

スギ人工林の密度推定を行うために局所最大値フィルタ法を GeoEye-1パנקロマチックデータに適用した研究

村上拓彦^{1*}・高橋雅博²

(平成24年7月6日受付)

要 約

本研究では単木梢端抽出法の一つである局所最大値フィルタ法に着目し、GeoEye-1パנקロマチック画像（分解能0.5m）においてスギ人工林の密度推定が可能かどうか検討した。今回、フィルタサイズ、ローパスフィルタ処理の有無、ラジオメトリック分解能低減の有無について検討し、スギ人工林密度推定に及ぼす効果について考察した。対象地は阿賀町たきがしら湿原周辺のスギ人工林である。3×3、5×5、7×7のフィルタサイズでそれぞれスギ樹冠の梢端を抽出し立木密度推定を行った。フィルタサイズと立木密度に負の相関関係が見られ、立木密度に応じて最適なフィルタサイズが変動することが確認された。画像データのノイズ軽減を目的としたローパスフィルタの有無を比較した結果、ローパスフィルタ無しでは梢端候補が過大に抽出されることが確認された。ラジオメトリック分解能についてはオリジナルの11ビットデータを8ビットに変換して処理を行ったが、推定結果にほとんど差異は認められなかった。最適なフィルタサイズを林分の状況に応じてどのように変動させるかが今後の課題である。

新大農研報, 65(1):49-55, 2012

キーワード：局所最大値フィルタ法、スギ人工林、フィルタサイズ、ローパスフィルタ、GeoEye-1

現在、国内の人工林施業は、主伐面積の大幅な減少とそれにとまなう植栽面積の減少もあり、間伐中心の状況にある。人工林の齢級分布の中心は9齢級にシフトしており（2007年3月現在）、これまで目標とされてきた伐期齢40年の想定では既に多くの国内人工林が利用されていてもおかしくない状況にあるが、実態は多くの森林所有者が既に人工林施業への関心を大幅に低下させており、多くの人工林が放置されている状況である。一方、二酸化炭素の吸収源対策として適正な森林施業が期待されており、国として330万ヘクタールの間伐実施を目標に掲げている（林野庁, 2011）。

間伐実施にあたって間伐が必要とされる林分を抽出する必要がある。森林施業に必要な森林情報を得る方法として森林簿の利用が挙げられる。しかし、森林簿はモニタリング機能の欠如やデータ更新システムの限界等の問題があり（白石, 1999; 松本, 2001; 松村, 2007）、森林情報を正確に把握しているわけではない。特に、間伐に必要な立木密度の現況は全く把握できていない。ここで現況を広域に把握する手段としてリモートセンシング技術に注目できる。

リモートセンシング技術は人工林の現況を把握する用途においても極めて有効なツールである。特に、空間分解能が1.0m以下の高分解能衛星データや空中写真では単木を認識することが可能である。これまでに単木レベルでの樹冠抽出に関する研究が進められている（Gougeon, 1995; Wulder *et al.*, 2000; Pitkänen, 2001; Persson *et al.*, 2002; 古家ら, 2003; Pouliot *et al.*, 2002; Leckie *et al.*, 2003; Holmgrena and Persson, 2004; Popescu and Wynne, 2004; Wulder *et al.*, 2004; Koukoulas and Blackburn, 2005; Leckie *et al.*, 2005; Pouliot and King, 2005; Pouliot *et al.*, 2005; Bunting and Lucas, 2006; Gougeon and Leckie, 2006; Korpela *et al.*, 2006）が、その中の一つの局所最

大値フィルタ法（以下、Local Maximum Filter法、以下LMF法）（Wulder *et al.*, 2000）は多くの研究で注目されている。針葉樹では梢端付近の輝度値（デジタルナンバー）が最大になる特徴を持っており、LMF法はこの特徴を利用して梢端候補を抽出する手法である。LiDARデータにLMF法を適用する場合、LiDARによって樹冠形状そのものを再現可能なデータを取得できるため、まさに最上部（梢端）を抽出する手法にて立木位置を特定することができる。LMF法の適用例として、画像のみを用いたもの（Wulder *et al.*, 2000; Pitkänen, 2001; Pouliot *et al.*, 2002; 古家ら, 2003; Wulder *et al.*, 2004; Korpela *et al.*, 2006）、LiDAR単独（Koch *et al.*, 2006）、LiDARとマルチスペクトルセンサを組み合わせたものが存在する（McCombs *et al.*, 2003; Popescu and Wynne, 2004）。スモールフットプリントのLiDARデータは樹冠の詳細な形状を捉えることができ、樹冠抽出においておおいに効果的であるが、全ての地点でLiDARデータの観測が実現できるわけではないので、画像データのみから樹冠抽出が行えるように各種の検討を重ねることが重要である。特に、多くの地点でアーカイブデータの利用が期待できる高分解能衛星データを用いて梢端抽出を行い、立木密度推定手法を確立することは大変有意義である。

今回、LMF法をGeoEye-1パנקロマチック画像に適用しスギ人工林の密度推定を試みたので報告する。本論ではフィルタサイズ、ノイズ低減処理の有無、ラジオメトリック分解能低減の有無について検討し、密度推定に及ぼす効果について考察した。

¹ 新潟大学大学院自然科学研究科

² 新潟大学農学部

* 代表著者：muratac@agr.niigata-u.ac.jp

方法

研究対象地

本研究では、新潟県東蒲原郡阿賀町（旧上川村）のたきがしら湿原周辺を研究対象地とした。たきがしら湿原は阿賀町内でも福島県に近い山間にあり、耕作放棄地から人工的に作られた湿原である。湿原の周辺には広葉樹林およびスギ人工林が広がり、人工林の一部は県行造林地となっている。たきがしら湿原周辺の標高は380mである。最寄りの気象観測点（津川、アメダス、標高100m）における年間降水量は2,377mm（1981～2010年平均値、以下同様）、平均気温11.5°、降雪の深さ合計721cmである。

使用データ

本研究では、GeoEye-1（GeoEye社、米国）で撮影された衛星画像を使用した。GeoEye-1はパンクロマチック画像（図1参照）と近赤外域を含むマルチスペクトル画像を同時に撮影できる。観測波長帯はパンクロマチックが450～800nm、マルチスペクトル画像が可視青色域：450～510nm、可視緑色域：510～580nm、可視赤色域：655～690nm、近赤外域：780～920nmである。直下観測時の地上分解能はパンクロマチック画像が0.5m、マルチスペクトル画像が2.0mとなっており、ラジオメトリック分解能は11ビット（2048階調）である。本研究ではマルチスペクトル画像の分解能2.0mではLMF法による単木レベルでの解析に適さないと判断し、パンクロマチック画像のみを解析に使用した。

現地調査

対象とする林分の基礎情報を得るため、パンクロマチック画像から調査候補地を抽出し、4つのプロットで現地調査を行った。調査プロットのサイズは樹冠サイズ、樹高などを考慮し、プロット1で20m×20m、プロット2で10×40m、プロット3で15×40m、プロット4で30×30mとした。調査は胸高直径、

樹高、枝下高、樹冠直径、立木位置である。立木位置に地理座標（経度、緯度）を与えるため、各プロット近くの林外にGPS観測点を設けた。GPS受信機にはMobile Mapper（Thales Navigation社、米国）もしくはSXBlue II（GENEQ社、カナダ）を使用した。立木位置データはポイントデータとしてシェープファイルに変換した。

画像解析

画像のノイズを軽減するためパンクロマチック画像に対してローパスフィルタを適用した。本研究では3×3のローパスフィルタを適用した。フィルタ処理した画像に対して、最大値フィルタを適用した。最大値フィルタはフィルタの中心輝度値を、フィルタ内の最大輝度値で置き換える処理である。本研究では最大値フィルタのフィルタサイズとして3×3、5×5、7×7の3種類を設定した。最大値フィルタ処理後、最大値フィルタ処理後画像と最大値フィルタ処理前画像の差分画像を作成した。差分画像に対して2値化処理を行い、梢端候補のみを抽出した。2値化画像にマスク処理を行い、調査プロットのみを抽出した。マスク処理した2値化画像のピクセル値1の箇所をポイントデータ（シェープファイル）に変換し、パンクロマチック画像と重ね合わせた。その結果を図2に示す。立木の梢端と思われる場所にポイントが配置され、ほぼ的確に抽出されていることが確認できる。

LMF法が提示された時点（Wulder *et al.*, 2000）では、ノイズ低減を目的としたフィルタ処理は組み込まれていなかったが、その後LMF法の際には何らかの画像平滑化の処理が組み込まれている（Nelson *et al.*, 2005）。本論ではローパスフィルタ処理の効果を確認するため、未処理での立木密度推定を試みた。

今回使用した画像のラジオメトリック分解能は11ビット（2048階調）であったが、階調を縮減させた場合に梢端抽出結果に差異がでるのかを調べるため、オリジナルの11ビットを

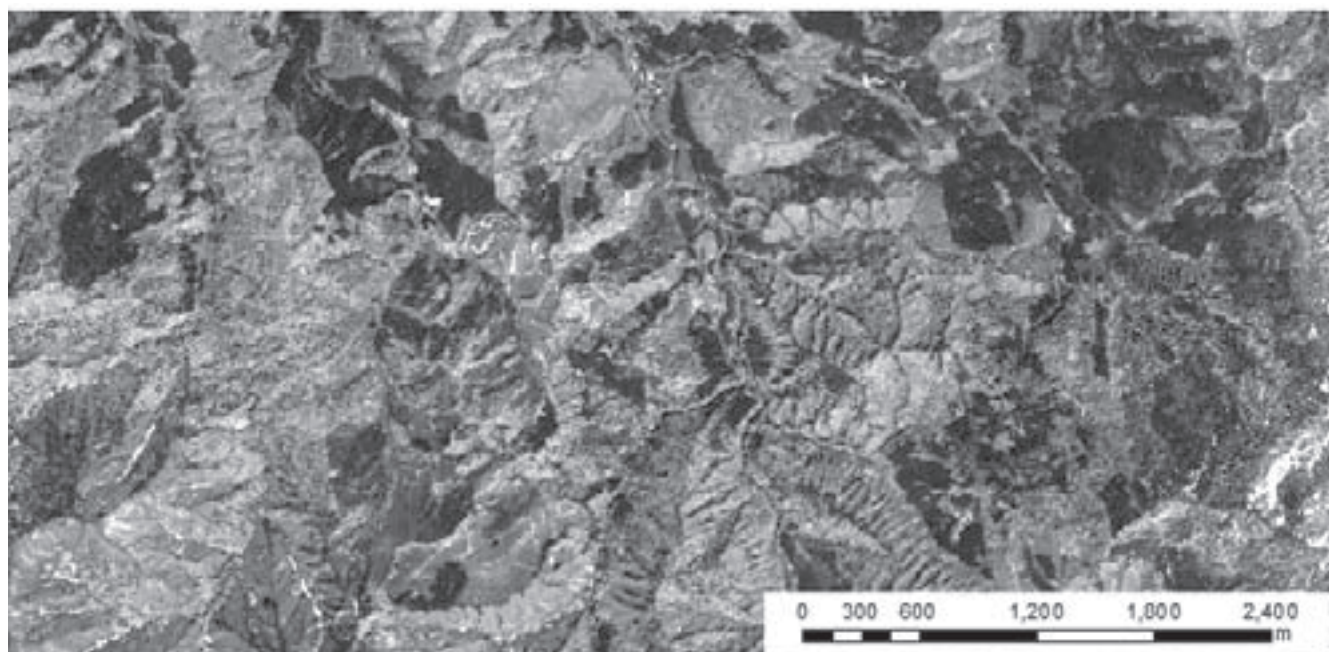


図1. GeoEye-1衛星画像（パンクロマチック画像）

8ビット（255階調）に変換しLMF法を適用してみた。

結果

現地調査の結果、各プロットの立木密度はプロット1、2が1,250本/ha、プロット3が583本/ha、プロット4が300本/haだった。また、その他林分構造因子に関する情報は表1の通りである。

LMF法で求めた推定立木密度と現地調査の結果を比較したものが表2～4である。3×3フィルタでは、推定立木密度がプロット1で1,225本/ha、プロット2で1,100本/haと現地データと近い値を示した。しかし、プロット3では967本/ha、プロット4では833本/haで現地データより過大な立木密度を示した。5×5フィルタではプロット3で推定立木密度が667本/haを示し、現地データと近い値を示した。しかし、プロット1では925本/ha、プロット2では850本/haと過小評価だった。プロット4では467本/haとやや過大評価だった。7×7フィルタではプロット4で推定立木密度が367本/haと現地データに近い値を示した。しかし、プロット1では575本/ha、プロット2では625本/ha、プロット3で500本/haと過小評価だった。

ローパスフィルタ処理を施した画像とそうでない画像の推定立木密度を比較すると、全てのフィルタサイズでローパスフィ

ルタ処理をしなかったものが明らかに過大評価であった。例えば、ローパスフィルタ処理をした画像とローパスフィルタ処理をしなかった画像で3×3フィルタサイズの推定立木密度を比較すると、ローパスフィルタ処理をした画像の推定立木密度はプロット1で1,225本/ha、プロット2で1,100本/ha、プロット3で967本/ha、プロット4で833本/haであった。これに対して、ローパスフィルタ処理をしなかった画像の推定立木密度はプロット1で1,800本/ha、プロット2で2,175本/ha、プロット3で2,450本/ha、プロット4で2,367本/haであり、ローパスフィルタ処理した画像に比べ倍近い推定立木密度となった。また、フィルタサイズが5×5、7×7と大きくなるにつれ、ローパスフィルタ処理をした画像とローパスフィルタ処理をしなかった画像の推定立木密度の差異は小さくなった。

次に、1画像当たりの情報量を8ビットに減らした画像とオリジナル画像の推定立木密度を比較した。その結果、推定立木密度に多少の差異はあるものの両者に大きな差異は認められなかった。

考察

今回の解析結果から現地の立木密度が1,250本/haだったプロット1、2で3×3フィルタ、583本/haだったプロット3で5×5フィルタと7×7フィルタ、300本/haだったプ

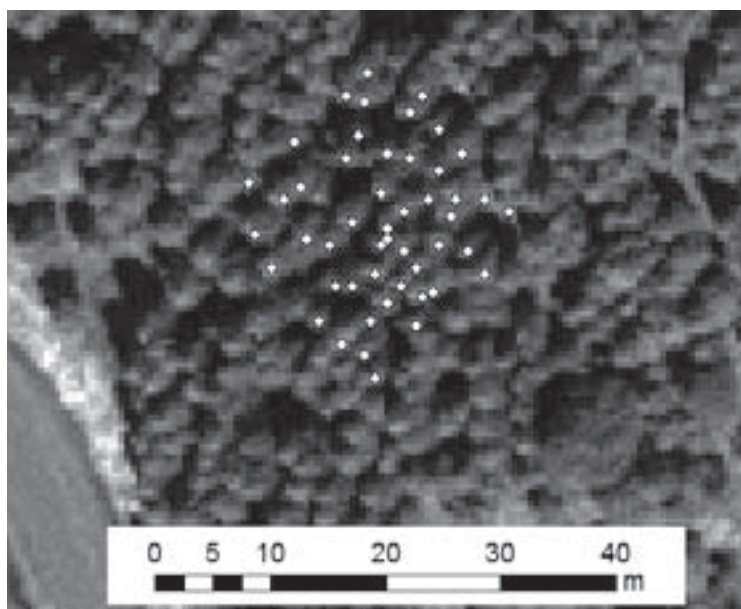


図2. 局所最大値フィルタ法によって抽出された梢端候補（白点）

表1. 各プロットの林分構造因子

| | 平均樹高 (m) | 平均枝下高 (m) | 平均胸高直径 (cm) | 平均樹冠直径 (m) | 樹冠直径標準偏差 (m) |
|-------|----------|-----------|-------------|------------|--------------|
| プロット1 | 13.99 | — | 21.31 | 3.16 | 0.53 |
| プロット2 | 15.45 | 5.07 | 22.93 | 3.10 | 0.63 |
| プロット3 | 21.06 | 8.43 | 35.08 | 3.19 | 0.96 |
| プロット4 | 30.45 | 13.45 | 51.15 | 3.70 | 0.82 |

表 2. 3 × 3 フィルタでの推定立木密度まとめ

| データセット | Plot1 | Plot2 | Plot3 | Plot4 |
|----------------|--------------|-------|-------|-------|
| | 立木密度 (本 /ha) | | | |
| 現地データ | 1,250 | 1,250 | 583 | 300 |
| Low Pass 処理画像 | 1,225 | 1,100 | 967 | 833 |
| Low Pass 未処理画像 | 1,800 | 2,175 | 2,450 | 2,367 |
| 8bit 画像 | 1,225 | 1,125 | 917 | 811 |

表 3. 5 × 5 フィルタでの推定立木密度まとめ

| データセット | Plot1 | Plot2 | Plot3 | Plot4 |
|----------------|--------------|-------|-------|-------|
| | 立木密度 (本 /ha) | | | |
| 現地データ | 1,250 | 1,250 | 583 | 300 |
| Low Pass 処理画像 | 925 | 850 | 667 | 467 |
| Low Pass 未処理画像 | 1,150 | 1,200 | 1,067 | 944 |
| 8bit 画像 | 925 | 850 | 700 | 444 |

表 4. 7 × 7 フィルタでの推定立木密度まとめ

| データセット | Plot1 | Plot2 | Plot3 | Plot4 |
|----------------|--------------|-------|-------|-------|
| | 立木密度 (本 /ha) | | | |
| 現地データ | 1,250 | 1,250 | 583 | 300 |
| Low Pass 処理画像 | 575 | 625 | 500 | 367 |
| Low Pass 未処理画像 | 625 | 650 | 533 | 500 |
| 8bit 画像 | 575 | 625 | 483 | 333 |

ロット 4 で 7 × 7 フィルタでの推定立木密度がそれぞれ近い値を示した。立木密度が低くなるにつれフィルタサイズが大きくなり、この両者に負の相関関係が認められた。フィルタサイズごとに推定立木密度に大きな違いが見られたこと、プロット 4 において 3 × 3 フィルタで処理すると一つの立木が複数の立木として抽出されていたことから、林分にあったフィルタサイズを設定することが重要であると考えられる。樹冠サイズの大きな林分において 3 × 3 フィルタを使用すると梢端が過大に抽出されてしまうのは既往の報告 (Wulder *et al.*, 2000) でも指摘されており、国内のスギ人工林でも同じ事が生じることを確認できたことになる。

ローパスフィルタ処理画像とローパスフィルタ未処理画像で推定立木密度に大きな差が出た。フィルタサイズが大きくなるにつれ、推定立木密度の差は小さくなったものの、画像上で確認するとローパスフィルタ未処理画像では立木が無い箇所而立木が抽出されていた。このことから、LMF 法を行う際の前処理としてノイズ除去は必須であるといえる。ちなみに、Wulder *et al.* (2004) は IKONOS データ (空間分解能 1.0m) に LMF 法を適用し梢端抽出を試みているが、過大に抽出されてしまった梢端候補を問題点として挙げている。この際の過大推定はノイズ除去が施されていないことも原因ではないかと考えられる。その後の彼らの研究 (Nelson *et al.*, 2005) では、

IKONOS データに平滑化処理を適用していることから、LMF 法にとってノイズ除去処理は重要な前処理であるといえそうである。

オリジナル画像 (11 ビット) と 8 ビット画像では推定立木密度に大きな違いが見られなかった。画像上で見ると抽出されたポイントのほとんどが同じ位置か隣接ピクセルに落ちていた。このことから画像の階調の大小で推定精度が大きく変わる可能性は低いと考えられる。画像の階調を縮減させることによってデータサイズを縮小させる効果が期待できる。データ容量を抑えたい場合には有効な手段であるといえる。

本研究では立木密度に応じて適切なフィルタサイズを変動することが確認できたが、LMF 法が実用化されるためには現地データを用いずに立木密度を推定しなければいけない。そのためには画像から林分情報を取得し、取得したデータに応じてフィルタサイズを決定する仕組みが必要であろう。これには単木樹冠の範囲を watershed 法 (Persson *et al.*, 2002)、valley following 法 (Gougeon, 1995) などで求め、樹冠直径推定の指標にする方法も考えられる。可変ウィンドウサイズを検討している研究 (Wulder *et al.*, 2000; Popescu and Wynne, 2004) もあることから、今後は梢端候補周辺の画素情報に基づいてフィルタサイズを自動的に決定していく手法を検討することが必要である。

本研究では、高分解能衛星データに LMF 法を適用し立木密度推定を行った。この立木密度と林齢情報に基づき間伐遅れかどうかの判定を行えるであろう。ただし、その林齢情報は森林 GIS (森林簿と森林計画図) に依存することになるため、精度不足の問題を抱えてしまう。一方、林分の高さ情報が得られるのであれば、相対幹距に基づく林分密度管理が行える (近藤ら, 2002)。ここで相対幹距とは、上層木平均樹高と立木密度の関係から導き出される林分の混み具合を表す指標の一つである (日本森林技術協会, 2001)。林分の樹高推定には LiDAR もあるが (富士ら, 2008)、ステレオペア画像データによっても数値表層モデル (DSM) を通して林冠高推定が可能となっている (田口ら, 2009)。特に最近ではデジタル空中写真の利用が増えつつあるので、デジタル画像ベースで林分の高さ情報を推定することが以前に比べると容易であるといえる。この研究を立木密度情報の推定にとどめることなく、林冠高推定と組み合わせ、間伐実施の支援ツールとして洗練させていかねばならない。

引用文献

- Bunting, P. and R. Lucas. 2006. The delineation of tree crowns in Australian mixed species forests using hyperspectral Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) data. *Remote Sens. Environ.*, **101**: 230-248.
- 富士亮太・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.
- 古家直行. 2003. 高分解能衛星画像を用いた針葉樹人工林立木密度推定手法の検討. *日林関東支部論*, **55**: 93-94.
- Gougeon, F. A. 1995. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images, *Can. J. Remote Sens.*, **21**: 274-284.
- Gougeon, F. A. and D. G. Leckie. 2006. The individual tree crown approach applied to IKONOS images of a coniferous plantation area. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, **72**: 1287-1297.
- Holmgren, J., and A. Persson. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sens. Environ.*, **90**: 415-423.
- Koch, B., U. Heyder and H. Weinacker. 2006. Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, **72**: 357-363.
- 近藤洋史・今田盛生・吉田茂二郎. 2002. 高齢林における林分密度指標の解析. *九州森林研究*, **55**: 42-45.
- Korpela, L. P. Anttila and J. Pitkanen. 2006. The performance of a local maxima method for detecting individual tree tops in aerial photographs. *Int. J. Remote Sens.*, **27**: 1159-1175.
- Koukoulas, S. and G. A. Blackburn. 2005. Mapping individual tree location, height and species in broadleaved deciduous forest using airborne LIDAR and multi-spectral remotely sensed data. *Int. J. Remote Sens.* **26**: 431-455.
- Leckie, D. G., F. A. Gougeon, N. Walsworth and D. Paradine. 2003. Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis. *Remote Sens. Environ.*, **85**: 355-369.
- Leckie, D. G., F. A. Gougeon, S. Tinis, T. Nelson, C. N. Burnett and D. Paradine. 2005. Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery. *Remote Sens. Environ.*, **94**: 311-326.
- 松本光朗. 2001. 森林情報の現状と将来—整備から活用へ—. *森林計画誌*, **35**: 81-86.
- 松村直人編著. 2007. *GISと地域の森林管理*. 207pp. 全国林業改良普及協会, 東京.
- McCombs, J. W., S. D. Roberts and D. L. Evans. 2003. Influence of fusing lidar and multispectral imagery on remotely sensed estimates of stand density and mean tree height in a managed loblolly pine plantation. *Forest Science*, **49**: 457-466.
- Nelson, T., B. Boots, M. A. Wulder. 2005. Techniques for accuracy assessment of tree locations extracted from remotely sensed imagery. *J. Environ. Man.*, **74**: 265-271.
- 日本林業技術協会. 2001. *森林・林業百科事典*. 1236pp. 丸善, 東京.
- 林野庁. 2011. *森林・林業白書 平成23年版*. 162pp. 財団法人農林統計協会, 東京.
- Persson, A., J. Holmgren and U. Soderman, 2002. Detecting and measuring individual trees using airborne laser scanning. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, **68**: 925-932.
- Pitkänen J.. 2001. Individual tree detection in digital aerial images by combining locally adaptive binarization and local maxima methods. *Can. J. For. Res.*, **31**: 832-844.
- Popescu, S. C. and R. H. Wynne. 2004. Seeing the Trees in the Forest: Using Lidar and ultispectral Data Fusion with Local Filtering and Variable Window Size for Estimating Tree Height. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, **70**: 589-604.
- Pouliot D.A., D. J. King, F. W. Bell and D. G. Pitt. 2002. Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. *Remote Sens. Environ.*, **82**: 322-334.
- Pouliot, D. A. and D. J. King. 2005. Approaches for optimal automated individual tree crown detection in regenerating coniferous forests. *Can. J. Remote Sens.*, **31**: 255-267.
- Pouliot, D. A., D. J. King, and D. G. Pitt. 2005. Development and evaluation of an automated tree detection-delineation algorithm for monitoring regenerating coniferous forests. *Can. J. For. Res.*, **35**: 2332-2345.
- 白石則彦. 1999. わが国のモニタリングシステムの現状と問題点. *森林科学*, **27**: 35-37.
- 田口仁・古川邦明・遠藤貴宏・沢田治雄・安岡善文. 2009. 多時期の空中写真から作成した Digital Canopy Model による森林キャノピーのモニタリング. *写測とリモセン*, **48**(1): 4-14.
- Wulder, M. A., K. O. Niemann and G. G. David. 2000. Local Maximum Filtering for the Extraction of Tree Locations and Basal Area from High Spatial Resolution Imagery. *Remote Sens. Environ.*, **73**: 103-114.
- Wulder, M. A., J. C. White, K. O. Niemann and T. Nelson.

2004. Comparison of airborne and satellite high spatial resolution data for the identification of individual trees with local maxima filtering. *Int. J. Remote Sens.*, **25**: 2225-2232.

Local maximum filter method applied to GeoEye-1 panchromatic data for stand density estimation in Japanese cedar plantation

Takuhiko MURAKAMI¹ and Masahiro TAKAHASHI²

(Received July 6, 2012)

Summary

We focused on local maximum filtering method as one of the extraction methods for single tree apex, and performed the stand density estimation of Japanese cedar plantation using GeoEye-1 panchromatic image (0.5-m spatial resolution). In this paper, we examined about the effect of filter size of maximum filter, low-pass filter for noise reduction and radiometric resolution conversion on stand density estimation. The study area was Japanese cedar plantation stands located around Takigashira wetland in Aga town, Niigata. Stand density estimation was performed by the extraction of the apex of each crown with the filter size of 3x3, 5x5 and 7x7. There was negative correlation between the filter size and stand density, and it was confirmed that optimal filter size varied according to stand density. Image processing without the low-pass filter indicated the overestimation of stand density because apex candidate was extracted excessively. Although radiometric resolution was converted from original 11-bit data to 8-bit, both results were almost the same. The determination of optimal filter size according to the situation of a stand is a topic of future research.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 65(1):49-55, 2012

Key words : local maximum filter, Japanese cedar plantation, filter size, low-pass filter, GeoEye-1

¹ Graduate School of Science and Technology, Niigata University

² Faculty of Agriculture, Niigata University

* Corresponding author: muratac@agr.niigata-u.ac.jp