

# レーザプロファイラデータからの有益情報の抽出

平岡透<sup>とおる</sup>1・幸弘美<sup>ひろみ</sup>1

<sup>1</sup> (株) 東京建設コンサルタント本社事業本部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

本論文では、航空機に搭載したレーザプロファイラ (LP) で取得した点群データから有益な情報 (地表、樹木、樹高) を抽出する方法を提案し、実験を通してその有効性を検証する。

本論文の構成は次の通りである。1章は序論である。2章では、LPデータから地表の点を抽出するために、エントロピーを用いる方法を提案する。3章では、LPデータから樹木の点を抽出するために、バイラテラルフィルタ<sup>7)</sup>を用いる方法を提案する。4章では、LPデータから樹木領域の樹高を推定する方法を提案する。5章はまとめであり、今後の課題と展望について述べる。

**Key Words :** レーザプロファイラ, 地表, 樹木, 樹高

## 1. はじめに

現在、航空機に搭載されたレーザプロファイラ (LP) によって地上を計測することが行われており、広域な範囲を高精度かつ高密度な点群データとして取得できるようになっている<sup>1)</sup>。

LPデータは建物や樹木等の地表以外の情報を含んでいるため、地盤高のデータが必要な河川氾濫解析や高潮浸水予測で使用するには、LPデータから建物や樹木等の地表以外の点を取り除く必要がある。この作業を手で行うと膨大な作業量が発生するため、コンピュータで自動化する研究<sup>2), 3), 4)</sup>が行われている。いずれの方法も、傾斜のある地形や凹凸のある地形、また大規模構造物がある場合等では、精度良く地表の点のみを抽出することが難しい。そこで、本論文では、これらの問題を解決するために、エントロピーを用いる方法を提案する。

一方、LPデータから樹木のみ点を抽出することができれば、河川区域における樹木の伐採や植樹等の管理を計画的に実施でき、また樹木の情報を含んだ水理解析にも利用できる。従来、河川区域の樹木に関するデータの整備は、現地調査や航空写真からの手動による取得によって行っており、多くの手間を要している。また、これらの作業は目視で行っていることが多く、観測者の主観によるところが大きい。つまり、LPデータから樹木のみ点を自動で抽出できれば、作業の効率化や定量的なデータの作成に寄与できる。これまでにLPデータから樹木の点を抽出する研究<sup>5), 6)</sup>は行われているが、本論文ではいずれの方法ともアプローチが異なるバイラテラルフィルタ<sup>7)</sup> (BF) を用いる方法を提案する。更に、本論文では、LPデータから樹木領域の樹高を推定する2通りの方法も提案する。

## 2. 地表抽出

### (1) 方法

LPデータ  $P_i^{(1)}$  ( $i=1,2,\dots,I$ ) をX-Y平面上で  $M$  個の格子に分割し、各格子内の標高が最低の点と格子内の各点の標高差を0から  $h$  の間で  $N$  個の区間に配分し、格子内の各区間の点数を格子内の全点数で割った出現確率  $p_{m,n}$  ( $m=1,2,\dots,M; n=1,2,\dots,N$ ) を求め (標高差が  $h$  より大きい点は  $N$  番目の区間に含める)、各格子のエントロピー  $E_m^{(2)}$  を求める。  $E_m^{(2)}$  は、エントロピー  $E_m^{(1)}$  を0から1に規格化したもの (式 (1) 参照) であり、  $E_m^{(1)}$  が小さい程指数関数的に0に近づき、  $E_m^{(1)}$  が大きい程指数関数的に1に近づく。

$$E_m^{(1)} = -\sum_{n=1}^N p_{m,n} \log p_{m,n}$$
$$E_{\max} = -\log L^{-1}$$
$$E_m^{(2)} = \frac{\left(\frac{E_m^{(1)}}{E_{\max}} + \alpha\right)^2 - \alpha^2}{(1+\alpha)^2 - \alpha^2}$$
(1)

ここで  $\alpha$  は正定数である。エントロピー  $E_m^{(2)}$  は、平坦地よりも斜面や凹凸地の方が大きく、同じ高低差でも建物ある場所よりも坂道の方が大きくなる。

以下に、エントロピー  $E_m^{(2)}$  を用いた地表の点を抽出する手順を示す。

Step1: LPデータ  $P_i^{(1)}$  をX-Y平面上で一辺の長さが  $r^{(1)}$  の  $M$  個の格子に分割し、各格子内の標高が最低の点  $P_m^{(2)}$  ( $m=1,2,\dots,M$ ) を抽出する。

Step2:  $M$  個の格子のエントロピー  $E_m^{(2)}$  を求める。

Step3: LPデータの全ての点  $P_j^{(1)}$  に対して、距離  $d^{(1)}$  以内にある点  $P_j^{(2)}$  ( $j=1,2,\dots,J$ ) の標高の平均  $a_i$  ( $i=1,2,\dots,I$ ) と標準偏差  $\sigma_i$  ( $i=1,2,\dots,I$ ) 及び、

点  $P_j^{(2)}$  を含む格子のエントロピー  $E_m^{(2)}$  の平均  $E_i^{(3)}$  ( $i=1,2,\dots,I$ ) を求め、標高の平均  $a_i$  との差の絶対値が  $\sigma_i(1+\beta E_i^{(3)})$  以下の場合は地表の点  $P_k^{(3)}$  ( $k=1,2,\dots,K$ ) として抽出する。ここで  $\beta$  は正定数である。一方、地表として抽出されていない点を  $P_l^{(4)}$  ( $l=1,2,\dots,L$ ) とする。

Step4: LPデータ  $P_i^{(1)}$  をX-Y平面上で一辺の長さが  $r^{(2)} (< r^{(1)})$  の  $Q$  個の格子に分割し、エントロピー  $E_q^{(2)}$  ( $q=1,2,\dots,Q$ ) を求める。

Step5: 点  $P_l^{(4)}$  から各格子の中心が距離  $d^{(2)}$  以内にある格子のエントロピー  $E_q^{(2)}$  の平均  $E_i^{(3)}$  ( $i=1,2,\dots,L$ ) を求め、点  $P_k^{(3)}$  を内挿補間して求めた点  $P_l^{(4)}$  のX-Y平面位置の標高と点  $P_l^{(4)}$  の標高との差の絶対値が閾値  $s(1+\gamma E_i^{(3)})$  以下の場合は、その点  $P_l^{(4)}$  を地表の点  $P_k^{(3)}$  とする。ここで  $s$  と  $\gamma$  は正定数である。

Step6: Step5の処理を  $R$  回繰り返す。

## (2) 実験

提案法を図-1に示す2.0km×1.5kmの範囲のLPデータ(1,594,694点(約1.9m<sup>2</sup>に1点))に適用した。図1の円A, B, C, D内の場所は、それぞれ建物密集地、約180m×80mの大規模な構造物が存在する場所、傾斜地、凸状の堤防が存在する場所である。このとき、 $h=20.0\text{m}$ ,  $N=20$ ,  $\alpha=0.5$ ,  $\beta=1.0$ ,  $\gamma=0.4$ ,  $s=1.0\text{m}$ ,  $r^{(1)}=20.0\text{m}$ ,  $d^{(1)}=100.0\text{m}$ ,  $r^{(2)}=5.0\text{m}$ ,  $d^{(2)}=15.0\text{m}$ ,  $R=20$ 回とした。

図1の円A, B, C, D内の地表として抽出された点(白点)を図-2に示す。円A内は建物と地表を上手く識別でき、円B内も大規模な建物を地表として抽出せず、C内の斜面と円D内の堤防は地表として抽出した結果が得られた。つまり、提案法は傾斜のある地形や凹凸のある地形、また大規模構造物がある場合でも地表の点を上手く抽出できると考えられる。但し、C内で斜面に存在する樹木が一部地表として抽出される場合があった。

## 3. 樹木抽出

### (1) 方法

提案法は、まずLPデータをBFで変換して変換前後のデータの較差から樹木データの候補を抽出し(Step1)、次に樹木以外のデータを除去し(Step2)、次に孤立したデータを除去し(Step3)、最後にこれまでの処理で樹木として抽出されなかったLPデータを加えることで最終的な樹木データを作成する(Step4)という手順で実行される。

以下、提案法のキーとなるStep1の方法を示す。他のStepの詳細は平岡らの文献<sup>11)</sup>を参照されたい。

LPデータを  $d_i(d_{x,i}, d_{y,i}, d_{z,i})$  ( $i=1,2,\dots,I$ ) (単位: m) とする。樹木データ  $d_i$  の  $i$  番目の点からX-Y平面上で半径  $H_1$  以内にある樹木データ  $d_j$  の点の添え字  $j$  の集合を  $a_{i,j}$  ( $j=1,2,\dots,J_i$ ) とし、BFを通した出力値  $f_{z,i}$  を式(2)で求める。

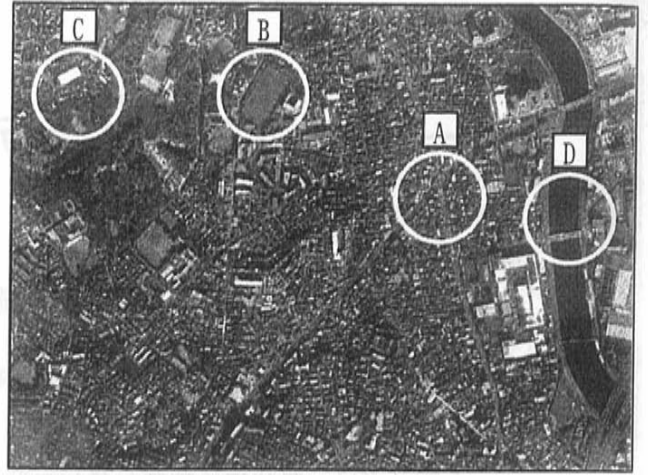


図-1 実験で使ったLPデータの範囲の航空写真

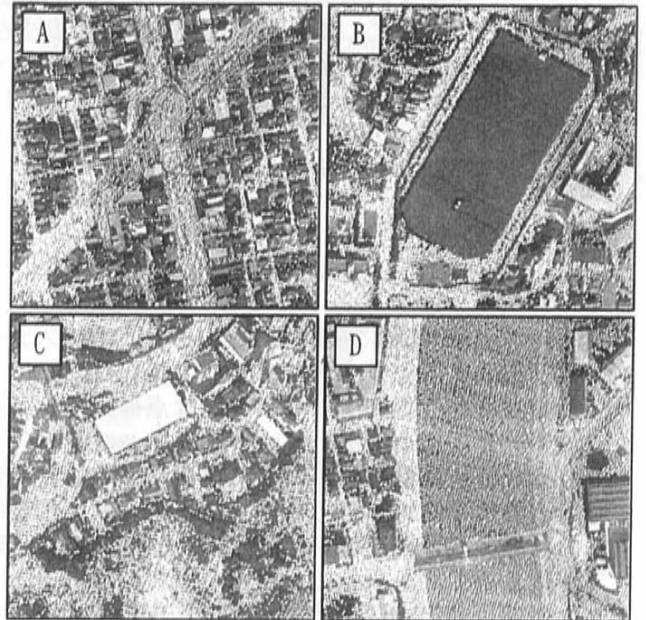


図-2 提案法による地表抽出の結果

$$f_{z,i} = \frac{\sum_{j=1}^{J_i} d_{z,a_{i,j}} e^{-\alpha[(d_{x,i}-d_{x,a_{i,j}})^2 + (d_{y,i}-d_{y,a_{i,j}})^2] - \beta(d_{z,i}-d_{z,a_{i,j}})^2}}{\sum_{j=1}^{J_i} e^{-\alpha[(d_{x,i}-d_{x,a_{i,j}})^2 + (d_{y,i}-d_{y,a_{i,j}})^2] - \beta(d_{z,i}-d_{z,a_{i,j}})^2}} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$  と  $\beta$  は正定数である。

パラメータ  $\beta$  の設定であるが、 $d_{z,i}$  のノイズの標準偏差  $\sigma$  を推定して  $\beta=1/(1.95\sigma)$  とする経験則が提案されており<sup>8)</sup>、寺岡らの文献<sup>9)</sup>を参考にして樹木部のLPデータの標準偏差  $\sigma$  を1.2mとすることで、 $\beta=0.4$ とする。パラメータ  $H_1$  の設定であるが、樹木の樹冠の半径は樹種や樹齢等によって異なるがおおよそ5.0m以内であると考えられるため<sup>10)</sup>、 $H_1=5.0\text{m}$ とする。パラメータ  $\alpha$  の設定であるが、 $(d_{x,i}-d_{x,a_{i,j}})^2 + (d_{y,i}-d_{y,a_{i,j}})^2 = D^2$  として  $E=e^{-\alpha D^2}$  における  $D$  と  $E$  の関係から、 $\alpha$  が0.2以上で  $D$  が5.0m ( $=H_1$ ) の場合に  $E$  の値が0に近い値となるため、 $\alpha=0.1$ とする。

BFは、ガウス性の白色ノイズの除去能力とエッジの保存能力の両方を兼ね備えたスムージングフィルタである。つまり、出力値 $f_{z,i}$ は、地表面や建物の屋上のように平らな面は樹木データ $d_i$ とほとんど同じ値になり、樹木のように細かい凹凸のある領域は滑らかになり、送電線のように急峻な凸状の場所は除去され、建物と地表面との境界部分の高低差は保存されると予測できる。

次に、 $d_{z,i} - f_{z,i}$ の値が $H_2$ 以上で且つ $H_3$ 以下となる点を樹木データとして抽出し、樹木データ $1s_k(s_{x,k}, s_{y,k}, s_{z,k}) (k=1, 2, \dots, K)$ とする。

地表面や建物の屋上のように平らな面では $d_{z,i} - f_{z,i}$ の絶対値が小さくなり、送電線のように急峻な凸状の場所では $d_{z,i} - f_{z,i}$ が大きな正の値となり、建物と地表面との境界部分では $d_{z,i} - f_{z,i}$ の絶対値が小さくなるため、これらの場所は樹木データ $1s_k$ として抽出されない。樹木のように細かい凹凸のある領域では、 $d_{z,i} - f_{z,i}$ の絶対値はある一定値以内となる。しかし、 $d_{z,i} - f_{z,i}$ の絶対値が0に近い値である場合は地表面や建物の屋上のように平らな面である可能性もある。そこで、樹木領域の点のみを確実に抽出するために、パラメータ $H_2$ は地表面や建物の屋上を抽出しないように0.4m、またパラメータ $H_3$ は家屋の軒先の高さがおおよそ2.0m以上であることを考慮して2.0mと設定する。つまり、全ての樹木の点が樹木データ $1s_k$ として抽出される訳ではない。 $d_{z,i} - f_{z,i}$ の絶対値が0に近い値である樹木の点は、Step4の処理で追加する。一方、狭い水路やピーク状の屋根において、それぞれ水路の境界や屋根のピーク位置が樹木データとして誤って抽出されるので、この樹木以外の点をStep2は処理で除去する。

## (2) 実験

提案法を図-3に示す樹木、家屋、狭い水路の存在する350m×180mの範囲のLPデータ(124,710点(約1m<sup>2</sup>に2点))に適用した。図-3の黒線内は樹木部であると想定される範囲で、航空写真測量の業務に10年以上携わった技術者が入力したものである。

Step1の処理後の結果を図-4に、最終的なStep4の処理後の結果を図-5に示す。図-4と図-5の白い点が抽出された樹木データである。

図-4より、家屋のピーク位置、狭い水路や狭い橋梁の境界部も樹木データとして抽出されていることが分かる。これらの点は、Step2とStep3の点で除去される。図-5より、最終的なStep4の処理によって、樹木データがより高密度で抽出されており、樹木領域の境界で樹木が抽出されない場合や樹木範囲外で抽出される場合も多少あったが、良好に樹木領域をカバーしていることが分かる。しかし、住宅密集地における家屋の一部分や地面も樹木データとして誤って抽出される場合もあった。

筆者らの経験から、提案法によって得られる樹木データの抽出精度でも、航空写真のオルソフォトに樹木データを重ねて表示し、樹木範囲を手動で作成する際、観測者の主観を十分に排除でき、樹木範囲の精度向上が図れると考えられる。また、現地における樹木範囲の修正作業の削減にも繋がり、作業の効率化も図れるとも考えられる。



図-3 実験で使用したLPデータの範囲の航空写真



図-4 Step1の処理後に抽出された樹木データの候補

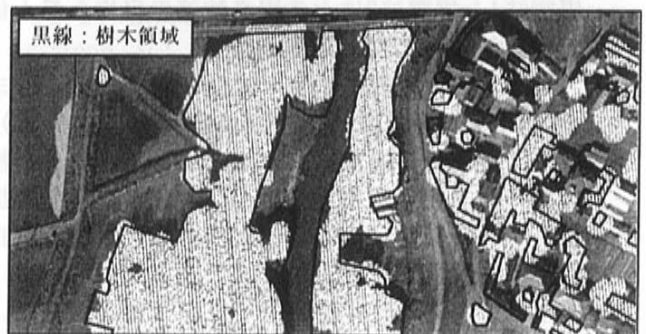


図-5 Step4の処理後の最終的な樹木データ

## 4. 樹高推定

### (1) 方法

提案法は、まず樹木領域のポリゴンデータ $P_i (i=1, 2, \dots, I)$ を作成し(Step1)、次に各ポリゴンデータ $P_i$ 内に含まれるLPデータ(以下、樹木領域内LPデータ) $LP_{i,j} (j=1, 2, \dots, J_i)$ を抽出し(Step2)、LPのグランドデータ(地表面のデータ)を内挿して地表面を作成して、樹木領域内LPデータの標高と樹木領域内LPデータ $LP_{i,j}$ のX-Y座標と一致する地表面の標高の差を求めて樹高とし(Step3)、最後に各

ポリゴンデータ  $P_i$  内の樹木領域内LPデータ  $LP_{i,j}$  を樹高の高い順にソートして、樹高の大きい方から  $\alpha$  ( $\alpha$  は正定数) %の樹高の平均値をポリゴンデータ  $P_i$  の樹高  $H_{1,i}$  とする (Step4-1)。以下、この方法を提案法1と呼ぶ。

提案法1の樹木領域の樹高の推定精度を向上させるために、提案法1のStep4-1を次のように変更する。提案法1のStep3後、各ポリゴンデータ  $P_i$  内の樹木領域内LPデータ  $LP_{i,j}$  の樹高の平均  $a_i$  と標準偏差  $\sigma_i$  を求め、樹高が  $a_i + \beta\sigma_i$  ( $\beta$  は正定数) 以上の樹高の平均値を各ポリゴンデータ  $P_i$  の樹高  $H_{2,i}$  とする。このとき、樹木領域内LPデータ  $LP_{i,j}$  において  $a_i + \beta\sigma_i$  以上の樹高が存在しなければ、最も高い樹高をポリゴンデータ  $P_i$  の樹高  $H_{2,i}$  とする (Step4-2)。以下、この方法を提案法2と呼ぶ。

## (2) 実験

提案法を図-6に示す1,500m×700mの範囲の河道内のLPデータに適用した。Step1において、樹木領域のポリゴンデータは樹木管理台帳と航空写真の判読、現地調査から樹種や樹高の境界 (図-5の白線) とし、各ポリゴンデータの樹高は樹木管理台帳と現地調査 (目視) から求めた。以下、このポリゴンデータの樹高を正解樹高と呼ぶ。提案法1と提案法2で求めたポリゴンデータの樹高と正解樹高の差の絶対値 (樹高較差) によって、提案法の有効性を評価した。提案法1は、 $\alpha$  を0.1から1.0まで0.1刻みの値として10通りの場合で評価した。提案法2は、 $\beta$  を0.0から0.9まで0.1刻みの値として10通りの場合で評価した。提案法1と提案法2による樹高較差の平均と最大値をそれぞれ表-1と表-2に示す。

提案法1は、表-1より、ポリゴンデータに含まれるLPデータの樹高の高い方から30% ( $\alpha=0.30$ ) 程度のデータを用いて平均を求めると、より良い樹木領域の樹高を推定できることが分かる。また、提案法2は、表-2より、 $\beta$  の値を0.3とした方がより良い樹木領域の樹高を推定できることが分かる。更に、提案法1と提案法2の結果はそれ程大きな差はないが、提案法1より提案法2の方が樹木領域の樹高の推定をより良く行えることが分かる。

## 5. まとめ

レーザプロファイラ (LP) で取得した点群データから有益な情報 (地表、樹木、樹高) を抽出する方法を提案し、実験を通してその有効性を検証した。地表抽出、樹木抽出、樹高推定ともに、良好な結果が得られたと評価する。今後の課題は、より多くの場所で検証し、提案法を改良することと、計算時間を削減することである。



図-6 実験で使用したLPデータの範囲の航空写真

表-1 提案法1の樹高の較差

$\alpha$	平均 [m]	最大 [m]
0.1	2.121	7.409
0.2	1.983	6.072
0.3	1.967	5.585
0.4	1.976	6.033
0.5	2.045	6.357
0.6	2.126	6.669
0.7	2.220	7.039
0.8	2.326	7.360
0.9	2.455	7.646
1.0	2.629	7.912

※ 下線のある数字は最小となる場合

表-2 提案法2の樹高の較差

$\beta$	平均 [m]	最大 [m]
0.0	1.898	5.685
0.1	1.871	5.521
0.2	1.861	5.361
0.3	1.859	5.314
0.4	1.872	5.290
0.5	1.886	5.408
0.6	1.910	5.649
0.7	1.934	5.874
0.8	1.984	6.142
0.9	2.033	6.321

※ 下線のある数字は最小となる場合

## 参考文献

- 1) 小荒井衛, 鈴木宏昭: 航空レーザー測量技術の公共測量作業規程における展開, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 39, No. 2, pp. 48-51, 2000.
- 2) H. Masaharu and K. Ohtubo: A filtering method of airborne laser scanner data for complex terrain, *ISPRS Commission III, 2002 Symposia*, pp.165-169, 2002.
- 3) A. Borkowski and G. Jozkow: Airborne laser scanning data filtering using flakes, *ISPRS Congress Beijing 2008, Proceedings of Commission III*, pp.179-184, 2008.
- 4) 横田宏行, 民野孝臣: 3次元データ処理方法及び装置, 公開特許公報 (A), 特開2005-202510, 2005.
- 5) 杉盛啓明, 恩田裕一, 村手直明, 徳村公昭, 大森博雄: 樹高の空間分布を考慮した航空機レーザスキャナデータからの地表面推定法, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 42, No. 1, pp. 4-11, 2003.
- 6) 田口仁, 遠藤貴宏, 吉岡善文: LiDAR点群データを用いた樹冠形状モデルに基づく単木樹冠および樹高推定, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 28, No. 4, pp. 331-341, 2008.
- 7) C. Tomasi and R. Manduchi: Bilateral filtering for gray and color image, *Proc. ICCV*, pp.839-846, 1998.
- 8) C. Liu, W. T. Freeman, R. Szeliski and S. King: Noise estimation from a single image, *Pro. CVPR*, pp.901-908, 2006.
- 9) 寺岡正樹, 吉岡善文, 瀬戸島正博, 今井靖晃: 高解像度衛星画像とLIDARデータを用いた樹木単木抽出, 写真測量学会平成16年度秋季学術講演会, pp. 61-64, 2003.
- 10) 梅木清: 針葉樹と広葉樹の大きさ, 光珠内季報, Vol. 93, pp. 5-8, 1993.
- 11) 平岡透, 碓正敬: バイラテラルフィルタを用いたレーザプロファイラデータからの樹木抽出, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 49, No. 2, pp. 103-108, 2010.