航空機レーザ計測による広葉樹林の樹高、樹冠面積の抽出

Extracting height and crown area of single tree in broadleaved forest by application of airborne laser scanner system

蔡 斌*・秋山 侃*・魏 宏**

Bien TSAI, Tsuyoshi AKIYAMA and Hong WEI

Abstract : We discuss the possibility of surveying the height and crown area of single tree in broadleaved forest by application of airborne laser scanner system. The process of this study includes: interpose the ground data for preparing accurate DTM (Digital Terrain Model) and DHM (Digital Height Model), extracting top of crown using method of segmentation-based in DHM, create crown area by means of segmentation on defined cross-section which the height can be designated. In result of our study, all of bigger trees, which compose upper crown-layer, had been extracted and the crown area on 11m above ground had been computed.

1. はじめに

林業・林学の分野では、毎木調査という伝統的な手法が森林調査の基本として今日でも広く利用されている。この調査方法は立木材積の推定などに対しては高い精度が得られるが、樹高や樹冠面積の計測は、測距器などを通した間接計測となる。このため、山岳地の森林地域では林冠による妨げや地形の影響を受けやすく、精度の高い計測は困難とされている（荻原・野口, 1969）。一方、森林調査に応用された最初のリモートセンシング情報は航空写真で、写真の目視判読により、対象林分の樹種や樹高、樹冠サイズを判断・推定し、林分レベルの情報を取得した。とくに航空写真を立体視することにより、立木本数の推定では高い精度が得られている（中島, 1966; 樋渡, 1972; 渡辺, 1980）。しかしこの方法による樹高の判読は、太陽光による林分の地面投影の長さおよび面積で行うため、単木レベルの樹高判読はできない。樹冠サイズは格子板を使っ

て目視により判読しているが、この方法にも判読者の知識と経験が必要であり、そして地形や樹冠影の影響も加わると考えられる（加藤, 2004）。

近年、航空機搭載型レーザスキャナが森林調査に導入され、林分レベルから単木レベルまでの計測に広く応用されている。その成果をまとめると、次のようなものが挙げられる。

- (1) 林分年齢および林冠構造の把握（Hall ら, 2005; Lefsky ら, 1999）: 林分高さ、立木疎密度とその特性から林齢段階の推定; 波形レーザ（Waveform Laser）を使用した林冠構造の解析など。
- (2) 森林バイオマス推定（Hyyppa and Hallikainen, 1996; Naesset, 1997）: 林分高さと樹冠被覆度の測定から推定。
- (3) 単木レベルの樹高、樹冠サイズ等の推定（Popescu ら, 2002; Andersen ら, 2005; 米ら, 2002; Ritchie ら, 1993）: 樹高モデル DHM（Digital Height Model）を用い、樹木高を抽出する。そして、波形レーザにより樹冠高さや最大面積を計測。

このうち、(3)に関する研究は元来の森林調査項目に直接関係している。しかしこれまでほとんどの研究は針葉樹を対象としており、広葉樹あるいは混交林に関する研究は少ない。その一因として、広葉樹種樹冠の頂点は針葉樹と比べて不明確で抽出しにくい。そして、高い林冠密度や広葉樹林によく見られる密生した

* 岐阜大学流域圏科学研究センター

〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1

Gifu University River Basin Research Center

**岐阜大学地域科学研究科

Gifu University Graduate School of Regional Studies
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 45, NO. 3, 2006

林床植物の遮断により、地表面からの反射点を取りにくいいため、本数や樹高の推定に誤差が生じる。

本研究は、岐阜大学流域圏科学研究センターの高山試験地（冷温帯落葉広葉樹林）を対象として、航空機搭載のレーザ計測データを用いて、地面レイヤの補正処理により作成した DHM から樹冠頂部の抽出や、レーザの 3 次元特性を用いた層別の樹冠面積の抽出手法など、広葉樹林対象の処理手法について検討した。

2. 研究対象サイトの概要

本研究の対象サイトは岐阜県高山市にある岐阜大学流域圏科学研究センター高山試験地（中心位置座標；東経137°25'22"，北緯36°08'44"）である（図1）。当サイトは乗鞍岳南西斜面上にあり、最低点は1,390m，最高点は1,430m，平均標高は1,411.5m，平均傾斜度は20°である。対象域は1ヘクタール（100m×100m）の面積からなり、地形は馬蹄型をなし、南斜面と北斜面に区分され、間に挟まれた部分は西向きの谷である（賈ら，2002）。年平均気温7.2℃，年平均降水量2,318mm（高山試験地気象観測データより，1980～2003年），積雪期間は例年12月上旬から翌年の4月中旬までで，WI（温かさの指数）は62，CI（寒さの指数）は-34である。この林は約50年前に伐採された冷温帯落葉広葉樹の二次林で，林内にはミズナラ（*Quercus mongolica* var. *grosseserrata* Rehd. et Wils.），ダケカンバ（*Betula ermanii* Cham.）とシラカンバ（*Betula platyphylla* Sukatchev var. *japonica* Hara.）が優占して，上層林冠を構成する。下層木は主にこの三種類の幼木に加え

て，カエデ科のイタヤカエデ（*Acer mono*），ハウチワカエデ（*Acer japonicum*），ウリハダカエデ（*Acer rufinerve*），ニシキギ科のツリバナ（*Euonymus oxyphyllus*），そしてスイカズラ科のオオカメノキ（*Viburnum furcatum*）などによって構成されている。林床植物のほとんどはクマイザサ（*Sasa senanensis* Fr. et. Savat. Rehder）であり（酒井ら，2002），とくに斜面上で密生する傾向が認められる。針葉樹種としてはウラジロモミ（*Abies homolepis* sieb. et zucc.）が散見されるが，サイト内にはわずか数本しか存在していない。1ヘクタールのサイト内で胸高直径（DBH）が3 cm 以上の生育している立木本数は1,818本，その平均 DBH は11.8cm である。立木分布は地形に依存し，斜面で多いのに対し，谷部の本数が少ない（川村ら，2001）。

高山試験地（対象サイト）では，樹木成長調査（DBH 計測）がほぼ毎年行われている（Ohtsuka ら，2005）。本研究に使われた DBH は，2000年の調査結果を用いた。そして，樹冠投影図は川村ら（2001）の計測結果を使用した。また，検証用データとして，試験地内で DBH が15cm 以上の生育している立木については，測高ポールを使用して，樹高計測をおこなった（調査日は2004年10月20日，2005年4月23日でした）。

3. レーザ計測データの前処理

レーザ計測は2002年8月8日午前10時に中日本航空株式会社が所有するヘリコプタ搭載型地形計測システム（NEC 社製）によって行われた。計測範囲は対象サ

図1 研究サイトの位置（左）と地形（右）

イトを含む東西800m、南北6,000m、計測コースは4本、対地飛行高度500m、飛行速度は40km/時であった。レーザ発射頻度は20,000回/秒、スキャン頻度24回/秒、スキャン角度45度、測距精度±20cmで、パルスはファーストパルスとラストパルスが収録された。空間解像度（面積1平方メートルに当たったレーザ点数によって換算した平均値）は50cmであった。取得したデータから、慣性航法装置によって得られたヘリコプタの位置と姿勢データを用いて揺れを補正した結果を参照して、ランダムな計測点のX座標、Y座標および高さの値を算出した。

レーザ計測範囲から研究サイト（試験地）を切り出す処理には、正確な位置座標が必要である。しかし、林内におけるGPSの平均定位精度は7mと非常に低い（GPS Pathfinder, Trimble社、米国、使用した場合）。このため、本研究では、トラバース（Traverse）測量方法（森，2001）を利用した。林内ではGPSを使わずに、Impulse+MapStar [IM200]（レーザーテクノロジー社）によって試験地内に設置された10m間隔121箇所の杭の相対位置のみを測定した。一方、遮るものない林外に設置した基準点で取られたGPSの座標（精度<1m）と林内点の相対位置関係によって各杭に座標をあたえた。

このように取得した座標を用いて、対象サイトを計測範囲から切り出した。

3.1 計測データの自動分類および補正

ここでいう分類とは、DTM（Digital Terrain Model, 数値地形モデル）とDSM（Digital Surface Model, 数値表面モデル）を作成するために、計測データに含まれている地面反射点と地面以外の反射点をそれぞれに分ける作業である。本研究では、レーザデータ処理に最も頻繁に使用されているソフトウェアTerraScan（フィンランドTerrasolid社製）を使用し、計測データを地面点群と植生点群の二つの点群に分けた。しかし、標高変化の大きい地形や、林床植物が存在した場合は、その植物の高さや密度などの影響で、地面点の自動分類はうまく行えない。このような場合は、ソフト画面上で適当な奥行きを横断面を切って、目視判断によるフィルタリング（地面点を出す作業）を行って自動分類結果を修正した。なお、奥行きの決め方としては、急激に変化する地形においても高い精度を保つため、緩傾斜地（斜面上部、谷底、傾斜≤15°）

には断面奥行き3m、急傾斜地（斜面、傾斜>15°）では断面奥行き1～2mの間隔で補正を行った（蔡ら，2003；2004）。

3.2 地面点の内挿および樹高モデル（DHM）の作成

通常DHMは対応するDSMとDTMの差引計算によって求められる。しかし本研究では、密閉された林冠と、斜面上に密生しているササによる遮断のため、植生上と比較して地面に届くレーザ点の数が少ない。本研究では植生点群が平均18点/m²、地面点群は平均4点/m²であったが繁茂期での計測であり密閉された林冠と、ササや灌木の影響で地面に到達していない箇所が多くあるため、このデータを用いたDTMは微地形が反映されているとはいえない。そして、植生点群との対応ができないため、樹高計測には誤差が生じやすいと考えられる。そこで、大野・田村（2002）の考え方を参照し、まず植生点群に基づき地面点群補間用のグリッドを作成した。つぎに、3次たたまみ内挿法（Cubic Convolution Method）（式1）を用いて、地面点群を補間した。

$$f(u_0, v_0) = \sum_{k=0}^3 \sum_{i=0}^3 f(u_k, v_i) C(u_k, u_0) C(v_i, v_0) \quad \text{式1}$$

式の中で、 u, v はX座標、Y座標、 0 は求めたい点で、 k, i は周囲点を代表する。 $C(x)$ は内挿関数で、補間された点との距離に応じて変化する。

この処理により作成した地面点群データから、より平滑な地面点レイヤ（DTM）が作られる（図2）。そして、植生点群と点-点对応の特徴をもつため、この二つの点群データの対応点において、高さ座標の引き算で、樹高DHMを作成した。

図2 補間による地面点の増加状況
補間により地面点群の密度（右）が補間前（左）より増えたことを示す。背景は補間により作成した地形（TIN）、白いピンは試験地内10m間隔の杭位置を示している。

4. レーザ計測データの解析法

分割法(Segmentation-Based Method, 領域分割法ともいう)は光学画像上での領域抽出処理に広範に利用されている。その原理は画像中から同じ特徴をもつセルを抽出し、その領域を作成する。Hyypä ら(2001)は、フィンランド北部森林の合成開口レーダ(SAR)画像を使用し、セル輝度値の相違から最大値と降下趨勢を調べ、樹冠範囲を出した。ここで、画像セルの輝度は地形の影響を除去して、樹高の変化を反映していると考えられる。同じように、レーザ計測で計測点に反映されるのは、その点の3次元座標である。そこで本研究では、この手法を参照して、レーザ計測点の高さ変化をその点の特徴として、分割法を適用した。

4.1 樹冠頂部の抽出および樹高推定

樹冠頂部というのは、樹冠領域の中で最も大きな高さ値をもつセルで、この点の周辺にあるセルの高さはだんだん下降するという特徴がある(図3)。

今回用いた抽出処理の考え方は Hyypä ら(2001)

と同様で、作業の流れとしては下記のとおりである。

- ① 全セル(対象全域)の中で、最も大きな高さ値をもつセル P_0 を検出。
- ② P_0 を中心として、半径 R のエリアを作成し、含まれるセル $P(i, j)$ の高さ $H_{P(i, j)}$ と P_0 の高さ H_{P_0} を比較し、降下趨勢を調べる。
- ③ 比較結果の判断基準

$$H_{P(i, j)} < H_{P_0} \rightarrow \text{降下}$$

$$H_{P(i, j)} = H_{P_0} \rightarrow \text{頂点領域を拡大}$$
- ④ 半径 R を1セル単位で拡大し、ステップ②を繰り返す(レーザの空間解像度は0.5mであるため、最大三つのセル単位1.5mまで拡大した)。
- ⑤ R に適合する全てのセルに対し、降下趨勢が明確になれば、 P_0 は頂点であることが確認される。
- ⑥ ①～⑤を繰り返し、全ての樹冠頂部を抽出する。

なお、針葉樹種の樹冠が鋭角三角形であるのとは異なり、広葉樹種は丸味を帯びた鈍角三角形の樹冠頂部をもつため、周囲点の高さ値の降下する趨勢が明確にできない箇所がしばしば見られる(図4(左))。この場合は該当する地点の縦断面図(図4(右))を参照して、頂部であるか否かを確認した。

図3 樹冠頂部および周囲セル高さ値の変化
左図は P_0 (頂部) よりも周囲セルの高さが低いことを示している。
右図は頂部と周囲セルの輝度変化を示している。

図4 頂部特徴が不明確な樹冠の抽出

左図は頂部に数点が存在し樹冠境界が不明確な場合(円内)。破線枠は縦断面の幅と方向を示している。右図は頂部縦断面図。円内の数点は同じ樹冠に属することが判明(円内)。太線内が研究サイトである。

このようにして抽出した樹冠頂点の高さを樹高とした。

4.2 樹冠面積の推定

レーザ計測データは3D座標をもつことが一つの特徴である。この特徴を利用して、森林調査手法のひとつとしての層別刈り取り調査（伐倒調査＋樹木解析）（図5（左））をコンピュータ上で模倣し、層別の樹冠面積を計測できると考えた。

層別刈り取り調査と同様、レーザ計測データは指定した高さの横断面に当たる計測点を抽出することができる。それらの点に囲まれた面積は該当層の樹冠面積になる（図5（右））。レーザ層別刈り取り調査に対する利点としては、空間に散布する点群を利用でき、断面間隔を幾らでも狭めて作成できることと、自然状態（立木のまま）で計測できること、などが挙げられる。

解析方法を図6に示した。樹高推定結果を参照して、地上25mの高さに第一断面を作成し、その断面に当たった点は樹高25m以上の立木を代表する。次に24m、23m…と1メートルおきに下げて断面を作れば、樹冠領域が拡大していく。各層に分割法を適用し、セグメントを作成することにより、層別樹冠面積が求められる。

本研究では、樹冠面積の推定は地上25mから11mまで1mおきに行った。11m以下では、樹冠の遮断によるレーザ計測点が少ないため、正確なセグメントの作成が困難となる。

5. 結果および考察

5.1 樹冠頂部の抽出および樹高推定

樹冠頂部の位置座標および樹高推定の結果を図7に示した。樹高11m以上に限定すると、レーザ計測に

よって抽出された本数は583本である。一方、現地調査では、DBH15cm以上の立木本数は538本であり($R^2=0.871$)、レーザ計測では1割以上過大に毎木を抽出する傾向が認められた。その原因を調べるため、現地でDBH15cm以上の立木樹高計測結果と比較したところ（図8）、高さ18-19mの段階の本数において、レーザ推定値は現地計測値より大幅に過大評価している。地形図と照合すると、この段階の立木は斜面頂部に集中していた（図7）。現場で観察すると、この場所は樹木がとくに密生し、光への競争の結果、DBH15cm以下の立木も高い樹高をもつものがあつた。これに対して、斜面の高さ11-13mの段階には、現地計測の立木本数がレーザ推定本数より多かった。その原因はDBHが大きくても、樹高は林冠層より低いため、レーザに検出されなかった場合と考えられる。このような傾向は種による樹形特性と関連して、例えばミズナラ、カエデ類などに多く見られる。現場調査結果と比べた結果、本来検出されるべき太さのミズナラ23%、カエデ類18%が抽出されていないことが判明した。また、レーザ計測日と現場調査日の時間差によって現場状況の変化（枯死木や大型測定施設などを設置するための伐採など）が生じていることも明らかになった。そして、レーザ光が平均0.5mの空間解像度であるため、樹冠頂部を外して計測した場合は、抽出された本数にも多少の誤差が発生することも考えられる。

5.2 樹冠面積の推定

図9（左）は11m断面で作成したセグメントにより作られたポリゴン形式の樹冠図である。現地樹冠投影図（図9（右））と比較する際、空中からと地面から見た同じ樹冠は、大きさや位置などが違うことを配慮し、双方で判読できる55本のサンプル樹冠を選んで比較した。その際、種組成が実際の対象サイトにお

図5 層別刈り取り調査とレーザ計測

（左）層別刈り取り調査では、指定する間隔で樹木を切って、層別の断面積や葉量を調べる。
（右）レーザ計測では、指定する高さの断面を作成し、断面に当たる点群から面積を出す。

図6 層別セグメントの作成

緑色の枠は1 haの研究サイト(試験地)の境界、枠内の色の違いは異なる横断面で作成したセグメントを表現する。(1)高さ25mの断面。3つの頂点を抽出した。(2)25mの断面に24m~20mの5断面を加えた結果。樹冠領域の拡大と新たな頂点の抽出を示す。(3)更に19m~15mで5断面が加わる。(4)高さ11m以上の断面の合成。ほぼ全域で抽出を完成したことを示す。

図7 樹冠頂部の位置座標と樹高推定結果

左は樹冠位置と樹高のレーザ推定結果、右は現地樹木根元位置図。南斜面(上)と北斜面に樹木が多く分布していることを示している。左図の樹高は地上11m以上を2m毎に段切りしている。

図9 二つの方法による樹冠面積推定の結果の比較

ピンク色の点は検証用サンプルを示す。(左)レーザ推定による樹冠投影図。ポリゴン形式に変換することにより樹冠面積を推定した。異なる色は異なる樹高を示している。(右)現地調査に基づく樹冠投影図(川村, 2001より)異なる色は樹種を示している。

けるものと近くなるように心がけた。その結果を図10に示した。ここでレーザ推定値は樹冠面積を過小に評価する傾向がうかがえた。そして、小さいサイズの樹冠の場合は、値にばらつきがみられるが、樹冠面積が40m²を超す程度に大きいサイズの場合は、より安定した値がえられた。その理由として以下のような点が考

えられる。

現地調査により作られた樹冠投影図は、地面から観察した結果を表している。これと、空中から観察する場合では、視覚的に大きな違いがある。通常小さい樹冠の場合、周りの樹冠の影響で真の樹冠領域を抽出しにくく、過大/過小判断してしまう。一方、大きい樹冠

図8 樹高別本数のレーザ推定値と現地調査結果との比較
現地調査では胸高直径15cm以上の立木を対象とした。

図10 樹冠面積 (CA) のレーザ推定値と現地樹冠投影図との比較

点線は1:1ライン, サンプル樹冠数は55個体

は、周辺の樹冠層から突出するか、周囲の立木密度が小さいため、領域が抽出しやすい。また、地面から観察する場合、遮蔽のため下層木を最上層と誤判断することもあり、本数の判断にも影響を与える。また、実際の林内では、樹木が斜めに成長したりすることにより、樹冠頂部あるいは樹冠全体が根元座標と一致するとは限らない。しかし、この点についてはこの方法による限界と考えられるため、今回は樹冠位置と現地根元位置の関係は検討していない。

6. 結 論

(1) 本研究は、ヘリコプタ搭載型レーザスキャナによる計測データから単一木レベルの樹高および樹冠面積の推定を試みた。地形の影響を軽減するためには、計測データの自動分類に加え、補正によって植生点群と地面点群に分け、地面点補間、レイヤ引き算などの前処理が必要である。また、空中からとられたGPS座標は、高さによる地面点の位置ずれが生じる。このため現地観測による位置修正などの処理は、最も有効な座標取得手段であると考えられる。

(2) レーザ計測が3D座標をもつ特徴を利用して、分割法を適用することにより、広葉樹種の場合でも樹冠頂部の抽出がより高い精度で可能になった。また、広葉林によく見られる同じ株に数本の萌芽木を派生することに対しては、縦断面図の補充的な適用により、樹冠の誤判読の可能性は大幅に減少した。これらの方法で583本の樹木が検出され、これはDBH15cm以上の実測本数の約1割の過大評価であった。

(3) 層別セグメントの作成により、指定する層の樹冠断面面積が推定できた。現地調査による樹冠投影図と比較した結果、樹冠サイズが小さい場合の推定は不安定であるが、樹冠サイズが40m²以上の場合には安定している傾向がみられた。

本研究では、地上11m以下の部分、つまり下層木と林床植物についてはレーザ点が少なく、セグメントの作成ができないため、樹高や樹冠面積の判読や推定はできなかった。そして、空中レーザのみの計測では、生物量が最も多く含まれる樹幹材積の計算はできない。これらの部分については、今後、航空機レーザと地上レーザを併用して、表面と側面から樹冠範囲を確定し、そして11m以下の部分（下層木も含めて）について解析しようと考えている。また、この併用の解析手法の応用としては、各断面に当たる面積から樹冠体積を計測し、樹冠密度との関係を明らかにすれば、葉面積指数やバイオマスの推定が可能ではないかと考えられる。

本研究の一部は、21世紀COEプログラム「衛星生態学創生拠点」のもとに実施された。また、研究サイト内に設置した杭の位置測定には、岐阜県立森林文化アカデミーの竹島喜芳氏の協力を得た。

(受付日2005.9.6, 受理日2006.5.12)

参考文献

- 樋渡幸男, 1972. 南方森林の調査と空中写真(上), 森林航測, 94, pp.7-10.
- 賈書剛, 酒井徹, 秋山侃, 小泉博, 2002. 冷温帯林土壌圏の炭素動態 1 地形, 植生と土壌分布, システム農学会, 18(1), pp.26-35.
- 加藤正人, 2004. 森林リモートセンシング, 日本林業調査会, 東京, pp.32-45.
- 川村健介, 橋本靖, 酒井徹, 秋山侃, 2001. 冷

- 温帯落葉広葉樹林の林冠構成種のリーフフェノロジーが林床の光環境に及ぼす影響, 日本林学会誌, 83(3), pp.231-237.
- 中島 巖, 1966. 森林航測概要 (訂正版), 地球出版, 東京, 231pp.
- 荻原貞夫, 野口陽一, 1969. 森林測量学(再訂版), 地球出版, 東京, 335pp.
- 大野裕幸, 田村栄一, 2002. 2万5千分1地形図ベクトルデータによるDEM作成方法について, 国土地理院時報, No. 99, pp.33-38.
- 酒井 徹, 賈 書剛, 川村健介, 秋山 侃, 2002. 携帯型分光反射計を用いた林床ササ地上部バイオマスおよび葉面積指数分布の推定, 写真測量とリモートセンシング, 41(2), pp.27-35.
- 蔡 斌, 秋山 侃, 北田勝紀, 村手直明, 2003. レーザ計測データによる林地画像の作成および林木情報の判読, システム農学, 第19巻, 別号1, pp.61-62.
- 蔡 斌, 秋山 侃, 北田勝紀, 村手直明, 2004. 航空機レーザによる広葉樹林樹冠面積の推定, 日本写真測量学会平成16年度年次学術講演会発表論文集, pp.181-182.
- 渡辺 宏, 1980. 新森林航測テキストブック, 日本林業技術協会, 東京, 258pp.
- 米 康充, 小熊宏之, 山形与志樹, 2002. 京都議定書に関わる吸収源計測システム開発ー航空機Lidarによるカラマツ林の樹冠計測と材積・炭素重量計測精度の検証ー, 日本リモートセンシング学会誌, 22(5), pp.531-543.
- Andersen, Hans-Erik, McGaughey, Robert J. and Reutebuch, Stephen E., 2005. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data, Remote Sensing of Environment, 94(4), pp.441-449.
- Hall, S.A., Burke, I.C., Box, D.O., Kaufmann, M.R. and Stoker, J.M., 2005. Estimating stand structure using discrete-return lidar: an example from low density, fire prone ponderosa pine forests, Forest Ecology and Management, 208 (1-3), pp.189-209.
- Hyypä, J. and Hallikainen, M., 1996. Applicability of airborne profile radar to forest inventory, Remote Sensing of Environment, 57, pp.39-57.
- Hyypä, J., Kelle, O., Lehtikainen, M., Inkinen, M., 2001. A Segmentation-Based Method to Retrieve Stem Volume Estimates from 3-D Tree Height Models Produced by Laser Scanners, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(5), pp.969-975.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Acker, S.A., Parker, G. G., Spies, T.A. and Harding, D., 1999. Lidar Remote Sensing of the Canopy Structure and Biophysical Properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests, Remote Sensing of Environment, 70(3), pp.339-361.
- Naesset, E., 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data, Remote Sensing of Environment, 61, pp.246-253.
- Ohtsuka, T., Akiyama, T., Hashimoto, Y., Inatomi, M., Sakai, T., Jia, S., Mo, W., Tsuda, S. and Koizumi, H., 2005. Biometric based estimates of net primary production (NPP) in a cool-temperate deciduous forest stand beneath a flux tower, Agricultural and Forest Meteorology, 134, pp.27-38.
- Sorin C.P., Randolph H.W. and Ross F.N., 2002. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy height based variable window size, Computers and Electronics Agriculture, 37(1-3), pp.71-95.
- Ritchie, J.J., Evans, D.L., Jacobs, D., Everitt, J.H. and Weltz, M.A., 1993. Measuring canopy structure with an airborne laser altimeter, Transactions of the ASAE, 36, pp.1235-1238.