

RTK 搭載ドローンを用いた GCP 点数削減に関する実験的研究

Experimental Study on Installation Reduction of GCP Using Drone with RTK

(株)砂子組	○正 員 八戸 政人 (Masato Hachinohe)
HELICAM(株)	非会員 丹野 宏柄 (Kohei Tanno)
(株)エル技術コンサルタント	非会員 山本 公志 (Takayuki Yamamoto)
(株)砂子組	非会員 阿部 和人 (Kazuto Abe)
(株)砂子組	非会員 千葉 大樹 (Hiroki Chiba)

1. 背景と研究目的

コンピュータ・ビジョン分野から発展した画像処理技術である Structure from Motion（以下 SfM）は、これまで困難だった、大量の重なった写真画像からなる高精度かつ全自動での 3 次元形状復元を実現し、ほぼ同時期に出現した UAV(Unmanned aerial vehicle：以下ドローン)との併用により、従来の測量概念を変える、革命的な地形測量手法となりつつある。

一方、国土交通省では、「ICT の全面的な活用」等の施策を建設現場に導入することにより、建設生産システム全体の生産性向上を目指す取り組みである i-Construction（以下 i-Con）を推し進めている。

近年の建設現場において、ドローンを用いた起工測量並びに出来形管理は、その利便性から急速に普及が進み、既に珍しい物では無くなりつつあるが、高精度な計測において必須となる地上基準点（Ground Control Point：以下 GCP）の設置・観測・撤去には、依然として人手・時間を要し、i-Con における重要なテーマの一つである、「生産性の向上」を妨げるボトルネックとなっている。

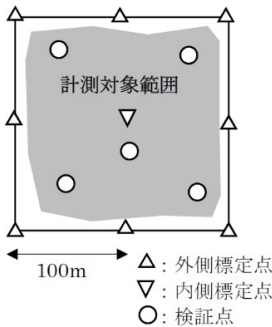


図 1 「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」 GCP 設置例

GCP は、計測範囲の周辺及び内部に複数個設置し（図 1）、SfM 処理で得られる任意座標のローカライズや、カメラ位置・傾き（外部標定要素）の推定及びカメラのレンズ歪み係数を最適化する（セルフキャリブレーション）ための正解データとして使用されるが、精密な計測手法により、最初からカメラ位置が明らかとなっている場合、理論上は GCP が不要となる。

本研究は、RTK-GNSS を搭載したドローンを用い、

GCP の設置数ならびに画像のラップ率について、複数条件で精度検証を行い、今後の i-Con 現場における新たな基準策定の一助となることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用機材



図 2 DJI 社製、Phantom4 RTK

ドローンは、中国 DJI 社製、Phantom4 RTK(以下 P4R)を使用した。

P4R は、DJI が販売する最新ドローンで、2 周波 GNSS モジュールを搭載し、NW 型 RTK(VRS)、固定局設置型 RTK、PPK(後処理型)の 3 種類のモードに対応している。施工現場においては、一般にローカル RTK(固定局設置型)が採用される事が多いが、本実験施行段階においては、専用固定局（D-RTK2）の国内向けバージョンが正式にリリースされていないため、VRS 方式を採用した。

表 1 P4R スペック表（メーカーサイトより）

機体重量	1391g
対角寸法	350mm
ホバリング精度	±0.1m
カメラセンサー	1インチCMOS
画素数	2000万画素
GPS	L1/L2
GLONASS	L1/L2
BeiDou	B1/B2
Galileo	E1/E5a
水平測位精度	1.0cm+1ppm(RMS)
垂直測位精度	1.5cm+1ppm(RMS)

2.2 実験場所

北海道美唄市北美唄町 経営体北美唄地区 41 工区圃場整備現場、100m×400mの範囲内とした。圃場整備では、平坦な施工を行うため、SfM 処理において、特にレンズ歪みの影響が出やすく、通常多くの GCP 設置が求められる。



図 3 実験場所

2.3 GCP 設置

検証用に、国交省において定められる規定に基づいたデザインで、GCP を 21 箇所設置した。GCP の設置には、GNSS ローバー (TOPCON HiperV) を用い、VRS 方式による単点観測で公共座標を設定した。

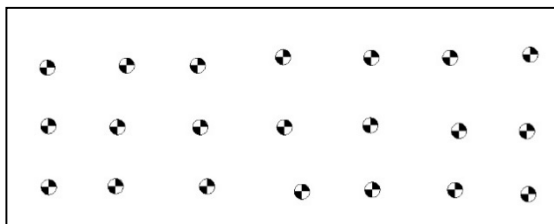


図 4 GCP 配置：全 21 点

公共座標は、X,Y,H(Z: 標高)の形式で取得されるが、P4R は、現時点では標高に対応しておらず、楕円体高が採用されている。その為、GNSS ローバーで取得した標高値に、ジオイドモデルから算出したジオイド高を加算し、各 GCP の楕円体高を算出した。

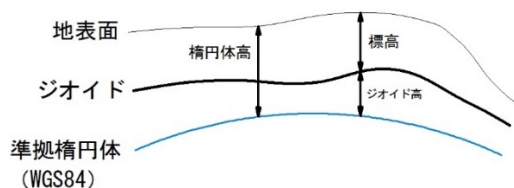


図 5 標高とジオイドの関係

表 2 GCP 計測座標

点名	X	Y	Z (標高)	ジオイド高	楕円体高
G1	-70318.853	-35590.074	14.797	31.573	46.370
G10	-70440.496	-35346.089	15.092	31.567	46.659
G11	-70427.196	-35415.151	15.496	31.568	47.064
G12	-70392.861	-35477.993	14.752	31.570	46.322
G13	-70378.521	-35544.186	14.767	31.571	46.338
G14	-70365.765	-35599.264	15.019	31.572	46.591
G15	-70414.646	-35609.542	15.096	31.570	46.666
G16	-70425.462	-35555.847	15.219	31.570	46.789
G17	-70441.387	-35482.680	15.154	31.568	46.722

2.4 フライト計画

平成 30 年 10 月 22 日 天候：晴れ 風力 1m
専用アプリケーションの GSRTK を用い、タブレット端末上で計測範囲、機体速度等、各種設定を行った。飛行高度 3 パターン、ラップ率 2 パターンの計 6 パターンを、それぞれ RTK ON (A セッション)、OFF (B セッション) で撮影し、合計 12 回のフライトを行った。

表 3 フライトパターン (A セッション)

	ラップ率 (%)	
高度 (地上画素寸法)	80×60	60×50
30m (0.82cm)	A-1	A-4
50m (1.40cm)	A-2	A-5
70m (1.90cm)	A-3	A-6

3. 撮影結果

12 フライトの結果が以下の表 4 である。

A-4 セッションについては、フライト途中で RTK の接続が切れるトラブルが発生した為、今回の評価対象からは外すこととした。

表 4 フライト結果 ※ () 内は撮影枚数

	ラップ率 (%)	
高度 (地上画素寸法)	80×60	60×50
30m (0.82cm)	A-1 (550枚)	A-4 (179枚)
50m (1.40cm)	A-2 (233枚)	A-5 (89枚)
70m (1.90cm)	A-3 (135枚)	A-6 (52枚)
30m (0.82cm)	B-1 (543枚)	B-4 (170枚)
50m (1.40cm)	B-2 (230枚)	B-5 (84枚)
70m (1.90cm)	B-3 (131枚)	B-6 (49枚)

4. 精度検証

各セッションの画像データを AGI Photo Scan Pro でそれぞれ解析処理を行い、同条件で精度検証を行った。

4.1 NO-GCP 時の精度

RTK-ON の 5 セッションについて、GCP を参照せずに処理を行った結果が以下の表 5 である。

表 5 カメラ位置の交会残差

セッション名	X 誤差(cm)	Y 誤差(cm)	Z 誤差(cm)
A-1	0.292665	0.672483	0.672483
A-2	0.319707	0.291131	1.20081
A-3	0.223493	0.260617	0.343322
A-5	0.13076	0.376142	0.177564
A-6	0.130044	0.149446	0.198105

すべてのセッションにおいて、交会残差が数mm~1 cm 程度に収まっており、RTK-GNSS 測位において、安定した Fix 解が得られていることが見て取れる。

表 6 A セッションの RMS (GCP 座標誤差)

セッション名	X 誤差(cm)	Y 誤差(cm)	Z 誤差(cm)
A-1	3.31563	1.5113	49.4776
A-2	1.36793	1.02798	37.4775
A-3	2.65686	1.13041	12.8911
A-5	2.85405	0.92605	33.4749
A-6	2.89192	1.12697	32.5485

すべてのセッションにおいて、水平精度が数cm以内に収まっているのに対し、Z 方向の誤差が顕著に出たが、どれも一定のオフセット誤差となっており、例えば A-2 セッションにおいて、Z 誤差を平均値でオフセットした場合の標準偏差は 2.29 cm となる（表 7）。

表 7 A-2 セッション全 GCP 誤差

ラベル	X 誤差 (cm)	Y 誤差 (cm)	Z 誤差 (cm)	合計 (cm)	画像 (pix)
G1	-1.13204	-0.231491	-33.2977	33.3177	0.177 (3)
G10	-0.1375	0.246031	-38.229	38.23	0.085 (5)
G11	-1.03785	0.116843	-39.4176	39.4315	0.119 (5)
G12	0.53381	0.992599	-37.5016	37.5185	0.079 (3)
G13	0.139117	1.41303	-38.3162	38.3425	0.127 (3)
G14	-0.681531	1.37673	-36.7197	36.7518	0.117 (3)
G15	-0.0402175	-0.176634	-34.8498	34.8503	0.164 (4)
G16	-0.213431	-0.189382	-36.7268	36.7279	0.100 (6)
G17	1.02027	0.64846	-37.1616	37.1813	0.068 (5)
G18	-0.495535	-0.610294	-38.7544	38.7624	0.113 (6)
G19	0.669549	0.10887	-39.1355	39.1414	0.132 (5)
G2	0.467435	0.624168	-32.9098	32.9191	0.140 (3)
G20	0.792709	-0.721514	-38.6672	38.6821	0.088 (4)
G21	1.28593	0.243769	-40.1728	40.1941	0.170 (5)
G3	1.6371	1.85987	-35.0633	35.1508	0.166 (3)
G4	0.172141	1.80048	-37.5309	37.5744	0.122 (5)
G6	4.0917	2.44543	-39.3252	39.613	0.072 (4)
G7	2.38498	1.02868	-34.3669	34.465	0.163 (4)
G8	1.69608	0.684656	-38.7873	38.8304	0.103 (5)
G9	1.4068	-0.28327	-41.2871	41.312	0.083 (5)
合計	1.36793	1.02798	37.4775	37.5166	0.122

テーブル 5. 基準点。
X - 東経, Y - 北緯, Z - 高度。

なお、RTK-OFF の B セッションにおいては、カメラ位置の計測は単独測位値となる為、NO-GCP で処理した場合、メートルオーダーの誤差が発生する（表 8,9）。

表 8 RTK-OFF のカメラ位置残差

セッション名	X 誤差(m)	Y 誤差(m)	Z 誤差(m)
B-1	1.52739	0.921891	1.78404
B-2	2.24085	0.744301	1.47113
B-3	2.3356	0.671324	0.54078
B-4	2.71846	0.874212	0.647864
B-5	1.60149	0.662111	1.73296
B-6	4.5779	1.20214	0.263174

表 9 RTK-OFF の RMS(GCP 座標誤差)

セッション名	X 誤差(m)	Y 誤差(m)	Z 誤差(m)
B-1	0.406194	1.96732	15.809
B-2	1.79676	2.12481	11.477
B-3	1.09829	2.50287	9.242111
B-4	0.99478	1.87999	12.447
B-5	2.55844	1.42111	10.6645
B-6	1.1114	2.22249	8.9778

RTK を使用しない単独測位 GNSS においては、特に Z 方向の精度が不安定になるため、機体内部で気圧高度計による大まかな補正を行っている。表 7,8 を見ても判るように、RTK-OFF の場合、カメラ位置残差と実際の地上座標誤差との対応付けが困難である。

以上の結果から、P4R を RTK-ON で利用すれば、GCP を一切参照しない場合であっても、十分な水平精度が確

保され、標高においても、一定量のオフセット計算を行えば、問題無く使用可能であることが判った。しかし、Z 方向のオフセット量は、各セッション毎でまちまちであり、GCP を検証点として参照することによって、初めて明確な数値が明らかとなるため、完全な NO-GCP による運用は、高さ精度が重要ではない場合や、緊急の災害調査時等、限定的な場面でのものとならざるを得ない。

4.2. GCP 減少試験

4.1 の結果により、RTK を用いた場合、GCP を使用せずとも、十分な水平精度が得られることが判ったが、実際に i-Con の現場で使用する場合は、高さ方向の誤差を解消しなくてはならない。

一般に、GCP を減らした場合、各々の誤差量が減少であっても、モデル全体が反る等の問題が発生しやすいと言われている。

特に、本実験のような、平坦な地形においては、図 6 のようなドーム状の歪みが生じ、水平精度が良好であっても、高さ方向の誤差が顕著なものとなる（表 10）。

表 10 RTK-OFF セッション B-3 GCP4 点使用

評価点数	X 誤差(m)	Y 誤差(m)	Z 誤差(m)
17点	0.025	0.016	1.319

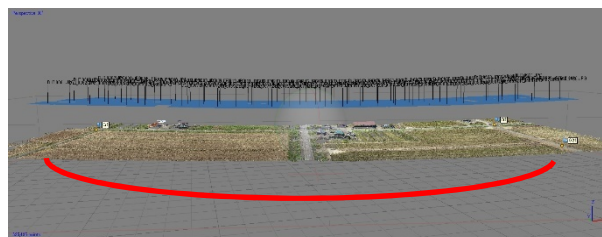


図 6 歪み事例 セッション B-3

そこで、使用する GCP の数と地上座標精度の関係性を確認するため、A-3 セッション（RTK-ON、高度 70m）を抽出し、徐々に GCP を減らしながら、各検証点の Z 方向誤差を検証した。

GCP を 8 点～2 点まで減らし、それぞれの点群データから、使用していない GCP を検証点とし、重み付内挿法により各位置の Z 方向誤差量を算出した結果が以下の表 11 及び図 7 である。

表 11 GCP 数と Z 方向誤差

GCP 数	8点	5点	3点	2点
最大値(mm)	24	25	37	32
最小値(mm)	4	2	2	1
平均値(mm)	3	8	-10	-7
標準偏差(mm)	14	18	17	17



図 7

使用 GCP が 3 点以下の場合において、全体にマイナス方向へのオフセット傾向が見られるが、何れの場合も公共測量マニュアル案で定められている 50mm 以内の精度に収まっていることが確認された。また、中心部の GCP を使用せず、外周部のみの GCP を使用した場合（3 点～2 点）においても、モデル形状の歪みが生じていないことが確認された。

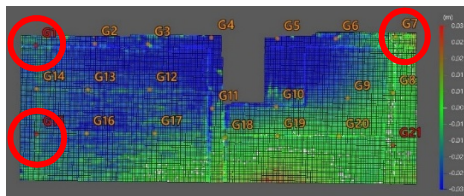


図 8 GCP 全使用時と 3 点使用時の差分評価

4.3. ラップ率減少試験

現行の「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」及び、「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）」では、オーバーラップ率 80%以上、サイドラップ率 60%以上を確保すると規定されている（図 9）。

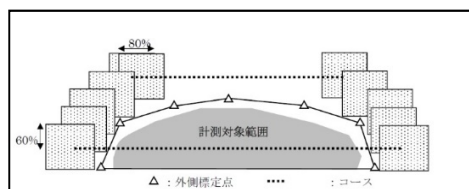


図 9 「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」第 57 条より

これは、SfM 処理における各画像間のマッチングポイント数を十分に確保することにより、精度の向上を目指すためのものであるが、過大なラップ率の設定は、画像枚数の増大を意味し、SfM 処理にかかる時間及び PC への負荷も同様に増大することとなる。

そこで、RTK 使用時における、ラップ率の軽減と全体の精度への影響を確認するため、4.2 の結果を踏まえ、GCP3 点使用時における、A-5 並びに A-6 セッションでの Z 方向誤差を検証したのが以下の表 12 である。

表 12 ラップ率 60%×50% GCP3 点使用

セッション番号	A-5	A-6
最大値(mm)	19	30
最小値(mm)	2	1
平均値(mm)	-1	8
標準偏差(mm)	12	14

いずれのセッションにおいても、モデル形状の歪みは殆ど認められず、高精度な結果が得られていることが判る。以上の結果から、ラップ率を減少した場合においても、全体の精度に顕著な影響が見られないことが確認された。

また、今回の実験では、撮影画像枚数を、ラップ率 90%×80%のセッションに対し、60%×50%のセッションでは、6 割～7 割減少させることが出来た（表 13）。各セッションにおけるの画像処理時間は、高ラップ率に対して低ラップ率では、およそ 80%～40%短縮することが確認された。

表 13 ラップ率と撮影枚数

ラップ率 (%)	
80×60	60×50
A-1 (550枚)	A-4 (179枚)
A-2 (233枚)	A-5 (89枚)
A-3 (135枚)	A-6 (52枚)

この結果は、処理時間の短縮や、ストレージの圧迫軽減につながる為、精度への悪影響が認められない限りにおいては、可能な限りラップ率を軽減するべきであると考えられる。

5. まとめ

5.1. GCP について

今回の研究結果では、P4R を使用することにより、GCP の設置数、点間距離に依存しない高精度な結果を得ることが出来た。ただし、Z 方向のオフセット量を正確に設定するためにも、最低でも 2 点以上の GCP は必要であると考ええる。

5.2. ラップ率について

オーバーラップ率 60%、サイドラップ率 50%という低ラップ率で計測を行ったが、計測精度への悪影響は特に認められなかった。

しかし、ラップ率の設定には、もう一つ、オクルージョン（隠蔽部）を可能な限り少なくすることにより、垂直構造物のモデル欠損を防ぐことや、オルソ画像の品質担保という役割もある。今回の試験結果においても、建物形状に一部欠損がみられ、オルソモザイクを生成した際に、顕著な歪みが認められたが、評価対象である平面部及び盛土の形状復元には影響が見られなかった。したがって、計測対象物の形状や、計測目的に応じて、ラップ率の設定を変更することが望ましいと言える。

6. 今後に向けて

本研究では、平坦な圃場地帯での実験を行ったが、今後は、起伏の多い地形や、構造物の多い道路工事現場等においても同様の検証を行う必要がある。

また、今回は、カメラレンズの歪み率補正を、Align 処理（カメラ位置計算）時に自動的にソフトウェア上で行う、セルフ・キャリブレーションによって行ったが、事前に試験場で計測された、正確な歪みパラメータを用いたプレ・キャリブレーションを行うことにより、更なる精度向上が期待される。

今後の本格運用時においては、今回行った VRS 方式以外にも、固定局を使用したローカル RTK や、後処理キネマティック方式等（PPK）、計測手法も選択肢が増える為、いち早く各種現場における、最適な設定及び処理手法の確立を目指したい。

参考文献

- 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） 2017
- 国土交通省：空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（案） 2018