

# 地形測量の精度向上に資する 技術開発・検証結果

国土地理院  
令和元年 6 月

## ① UAVレーザ測量機器（レーザ測距装置、GNSS/IMU、UAV機体）

### 本検証結果の取扱いについて（留意事項）

本実証結果については、以下の点にご留意ください。

- 検証はできるだけ同じ条件下での実施となるよう配慮しましたが、屋外での作業のため、天候状況や風向き、GNSS配置状況等の諸条件が完全に同一だったわけではございません。また、各機器の性能・特性を考慮して、機器ごとに具体的な飛行計画（高度、ラップ率、速度等）は異なる結果となっています。
- 検証の公平性を期すため、実証フィールドに関する情報（具体的な場所、現地の地形形状、調整用基準点等の設置位置等）について、開発チームへの事前提供を制限しました。このため、平時の測量作業に比べると、事前の準備・計画を十分に行えなかった可能性があります。
- 今回の実証では、一度のフライトで精度と効率性（時間）の両方を検証しましたが、実際の現場では、作業目的によって精度と効率性（時間）の優先順位が異なることが想定されます（一般的に、精度と効率性（時間）はトレードオフの関係となる可能性が高いため）。たとえば、以下のようなことが想定されます。
  - 平時の測量作業において、精度を最優先で作業を行う（事前の準備をしっかり行い、十分な計測時間を確保する）
  - 災害時の現況把握において、効率性（時間）優先で作業を行う

このため、使用機器を選定する際には、その目的に応じて優先すべき性能をよく見極め、目的に合致する性能を有する機器を選定する必要があります。

# ① UAVレーザ測量機器（レーザ測距装置、GNSS/IMU、UAV機体）

## 募集テーマ

### □ 精度

- 3次元点群データの制限値±5cm以内の精度及び取得点密度100点/m<sup>2</sup>以上を確保するUAVレーザ測量機器であること。

### □ 効率性

- 平地で0.30km<sup>2</sup>の範囲の測量（現地到着～機器撤収までの作業。作業方法は「UAV搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル案」（平成30年3月国土地理院）に基づく。ただし、調整用基準点等の設置作業を除く。）を、制限値±5cm以内の精度及び取得点密度100点/m<sup>2</sup>以上で40分以内（初期化の時間も含む）で実施可能なUAVレーザ測量機器であること。
- UAVは自律航行ができること。

## ■ 開発チーム

- ① (株)アミューズワンセルフ／(株)パスコ
- ② テラドローン(株)

# ① UAVレーザー測量機器（レーザー測距装置、GNSS/IMU、UAV機体）

## □ 実証フィールド

### ①『裸地』

@国営ひたち海浜公園（茨城県ひたちなか市）



### ②『植生繁茂地』

@国営ひたち海浜公園（茨城県ひたちなか市）



### ③『傾斜地』

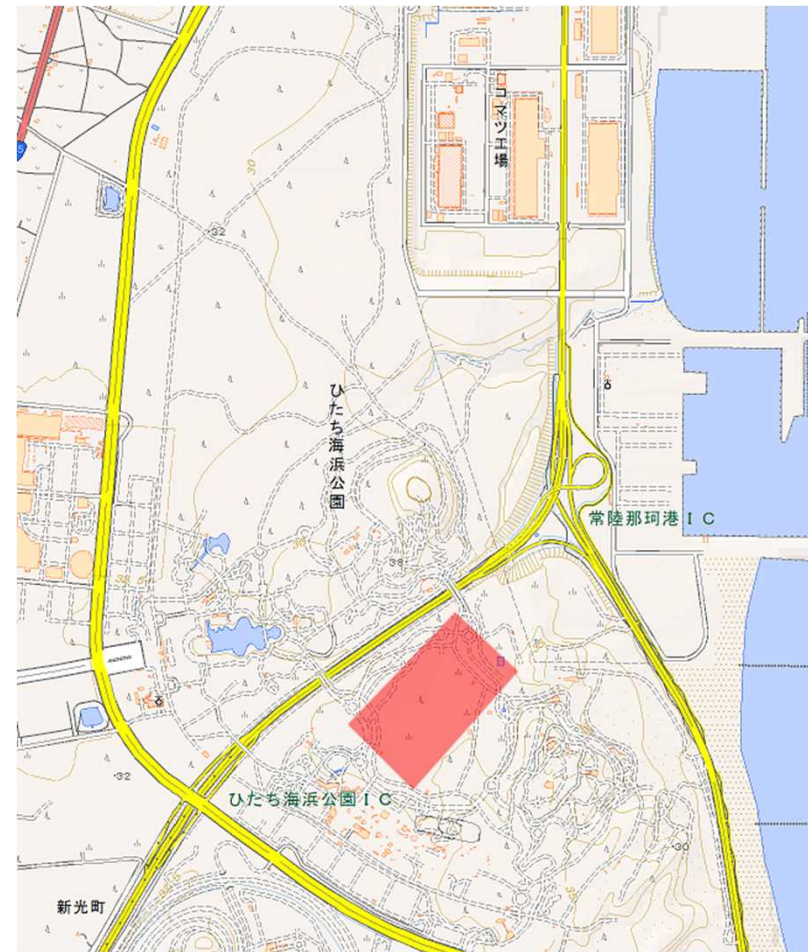
@塚田陶管株式会社（茨城県土浦市）





計測フィールド

①『裸地』

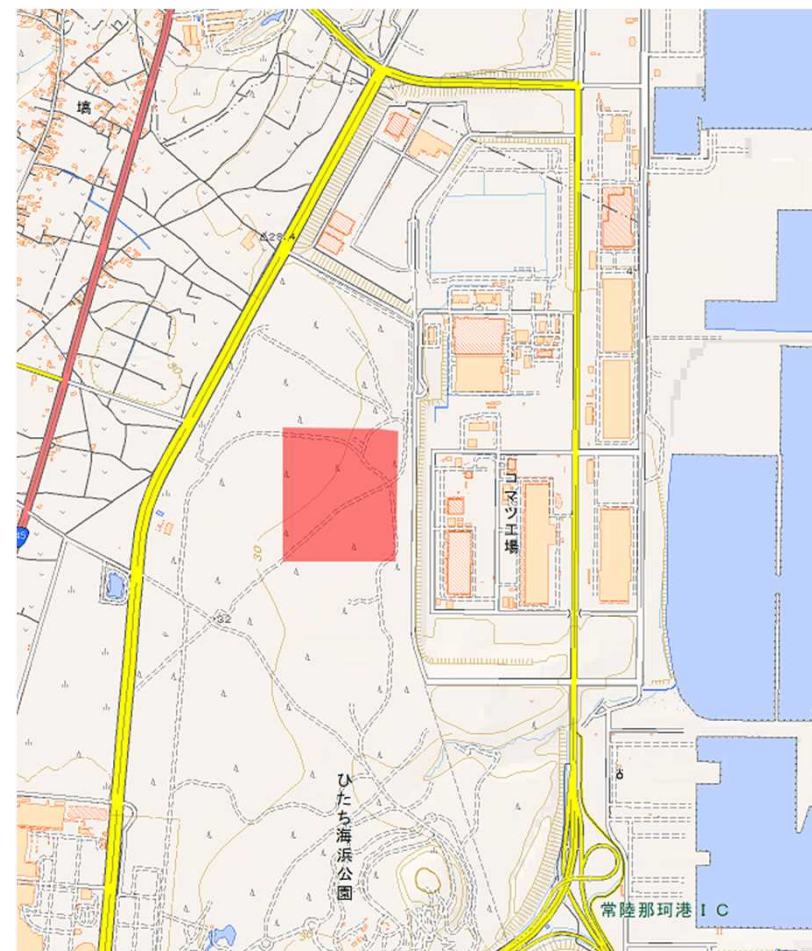




① UAVレーザ測量機器 (レーザ測距装置、GNSS/IMU、UAV機体)

計測フィールド

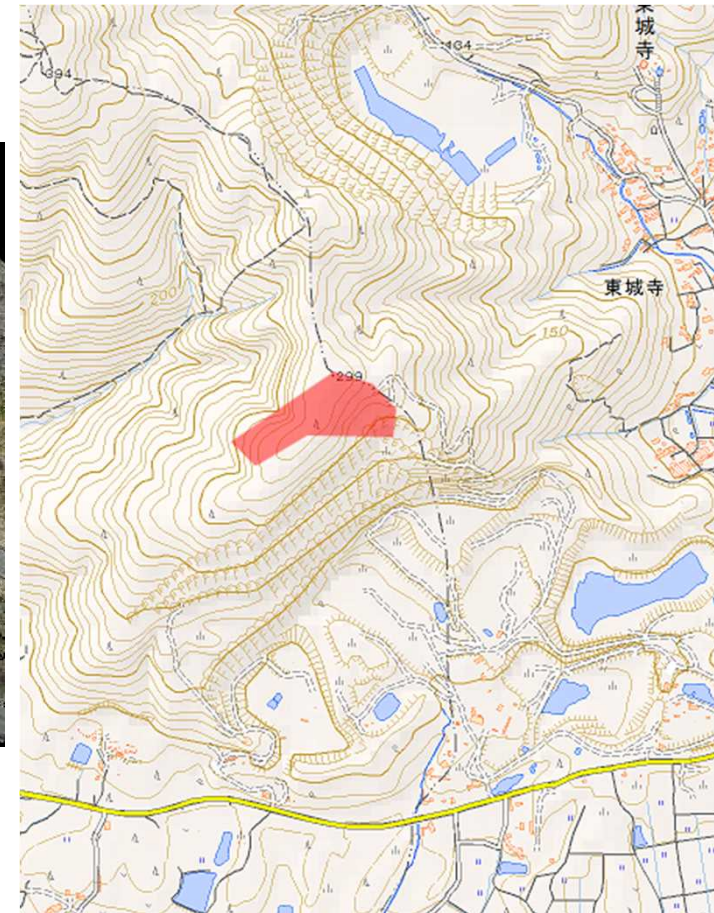
② 『植生繁茂地』









計測フィールド

③『傾斜地』



# ① UAVレーザ測量機器（レーザ測距装置、GNSS/IMU、UAV機体）

## □ 対象とした機器

UAVレーザ機器	概要	重量 (レーザスキャナ +GNSS/IMU)	価格 (税抜き)	外観
従来機器A	UAV : PRODRONE PD6-BL レーザスキャナ : RIEGL社製VUX-1 GNSS/IMU : Applanix AP20/IMU-42	4.43kg	¥46,450,000	
従来機器B	UAV : enRoute CH940 レーザスキャナ : Velodyne社製VLP-16 GNSS/IMU : Applanix APX-15(IMU内臓)	1.6kg	¥15,300,000	
<b>開発機器 TDOT</b>	<b>株式会社amuse oneself / 株式会社パスコ 開発</b> UAV : DJI社 Matrice600Pro レーザスキャナ : TDOT Plus GNSS/IMU : TDOT Plus(IMU内臓)	<b>1.8kg</b>	<b>¥19,800,000</b>	
<b>開発機器 Terra Lidar</b>	<b>Terra Drone株式会社 開発</b> UAV : DJI社 Matrice600Pro レーザスキャナ : Velodyne社製VLP-16 GNSS : UBLOX NEO-M8T( <b>IMU未使用</b> )	<b>3.8kg</b>	<b>¥6,500,000</b>	

※R1.7.1 「Terra Lidar」の重量を修正

「従来機器A」は、高性能・高価格なレーザスキャナを搭載した機器として、  
「従来機器B」は、比較的性能は劣るが低価格なレーザスキャナを搭載した機器として、選定



# ① UAVレーザー測量機器（レーザー測距装置、GNSS/IMU、UAV機体）

## 技術開発機器の検証

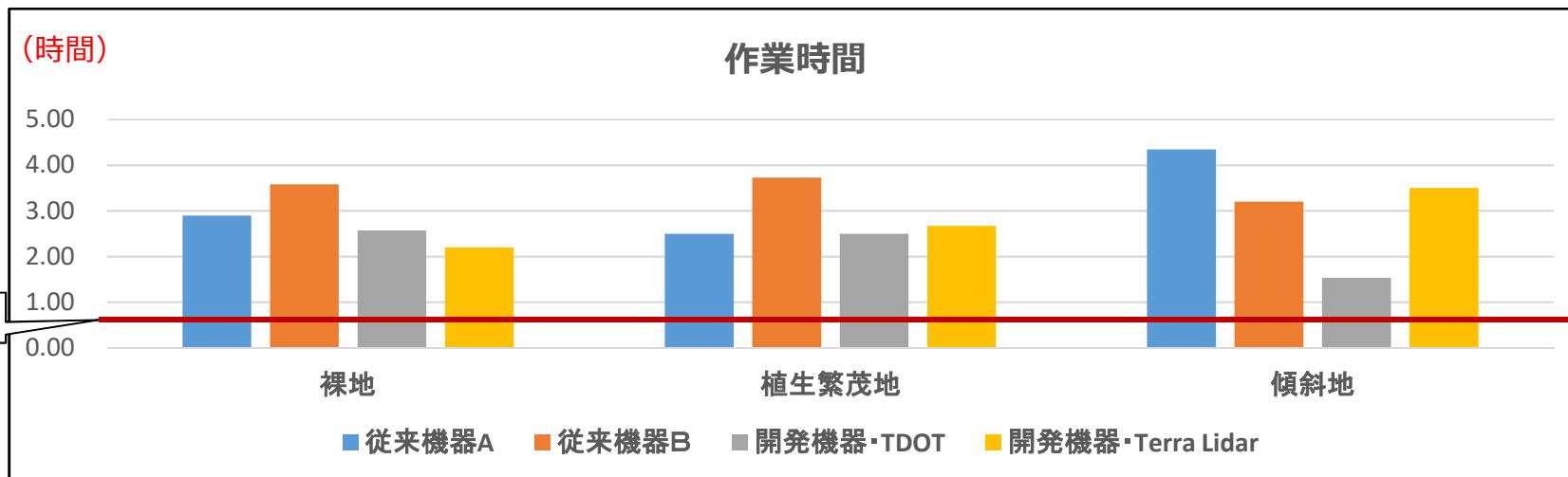
### 作業時間

現地到着～機器撤収までに要した時間

※カッコ内の数字はフライト回数

※フライト回数の違いは、各機器の飛行計画の違いによる（単位：時間）

UAVレーザー機材	裸地	植生繁茂地	傾斜地	リクワイヤメント (現地到着～機器撤収までの作業)
従来機器A	2:54 (2)	2:30 (2)	4:21 (6)	0:40
従来機器B	3:35 (9)	3:44 (9)	3:12 (6)	
<b>開発機器・TDOT</b>	2:34 (6)	2:30 (7)	1:32 (3)	
<b>開発機器・Terra Lidar</b>	2:12 (4)	2:40 (4)	3:30 (4)	



### 【検証結果】

- 0.30km<sup>2</sup>の範囲の測量（現地到着～機器撤収までの作業）を40分以内 に実施できた機器はなかった。

# ① UAVレーザ測量機器（レーザ測距装置、GNSS/IMU、UAV機体）

## 技術開発機器の検証

### 計測時間

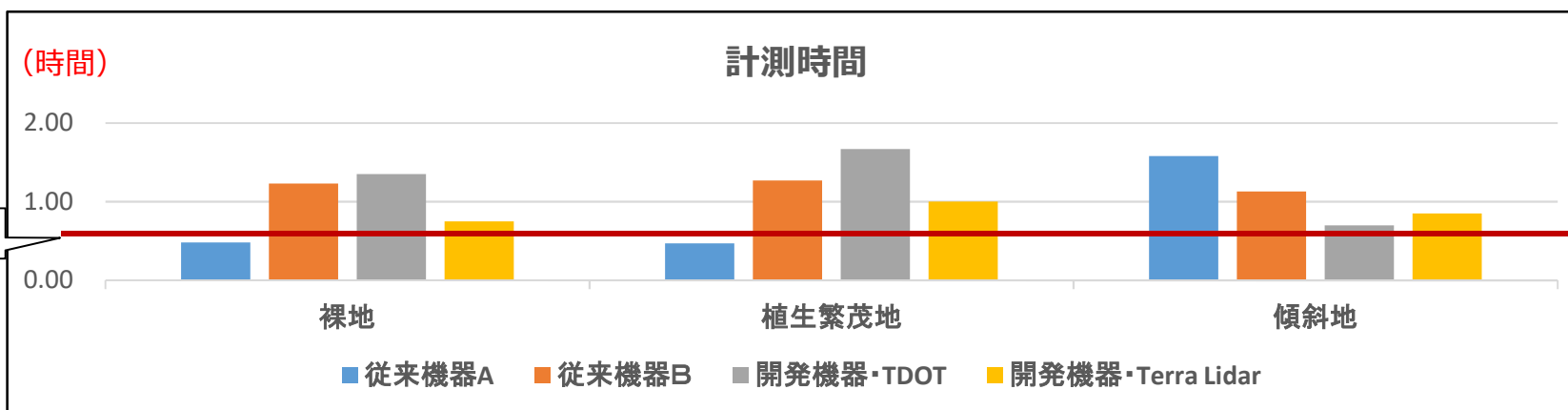
前頁の作業時間のうち、UAV飛行に要した時間のみを積み上げた時間

※カッコ内の数字はフライト回数

※フライト回数の違いは、各機器の飛行計画の違いによる

(単位：時間)

UAVレーザ機材	裸地	植生繁茂地	傾斜地	リクワイヤメント (現地到着～機器 撤収までの作業)
従来機器A	0:29 (2)	0:28 (2)	1:35 (6)	0:40
従来機器B	1:14 (9)	1:16 (9)	1:08 (6)	
開発機器・TDOT	1:21 (6)	1:40 (7)	0:42 (3)	
開発機器・Terra Lidar	0:45 (4)	1:00 (4)	0:51 (4)	



0:40

### 【検証結果】

- 計測時間のみでみた場合、「従来機器A」は裸地、植生繁茂地で40分以内で計測できた。「開発機器TDOT」の傾斜地、「開発機器Terra Lidar」の裸地もそれぞれ40分に迫る時間を達成している。
- バッテリー交換のための離発着回数（フライト回数）を減らすことができれば、よりリクワイヤメントに近づけるものと考えられる。

# ① UAVレーザ測量機器（レーザ測距装置、GNSS/IMU、UAV機体）

## 技術開発機器の検証

### □ 取得点密度

※カッコ内は飛行速度、フライト回数

UAVレーザ機器	裸地	植生繁茂地	傾斜地	リクワイヤメント
従来機器A	169点/m <sup>2</sup> (5.0m/s、2回)	259点/m <sup>2</sup> (5.0m/s、2回)	559点/m <sup>2</sup> (3.5m/s、6回)	100点/m <sup>2</sup>
従来機器B	189点/m <sup>2</sup> (5.0m/s、9回)	200点/m <sup>2</sup> (5.0m/s、9回)	137点/m <sup>2</sup> (5.0m/s、6回)	
<b>開発機器 TDOT</b>	96点/m <sup>2</sup> (3.0m/s、6回)	152点/m <sup>2</sup> (3.0m/s、7回)	130点/m <sup>2</sup> (3.0m/s、3回)	
<b>開発機器 Terra Lidar</b>	84点/m <sup>2</sup> (5.0m/s、4回)	109点/m <sup>2</sup> (5.0m/s、4回)	113点/m <sup>2</sup> (4.0m/s、4回)	

### 【検証結果】

取得点密度（100点/m<sup>2</sup>以上）については、

- 「従来機器A」及び「従来機器B」が全フィールドで達成。
- 「開発機器TDOT」及び「開発機器Terra Lidar」は傾斜地及び植生繁茂地において達成。



## 技術開発機器の検証

## □ 精度検証結果『裸地』

- 検証点における評価（調整用基準点を用いた補正実施後の最大較差）

単位：cm

UAVレーザ機器 (飛行速度・フライト回数)	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta XY$ (水平)	$\Delta Z$ (標高)	リクワイヤメント (3次元点群データの 制限値)
従来機器A (5.0m/s、2回)	3.2	4.4	4.6	-2.5	±5cm以内
従来機器B (5.0m/s、9回)	6.5	6.8	8.2	4.7	
開発機器 TDOT (3.0m/s、6回)	6.5	3.3	6.7	-4.5	
開発機器 Terra Lidar (5.0m/s、4回)	—	—	—	—	

## 【検証結果】

- 「従来機器A」は、水平位置・標高ともに制限値±5cm以内の精度を満たしている。
- 「従来機器B」及び「開発機器TDOT」は、標高の制限値±5cm以内の精度を満たしている。

※調整用基準点を用いた補正量を検証点5点に補正

※「開発機器Terra Lidar」は、機器トラブルのため公表を辞退

# ① UAVレーザ測量機器（レーザ測距装置、GNSS/IMU、UAV機体）

## 技術開発機器の検証

### □ 精度検証結果『植生繁茂地』

- 検証点における評価（調整用基準点を用いた補正実施後の最大較差）

単位：cm

UAVレーザ機器	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta XY$ (水平)	$\Delta Z$ (標高)	リクワイヤメント (3次元点群データの 制限値)
従来機器A (5.0m/s、2回)	3.3	-3.1	4.5	5.3	±5cm以内
従来機器B (5.0m/s、9回)	-15.7	-6.0	15.7	7.4	
開発機器 TDOT (3.0m/s、7回)	-6.4	1.5	6.6	7.7	
開発機器 Terra Lidar	—	—	—	—	

### 【検証結果】

- 「従来機器A」は、水平位置の制限値±5cm以内の精度を満たしている。

※調整用基準点を用いた補正量を検証点4点に補正

※「開発機器Terra Lidar」は、機器トラブルのため公表を辞退

## 技術開発機器の検証

## □ 精度検証結果『傾斜地』

- 検証点における評価（調整用基準点を用いた補正実施後の最大較差）

単位：cm

UAVレーザ機器	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta XY$ (水平)	$\Delta Z$ (標高)	リクワイヤメント (3次元点群データの 制限値)
従来機器A (3.5m/s、6回)	-2.7	1.3	3.0	4.5	±5cm以内
従来機器B (5.0m/s、6回)	-5.0	-7.5	5.2	-2.2	
開発機器 TDOT	—	—	—	—	
開発機器 Terra Lidar	—	—	—	—	

## 【検証結果】

- 「従来機器A」は、水平位置・標高ともに制限値±5cm以内の精度を満たしている。
- 「従来機器B」は、標高の制限値±5cm以内の精度を満たしている。

※調整用基準点を用いた補正量を検証点5点に補正

※「従来機器B」は、検証点5点のうち3点で計測点を取得できていない。

※「開発機器TDOT」は、「開発機器TDOT」のシステム上、計測日はGNSSの状況が良くなかったため公表を辞退

※「開発機器Terra Lidar」は、機器トラブルのため公表を辞退



## ②ソフトウェア全般

### ②-1. フィルタリング作業※を効率化するソフトウェアの開発

※取得したデータから樹木や建物等、地形以外の高さデータを取り除く作業

#### 募集テーマ

##### □ 精度

- 0.3km<sup>2</sup>の範囲を取得点密度100点/m<sup>2</sup>以上で取得したデータのフィルタリング処理結果に含まれる過剰なデータ（地表面以外の点データ）の割合が10%以内であること。  
また、本来フィルタリング処理結果に含まれるべき漏れのデータの割合が10%以内であること。

##### □ 効率性

- 0.3km<sup>2</sup> の範囲を取得点密度100点/m<sup>2</sup>以上で取得したデータのフィルタリング処理を0.5時間以内で実施可能であること。

#### ■ 開発チーム

- ① (株)アミューズワンセルフ／(株)パスコ
- ② 朝日航洋(株)／(株)GEOソリューションズ

## ②ソフトウェア全般

### ②-1. フィルタリング作業を効率化するソフトウェアの開発

#### □ 効率性の検証

##### 【検証方法】

開発チーム①・・・ソフトウェア貸与の許可を得ることができなかつたため、立ち会いの下、開発チームが作業を実施。その作業所要時間を計測。

開発チーム②・・・ソフトウェア一式を貸与いただき、作業所要時間を計測。

開発チーム	読込時間	処理時間	LAS出力時間※	合計時間	リクワイヤメント
①(株)アミューズワンセルフ ／(株)パスコ	4分2秒	2分40秒	3分49秒	10分31秒	30分以内
②朝日航洋(株) ／(株)GEOソリューションズ	4分0秒	3分54秒	3分35秒	11分39秒	

VLP-16 (レーザスキャナ) の計測データ (0.6km<sup>2</sup>) を使用

処理に使用したPCのスペック

①DELLコンピュータ/CPU Intel(R)Xeon(R)E3-1535Mv5@2.90GHz 2.90GHz/4コア/メモリ32GB  
ストレージ HDD/GPU QuadroM3000

②DELLコンピュータ/CPU Intel(R)Xeon(R)E5-1620v4@3.50GHz 3.50GHz/10コア/メモリ32GB  
ストレージ HDD/GPU QuadroM2000

※LAS出力時間・・・点群データの標準的なフォーマットであるLASフォーマットを出力する処理時間

##### 【検証結果】

- リクワイヤメントは0.3km<sup>2</sup>30分以内だが、0.6km<sup>2</sup>を実施し、いずれも30分以内で出力できた。

## ②ソフトウェア全般

### □ 精度の検証

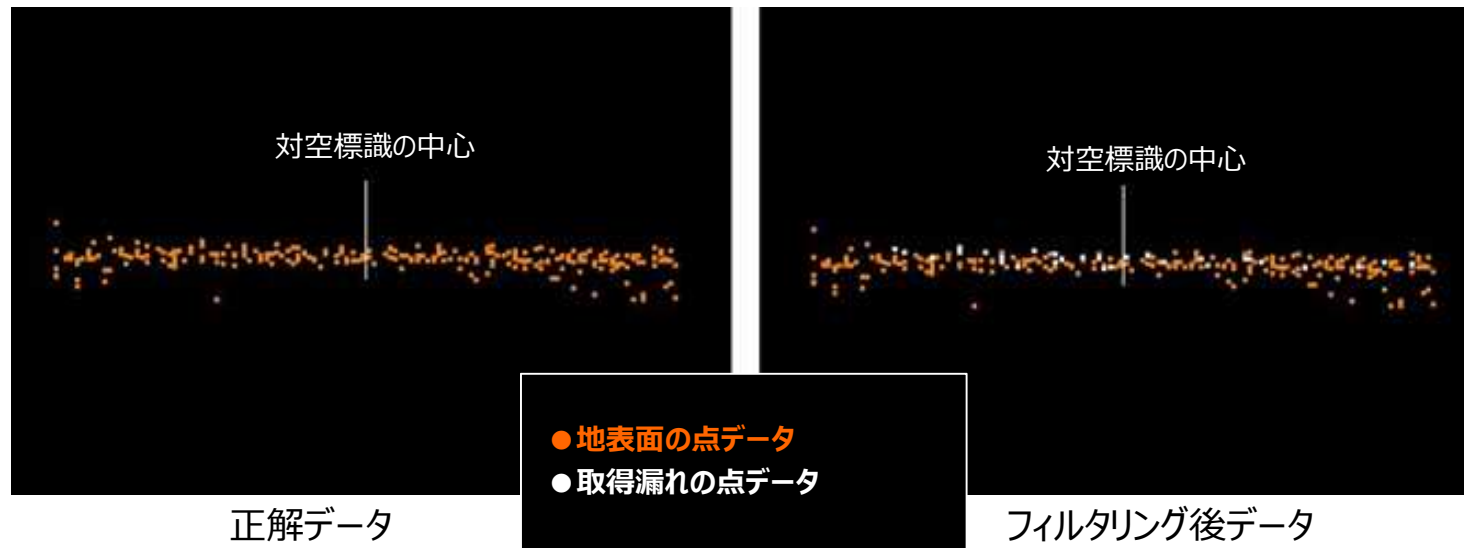
#### 【検証方法】

1. 検証箇所（対空標識）を9箇所設置してレーザ計測を実施
2. 得られた点群データについて、現地調査等の結果を踏まえて主に手作業によるフィルタリングを実施して正解データを作成。
3. 開発されたソフトウェアによるフィルタリングデータと正解データを比較し、過不足率を計算。  

$$\text{過剰率 (\%)} = \text{過剰点数} / \text{正解点数} \times 100$$

$$\text{不足率 (\%)} = \text{不足点数} / \text{正解点数} \times 100$$

#### フィルタリングの例



VUX-1（レーザスキャナ）の計測データを使用



## ②ソフトウェア全般

### □ 精度の検証

#### ①(株)アミューズワンセルフ/(株)パスコ フィルタリングソフトウェア 実施結果

検証箇所	正解点数	正解と一致点数	過剰点数	過剰率	不足点数	不足率
1	190	181	0	0.00%	9	4.74%
2	144	134	0	0.00%	10	6.94%
3	253	223	0	0.00%	30	11.86%
4	276	249	0	0.00%	27	9.78%
5	271	247	0	0.00%	24	8.86%
6	174	165	0	0.00%	9	5.17%
7	122	121	1	0.82%	1	0.82%
8	185	169	3	1.62%	16	8.65%
9	129	119	0	0.00%	10	7.75%
合計	1744	1608	4	0.23%	136	7.80%

VUX-1（レーザスキャナ）の計測データを使用 リクワイアメント・・・10%以内

#### 【検証結果】

- 不足率10%を超える点が1点あった。全体では10%以内であった。

## ②ソフトウェア全般

### □ 精度の検証

#### ②朝日航洋(株)／(株)GEOソリューションズ フィルタリングソフトウェア 実施結果

検証箇所	正解点数	正解と一致点数	過剰点数	過剰率	不足点数	不足率
1	190	189	1	0.53%	1	0.53%
2	144	144	0	0.00%	0	0.00%
3	253	252	0	0.00%	1	0.40%
4	276	271	2	0.72%	5	1.81%
5	271	265	1	0.37%	6	2.21%
6	174	174	0	0.00%	0	0.00%
7	122	119	1	0.82%	3	2.46%
8	185	183	4	2.16%	2	1.48%
9	129	124	3	2.33%	5	3.88%
合計	1744	1721	12	0.69%	23	1.32%

VUX-1 (レーザスキャナ) の計測データを使用      リクワイアメント・・・10%以内

#### 【検証結果】

- 10%を超える点はなかった。全体も10%以内であった。

## ②ソフトウェア全般

### ②-2. UAVレーザ測量の飛行計画を支援するツールの開発

#### 募集テーマ

##### □ 精度

- 0.3k m<sup>2</sup>の範囲（高低差のある傾斜地）の飛行計画について、取得漏れエリアを出すことなく全域を計測する飛行計画を自動策定可能であること

##### □ 効率性

- 計測範囲や標高データを入力し、視覚表示して飛行計画を練ることの可能なツール。  
（ツールは計測現場で使用する事を考慮してノートPC等のモバイル機器で動作すること）
- 0.3k m<sup>2</sup>の範囲（高低差のある傾斜地）の飛行計画を0.5時間以内で策定可能であること。

#### ■ 開発チーム

- ① (株)アミューズワンセルフ／(株)パスコ
- ② 福井コンピュータ(株)



## ②ソフトウェア全般

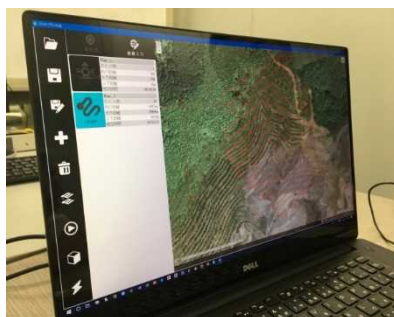
### ②-2. UAVレーザ測量の飛行計画を支援するツールの開発

#### 【検証方法】

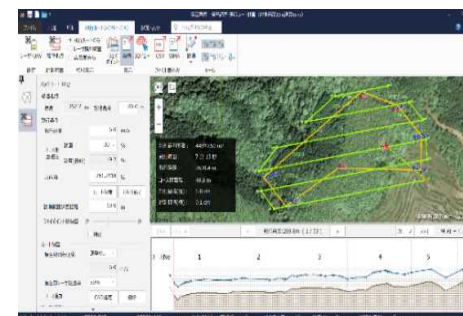
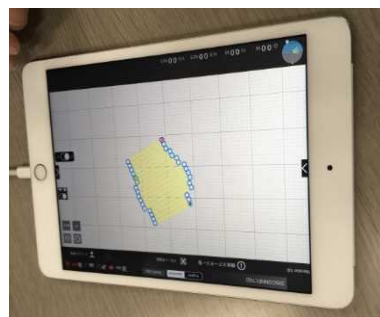
1. 飛行計画をPC上で作成し、UAVの操縦機器等に転送するまでの時間を計測（効率性の検証）
2. 作成した飛行計画データに基づき実証飛行を行い、得られた点群データから取得漏れエリア有無の検証を実施（精度の検証）

#### □ 効率性の検証

開発チーム	飛行計画作成時間	転送時間	合計時間	リクワイヤメント
①(株)アミューズワンセルフ ／(株)パスコ	2分37秒	54秒	3分31秒	30分以内
②福井コンピュータ(株)	17分51秒	33秒	18分24秒	



開発チーム①のソフトウェア画面



開発チーム②のソフトウェア画面

#### 【検証結果】

- いずれも30分以内で完了した。

## ②ソフトウェア全般

### ②-2. UAVレーザ測量の飛行計画を支援するツールの開発

#### □ 精度の検証

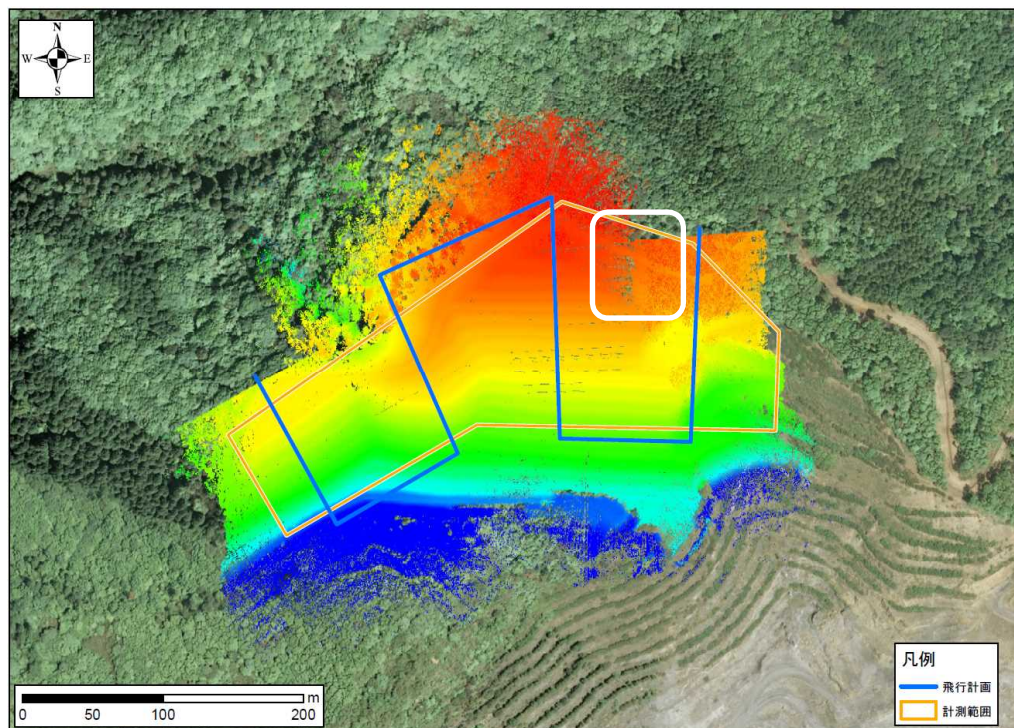
実際に飛行計画を構築し、実証飛行を行って、計画が適切であるかどうか検証した。  
検証は、取得漏れの起きやすい急傾斜地で行った。

#### ① (株)アミューズワンセルフ/(株)パスコ 飛行計画ソフトウェア 実施結果

検証は開発チームではない第三者による実証飛行により点群データを取得し、解析する事が望ましいが、飛行計画ソフトウェアが特定のUAVフライトコントローラしか対応していなかったため、安全性を考慮し（墜落等の危険を防ぐため）、実証実験済みの機体（開発チームの一社が開発した機体）を用いて実証飛行を行った。

#### 【検証結果】

一部取得できていない範囲があった。  
(図中の白枠内)



点群データ表示画面

## ②ソフトウェア全般

### ②-2. UAVレーザ測量の飛行計画を支援するツールの開発

#### □ 精度の検証

#### ②福井コンピュータ(株) 飛行計画ソフトウェア 実施結果

検証は開発チームではない第三者による実証飛行により点群データを取得し、解析する事が望ましいが、開発チームが事前のテスト飛行に使用したUAV機体はレーザスキャナを搭載できない中型の機体であり、検証に用いるレーザスキャナを搭載可能なUAV機体とでは大きさ、重さが異なるため、安全性を考慮し（墜落等の危険を防ぐため）、実証飛行は中止とした。