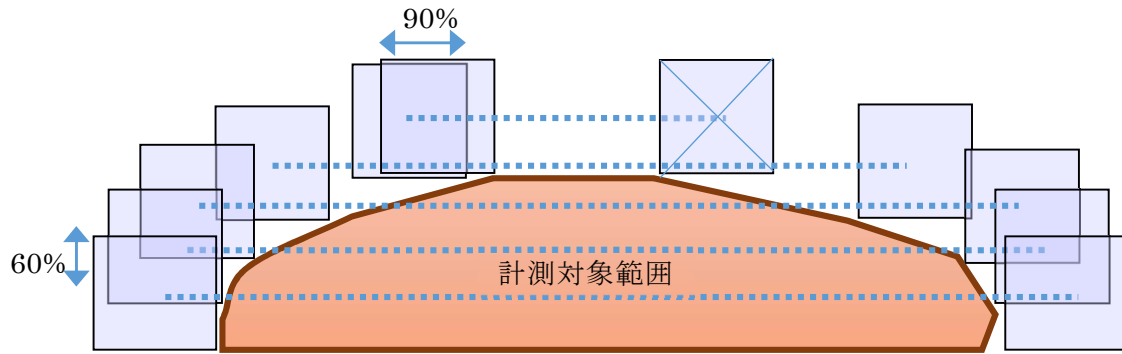


図 6 撮影の概念

**(UAV)**

第 60 条 UAV は、次の性能を有するものを使用することを基本とする。

- 一 手動飛行機能及び自律飛行機能、異常時の自動帰還機能等を装備している。
- 二 航行能力は、利用が想定される飛行域の地表風に耐えることができる。
- 三 撮影時の飛行姿勢、デジタルカメラの水平規正及び写角が確保できる。

**(デジタルカメラ)**

第 61 条 デジタルカメラは、所要の性能を有するものを使用するものとする。

**<第 61 条 運用基準>**

- 1 レンズの光軸（主点位置）のずれ、放射方向歪曲収差（ラジアルディストーション）、接線方向歪曲収差（タンジェンシャルディストーション）を内包する幾何学的位置のずれは、カメラキャリブレーション後、画像座標の標準偏差として 0.5 画素以内であること。
- 2 デジタルカメラ本体の性能は、次のとおりとする。
  - (1) 画面距離、露光時間、絞り、ISO 感度が手動で設定できることを標準とする。
  - (2) 焦点の調整、ブレ防止等の補正機能を解除できる。ただし、オートフォーカスでの撮影が適切であると判断される場合は、焦点の調整を解除できなくてもよい。
  - (3) 画面距離や露光時間帯等の情報を記録できる。
  - (4) 十分な記録容量を確保できる。
- 3 レンズは、単焦点とする。
- 4 撮像素子の性能は、次のとおりとする。
  - (1) CCD もしくは CMOS 構造である。
  - (2) 素子（ピクセル）の形状は正方形とみなせる。
  - (3) 素子（ピクセル）の数と設置間隔がわかる。

## 【解 説】

運用基準第1項に関しては、第63条の解説を参考とすること。

運用基準第3項に関して、可動部分を物理的に固定し、第61条運用基準第1項を確認した状態と確実に同じ状態（この確認とは別に、第63条の独立したキャリブレーションを行った場合には、この状態とも確実に同じ状態）で計測が可能であれば、ズームレンズでも単焦点レンズとみなしてもよい。ただし、一般的にはズームレンズは、レンズの歪みが大きいため、注意を要する。

撮影時の位置やカメラの設定状況等を Exif 情報に記録しておくことで作業の効率化や品質の確認に有効である。

なお、撮像素子とは CCD や CMOS センサ自体をいい、素子とは撮像素子を構成する光を受光する電極をいい、画像上では1ピクセル（画素）に相当する。

キャリブレーションの実施に当たっては専門機関へ依頼する方法もある。

### （撮影時期）

第62条 撮影は、原則として、撮影に適した時期及び時間で、気象状態が良好なときに行うものとする。

### （カメラキャリブレーション）

第63条 デジタルカメラは、キャリブレーションを行わなければならない。このキャリブレーションには、独立したキャリブレーションのほか、セルフキャリブレーションを用いることができる。

## <第63条 運用基準>

独立したキャリブレーションには、三次元的に配置されたターゲットの撮影、又は二次元的に配置されたターゲットの多方向からの撮影を用いる。

## 【解 説】

写真測量に使用するカメラは、幾何学的な位置のずれが既知である必要がある。この幾何学的な位置のずれは、典型的には画面距離、主点位置、放射方向の位置ずれを示す多項式、接線方向の位置ずれを示す多項式でモデル化される。カメラキャリブレーションとは、このようなモデルを求めることである。

画面距離（よく文字  $c$  であらわされる）は、レンズの中心から焦点面までの距離である。焦点距離（よく文字  $f$  であらわされる）と比較して十分遠方からの撮影である場合（例えば有人機を用いた写真測量）は、焦点距離は、画面距離とほぼ同じ値となるが、このような場合においても、キャリブレーションにより決定する必要がある。なお、既存文献では画面距離と焦点距離を区別せず、焦点距離  $f$  と記載している場合があるため、注意を要す

る。

カメラキャリブレーションは、屋内等に設置されたターゲット等を用い、三次元形状復元計算とは独立に行う方法（独立したキャリブレーション）、三次元形状復元計算の過程で行なう方法（セルフキャリブレーション）がある。独立したキャリブレーションのほうが高い精度でキャリブレーションできる場合が多いが、キャリブレーションに使用している誤差モデルと三次元形状復元計算で使用している誤差のモデル、あるいはそのパラメータを記載したファイルの形式を合わせる必要がある。したがって、セルフキャリブレーションのほうが作業量が少なく、ミスが発生する可能性も少ない。

第61条運用基準第1項は、このモデルと実際の位置ずれの差が0.5画素以内であることを要求している。通常、セルフキャリブレーションでは、このずれを求めることができない。したがって、このずれを求めるには、独立したキャリブレーションを実施することになる。しかしながら、カメラメーカーからこのずれの最大値の情報が提供される等、合理的にカメラの性能が適切であると推定できる場合は、必ずしも、独立したキャリブレーションを実施する必要は無い。

#### （機器の点検と撮影計画の較正）

第64条 撮影飛行を開始するにあたっては、撮影計画の実際への適合性を確認する飛行を行い、機器の点検と撮影計画の確認を行うものとする。

#### 【解説】

撮影計画を行った地図と現地、あるいは UAV を制御する GNSS 衛星の配置や精度によって、撮影計画が現地の位置と整合しないことが危惧される。また、安全な高度（低高度）で機体の試運転を行い、機体の状況を確認する必要がある。これらを考慮し、作業を開始するにあたっては行うべき事項を規定している。なお、基本的には作業を開始する際の1度のみを想定している。

#### （撮影飛行）

第65条 撮影飛行は、次の各号に従って行うものとする。

- 一 計画撮影高度及び計画撮影コースを保持するものとする。
- 二 離着陸以外は、自律飛行で行うことを原則とする。
- 三 機体に異常が見られた場合は、ただちに撮影飛行を中止する。
- 四 他の UAV 等の接近が確認された場合には、ただちに撮影飛行を中止する。

#### <第65条 運用基準>

- 1 操縦する場所は、機体外寸の3倍以上の長さで規定される面積以上の広さがなければならない。

- 2 記録する画像には、画面距離や露光時間帯等の情報を保持させるものとする。
- 3 撮影中の撮影範囲は、次の各号に定める事項に留意するものとする。
  - (1) 地形及び土地被覆の変化
  - (2) 移動体の存在
- 4 三次元データ作成に不要な空中写真が撮影された場合には、削除するものとする。

#### 【解説】

三次元点群データは、自動処理により空中写真間の特徴点の対応付けを行うため、経時変化や移動体等、空中写真間で写っている状況が異なると不具合が発生するため、これらを回避しなければならない。また、三次元点群測量は、土砂や資材、あるいは機器等、多くの移動するものが測量範囲に存在するため、それらが移動しないようにするか、移動により生じた不具合を三次元形状復元ソフトの機能あるいは数値編集で除去しなければならない。

#### (撮影結果の点検)

第66条 撮影の直後に、撮影結果の点検を行うものとする。

- 2 撮影結果の点検は、次の各号について行うものとする。
  - 一 撮影範囲
  - 二 空中写真の画質
  - 三 空中写真間の重複度
  - 四 撮影高度
  - 五 隠蔽部の範囲

#### <第66条 運用基準>

- 1 空中写真の画質は、露光不足、露光過多、ボケ、ブレについて行うものとする。
- 2 空中写真間の重複度は、空中写真を撮影された関係で並べて点検するものとする。

#### (再撮影)

第67条 点検の結果、後工程に問題が生ずる可能性がある場合には、それらの箇所を再撮影するものとする。

#### <第67条 運用基準>

- 1 再撮影は、次の各号によるものとする。
  - (1) 撮影コースは、隠蔽・陰影やハレーションが生じない位置とする。
  - (2) 撮影範囲は、当該箇所の前後に写真1枚分以上を加えたものとする。
- 2 再撮影の撮影方向は、隠蔽部あるいは暗影光輝が最も緩和される方向に設定するもの



とする。

**(成果等)**

第68条 成果等は、次の各号からのとおりとする。

- 一 カメラキャリブレーション実施記録又は、これに相当する資料
- 二 空中写真
- 三 撮影記録
- 四 撮影位置図
- 五 UAV 撮影コース別精度管理表
- 六 その他の資料

**<第68条 運用基準>**

撮影位置図は、第70条の三次元形状復元計算において得られる同様の図で代えることができる。

**【解説】**

カメラキャリブレーション結果に相当する資料には、例えば、必要事項が記載されたカメラの仕様である。

**第6節 三次元形状復元**

**(要旨)**

第69条 三次元形状復元とは、標定点と特徴点の写真座標等を用いて、空中写真の外部標定要素及び地形・地物の三次元形状を復元する作業をいう。

**【解説】**

外部標定要素とは、撮影された空中写真の状態、すなわちカメラの位置及び向きのことである。

**(三次元形状復元計算)**

第70条 三次元形状復元計算は、特徴点の抽出、標定点の観測、外部標定要素の算出、三次元点群の生成までの一連の処理をいう。

**<第70条 運用基準>**

- 1 撮像素子寸法、画素数は、デジタルカメラのカタログ値を採用し、画面距離の初期値は、デジタルカメラのカタログの焦点距離の値を用いるものとする。

- 2 原則として、三次元形状復元計算を分割して実施しないこと。

**【解 説】**

生成される三次元点群の各点には、自動的に写真の色情報が着色される。  
この三次元点群は、色を持った点の集まりが空中に浮いたように見える。

**(三次元形状復元計算結果の点検)**

第71条 三次元形状復元計算の結果は、三次元形状復元計算ソフトの機能に応じて点検するものとする。

**【解 説】**

三次元形状復元計算ソフトが出力する点検に利用可能な情報には、以下のようなものがある。なお、第48条及び第66条の条件を満たしていれば、これらに不良が生じる可能性は低いと考えられる。

- (1) 計算から省かれた空中写真の有無
- (2) 計算に使用した空中写真の重複枚数
- (3) 特徴点の分布
- (4) 写真座標の交会残差
- (5) 標定点の残差

**(標定点の残差及び検証点の誤差の点検)**

第72条 標定点の残差及び検証点の誤差は、平面位置、高さとも全て 0.05 m 以内であること。

- 2 平面位置の点検のために、必要に応じて第70条の三次元点群からオルソ画像を作成する。

**<第72条 運用基準>**

- 1 標定点の残差は、第71条で求めた結果を確認する。
- 2 三次元形状復元計算ソフトで検証点の誤差を求めることができない場合は、検証点の誤差は、次の方法で求めるものとする。
  - (1) 平面位置の誤差は、本条第2項で作成したオルソ画像上で確認できる各検証点の平面座標を観測し、実際の座標と比較して求める。
  - (2) 高さの誤差は、第70条で得られた三次元点群を用いて、各検証点に対し平面座標上の距離が 15cm 以内であるような点群を抽出し、距離の重み付内挿法（Inverse Distance Weighted 法：IDW 法）で得た高さを、実際の座標と比較して求める。
- 3 この条件が満たされない場合には、以下のいずれかの処置を行った後、あるいは、再

撮影を行った後、三次元形状復元を再度行うものとする。

- (1) 不良写真の除去
- (2) 特徴点の修正

#### 【解 説】

三次元点群データの要求精度を第 47 条の規程としない場合は、残差及び誤差の許容範囲の値は要求精度と同一とする。

#### (成果等)

第 7 3 条 成果等は、次の各号のとおりとする。

- 一 三次元形状復元計算ソフトが出力する情報
- 二 精度管理表
- 三 その他の資料

#### 【解 説】

精度管理表は、空中三角測量精度管理表、三次元形状復元精度管理表、標定点及び検証点精度管理表による。

### 第 7 節 数値編集

#### (要 旨)

第 7 4 条 数値編集とは、必要に応じて三次元点群から不良な点を除去する作業をいう。

#### (数値編集)

第 7 5 条 三次元点群を複数の方向から表示し、不良箇所を取り除くものとする。

- 2 不良箇所が広範囲な場合には、空中写真及び三次元形状復元計算結果を見直し、必要に応じて空中写真の再撮影あるいは三次元形状復元計算の再計算を行うものとする。

#### 【解 説】

三次元点群の数値編集には、誤抽出の修正と欠測部での補測がある。誤抽出とは、異なる場所を同一の場所と判定して三次元点群に変換したものをいう。欠測部とは三次元点群が、精度に影響するほどまとまった範囲で抽出できなかったところをいう。前者は類似の様子が固まって存在する場所に、後者は土地被覆の濃淡が少なかったり、水面のように異なる模様で写る場所が、該当する。

抽出が正確に行われたとしても成果とはならない樹木、草、構造物、車両等を抽出している場合は、これらも編集により除去する必要がある。

## 第 8 節 三次元点群データファイルの作成

### (要 旨)

第 7 6 条 三次元点群データファイルの作成とは、編集済三次元形状復元データから三次元点群データファイルを作成し、電磁的記録媒体に記録する作業をいう。

### <第 7 6 条 運用基準>

三次元点群データを作成する場合における点密度の標準は、下表による。

ただし、土木施工における法肩・法尻等の地形形状が急激に変化する箇所においては、原則として、点密度を高密度とし、三次元点群データ上で高密度の範囲を表示しなければならない。また、植生等により測定した点が正しく地表を捉えられず、標準の点密度の取得が困難な場合には、原則として、点密度を低密度とし、三次元点群データ上で低密度の範囲を表示しなければならない。

また、低密度の範囲の許容点密度に満たない場合は、トータルステーション等により、追加測量を行うことにより、低密度の範囲の許容点密度を満たすように補完するものとする。

地図情報レベル	点密度の標準	低密度の範囲の許容点密度	高密度の範囲の許容点密度
250	0.5m メッシュに 1 点以上	10m メッシュに 1 点以上	0.1m メッシュに 1 点以上

※その他の地図情報レベルは、準則第 3 1 3 条（地図情報レベルと格子間隔）に準ずる。

### 【解 説】

三次元形状復元計算ソフトは、多様な形式の出力が可能な場合が多いが、土工で使う場合には、画像として TIF 形式、点群として LAS 形式や CSV 形式、ポリゴンとして TIN 形式のいずれかを選択することが標準的である。

必要に応じて、他の形式に変換してもよい。

## 第 9 節 成果等の整理

### (メタデータの作成)

第 7 7 条 必要な場合、公共測量作業規程の準則に従い、メタデータを作成する。

### 【解 説】

三次元点群測量を公共測量としない場合は、メタデータを作成する必要はない。

(成果等)

第78条 成果等は、次の各号のとおりとする。

- 一 三次元点群データファイル
- 二 その他の資料

## 第4編 資料

### 標準様式等

- ・ カメラキャリブレーション実施記録
- ・ 標定点及び検証点精度管理表
- ・ UAV 撮影コース別精度管理表
- ・ 空中三角測量精度管理表
- ・ 三次元形状復元精度管理表
- ・ 電子納品補足資料

### 参考資料

- ・ 日本写真測量学会編：解析写真測量、日本写真測量学会、1983
- ・ 八木康史・齋藤英雄編：CVIM チュートリアルシリーズ コンピュータビジョン最先端ガイド3、2010
- ・ 秋山実著：写真測量、山海堂、2001

# カメラキャリブレーション実施記録

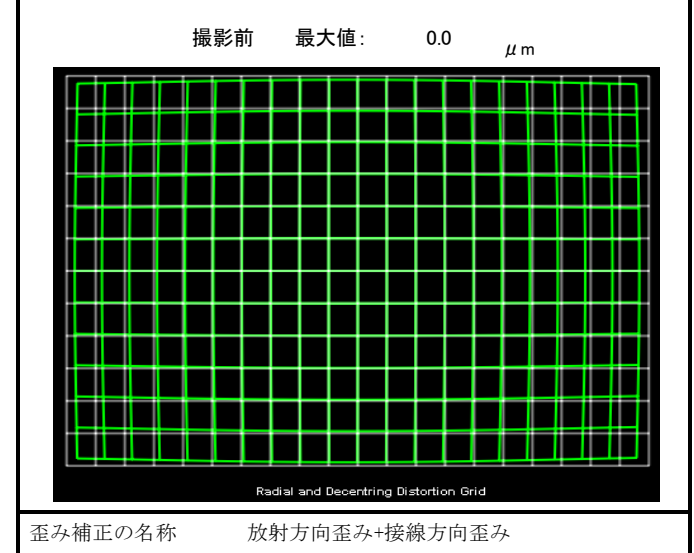
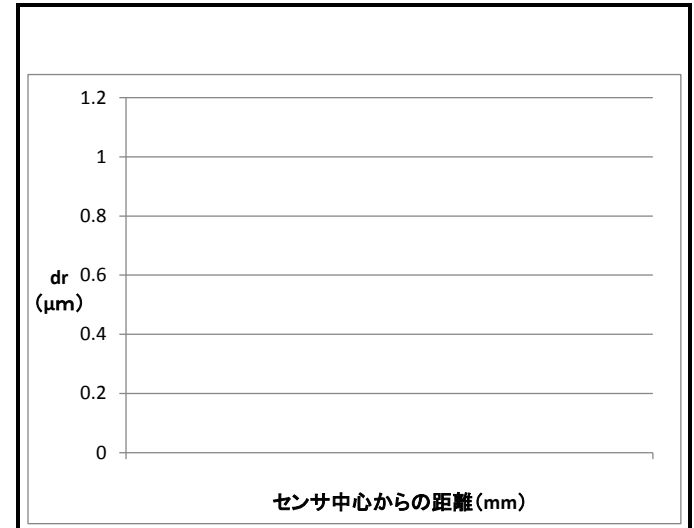
地区名		カメラ キャリブレーション 実施年月日	撮影年月日		作業機関名	主任技術者	印
						作業実施者	印

カメラ	名称			
	シリアル番号	No.		
	画素数	pixel ×	pixel	
	センササイズ	mm ×	mm	-
	1画素あたりの大きさ	μm		

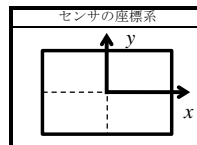
レンズ	名称			
	シリアル番号	No.		
	焦点距離	mm		
	画角	°		

カメラキャリブレーションに 使用したソフトウェア	iWitness V2.2 (Photometrix社)		
補正モデル式			
$\Delta x = x \cdot dr/r + p_1 \cdot (r^2 + 2x^2) + 2 \cdot p_2 \cdot x \cdot y$ $\Delta y = y \cdot dr/r + p_2 \cdot (r^2 + 2y^2) + 2 \cdot p_1 \cdot x \cdot y$ $(dr = k_1 \cdot r^3 + k_2 \cdot r^5 + k_3 \cdot r^7, r = \sqrt{x^2 + y^2})$			
パラメータ	記号	値	
焦点距離	$f$		mm
主点位置のズレ	$x_p$		mm
	$y_p$		mm
放射方向歪み係数	$k_1$		
	$k_2$		
	$k_3$		
接線方向歪み係数	$p_1$		
	$p_2$		
画像座標の残差(RMS)			pixel

放射方向歪み量 $dr$ (μm)	
距離 $r$ (mm)	歪み量
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
最大 (μm)	0.0



注 1. パラメータ欄には歪み補正の名称を記載する。  
接線方向歪みの補正を行っていない場合は接線方向歪み係数欄を斜線にて削除する。  
2. 記号欄には補正モデル式に記した補正項の記号を記載する。



注 原点位置と座標軸を記載する。

接線方向最大歪み量 (μm)
撮影前

注 1. 補正前と歪み補正後を重ね合わせた図を掲載する。  
2. 放射方向歪みに関する図と接線方向歪みに関する図の掲載を原則とする。





# UAV撮影コース別精度管理表

地区名	地名		カメラ	名称	計 画			作機	業名			
				画素数	地上画素寸法	基準面高	対地高度					
撮影日時		飛行方向		名称	cm	m	m	主 任 者 技 術 者				
年 月	時	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="margin-right: 5px;">W</div> <div style="text-align: center;"> <div style="margin-bottom: 5px;">N</div> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 10px;"> <div style="border-top: 1px solid black; width: 20px; height: 20px;"></div> <div style="border-left: 1px solid black; width: 20px; height: 20px;"></div> <div style="border-right: 1px solid black; width: 20px; height: 20px;"></div> <div style="border-bottom: 1px solid black; width: 20px; height: 20px;"></div> </div> <div style="margin-left: 5px;">E</div> </div> </div>		レンズ							カメラキャリブレーション 実施年月日	
h:m	~			ISO	シャッター速度	名称	焦点距離					
風速		風向		画像記録方式		年 月 日			社内検査日			
m/s		S		データ形式	JPEG形式・RAW形式		年 月 日			年 月 日		
				ビット数	各色 bit		年 月 日			年 月 日		

ファイル名	コース番号	写真番号	採 否	コース方向 重複度		航 跡 の ず れ	色 調 の 良 否	光 輝 暗 影		ボ ケ ・ ブレ	ケ ラ レ	ス ミ ア	ゴ ミ	ノ イ ズ	対 標 明 否	隠 蔽 部 の 有 無	障 害 事 項 そ の 他
				最小 0L	主点 基線長			ハ レ ー シ ョ ン	暗 影 部								
				%	%	m											
平均及集計				(最小値) %	(最大値) %	(最大) %											

注1. ハレーションは、場所の判別（海、川、池、屋根等）を記入する。

コース間重複度			
コース番号	写真番号		最小 SL (%)
コース間 重複度 (%)			
コース番号	写真番号		最小 SL (%)
コース間 重複度 (%)			
コース番号	写真番号		/

# 空中三角測量精度管理表

作業名又は地区名		作業量		作業期間		作業機関名		主任技術者		印					
								社内検査者		印					
コース番号	撮影高度	写真番号	モデル数	標定 点				標定 点 残 差				地上画素寸法	cm		
				使用点数		除外点数		水平位置		標高		バンドル法	<input type="checkbox"/> セルフキャリブレーション付き 誤差モデル		
				水平位置	標高	水平位置	標高	標準偏差	最大	標準偏差	最大		<input type="checkbox"/> 最適軌跡解析付き		
				交会残差											
	(m)	～						(m)	(m)	(m)	(m)		(mm)	(mm)	
		～													
		～													
		～													
		～													
		～													
		～													
		～													
		～													
		～													
		～													
		～													
		～													
制 限 値 (地図情報レベル: )															
使用機械		作業者		社内検査期間 人日数		再測率		備考							

- 注 1. セルフキャリブレーションおよび最適軌跡解析を使用した場合は□にチェックを入れ、誤差モデルを記入する。  
 注 2. パスポイント及びタイポイントの交会残差の単位は、mm 単位で記入する。  
 注 3. 計算から除外した点がある場合は、備考欄にその理由を明記する。

用紙の大きさは A4 判とする。





