

無人飛行機を用いた地形計測と精度検証

古 屋 弘

Topography Measurement and Precision Inspection Using UAV

Hiroshi Furuya

Abstract

In this study, an unmanned aerial vehicle (UAV) developed in Belgium in 2012 was used for a new topographical survey technique, and its application and precision were examined. UAVs can be used similarly to aerial surveys, but in recent years their usage has been increasing because of their economy and mobility with regard to extensive surveying. This UAV system was imported by a general contractor for its first use in Japan. In this study, a computer-aided design system was used to systematize topographical data from the UAV measurements. The pinpoint precision depends on the flight altitude, but the error was less than 6 cm in the horizontal direction at an altitude of 150 m. This result showed that the UAV provides sufficient accuracy for application in topographical surveys.

概 要

大林組では、2012年にベルギーの無人飛行機（UAV）を研究機械として導入し、地形測量の新しい技術として、現場への適用とその精度の検証を行ってきた。UAVは基本的には航空写真測量と同じ技術であるが、広範囲の測量においては経済性、機動性に優れることから国内での実施事例も増えつつある。大林組では総合建設業として国内で初めてこのUAVを導入し、地形計測を実施後、CADで活用可能なデータを生成する一連の作業をシステム化した。測位精度は飛行高度に依存するが、地表の基準点補正を行うと、飛行高度150mで概ね水平方向で6cm以内となり、地形測量として活用出来るレベルであることが解った。

1. はじめに

災害あるいは軍事の調査などに使われることが多い無人飛行機（UAV：Unmanned Aerial Vehicle）は、搭載機器を含む機材の軽量化とともに、機体制御のプロセッサ、GNSS（全地球衛星測位システム）、慣性センサ等の技術的進歩により、無人飛行ロボットと呼べるような領域にまで進歩している。近年のUAVは自律飛行が可能となり、近年、色々な企業において開発が盛んに行われており、また各方面での利用が提案されつつある。UAVは飛行方式(S-Tol：固定翼飛行機タイプ,V-Tol：回転翼ヘリコプタタイプ)、大きさ、重量など様々な種類のものが存在する。中型タイプは、農薬散布や商用ベースの航空写真測量、その他色々な探査に利用するための実績も多いが、近年では、特に重量が数kg級の小型のUAVが、国内でも

災害時の効率的な情報収集、森林や農業分野でのリモートセンシングなど、様々な分野で利用されるようになってきた^{1) 2) 3) 4)}。建設分野でも、地形や構造物の簡便な計測・測量、さらに道路や橋梁などの社会インフラ点検に利用され始めている⁵⁾。

筆者は、情報化施工における地形データ取得の効率化の観点からUAVに着目し、2012年にベルギーGatewing社製UAVを導入した。導入したUAVは、自律での飛行が可能で、搭載カメラにより有人機では困難な100～150m程度の低空から、高精細な空撮画像が取得できるという特徴がある（Table 1参照）。

本論文では、導入したUAVの特徴と、現場における飛行試験の結果を基に、取得データの活用方法、計測精度、および利用にあたっての課題に関して報告する。

Table 1 UAVの種類と特徴
Variation and Characteristics of UAV

	回転翼型UAV	小型固定翼型UAV (今回導入:X-100)	大型固定翼型UAV
			
離陸	垂直離陸(要操縦)	カタパルトランチャー(自動)	一定の長さのある滑走路が必要(要操縦)
着陸	垂直着陸(要操縦)	30m*100mのスペース(自動)	一定の長さのある滑走路が必要(要操縦)
飛行後の操縦	自動/手動も可	自動	自動
撮影範囲	△	○	◎
飛行速度	△	○	◎
取り扱い	◎	◎	△
搭載機器	許容範囲内で変更可能	指定されたデジタルカメラのみ	許容範囲内で変更可能

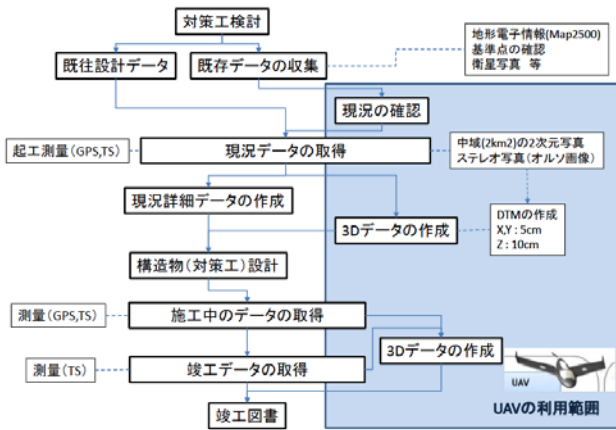


Fig. 1 施工におけるUAVの利用範囲
Usage of UAV in Construction



Fig. 2 導入したUAV (X-100)
The Appearance of UAV (X-100)

2. 導入したUAVの特徴

UAVは、近年では災害調査などで、一般に知られるようになってきており、軍事利用はともかく、農場などにおける植生調査や鉱山の出来形管理などにも広く活用されつつある。国内の実績はまだ少ないものの、今後活用事例は、調査関連を中心に増加するものと思われる⁶⁾。建設会社では、特に土木工事における造成やダム建設などでの利用が考えられるが、その時のUAVの果たす役割をFig.1に示す。

今回導入したUAVは固定翼タイプ(S-ToI)で、上空から写真撮影を行い、撮影した個々の写真を結合後(オルソ画像; 写真のひずみ修正を行った画像を作成)、ステレオ画像化し、高さデータを抽出する。これまでは、小型UAVは、搭載能力が小さいことから、カメラ以外のセンサや機器は載せられないため、高精細な空撮画像が取得できる反面、高精度な自己位置、姿勢センサを搭載することが困難であり、地形などの計測に必要な正確な機体の位置姿勢を適切に推定することが難しかった。

しかし、近年では、プロセッサやセンサの発達と、撮

Table 2 導入したUAV(X-100)の諸元
Specifications of UAV (X-100)

機体要素	項目	値
操作	システムセットアップ時間	15分
	飛行高度(範囲)	75~750m(ただし国内では75~200m)
	代表的なフライト高度	150m
	撮影写真のオーバーラップ	75%(前後/左右)
	1フライトあたりの平均撮影範囲	1.5km ² (高度150mで40分)
オルソフォト	1km ² あたりの平均撮影画像枚数	600枚(高度150m)
	気象条件	最高風速6bft(10.8~13.8m/s)
	画素解像度	5cm(高度150m)
	水平精度	1画素
	投影色	TRUE RGB
DTM	ポイントスペーシング	5~200cm
	水平精度(x,y面)	5cm(高度150m)
	高さ精度(z軸)	10cm(高度150m)
機体	翼	無尾翼、固定翼
	重量	1.9kg(カメラ、バッテリー全装備)
	翼長	100cm
	翼面積	2300cm ²
	寸法	100×60×10cm
構成	材質	カーボンフレーム, EPP
	推進ユニット	ブラシレスモーター+プロペラ
	バッテリー	リチウムポリマー(11.1V, 6000mAh)
	搭載機器	GPS, ジャイロ, ビト管(速度計), 高度計, カメラ
	自動操縦	自動着陸 ウエイポイントナビゲーション 自立的なカメラ撮影 安全装置(緊急時)
離陸/着陸	離陸方法	カタバルト
	離陸速度	55km/h
	上昇角度	15度
	飛行速度	75~90km/h
	着陸方法	ペリランディング
通信	着陸速度/角度	50km/6.5度
	着陸に必要なエリア	100×30m
	機体/コントローラ制御リンク	2.4GHz
	通信と制御範囲	5km(最適環境下)

影写真を飛行データを考慮して合成し、オルソ画像の作成が可能なソフトウェアが登場したことから、筆者は、地形計測の手段の拡張としてUAVを導入した。UAVの種類と大まかな特徴をTable 1に、今回導入したUAVの外観をFig.2に、諸元をTable 2に示す。

このUAVはベルギー製で当社が極東で初の導入であった。この導入目的は、従来から行われているトータルステーション、GNSS(GPS)を用いた測量に加え、近年では、レーザー測量、航空測量なども利用しているが、UAVは機動性に優れ、業者の都合に左右されないフレキシブルな活用を目指したものである。色々な測量の特徴と比較をTable 3に示す。

このUAVはラジコン型と異なり、あらかじめ撮影エリアを設定しておく、自動でフライト計画を設定し、指定されたエリアを撮影後に指定した場所へ戻ってくる。このため、目視出来ない範囲でも利用可能となる。また、1フライト40分間の飛行で、75%ラップ写真の撮影の場合、およそ1.5km²のデータが取得可能であり、撮影後、地上既知点データ等とマージするとともに、画像処理(オルソ画像の作成)しステレオ化した後に、その後デジタルデータ(DTM: Digital Terrain Model)として出力が可能である。このUAVの付属機能として、簡易版の写真結合ソフトウェアがあり(完全なオルソ画像は作成できない)、これを用いると、データ結合までならば飛行後30分で撮影エリアの概観を掴むことができる。また、詳細データは約8時間でデータをマージでき、点群データの抽出を行うことができる。このUAVは以下のような利用方法を想定して導入した。

Table 3 測量方法の種類と特徴
Variation and Characteristics of Surveying Method

データ取得方法	TS(トータルステーション)	GPS(高速キネマティック)	レーザー スキャナ	航空測量	X-100 【今回起案】	備考
概要	トータルステーション(光波による測距・測角)任意点の測量にて地形データを取得。測量は機械扱い者とミラーマン(プリズム)の2名以上が基本。線形構造物の場合は設計(管理)断面(20m ピッチが基本)、造成の場合は目視による変化点を計測し、データコレクタ等に計測値を格納する。	基本的な測量方法は左記(TS)と同じ。ただし、測量員はGPSによる計測者のみで可。近年ではグロナス衛星も含めGNSS測量と呼ばれる。GNSSの電波が取得できることが基本。基地局が必要であるが、後処理キネマティックで仮想基準点を利用することも可能。	レーザースキャナにて地形を取得する。現地に既知点(GCP)を置くことにより座標も正確に取得できる。障害物等で見通しがきかない場合は機械を複数回移動させて対応する。	セスナ等の小型機にて航空写真(ステレオ画像)を撮影し、地形データを生成する。衛星を使った写真測量(IKONOS等)もある。天候(雲海の量)に左右される。	模型飛行機にて連続的に地形を写し、画像を合成することにより地形データを作成する。地表に設置した既知点(GCP)を用いてオルソ画像を生成し、デジタルの地形データ(DTD)を生成するまでの一貫作業をシステム化したもの。ステレオ写真も生成可能。天候(風)により飛行できない場合がある。	
適用範囲	1日あたり150~200点(実働3名)のデータ取得。10ha程度が限界	1日あたり200~300点のデータ取得。30ha程度が適当	2~5ha程度	小規模には向かないが、2~3km ² まで対応可能(連続写真とすれば上限はない)	一般的に2km ² 程度まで。ただし小規模でも可能。	一般的な使用条件にて記載。
使用上の制約	視通が遮られる場所では使用できない。	衛星(からの電波)が取得する場所で使用可能。	視通が遮られる場所では使用できない。	樹木等がある場合は精度が低下する。	樹木等がある場合は精度が低下する。着陸場所(30×80m)が必要	
取得時間	1.5~2分/点 (移動時間含む平均値)	0.5~1.5分/点 (移動時間含む平均値)	4時間(2ha) (機械設置から撤去)	1日	2時間 (機械設置から撤去)	
DTMへの変換	不要(ただし公共座標への変換が必要な場合あり)	不要	1~3日	2~7日	2時間(画像ファイル) 1.5日(※)	※MosaicUAV使用
精度	2mm+2ppm	2~3mm(X,Y), 5mm(Z)	3~5mm+2ppm	5~10cm(X,Y), 10~25cm(Z)(※)	5cm(X,Y), 10cm(Z)(※)	※飛行高度(写真1ピクセルの解像度)に依存 ハードウェアリソースと人件費を考慮
B/C	小規模	◎	◎	△	△	
	中規模	○	○	○	◎	
	大規模	×	△	×	◎	
総合評価	小規模	○	◎	×	×	
	中規模	△	△	○	×	
	大規模	×	△	×	○	

B/C および総合評価は対象とする領域の規模(面積)にて分類

- 1) フィルダム、道路工事などの土工(明かり工事)の初期データ(工事着手前の状況)の取得、出来形・出来高計測(進捗管理)
- 2) 工事計画地の初期データの取得:土地利用(家屋、植生など)の判定
- 3) 赤外線データも取得可能なので、地形データと赤外線からの地表水分推定から、土砂災害ハザード予測も可能
- 4) 災害地の先遣データの取得

なお、商用の許諾を取った上で、GoogleEarthのデータ補完を行う事も可能となる。これは、kmlフォーマットでの出力をサポートしていることから、取得データをGoogleEarth上に重ねることが可能で、データの更新が粗い地域の詳細データを取得後に、周りの地形とマージし、対象領域は詳細に、かつ周辺環境など全体を評価することも可能となる。

3. UAVによるデータ取得と処理

UAVの物理的なシステムの概要をFig.3に、このシステムを用いた写真撮影とデータ処理の流れをFig.4に示す。発射時の状況をPhoto 1に示す。UAVには写真撮影用のカメラ(11Mega pixel)の他、オートパイロットを行うMPU(マイクロプロセッサユニット)、GNSS、ジャイロ、ピトー管速度センサ、気圧高度計を搭載しており、これらのデータは、飛行時の機体の動きを記録し、写真データを結合する時の補完データとして使用することとなる。

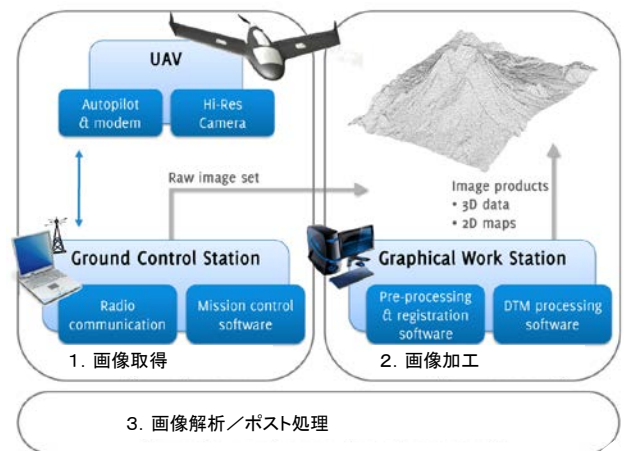


Fig.3 UAVシステムの概要
Outline of UAV System (Physical Model)



Photo 1 UAV射出時の状況
Picture of Launching UAV

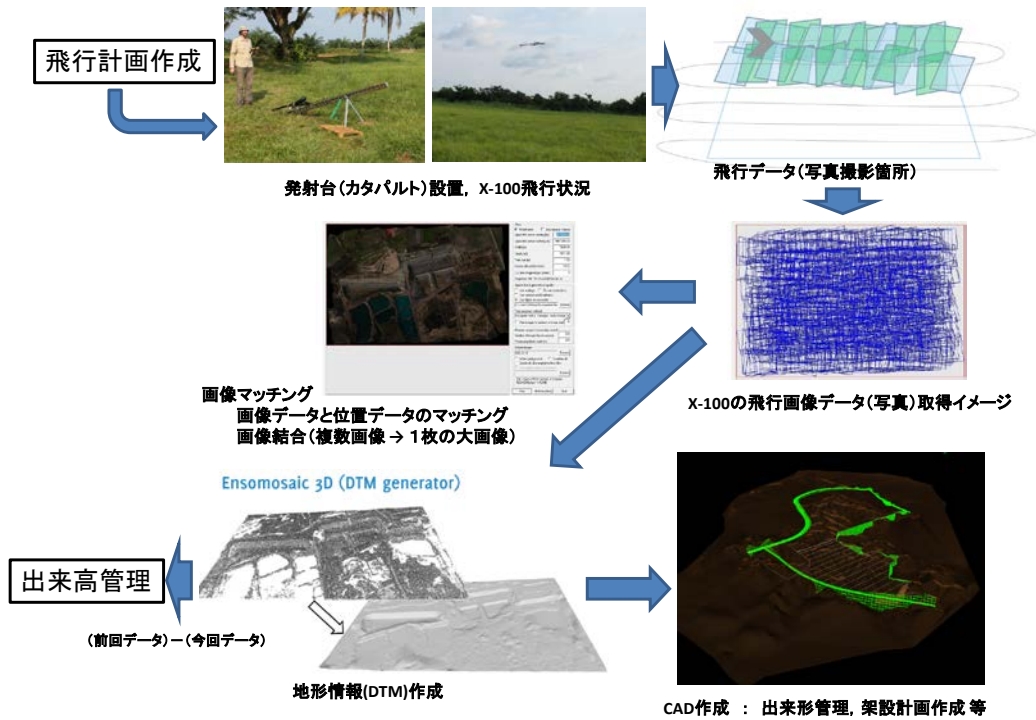


Fig. 4 UAVを用いた写真撮影とデータ処理の流れ
Outline of Photography and the Data Handling using UAV

3.1 写真撮影

UAVは、あらかじめ設定した飛行高度（対地高度で設定）、および撮影エリアに到達後、写真撮影を自動的に行う。撮影エリアの設定は非常に容易で、既存の地図データをコントローラ（これはUAVの飛行状況を監視するもので、操縦は行わない）を兼ねた専用PCに読み込ませ、矩形で範囲と高度を設定する。設定に要する時間は10分程度である。なお、このコントローラは、写真撮影時のUAVの位置や姿勢情報をリアルタイムで監視するのに用いるが、緊急時の回避操作も行う。また、UAVに搭載されたカメラは、11Mpixelのデジタルカメラで、レンズのゆがみに対する出力補正のキャリブレーションを予め行ったものである。

撮影は、Fig.5に示すようにオーバーラップしながら行う。ラップ率は撮影写真を合成する時の作業性とデータ量に影響を与え、通常30～80%で設定するが、今回の実験では進行方向および左右方向とも75%のラップ率にて行った。撮影画像は、搭載されたカメラのメモリに記録され、同時にUAVに搭載されたMPUに、GNSSによる位置情報、気圧高度計による高度、ジャイロによる機体の姿勢（ロール、ピッチ、ヨー（ヘディング））を記録する。このデータは写真の結合を行う時に、機体の姿勢に起因するひずみの補正に用いる。なお、撮影された写真の飛行高度と水平方向の解像度(Ground Sample Distance)の理論値（計算値）を、Table 4に示す。

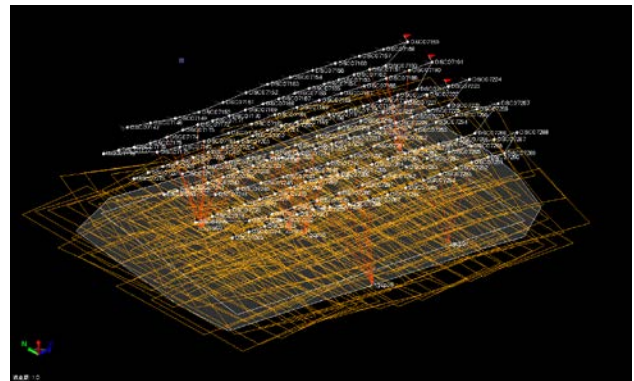


Fig. 5 UAVによるデータ取得（写真撮影）
Data Acquisition by the UAV (Photography)

Table 4 UAV(X-100)の写真解像度
Ground Sample Distance of UAV (X-100)

対地高度(m)	100	120	150	200
GSD (cm)	3.33	4.00	4.80	6.67

3.2 撮影画像の処理

UAVで撮影したデータ（写真および飛行データ）は、機体が着陸後に、カメラのメモリカードおよびMPUメモリから回収する。データはFig.6に示すような流れで処理する。簡易処理と詳細処理に分かれるが、簡易処理は、撮影枚数に依存するが、おおよそ20～40分程度で終了する。

詳細データの作成は、高性能なグラフィックボードとステレオディスプレイを搭載した高性能PCにて行う。使用するソフトウェアは、写真データ処理（主に航空写真などの結合）に実績の多い、フィンランドのMosaicMill社のEnsoMOSAICを使用している。オルソ画像の作成は、写真データと飛行データを読み込み、ソフトウェアで各写真の高度とひずみ補正を行った後に、隣り合う4枚の写真の中から特徴点をソフトウェアが自動抽出し、順次結合していく（Fig.7参照）。これを順次すべての写真で行い1枚のオルソ画像を作成する。このように、写真のマッチングはソフトウェアがかなりの部分を自動的に行ってくれる。しかし、特徴点に関しては、建物などの構造物（コーナー部など）は認識をほぼ100%行ってくれるが、土木の造成現場のようななだらかで変化の少ない場合は、マッチングポイントを判断できないことが多い。このような曖昧さが残る場合には、人間がマッチングポイントを対応させることになる。この作業は、精度を上げるためには複数回行う必要があり、各々の写真にマッチングポイントを20点以上確保することを複数回繰り返す。これに要する時間は、人間の修正作業に1.5～2.5時間、PCのマッチング作業に4～6時間程度かかる。

オルソ画像を作成した後、そのデータからCADなどで利用できるように点群データを抽出する。点群データは

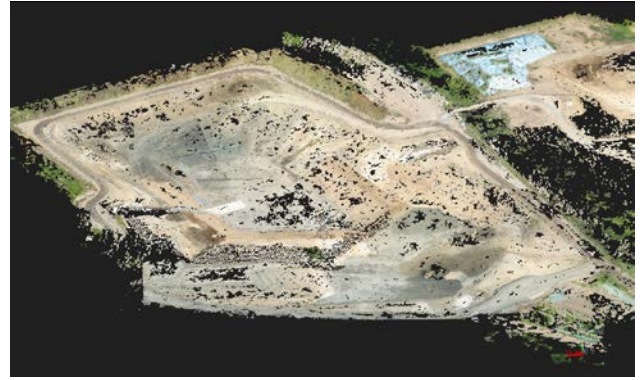


Fig. 8 点群データの密度の確認
Confirmation of the Density of Point Cloud Data

マッチングポイントを中心に抽出し、そのままFig.7の右に示されているTIN(Triangulated Irregular Network)として利用するか、さらに所定のメッシュの平均標高として処理を行うこととなる。TINの抽出密度はビジュアルに確認できるシステムを作成した。Fig.8にその概要を示すが、レンダリングした写真に点群データの少ない部分を示すことにより（図では黒い部分）、点群生成の精度を確認できるようにした。ただし、点群データの密度が低いことは、必ずしも精度が低いこととは一致しない。これは、平坦部ではそもそもマッチングポイントが少ないためで、このような点に関しては、作業にあたる人間の判断が求められるため、注意が必要である。

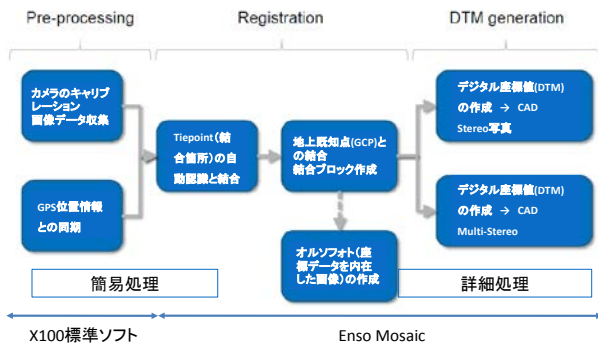


Fig. 6 飛行後のデータ処理
Data Handling after the Flight



Fig. 7 写真の結合（特徴点のマッチング）
Combination of the Photograph
(Matching of the Characteristic Point)

4. 現場での飛行試験と精度検証

UAVの施工管理への適用に対しては、機動性の確認と、必要な精度を確保できるかの検証を行う必要があった。筆者は、2012年5月から、北海道の馬追調整池造成現場にて飛行試験を実施した。現場実験の状況はPhoto 2に示す。データの精度向上のためには、UAVの計測データを地上の既知点と照合させ、データを補正する必要がある。このため、Photo 2（右上）に示すように、写真撮影範囲の地上に3箇所以上の既知点（GCP: Ground Control Point）を設置し、点群データ変換時に利用する。今回の実験でも地上に4箇所GCPを設置し、実験を行った。

4.1 飛行中のUAVの挙動

撮影写真は、個々の写真を結合してオルソ画像を作成後、点群データ変換を行う。飛行高度や姿勢は一定であることが望ましいが、軽量のUAVは気象条件に飛行姿勢が大きく左右される。ここで重要な点は、撮影した写真は必ずしも一定高度、一定の姿勢で撮影されていない。このため、写真撮影にあたり、UAVの飛行高度や姿勢などは、写真のデータNo.(ID)とともに記録され、データ補正に使用される。現場実験では、このUAVの姿勢を含めた挙動に関してデータを取得し検証した。

今回の実験では、Photo 2に示す打ち上げ地点から、対地高度120mで飛行することを設定した（指定標高185m）。



Photo 2 飛行試験の状況
Outline of UAV Flight Test

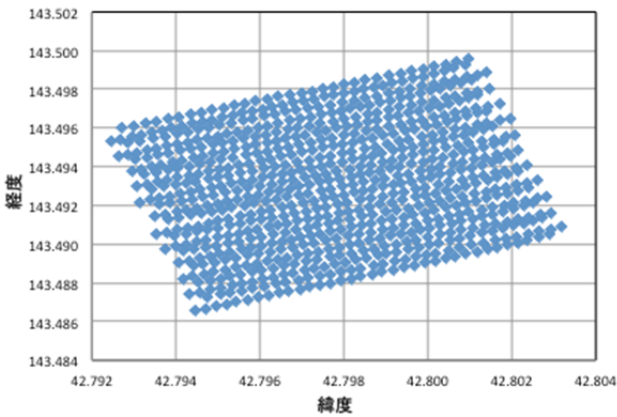


Fig. 9 飛行データ (飛行範囲の緯度経度)
Flight Data (Latitude and Longitude of the Flight Area)

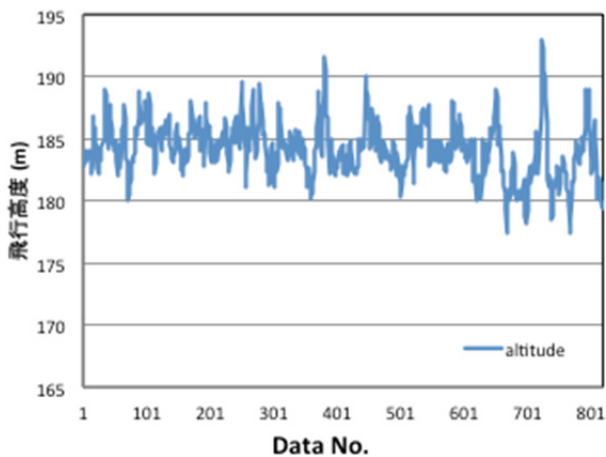


Fig. 10 飛行データ (飛行高度：抜粋)
Flight Data (Flight Altitude)

当日の風速は、周囲の状況から「木の葉や小枝が揺れる状況」であったため、ビューフォート風力階級BFT(Beaufort scale)3(風速で3.4~5.4m/s)相当であった。飛行範囲の機体GNSSで計測した緯度経度情報をFig.9に、飛行高度(楕円体高)をFig.10に示す。飛行高度は概ね

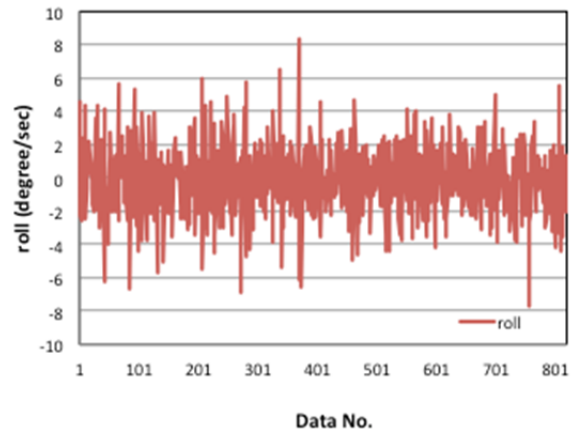


Fig. 11 機体の姿勢データ (ロール)
Posture Data (Roll of the Body)

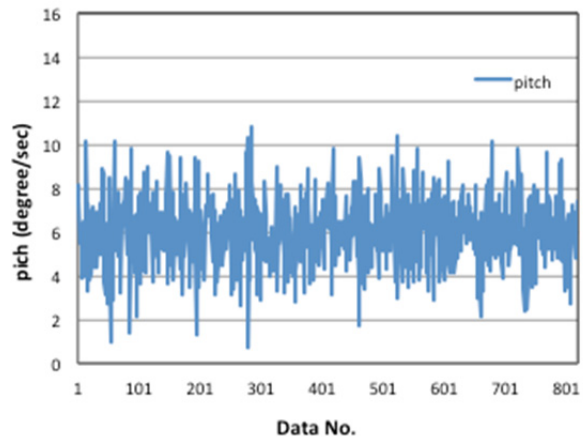


Fig. 12 機体の姿勢データ (ピッチ)
Posture Data (Pitch of the Body)

±4m以内であったが、飛行終了近くで大きな乱れが生じている。飛行高度は気圧高度計で計測したデータであるが、次に示す機体の姿勢が、同一データNo.で乱れていないことから、急激な気圧変化による降下が発生したためだと推定した。

機体の姿勢に関しては、ロールとピッチ角度をFig.11およびFig.12に示すが、ロールは平均0(deg./sec)であり、ピッチは平均5.8(deg./sec)であった。なおピッチ角は飛行高度を保つために上向きに4~6(deg.)上向きとなる仕様であり、正常な飛行が行えたことが解った。

4.2 データの変換と精度確認

今回の実験では、現場エリアとその周辺も含め、0.23km²のエリアを撮影した。写真のラップ率は75%で、821枚の写真(11Mpixel,JPGフォーマット)データを取得した。また、データ変換後の精度を上げるために、Fig.13に示すように地上に4箇所のGCPを設置した。

4.2.1 機体データのみでの精度 写真データを結合しFig.14に示すようにオルソ化するとき、これまで述べたような姿勢データなどのデータを用い補正を行うが、

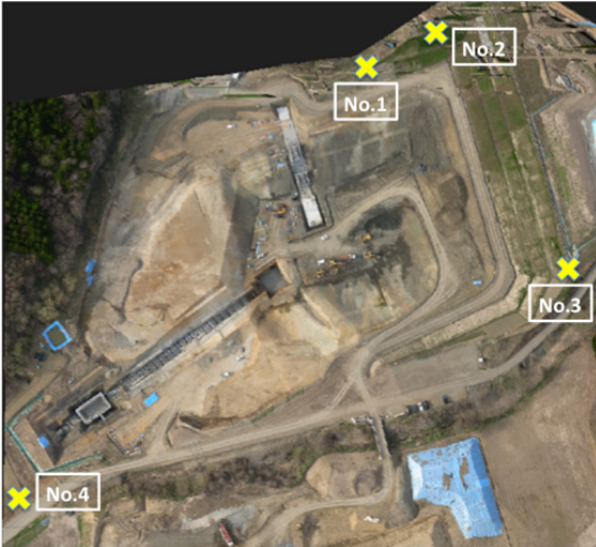


Fig. 13 計測対象とGCP
Target Area and GCP

Table 5 GCP補正前の誤差 (GCP位置で比較)
Error before Correction using GCP

	X	Y
No.1	0.86	1.54
No.2	0.74	1.52
No.3	0.83	1.61
No.4	0.88	1.63

Unit : m

位置情報は機体に搭載したGNSSにて行う。このGNSSは1周波であり、MSAS (運輸多目的衛星用衛星航法補強システム: MTSAT Multi-functional Transport Satellite-based Augmentation System) を用いたデファレンシャル測位を行ってはいるが、誤差は測量で用いられているものよりも大きい。この精度を確認するために、GCP補正を行う前の座標データを確認することとした。なお、GNSSからの取得データはWGS84 (緯度, 経度, 楕円体高) であるので、これを世界測地系に座標変換後、数学座標第一象限で比較した。結果をTable 5に示すが、X方向で0.9m程度、Y方向に1.6m程度のずれが確認された。

4.2.2 GCP補正後の精度 1周波のデファレンシャル補正によるGNSS計測では、移動体ではこの程度の誤差が生じることは予め予測された。精度の向上のために、GCPを用いた補正を行いデータ結合しオルソ化した後に、現場座標との比較を行った。GCP補正は、現場での4点のうちNo.1～No.3を用い、No.4の座標と比較することとした。結果をTable 6に示すが、水平方向(X, Y)で5cm程度、標高(Z, ジオイド補正後)で8cm程度の誤差であった。なお、補正に用いたNo.1～No.3にも誤差が発生しているが、これはオルソ化し1枚の写真データとしたときの内部誤差である。今回用いたカメラは、理論上、高度120mでは4.0cmの解像度である。これを常用の飛行高度に換算すると、精度(解像度)は高度に反比例するので、水平方向は6cm程度の精度となり、計測結果は概ね機器の保証

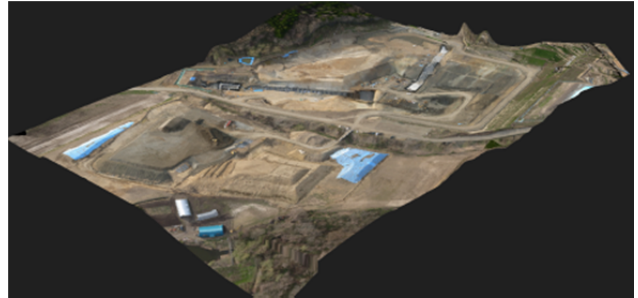


Fig. 14 補正後のオルソ画像
Ortho Image after Correction

Table 6 GCP補正誤の誤差 (GCP位置で比較)
Error after Correction using GCP

	X	Y	Z
No.1	2.2	-3.1	-3.6
No.2	0.8	-1.9	2.8
No.3	-0.9	0.7	1.1
No.4	4.9	5.8	7.9

Unit : cm

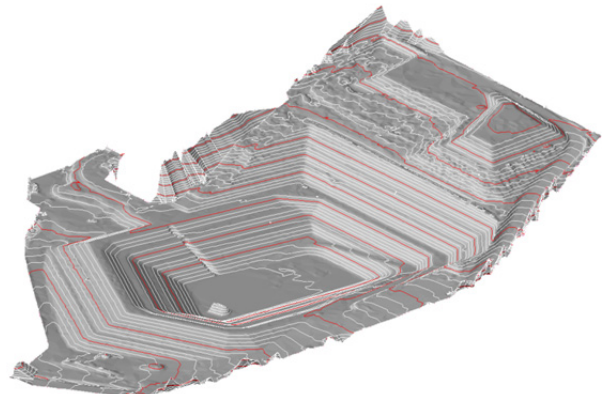


Fig. 15 補正後のオルソ画像
Ortho Image after Correction

精度を満足していること示す結果となった。

4.3 ポイントデータへの変換と活用

オルソ化後のデータから、点群データを抽出してCADなどに読み込ませ、Fig.15に示すような地形データを作成することが出来る。この作業を行うにあたり、UAVで作成した点群データをメッシュデータに変換する。これは、地形データが扱えるCADに読み込ませるために、データサイズをメッシュ内平均化して小さくするために行うものである。Fig.15は1mメッシュに変換したものを、Autodesk社のCivil3Dに読み込ませたものであるが、1mメッシュで約43,000点のデータとなった。メッシュサイズが小さいほど真値に近づくことは間違いないが、データサイズが大きくなり、ソフトウェアで読み込めない可能性の方が高くなるリスクも大きくなる。この比較には、掘削工事などにおいて、時系列で地上測量とUAVでの計測値を比較する必要があるが、残念ながら今回は実施できなかった。

しかし、土工事などにおける地上ランダム測量は、地形の変化点を計測して行い、多くても数百点のポイントから、平均断面法やメッシュ法などで土量計算を行ったり、TINから等高線を作成したりする。これに比べれば、多点計測の意義は大きい。

5. UAVの適用に関する課題

UAVは、これまでに報告したように、新しい測量方法として、施工現場でも利用が可能である。これまでに海外では多くの実績が報告され、利用方法も増えつつあるが、国内での利用にあたっては、以下のような課題がある。

- 1) S-Tol型のUAVは、広域を迅速に計測（写真撮影）出来る反面、特に着陸場所の確保が重要である。滑空時の障害物の無い場所を探すのは、市街地では難しい。
- 2) 撮影のための飛行は水平に飛ぶ必要がある。このため谷地形では山際を飛行することが困難で、撮影範囲の制約が生じる。
- 3) 旋回にある程度の距離が必要で、上記のような場所では旋回も含めた飛行計画を立てる必要がある。
- 4) 搭載能力に限りがあるため、写真撮影以外の用途では利用できない（赤外線撮影は可能）。

以上のような課題はあるものの、UAVは新しい測量方法として有用であることが今回の試験で解った。例えば、Fig.16は、北海道の豊頃メガソーラの現場予定地（施工開始後）を撮影したものであるが（撮影エリア：1.3km²、飛行高度120m、撮影枚数1535枚(70%ラップ)）。現場の初期データを迅速に取得する方法として、制約条件はあるものの、今後活用できる場所への導入を考えていきたい。

6. おわりに

今回の試験により、UAVの精度や使用性を検証したが、以下の知見を得た。

- 1) 精度は150mの高度からの撮影で、おおよそ6cm程度は確保できる。
- 2) 精度向上には、地上のGCP、またはマッチングポイントに使えるような構造物が必要である。
- 3) データ取得および精度を考慮すると、土工事などでは充分実用に耐える。
- 4) 座標変換に関しては、WGS84形式（緯度、経度、

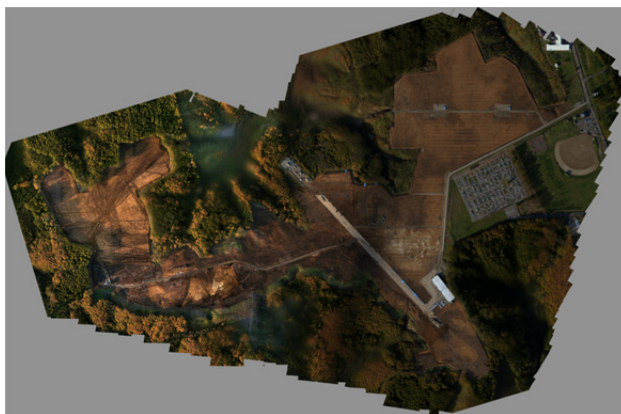


Fig. 16 データ取得例（豊頃）
Data Acquisition Example

楕円体高度) から現場で使用している座標系への変換が必要であり、標高に関しては、さらにジオイドも考慮する必要がある。

- 5) 土工現場などで広域を空撮・測量する場合、省力化と工期短縮に寄与する。

今回紹介したUAVは、2014年現在、システムのバージョンアップを行い、着陸距離の大幅な短縮、写真解像度の向上、制御系の見直しによる安全性の向上など、機能の向上を図りつつある。

今後は施工への適用をさらに進め、施工の高度化と測量の省力化を含めた施工の合理化に貢献できるシステムとして活用を進めたい。

参考文献

- 1) 古屋 弘:近年の施工管理技術の中での情報化施工、地盤工学会誌 Vol.58 No.1 Ser.No.624, pp.24~25, 2010.1.
- 2) 古屋 弘:【総説】建設事業における情報化施工(ICT)の活用、基礎工 Vol.40, No.5, pp.2-7, 2012.5.
- 3) 鈴木太郎, 橋詰匠, 鈴木真二:小型自律飛行ロボット(UAV)の活用による簡便な地物計測、建設の施工企画 Vol.63 No.10, pp.65-69, 2011.11.
- 4) 古屋 弘:情報化施工における3次元データの活用、土木技術 Vol.69, No.2, pp.28-33, 68, 2014.2.
- 5) 古屋 弘:情報化が導くスマートな建設現場—事例紹介—、建設機械施工 Vol.66, (No.770), pp.18-24, 2014.4.
- 6) 酒井和也ほか:海岸調査における飛行ロボットの活用事例、第49回飛行機シンポジウム, 2013.