

# 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

中日本航空株式会社

調査測量事業本部 齋藤重好、村手直明、宮下大明

## 1. はじめに

本研究は、GIS への利用も可能である詳細な高さ情報を取得できる航空機搭載型レーザースキャナーについて、その精度要因を検討後、データを取得、解析して、精度要因ごとに精度検証し、その結果を評価した。

## 2. 精度要因の検討

航空機搭載型レーザースキャナーについて、作業工程とそれらの工程で発生する精度要因を検討した。

検討の結果から、本研究では以下の精度要因について精度検証手法の検討をすることとした。

### ①GPS 基線長

- ア) GPS 基線長とセンサーの位置・姿勢精度の関係
- イ) GPS 基線長とDSM の精度の関係

### ②レーザースキャン点密度

レーザースキャン点密度とグリッドDTMの精度の関係。

### ③土地被覆の状態

土地被覆の状態とDTM精度の関係。

※DSM：数値表層モデル。建物等を含む表層の標高データ。

※DTM：数値標高モデル。地盤高を示すデータ。

※グリッドDTM：水平位置が格子状に配列した標高データ。

DTM から内挿補間により算出する。

## 3. データ取得及び解析

### (1) データ取得

データは、岐阜県大垣市の2地区(市内、郊外)で、それぞれ約2km<sup>2</sup>の範囲で取得した。(図1参照)以下に概要を示す。

#### ①計測日時

平成14年2月6日 13時08分～16時30分

#### ②使用航空機及び航空レーザースキャン装置

航空機：AS350B型ヘリコプター(JA9403)

計測装置：N-TOMS II

#### ③設定パラメータ及びデータ取得間隔

表1参照。

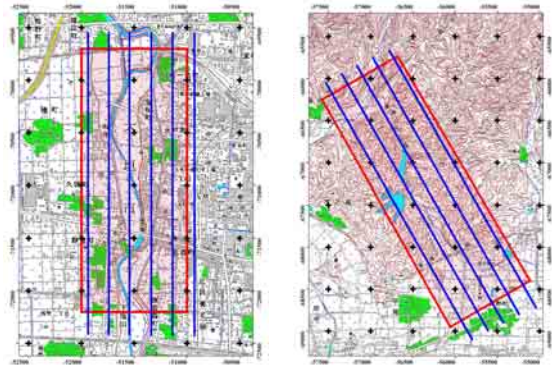
#### ④GPS 基準局観測

三等三角点「室原」において航空レーザースキャンと同時にGPS観測した。基準点の位置は、周辺の電子基準

点のデータを利用してGPS測量した。

#### ⑤キャリブレーションデータ取得

機材のキャリブレーション(レーザースキャン計測点座標計算時に必要な機材取り付け角度の値の校正)用に、大きな建物のある場所(名古屋港付近)を計測し、校正値を求めた。



大垣市内 大垣郊外(山間部)  
(赤枠：計測範囲、青線：飛行コース)

図1 計測地区及び飛行コース

表1 設定パラメータ及びデータ取得間隔

| 項目                | 内容                  | 設定パラメータ |         |
|-------------------|---------------------|---------|---------|
|                   |                     | 市街地     | 山間部     |
| 対地高度 (m)          | 計測時の航空機の飛行高度 (対地高度) | 300     | 500     |
| 飛行速度 (m/sec)      | 計測時の航空機の飛行速度 (対地速度) | 12      | 12      |
| レーザースキャン照射頻度 (Hz) | 1秒間に照射するレーザースキャンの頻度 | 20000   | 20000   |
| スキャン頻度 (Hz)       | 1秒間にミラーをスキャンする頻度    | 24      | 24      |
| スキャン角 (Deg)       | ミラーをスキャンする最大角度(片側)  | 30      | 22.5    |
| ビーム径 (mrad)       | レーザースキャンの広がり        | 0.50    | 0.50    |
| 1スキャン当たりの光の発射回数   |                     | 620     | 620     |
| 計測幅 (m)           | 高度×tan(スキャン角)×2     | 346     | 414     |
| コースピッチ (m)        |                     | 200     | 200     |
| コースラップ (m)        |                     | 140     | 130~210 |
| スキャン方向点密度 (m)     | 計測幅÷1スキャン当たりの光の発射回数 | 0.56    | 0.67    |
| 進行方向点密度 (m)       | 速度÷スキャン頻度           | 0.50    | 0.50    |

### (2) 解析

取得データを図2に示す流れで解析した。以下に各工程の概要を示す。

#### ①GPS 解析

機上と基準局のGPS観測データを用いGPS解析(後処理キネマティックGPS測量)をした。

#### ②慣性複合処理

GPS解析結果とIMUデータ(レーザースキャンの角速度・加速度データ)を用いて慣性複合処理し、レーザースキャンの位置・姿勢データを算出した。

### ③レーザー計測点の座標の計算

位置・姿勢データとレーザー測距データを時刻同期で結合させ、レーザー計測点の座標を算出した。標高は、ジオイド高データを用いて楕円体高 (GRS80) から算出した。ジオイド高データは、“GSIGEOME Ver2.00 (ジオイドデータ gsigeme.ver22)” (国土地理院ジオイド補間プログラム) を用いて算出した。

### ④ノイズ除去処理

ノイズデータ (空中の塵などを計測したデータ等) を除去した。

### ⑤分類

レーザー計測点から地盤と地物に分類した。分類は、ア) ソフトウェアによる自動分類処理、イ) 目視による結果の確認と誤分類の修正、の順に実施した。

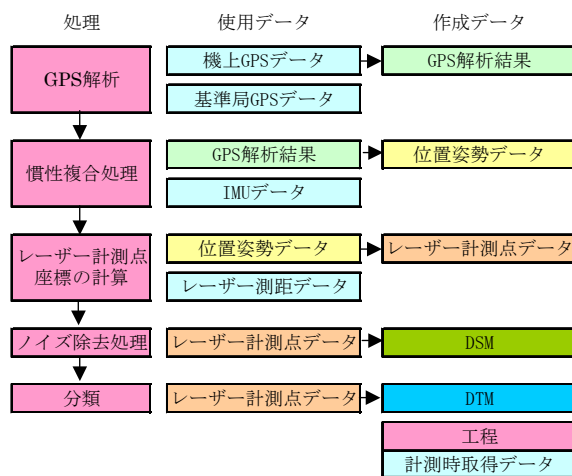


図2 データ解析の流れ

## 4. 要因ごとの精度検証

### (1) GPS 基線長

#### 1) 検証手法

取得データと複数の GPS 基準局データを利用して、センサーの位置・姿勢、DSM の精度を検証した。GPS 解析には、三等三角点「室原」及び電子基準点 (1 秒間隔のデータ) (表 2、図 3 参照) のデータを利用した。比較の基準は、最も基線長が短い「室原」(基線長: 3km) のデータとした。センサーの位置・姿勢の精度検証には、大垣市内の計測時間に当たる約 55 分間のデータを利用した。

DSM の基準データには、地上設置型レーザーキャナー (データ取得と処理: 国土地理院) で取得されたデータを用いた。標高の比較箇所は、水平位置誤差の影響を少なくするため、舗装路で標高差の少ない箇所を選んだ。(図 4 参照。面積: 46m<sup>2</sup>。標高値の標準偏差: 3.3cm) 水平位置の比較は、高さの情報のみから位置を判読できる箇所 (電柱) を選んだ。(図 5 参照)

### (検証の手順)

- ① GPS 基準局ごとに基線解析、IMU 処理、レーザー計測点の座標を算出した。
- ② センサーの位置・姿勢 (East, North, 楕円体高, Roll, Pitch, Heading) について、基準データと GPS 基準局ごとのデータの較差を比較した。
- ③ DSM データ (East, North, 標高) について、基準データと GPS 基準局ごとのデータの較差を比較した。

表 2 利用した電子基準点と基線長

| 点名      | 本巣 | 甚目寺 | マキノ | 水口 | 加茂白川 | 白鳥 | 額田 | 越前 | 渥美 | 室生  | 飯田  | 大阪  |
|---------|----|-----|-----|----|------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 距離 (km) | 17 | 30  | 49  | 58 | 60   | 61 | 82 | 84 | 95 | 101 | 113 | 123 |

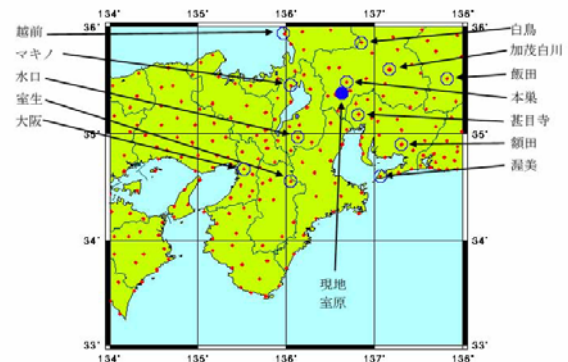
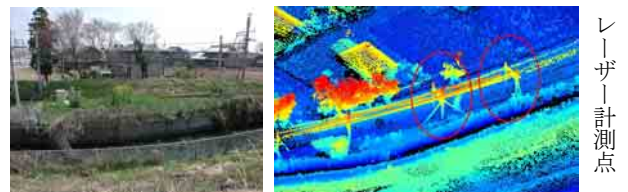


図3 利用した電子基準点の位置図



赤丸: 検証箇所

図4 DSM の標高精度検証箇所



赤丸: 検証箇所

図5 DSM の水平位置精度検証箇所

### 2) 検証結果とその評価

#### ①センサーの位置精度

基線長とセンサー位置の較差 (基準は最も基線長が短い「室原」のデータ) を比較した結果、較差 (平均値) は水平・高さ位置とも基線長との関連性はみられなかった (図 6)。この結果の要因の一つとして、受信衛星の数やその配置が影響していることが考えられた。そこで、基準局との位置関係 (方角) を考慮 (方角

の分類は、16 段階（北、北北東、北東・・・）して整理した。この結果、水平位置は基線長の増加とともに較差が増加した。（ただし、方角により較差や増加量は異なる。）（図 8、図 9）また、高さは方角別に見ても基線長と較差の増減の関係は見られなかった（図 10）が、基線長の増加とともにばらつきが増加した（図 11）。

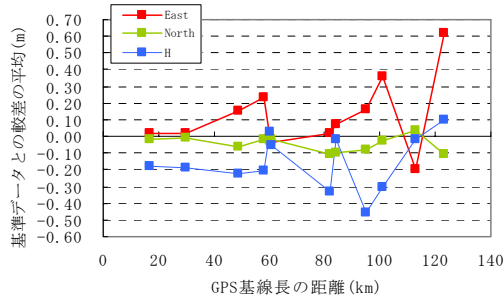


図 6 基線長と位置の較差の平均値

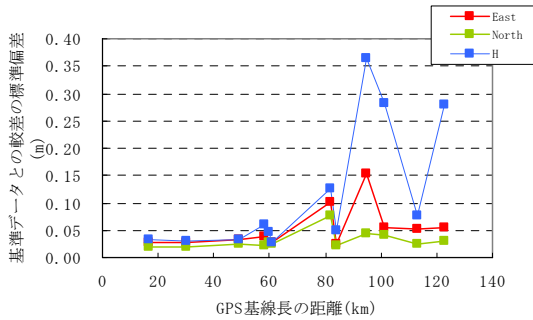


図 7 基線長と位置の較差の標準偏差

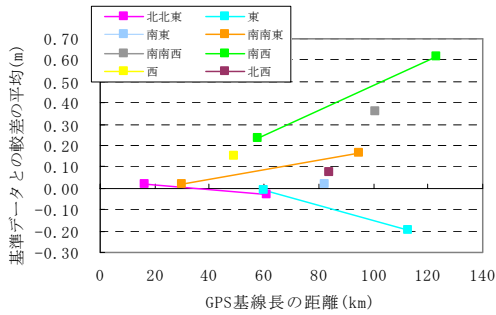


図 8 方向別の基線長と位置(east)の較差の平均

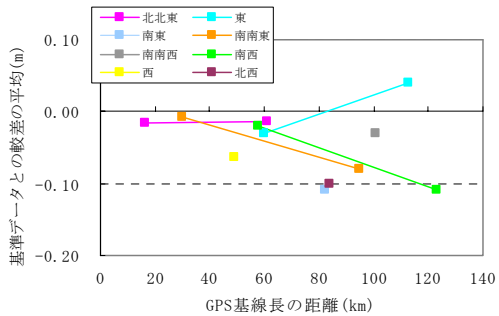


図 9 方向別の基線長と位置(north)の較差の平均

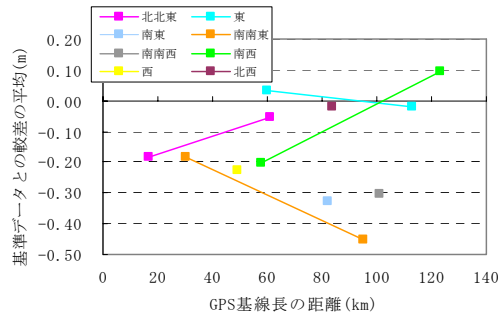


図 10 方向別の基線長と位置(h)の較差の平均

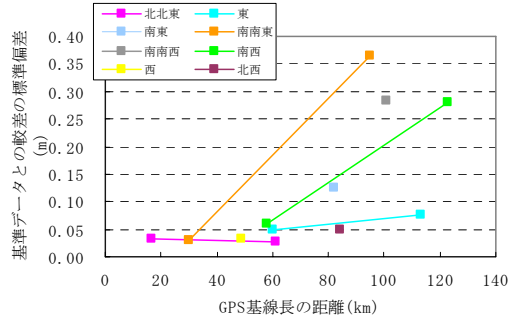


図 11 方向別の基線長と位置(h)の較差の標準偏差

## ②センサーの姿勢精度

基線長とセンサー姿勢の較差（基準は最も基線長が短い「室原」のデータ）を比較した結果、Heading の値は基線長により、較差の平均、標準偏差ともばらつきが見られたが、Roll、Pitch、Headingとも IMU 装置の公称精度(Roll、Pitch:0.005°、Heading:0.008°)以下の較差であり、基線長 120km まではセンサーの姿勢精度に基線長はほとんど影響していなかった。（図 12,13）

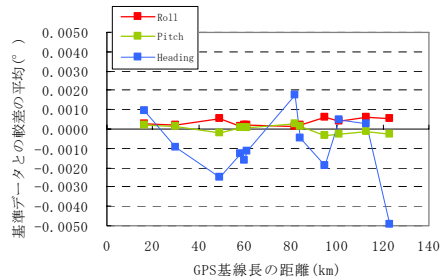


図 12 基線長と姿勢の較差の平均

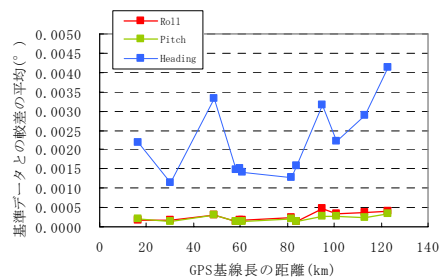


図 13 基線長と姿勢の較差の標準偏差

### ③DSM の標高精度

基線長と DSM の標高値の較差（基準は地上設置型レーザースキャナーで取得されたデータ）を比較した結果、基線長と DSM の標高精度に関連性はみられなかった。（図 1 4）

そこで、DSM の標高精度、前項で得られたセンサー高さ位置精度それぞれの較差の平均を比較した。（比較の基準は、基準局「室原」とした）。（図 1 5）この結果、DSM の標高精度は、センサー高さ位置精度に支配されていた（すなわちレーザー測距・測角精度は、ほぼ一定であった）。

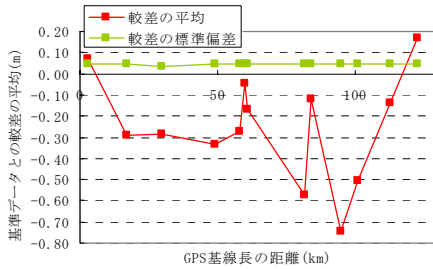


図 1 4 基線長と DSM 標高値の較差の平均、標準偏差

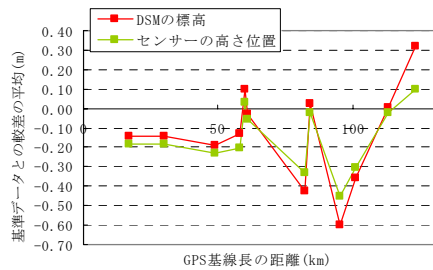


図 1 5 センサー位置(高さ)の結果との比較

### ④DSM の水平位置精度

基線長と DSM の水平位置の較差（基準は地上設置型レーザースキャナーで取得されたデータ）を比較した結果、基線長と水平位置精度に関連性はみられなかった。（図 1 6）

そこで、標高位置精度の検証と同様に、センサー水平位置の検討結果と比較した（比較の基準は、基準局「室原」とした）。（図 1 7）この結果、DSM の水平位置精度もセンサーの水平位置の精度に支配されていた。

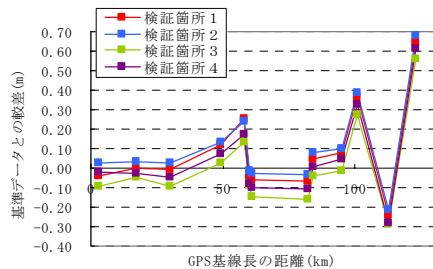


図 1 6 基線長と位置(East)の較差の平均

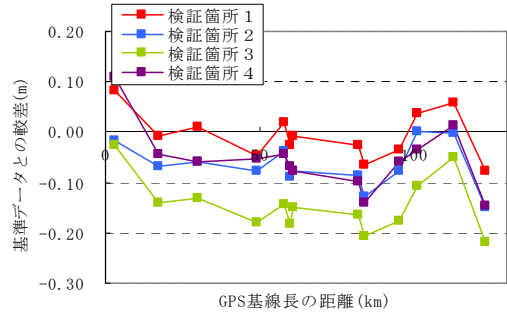


図 1 7 基線長と位置(North)の較差の平均

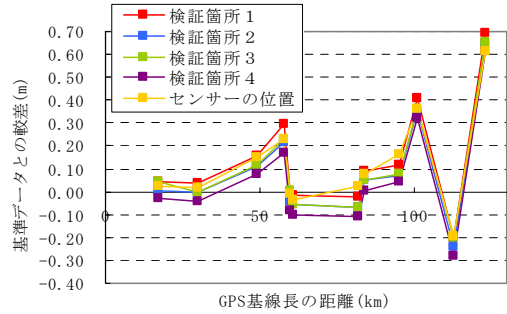


図 1 8 センサー位置(East)の結果との比較

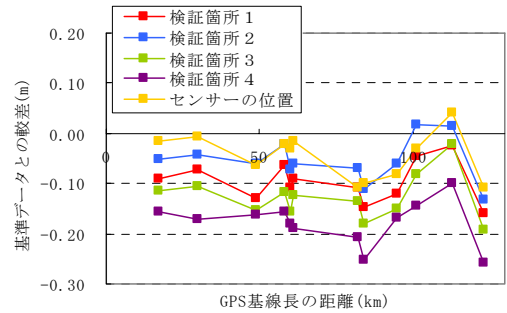


図 1 9 センサー位置(North)の結果との比較

### (2) レーザー計測点密度

#### 1) 検証手法

レーザー計測点密度の異なるデータからグリッドDTMを作成し、幅員の狭い道が表現されているかどうかを基準データと比較した。基準データは、地上設置型レーザースキャナー（データ取得と処理：国土地理院）で取得されたデータを用いた。（図 2 0）



図 2 0 検証箇所と地上設置型レーザースキャナー

(検証の手順)

- ① 地上設置型レーザースキャナーの計測範囲内で、幅員の狭い道があるエリアを選定した。(図 2 1 赤丸内) 道の幅員は、約 3m~5m であった。



図 2 1 検証箇所 (航空写真)

- ② 選定エリアの地盤計測点から TIN を形成し、TIN からの内挿補間でグリッド DTM を算出した。グリッド間隔は、以下に示す 4 種類とした。

- A : 0.2m 地上設置型レーザースキャナーデータ使用  
比較の基準データ (点密度 約 75 点/m<sup>2</sup>)
- B : 0.5m 3 コースの航空レーザースキャナーデータ使用  
(点密度 約 5 点/m<sup>2</sup>)
- C : 1.0m 単コースの航空レーザースキャナーデータ使用  
(点密度 約 3 点/m<sup>2</sup>)
- D : 2.0m 単コースの航空レーザースキャナーデータ使用  
(点密度 約 3 点/m<sup>2</sup>)

- ③ グリッド DTM データから TIN を形成して、以下の画像を作成した。
- ア) グリッド DTM の標高段彩表示画像
  - イ) 道の断面画像
- ④ 作成した画像から、道が表現されているかどうかを目視で評価した。

2) 検証結果とその評価

標高陰影段彩図、断面図を図 2 2, 2 3 に示す。

標高陰影段彩図、断面図ともに、グリッド間隔が大きくなるほど、道の表現が粗くなった。

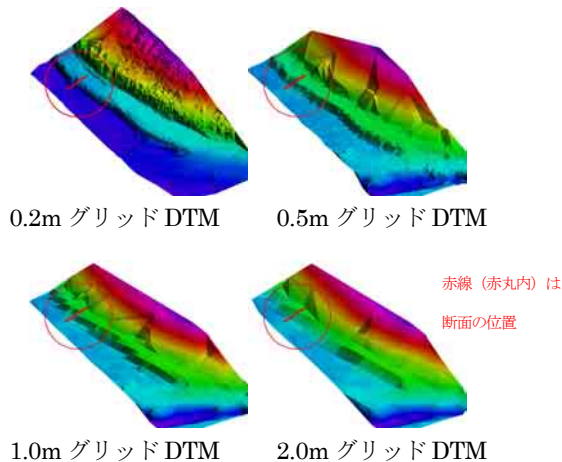
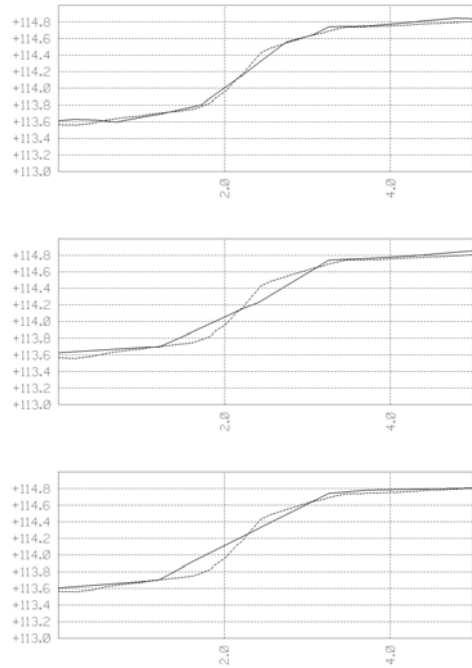


図 2 2 標高陰影段彩図



実線 : (上) 0.5m、(中) 1.0m、(下) 2.0m  
破線 : 0.2m  
断面位置 : 標高陰影段彩図の赤線 (赤丸内)

図 2 3 TIN から作成した断面図

(3) 土地被覆と DTM 精度

1) 検証手法

土地被覆の違いによる地盤の計測点密度の違いを評価した。土地被覆は、森林、草地、水田、畑、空き地、建物、道路、河川の 8 項目について分類した。森林については樹種も分類した。

(検証の手順)

- ① 航空写真等を参考に、計測範囲内で分類項目ごとの評価エリアを選定した。土地被覆は、10m グリッド相当の精度で分類した。(図 2 4、2 5 参照)

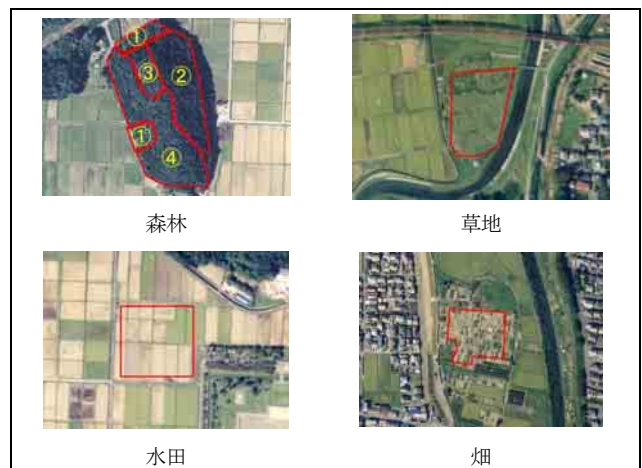




図 2-4 評価エリア (航空写真)

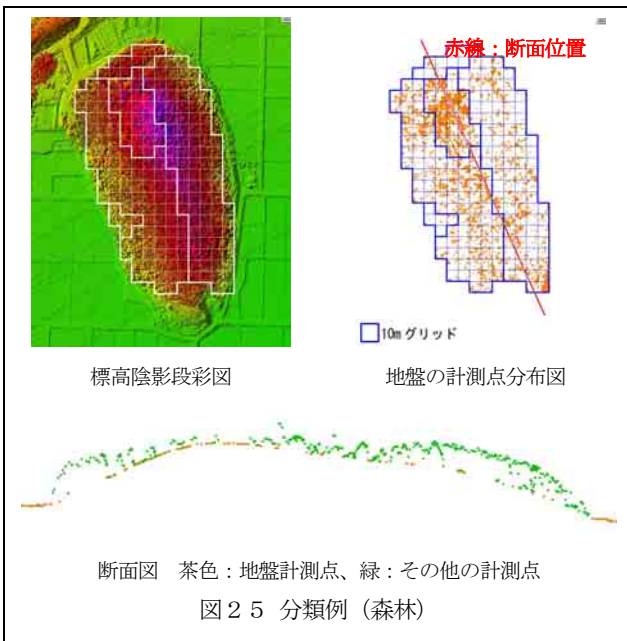


図 2-5 分類例 (森林)

- ② 選定エリアにおける地盤の計測点数と総計測点数を集計した。
- ③ 土地被覆項目毎の地盤の計測点密度を算出した。計算式を以下に示す。

《地盤の計測点密度》

$$= \langle \text{地盤の計測点数} \rangle \div \langle \text{評価エリアの面積} \rangle$$

2) 検証結果とその評価

表 3 土地被覆分類と計測点密度の違い

| 土地被覆分類項目 | 評価エリアの面積 (m <sup>2</sup> ) | (A) 地盤の計測点数 | 地盤の計測点密度 (点/m <sup>2</sup> ) | (B) 総計測点数 | 総計測点の点密度 (点/m <sup>2</sup> ) | 地盤計測点の割合 (A÷B) |      |
|----------|----------------------------|-------------|------------------------------|-----------|------------------------------|----------------|------|
| 森林       | ① 竹林                       | 1,500       | 145                          | 0.10      | 6,199                        | 4.13           | 0.02 |
|          | ② 針葉樹 (松)                  | 8,800       | 3,058                        | 0.35      | 52,520                       | 5.97           | 0.06 |
|          | ③ 針葉樹 (杉、榎)                | 2,500       | 3,576                        | 1.43      | 11,985                       | 4.79           | 0.30 |
|          | ④ 落葉広葉樹                    | 9,000       | 3,844                        | 0.43      | 43,666                       | 4.85           | 0.09 |
|          | 全体                         | 21,800      | 10,623                       | 0.49      | 114,370                      | 5.25           | 0.09 |
| 草地       | 8,700                      | 21,245      | 2.44                         | 48,040    | 5.52                         | 0.44           |      |
| 水田       | 7,500                      | 28,609      | 3.81                         | 33,277    | 4.44                         | 0.86           |      |
| 畑        | 6,000                      | 25,067      | 4.18                         | 30,819    | 5.14                         | 0.81           |      |
| 空き地      | 13,100                     | 45,017      | 3.44                         | 54,309    | 4.15                         | 0.83           |      |
| 建物       | 7,579                      | 0           | 0.00                         | 35,513    | 4.69                         | 0.00           |      |
| 道路       | 2,543                      | 7,676       | 3.02                         | 11,207    | 4.41                         | 0.68           |      |
| 河川       | 11,316                     | 1,497       | 0.13                         | 2,007     | 0.18                         | 0.75           |      |

検証結果を表 3 に示す。

比較の結果、森林での地盤の計測点密度が、他の土地被覆項目に比べ低かった。また、森林での地盤の計測点密度の低下は、樹種によって異なっていた。

5. まとめと今後の課題

本研究では、岐阜県大垣市で取得した航空機搭載型と地上設置型のレーザースキャナーデータを用いて、以下に示す精度要因について航空機搭載型レーザースキャナーの精度を検証した。

① GPS 基線長

ア) GPS 基線長とセンサーの位置・姿勢精度の関連

イ) GPS 基線長と DSM の精度の関連

② レーザー計測点密度とグリッド DTM 精度の関連

③ 土地被覆とレーザー計測点密度の関連

本研究の結果から、航空機搭載型レーザースキャナーの精度検証手法事例を示し、以下の検証結果を得た。

① GPS 基線長

ア) 基線長とセンサーの位置精度に強い相関は認められなかった。ただし、基線長が 40km 以上では、距離の増加によりセンサー水平位置は較差が増加し (方角により較差や増加量は異なる)、センサー高さ位置はばらつきが増加した。また、センサー姿勢精度に、基線長はほとんど影響していなかった。

イ) DSM の標高・水平位置精度は、センサー位置精度に支配されていた (すなわちレーザー測距・測角精度は、ほぼ一定であった)。

(2) DEM グリッド間隔が大きくなるほど (計測点密度が粗くなるほど)、微地形 (幅員約 3m~5m の道) での DEM 精度が低下した。

(3) 森林での地盤の計測点密度が、他の土地被覆項目に比べ低く、樹種によって低下率は異なっていた。

今後は、航空機搭載型レーザースキャナーの実利用に適した精度検証方法を確立するために、精度検証の事例を増やす必要がある。

問い合わせ先

中日本航空株式会社

調査測量事業本部事業開発部

〒480-0202 愛知県西春日井郡豊山町大字豊場若宮 17-1

TEL 0568-28-4845

MAIL nmurate@nnk.co.jp

Web http://www.nnk.co.jp/