

地形モデルの違いによる UAV 空撮画像を用いた樹高計測精度

蝦名益仁

はじめに—UAV による樹高計測とは—

現地調査の省力化のため、無人航空機 (UAV) で空撮した画像を SfM (Structure from Motion) 多視点ステレオ写真測量と呼ばれる画像解析技術を用いて森林の表面形状を三次元化し、森林計測する技術の開発が近年進められています。計測項目のなかでも『樹高』は樹木の材積や地位 (林地の成長ポテンシャル) を求めるのに用いられるため、特に開発が求められています。このとき必要となるのが数値表層モデル (以降, 表層モデル) と数値地形モデル (以降, 地形モデル) です。

樹冠や建物の表面など, 上空からの可視領域を三次元化して得られるのが「表層モデル」です。表層モデルは UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量を用いて取得する手法が一般的です。その他に, レーザ光を用いた検出・測距技術 (LiDAR: Light Detection and Ranging) を用いて取得する手法があり, いずれも高精細な表層モデルが得られますが, LiDAR (後者) に用いるセンサは高価なため, 前者の手法がよく用いられます。

一方, 「地形モデル」とは地盤高そのものを表し, 複数の取得手法があります。表層モデルの値から地形モデルの値を差し引くことで樹高を求めるため, どの地形モデルを使えば, どの程度正確に樹高が計測できるか検証することが重要です。そこで本稿では, 異なる4つの地形モデルを使い, 樹高計測精度の違いについて検証した事例を紹介します。

地形モデルの種類と特徴

表-1に地形モデルの特徴をまとめました。

まず, 国土地理院が公開している数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) を利用する方法があります。これは5 m メッシュ (以降, 5 m DEM) と10 m メッシュ (以降, 10 m DEM) の二種類あり, 5 m DEMは航空機LiDAR計測を用いて作成されているため, 高精度の地形モデルが無料で入手できます。しかし, 北海道の山間部では未整備のエリアが多く, 現時点では利用できない箇所が多く存在することがネックです。一方, 10 m DEMは全国一円で整備されています。しかし, 10 m DEMは空中写真測量を基に作成された地形図の等高線を内挿補間して作成しているため, 精度が低く, 解像度も10 mと粗いため地表面の細かい凹凸や起伏を正確にとらえられていないと言われていています。

表-1 地形モデルの種類と特徴

地形モデルの種類	入手方法	精度	その他の特徴
5 m DEM	国土地理院ホームページよりダウンロードによって入手	高い	整備範囲が限られる。無料。
10 m DEM	〃	低い	全国全域で整備。無料。
UAV-SfM-MVS	空撮画像から生成	樹木密度など障害物の有無に依存	一回の飛行で取得できる範囲が限られる。ソフトウェアがあれば自作可能。
UAV-LiDAR	LiDAR計測データから生成	非常に高い	データ取得コストがとて高い。一回の飛行で取得できる範囲が限られる。
航空機LiDAR	測量業者に委託	高い	データ取得コストが高い。行政・大規模森林所有者によって広範囲に整備されることが多い。

UAV空撮画像を用いて地形モデルを作成する手法もあります。しかしこの手法では、樹木密度が高い森林や、ササなど下層植生が繁茂して地表が見えない部分は、高精度な地形モデルを作成することは困難です。一方LiDARを用いた計測ではデータ取得コストが高くなるものの、レーザ光の一部が地表に到達しさえすれば、高精度な地形モデルを作成することが可能です。特に、UAVからのLiDAR計測は航空機からのLiDAR計測に比べ測定対象に接近し計測でき、高密度に点群が取得できることから、より高精細な地形モデルが作成できます。

本報告で用いる地形モデル4種類（①航空機LiDAR、②UAV-LiDAR、③UAV空撮画像、④国土地理院提供の10 m DEM）は精度、コスト、取得可能範囲がそれぞれ異なるため、用途に応じたデータを選択する必要があります。

地形モデルおよび樹高の精度検証の手順

今回の対象地は道有林十勝管理区（浦幌町）にある急傾斜地に植栽されたトドマツ人工林（林齢60年）です。航空機LiDAR・UAV-LiDAR・UAV空撮画像（それぞれ北海道が2019年に取得）と国土地理院提供の10 m DEMの4種類の地形モデルを用い解析を行いました。

樹高計測精度の検証のため、トドマツの樹高・位置の計測を行い、地形モデルの精度検証のためのGNSS（人工衛星による全球の位置測位システム）による位置座標の測量（20点）を行い検証点としました（図-1左）。GNSS測量による標高値の取得は現地におけるデータ取得と国土地理院によって全国に設置されている電子基準点の情報を用いた、後処理キネマティック法（PPK：Post Processing Kinematic）という手法を用いて行い（光珠内季報No.194にて紹介している『RTK』を後処理で行ったものを『PPK』と呼称する）、斜面に対して横断、縦断するように検証点を設置しました。本試験で精度検証に用いるGNSSの測定精度は後処理の結果、水平精度3 cm、垂直精度4 cmになりました。

地上に設置した参照点を基にSfM多視点ステレオ写真測量を行い、三次元点群データを作成しました。SfM多視点ステレオ写真測量は使用した参照点に対して、平面誤差0.95 cm、垂直誤差4.3 cmで三次元点群データを作成することができました。三次元点群データより正射画像、表層モデル、地形モデルを作成しました（図-1）。

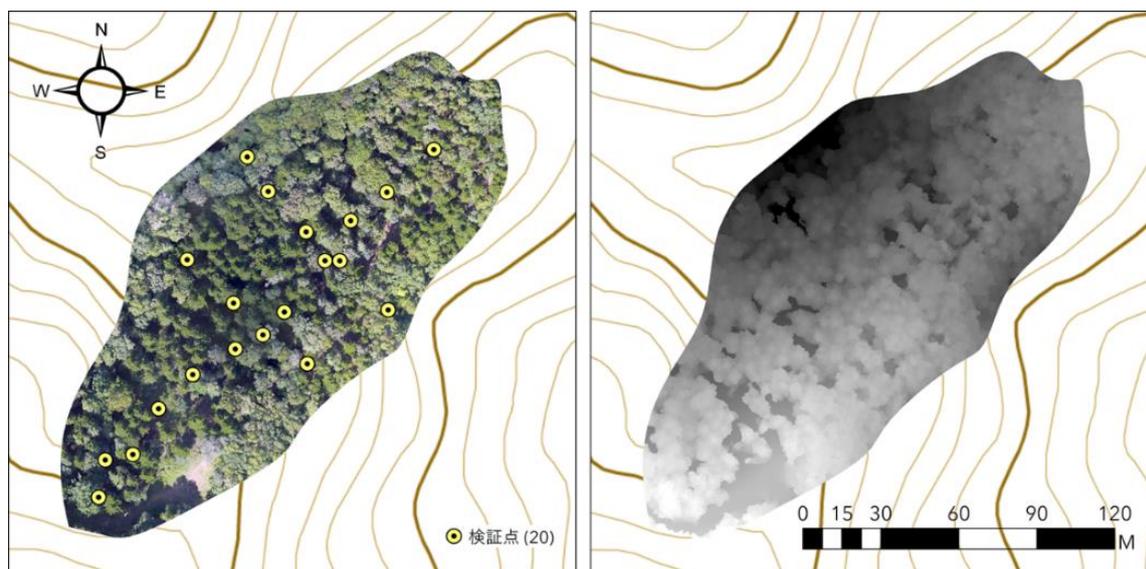


図-1 UAV SfM多視点ステレオ写真測量で作成した正射画像（左）と表層モデル（右）
（出典：地理院タイルを一部改変）

実証試験をした範囲を図示。黄丸は検証に用いたGNSS測量位置

GNSS 測量で取得した標高値を正値とし、UAV-LiDAR、航空機 LiDAR、10 m DEM、UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量の 4 タイプの地形モデルから取得した標高値を正値と比較することにより、各地形モデルの精度を検証しました。

樹高の精度検証で用いた樹冠モデルは地形モデルの精度検証で用いた各地形モデルと UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量から作成した表層モデルの差分から導いた 4 タイプのものを使用しました。各樹冠モデルと正射画像を用い、道総研林業試験場開発の AI (AI については“北海道立総合研究機構林業試験場年報 令和 2 年度：UAV を活用した低コストの森林調査手法の研究”をご参照ください) を用いトマツの樹冠だけを自動抽出し、自動抽出した樹冠内の最高点を樹高としました。現地計測樹高は Vertex (Haglöf 社製) を用いて取得しました。

地形モデルの精度検証 ～地表はどのくらい正確にとらえられている？～

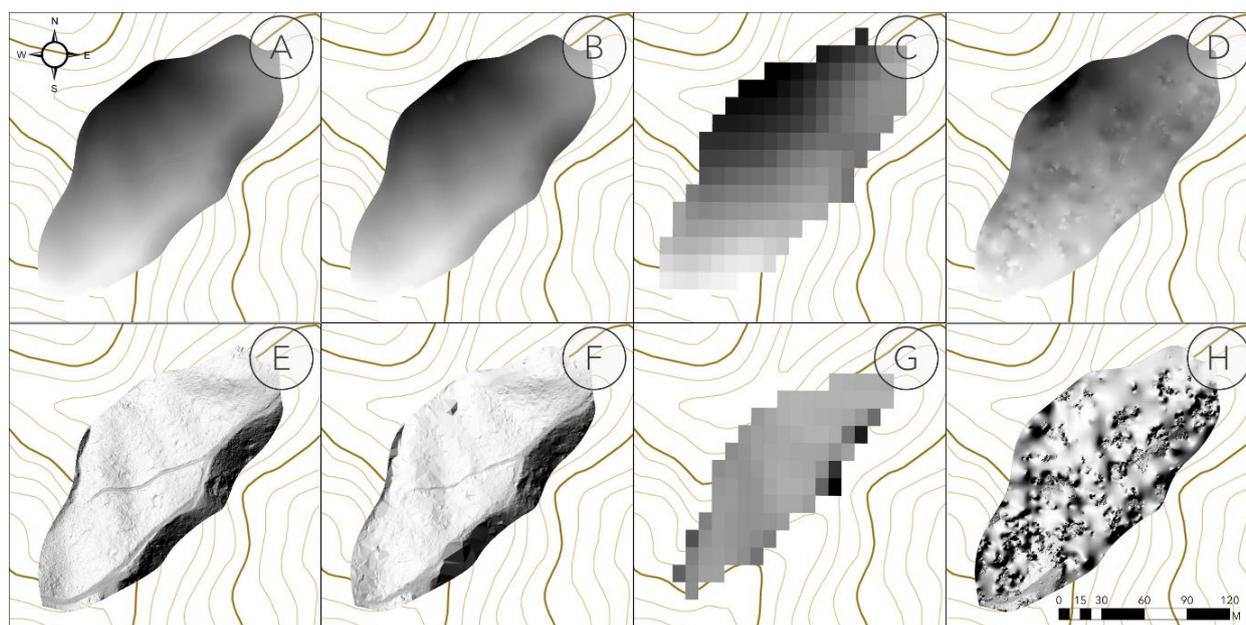


図-2 タイプ別の地形モデル(A~D)と陰影起伏(E~H) (出典：地理院タイルを一部改変)

A, E は UAV-LiDAR を B, F は航空機 LiDAR を C, G は 10 m DEM を D, H は UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量を示す。地形モデルは黒から白になるにつれ標高が高くなっていることを示す。

図-2 において各地形モデル及び陰影起伏図(陰影により起伏を強調した図)を確認すると、LiDAR では航空機 (B, F) より UAV (A, E) のほうがより精細に地表をとらえていることがわかります。また 10 m DEM は解像度が荒く (C, G)、UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量では不自然な平滑面や凹凸が見られません (D, H)。これらは地表をとらえることができず、値が欠損しているか、もしくは誤って植生を地表面として捉えていることが原因だと推察できます。図-3 に各地形モデルと GNSS 標高の比較を示しました。比較の際、地形モデルの解像度は 4 タイプの中で一番細かい UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量の解像度に統一し 5.6 cm になるよう内挿補間しました。UAV-LiDAR (A) と航空機 LiDAR (B) では 2 m 以下の誤差で標高値を取得することができました。また、40 cm ほど UAV-LiDAR のほうが高精度に標高値を取得することができました。一方、10 m DEM (C) と UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量 (D) の 2 つは大きな誤差が発生しました。10 m DEM ではもともとの地形図の精度と解像度が要因で誤差が大きくなったと考えられます。UAV-SfM 多視点ステレオ写真測量では一部の点では高精度に計測することができましたが、地面の見えていない箇所が集中しているところで大きな誤差が発生したため全体の誤差が大きくなったと考えられます。

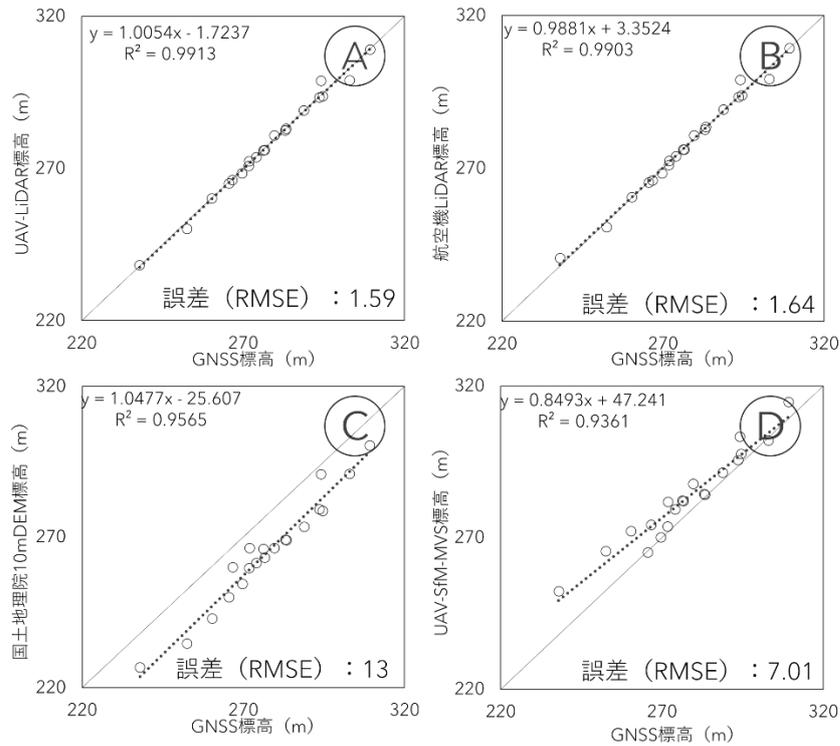


図-3 各地形モデルとGNSS測量による標高の関係

A~Dは図-2と同じ。実線は1:1の線を示し、点線は回帰直線を示す。グラフ中に各地形モデルにおける回帰式、相関係数、誤差を示す。X軸は地形モデルとの比較に用いたGNSSで取得した標高値を示し、Y軸は各地形モデルから取得した標高値を示す。

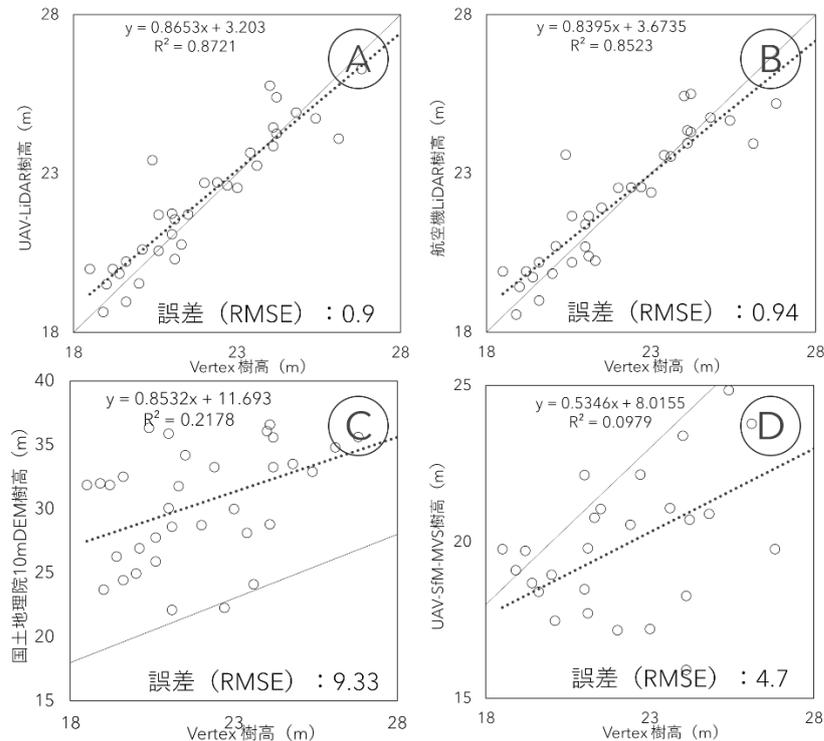


図-4 各樹冠モデルより計測した樹高と現地計測樹高の関係

A~Dは図-2と同じ。実線は1:1の線を示し、点線は回帰直線を示す。グラフ中に各樹冠モデルにおける回帰式、相関係数、誤差を示す。X軸は樹冠モデルとの比較に用いたVertexで計測した樹高を示し、Y軸は各樹冠モデルから取得した樹高を示す。対象としたトドマツは林冠に達したもので、AIによる樹冠抽出と位置が一致したもののみ(32本)

樹高の精度検証 ～樹高は正確に測れるのか？～

図-4に各樹冠モデルから計測した樹高と現地計測樹高の比較を示しました。地形モデルの精度検証と同じ傾向が見られました。LiDARを用いた2つの計測(A:UAV, B:航空機)では1 m以下の誤差で計測することができました。これは、LiDAR計測の精度が高いことに加え、AIで検出した樹冠内の最高点を樹高としたため、樹頂点を正しく選択することができたためと推測できます。10 m DEM(C)で計測したものは誤差が大きく、相関係数も低いため、樹高の測定結果として扱うことは困難であると考えられます。UAV-SfM多視点ステレオ写真測量(D)も同様に誤差が大きく、相関係数が低いのですが、一部精度よく計測できているものもありました。林道近くや林冠ギャップなど、地表面が計測できる可能性がある場所では、樹高計測を行える可能性があります。

まとめ

本事例からLiDARを用いた地形モデルを使用した場合、高精度に樹高が計測できることがわかりました。比較的地形計測の誤差が発生しやすいといわれる急傾斜地においてよい結果が得られたことから、緩傾斜地の多い北海道では多くの場所で同程度以上の精度で樹高が計測できることが期待できます。今後、安価なLiDARセンサの開発によって現地のUAV計測で取得したデータのみを利用して、簡易に高精度な地形モデルが取得できる可能性も示唆されています。道総研林業試験場ではより安価で高精度に森林計測する技術の開発を進めていく予定です。

一方で、10 m DEMやUAV-SfM多視点ステレオ写真測量の地形モデルを用いた場合、樹高が高精度に計測できない場合があることが示唆されました。10 m DEMを地形モデルとして利用した樹高計測を行う場合、樹高計測を高精度に運用できないことを考慮し、標本抽出による樹高精度の確認などを併用し運用することが必須です。UAV-SfM多視点ステレオ写真測量で作成した地形モデルを利用して樹高計測を行う場合、間伐直後など林分密度が高すぎず計測範囲内に適度に地表が見えている箇所が確保されているかの確認が必要です。

謝辞

データ提供・現地調査では北海道十勝総合振興局森林室および北海道水産林務部道有林課の協力を得ました。現地調査の際は特に大坪器氏・渡部聡太氏に協力いただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- ・蝦名益仁・速水将人・竹内史郎・大野泰之・中田康隆(2020)高精度位置情報の取得—低価格2周波GNSS受信機の可能性—。光珠内季報 194
- ・北海道立総合研究機構林業試験場(2021) UAVを活用した低コストの森林調査手法の研究。北海道立総合研究機構林業試験場年報 令和2年度

(森林経営部経営グループ)