

立木密度の異なるスギ人工林におけるオルソ空中写真のセミバリエーションの特徴

高橋與明・細田和男・西園朋広・田中真哉 (森林総研)

要旨：立木本数を推定する際によく利用される局所最大値フィルタ法 (LMF) のフィルタサイズの客観的な決定方法について、16cm 解像度のデジタルオルソ空中写真を用いて考察した。まず、45 年生の立木密度の異なる二つのスギ林分における 40m×40m のプロット調査の結果をもとに GIS 上で樹冠投影図を作成した。次に、両プロットにおけるオルソ空中写真の各バンドのセミバリエーションからレンジを推定し、様々な窓サイズの LMF によって検出されたピクセルについて正しく抽出された樹木・過剰抽出木・過少抽出木・ギャップでの過剰抽出のどれに属すかを樹冠投影図を利用して調べ、最後にその結果をセミバリエーションのレンジに相当する窓サイズと比較した。本研究の結果から、解析に使用したオルソ空中写真では LMF 法による立木本数推定を行う場合に尤もしい樹冠頂部ピクセルを抽出可能なのは、セミバリエーションのレンジに相当する窓サイズを適用した場合であることが示唆された。

キーワード：オルソ空中写真、立木本数、スギ、LMF、セミバリエーション

Abstract : This study investigated the objective way to determine the window size of Local Maximum Filtering (LMF), which is often used to count standing trees, using a digital orthophotograph with 16cm-resolution. Firstly, we established two plots (40m by 40m) and surveyed the location of stems and measured tree crown radii for all living trees within each plot, and the crown projection maps were created on GIS. After estimating the range value of semivariance for each band of the orthophoto, local maximum pixels derived from the LMF with various window sizes were assigned to correct tree, commission tree, omission tree, commission gap and so on referring to the maps. Finally, we compared the range value of each band with the results of the assigned local maxima. All results of this study indicated that the optimal LMF window size for confident tree counting would be objectively determined by the range value of semivariance of the orthophoto.

Keywords : aerial orthophotograph, stem number, Japanese cedar, LMF, semivariance

I はじめに

現在のデジタル空中写真測量技術ではオルソ化された二次元の高解像度カラー写真 (以後、オルソ空中写真と称す) を容易に作成することができる。単木が明確に認識できるほどの解像度でなおかつカラーであれば、造林樹種や林相の判読が可能である。さらに三次元情報である数値表層モデル (DSM) も容易に作成できるため (1)、数値標高モデル (DEM) があれば平均樹高や林分材積を推定することも可能である (5)。航空機レーザ測量も含め、航空機によるリモートセンシング技術が進歩 (センサと GPS/IMU の双方の進歩) したことで、GIS 上で誰でも扱いやすい様々なデータが徐々に整備されてきており、森林管理にこれまで以上に有効活用される可能性が広がってきているといえよう。

高解像度の空中写真を利用すれば、森林管理に必要な様々な林分因子を把握できる。例えば二次元の単写真から上層木の立木本数がある程度正確に数えることができた。ステレオペアの写真からは二次元の単写真よりも正確に立木本数を数えることや地面が見える場所の樹高計測

が可能である。詳細な林分情報を正確に知りたい場合はこのような写真判読が最も有効である。しかしながら、森林情報を写真判読のみで整備するには相当労力がかかるため、判読ほどの精度で林分因子の把握は困難であるにしても、広域の森林現況を把握する場合にはある程度自動化を図ることが必要となってくる。国内外問わず 1980 年代後半から現在もなお高解像度の衛星画像や航空機画像を利用した様々な林分因子を自動的に推定・分類・抽出する様々な手法の開発が行われてきているが、本研究では、高解像度リモートセンシング画像から立木本数を推定する際に一般的によく利用される局所最大値フィルタ法 (Local Maximum Filtering : LMF) のフィルタサイズの客観的な決定方法について、16cm 解像度のデジタルオルソ空中写真を用いて考察する。具体的には、同じ林齢で立木密度の異なるスギ人工林のオルソ空中写真を用いて、画像のセミバリエーション (4) の特徴を把握し、LMF のフィルタサイズとの関係を考察する。

Tomoaki TAKAHASHI, Kazuo HOSODA, Tomohiro NISHIZONO, Shinya TANAKA (Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki 305-8687), Semivariance of an aerial orthophotograph in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations with different stand density

II オルソ空中写真とプロット調査

2010年9月に東白川郡森林組合(福島県東白川郡棚倉町)が管轄する民有林の一部を含む東西南北 2km×3km のエリアを対象に UltraCamD (Vexcel Imaging 社)で空中写真撮影を行った。センサの観測波長などの諸元については本稿では割愛する(詳しくは(1)を参照のこと)。撮影から16cm解像度のオルソ化したパンシャープン画像(R, G, B, NIRの合計4バンド)作成までの全工程は(株)パスコによって行われた。本研究では、同一斜面上で互いに隣接する二つの小班(中心間距離は100m未満)の画像を解析するため、大気および地形効果の影響は無視できると考え、この二つの補正は行っていない。

撮影エリア内のスギ人工林の中から、45年生で立木密度が異なる小班をそれぞれ一箇所選び、2010年12月に各小班においてスタティック測量で40m×40mのプロット(Plot1とPlot2と呼ぶ)を設置した後、プロット内の全ての立木について、根元位置の測量および樹高、胸高直径、樹冠半径(8方位)の測定を行った(表-1)。

表-1. プロットの総括表
Table 1 Summary of plot data

	Plot 1 (80本)		Plot2 (199本)	
	平均	変動係数 %	平均	変動係数 %
直径 (cm)	37.1	19	27.5	23
樹高 (m)	27.7	9	26.0	9
樹冠半径 (m)	2.1	22	1.5	30

リモートセンシングで得られる画像は上空から林冠を見下ろした風景が記録されることを考慮し、立木の根元の標高と樹高を足した値(つまり樹冠頂部の標高)が相対的に高い個体の樹冠投影ポリゴンが低い個体の樹冠投影ポリゴンより上に位置するような樹冠投影図をGIS上で作成した(図-1)。なお、樹冠投影図に用いた立木は枯死木を除く着葉木だけであり(表-1も着葉木)、また樹冠の形状は8方位の樹冠半径の平均値を半径とする円で表現した。

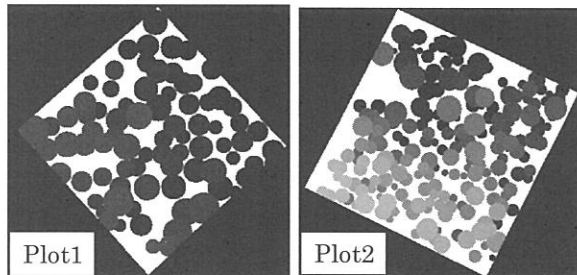


図-1. 40m×40mプロット内の樹冠投影図
Fig.1 Crown projection map within 40m by 40m plot

III セミバリエンス解析と LMF による立木本数推定

Plot1 と Plot2 の範囲内のオルソ空中写真を切り出し、4

バンドについてデジタルナンバー(DN値)をもとにセミバリエンス解析を行った。本研究では経験セミバリエンスを用い、以下の式で定義されるセミバリエンスを算出した(7)。

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2|N_k|} \sum_{N_k} (Z(s_i) - Z(s_j))^2$$

ここで、 h はピクセル s_i と s_j の距離(ラグ)、 Z はそのピクセルのDN値、 N_k は第 k 区間に含まれる距離 h だけ離れたピクセル s_i と s_j のペアの数である。本研究では、区間幅はオルソ空中写真の解像度である0.16mとし、等方性を仮定して全方位のセミバリエンスの算術平均を代表値とみなした。経験セミバリエンスを用いて空間従属性を把握する際に鍵となるのがレンジである。レンジとは $Z(s_i)$ と $Z(s_j)$ の相関が0となる最小の距離であり、高解像度リモートセンシング画像から計算されるレンジは、例えば単木の樹冠の大きさに密接に関係することが知られている(6)。本研究でもこのレンジに着目し、後述するLMFの窓サイズと比較することにする。レンジの推定(決定)方法について検討した結果、通常よく利用される球形モデルやガウス型モデルは適切に当てはまらなかったため、本研究では一般化加法モデル(GAM)による平滑化スプラインを当てはめ、GAMの最初の極大値(図-2を参照のこと)をレンジと定義した。

高解像度リモートセンシング画像に対するLMFによる立木本数推定は、ある局所領域(通常は、 n ピクセル× n ピクセルの方形窓(window))の中で極大となるDN値を持つピクセル(Local maxima: LM)を樹冠頂部(もしくはその付近)に見立ててそのピクセルを選択することで行われる(9)。窓サイズを単木の樹冠サイズより小さくし過ぎると単木の樹冠頂部ピクセルのみならず樹冠表面の微細な凹凸や樹冠部以外のギャップにおける凹凸を検出しやすくなる。逆に窓サイズを大きくし過ぎると単木の樹冠頂部ピクセルすら検出されにくくなる。したがって、窓のサイズを適切に決定することは極めて重要である。本研究では、前処理として3×3 windowの平均値フィルタでオルソ空中写真を平滑化処理した後、窓サイズを最小で3×3 window(一辺が0.48mに相当)から最大で39×39 window(一辺が6.24mに相当)まで変化させてLMF法による局所最大値ピクセルを検出した。なお、本研究では樹冠投影図をもとに、一つの樹冠ポリゴンに一つのLMが存在した場合は正しく樹木が抽出された(correct tree)と定義する。一方、一つの樹冠ポリゴンに二つ以上のLMが存在した場合は過剰抽出の樹木(commission tree)、樹冠ポリゴンに一つもLMが存在しない場合は過少抽出の樹木(omission

tree) と定義する。さらに樹冠と樹冠の間のギャップで LM が検出された場合 (commission gap) およびプロット内の全ての LM (all local maxima) を定義する。

プロットの立木本数(表-1)に対する各定義で検出された LM の割合 (%) と LMF 法の窓サイズとの関係を散布図によって調べ、セミバリエーションのレンジがどの窓サイズに相当するのかを散布図上で確認した。

IV 結果と考察

図-2に各プロットのオルソ空中写真のセミバリエーションとレンジ(縦線)を示す。両プロットの全バンドにおいて、ラグの増加に伴ってセミバリエーションが上昇し、あるラグを境にその上昇がほぼ頭打ちになっており、空間従属性の存在が明瞭に認められた。また全てのセミバリエーションに人工林や田畑の畝などで特に顕著な周期的な変動が現れている(2,3,8)。その変動はPlot 1の方がPlot 2より明確に現れているが、これはPlot 1のほうがPlot 2よりも樹冠サイズのばらつきが小さいことが影響していると考えられる(表-1)。先に述べたように、高解像度リモートセンシング画像から計算されるレンジは、例えば単木の樹冠の大きさに密接に関係することが知られている(6)。プロット間で比較するとPlot 1のほうがPlot 2より大きなレンジになっているが、これは平均樹冠サイズがPlot 1のほうがPlot 2より大きいこととつじつまが合う。また、本研究で算出したレンジの値は各プロットにおけるバンド間ではばらつきが小さく(ほとんど同じ)、このことはどのバンドのDN値でも空間従属性が存在する範囲がほぼ同じ範囲であることを示唆している。

次に、先述した定義のLMと窓サイズの関係を図-3に示す。図中の縦線は各バンドの画像から算出したレンジの値を窓のサイズに変換して示してある(つまり、レンジを0.16で除した値)。両プロットの全バンドについて共通しているのは、窓サイズが大きくなるにつれて①樹木の過剰抽出(commission tree)の割合とギャップでの過剰抽出(commission gap)の割合と全てのLM(all local maxima)の割合が単調減少するのに対し、②樹木の過少抽出(omission tree)の割合は単調増加し、③正しく抽出される樹木の割合はある窓サイズまでは上がった後に下がる、ということである。ここで、セミバリエーションのレンジに相当する窓サイズに着目すると、多少のずれはあるが全てのバンドにおいて正しく抽出された樹木(correct tree)の割合が最大になる窓サイズにセミバリエーションのレンジが一致していることがわかる。さらに①の割合が急激に下がる窓サイズは、レンジに相当する窓サイズとほぼ一致していることがわかる。以上のことから、本研究で解析に使用したオ

ルソ空中写真では LMF 法による立木本数推定を行う場合に尤もらしい樹冠頂部ピクセルを抽出可能なのは、セミバリエーションのレンジに相当する窓サイズを適用した場合であることが示唆された。

今後は、立木密度がPlot 1 および 2 とは異なるスギ林や、ライブラリーデータとして豊富な空間解像度が 50cm 程度の画像に対して本研究と同様の解析を行うことで、本研究の結果に一般性が成り立つかどうかを調べる。

V おわりに

本研究は森林総合研究所の交付金および文部科学省科学研究費補助金(No. 22780155, No. 22248017)の一部で実行された。

VI 引用文献

- (1) 栗屋善雄 (2010) デジタル空中写真の魅力ー森林管理への利用に向けてー. 森林計画研究会会報 441:1-6
- (2) COHEN, W. B., SPIES, T. A. (1990) Semivariograms of Digital Imagery for Analysis of Conifer Canopy Structure. *Rem. Sens. Environ.* 34:167-178
- (3) COLOMBO, R., BELLINGERI, D., FASOLINI, D., and MARINO, C. M. (2003) Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Rem. Sens. Environ.* 86:120-31
- (4) CURRAN, P. J. (1988) The Semivariogram in Remote Sensing: An Introduction. *Rem. Sens. Environ.* 24:493-507
- (5) 福士亮太・小熊宏之・米康充・鈴木恵一・岡野哲郎・藤沼康実 (2008) 高解像度デジタル航空写真と LiDAR データによる DTM を組み合わせたカラマツ林の現況推定. 日林誌 90: 297-305.
- (6) LEVESQUE, J., KING, D. J. (1999) Airborne Digital Camera Image Semivariance for Evaluation of Forest Structural Damage at an Acid Mine Site. *Rem. Sens. Environ.* 68:112-124
- (7) 間瀬茂・武田純 (2001) 空間データモデリングー空間統計学の応用ー. 共立出版 190
- (8) TREITZ, P., HOWARTH, P. (2000) High Spatial Resolution Remote Sensing Data for Forest Ecosystem Classification: An Examination of Spatial Scale. *Rem. Sens. Environ.* 72:268-289
- (9) WULDER, M., NIEMANN, K.O., and GOODENOUGH, D.G. (2000) Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. *Rem. Sens. Environ.* 73:103-114

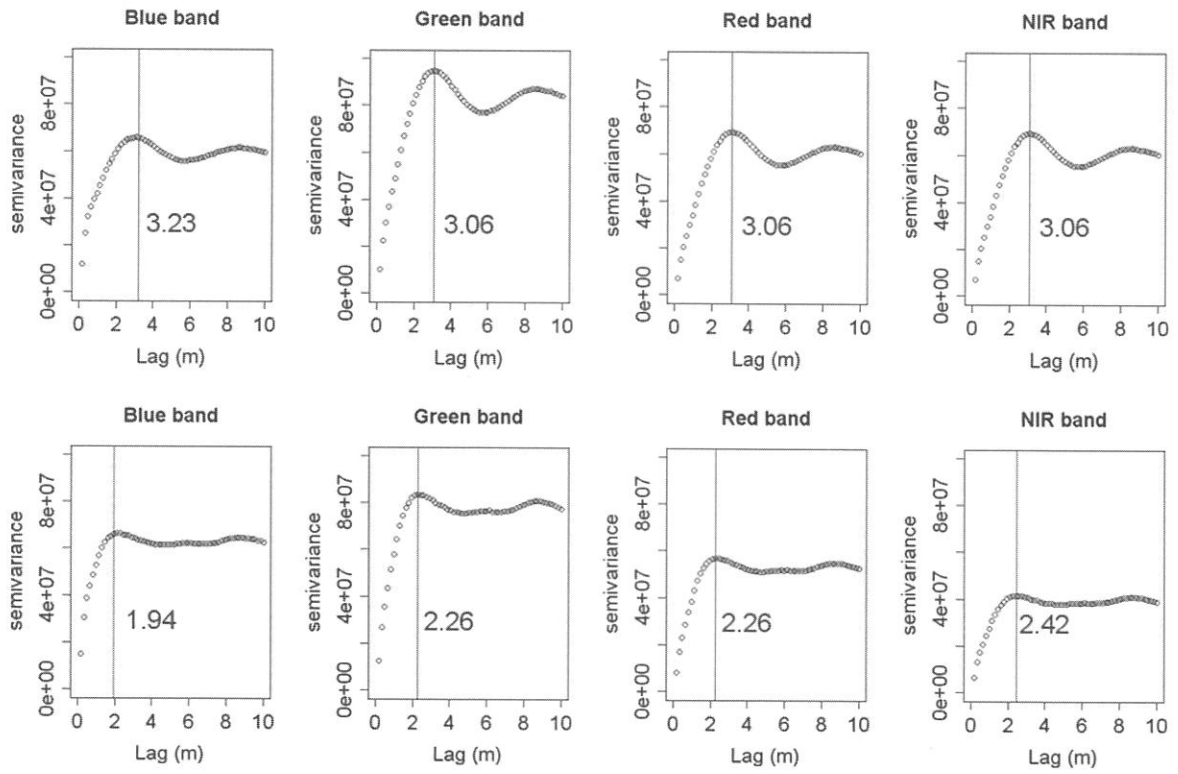


図-2. Plot1 (上)と Plot2 (下) におけるセミバリエンスと推定されたレンジ

Fig.2 Semivariance and range estimates for each band (Upper : Plot1, Lower : Plot 2)

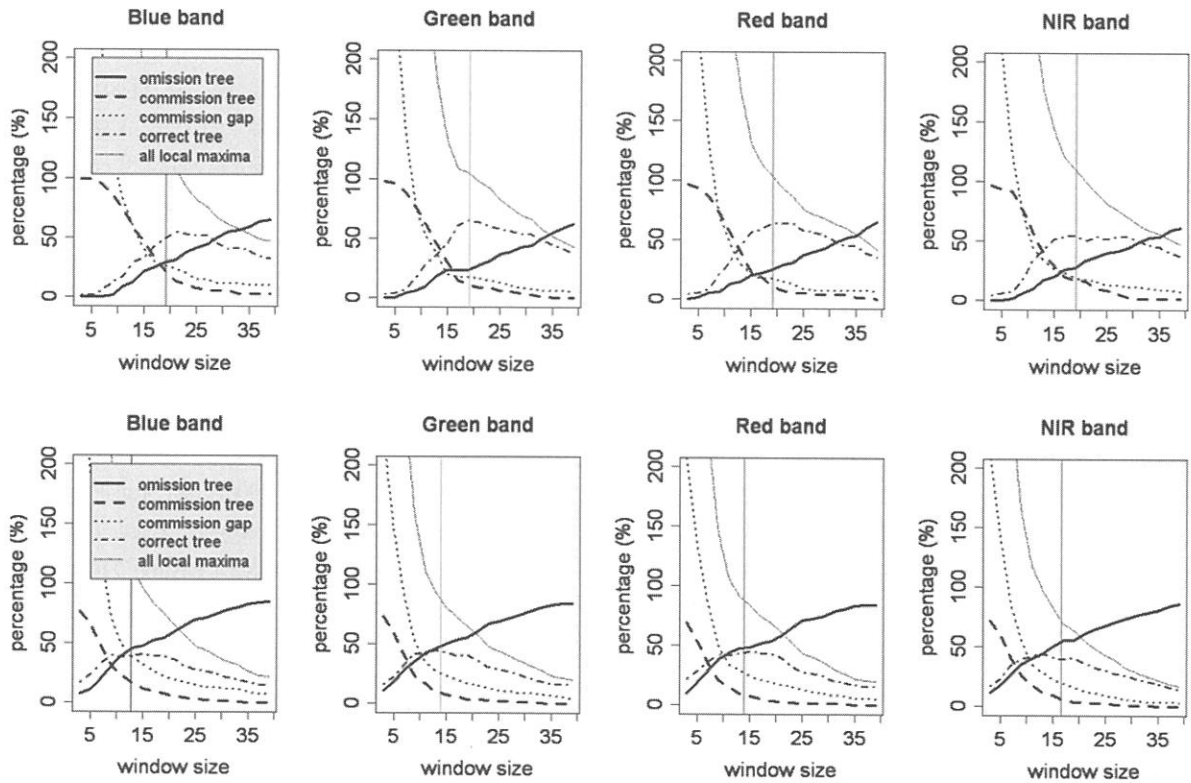


図-3. Plot1 (上)と Plot2 (下) における LMF による検出ピクセルの割合と窓サイズの関係

Fig.3 Relationship between percentage of the number of LM and window size (Upper : Plot1, Lower : Plot 2)