

RTK-UAVを利用した高精度簡易測量技術 (デイリードローンRTK)

松岡 祐仁¹

¹株式会社フジタ 土木本部 土木エンジニアリングセンター設計技術部。

従来の空中写真測量は、事前に設置した標定点の測量作業、工事の進捗に合わせた標定点の更新作業に膨大な費用と時間が必要になる。また、写真撮影後の解析、点群生成処理に半日以上要するため、現場職員がUAV測量をタイムリーかつ有効に活用できるまでには至っていない。

当社では、現場における出来高計測の内製化と日々手軽に土量を算出することを目的に、従来の1/3の時間で土量管理が可能なデイリードローンを開発、運用している。更にRTK-GNSS搭載型UAV適用により、精度を確保した上で標定点の削減が可能となった。本稿では、本技術の開発経緯とノウハウである飛行、解析条件、及び適用現場における精度検証結果を報告する。

キーワード：空中写真測量，出来高計測，簡易測量，RTK-GNSS搭載UAV，技術開発研究

1. はじめに

国土交通省が2016年から導入した「i-Construction」の3本柱の一つである土工への「ICTの全面的な活用」により、起工測量、及び出来形・出来高計測にレーザースキャナーやUAV (Unmanned Aerial Vehicle) が活用されている。特に、UAVの高機能、及び低価格化により空中写真測量が急速に普及しており、日常出来高管理への活用も期待されている。しかし、現状では測量事前準備や飛行操作技術、データ処理の課題から専門業者に委託するケースが主であり、UAV測量による日常出来高管理を現場職員が行うまでには至っていない。

本論文では、これらの課題を改善し、現場職員でUAV測量が容易に行える当社独自の簡易UAV測量システム「デイリードローン」(図-1)を開発した経緯、及び本システムをRTK-GNSS搭載UAVに適用した「デイリードローンRTK」の現場検証の結果を報告する。

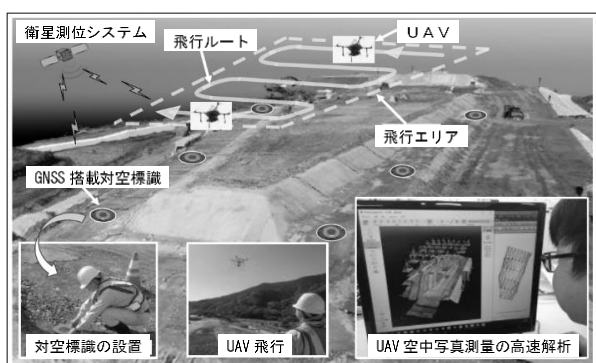


図-1 「デイリードローン」概念図

2. デイリードローン開発

(1) デイリードローン開発の経緯

空中写真測量は、「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」(国土交通省国土院)、 「空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案)」(国土交通省)に準じて運用される。図-2に示す実施手順¹⁾の網掛けした工程は、特に労力と時間を要するため、日常出来高管理の現場活用への阻害要因となっている。そこで、現場での数量算出(出来高土量等)利用を前提とした事前準備の改善、飛行・解析条件の最適化を図ることとした。

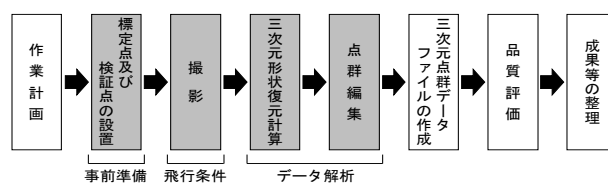


図-2 UAVによる写真測量の実施手順

(2) 対空標識

a) 対空標識設置の課題点

「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」の規定²⁾により、図-3に示す2ha(100×200m)の範囲に対空標識を設置する場合、標定点7点以上、検証点4点以上が必要となる。この設置には、TSを用いた場合、おおよそ2人×4時間を要する。また、施工範囲内に設置する対空標識は、工事の進捗に合わせて設置・撤去の繰り返しが必要となる。

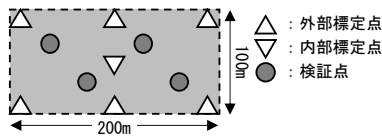


図3 対空標識配置例

b) エアロボマーカの導入

対空標識としてスタティック測位処理機能を持つエアロボマーカ（図4）により、課題解決を図ることとした。当初、マーカの測位処理は近傍電子基準点を基準局として世界測地系座標を求める仕様のみであったが、我々の要望により現場基準点を基準局として処理する仕様を追加し、現場内座標と整合が取れるようにした。

表-1に示す3~4箇所のエアロボマーカの座標値を計6回計測した結果より、「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」に基づく許容範囲（2回計測した誤差）のX,Y成分20mm, Z成分30mm⁹⁾を満たすことが確認できた。

エアロボマーカは、対空標識として機能し、起動後60分程度でその位置の座標を取得するため、その間にUAVでの写真撮影が可能である。また、現場基準点での測位処理は、当初仕様（電子基準点）の半日から約20分に短縮される。これにより、従来4時間程度要していた対空標識設置・測量作業を1/4の1時間に低減することが可能となった。

表-1 エアロボマーカとTS測量の誤差



	誤差 (mm)		
	X	Y	Z
最大値	10.0	26.0	19.0
最小値	-18.0	-27.0	-26.0
平均値	-2.8	-7.0	-3.8
標準偏差	6.2	14.2	14.9

図4 エアロボマーカ

(3) 三次元点群データ解析時間の短縮

デイリードローンでは、i-Construction基準における数量算出（出来高土量等）の基準値±100mm⁴⁾を満足するとともに、画像解析時間を現行の5時間から2時間に短縮することを目標としている。目標達成のため、画像解析時間に大きく寄与する「A. 写真ラップ率」、「B. 地上画素寸法」、「C. 点群密度」、「D. 標定点の設置間隔」の4ケースについて条件を変更しながら検証した結果から決定した「デイリードローン」における当社の独自運用基準を表-2に示す。なお、UAVはPhantom 4 Advanced, 解析ソフトはPix4Dmapperを使用した。

表-2 「デイリードローン」飛行解析運用基準

	i-Construction基準		デイリードローン基準
	出来形計測	数量計算	数量計算
写真ラップ率	同一コース80% 隣接コース60%	同一コース80% 隣接コース60%	同一コース80% 隣接コース60%
地上画素寸法	10mm	20mm	20mm
点密度	10cm	50cm	20~25cm
標定点間隔	外縁100m	外縁100m	外縁100m
要求精度	±50mm	±100mm	±50mm

(4) 現場検証

a) 出来高土量の精度検証

デイリードローンを用いた出来高数量の精度検証を実施した。土量算出は、起工測量と現況測量結果から作成されたTINデータより平均断面法により行った。2haの施工区域において、土量変化率を考慮したダンプ搬入土量との比較を表-3に示す。

表-3 デイリードローン・ダンプ集計 出来高土量比較

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	
	10月26日	11月13日	11月14日	11月15日	11月21日	11月24日	
①デイリードローン							
・検証点精度 X(mm)	-4.0	3.0	-	14.0	9.0	-2.0	
Y(mm)	1.0	27.0	-	9.0	8.0	-3.0	
Z(mm)	45.6	0.0	-	15.1	-30.1	-21.5	
最大誤差(mm)	45.6	27.0	-	15.1	30.1	21.5	
・集計土量(累計)(m3)	51,352	73,299	73,594	75,038	78,037	79,609	
②ダンプ集計(累計)※(m3)	49,699	71,321	72,110	73,026	75,804	77,221	
出来高土量比較	(①-②)(m3)	1,653	1,978	1,484	2,012	2,233	2,388
	(①-②)/①(%)	3.2%	2.7%	2.0%	2.7%	2.9%	3.0%

※ダンプ土量は変化率を考慮

土量較差は最大で約3.2%となり、5%以内となった。検証点においても最大誤差45.6mm（Z方向）と数量算出基準±100mm⁴⁾はもとより出来形計測相当±50mm⁹⁾を満足する結果となった。

b) 測量、解析に要する時間の検証

デイリードローンによる2.0haの測定時の事前準備～解析に要する時間の検証を実施した。作業内容、及び時間は表-4に示すとおり、従来の1/3の時間で土量算出が可能となった。

表-4 作業時間の従来比較

		適用機器、ソフト	従来測量・解析時間	デイリードローン® 測量・解析時間
事前	① 対空標識計測	GNSS搭載対空標識	4.0h	1.0h
	② UAV写真撮影	UAV	(0.5h)	(0.5h)
解析	③ 標識紐付け	座標変換ソフト	5.0h	0.5h
	④ 点群処理	SfM/MVSソフト		0.5h
	⑤ 点群編集	点群編集ソフト		0.5h
	⑥ 三次元処理	三次元CAD		0.5h
時間合計			9.0h	3.0h (従来の1/3)

3. RTK-GNSS搭載UAVの導入

2018年末、2周波GNSS搭載のPhantom 4 RTKの発売が開始された。従来のPhantom 4 Advanced等と同等の取り扱い易いサイズながら、RTK、VRS、及びPPKの各GNSS測位方式に対応することから、写真撮影位置精度の向上が期待できる。

デイリードローンと組み合わせると、計測精度の向上、対空標識の削減により、システムの簡略化やより多くの現場への適用可能性が広がることから、「デイリードローンRTK」として運用を開始するとともに精度検証を実施した。

(1) 評定点削減時の精度検証

比較的平坦な造成現場に計9個の対空標識を設置した100×200mの計測領域を設定し、デイリードローンRTKの精度検証を実施した。SfM (Structure from Motion) 解析時に、標定点として設定する対空標識の配置形状、数を変更して、残りを検証点として座標誤差を確認した。

a) 評定点レス時の精度

対空標識をすべて検証点とし、評定点を設置しない場合の精度の確認を実施した。フライトは、飛行高度73m (地上画素寸法20mm) で①RTK機能を使用しない「単独GNSS測位」、②「RTK-GNSS測位」、③「VRS-GNSS測位」、④「PPK-GNSS測位」の計4ケース実施した。

①単独GNSS測位においてメートルオーダーの誤差が発生した。②～④の3ケースにおいては、水平(X,Y方向)誤差が±50mm以内に収まるのに対し、鉛直(Z方向)誤差が顕著に出たが、標準偏差はいずれも10～15mmであり、Z方向に一定のオフセットがあるものの非常に高い精度で解析ができていているといえる。各ケース解析処理後の検証点座標誤差を表-5に示す。

表-5 標定点レス時の検証点座標誤差

① 単独GNSS測位				② RTK-GNSS測位			
検証点	X誤差(m)	Y誤差(m)	Z誤差(m)	検証点	X誤差(m)	Y誤差(m)	Z誤差(m)
0	0.297	0.050	0.433	0	-0.001	0.009	-0.572
1	-	-	-	1	0.023	0.018	-0.589
2	0.432	-0.195	0.589	2	-0.015	0.020	-0.567
3	0.236	-0.166	0.145	3	0.018	-0.012	-0.577
4	0.320	0.243	0.908	4	0.020	0.003	-0.588
5	0.374	-0.421	0.408	5	0.014	-0.002	-0.542
6	0.626	-0.236	1.154	6	0.009	-0.007	-0.576
7	0.479	0.015	0.869	7	0.020	0.017	-0.567
8	0.350	-0.065	0.468	8	0.034	0.001	-0.593
平均(m)	0.389	-0.097	0.622	平均(m)	0.014	0.005	-0.575
標準偏差(m)	0.114	0.190	0.308	標準偏差(m)	0.014	0.011	0.015
平均二乗誤差(m)	0.406	0.214	0.694	平均二乗誤差(m)	0.019	0.012	0.575

③ VRS-GNSS測位				④ PPK-GNSS測位			
検証点	X誤差(m)	Y誤差(m)	Z誤差(m)	検証点	X誤差(m)	Y誤差(m)	Z誤差(m)
0	0.038	-0.009	-0.258	0	0.005	-0.004	-0.712
1	-	-	-	1	-	-	-
2	0.000	-0.017	-0.255	2	-0.001	-0.009	-0.708
3	0.015	-0.013	-0.244	3	-0.006	-0.032	-0.685
4	0.024	-0.001	-0.241	4	-0.030	-0.001	-0.683
5	-0.006	-0.039	-0.250	5	-0.005	-0.044	-0.706
6	-0.013	-0.015	-0.231	6	0.002	-0.001	-0.700
7	0.013	-0.011	-0.236	7	-0.006	0.017	-0.700
8	0.011	-0.015	-0.262	8	-0.011	-0.004	-0.713
平均(m)	0.010	-0.015	-0.247	平均(m)	-0.007	-0.010	-0.701
標準偏差(m)	0.016	0.010	0.010	標準偏差(m)	0.010	0.018	0.011
平均二乗誤差(m)	0.019	0.018	0.247	平均二乗誤差(m)	0.012	0.021	0.701

①, ③, ④の標定点1は欠測

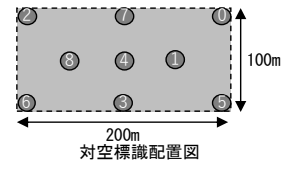
b) 評定点設定時の精度

次にデータ通信圏外でも運用可能で解析フローも従来と同じことから、様々な現場への適用が期待できるRTK-GNSS測位時に標定点を追加した場合の検証を実施した。代表的なケース(標定点数1~3)解析処理後の検証点座標誤差を表-6に示す。

表-6 RTK-GNSS測位 標定点設定時の検証点座標誤差

標定点数: 1 (④) (検証点数: 8)				標定点数: 2 (①⑧) (検証点数: 7)				標定点数: 2 (②⑤) (検証点数: 7)			
検証点	X誤差(m)	Y誤差(m)	Z誤差(m)	検証点	X誤差(m)	Y誤差(m)	Z誤差(m)	検証点	X誤差(m)	Y誤差(m)	Z誤差(m)
0	-0.008	-0.001	0.011	0	-0.008	-0.011	0.015	0	-0.007	0.005	-0.031
1	0.008	0.011	-0.005	2	-0.033	0.024	0.031	1	0.017	0.018	-0.047
2	-0.022	0.020	0.027	3	-0.011	-0.021	0.036	3	0.018	-0.007	-0.027
3	-0.001	-0.013	0.021	4	-0.004	-0.004	0.002	4	0.019	0.002	-0.040
5	-0.001	-0.012	0.061	5	-0.006	-0.026	0.077	6	0.016	-0.001	-0.048
6	-0.004	0.001	0.015	6	-0.019	0.004	0.033	7	0.017	0.010	-0.014
7	0.007	0.013	0.022	7	0.003	0.013	0.019	8	0.038	-0.003	-0.046
8	0.019	0.001	-0.004	平均(m)	-0.011	-0.003	0.030	平均(m)	0.017	0.003	-0.036
平均(m)	0.000	0.002	0.019	標準偏差(m)	0.011	0.017	0.022	標準偏差(m)	0.012	0.008	0.012
標準偏差(m)	0.011	0.011	0.019	平均二乗誤差(m)	0.016	0.017	0.037	平均二乗誤差(m)	0.021	0.008	0.038
平均二乗誤差(m)	0.011	0.011	0.027								

標定点数: 3 (②④⑤) (検証点数: 6)				標定点数: 3 (②⑤⑥) (検証点数: 6)			
検証点	X誤差(m)	Y誤差(m)	Z誤差(m)	検証点	X誤差(m)	Y誤差(m)	Z誤差(m)
0	-0.022	0.024	0.001	0	-0.009	0.020	-0.002
1	0.004	0.023	-0.013	1	0.016	0.023	-0.014
3	0.010	-0.009	0.000	3	0.018	-0.013	0.003
6	0.005	-0.004	-0.024	4	0.012	0.002	-0.007
7	-0.003	0.009	0.020	7	0.005	0.015	0.012
8	0.025	-0.007	-0.013	8	0.025	-0.006	-0.014
平均(m)	0.003	0.006	-0.005	平均(m)	0.011	0.007	-0.004
標準偏差(m)	0.014	0.014	0.014	標準偏差(m)	0.011	0.013	0.009
平均二乗誤差(m)	0.014	0.015	0.015	平均二乗誤差(m)	0.016	0.015	0.010



標定点を追加した結果、標定点数1~3個のいずれのケースにおいても水平、鉛直の平均二乗誤差は40mm以下となったが、標定点数1, 2個のケースでは1点の鉛直誤差が±50mm以上となった。3点以上標定点を設置した場合、すべてのケースで誤差が±50mm以下となった。

今後、より多くのデータを蓄積した上で定量的な評価が必要であるが、比較的平坦な地形上での測量では、標定点3点以上によるデイリードローンRTKの運用が適切であるといえる。

(2) 他の測量法との出来高土量比較

約3haの造成現場において、TS測量, UAV測量(デイリードローンRTK), 及び地上型LS測量(レーザースキャナー)による出来高数量(盛土量)の比較検証を実施した。デイリードローンRTKは、盛土領域の四隅と中央部に計5箇所の評定点を設定し、地上画素寸法20mmとなる飛行高度73mでの結果である。検証点9点の平均二乗誤差は、X: 10mm, Y: 15mm, Z: 17mmとなり、個々の値も±50mm以内となった。

TS測量の10断面に合わせてUAV、地上型LSのTINに断面を設定し、それぞれの土量を平均断面法により求めた結果を表-7に示す。

表-7 異なる測量方法による土量比較（平均断面法）

断面	盛土土量 (m ³)		
	TS測量	地上型LS測量	デイリードローン [®] RTK
1			
2	772.6	746.6	747.5
3	12542.2	12413.8	12444.3
4	14412.2	13364.0	13465.3
5	1078.9	962.7	970.8
6	810.3	782.7	786.0
7	18058.0	18380.0	18437.5
8	12206.1	12574.9	12600.3
9	4596.5	4571.6	4569.0
10	572.3	545.1	544.2
	65049.1	64341.5	64564.7
土量較差 (m ³)	707.6	0.0	223.3
土量較差 (%)	1.10%	-	0.35%

地上型LSを基準とした場合の土量較差は、TS測量+1.10%、デイリードローンRTK+0.35%であった。地上型LSとデイリードローンRTKの較差は、計測面積で割り戻すと標高差で平均5mmの違いとなり非常に良い一致となった。

(3) デイリードローンRTK現場適用例

出来高計測以外にデイリードローンRTKを活用した事例を紹介する。当該地は、図-5に示す採石場跡地で全体高低差が100mに及ぶ斜面である。浮石等があるため、安全面から人が立ち入ってのTSや地上型LSでの測量は困難であり、測量が可能であったとしても機器の盛替え、昇降に多くの時間を要することが予想される。

計測範囲を囲む4点に評定点を設置し、デイリードローンRTKにより、現況形状の計測を実施した。表-8に示すとおり、検証点6点それぞれのX、Y、Zの誤差は、それぞれ±50mm以内、全体の平均二乗誤差もX: 7.3mm, Y: 12.7mm, Z: 16.8mmとなり、高低差のある地形でも出来高管理±50mm⁹相当の精度で計測を行うことができた。得られたデータは、断面の切り出し、施工計画、協議用資料として活用した。

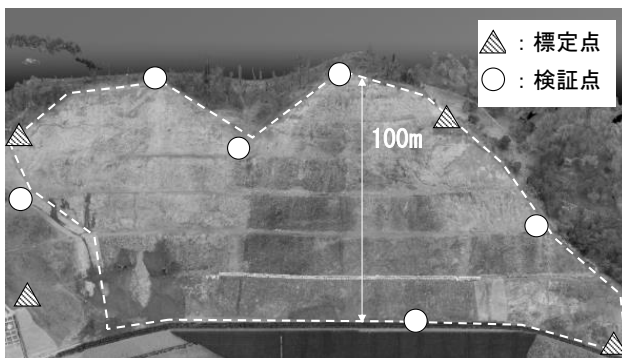


図-5 長大斜面での計測事例

表-8 長大斜面計測時の検証点座標誤差

標定点数：4（検証点数：6）			
検証点	X誤差 (m)	Y誤差 (m)	Z誤差 (m)
0	0.0080	-0.0021	0.0117
1	-0.0086	0.0135	-0.0111
2	-0.0088	0.0117	0.0194
3	-0.0002	0.0185	0.0269
4	-0.0073	-0.0175	-0.0158
5	-0.0075	0.0013	0.0092
平均 (m)	-0.0041	0.0042	0.0067
標準偏差 (m)	0.0061	0.0120	0.0154
平均二乗誤差 (m)	0.0074	0.0127	0.0168

4. おわりに

「デイリードローン」は、i-Construction出来高等数量算出と同等の飛行・解析基準で、出来形計測精度を満足する簡易UAV測量システムである。その特徴を以下に示す。

- ① 対空標識にエアロボマーカを採用することで、設置・測量時間を1/4に低減
- ② 当社独自の飛行・解析基準の設定により、解析時間を2/5に低減
- ③ 作業時間が従来比1/3となる即日測量を実現

現在「デイリードローン」は、造成現場等での出来高計測や土量変化率の把握による土配計画、着工前等の現況測量等に活用されており、現場職員による運用拡大を進めている。

また、「デイリードローンRTK」導入により、評定点数を削減した上で従来と同等以上の精度確保が可能となった。今後の運用とともに更なる検証を重ね評定点の配置、ラップ率等システムの最適化を図る予定である。

今後は、低コストで導入可能な「デイリードローン」、現地条件が厳しく、精度が要求される場合の「デイリードローンRTK」の両輪により、土木分野に加え建築分野へも適用範囲の拡大を図り、現場の生産性向上に資する技術として発展させていく所存である。

謝辞：現場検証にあたり、多岐にわたりご指導・ご協力を頂きました関係者各位に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1), 2), 3) 国土交通省国土地理院：UAVを用いた公共測量マニュアル（案），p2, 23, 24, 2017.3
- 4), 5) 国土交通省：空中写真測量（無人航空機）を用いた出来高管理基準要領（土工編）（案），pp.25~29, 33-36, 2018.3