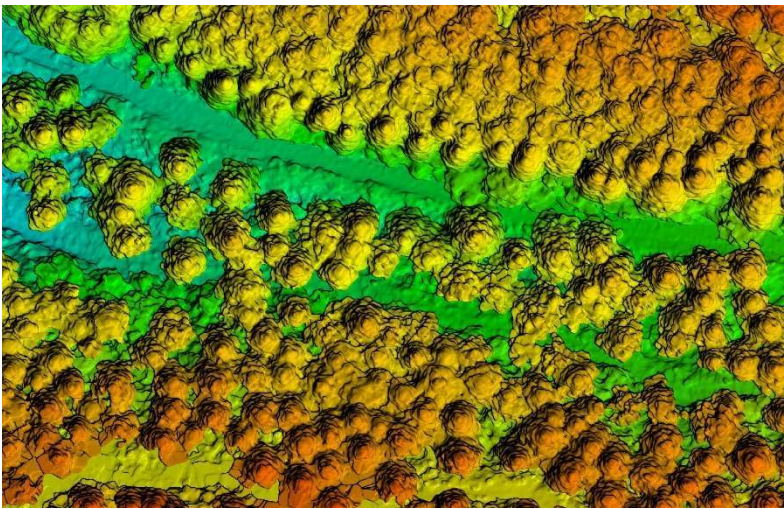
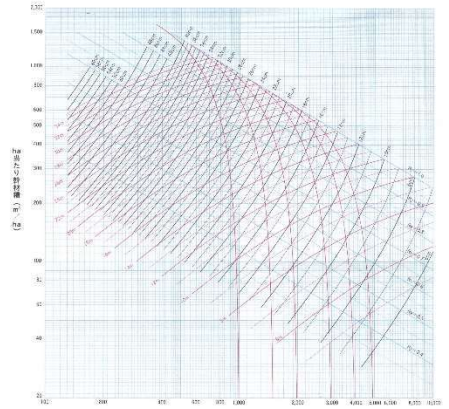


ドローン空撮による森林調査



9

北近畿・中国地方 ヒノキ林分密度管理図



2024年6月
岡山県農林水産総合センター
森林研究所 林業研究室

目次

I はじめに

- 1 持続的な森林経営のために1
- 2 森林情報取得の方法1
- 3 ドローンを利用した森林調査2

II 森林の空撮

- 1 飛行計画4
- 2 撮影条件の設定5
- 3 現地撮影6

III 空撮画像の処理

- 1 DSM(Digital Surface Model)の作成6
- 2 DCHM(Digital Canopy Height Model)の作成8
- 3 樹頂点抽出と樹高の判読10
- 4 林分材積の算出13
- 5 その他の解析14

IV 林分データの推定精度と適用条件

- 1 立木密度と材積推定の一例15
- 2 適用に当たっての留意事項15

参考文献

I はじめに

1 持続的な森林経営のために

森林の機能を高度に発揮させ、かつ持続的に利用していくためには、日本の森林の4割を占める人工林の適切な管理と計画的な利用が求められます。人工林の利用に当たっては、その資源の賦存量を把握し、種々の計画とそれに基づく施業に反映させることが不可欠です。また、林業の採算性を向上させるために、施業提案や設計に当たって、省力的でありながら、精度良く森林の現況を調査し、推定することも求められます。このような要求から、人工林資源量の調査や推定の方法としては、後述する様々な技術が開発されてきました。他方で、これらの技術によって得られる人工林データの予測値には、その方法ごとに異なる特性があります。それをよく理解した上で、用途や目的に応じて適切に使用する必要があります。

昨今は、林業の成長産業化に向けて様々な取り組みがなされていますが、とりわけ森林情報の分野ではドローン等を活用した森林データのデジタル化やICTスマート林業の普及が求められています。これに対応し、林業分野の民間事業者等においても、ドローンやICT技術を用いた装置の導入が進んできており、これらの有効な利用方法に関する技術確立が急務となっています。ドローンを利用した森林計測の技術は、昨今、急速に進化しており、測位精度を飛躍的に高めるRTK(Real Time Kinematic)測量やドローンに搭載できるレーザーモジュールなども比較的安価に入手できるようになってきました。一方で、森林の調査でこれらの装置を効果的に使いこなすためには、取得データの解析に一定の知識を必要とすることや、精度を高めるための現地調査とそのデータの統計的処理が求められる場合があるなど、必ずしも容易ではありません。

この冊子では、ドローンを使用した空撮画像と地表面のモデル(DEM)を用いて、林木の成立本数(立木密度)と林分材積を比較的簡易に予測する方法を紹介します。なお、この内容は、令和元年度から5年度まで実施した「高齢級人工林の資源量推定に関する研究」の一部として行った調査に基づいています。

2 森林情報取得の方法

人工林の資源量等の現況を知るためには、いくつかの方法が挙げられます。

最も簡易な方法としては、成長モデル等を使用した予測値があります。これは林分収穫予想表や森林簿等に掲載された数値として参照されているものです。ここで使用される数値は、実測した林分データに基づいて統計解析により調整された、林齢と平均胸高直径及び平均樹高の関係を表す成長曲線や成長モデルと呼ばれる関数に基づきます。これにより、平均胸高直径、平均樹高及び林分材積について、林齢(樹齢)ごとに代表的な値を知ることができます。樹木の成長は、地域ごとに一様ではないため、一般的には調整された成長モデルを地位指数(立地条件の指数)等で細分化し、予測精度が高まるように工夫されています。未知の林分であっても、樹種や林齢が与えられれば、各林分の地位に応じた値を得ることができ、広域的な

管理計画等に利用されます。地位等級さえ決定していれば、現地に行くことなく、図上で予測が行える点で最も省力的な方法です。

より正確な林況を知りたい場合には、現地に赴いて個々の樹木の樹高や胸高直径を調査します。知りたい範囲の全ての樹木を面的に調査する方法を、毎木調査といいます。毎木調査は膨大な時間と労力を要しますが、稀な現象を捉えやすいので学術調査等で行われる方法です。林業の施業提案や設計に際しては、対象となる林分の一部を切り取って調査し、その結果を林分の代表値として扱う「標準地調査」が行われることが一般的です。標準地は、その林分の中で代表となり得る最も標準的な区域に設ける必要があります。また、対象となる林分の現況にばらつきがある場合には、複数の標準地を設けて、調査結果を調整するなどの配慮が必要となります。標準地の面積が大きいくほど、得られるデータが調査対象林分の現況に近づきやすくなりますが、その分手間がかかります。標準地の設定場所、箇所数、面積の決定には、一定の技術や知識を要します。

最近では、現地調査の労力を軽減させるツールとして、林内で使用できるレーザー計測装置が開発され、各所で導入が進んでいます。これらの装置を利用することで、比較的広い面積の毎木調査を簡単に行うことができるようになりました。それぞれの装置には、スキャニングモジュールや専用の解析ソフトに特性があり、各測定値や解析結果の各項目の精度に長短があるため、運用に当たっては、装置の特性をよく理解して使用することが大切です。

もう一つの方法が、本冊子で紹介するような、航空機やドローンにより上空から森林を調査するものです。こういった方法は、リモートセンシングと呼ばれ、かなり以前から開発が試みられてきた分野です。初期の頃は、衛星画像や航空写真から、立体視して地形の概略を捉えたり、色相解析によって樹種(林種)を推測したりといった技術開発が盛んでした。最近では、センサーの種類や、得られた情報の電磁的処理の能力と統計的手法の技術の向上により、森林のリモートセンシングでも、本数や蓄積などの資源量情報を解析できるようになりつつあります。

3 ドローンを利用した森林調査

様々な用途のドローンが普及し、森林調査の分野でもドローンを導入する動きが広がっています(図 1)。大面積で複雑な外観を有する森林・林業分野でドローンを使用することは、他分野にも増してそのメリットは大きいと言えます。これまで簡単に到達できなかった場所や普段は見ることのなかった上空からの様子を、比較的簡単に観察でき、また同時に映像として記録・保存することもできるようになったからです。

森林における撮影用ドローンの最も単純な使用法は、病虫被害木の探索など、映像を利用したリアルタイムの観察です。病虫害の発生状況や林地における土砂災害等の面的な広がりや、踏査のみによって把握する従来の方法は、膨大な労力と時間を要するものでしたが、ドローンを活用すれば、ある程度の面積の概況を短時間で知ることができます。調査時に撮影した画像は、その時点における状況と位置を記録し、保存しておくことができます。これらの記



図1 森林調査で利用されるドローンの一例

カメラのみを搭載した撮影用ドローン（写真左と中）や、センサーを任意に交換できる調査用ドローン（写真右）がある。この他に、農薬散布や資材運搬に使用できる大型の産業用ドローンも林業分野で活躍し始めている。

調査目的や対象地の条件に応じて使い分けている。本冊子で紹介する方法には、高画質で撮影ができれば、いずれのドローンでも対応可。

録は、森林の経時変化の比較にも活用できます。こういった用途は、特に事後の画像処理を要するものではなく、カメラ付きドローンの機体だけ購入すれば実施可能になります。

次に、複数の撮影画像を結合処理してGIS（地理情報システム）で活用できる「オルソ画像」にすることで、GIS上で距離や面積を簡易に計測できるほか、境界管理などに役立てることも可能です。オルソ画像の作成に使用する画像は、その作成に当たって求められるいくつかの条件を満たすように意図して撮影する必要があります。詳しくは、国土交通省のホームページから、「公共測量の作業規程の準則」を参照してください。オルソ化の処理は、フリーソフトで可能なものもありますが、専用のSfM（Structure from Motion）ソフトを購入するか、オルソ化のクラウドサービスを利用するのが、コストはかかりますが手軽で一般的です。

ドローンの機種によっては、備え付けのカメラ以外の各種センサーを取り換えて使用できるものがあります。多波長センサーカメラは、異なる波長の光を別々に感応するセンサーで、農業分野では、例えば稲の生育状態を知る方法として実用化されています。サーマルセンサーは、対象物の温度を可視化して記録するセンサーで、コンクリート構造物の点検や野生動物の観察などに使用されます。また、ドローンに搭載できる小型のレーザーモジュールも、ひと昔前と比べるとかなり安価になり、森林調査に適用できるレベルになってきました。ただし、レーザー計測で得られたデータから、林木の情報を知るには専用のソフトウェアを使用するか、現地調査等により自ら相関解析を行う必要があり、その点は航空機レーザー計測を行った後の解析処理と技術的には変わりません。従って、必ずしも簡単ではないと言えます。当森林研究所では、これらの各種センサーや解析用ソフトウェアについても、森林分野での応用を目指した検討を行っています。

このように、森林・林業の分野でもドローンの用途の幅は広がりつつあり、これまでできなかった様々なことが可能となり始めています。しかし、多機能で高性能な機体やセンサーが手に入るからといっても、高度な森林解析等を行うのは、やはりまだややハードルが高いと言わざるを得ません。

そこで、森林調査でドローンを最大限活用し、省力的に森林調査方法を行う選択肢のひとつとして本冊子のような方法を検討しました。この冊子で紹介する方法は、空撮用ドローンと SfM処理をする方法(ソフトウェアかアウトソーシング)があれば、あとはフリーソフトの QGIS 上で調査(立木密度と林分材積の推定)を完了させることができます。

II 森林の空撮

この冊子で紹介する方法の最も特筆すべき点は、低高度を飛行するドローンによる空撮画像であれば、かなり精緻な林冠高モデルが作成できるという点にあります。そのためには、ブレや滲みの少ないシャープで奥行きのある撮影画像の取得が求められます。以下の項では、そのための飛行と撮影に関する留意点を紹介します。なお、これらの留意点は、精密な林冠高モデルを作るのに有効だけでなく、歪みやノイズの少ないオルソ画像を作る上でも大切なことが多く含まれていますので、普段からドローン空撮の際には心がけておくことをお勧めします。

実際のドローンの飛行は、法令や自主マニュアル等に則って安全に配慮して行わなければならないことは言うまでもありません。特に以下に記述すること以外の点についても、通常のドローン運用と同様に、適切な運用を心がけてください。

1 飛行計画

飛行の計画に当たっては、調査したい林分のアクセス条件、地形、面積等について現地を見等により事前に把握しておく必要があります。特に、撮影時のドローンの離発着の地点については、十分な広さがあるか、近くに配慮が必要な施設等がないか、上空が十分に開けているか、調査区域全体の上空が概ね見通せるか、飛行空域との間に高圧送電線がないか、などの事前確認が調査の安全性と効率を大きく左右します。

本冊子の方法において、もっとも重要なポイントのひとつが、調査対象地域の近くで、地表面が撮影できる場所を事前に探しておくことです。人工衛星の配置等によりますが、GPS測位で最も誤差が生じやすいのが、高さです。この方法では、撮影画像から作成した DSM と、既存の DEM の高さの差を、双方が同じ場所を示していることが確実な地表面の位置で合わせて、GIS 上で補正します。従って、調査(撮影)の際に、調査プロジェクトの中で必ず地表面が見える箇所を同時に撮影しておく必要があります。このとき、撮影する地表面は、DEM を作成した時にも同じ高さで存在していた場所である必要があるため、道路や古い作業道などで地形の変化が少ない場所を選定することが重要です。なお、この高さの補正は、樹高推定の誤差を小さくするためのものなので、作業道の表面の攪乱などの小さな変化にまで極端に神経質になる必要はありません。より正確に位置を合わせるためには、地表が見える撮影箇所を離れた場所に 2 箇所以上設けることや、建築物のように形の明確な対象物が写るように工夫することも有効です。

2 撮影条件の設定

ドローンに搭載されたカメラは、ある程度画素数が大きいものが一般的で、あまり設定に気を遣わずに撮影しても高画質の写真が撮影できます。しかし、SfM処理やその後のDSMの生成に当たっては、少しでもノイズやブレの少ない明瞭な写真を撮影することが、精度の向上にとっては大切であると言えます。

カメラの設定は、シャッタースピード(露光時間)、絞り値(F値)、センサー感度(ISO)を調整して行います。シャッタースピードが速ければ、ブレの少ないシャープな写真が撮影できます。同じ条件でシャッタースピードを速くするためには、絞りを開く(F値を下げる)か、センサー感度を上げる(ISOの設定値を上げる)必要があります(図2)。センサー感度は、高くしすぎると写真にノイズが現れやすいので、できれば、ISO:200 以下で撮影するのが望ましいところです。絞りを開くと、被写界深度(ピントが合う奥行き)が浅くなりますが、上空数十mから撮影するドローン空撮では、あまり気にする必要はありません。上空を飛行しながら撮影するドローンカメラでは、写真の画質はシャッタースピードに最も影響を受けやすいので、まずシャッタースピードを 1/1,000 秒程度に設定します。その状態で、現地で本番の撮影を行う前に、テスト飛行を行い、数枚撮影してみます。その時、送信機のモニターで全体がやや暗く見える程度が最適です。作業道など色合いの明るい箇所では、露光が多すぎると起伏に由来する陰影などの特徴が失われがちなので注意が必要です。植生等の部分がモニターで見てやや暗く、



図2 撮影条件の違いによって生じる画質の差の一例

シャッタースピードが遅すぎる場合や ISO を高く設定しすぎると、画質にノイズやボケ味が生じやすい。同程度の露光量でも、拡大してみると、感度を上げすぎた左の写真 (ISO1600) は、右 (ISO100) と比べて明らかに画質が粗いことがわかる。多くのドローンは、カメラの撮影条件はオートモードがデフォルトになっているが、マニュアルに切り替えて適正な条件で撮影するよう心がける。マニュアルモードでも、シャッタースピードを上げすぎると、露光が足りない場合に自動的にセンサー感度を上げて撮影することがあるので、注意が必要。ここに挙げたような撮影画像の差は、調査中にモニターで確認することができず、事務所に帰ってから気づくことになるので、撮影条件の数値をこまめにチェックしながら、調査を進めるのが望ましい。

例えばフォトレタッチソフトの明るさの調整で対象物が見えるようにできる程度であれば、画像処理には問題ありません。

天候の悪い日や谷あいの地形の撮影で暗すぎる場合は、シャッタースピードを長めに設定する必要が生じますが、その時には、ドローンの飛行速度を下げるか全ての撮影地点でホバリング状態で撮影するモードに設定して飛行するのが望ましいでしょう。

3 現地撮影

ドローンの飛行は風のない薄曇りの日が最も適しています。樹木の枝葉が遠目に見てわかるほど風で揺れているような時は、安全な飛行はもちろん、撮影にも不向きです。なお、国土交通省が示した「無人航空機の飛行マニュアル」では、「風速 5m/s以上の状態では飛行させない」とされています。また、日射が強く、明暗のコントラストが強すぎる場合も避けたほうが無難です。やむを得ず、日射の強い日に撮影する場合には、画像に写る影が極力少なくなるよう、正午に近い時間帯に撮影するといった配慮が必要です。

飛行高度は、カメラの性能にもよりますが、地上解像度(GSD; Ground Sampling Distance)が概ね3cm/ピクセル以下となるような高度で撮影すれば、ここで紹介する方法には十分な画質であると言えます。飛行高度が低すぎると、地上解像度は上がりますが、同じ面積に対する撮影枚数が増加し、調査に時間がかかることとなります。また、画面の端の方に映った対象物の視野角が大きくなりすぎ、その後の処理で他の画像との共通ポイントと認識されにくくなる点が増えてしまい、結果的に画像の結合処理が適切にできない場合があります。

高度を一定にした自動飛行ルートを設定して調査を行う場合、対象林分の比高が高い場所では、相対的に対象とカメラとの距離が近くなり、ラップ率が不足する場合があります。こうした影響は、飛行高度とラップ率をある程度高めに設定して調査を行うことである程度軽減できます。もちろん、対地高度を一定にして飛行させることや、傾斜の急な林分では飛行プロジェクトを複数回に分割して行うなどの配慮を行うのが、手間はかかりますがかえって効率的です。

III 空撮画像の処理

1 DSM(Digital Surface Model)の作成

DSM は、ドローンから撮影した画像の表面(見えている部分)を 3 次元的に表現したモデルです。オルソ画像を作るためのソフトウェアでは、SfM(Structure from Motion)という処理によって、同じ対象物を写した複数の画像のそれぞれの共通点の写り方からカメラと対象物の相対位置を解析し、写っている対象を立体として再構築します。つまり、森林の部分では見えている樹冠表面、作業道等が見えていればその地表面、建物は見えている表面などが DSM として表現されます。なお、この冊子の作成に当たって使用したのは「Pix4D mapper」というソフトウェアです。撮影してきた画像をソフトウェアに取り込んで、SfM により、一旦立体