

北海道大学 ○宇井宏太郎, 金井 理, 伊達宏昭, 国際航業(株) 横尾泰広, 浅田典親, 武田浩志
要旨

近年, 航空機搭載型レーザープロファイラーにより地表面を計測する LiDAR 技術が航空測量分野に広く普及し, その測定データが3次元都市モデリング等に利用され始めている. しかしそのために必要な計測点群の地物の分類や, 建物の屋根境界の認識等は手動で多くの時間とコストをかけて行われているのが実情である. そこで本研究では, LiDAR データ点群を領域化して建物領域の分類判定を行う新たな手法を提案する.

1. はじめに

近年, 航空機搭載型レーザープロファイラーにより, 地表面を高密度・高速に測定する LiDAR(Light Detection and Ranging) 技術が発達し, その測定データが, 防災や環境調査など様々な分野で幅広く使用されるようになった. 取得されたデータ群をもとに建物抽出や, 森林抽出も可能になっており 3次元都市モデルや 2次元の地図の生成にも利用されている. しかし, 計測された地表面の点群データを, 建物や植生, 地面へと分類する作業は, 熟練者によって時間とコストをかけて行われているのが実情であり, 分類の自動化が求められている. すでに自動化の研究として[1,2]などがあるが, これらの研究では高密度(8~15 点/m²)な点群を使用している. 一方で日本で計測される LiDAR データは点の密度が 1~2 点/m² と低いものがほとんどで, [1,2] のような既存研究を適用する事が難しい. そこで本研究では, 低密度な LiDAR データからでも, 領域ベースでの地物の認識分類が可能なアルゴリズムを開発し, その分類精度を検証する.

2. 提案する LiDAR データ認識分類アルゴリズム

図 1 に提案アルゴリズムの概要を示す. 本アルゴリズムでは LiDAR データの領域ベースでの認識分類を行う. そのためにまず地表面を計測したと考えられる計測点をオリジナル LiDAR データから分離し, その後地表面以外の物体を測定したと考えられる残された点群に対してセグメンテーションを行い, 建物を計測したと思われる点群のみを認識する.

2.1 地表面判定(図 1-A1)

地表面とその他の建物や植生等を分離するために, 各点の持つ高度値を用いる. しかしオリジナル LiDAR データ点 $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ の z 値はその地形の持つ標高を含んでいる. 従って, 国土地理院発行の 5m メッシュを利用して, 各点の地表面からの高さである地上高 e_i を求める. 地上高 e_i は, LiDAR データ点の z_i から, (x_i, y_i) が最も近い 5m メッシュの標高を引き求める. こうして求められた地上高 e_i に対して, $e_i \leq e_{th}$ (e_{th} : 地上高しきい値)となる p_i を「地表面点」と判定する.

2.2 点特徴量計算(図 1-A2)

地表面点群をオリジナル LiDAR 点群から除いた後, 残された非地面点群の各点の特徴量として, 点の規則性 F_i を評価する. これは文献[1]で定義された, 点周りの近傍点が平面的に分布している程度を表した指標であり, 式(1)によって求められる.

$$F_i = \|\bar{p}_i - \bar{p}\| \tag{1}$$

ここで \bar{p}_i は, p_i の近傍領域内点群 $N_{p_i} = \{q | q \in P, \|p_i - q\| < \delta\}$ の重心である. P は LiDAR データに含まれる全点の集合である. 建物屋根上の点の近傍点群の点分布は比較的均一で F_i は小さくなり, 逆に木などの植生上では F_i は大きくなる.

2.3 非地面点群のセグメンテーション(図 1-A3)

次に非地面点群のセグメンテーションを 2 回のリージョンングによって行い, 建物と判定できる点群のみを検出する. まず 1 回目のリージョンングは地表面点に囲まれた一区画を一領域に分離する. さらに得られた領域を, それぞれ 2 回目のリージョンングによってさらに細かく分割する. 2 回目のリージョンングは建物の屋根上には必

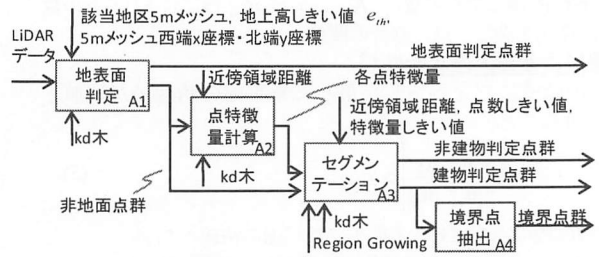


図 1 本アルゴリズムの概要

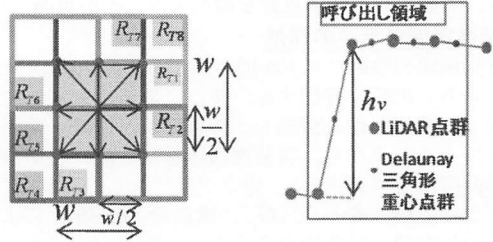


図 2 領域拡大方向

図 3 高度変動による拡大停止条件



図 4 判定条件(a)により非建物と判定された点

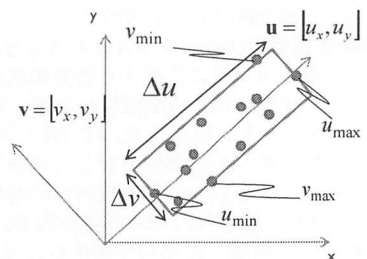


図 5 方向付きバウンディングボックスの縦横比による判定

ず平坦な領域が存在し, 建物の境界部分では必ず隣接点との高度差が存在するという考え方に基づいている. このリージョンング手順は, 以下の通りである.

前処理) ある点群 P_2 (1 回目のセグメンテーションでは LiDAR データに含まれる非地面点群, 2 回目のセグメンテーションではある領域 S 内の点群を表す)を準備する.

- 1) シード点条件 C_1 を満たす P_2 内の点をシード点 p_s とする.
- 2) シード点 p_s を領域中心点 $p_c = (x_c, y_c, z_c)$ とし, 領域中心点候補集合 $P_c = \{p_s\}$ とする.
- 3) P_c 内のすべての点に p_c 対し, 領域中心点 p_c を中心とした式(2)で表される近傍領域 R_r を生成し, 領域 R_r 内の点を領域 S に加える. ここで w は領域幅を表している.

$$R_r = \left\{ p_j \mid p_j \in P_2, |x_i - x_c| \leq \frac{w}{2}, |y_i - y_c| \leq \frac{w}{2} \right\} \tag{2}$$

- 4) R_r から $+x$ 方向に領域幅の半分だけ中心をずらした領域 R_{r1} を生成し, R_{r1} 内の未セグメンテーション点を S に加える.
- 5) R_{r1} に対して拡大停止条件 C_2 を判定する.
- 6) R_{r1} が C_2 を満たしていない場合, R_{r1} の中心点を領域中心点候補集合 P_c に加える.

- 7) 上記 4-6)を図 2 に示す他の 7 方向に対しても同様に行う。
- 8) $P_c \leftarrow P_c - \{p_c\}$ とする。
- 9) $P_c = \{ \}$ となったら 1)に戻り、別なシード点を選択し 2)以下を繰り返す。
- 10) P_i 内の全点がいずれかの領域 S に含まれたら終了する。

1 回目のリージョンローイングのシード点条件 C_1 は、未セグメンテーション点であること、拡大停止条件 C_2 は、新たに領域 S に加えられる点がない、または地表面判定された点が領域内に存在することとする。2 回目のリージョンローイングのシード点条件は C_1 は、点の特徴量 F_i が特徴量しきい値 F_{th} 以下であること、拡大停止条件 C_2 は、新たに領域 S に加えられる点がない、または領域内の高度変動 h_v が高度変動しきい値 $h_{v,th}$ 以下であるという条件としている。ここで図 3 のように高度変動 h_v は、領域内の Delaunay 三角形分割によって得られた各三角形のもつ高度差 T_m (3 頂点の z 値の最大値と最小値の差)のうち最大のものを表す。領域内の三角形かどうかは、三角形の重心点が領域内に含まれるかどうかで判断される。

2.4 セグメントの建物判定と再セグメンテーション(図 1-A3)

2.3 のリージョンローイングによって得られた各領域 S に対し、 S が建物であるか否かの判定を行う。この判定では条件 (a)(b)の両者を満たしたものを「建物点群」として判別する。

判別条件(a) $|S| > C_{th}$ (3)

判別条件(b) $\frac{1}{|S|} \sum_{p_j \in S} F_j < F_{th2}$ (4)

ここで $|S|$ は S に含まれる点数、 C_{th} は点数しきい値、 F_{th2} は規則性 F_i のしきい値を表す。条件(a)は、街路樹等の植生であると考えられる点群領域は、建物よりも少ない点数を持つという条件を表す。条件(b)は、領域内の規則性 F_i の平均値に対する条件である。建物である領域はより平坦であると考えられるため、点の規則性 F_i の平均値はより小さくなることを表す。

ここで判別条件(a)によって建物でない認識された点の中にも図 4 のようにリージョンを拡大できない狭い領域の建物点が含まれてしまう。これらの点群 P_2 に対し、先のリージョンローイング手順の 3),6)を以下のように 3'),6')に変更し、再セグメンテーションを行う。

- 3') P_c 内のすべての点に p_c に対し、領域中心点 p_c を中心とした式(5)で表される近傍領域 R_r を生成し、領域 R_r 内の点を領域 S に加える。ここで w' は領域幅を表している。

$$R_r = \left\{ p_j \mid p_j \in P_2, |x_i - x_c| \leq \frac{w'}{2}, |y_i - y_c| \leq \frac{w'}{2}, |z_i - z_c| \leq \frac{w'}{2} \right\} \quad (5)$$

- 6') R_{r1} が C_2 を満たしていない場合、 p_j を領域中心点候補集合 P_c に加える

ここでシード点条件 C_1 は未セグメンテーション点であること、拡大停止条件 C_2 は、新たに領域 S に加えられる点がないこととなる。得られた各領域 S 内の点群に対し、2次元の共分散解析を行い主方向ベクトル $u = [u_x, u_y]$ 、 $v = [v_x, v_y]$ を求める。最大固有値に対応する固有ベクトルを u とする。これらは S 内の点群の方向付きバウンディングボックスの基底ベクトルとなる。図 5 のように得られたバウンディングボックスに対し、この処理では領域を拡大できない細長い領域の検出を目的とするので、以下の条件(c)を満たすものを建物点群として認識する。

判別条件(c) $\frac{\Delta u}{\Delta v} > A_{th}$ (6)

ここで $\Delta u, \Delta v$ は以下の式(7)で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \max_{p_j \in S} (u_x \cdot p_x + u_y \cdot p_y) - \min_{p_j \in S} (u_x \cdot p_x + u_y \cdot p_y) \\ \max_{p_j \in S} (v_x \cdot p_x + v_y \cdot p_y) - \min_{p_j \in S} (v_x \cdot p_x + v_y \cdot p_y) \end{bmatrix} \quad (7)$$

表 1 分類精度

真クラス	予測結果				検出不足[%]	過検出[%]
	地表面判定	建物判定	非建物判定	合計		
地表面	702465	31221	9679	743365	5.5	20.8
建物	8090	418421	75756	502267	16.7	18.8
植生	115443	60116	158423	333982		
その他	30785	3257	11308	45350	55.3	25.5
合計	856783	513015	255166	1624964		

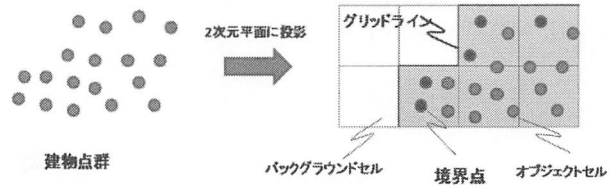


図 6 境界点抽出手法の詳細



図 7 LiDAR データの一部

図 8 図 7 の境界点抽出結果

2.5 境界点抽出(図 1-A4)

さらに建物と判定された領域内の点群に対して、図 6 に示す領域の境界点群抽出を行う。この抽出は文献[1]で提案される以下の手順を活用する。

- 1)セグメント内に含まれる点群を $x-y$ 平面に投影する。
- 2)一様格子をこの平面上に重ねる。格子間隔はリージョンローイングに用いた領域幅 w と同じものを用いる。
- 3)格子内に建物点が含まれるセルをオブジェクトセル C_{in} 、含まれないセルをバックグラウンドセル C_{out} とする。
- 4)オブジェクトセル C_{in} とバックグラウンドセル C_{out} を分離するグリッドラインを発見する。
- 5)オブジェクトセルの中で 4)のグリッドラインに最も近い点 $5c$ を境界点として抽出し、境界点群を生成する。

3. 認識分類結果と今後の課題

あらかじめ手で分類された真クラス付きの調布地区の LiDAR データ(点密度およそ 2点/m²、全 1624964 点)を提案アルゴリズムで自動分類し、その分類精度を検証した。各しきい値として、 $e_{th}=1.5, w=1.5, h_{v,th}=2.0, F_{th}=0.2, F_{th2}=0.3, C_{th}=30$ を用いた。分類精度を表 1、境界点群抽出の結果を図 8 に示す。図 7 から市街地ではほぼ妥当に建物抽出が行われている事が分かる。地図データ生成を目的として考えた場合、重要となるのは建物に関する検出精度であるので建物の分類結果を見てみると、過剰検出が 18.8%程度、検出不足が 16.4%程度にであることが分かる。また分類時間は 20 分程度であった。

今後の課題としては領域境界線の形状認識分類による検出不足の減少があげられる。また、現状では 5m メッシュが存在しない地域等も存在する。そのため LiDAR 点群のみから地表面を分離する新たな手法の開発も今後の課題である。

参考文献

[1] Qian-Yi Zhou, Ulrich Neumann, "Fast and Extensible Building Modeling from Airborne LiDAR Data", ACM GIS, No.7,2008
 [2] John Secord, Avidah Zakhor, "Tree Detection in Urban Regions using Aerial Lidar and Image Data." IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol.4, No.2, pp.196-200, 2007