

UAV (ドローン) による垂直画像を用いた 写真測量手法の開発

國井洋一*†・熊崎理仁**

(平成 29 年 9 月 19 日受付/平成 30 年 3 月 9 日受理)

要約: 本研究では UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた空中写真測量において、通常よりも少ない枚数の写真撮影および容易な飛行方法での手法を開発することとした。具体的には、対象地において UAV を垂直方向に上昇させ、異なる対地高度で撮影された少枚数の写真によって写真測量を可能とする手法である。開発した手法は、通常は平行撮影された 2 枚の写真に対して行う相互標定を、垂直方向に並んだ写真に対して適用できるよう変形し、さらに最終標定として各標定要素および計測点の 3 次元座標を全て未知量として標定を実施するものとした。本手法による計測精度の検証を行うために、日本写真測量学会 UAV テストサイトにおいて 70~90 m の対地高度で 5 m おきに撮影を行い、計 5 枚の写真を用いて 3 次元座標の算出を実施した。その結果、平面精度が ± 0.093 m、高さ精度が ± 0.166 m となり、同じ写真を一般的な写真測量用ソフトウェアに取り込んで処理した場合よりも高精度となった。以上の成果より、本開発手法は UAV による空中写真測量の効率化が見込まれるため、土工現場の測量や災害時の現況把握などにおいて、有用なツールとなることが期待される。

キーワード: UAV (ドローン), 写真測量, 垂直画像, 精度検証

1. はじめに

近年、通称ドローンと呼ばれる UAV (Unmanned Aerial Vehicle: 無人航空機) の需要が増加している。UAV は、米国にて 1950 年代から軍事的での開発が開始され、1970 年頃には電子誘導技術の進歩などを背景に小型の無人偵察機として開発されてきた。日本における UAV の利用は、農薬散布のために 1990 年代後半から全国各地で使われたことから普及が始まり¹⁾、現在では各種現場での情報収集や測量、あるいはメディアやエンタテインメントでの利用など応用性が拡大している²⁾。それらの中でも、特に重要性の高い応用分野は空中写真測量である。通常空中写真測量は、有人航空機によって数百から数千 m の対地高度より地上を撮影し、主に地形図を作成するために実施される³⁾。一方、UAV の対地高度は数十から 100 m 前後と低空であることから、有人航空機よりも詳細な地形図の作成が可能である。また、UAV は有人航空機と比較して安価で機動性が高く、操作も容易であることから、災害発生時などの緊急時における地形把握においては優れた能力を発揮する^{4,5)}。さらに、国土交通省が推進する i-Construction の取り組みにより、土工やコンクリート工における測量の効率を向上させるツールとしても期待されている^{6,7)}。

通常、空中写真測量によって地形把握を行うための撮影は、機体を一定の対地高度で水平方向に移動させながら、

地上を重複撮影 (オーバーラップ) し、対象地を網羅する方法で実施される。国土交通省国土地理院から発表されているマニュアルでは、オーバーラップ率を 80% とするよう規定されているため⁸⁾、撮影枚数は狭小な対象地でも数十から数百枚程度を要することとなる。また、現在主流となっている SfM (Structure from Motion)⁹⁾ を搭載した写真測量用ソフトウェアも、上記のような水平にオーバーラップ撮影された写真を対象としている¹⁰⁾。しかしながら、上記のような撮影方法はオペレータの技術と労力を要するため、土工等の現場においてはコスト面での不安がある。また、災害等の緊急時における撮影を考えると、オーバーラップ率や対地高度を考慮しながら UAV を操作することは難しい。さらに、UAV を緊急時の対象地上空にて網羅的に移動させることは、万一の墜落等の危険性を考慮すると避けたい操作である。以上のことから、UAV による緊急時の空中写真測量のための撮影は、可能な限り少ない枚数かつ容易な方法が求められる。

そこで本研究では、UAV の移動を垂直方向のみに限定し、異なる対地高度で垂直撮影された少枚数の写真のみを用い、かつ地上基準点を使用せずに空中写真測量を実施する手法の開発を行った。また、開発した手法の性能を評価するために、一般的な写真測量用ソフトウェアとの測量精度の比較により検証を行った。

* 東京農業大学地域環境科学部造園科学科

** 東京農業大学大学院農学研究科造園学専攻

† Corresponding author (E-mail: y3kunii@nodai.ac.jp)

2. 検証用写真の撮影

本研究における精度検証用の写真撮影は、神奈川県足柄上郡松田町の UAV テストサイトにて実施した。UAV テストサイトは、一般社団法人日本写真測量学会が運営している UAV 用の検証サイトであり、約 5,000 m² の敷地に計 76 点の対空標識が図 1 のように設置されている。この対空標識の中心座標は、2 級トータルステーションによる地上基準点測量によって、平面直角座標第Ⅸ系の座標が ±0.006 m の精度で求められている。そのため、UAV による空中写真測量で得られた座標との比較を行うことにより、精度検証が可能となる。なお、本研究で開発した手法は地上基準点を不要とするものであるため、得られる 3 次元座標は任意の原点および座標軸によるローカル座標となる。また、本手法による 3 次元座標算出には、任意の 2 点間の距離のみを既知量として与える必要がある。本研究では、図 2 に示す対空標識 No. 27 と No. 35 の間の距離 (14.831 m) を既知量として扱うこととした。

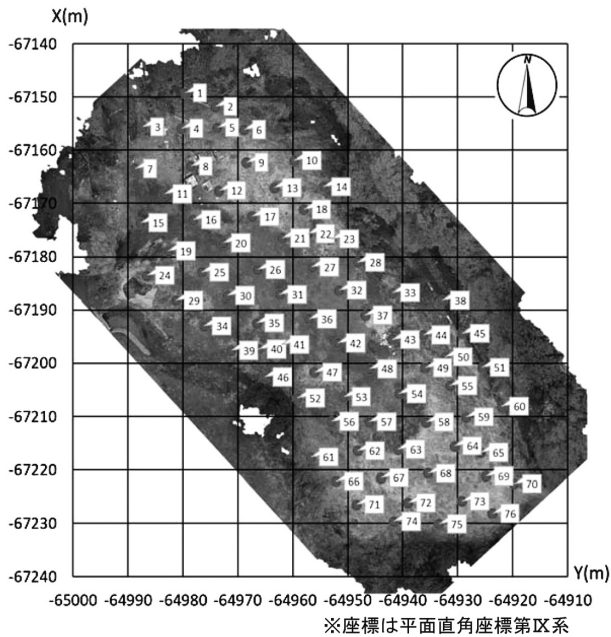


図 1 対空標識の配点

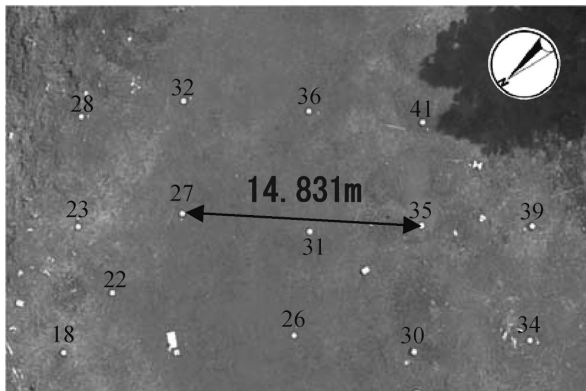


図 2 対空標識配点の一部

本研究における撮影に使用した UAV は図 3 に示す DJI 社製の Inspire 1 であり、Inspire 1 に搭載されているカメラ (FC350) は、画素数 4,000×2,250、焦点距離 4 mm のスペックを有している。図 4 に Inspire 1 にて撮影された UAV テストサイトの全景写真を示す。

3. 開発手法の理論

本研究では UAV から撮影された複数枚の垂直写真を利用し、各写真に対する共通の対応点を取得することにより、写真測量を行うこととする。一般的な写真測量の手順は、まず撮影時のカメラの撮影点や姿勢といった外部標定要素および、焦点距離やレンズ歪み補正係数といった内部標定要素を求める標定処理 (カメラキャリブレーション) を行った後、測点の 3 次元測量を実施することとなる。しかしながら、本研究で開発した手法はカメラキャリブレーションと 3 次元測量とを同時に進めながら、各パラメータの最適解を求めるものとなる。以下、本手法の詳細を手順ごとに述べる。

(1) 各撮影点に対する相対距離の推定

まず、UAV から撮影された複数枚の垂直写真に対し、各撮影点に対する相対的な位置関係を推定する。図 5 は各写真の撮影時におけるカメラの状況を模式的に示したものであり、対地高度が低い順に①, ②, …としている。はじめに、各写真に対する概ねの対地高度を算出する。対地高度の算出にあたっては、前述のとおり設定した任意の 2 点間距離を既知量 L とし、 L が写真上に写された際のセン



図 3 使用した UAV (Inspire 1)



図 4 Inspire 1 にて撮影された UAV テストサイト (対地高度 約 90 m)

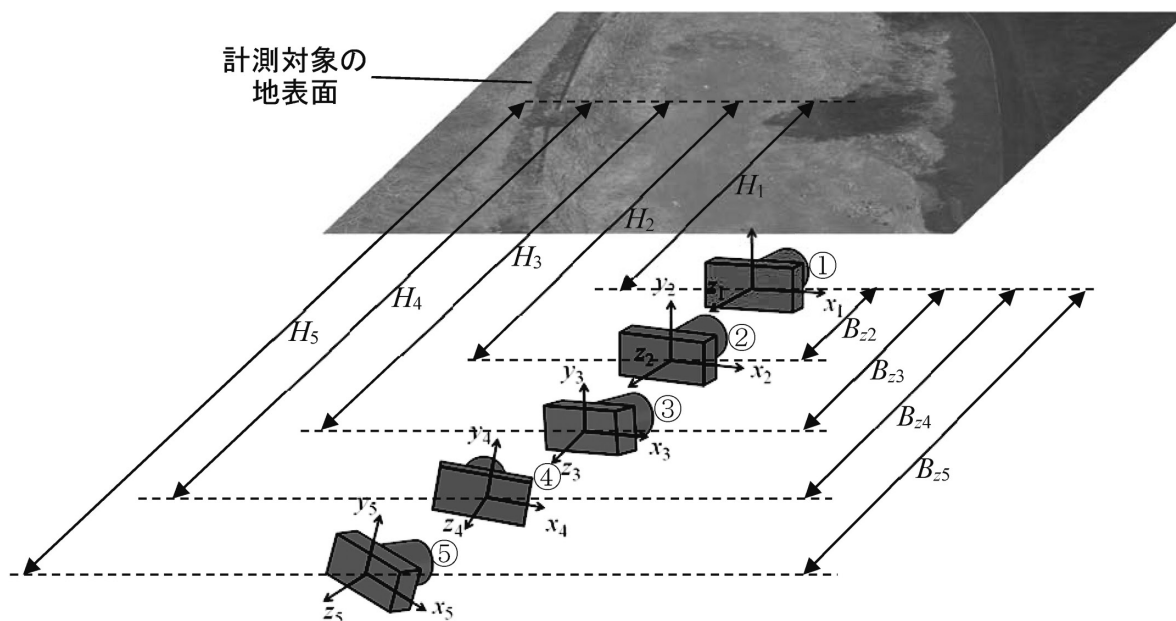


図 5 垂直写真の相対位置関係

サ上での長さを l_1, l_2, \dots , カメラの焦点距離を f とした場合, 各画像に対する概ねの撮影高度 H_1, H_2, \dots は次式にて求められる。

$$H_i = \frac{L}{l_i} f \quad (i=1,2,3,\dots) \quad (1)$$

これにより得られた各撮影高度を用い, 図 5 に示す写真①と他の写真との撮影点間に対する相対距離 B_{z1}, B_{z2}, \dots を次式により求める。

$$B_{zi} = H_i - H_1 \quad (i=1,2,3,\dots) \quad (2)$$

以上により得られた相対距離を用い, 以下の手法により全ての写真に対する相互標定を行うこととする。

(2) 相互標定

相互標定とは, 複数の撮影写真に対する相対的な撮影点および姿勢を求めることである。通常, 相互標定は 2 枚の写真間のみに対して行われることが多いが, 本研究においては図 5 中の写真①を基準とし, 写真②以降の他の各写真とのペアに対する相互標定を全て同時に行うこととした。すなわち, 写真①の撮影は相対座標の原点にて傾きの無い状態で行われたものとし, 写真②以降の撮影時における相対的な撮影点および姿勢角を同時に求めるものである。さらに, 本研究における相互標定については, カメラの内部標定要素も各写真共通のパラメータとして未知量に設定し, 同時に標定を行うこととする。図 6 は複数の撮影写真のうち 2 枚のみに着目して, 2 枚の各撮影点および共通に写っている対応点 P を一つの面 (エピポーラ面) とする共面条件を図示したものである。以下, 同図を踏まえて本手法の詳細を述べることとする。

各写真における共通の対応点 P に対し, 写真①と写真⑤のペアによる共面条件式を導出する。すなわち, 写真①

と写真⑤の撮影点 $O_1(0, 0, 0)$, $O_5(B_x, B_y, B_z)$ および点 P のセンサ上への像点 $p_1(x_1, y_1)$, $p_5(x_5, y_5)$ の 4 点はエピポーラ面を構成するため, 写真⑤の姿勢角を $(\omega, \varphi, \kappa)$ とすると, 次式に示す共面条件式が得られる。

$$\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_5 & Y_5 & Z_5 \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

ここに,

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X_5 \\ Y_5 \\ Z_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_5 \\ y_5 \\ -f \end{pmatrix}$$

$$+ \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}$$

ここで, 式(3)における B_z には式(2)にて求めた相対距離 B_{z1} が代入されることとなる。すなわち, 通常の共面条件では B_x を固定値とするが, ここでは B_z を既知量として相互標定が行われる。さらに, 本手法における相互標定では各写真に共通の内部標定要素についても未知量として扱うため, 像点 p_1, p_5 の写真座標については, 内部標定要素を考慮する必要がある。すなわち, 主点位置を u_0, v_0 , スケールファクタを a_1, a_2, a_3, a_4 , さらにレンズ歪みについては放射方向 (係数: k_1, k_2, k_3) および接線方向 (同: p_1, p_2) を考慮すると, 式(3)中の (x_i, y_i) ($i=1, 5$) は, 各撮影写真

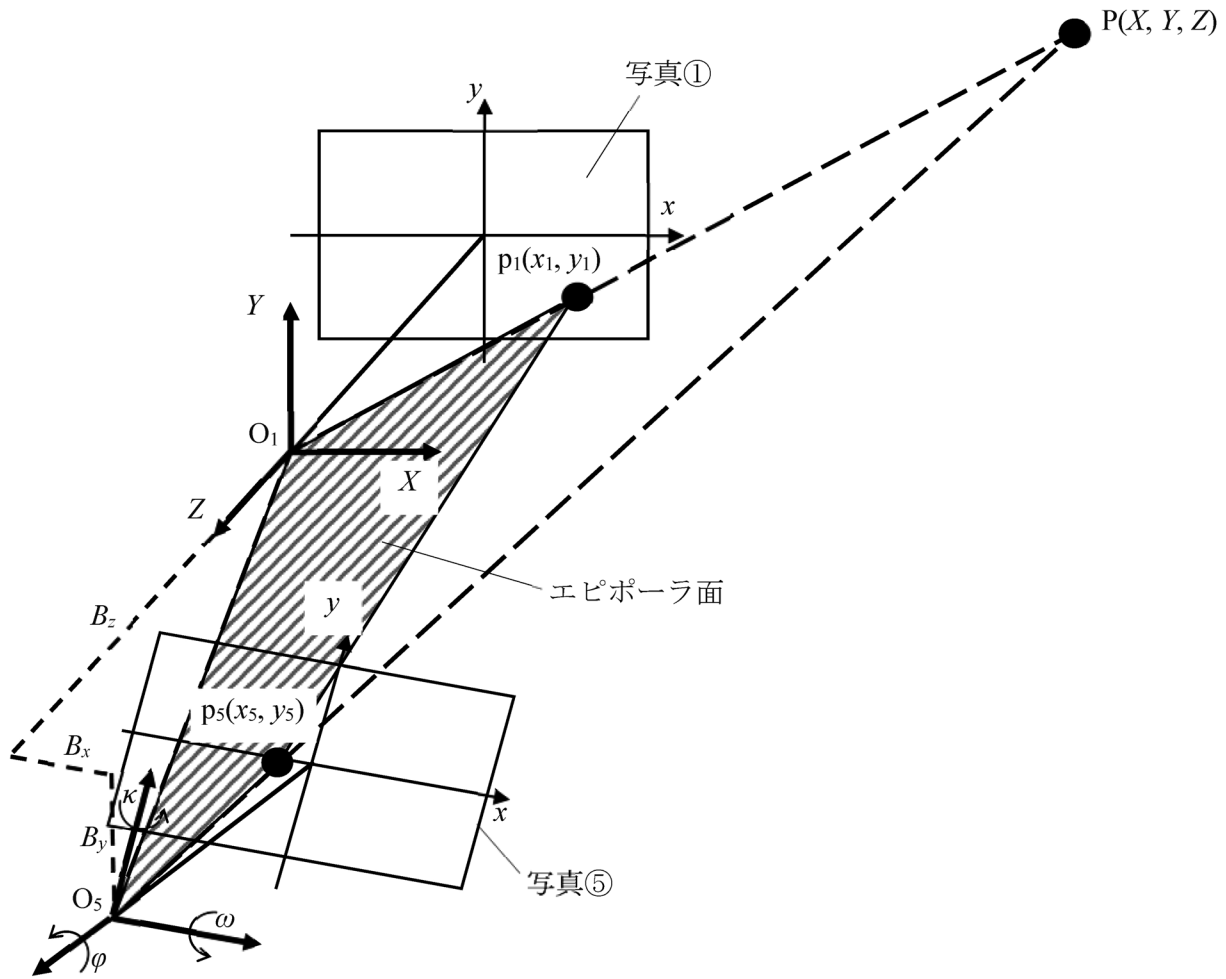


図 6 垂直写真の相互標定

から取得した画素座標 (u_i, v_i) ($i=1, 5$) を次式により変換したものとなる。

$$\begin{cases} x_i = x'_i + x'_i(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2x_i'^2) + 2p_2 x'_i y'_i \\ y_i = y'_i + y'_i(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_2(r^2 + 2y_i'^2) + 2p_1 x'_i y'_i \end{cases} \quad (4)$$

ここに、

$$\begin{cases} u_i = u_0 + a_1 x'_i + a_2 y'_i \\ v_i = v_0 + a_3 x'_i + a_4 y'_i \\ (a_3 = 0, a_4 = \text{一定}) \end{cases}$$

上記の共面条件式を写真①を基準とした各ペアより順次導出することにより、表1に示すパラメータがここでの相互標定における未知量となる。すなわち、各写真間において1組の対応点が得られれば共面条件式が1個得られるため、未知量の数を上回る共面条件式が得られるよう対応点を取得する必要がある。例えば、写真枚数が5枚の場合の未知量は $10 + 5 \times (5 - 1) = 30$ 個となるが、対応点が8点以上得られれば、共面条件式が $8 \times (5 - 1) = 32$ 個以上となるため、解を得ることが可能となる。

(3) 3次元実座標の算出

上記の処理により、全ての写真に対する相互標定要素ならびに内部標定要素が得られたため、ここでは各計測点に対する3次元相対座標の算出を共線条件により行う。共線条件は、地上の測点 (X, Y, Z) 、センサ上での像点 (x, y) ならびに撮影点 (X_0, Y_0, Z_0) の3点が一直線上に存在するという条件であり、共線条件式として次式にて表される。

$$x = -f \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad (5)$$

$$y = -f \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

ここに、

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

すなわち、1点の計測点に対する共線条件式は1枚の写

真につき2個得られるため、2枚以上の写真があれば、 $2 \times 2 = 4$ 個以上の共線条件式により3次元相対座標の3個の未知量を解くことが可能となる。これにより、全ての計測点に対する3次元相対座標が得られることとなる。

さらに、得られた全ての3次元相対座標は、図3に示した既知量として与えた長さによって実スケールの座標へと変換する。すなわち、既知量とした点間のセンサ上での長さを実際の長さとの比率から、全ての計測点に対する3次元相対座標を実スケールの座標へと変換する。なお、実スケール座標への変換の際は、座標原点および座標軸を設定しておく必要がある。

(4) 各画像の絶対座標および最終座標

上記の処理により全計測点に対する実スケールでの3次元座標が得られたため、ここでは各画像に共通の内部座標要素ならびに各々の外部座標要素を絶対座標にて求めることとする。すなわち、ここでの座標は3次元座標が得られた全計測点を地上基準点として共線条件式をそれぞれ導出し、表1に示した内部座標要素および、各写真に対する撮影点および姿勢角の外部座標要素を、すべて同時に求める

表 1 相互座標における未知量

内部座標要素 (10個)		相互座標要素 ($5 \times (n-1)$ 個)	
焦点距離 (mm)	f	姿勢角	$\omega_2, \omega_3, \omega_4, \dots$
主点位置 (pixel)	x_p, y_p	姿勢角	$\phi_2, \phi_3, \phi_4, \dots$
スケールファクタ	a_1, a_2	撮影点	$\kappa_2, \kappa_3, \kappa_4, \dots$
放射方向歪み係数	k_1, k_2, k_3	撮影点	$B_{x2}, B_{x3}, B_{x4}, \dots$
接線方向歪み係数	p_1, p_2	撮影点	$B_{y2}, B_{y3}, B_{y4}, \dots$

ものである。これにより、各画像に対する絶対座標が完了することとなる。さらに、本計測処理の最終段階として、全座標要素および全計測点に対する3次元実座標をいずれも未知量とし、前項と同様に全計測点を地上基準点とした共線条件式により最終的な座標処理を行うこととする。

4. 精度検証

ここまで示した計測手法の性能を評価するために、前述の UAV テストサイトにて撮影を実施し、計測精度検証を行った。UAV による写真撮影は、UAV テストサイトのほぼ中央付近から UAV を垂直方向に飛行させ、対地高度がおおよそ 70m から 90m の範囲において 5m 毎に撮影を行い、図7に示す計5枚の写真を取得した。また、5枚の写真に共通に写っている39点の対空標識に対する3次元座標を本開発手法にて算出し、既知の座標との残差により精度検証を実施した。その際、原点は図8に示すとおり No. 27 の対空標識とし、No. 35 の方向を X 軸、さらにそれ

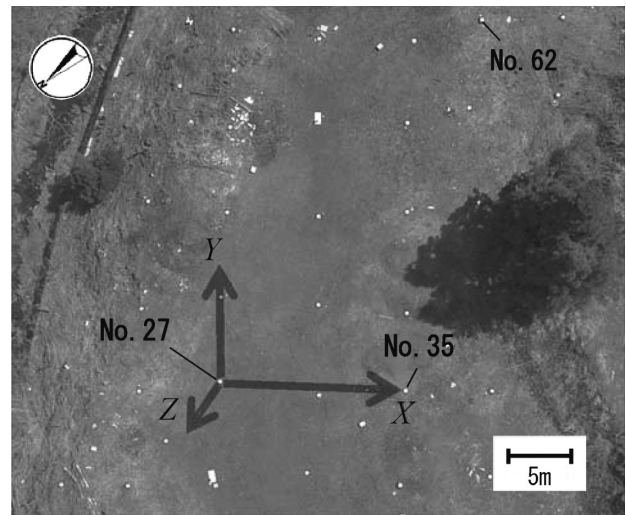


図 8 設定した対象地における座標系

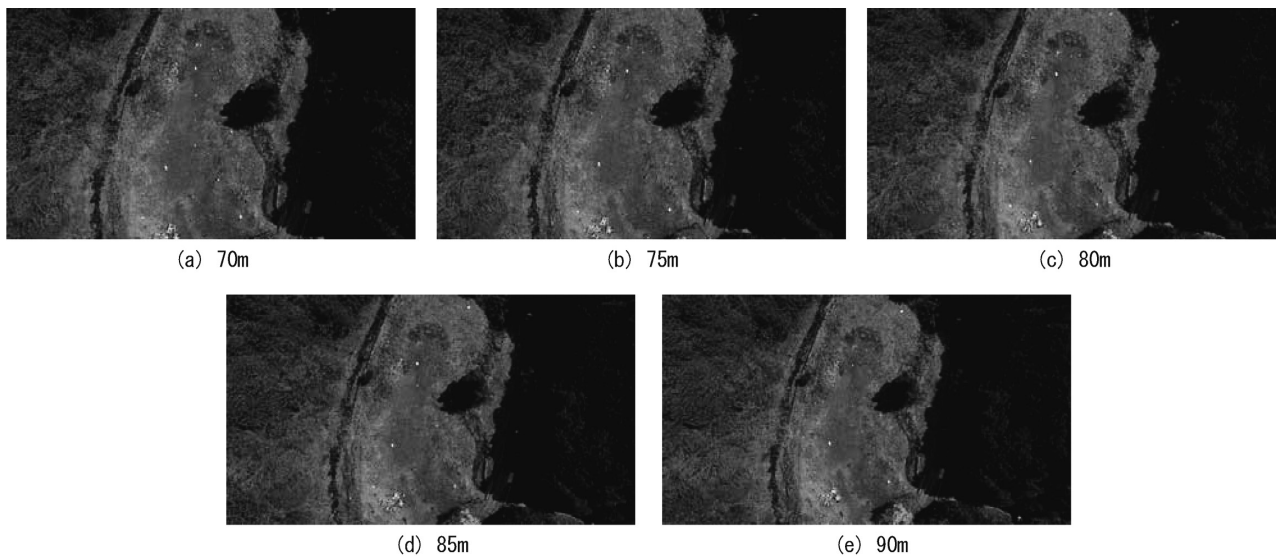


図 7 検証用撮影写真 (各画像のキャプションは対地高度)

ら2点とNo. 62の3点で構成される平面をX-Y平面とし、X-Y平面に直交する方向をZ軸として設定した。なお、上記の対空標識のうち原点を除く38点の3次元座標を未知量として本手法を適用する場合、前述の最終標定における未知量の数を考慮すると、理論上は2枚以上の写真があれば解を得ることが可能である。しかしながら、少ない写真枚数の場合は観測方程式と未知量の数が拮抗し、最小二乗法による計算の収束状況が不安定となる。本研究で撮影した写真においても少ない枚数での標定を試行したが、4枚以下では収束解を安定的に得ることが困難であったため、5枚全ての写真を使用することとした。表2に5枚の写真に対する最終標定の結果を示す。同表中の対地高度はUAVに搭載されているGPSによる単独測位で求められた概算値であるため、標定結果におけるZ座標とは数mの差異が生じている。

精度検証の結果は表3に示したとおり、平均二乗誤差は平面、高さともに $\pm 0.200\text{m}$ 以内となった。この精度を土工現場における測量精度にあてはめると、位置精度 0.20m 以内の三次元点群は部分払い出来高計測に適用できるとされており、土工に対する簡便な方法として適用可能であることが認められた。

一方、比較対象として、一般的な写真測量用ソフトウェアによる計測精度の算出も行った。使用したソフトウェアは、SfMを搭載するソフトウェアとしてもっとも普及しているAgisoft PhotoScan Pro (以下、PhotoScan)である。本研究ではPhotoScanにも図7に示した5枚の写真を取り込み、対空標識に対する3次元座標および計測精度の算出を行った。その際、No. 27, 35, 62の3点のみを基準点

とした場合と、写っている39点全点を基準点とした場合の2パターンを試みた。加えて、写真測量として一般的な方法にて撮影を行った場合との比較も行うこととした。すなわち、対地高度をおよそ 70m で一定としてUAVを平行に飛行させ、80%のオーバーラップ率を確保してテストサイト全域を網羅するよう計57枚の写真撮影を行い、その写真をPhotoScanに取り込んだ場合の3次元座標および計測精度も算出した。その際の基準点は、一般的な写真測量と同等数の9点を用いることとした。また、上記により得られた各計測精度を評価するための指標として、写真測量において一般的に用いられている標準精度を次式により算出した¹¹⁾。

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{H}{f} \sigma_p, \quad \sigma_z = \sqrt{2} \frac{H}{f} \frac{H}{B} \sigma_p \quad (6)$$

ここに、

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: x, y, z 座標に対する標準精度 (m)

H : 撮影時の対地高度 (m)

f : 焦点距離 (m)

B : 基線長 (m)

σ_p : 読み取り精度 (m)

ここで、本研究では5枚の垂直撮影写真を用いているため、式(6)における H には5枚の写真に対する標定後の対地高度の平均値 (83.944m)、 B には5枚のうちもっとも位置の離れた2枚の撮影間の距離 (20.137m) を用いて標準精度の算出を行った。また、読み取り精度については一般的な写真測量と同様に1画素とし、画素をカメラのセン

表2 最終標定結果

対地高度*	70m	75m	80m	85m	90m
撮影点 $X_0(\text{m})$	13.648	13.823	14.302	14.180	14.325
$Y_0(\text{m})$	-0.619	-1.052	-1.297	-1.528	-1.958
$Z_0(\text{m})$	74.061	78.676	83.806	89.035	94.142
姿勢角 ω	6' 58"	6' 43"	6' 35"	6' 33"	6' 28"
φ	1' 12"	1' 15"	1' 10"	1' 09"	0' 59"
κ	3' 15"	3' 00"	3' 00"	3' 14"	2' 58"

*対地高度はUAV搭載のGPSによる単独測位の値

表3 精度検証結果

計測手法	X座標精度 (m)	Y座標精度 (m)	Z座標精度 (m)
提案手法 垂直5枚・基準点0点 (座標決定用3点のみ使用)	± 0.096	± 0.160	± 0.166
垂直5枚・基準点3点	± 4.808	± 3.437	± 10.109
PhotoScan 垂直5枚・基準点39点	± 0.094	± 0.098	± 0.574
平行57枚・基準点9点	± 0.038	± 0.030	± 0.048
標準精度	± 0.040	± 0.040	± 0.233

サ上の長さに換算して用いることとした。

結果として、垂直写真5枚のみを用いた場合においては、平面精度は提案手法および PhotoScan 共に標準精度を下回ったが、高さ精度については提案手法のみが標準精度を上回る結果となった。すなわち、提案手法は撮影方法が簡便かつ地上基準点が不要であるにも関わらず、特に高さ方向に関しては通常の写真測量と同等の精度が得られることが確認された。一方、一般的な平行撮影による写真を PhotoScan にて処理した場合は、土工の出来高管理にも適用できる程度の高精度となった。以上の結果から、UAV による撮影方法は状況に応じて選択する必要があるが、本提案手法は短時間で簡便に現場の状況を把握するうえでは有用であることが示されたといえる。

また、図9は39点に対する X, Y 座標の残差の分布を矢視にて示したものである。同図より、原点より 10~20m 程度の範囲内においては、大半の検証点における残差が標準精度と同等の $\pm 0.04\text{m}$ 以内に収まっているが、30m 程度離れた No. 45, 50, 51, 55, 61, 66 といった各点は残差が $\pm 0.2\text{m}$ 前後となっており、精度の低下が確認できる。また、同図にて検証点の位置の分布をみると、X 方向は約 40m 程度の範囲であるのに対し、Y 方向は 50~60m と比較的広く分布していることが確認できる。すなわち、本検証では特に Y 座標が原点から離れた検証点が、提案手法における Y 座標精度の低下に起因したものと推測される。これらの結果より、本手法を現場にて適用する際は、原点を可能な限り計測対象物の近傍に設定することが望ましい

と考えられる。

5. おわりに

本研究では、UAV から垂直撮影された写真のみを用い、かつ地上基準点を使用せずに空中写真測量を実施する手法の開発を行った。また、開発した手法の性能を評価するために、一般的な写真測量用ソフトウェアとの測量精度の比較により検証を行った。その結果、開発した手法は少数の垂直撮影写真のみを用いるものであるため、通常的手法と比較して撮影の労力が軽減できることが推測される。また、地上基準点も不要であることから、撮影の事前準備も不要である。

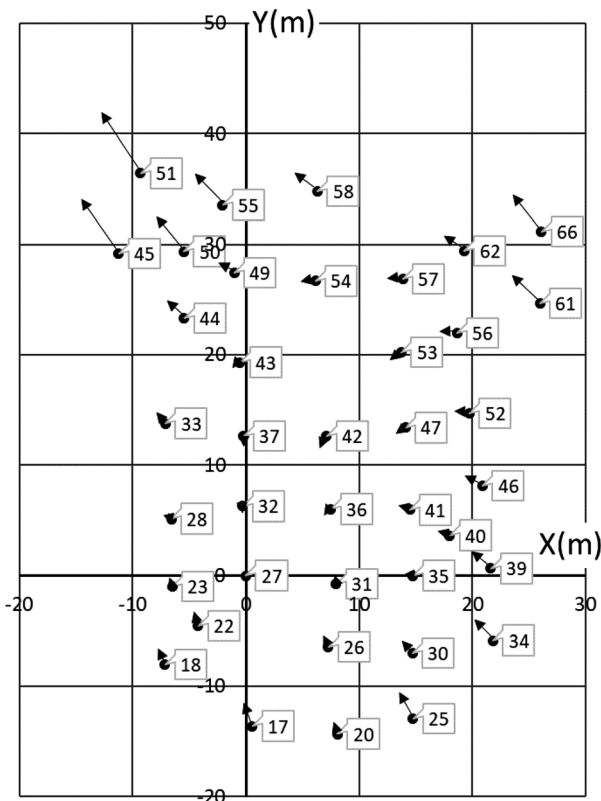
一方、精度検証はトータルステーションによる地上測量により得られている座標値との比較により、平均二乗誤差を算出して実施したが、一般的な撮影方法およびソフトウェアを用いた場合には劣るものの、一定以上の精度による計測は可能であることが確認された。また、撮影方法は UAV を単純に垂直方向に飛行させて数枚撮影するのみであるため、撮影に関わる時間と労力については大幅な縮減が可能となる。これらのことから、本開発手法は土工現場における現況の測量や、災害時における被害状況の把握等における活用が見込まれる。

今後の課題としては、さらに精度を向上させるための手段について検討する必要がある。特に、本手法は原点から離れた点に関して精度が低下することが確認されたため、計測点の位置に対する精度の安定化が望まれる。具体的な対応策としては、状況に応じた最適な写真枚数や、各写真間における最適な高度差の検証、さらには UAV 飛行時における GNSS (GPS) 測位情報の利用などが挙げられる。また、本研究では地上基準点を使用せずに 3 次元座標をローカル座標として求めたが、平面直角座標等のグローバルな座標を効率的に求めるための手法についても、引き続き検討が必要である。

謝辞：本研究における現地調査は、(一社)日本写真測量学会テストフィールド委員会のご協力の下に実施したものである。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 丸田哲也 (2012)：注目される無人航空機の民生利用—センサー技術との組み合わせで期待される用途—, IT ソリューションフロンティア 9月号, 18-19.
- 黒田潤一 (2017)：ドローン操縦レース 空を「エンタメの舞台」に変える, 月刊事業構想 3月号.
- 解析写真測量委員会 (1997)：解析写真測量, 日本写真測量学会, 190 pp.
- 齋藤 仁, 内山庄一郎, 小花和宏之, 早川裕式, 泉 岳樹, 山本遼介, 松山 洋 (2015)：UAV と SfM 多視点写真測量を用いた高精細データの取得と地形解析への応用—阿蘇山周辺の表層崩壊を対象として—, 日本地理学会発表要旨集 2015s
- 政野敦臣, 堀川毅信, 鳥田英司, 鳥田 徹, 光武孝弘, 野村真一, 中出 剛, 北原成郎, 土屋任史, 飛鳥馬翼 (2017)：航空レーザ測量及び UAV を併用した斜面災害対応の活用



※矢視の長さは 10 倍の強調表示

図 9 計測した各対空標識の残差分布

- 事例, 応用測量論文集 28, 149-158.
- 6) 黒台昌弘, 武石 学, 澤 正樹 (2016): UAV マルチコプタの活用事例と土工管理への適用: 土工管理における作業方法と精度管理について, 建設機械 52 (8), 50-54.
 - 7) 和田章三, 田中正人, 岡本直樹 (2014): 4D 土工管理のマルチコプタ運用: 土工管理の見える化, 建設機械施工 66 (4), 39-45.
 - 8) 国土交通省国土地理院 (2017): UAV を用いた公共測量マニュアル (案), 42 pp.
 - 9) WESTOBY M.J., BRASINTON J., GLASSER N.F., HAMBREY M.J., REYNOLDS J.M. (2012): 'Structure-from-Motion' Photogrammetry: A Low-cost, Effective Tool for Geoscience Applications, *Geomorphology* (179), 300-314.
 - 10) 近津博文, 小高明彦, 柳 秀治, 横山 大 (2016): UAV 写真測量における三次元モデリングソフトウェアの性能評価, 写真測量とリモートセンシング 55 (2), 117-127.
 - 11) 柳 秀治, 近津博文 (2011): 近接デジタル写真測量における精度要因と精度評価, 写真測量とリモートセンシング 50 (1), 4-17.

Development of Photogrammetric Method Using Vertical Image by UAV

By

Yoichi KUNII*[†] and Rihito KUMAZAKI**

(Received September 19, 2017/Accepted March 9, 2018)

Summary : In order to propose an efficient photogrammetric method for UAV (Unmanned Aerial Vehicle), a new method which requires only few images was developed is presented in this paper. The operation of the UAV for the method flown in a vertical direction, and few images could be taken from different altitudes. Therefore, the UAV can be operated more easily than general photogrammetric method. The developed method includes original relative orientation procedure which can be applied to vertical direction images. In addition, a final orientation which can perform absolute orientation for every parameter and calculate 3D coordinates of all measurement points simultaneously was included. In order to observe performance evaluation of the method, the checking accuracy of the measurement was performed using UAV test site by Japan Society for Photogrammetry and Remote Sensing. The UAV was operated in the test site, and the 5 vertical images were taken from 70–90 m altitude respectively. Therefore, 3D coordinates of measurement points were calculated. As a result, the plane and height accuracy was ± 0.093 m and ± 0.166 m respectively. These values were of higher accuracy than the results of the usual photogrammetric software. Consequently, the developed method can be 3D measured efficiently, and it is expected that the method will become a useful tool in the field of construction, disaster and any surveying.

Key words : Unmanned Aerial Vehicle, photogrammetry, vertical image, checking accuracy

* Department of Landscape Architecture Science, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

** Department of Landscape Architecture, Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture

[†] Corresponding author (E-mail : y3kunii@nodai.ac.jp)