

図-5 UAV レーザ計測による 3D 点群モデル

点群の精度検証として、UAV 写真の精度検証でも用いた標定点(VRS 計測を行ったもの)での高さ評価を行った。点群のバラツキを考慮し、標定点の座標付近の点群を半径 10cm の範囲において高さ方向で平均を取り、標定点自体の高さと比較した。その結果、表-2 に示すとおり平均値において 4.6cm の差がみられた。計測日時など条件が異なることもあり、これをオフセット値として考慮すると約 1cm の精度であることが確認できる。

(5) UAV 写真による計測結果について

図化手順は以下の通り。

- ①計測する範囲より、機材・飛行コース・高度・航行速度・焦点距離・シャッター間隔等を決定する。
- ②カメラ位置の算出のため標定点を設置、同時に検証の為に標定点の VRS 計測を行う。
- ③設定したコースで撮影を行う。
- ④標定点から 2 枚の画像のそれぞれのカメラ中心位置を算出し、2 枚の画像点をマッチングさせることにより図

表-2 VRS 計測とレーザ計測 標定点の高度比較

No.	検証点			レーザ高さ		差分 (H'-H)[m]	オフセットを考慮した差 [(H'-H)-Δ [m]]
	x[m]	y[m]	H[m]	H'[m]			
1	-188856.041	-78002.559	57.240	57.208	-0.032	0.014	
2	-188877.920	-78011.588	57.966	57.893	-0.073	0.027	
3	-188897.759	-78020.397	58.619	58.588	-0.031	0.015	
4	-188916.234	-78028.711	59.231	59.183	-0.048	0.002	
5	-188934.281	-78038.435	60.010	59.940	-0.070	0.024	
6	-188951.745	-78048.111	61.507	61.481	-0.026	0.020	
7	-188927.608	-78097.402	52.010	51.964	-0.046	0.000	
8	-188900.371	-78083.993	51.734	51.684	-0.050	0.004	
9	-188875.410	-78071.112	51.699	51.656	-0.043	0.003	
10	-188849.758	-78057.926	51.492	51.459	-0.033	0.013	
11	-188826.045	-78043.820	51.194	51.151	-0.043	0.003	
12	-188820.136	-78058.462	51.194	51.139	-0.055	0.009	
13	-188847.748	-78073.799	51.068	51.024	-0.044	0.002	
14	-188865.192	-78082.880	51.128	51.092	-0.036	0.010	
15	-188883.703	-78091.224	51.553	51.504	-0.049	0.003	
16	-188897.058	-78097.808	51.842	51.832	-0.010	0.036	
17	-188910.584	-78105.312	51.817	51.783	-0.034	0.012	
18	-188924.715	-78112.021	52.016	51.955	-0.061	0.015	
7a	-188927.604	-78097.394	52.060	51.966	-0.094	0.048	
平均			53.967	53.921	-0.046	0.013	

化対象物の座標を確定。線と点を順次作成する。今回は空中三角測量用ソフト「Summit Evolution」を利用した。図-6 に図化した成果を示す。

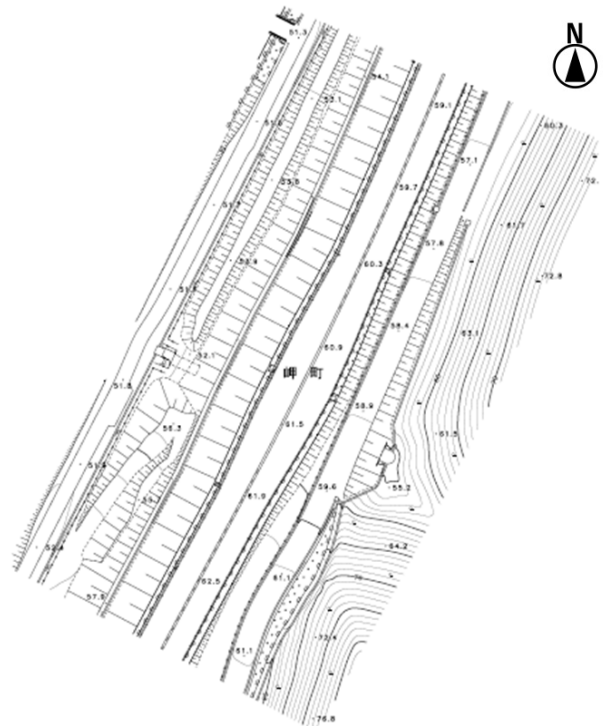


図-6 UAV 写真測量による図化成果

⑤精度検証のため、図化成果から、再度標定点の座標を求める。求めた座標と VRS 計測による座標のずれが図化精度となる。表-3 の通り、図化精度は水平方向 1.6 cm 程度、高さ方向 1.8 cm 程度であることが確認された。

また、低高度・低速度で飛行できることから、SFM (Structure From Motion) を用いることで、航空写真測量で作成する場合と比べて高精度の 3D 点群を生成することができる。この成果については後述とする。

表-3 VRS 計測と UAV 写真測量の図化での標定点座標値の比較

検証点観測記録簿												
使用機材	Summit Evolution		カメラ名	SONY-A7RM2-20MCP		シリアルナンバー						
基点座標	20.9020	mm	カメラの回転	Prinicipal Point		X=	-0.0835	mm	Y=	0.0765	mm	
撮影間隔	1/500	mm	画像サイズ	幅 33.7940	mm	高さ	23.8960	mm	図化機による高さ調整	調整する	調整しない	
	1		2		3		4		5		6	
	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H
座標	-78002.559	-188856.041	57.240	-78011.588	-188877.920	57.966	-78020.397	-188897.759	58.619	-78028.711	-188916.234	59.231
観測値	-78002.576	-188856.062	57.258	-78011.608	-188877.945	58.000	-78020.376	-188897.738	58.635	-78028.726	-188916.261	59.267
観差	0.017	-0.020	0.018	0.012	-0.020	-0.028	-0.021	0.029	-0.026	0.008	0.027	-0.036
	7		8		9		10		11		12	
	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H
座標	-78038.435	-188934.281	60.010	-78048.111	-188951.745	61.507	-78057.402	-188927.608	52.010	-78083.993	-188900.371	51.734
観測値	-78038.445	-188934.310	60.023	-78048.095	-188951.766	61.519	-78057.392	-188927.633	52.028	-78083.960	-188900.375	51.769
観差	0.010	0.029	-0.015	-0.016	0.021	-0.009	-0.010	0.027	-0.018	-0.013	0.007	-0.036
	13		14		15		16		17		18	
	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H
座標	-78071.112	-188975.410	51.699	-78073.799	-188949.778	51.492	-78083.820	-188926.045	51.194	-78097.808	-188900.371	51.734
観測値	-78071.105	-188975.411	51.688	-78073.834	-188949.778	51.504	-78083.828	-188926.076	51.229	-78098.455	-188920.184	51.190
観差	-0.007	0.001	0.001	0.006	0.020	-0.012	0.008	0.031	-0.035	-0.007	0.028	-0.001
	19		20		21		22		23		24	
	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H
座標	-78073.799	-188949.778	51.492	-78083.820	-188926.045	51.194	-78097.808	-188900.371	51.734	-78105.312	-188924.715	52.016
観測値	-78073.824	-188949.792	51.502	-78083.808	-188926.068	51.140	-78097.822	-188900.384	51.584	-78105.322	-188924.740	52.016
観差	0.025	0.014	0.010	0.008	-0.024	-0.012	0.006	-0.009	-0.011	0.014	-0.015	-0.017
	25		26		27		28		29		30	
	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H
座標	-78105.312	-188910.584	51.817	-78112.021	-188924.715	52.016	-78097.394	-188927.604	52.060	-78097.394	-188927.604	52.060
観測値	-78105.349	-188910.586	51.799	-78112.045	-188924.713	52.025	-78097.398	-188927.628	52.051	-78097.398	-188927.628	52.051
観差	0.037	0.002	0.018	0.024	-0.002	-0.009	0.004	0.024	0.009	0.000	0.000	0.000
	平均		X	Y	H	標準偏差		X	Y	H	標準偏差	
	平均		53.967	53.921	-0.046	標準偏差		0.006	0.006	-0.013	標準偏差	
	最大		0.037	0.031	0.056	標準偏差		0.016	0.016	0.018	標準偏差	
	最小		-0.037	-0.031	-0.056	標準偏差		-0.016	-0.016	-0.018	標準偏差	

4. 各手法の精度比較

(1) UAV写真測量 と 航空写真測量(従来方式) の比較

比較する点を図-7 のとおりに選定し、それぞれ作成した図面から座標を求め、表-4 のとおり比較した。

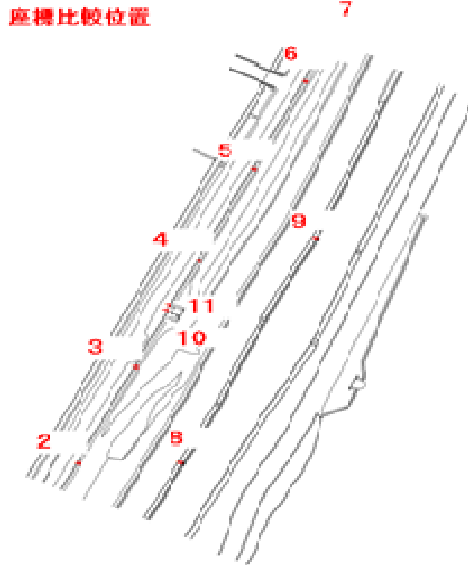


図-7 精度比較に用いた点

表-4 の比較結果より、UAV 写真測量の精度は、従来方式の航空写真測量と遜色のないものであることがわかる。

表-4 精度比較結果 (航空写真測量 vs UAV 写真測量)

No	比較点	航空写真測量図化(A)		UAV計測図化(B)		差分(A-B)			
		x(m)	y(m)	x(m)	y(m)	Δx(m)	Δy(m)	距離Δ(m)	
1	電柱1	-188979.903	-78115.921	-188979.808	-78115.985	-0.095	0.044	0.105	
2	電柱2	-188943.069	-78097.491	-188943.061	-78097.495	-0.008	0.004	0.009	
3	電柱3	-188912.588	-78081.710	-188912.490	-78081.751	-0.098	0.041	0.106	
4	電柱4	-188978.739	-78064.144	-188978.867	-78064.176	0.128	0.032	0.132	
5	電柱5	-188849.733	-78049.378	-188849.767	-78049.414	0.034	0.036	0.050	
6	電柱6	-188822.188	-78035.088	-188822.043	-78035.082	-0.145	0.004	0.145	
7	電柱7	-188790.928	-78026.881	-188790.989	-78026.927	0.061	0.046	0.076	
8	標高1	-188942.684	-78099.150	-188942.761	-78099.312	0.077	0.162	0.179	
9	標高2	-188971.750	-78092.746	-188971.808	-78092.590	0.058	-0.156	0.166	
10	側角点1	-188944.496	-78073.484	-188944.545	-78073.470	0.049	-0.014	0.051	
11	側角点2	-188982.877	-78072.735	-188982.917	-78072.690	-0.040	-0.055	0.082	
						平均値	0.000	0.013	0.100
						max	0.128	0.162	0.179
						min	-0.145	-0.156	0.009
						振れ幅	0.273	0.318	0.170

また、航空写真をもとにした図化成果(黒)と、UAV 写真をもとにした図化成果(緑)を重ねたものを図-8 に示す。

これより、図化作業者が異なることも関連し図には多少のズレがあるものの、UAV 写真による図化成果が従来方式による図化とほぼ一致することがわかる。

以上より、UAV 写真測量は航空写真測量を代替できる精度をもったものであるといえる。

(2) UAV レーザ計測 と 航空写真測量(従来方式) の比較

UAV レーザ計測による点群から生成した三次元モデルを図-9 に示す。この点群がもつのは X・Y・Z の座標値と輝度情報であり、実際の色は判別できない。そのため、点の特定には形状か輝度が明確に変化する箇所を使用する必要がある。よって、今回は電柱下部の座標を主に、標識、柵角の点を比較した。比較結果については表-5 にて示す。なお、比較に用いた点は(1)と同じである。

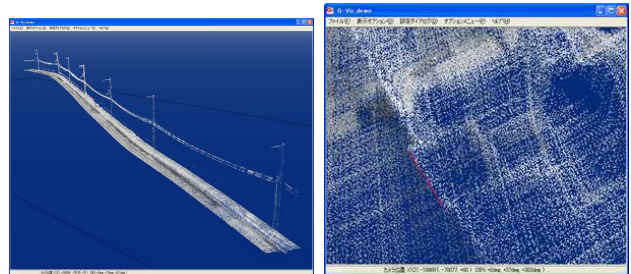


図-9 比較に用いた座標部分の 3D モデル (電柱および柵角)

表-5 精度比較結果 (航空写真測量 vs UAV レーザ計測)

No	比較点	航空写真測量図化(A)		UAV計測点群(C)		差分(A-C)			
		x(m)	y(m)	x(m)	y(m)	Δx(m)	Δy(m)	距離Δ(m)	
1	電柱1	-188979.903	-78115.921	-188979.702	-78115.929	-0.201	0.007	0.201	
2	電柱2	-188943.069	-78097.491	-188943.019	-78097.484	-0.050	-0.007	0.051	
3	電柱3	-188912.588	-78081.710	-188912.462	-78081.774	-0.126	0.064	0.141	
4	電柱4	-188978.739	-78064.144	-188978.753	-78064.217	0.014	0.073	0.074	
5	電柱5	-188849.733	-78049.378	-188849.627	-78049.490	-0.106	0.112	0.154	
6	電柱6	-188822.188	-78035.088	-188821.936	-78035.263	-0.252	0.175	0.307	
7	電柱7	-188790.928	-78026.881	-188790.858	-78027.127	-0.070	0.246	0.256	
8	標識1	-188942.684	-78099.150	-188943.080	-78099.590	0.396	0.440	0.592	
9	標識2	-188971.750	-78092.746	-188971.800	-78092.350	0.050	-0.396	0.424	
10	側角点1	-188944.496	-78073.484	-188944.420	-78073.480	-0.076	-0.004	0.076	
11	側角点2	-188982.877	-78072.735	-188982.730	-78072.700	-0.147	-0.035	0.151	
						平均値	-0.049	0.061	0.219
						max	0.396	0.440	0.592
						min	-0.252	-0.396	0.511
						振れ幅	0.648	0.836	0.541



図-8 航空写真による図化成果と UAV 写真による図化成果の重畳

(3) UAV 写真 と UAV レーザの点群による比較

UAV 写真測量から生成した点群と UAV レーザ計測で取得した点群を重ねて比較を行った。図-10 は UAV 写真測量により生成した点群 (白) と UAV レーザ計測により取得した点群 (赤) を重ねて 3D 表示したものである。赤と白が混ざり合い、大まかな形状としては特に乱れがなく、基本的な精度には大きな差がないことがわかる。

一方、図-11 は UAV 写真測量による点群と UAV レーザ計測で取得した点群の高さを比較した 3D モデルである。黄色の点が 10 cm 以内の差となった点、橙は UAV レーザのみで検出した点、青は UAV 写真測量のみで検出した点である。これによると、電柱や架空線といった突起物は UAV レーザが検出しており、写真測量による点群では容易に検出できていないことがわかる。一方、水面については写真測量でのみ検出できていることが確認できる。

また、点の高さの精度についてより正確に比較するため、断面で切断した点群を真横から見たものを図-12 および図-13 に示す。白が UAV 写真測量から生成した点群、赤が UAV レーザ計測による点群である。

図-12 では比較的平坦な箇所を比較している。ここでは、高さ方向に約 10 cm 程度の差が認められる。

図-13 では、水路のある部分の断面を比較している。UAV レーザ計測はほぼ正確に水路の形を反映しているのに対し、UAV 写真測量では水路の底部まで点が到達していない。これは、写真測量では植生表面の座標のみしか取得できないのに対し、レーザ計測では計測器の発するレーザが枝葉の間をすり抜けて地面へ届く場合があり、その際地面までの距離が正確に計測できるためである。

以上より、グランドレベル (地面そのものの高さ) を計測することについて、レーザ計測は写真に対して優位であるといえる。

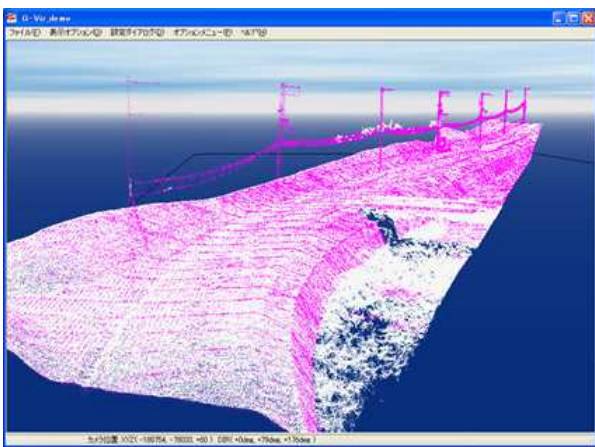


図-10 UAV 写真の点群と UAV レーザ計測点群の重畳

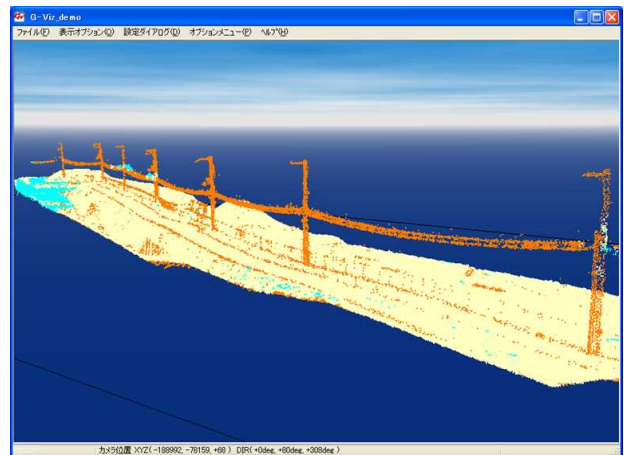


図-11 UAV 写真と UAV レーザ計測での点群の高さ比較

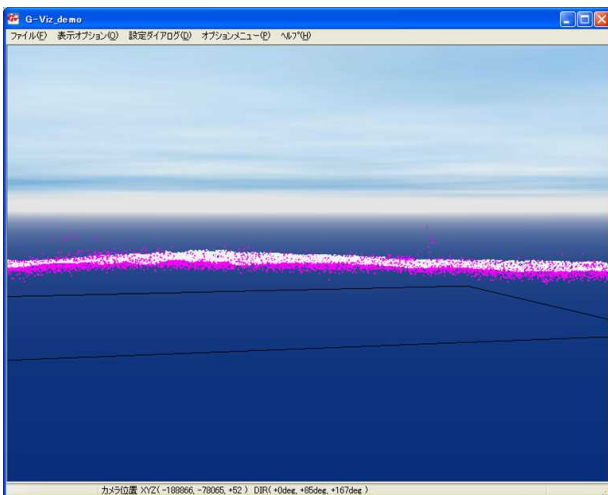


図-12 断面比較

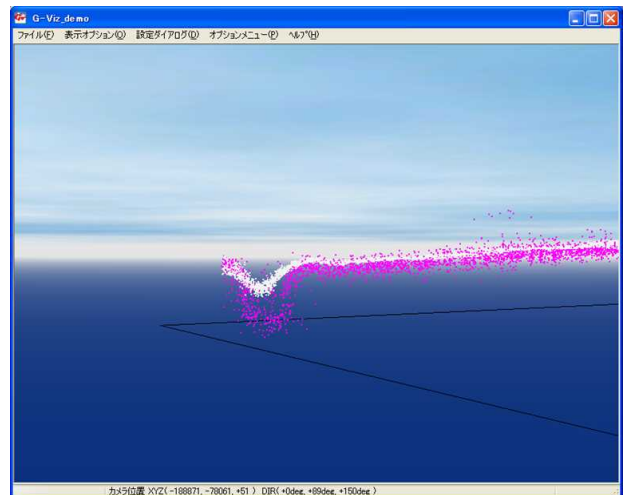


図-13 断面比較(水路部)

5. 考察

今回の検証から、道路台帳附図の作成について、下記の結果が得られた。

(1) UAV 写真を用いることについて

UAV 写真による測量は、道路台帳附図の作成において、十分な精度を備える。また、UAV 写真からも一定程度の精度をもつ点群が生成できる。ただし、電柱等の突起物・電線等の架空物・地表面の形状把握において UAV レーザが優位である。一方で、細かな物体の存否については写真が勝る。

(2) UAV レーザ計測について

レーザ計測で得られる点群は形状の計測において優位であり、これを上空から計測することから、UAV レーザ計測では路面や法面等の詳細な情報が得られる。これは、TS 等を用いた従来のレーザ計測の手法では得がたいものであり、管理上有用なものであるといえる。

ただし、その特性上、コントラストのハッキリした白線、柵や電柱等の突起物は判別できるものの、細かな物体の判別は難しいことが確認された。このため、UAV レーザ計測単体で道路台帳附図を作成することは困難であると言わざるを得ない。

(3) UAV 測量全体について、航空測量等との比較

航空機は一度に測量できる範囲では勝るものの、航空機自体や専用の撮影機器に加えて操縦士や撮影技術者といった、専門性が強くコストのかかる機材および専門職の人員が多く必要となる。

一方、UAV測量はバッテリー容量の制限から一度に測量できる範囲に限られるものの、機材は大幅に安価であり、航空測量と比べて実行のハードルが大幅に低いといえる。

また、航空機による測量は規模が大きく高度が高いことから、天候次第で実行を見送る必要がある場合もある。一方でUAV測量は短時間で完了し、必要なコストも低い。このため例えば、現地で天候を見ながら待機しておき、タイミングを見て実行するといったような、機動的な対応も可能となる。

このことから、今回検証した範囲での図化であれば、UAV測量が適した手法であることがわかる。

(4) 最後に

UAV 測量の技術は日進月歩の発展を見せており、今後、技術革新やコストの低減などによって、更に有用性が増すものと見られる。

例えば、今回は UAV レーザ計測と UAV 写真撮影を別で行ったが、レーザ計測と写真撮影を同時に行える機材も開発されている。これは本検証実施時には存在しなかったものであり、発展の速度を示すといえる。

また、現在の技術では、航空写真測量と UAV 写真測量のどちらであっても図化の工程に際しては技能者による作業が必要となる。現状では、自動図化技術は道路台帳附図に要求されるレベルには達していない。しかし今後、AI を含む ICT 技術の発展によって、図化の工程についてもより効率化・省力化を実現できると思われるところであり、今後の発展に期待したい。

今回の検証が、今後の道路管理におけるICT活用推進の一助となれば幸いである。

なお、本稿は従前の所属である近畿地方整備局浪速国道事務所工務課での所掌内容である。

謝辞：本発表に際して多大なるご協力を頂いた、一般社団法人 近畿建設協会のみなさまをはじめとし、関係各所の皆様に感謝の意を述べさせていただきます。

参考文献

1) 国土地理院：UAV を用いた公共測量マニュアル(案)