

デジタル航空カメラ等による空中写真撮影 Aerial Photogrammetry with Digital Aerial Cameras

測図部 吉高神 充・田村竜哉

Topographic Department Mitsuru KIKKOJIN and Tatsuya TAMURA

要 旨

国土地理院では、平成 19 年度から航空測量用デジタル航空カメラ等による空中写真撮影を実施している。航空測量用デジタル航空カメラ等の導入により、従来の航空測量用フィルムカメラと比較して撮影計画から最終成果（オルソ画像作成）までの一連作業を効率化できることが期待されている。

本稿では、国土地理院が導入した航空測量用デジタル航空カメラ等の機器を紹介し、航空測量用デジタル航空カメラ等による作業工程及び、従来から使用している航空測量用フィルムカメラとの特徴を比較し、今後の方向性についてまとめる。

1. はじめに

航空測量用の空中写真撮影は、国土地理院における業務の中でデジタル化の流れに残された分野の一つであった。

しかし、近年の航空測量用デジタル航空カメラ（以下、「デジタル航空カメラ」という。）及び GPS/IMU 等の開発・研究により、空中写真撮影業務においてもデジタル化へ向かうことになった。

現在、多く使用されている主なデジタル航空カメラとしては、Vexcel 社の UltraCamD 及び UltraCamX、INTERGRAPH 社の DMC、Leica Geosystems 社の ADS40 が挙げられる。

国土地理院では、平成 18 年に Vexcel 社（オーストリー）製のデジタル航空カメラ UltraCamD 及び、Applanix 社（カナダ）製の GPS/IMU システム POSAV と TrackAir 社（オランダ）製のナビゲーションシステム X-Track を一体型のボックスに組み込んだ POSTrack システムをはじめとする機器一式のリース契約による導入を開始した。その後、国土地理院が所有し、海上自衛隊が運航している航空測量用航空機（以下、「航測機」という。）「くにかぜⅡ」（写真－1）の改修等を含めた準備を行い、平成 19 年 11 月より運用を開始した。

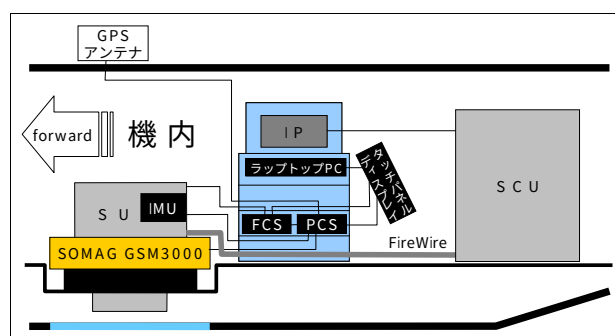
なお、平成 19 年度はデジタル航空カメラ UltraCamD で 7,708km²、フィルムカメラ RC-30 で 1,230km² の撮影を予定している（平成 20 年 1 月現在）。



写真－1 航空測量用航空機「くにかぜⅡ」

2. デジタル航空カメラ等の機器

国土地理院で所有しているデジタル航空カメラ等の構成は、図－1 のとおりである。以下に主な機器の特徴を示す。



図－1 デジタル航空カメラ等の機器一覧

2.1 デジタル航空カメラ

デジタル航空カメラ UltraCamD（以下、「UCD」という。）は、写真測量用画像アプリケーション用に設計された大判デジタルカメラであり、次のような特徴がある。

- 1) 14bit アナログ/デジタル変換により、チャンネルあたり 12bit を越えたダイナミックレンジを実現している。
- 2) パンクロマティック（白黒）、可視帯域（赤、緑、青）及び不可視帯域（近赤外）を同時に収集する。
- 3) 1 回のフライトで、最大 2692 シーンの画像取得ができる。
- 4) 1 シーンを 9 分割して取得することにより、1 シーン/1 秒を実現している。
- 5) ジャイロマウント、フライトマネジメントソフトウェア、航空 GPS、慣性航法システム等、多く

の既存写真測量用機器に対して、直接互換性を持つ。

- 6) フィルムのスキャニング工程がなく、生成した画像を直接一般の写真測量アプリケーションソフトウェアで読み込むことが可能。
- 7) 9分割で取得された画像は、独自のシントピック画像処理により、1つの中心投影画像として正確に再構築される。
- 8) 機内、またはオフィスで操作可能な後処理ソフトウェアを備えている。
- 9) Windows オペレーティングシステムを採用している。

以下に、UCD を構成する各機器の特徴を示す。

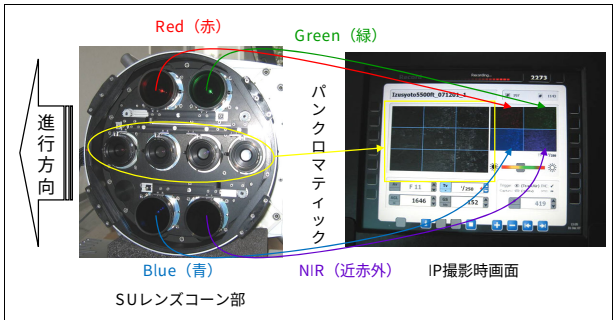
2. 1. 1 センサーユニット

センサーユニット(写真－2、以下、「SU」という.)は、画像を取得する機器で、レンズコーンには8個の光学レンズを配置し、その中に13個のCCDセンサーを搭載している(図－2)。UCDでは、パנקロマティック画像(9分割)とマルチスペクトル画像(赤、緑、青、近赤外)を13個のCCDセンサーがそれぞれ対応し、分割取得された画像を合成することで1枚の中心投影画像となる。

SUの仕様を表－1に示す。



写真－2 SU (機体設置時)



図－2 SUの画像取得イメージ

表－1 SUの仕様

パנקロマティック 画像サイズ	11,500×7,500 ピクセル
パנקロマティック 物理ピクセルサイズ	9 μm
フォーカルプレーンの 物理フォーマット	103.5mm×67.5mm
パנקロマティック レンズ焦点距離	105.2mm (最大 100mm)
最大レンズ絞り	f=1/5.6
真上からの写角： クロストラック方向 (アロングトラック方向)	52.4 ° (35.6 °)
カラー (マルチスペクトル機能)	4 チャンネル (RGB+NIR)
カラー画像サイズ(レベル2)	3,680×2,400 ピクセル (パנקロマティックレ ベル2に同時登録)
カラー物理ピクセル (ディテクタ) サイズ	9 μm
カラーレンズ焦点距離	28mm
最大カラーレンズ絞り	F=1/4.0
真上からのカラー写角： クロストラック方向 (アロングトラック方向)	52.4 ° (35.6 °)
シャッタースピードの オプション	1/500～1/32 秒
前進ブレ補正 (FMC)	TDI 制御
最大 FMC 能力	50 ピクセル
高度 300m (1000 フィート) での最少地上サンプリング 距離	3cm (1.1 インチ) まで
秒あたりのフレームレート (最小画像間インターバル)	秒あたり 1 フレーム超
アナログ/デジタル 変換ビット数	14bit
各カラーチャンネルの 放射解像度	12bit 超
カメラユニットの物理寸法	45cm×45cm×60cm
重量	最大 45kg
フル稼働時の消費電力	150W

2. 1. 2 格納/処理ユニット

格納/処理ユニット（写真－3，以下，「SCU」という。）は，15 個のモジュラーユニットで構成され，それぞれのユニットは CPU と 2 つのミラーリングされたハードディスクドライブを持つ密封型ストレージを組み合わせている．それぞれのユニットは，オペレーティングソフトウェア制御プロセッサ（1 CPU），SU 内の CCD センサーと連携して動作する作業ユニット（13CPU）と予備ユニット（1 CPU）に割り当てている．

SCU と SU の接続には，FireWire（IEEE1394）ケーブル（図－3）を使用する．

SCU の仕様を表－2 に示す．



写真－3 SCU（機体設置時）

表－2 SCU の仕様

飛行時の格納容量	1.5TB (ミラードデータを含む)
飛行時の非圧縮フレーム収集数	2692
格納/処理ユニットの構成	複数の CPU とディスクを並列配置
データの冗長性	機内で二重化ディスクを採用 (ミラー画像を含む)
オフィス環境へのデータ移送	移動可能であり，オフィスでの後処理も可能
物理寸法	40cm×55cm×65cm
重量	最大 65kg
フル稼働時の消費電力	700W



図－3 FireWire（IEEE1394）ケーブルの接続

2. 1. 3 インターフェースパネル

インターフェースパネル（写真－4，以下，「IP」という。）は，飛行中の設定と操作を制御し，撮影時には取得画像（クイックビュー），輝度，キャプチャ情報を表示する．

UCD では，撮影士用のビューファインダーを搭載しないため，撮影状況は IP により確認する．



写真－4 IP（撮影時）

2. 1. 4 モバイルストレージユニット

モバイルストレージユニット（写真－5，以下，「MSU」という。）は，SCU に収集した画像データをダウンロードし，このデータを後処理環境（PC）へ運搬することができる．

MSU の格納容量は約 780GB になる．



写真－5 MSU（SCU 接続時）

2.2 フライトマネジメントシステム

フライトマネジメントシステムとして、Applanix 社製の POSTrack を導入した。POSTrack は、Applanix 社製の POSAV と TrackAir 社製の X-Track を改造した Field Computer System を、一体型のボックスに組み込んだ装置で構成している。

以下に、POSTrack を構成する各機器の特徴を示す。

2.2.1 POSAV システム

POSAV システムは、GPS/IMU を制御するシステムである。GPS/IMU は、GPS と IMU (Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置) を組み合わせることにより、カメラの位置 (X,Y,Z) 及び姿勢 (ω, ϕ, κ) を高精度に求めることができる。

POSAV システムは、GPS アンテナ (写真-6) 及び IMU 装置 (写真-7) 並びに POS Computer System (写真-8, 以下、「PCS」という.) で構成している。



写真-6 GPS アンテナ (航空機設置時)

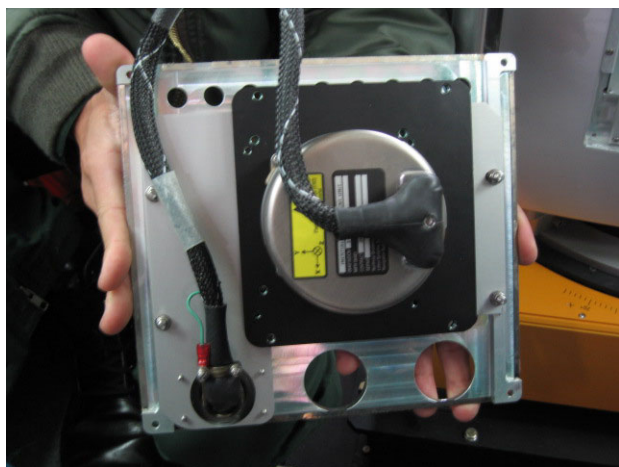


写真-7 IMU 装置 (SU から取り外し時)



※左側が FCS, 右側が PCS

写真-8 POSTrack (機体設置時)

2.2.2 Field Computer System

Field Computer System (写真-8, 以下、「FCS」という.) は、フライトマネジメントシステムがインストールされた PC で、PCS から入手した GPS/IMU の情報を利用して航空機の計測制御を行うシステムである。

2.3 ジャイロマウント

SU を設置するマウントは、SOMAG 社製の GSM3000 ジャイロマウントを使用する。ジャイロマウントは、PCS から入手した GPS/IMU の情報を利用して、偏流角を補正し、かつ、航空カメラを水平に保つように制御を行うシステムである。

3. 撮影の実施

GPS/IMU 付きデジタル航空カメラでの撮影は、以下の規定等に準じて実施している。

- 1) 基本図測量作業規程 (案)
- 2) 基本図測量作業実施要領
- 3) デジタル空中写真測量 (フィルム航空カメラ版) 公共測量作業マニュアル (案)
- 4) デジタル空中写真撮影作業要領 (案)
- 5) GPS/IMU 撮影作業要領 (案)
- 6) デジタルオルソ作成作業要領 (案)

3.1 UCD での撮影

UCD で撮影する場合、撮影計画の段階で予め各コースの撮影高度、始点及び終点の座標、オーバーラップ率等を FCS へ入力する。FCS に各コースの諸元を入力することにより、航測機がコース始点を通過した瞬間に自動で撮影を開始することができる。また、撮影地区までの誘導や撮影中のコースずれは、POSTrack 付属のディスプレイで容易に確認できる (写真-9, 10)。

FCS との連動を断つことにより、マニュアルで撮影することも可能である。

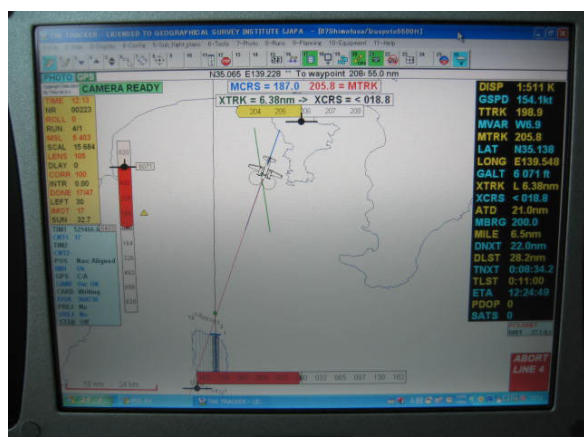


写真-9 コース誘導時

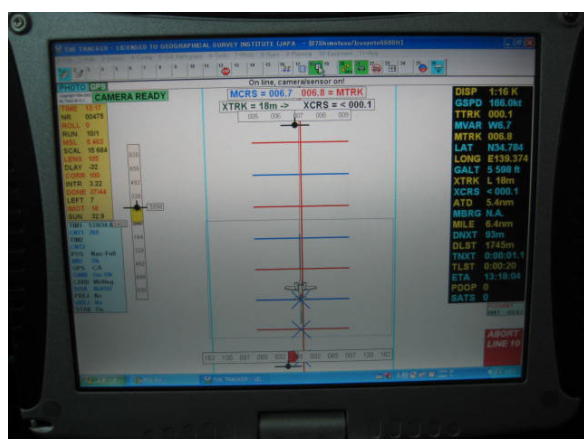


写真-10 撮影時

3.2 GPS/IMU データの取得

3.2.1 GPS/IMU の原理

GPS/IMU で取得したカメラの位置 (X,Y,Z) と姿勢 (ω, ϕ, κ) 情報からは、外部標定要素を直接取得することができる。この外部標定要素を使用することにより、空中三角測量が不要となり、地形図修正やオルソ画像作成といった後続作業を効率的に行うことが可能となる。

GPS は、0.5 秒～1 秒間隔での高精度な位置を取得できるが、その間に航測機は数十m動くことになり、正確な軌跡がわからない。一方、IMU は 1/200 秒間隔でデータ取得ができるが (POSAV システムの場合)、時間とともに誤差が増大する。そこで両者の長所を組み合わせ、航測機の正確な軌跡を求め、シャッターが落ちた時刻の位置と姿勢を求める。

3.2.2 飛行方法

GPS/IMU データを精度よく取得するためには、図-4 のとおり飛行する必要がある。

撮影前後の5分間の直線飛行は、GPS の初期化のために必要になり、フライト前に5分間停止することでも代替できる。しかし、実際には航空管制の指示により5分間停止するのが困難な場合が多いため、直線飛行を実施している。S字飛行は、IMU の初期化のために必要になる。

GPS/IMU データロギング (取得) 中には、バンク角を 20° 以内に保ち GPS のサイクルスリップを避ける。また、GPS の精度を高めるため、航測機に取り付けた GPS アンテナと撮影地区付近の電子基準点において、GPS 衛星を5衛星以上受信する必要がある。そのため、フライト前には、天候状況に加え撮影予定時間の衛星配置状況の確認も不可欠となる。

1 コースの撮影時間を15分以内に制限するのは、IMU の蓄積誤差を考慮しているためである。

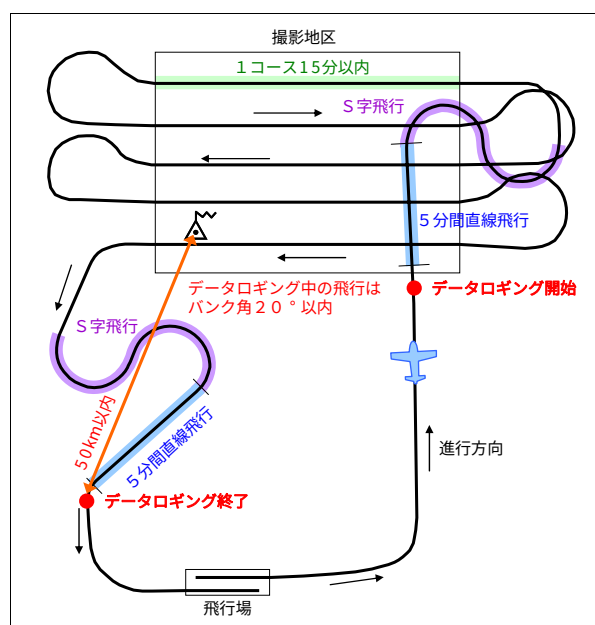


図-4 GPS/IMU データ取得時の飛行方法

3.2.3 レバーアーム

レバーアームとは、航空カメラの投影中心と GPS アンテナ及び IMU 装置との間の位置関係を測定した値をいう (図-5)。

くにかぜIIに取り付けた各装置のレバーアーム値は表-3のとおりである。

表-3 くにかぜIIに搭載したUCDのレバーアーム値

SU 原点から IMU 原点までの相対位置		
X(m):-0.200	Y(m):0.000	Z(m):-0.473
SU 軸と IMU 軸の取付角度差		
X(deg):0.000	Y(deg):-90.000	Z(deg):0.000
SU 原点から GPS アンテナ原点までの相対位置		
X(m):0.056	Y(m):-0.122	Z(m):-1.657

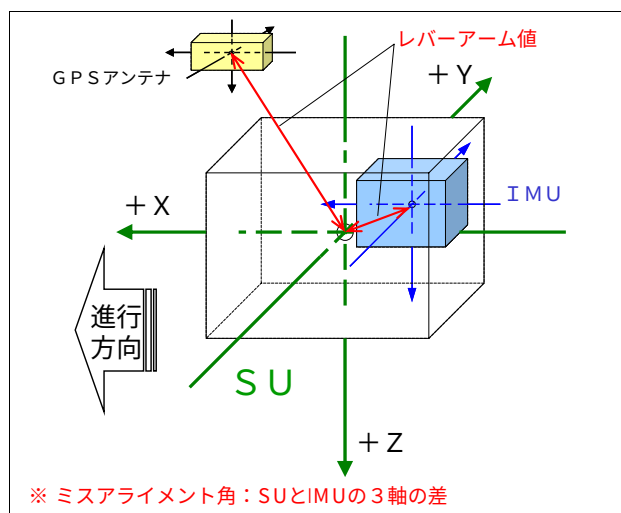


図-5 レバーアーム値とミスアライメント角

3.2.4 ボアサイトキャリブレーション

ボアサイトキャリブレーションとは、IMUの3軸と航空カメラの3軸の差（ミスアライメント角）を求める作業をいう（図-5）。

ボアサイトキャリブレーションは、カメラからIMU装置を取り外した場合のほか、6ヶ月に一度行う必要がある。作業基地毎にUCDを航測機から取り外した場合は、作業基地毎にボアサイトキャリブレーションを行う必要がある。

ミスアライメント角を求めるには、一定範囲について撮影を実施する必要がある。そのとき取得したGPS/IMUデータから外部標定要素を出力し、空中三角測量の結果と比較することにより算出する。

4. 後処理

UCD及びPOSTrackで撮影を実施した場合、以下の作業工程により画像処理と外部標定要素作成を行う必要がある。

4.1 画像処理

SUで取得した画像（RAWデータファイル）はSCUに蓄積され、フライト終了後にMSUへダウンロードを行う。200シーン程度のダウンロードに5分程度の時間を要する。

MSUに蓄積したRAWデータは、画像処理を行うPCへダウンロードする。200シーン程度のダウンロードに50分程度の時間を要する。

UCDで取得した画像は、付属のOPC（Office Processing Center）ソフトウェアで画像処理を行う。

UCDは、13個のCCDセンサーで分割取得した画像を合成することで、1枚の中心投影画像を生成する。そのため、RAWデータ（以下、「Level0」という。）は、1シーンにつき13ファイルで構成されている。Level0の状態では一般的な画像ビューアソフトで

表示することはできない。

Level0をOPCで画像処理しLevel2を生成する。Level2では、パナクロマティック画像とカラー画像及びサムネイル画像（パナクロマティック、RGB、CIR）が生成され、一般的な画像ビューアソフトで表示することができる。

Level2生成後、必要な形式のパンシャープン画像（RGBカラー、フォールスカラー、マルチスペクトル）等をLevel3として生成する。パンシャープン画像はTIFF形式とJPEG形式が選択できる。また、同時にJPEG形式でサムネイル画像を生成することができる。Level3を生成するにあたっては、各シーンの色調を調整し撮影地区内で色合いにばらつきがなくなるように調整する必要がある。この作業にはデジタル画像処理に関する知識を必要とする。また、自動処理が困難なため、相当な時間を要する。

画像処理の作業工程を図-6に示す。

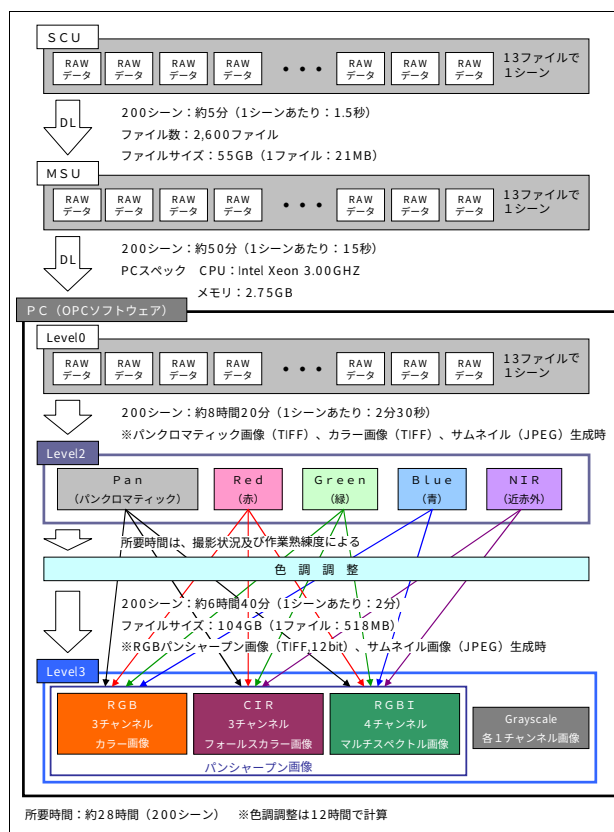


図-6 画像処理の作業工程

4.2 外部標定要素作成

外部標定要素は、POSAVシステムで取得した撮影時の位置（X,Y,Z）及び姿勢（ ω, ϕ, κ ）情報を付属のPOSTacソフトウェアで解析することで作成する。

撮影を行った場合、当日中にPOSAVシステムで取得したRAWデータを、解析を行うPCへダウンロードする。ダウンロード後、RAWデータからGPSデータ、

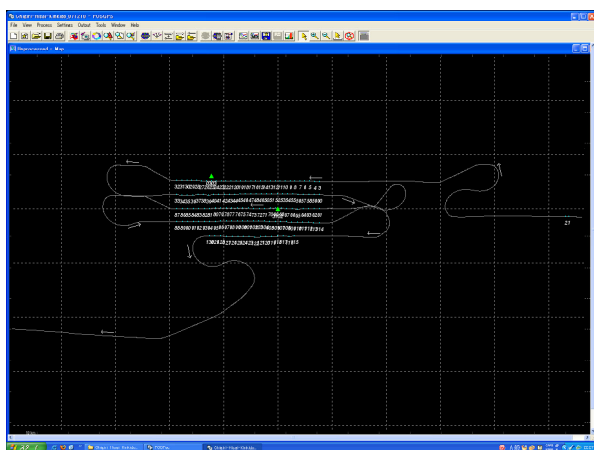
IMU データ、イベントデータを抽出し、それぞれのデータ取得状況を確認する。

撮影翌日、国土地理院ホームページの電子基準点データ提供サービスより、撮影地区付近の電子基準点 30 秒読みデータをダウンロードする。その後、ダウンロードした電子基準点 30 秒読みデータを利用し、後処理 RTK による解析を行う（図－7）。

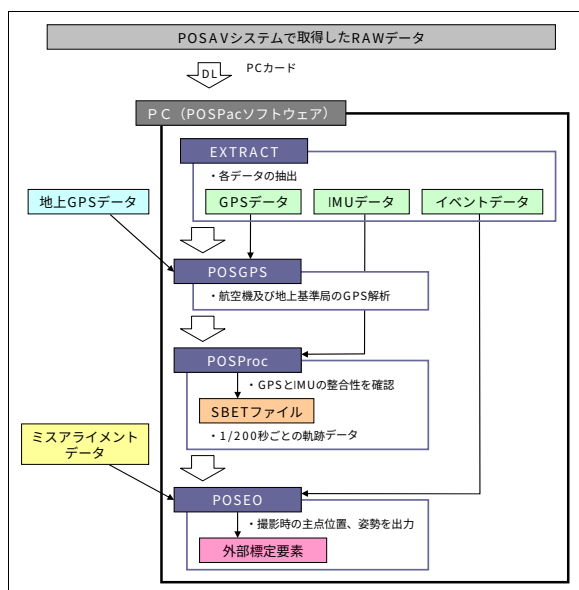
後処理 RTK により得られた 1 秒ごとの位置座標は、IMU データと合わせることでスムージング処理し、1/200 秒ごとの位置 (X,Y,Z) と姿勢 (ω, ϕ, κ) の情報を持った SBET ファイルを作成する。

この SBET ファイルの中から、写真を撮影した瞬間の主点位置 (X,Y,Z) と姿勢 (ω, ϕ, κ) が抽出され、外部標定要素となる。ただし、この時点で出力される外部標定要素は 30 秒読みの電子基準点データを使用しているため、成果とはならず、写真判定に利用するだけである。

外部標定要素作成の作業工程を図－8に示す。



図－7 POSAV システムで取得した航測機の軌跡情報



図－8 外部標定要素作成の作業工程

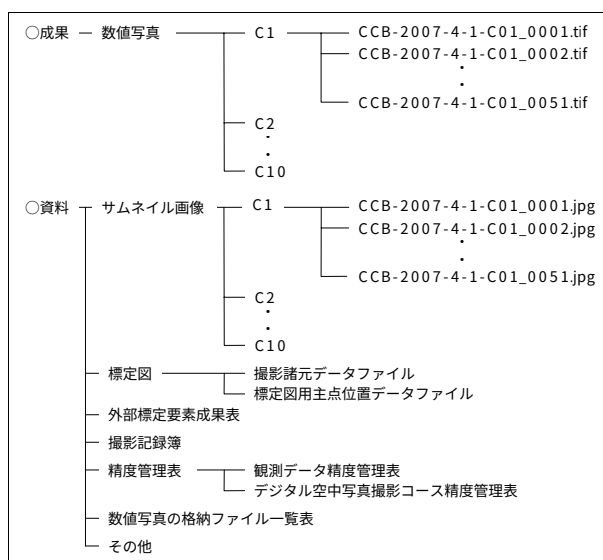
4.3 写真判定

写真撮影作業は、撮影期間と飛行時間に制約があることから、画像処理での Level3 生成と外部標定要素の作成を迅速に行い、写真判定を早急に実施する必要がある。

具体的には、Level3 から、雲やハレーションといった障害状況及び画像統合処理の良否を判定する。また、外部標定要素からは、主点基線長、回転 (κ)、傾斜角 (ϕ, ω)、航跡のずれ等の判定を行う。

4.4 成果等の提出

GPS/IMU 付きデジタル航空カメラで撮影した場合、デジタル空中写真撮影要領（案）により、図－9 のとおり成果等を提出する。



図－9 成果等

外部標定要素成果表については、1 秒読み電子基準点データを測地観測センター衛星測地課衛星情報係へ申請し入手すると共に、ミスマイメント角を計算し、再度作成し直す。

また、外部標定要素成果表と Level3 ファイルの写真番号を対応させるため、Level3 に改めて整理番号をふり直す必要がある。

標定図については、利用者が個々に利用しやすい体裁で作成できるよう、標定図用主点位置データファイル及び撮影諸元データファイルを作成する。基本的に、従来の紙による標定図は作成しない。

5. 航空測量用フィルムカメラとの比較

従来まで使用してきた航空測量用フィルムカメラ RC-30 と、今回導入した UCD とを、システムと作業工程に分けて比較した。

5.1 システムの比較

UCD の機器一式は、RC-30 の機器一式に比べ重量があり、機内スペースも狭くなることから、今まで2名体制（撮影士及びアシスト）で搭乗していた国土地理院職員は、1名体制（撮影士のみ）へ減少することになった。そのため機内では、UCD 等のシステム管理、撮影記録簿の記入、天候等の確認といった飛行中に実施する作業を1名で担当することになった。

RC-30 で撮影したネガフィルムを 20 μ m で数値化した写真と、UCD のカラー物理ピクセル 9 μ m の画像をネガフィルムの 20 μ m 相当の地上画素寸法に換算し比較した場合、UCD の方が撮影高度を上げることになる。

同地区を同地上画素寸法、同ラップ率で撮影した場合、コース数はほぼ同本数になる。しかし、1コースに対する撮影枚数については、UCD の方が進行方向に対する画郭が狭いため多くなる。同理由により、UCD の主点基線長は短くなる傾向にあるが、UCD のシャッター間隔は RC-30 より短いため、飛行速度を落とすことなく撮影を実施できる。

UCD では、RC-30 と比較すると撮影枚数が増えることになるが、SCU に最大 2692 シーンもの画像を格納できるため、1日の撮影には十分な容量を備えている。また、正確な残撮影可能シーン数を撮影中に確認できるため、RC-30 のときに必要だった正確なフィルム残枚数の管理や機内でのフィルム交換の手間が省けるようになった。

UCD には、撮影士用のファインダーがなく、撮影した画像は IP に表示される。そのため、撮影直近の真下の状況を確認することができなくなった。しかし、データとして画像を取得するため、雲が多い等の障害がある場合でもフィルムのコストを気にすることなく撮影を行うことができる。

RC-30 と UCD の主なカメラ諸元の比較を表-4 に示す。

表-4 RC-30 と UCD のカメラ諸元比較

	RC-30	UCD
記録方式	フィルム	CCD エリアセンサ
焦点距離	153.76mm	105.20mm
画角 (along×across)	72°×72°	52.4° (35.6°)
深度 (階調)	11bit	14bit
撮影間隔	約 5 秒	約 1 秒
撮影可能枚数	約 200 枚/1 本 (カラー)	2692 シーン

5.2 作業工程の比較

UCD で撮影することにより、RC-30 で必要だったフ

ィルムを扱う作業工程はなくなった。しかし、UCD で撮影することにより新たに必要になる作業工程もある。フィルムを扱う作業工程は、今まで外注や防衛省との協定により陸上自衛隊地理情報隊が対応していた業務であった。UCD での作業においては、フィルムの現像にあたる画像の生成や色調整といった処理を、撮影担当者がすべて行うことになるため、作業量は純粋に増えたことになる。

RC-30 と UCD の作業工程を図-10 に示す。

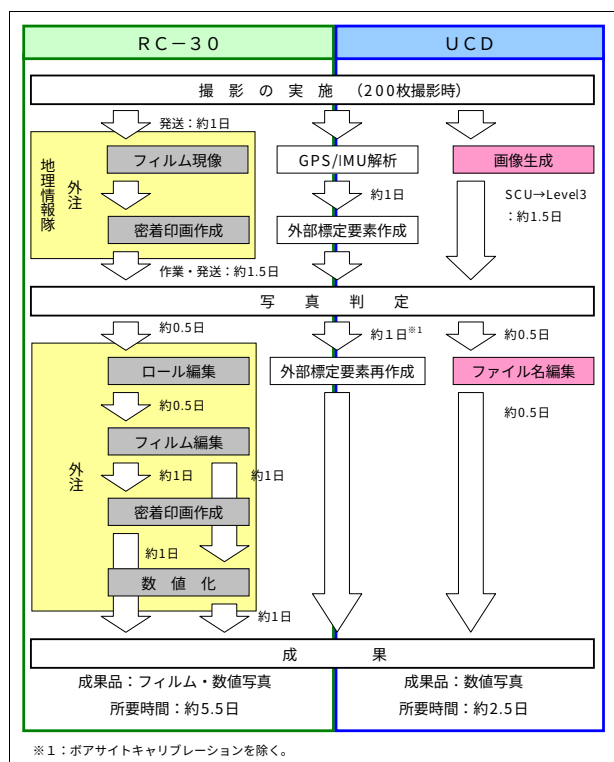


図-10 RC-30 と UCD の作業工程

6. 緊急撮影時の対応

国土地理院は大規模地震等の災害時に、被災状況を迅速に把握し、その情報を広く提供することが求められている。

デジタル航空カメラの場合、リニアなフィルム現像という工程に縛られることがない。そのため、部分的に画像処理を行うことが可能であり、撮影を実施した時点で特に重要な箇所を控えておくことで、10 シーン程度の画像なら撮影後 3 時間程度で画像を提供できる見込みである。このことは、緊急撮影時の対応として大きな利点となる。

7. まとめと今後の課題

GPS/IMU 付きのデジタル航空カメラを導入したことで、撮影に関する作業工程の減少及び成果提出後の後続作業に関しては効率化が図れるようになった。しかし、撮影準備及び撮影後の処理、成果提出ま

での整理については、撮影担当者への作業工程が増加している。また、GPS/IMU データを精度よく取得するために、飛行方法にも多くの制約が課せられる。このことは、効率的な航測機の運航に影響を与えている。

現在は、UCD を導入し、まだ期間が短いことから、様々な面において試行錯誤を行っている最中である。今後は、現在の経験をふまえて実施体制の効率化を図る予定である。

画像処理の工程においては、扱う画像のファイルサイズが大きいため、処理に相当な時間を必要としている。これに関しては、ハードウェアの処理能力やソフトウェアの最適化に負うところが大きい。

緊急撮影時においては、今まで以上に迅速な対応

が期待できるようになった。今後、緊急撮影時の体制、画像データの送付方法等について、更なる検討が必要である。さらに、大規模地震の場合は、電子基準点データの取得状況や成果改定等も考えられる。撮影後の正射写真図作成等の後続作業がスムーズに進められるよう、担当者間の連携も図っていくことが重要である。

謝 辞

本報告の執筆にあたり、国土地理院測図部測図技術開発室笹川啓様並びに渡部金一郎様には多大な助言と資料を提供いただきました。ここに記して感謝いたします。

参 考 文 献

- Vexcel Imaging GmbH (2005): Camera Installation & Operation (ユーザーマニュアル).
- 株式会社ニコン・トリンプル (2007): POSTrack 設置簡易マニュアル.
- 株式会社ニコン・トリンプル (2006): POSTrack フライトマネジメントシステム簡易マニュアル.
- 田村栄一 (2007): 基盤地図情報のための画像情報の整備, 第 36 回国土地理院技術研究発表会, 国土地理院技術資料 A・1-No.326, 81-89.
- 田村竜哉 (2007): 撮影作業全般にわたるデジタル化についての考察, 平成 19 年度高等測量研修.
- 中村孝之, 下野隆洋, 笹川啓 (2005): GPS/IMU のボアサイトキャリブレーション及び精度検証について, 国土地理院時報, 第 106 号, 7-12.
- 中村孝之, 下野隆洋, 大木章一 (2004): GPS/IMU の地形図作成への適用に関する調査研究, 国土地理院時報, 第 105 号, 17-22.