

航空機搭載型レーザースキャナーの精度検証手法に関する研究

株式会社パスコ

GIS 総合研究所 笹川 正、橋 菊生、福澤 由美子、岡川 正臣

画像計測部 宮作 尚宏

1. はじめに

本業務は航空レーザ測量によるデータの取得に際して、GPS 基線長、植生の有無、地形などの外部要因と DEM 精度の関係を評価することを目的として実施されたものである。評価に際しては、複数のGPS基準点を用いたGPS基線長とDSM精度の関係の評価、DTM間隔と標高単点密度の違いによるDTM精度の違いの評価、土地被覆の状態による評価を行うこととし、航空機レーザによる標高データを地上レーザの標高データと比較する実証実験を行うこととした。以下に検証実験の概要と結果を報告する。

2. 実験データ

(1) 航空機レーザ

1) データ取得範囲

対象地区における実証実験を下記の範囲で実施した。

(図 1-1 参照)

実施年月日：2002 年 2 月 8 日

対象地域：岐阜県大垣市 山間部および市街地 2 地区
(各 1km×2km)

使用機器：航空機レーザ測量システム RAMS
(EnerQuest 社)

使用航空機：CESSNA 208 JA888P

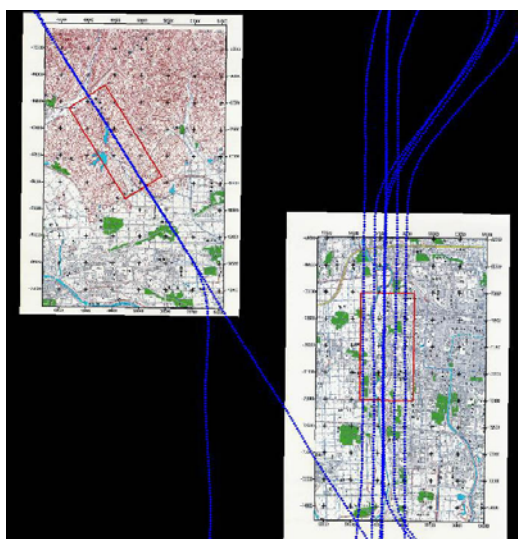


図 1. 対象地域2地区(赤枠)と撮影コース(青点線)

表 1. データ取得緒元

	山間部	市街地	備考
高高度			
対地高度	6000ft(1800m)	6000ft(1800m)	
コース数	1	1	対向飛行実施
スキャン回数	15kHz	15kHz	
レーザ走査角度	35度	35度	
レーザビーム幅	0.47m	0.47m	
データ取得幅	1117m	1117m	
飛行方向最長点間隔	4.0m	4.0m	単一飛行時
飛行直角方向最長点間隔	3.3m	3.3m	単一飛行時
低高度			
対地高度		3500ft(1050m)	
コース数		5	一部対向飛行
コース間隔		223m	60%サイドラップ
スキャン回数		15kHz	
レーザ走査角度		30度	
レーザビーム幅		0.28m	
データ取得幅		559m	
飛行方向最長点間隔		3.8m	単一飛行時
飛行直角方向最長点間隔		1.8m	単一飛行時

なお、固定翼に対する標高単点の密度の目安である 2~3 m間隔をみたすため、高高度では対向飛行、低高度では 60%サイドラップの飛行によりデータ取得を行い、全域が 2 重取得となるよう計画した。

GPS/IMU データは離陸 10 分前から着陸 10 分後まで連続取得を行った。航空機の GPS は 2Hz、IMU は 200Hz でデータ取得を行っている。

2) GPS 固定局 (基準局)

データ解析に使用する基準局として、下記の通り 12 点の電子基準点のデータの供与を受けた。

表 2. 電子基準点

点番号	点名	所在地	基地局からの距離	対象地までの距離
950288	本巢	岐阜県 本巢町	33	17
950299	甚目寺	愛知県 甚目寺町	11	28
950318	マキノ	滋賀県 マキノ町	82	51
950323	水口	滋賀県 水口町	77	59
950287	加茂白川	岐阜県 白川町	45	60
950282	白鳥	岐阜県 白鳥町	68	62
950303	額田	愛知県 額田町	51	80
950259	越前	福井県 越前町	110	86
950307	渥美	愛知県 渥美町	74	94
950364	室生	奈良県 室生村	110	102
950276	飯田	長野県 飯田市	87	112
950336	大阪	大阪府 大阪市	143	124

なお、表中の基地局からの距離は、各電子基準点から名古屋空港までの概算距離、対象地までの距離はデータを取得した地域までの概算距離を意味する。

3) GPS/IMU データの解析

GPS/IMU データの解析は APPLANIX 社の POSPAC を使用した。POSPAC は GPS 解析を行う POSGPS、IMU データを用いて最適飛行航跡を推定する POSPROC 等のモジュールで構成される。POSGPS の処理では通常 WGS84 系が用いられる。このため電子基準点の ITRF 直交座標を国土地理院の WEB に掲載されている 7 パラメータを用いて WGS84 の緯度、経度、楕円体高に変換し与点座標とした。(本検証は測地成果 2000 導入前に実施された。)

解析は 12 点の電子基準点を用いて、各々のケースで最良の結果を得られるように、仰角マスクや位相波の標準偏差、使用衛星の取捨選択等各種パラメータを設定して計算を実施した。なお、離陸前、着陸後の 10 分間は静止状態でデータ取得を行っていることから、この部分ではスタティックモードを用いて解を求めた。今回の例では、全てフィックス解もしくは安定したフロート解が得られている。

上記の GPS の解析結果と IMU のデータの合成解析を行った後、対象地域での位置・姿勢情報を比較検証するため、2.5 秒間隔の外部標定要素を算出した。比較用の外部標定要素は、WGS84 座標系から GRS80-ITRF94 系の 7 系の位置に投影変換したもので、高さは標高ではなく、楕円体高を使用している。算出した点は 324 点である。

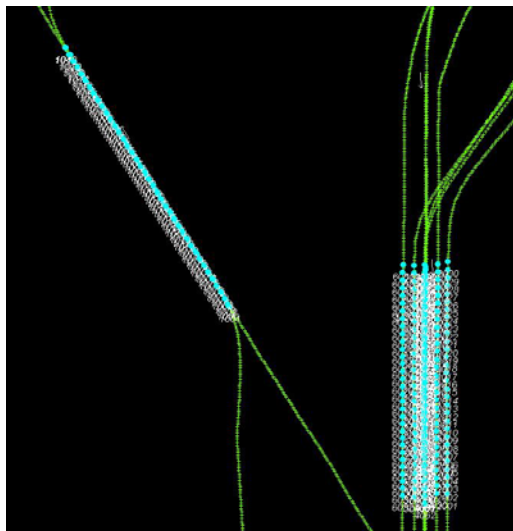


図 2. 2.5 秒毎の外部標定要素算出位置(水色の点)

4) GPS 基線長の影響の評価

GPS 基線長の影響の評価を行うため、対象地域に最も近い電子基準点、本巢を用いて解析した結果を正として、各仮想撮影主点における主点位置および回転角の較差の平均二乗誤差 (以下 RMS と表記) および最大値をまとめたものが次表 3 および 4 である。

表 3. 位置の較差の RMS および最大値(単位:m)

RMS	基地局か	対象地ま	RMS X	RMS Y	RMS EH	MAX dX	MAX DY	MAX dEH
基目寺	11	28	0.10	0.01	0.03	-0.11	0.02	-0.05
マキノ	82	51	0.08	0.08	0.10	0.15	0.11	-0.13
水口	77	59	0.05	0.06	0.04	0.09	0.08	-0.07
白川	45	60	0.19	0.04	0.09	-0.20	-0.08	0.12
白鳥	68	62	0.12	0.03	0.04	-0.14	-0.05	0.07
額田	51	80	0.22	0.04	0.07	-0.25	-0.08	-0.12
越前	110	86	0.03	0.02	0.06	0.04	-0.04	0.12
渥美	74	94	0.14	0.04	0.05	-0.16	-0.09	-0.09
室生	110	102	0.07	0.06	0.06	0.13	0.09	-0.10
飯田	87	112	0.29	0.05	0.03	-0.36	-0.10	0.06
大阪	143	124	0.03	0.03	0.15	-0.07	-0.06	0.22

表 4. 回転角の較差の RMS および最大値(単位:度)

最大較差	基地局か	対象地ま	RMS ω	RMS ϕ	RMS κ	MAX d ω	MAX d ϕ	MAX d κ
基目寺	11	28	0.0001	0.0001	0.0008	-0.0003	0.0002	0.0016
マキノ	82	51	0.0001	0.0001	0.0006	-0.0003	-0.0001	0.0013
水口	77	59	0.0001	0.0001	0.0007	0.0002	0.0002	0.0016
白川	45	60	0.0001	0.0001	0.0014	0.0003	0.0003	0.0031
白鳥	68	62	0.0001	0.0001	0.0008	-0.0003	0.0002	0.0015
額田	51	80	0.0001	0.0001	0.0007	0.0002	0.0002	0.0014
越前	110	86	0.0002	0.0001	0.0012	-0.0004	-0.0003	0.0021
渥美	74	94	0.0001	0.0001	0.0007	0.0002	-0.0002	0.0019
室生	110	102	0.0001	0.0001	0.0005	-0.0002	0.0002	0.0014
飯田	87	112	0.0001	0.0001	0.0006	-0.0002	0.0003	0.0014
大阪	143	124	0.0001	0.0001	0.0015	0.0006	0.0004	0.0026

この結果より、位置の較差については、RMS 値はすべて 30cm 以内に収まっている。また、一概に距離が離れることにより較差が増大するという結果とはなっていない。100km 程度の基線長でも、十分精度が得られる場合もあり、近い場合でも、条件次第では精度は劣化することが考えられる。これに関しては、むしろ衛星の配置状況や観測データの良否、解析時の各種パラメータの設定等の影響が大きいと考えられる。角度データに関しては、較差の最大値を見ても、オメガとファイで 0.001 度以下、カッパーで 0.003 度程度である。このオメガとファイの較差は 1800m の飛行高度で換算して、地上 3cm に相当し、カッパーの影響はレーザー走査角 35 度の場合、スキャンラインの端部で 3cm 程度に相当する。このことから、角度誤差に起因する測定誤差はきわめて小さい事がわかる。なお、本システムで使用している GPS/IMU 装置のカatalogスペックでは、後処理後の位置精度を 5~30cm、角度に関してはロール、ピッチが 0.005 度、ヘディングが 0.008 度としており、今回の結果は相対的な比較ではあるが、この条件をほぼ満たしていると考えられる。

各標高点は、この位置、姿勢情報とレーザーによる測距データを用いて算出される。このため、各計算結果による標高点の位置精度は、おおむねこの仮想主点精度と同等と判断されるため、個別の標高計算は実施しなかった。

(2) 地上レーザー

地上レーザーデータは国土地理院より提供された。山間部、市街地に対して計測された地上データは13ファイルある。このうち山間部では2カ所、市街地では3カ所について計測されている。ただし、同地域で複数計測されたデータで、著しく高さの差がみられるものもあり、これらは比較対象から除外した。(Gaki01-4.shp:他の3つと6~7m相違) また、データが2つしかない場合(Gaki06-1とGaki06-5)は、どちらが正しいのか不明なので、航空機レーザーから取得された標高と比較した後、極端に相違がみられる方を除外した。

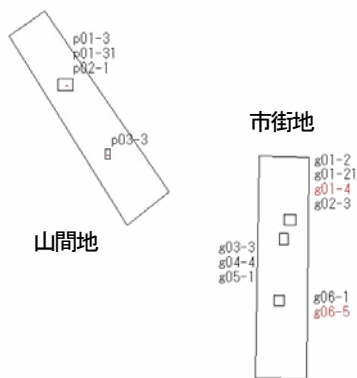


図3. 地上レーザーの計測位置

解析のエリアを以下にグループ分けした。

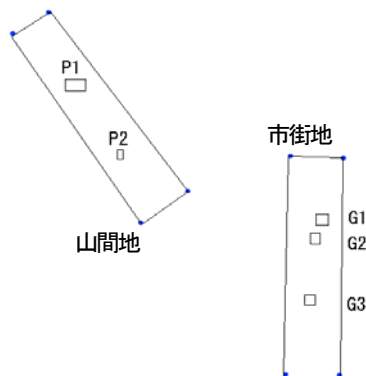


図4. 地上レーザーの計測グループ

3. 地上レーザーと航空機レーザーの密度比較

航空機レーザーの計測点密度は、スキャンレートを変えることにより可変である。本データでは高高度時には飛行方向最長間隔は4m、飛行直角方向最長間隔は3.3m、低高度時には各3.8mと1.8mである。一方、地上レーザーでは計測地点から障害物さえなければ、スキャン間隔は近い点で水平回転方向数cm程度、100m先においても30cm程度である。前者が広域の正確な標高データを計測するこ

とを目的としているのに対し、後者は高密なデータにより対象物の形状等を正確に計測することを目的としている。従って双方のデータを相互補完するかたちで組み合わせるのが有効であると考えられる。

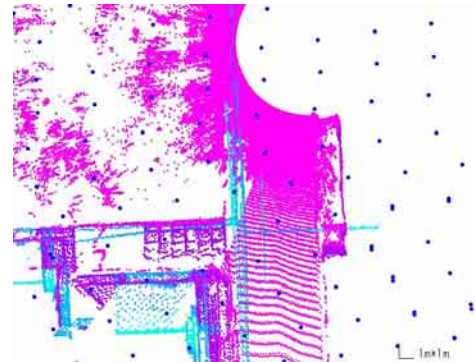


図5. 地上レーザーと航空機レーザー(高高度)

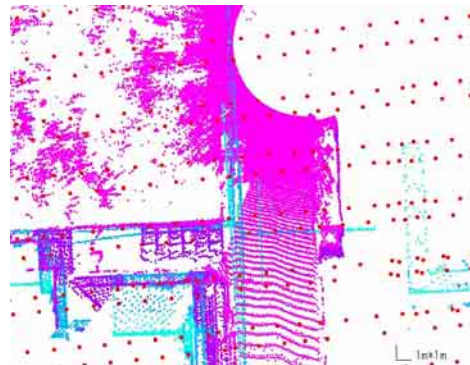


図6. 地上レーザーと航空機レーザー(低高度)

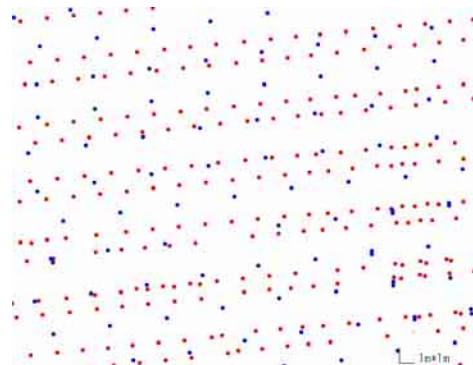


図7. 航空機レーザー(青:高高度と赤:低高度)

4. 航空機レーザーの相対的精度の確認

航空機レーザーの相対的精度の確認を行うため、対象領域に対して対向コースでの計測を行い比較した。また、高度を変えて計測したデータについても同様の比較を実施した。

航空機レーザーのデータは数m間隔のランダムポイントであるため、点同士の比較はできない。このため、地上レーザーで計測された地域(または近い場所)の500m²程度の平坦な範囲を選択し、それぞれの領域に対して平均

標高と標準偏差を求め比較した。データの取得位置は、高高度データは、すべてコースの中央付近のデータを抽出して比較を行ったが、低高度の 111005 : G2,G3 エリアと 112459 : G1、113005 : G3 では、コースの端部分となっている。サンプル数は100~300点程度である。なお、必ずしも全てのコースがオーバーラップしている訳ではないので、欠損地域も存在する。

表 5. 航空機レーザーの撮影条件による精度(単位:m)

市街地		高高度		飛行方向は 青:北向き、緑:南向き
		【105049】	【105614】	
G1	平均標高	7.57	7.56	
	標準偏差	0.06	0.04	
G2	平均標高	7.92	7.93	
	標準偏差	0.05	0.04	
G3	平均標高	6.81	6.83	
	標準偏差	0.05	0.05	

市街地		低高度				
		【111005】	【111457】	【112001】	【112459】	【113005】
G1	平均標高	7.66	7.68	7.68	7.69	-
	標準偏差	0.07	0.06	0.06	0.09	-
G2	平均標高	8.03	8.05	8.01	8.06	-
	標準偏差	0.07	0.08	0.06	0.09	-
G3	平均標高	6.89	6.91	6.85	6.84	6.90
	標準偏差	0.09	0.05	0.06	0.05	0.06

山間地		【103852】	【104411】
		P1	平均標高 113.21
P2	平均標高	28.46	28.41
	標準偏差	0.04	0.04

表 5.の結果から、各対向コースの組では平均標高の差が最大でも 6.8cm である。また同高度では 0.6~6.8cm 以内で収まっており、全データを比較しても 10~14.4cm の差となっている。これにより反復性と安定性が確認できた。また、写真測量とは異なり、高度の影響も事実上ないことも確認できた。

5. 地上レーザーと航空機レーザーの精度確認

国土地理院より供与された地上レーザーデータを用いて、絶対的な標高精度の確認を行うこととした。供与された地上レーザーデータには、建物の壁面や電線等の航空機レーザーでは通常取得されない対象物が多く含まれている。双方のデータを比較するためには、共通の対象を捉えた点を比較する必要がある。このため各地域で平坦な場所のみ選択 (図 4. 参照) し、航空機レーザーで取得されたデータを TIN データに変換し、地上レーザーとの比較を行うこととした。(G2は3つの地上レーザーがオーバーラップする箇所がなく、さらに2つの地域に分けた)。比較の結果が表 6. である。表中には地上レーザーの平均標高およびその標準偏差と、航空機レーザーデータにより作成された TIN に対する地上レーザー点の平均標高較差と較差の標準偏差、RMS を示した。

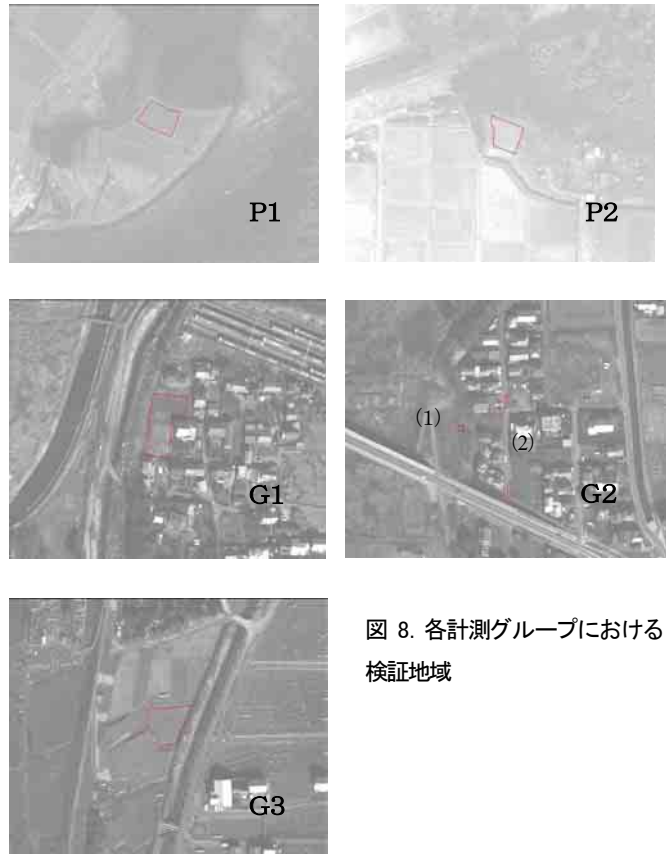


図 8. 各計測グループにおける検証地域

この結果から、航空機レーザーと地上レーザーの平均標高較差および RMS が 10~80cm であることがわかる。この較差は航空レーザーシステムの仕様からしても、きわめて大きい。しかしながら、標高値の較差の標準偏差はきわめて小さいこと、対向飛行の結果等から、何らかの定誤差が含まれていると推定される。

表 6. 航空機レーザーと地上レーザーの精度比較(単位:m)

		地上レーザー	高高度	
			【105049】	【105614】
市街地 G1	g01-2	平均較差	0.68	0.58
	平均標高	標準偏差	0.18	0.18
		RMS	0.71	0.61
		標準偏差	0.22	0.22
	g01-21	平均較差	0.67	0.57
	平均標高	分散	0.18	0.18
RMS		0.69	0.60	
標準偏差		0.22	0.22	
g02-3	平均較差	0.81	0.72	
	平均標高	標準偏差	0.14	0.14
		RMS	0.82	0.74
標準偏差		0.19	0.19	
市街地 G2(1)	g03-3	平均較差	0.38	0.43
	平均標高	標準偏差	0.16	0.16
		RMS	0.42	0.46
標準偏差		0.17	0.17	
市街地 G2(2)	g04-4	平均較差	0.21	0.23
	平均標高	標準偏差	0.08	0.05
		RMS	0.22	0.23
		標準偏差	0.02	0.02
	g05-1	平均較差	0.19	0.20
	平均標高	標準偏差	0.05	0.04
RMS		0.20	0.21	
標準偏差		0.02	0.02	
市街地 G3	g06-1	平均較差	0.20	0.23
	平均標高	標準偏差	0.05	0.05
		RMS	0.21	0.24
標準偏差		0.05	0.05	

	低高度					
	【110506】	【111005】	【111457】	【112001】	【112459】	【113005】
平均較差	0.35	0.45	0.48	0.47	-	-
標準偏差	0.18	0.18	0.18	0.19	-	-
RMS	0.40	0.49	0.51	0.51	-	-
平均較差	0.34	0.44	0.46	0.46	-	-
標準偏差	0.18	0.18	0.18	0.18	-	-
RMS	0.39	0.48	0.50	0.50	-	-
平均較差	0.55	0.62	0.62	0.60	-	-
標準偏差	0.15	0.14	0.14	0.15	-	-
RMS	0.57	0.63	0.64	0.62	-	-
平均較差	-	0.26	0.23	0.26	0.33	-
標準偏差	-	0.16	0.16	0.16	0.16	-
RMS	-	0.30	0.28	0.31	0.37	-
平均較差	-	0.37	0.31	0.37	0.41	-
標準偏差	-	0.06	0.04	0.03	0.04	-
RMS	-	0.38	0.31	0.37	0.41	-
平均較差	-	0.30	0.24	0.31	0.36	-
標準偏差	-	0.05	0.07	0.07	0.03	-
RMS	-	0.30	0.25	0.32	0.37	-
平均較差	-	0.18	0.10	0.17	0.19	0.18
標準偏差	-	0.06	0.05	0.05	0.06	0.08
RMS	-	0.19	0.11	0.18	0.20	0.20

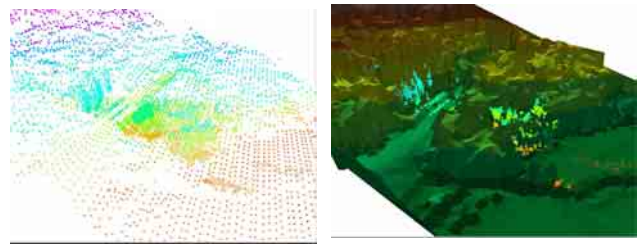


図9. 地上及び航空機レーザーの計測点(左)とTIN作成(右)

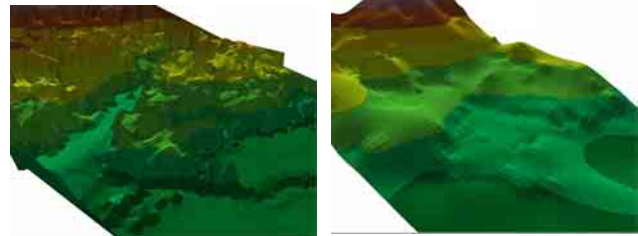


図10. 航空機レーザーの生データ(左)とフィルター後地表面(右)

		地上レーザー		【103852】	【104411】
山地域 P1	p01-3		平均較差	0.19	0.24
	平均標高	113.36	標準偏差	0.07	0.07
	標準偏差	0.00	RMS	0.20	0.25
	p01-31		平均較差	0.19	0.24
	平均標高	113.36	標準偏差	0.07	0.07
	標準偏差	0.00	RMS	0.20	0.25
	p02-1		平均較差	0.04	0.11
	平均標高	113.24	標準偏差	0.10	0.10
	標準偏差	0.01	RMS	0.11	0.15
山地域 P2	p03-3		平均較差	0.12	0.16
	平均標高	33.54	標準偏差	0.07	0.06
	標準偏差	0.00	RMS	0.14	0.17

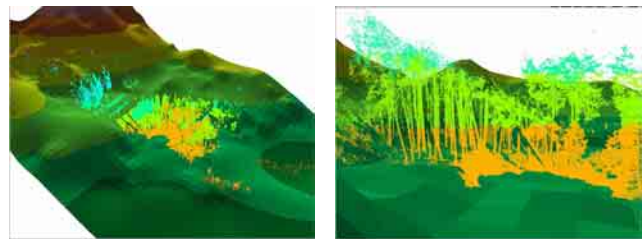


図11. 航空機レーザー地表面と地上レーザーの計測点

6. 密度の違いによる取得形状

(3) 山間部

地上レーザーでは、個々の樹木や地表面を計測する事が可能だが、取得点が非常に多いため、データの分類は難しい。一方、航空機レーザーには反射波の受信順番を表すリターン情報がある。リターン情報は、一度のレーザー照射対象域に標高差がある場合の反射波の到着時間の差に基づいて付与され、最初の反射波をファーストパルス、最後の反射波をラストパルスと呼んでいる。本システムでは5段階のリターン情報を取得する能力がある。山間部では樹冠部の反射波がファーストパルスで、理想的な状況では、ラストパルスが地表面の反射波となる。この情報を利用したフィルタリング処理を行うことにより、より正確な地表面を求めることができる。今回計測した山間部データにおいて、このリターン情報を利用したフィルタリング処理を行い、地表面を求め、地上レーザーとオーバーレイした。なお、使用したフィルタリングソフトウェアは自社開発のものである。

山間部では取得形状の定量的な検証は難しい。本件では得られているデータの視覚的な検証にとどまるが、フィルタリングした地形データは当該地区の地形形状を表現していると考えられる。

(2) 屋根の形状

市街地域において、建物の形状が航空機レーザーと地上レーザーでどの程度異なるか、比較を試みた。

地上レーザーでは対象物に対して横からの計測なので、建物の壁や窓の他、傾斜があれば屋根面を取得できる。これに対し航空機レーザーは上部からの計測なので、壁面は計測不可能である。ここでは、両者ともに計測可能な屋根面の計測点について注目し、形状の比較を行った。

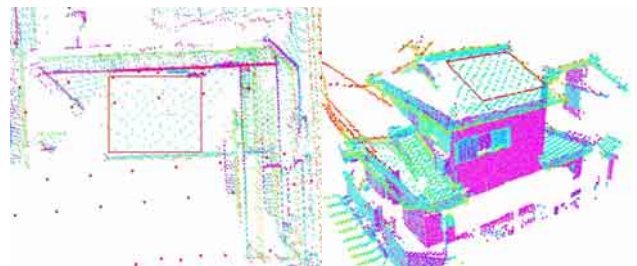


図12. 地上レーザーの対象屋根面2D(左)と3D(右)

図12. では、左の図で赤い点が航空機レーザーの計測

点である。対象の約 10 m²内では、低高度コースでも 3～4 点しか入らない。高高度では 1～2 点程度なので、標高値を比較する際には TIN を作成し、差分を算出した。このとき航空機レーザーは建物の上部データのみを利用するためにファーストパルスのみを計測点で TIN を作成し、比較をおこなった。サンプル点数は 134 点である。

表 7. 航空機レーザーと地上レーザーの屋根高さ(単位:m)

	地上 レーザー		高高度	
			【105049】	【105614】
平均標高	14.97	平均較差	0.39	0.34
標準偏差	0.30	標準偏差	0.19	0.15
RMS		RMS	0.42	0.36

	低高度			
	【111005】	【111457】	【112001】	【112459】
平均較差	0.23	0.16	0.24	0.44
標準偏差	0.01	0.02	0.01	0.01
RMS	0.25	0.20	0.25	0.43

固定翼搭載の航空機レーザーでは点間隔が大きいため、建物の屋根形状を詳細に再現することは難しい。ただし、取得された標高データの精度には問題はない。建物等、より詳細な形状を把握するためには、点密度を高める必要がある。しかしながらこれは、広域の正確な標高データを計測するという本システムの使用用途とも異なり、標高データで形状が識別できても、それを分類してベクトル化するためには、フィルタリング等の処理が必要である。さらに、構造物の形状を抽出することを主眼とする場合は、他の手法を選択することも可能である。

7. おわりに

本検証実験で、航空レーザーシステムが高い反復性を持つことが確認できた。これは、GPS と IMU の相互補完により、飛行期間中の位置精度が均一に保たれていることに起因すると考えられる。

GPS 地上基準局との距離は GPS の特性を考えれば、近い方が有利であることは明白である。しかしながら、GPS/IMU システムの精度に関しては、一概に地上基準局との距離に依存するものではないことが確認できた。現在は、スタティックイニシャライズ法に代わって上空で GPS/IMU システムをイニシャライズするインエアアライメントあるいはオンザフライアライメントといわれる手法が主流となっている。この手法によれば、GPS 地上基準点の設置に関する自由度が広がる。また、電子基準点の利用や複数局を用いた解法もあり、より精度の高い解を求めることが可能となる。

地上レーザーデータを用いた絶対的な位置精度検証の結果では、大きな較差が見られた。この結果についてはさ

らに詳細な検証が必要である。

航空機レーザーのデータは、最終的な目的に応じてさまざまなフィルタリング処理により加工される。最終的な成品の精度はむしろこの過程によって左右される。従って、精度評価を行う場合は、機器の性能評価部分と加工時の精度評価に分けて行う必要があると考えられる。前者は定量化が容易であるのに対し後者は非常に難しい。山間部の標高データの精度評価等は残された課題である。

機器の性能は日々向上しており、レーザー照射の周波数も向上している。従って取得密度を上げることも可能となる。密度が向上することにより、対象物の詳細な情報が得られる一方、フィルタリング処理に際してはこれがノイズとなることも事実である。目的に応じた最適データ取得設定が必要である。今後とも、航空レーザーデータを用いたフィルタリング技術とアプリケーションの開発に努めていきたい。

参考文献

岡川 正臣, Algorithm of multiple filter to extract DSM from LiDAR data, 写真測量学会平成 13 年度年次学術講演会発表論文

笹川 正, 橘 菊生, 直接定位と自動空三による大縮尺図化精度検証, 写真測量学会平成 13 年度年次学術講演会発表論文

笹川 正, 橘 菊生, 電子基準点データを用いた直接定位の精度検証, 写真測量学会平成 13 年度年次学術講演会発表論文

問い合わせ先

株式会社 パスコ

GIS 総合研究所

〒153-0043 東京都目黒区東山 1-1-2 東山ビル 2 階

TEL 03-3715-4011

Web <http://www.pasco.co.jp>