地上据置型レーザスキャナを用いた地形計測結果からの樹木の自動除去

Automatic tree data removal method for topography measurement result using terrestrial laser scanner

横山 大*・近津 博文*

Hiroshi YOKOYAMA and Hirofumi CHIKATSU

Abstract : Recently, laser scanning has been receiving greater attention as a useful tool for real-time 3D data acquisition, and various applications such as city modelling, DTM generation and 3D modelling of cultural heritage sites have been proposed. And, former digital data processing was demanded in the past digital archive techniques for cultural heritage sites.

However, robust filtering method for distinguishing on- and off-terrain points by terrestrial laser scanner still have many issues. In the past investigation, former digital data processing using air-borne laser scanner were reported. Though, efficient tree removal methods from terrain points for the cultural heritage are not considered.

In this paper, authors describe a new robust filtering method for cultural heritage using terrestrial laser scanner with “the echo digital processing technology” as latest data processing techniques of terrestrial laser scanner.

1. はじめに

近年のデジタル技術や画像処理技術の飛躍的な発展を背景に、文化資産の修復や記録、バーチャルリアリティの構築等の観点から遺構や文化財、美術品の記録手法としてデジタルアーカイブ化が注目されており、デジタルアーカイブ化を行うために海外での大型調査プロジェクトも組まれている(池内, 大石, 2010)。このデジタルアーカイブ化において、以前のデジタルアーカイブ化では文化財の形状に関するデジタルデータ化だけが求められていたが、最近ではインフラの整備や処理システムの高性能化に伴い、従来の3D CGを利用した文化財の記録だけでなく、膨大なデータを用いたAR (Augmented Reality, 拡張型現実)やGISなど様々な分野での活用が検討されている(大野他, 2009)。このデジタルアーカイブ化を推進するにあたっては、GISとの連携などが模索されるに伴って所在地や出土場所、調査結果などのデータの付加が求められ

る様になり、さらにはデータサイズも日々増加する傾向にあることから、幾何データの取得およびその後の三次元モデリングでの作業について、如何に労力を減らすかという観点からの作業の自動化が検討課題となっている。特に遺跡を対象とした三次元計測を行った場合、取得したデータに対する樹木等の不要なデータの除去が必要となり、計測データの自動分類とその結果に基づいた地形以外のデータの自動除去という作業の自動化が望まれる。

レーザスキャナ計測によって取得される点群データを対象とした計測データの自動分類においては、画像処理で主に使用され、注目点と近傍の点の比較を行うモルフォロジー処理や高さ情報を使った手法が近年では検討されている(Bordu, Lague, 2012, Pirotti 他, 2013)が、樹木と凹凸の激しい地形が複雑に入り組んだ場所では検討範囲の設定やしきい値の設定が難しく、分類には経験や教師データの処理結果に基づいたしきい値の設定作業が必要となる。さらに、データの分類を行った際には誤分類が発生するが、その際のデータの補間または誤分類した部分のデータの復活方法において、検討を行う必要がある。その他の手法として、2次元画像ではpixelという概念を3次元に拡張し、3次元空間での正規格子単位として表すvoxel

*東京電機大学理工学部創造工学系

Department of Civil Eng., Tokyo Denki Univ.

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 54, NO. 5, 2015

という概念を用いた方法も提案されている (Lim 他, 2009)。しかし、この方法は voxel の活用によってモデル作成時に使用する点データの数が抑えられるというメリットがあるものの、voxel の設定サイズによって能力が異なることになる、比較的平坦な地形やビルなどのモデルでは大きなサイズでの voxel が設定できるが複雑な凹凸の地形では voxel のサイズを小さくする必要があるためにデータ処理が大きくなり、適用効果が薄れるため、別種の方法での検討が望まれている。

一方、遺構の計測が含まれる最近の地形計測の分野では、地上据置型レーザスキャナが詳細な地形計測を可能とする手法として注目されているが、計測結果である三次元点群データから地形モデルを作成するためには地表面を覆う樹木等を取り除き、地表面が効率的に検出されなければならない。過去の研究においては、航空機レーザ計測を用いた樹木を含めた計測と森林の解析に関する研究が数多く行われており、地上据置型レーザスキャナを用いた方法でも検討はなされているが、樹高の計測や植生分類や外形の再現などが行われており (押尾他, 2013, Schilling 他, 2012)、文化財の記録に求められる地表面からの樹木の除去までは至っていない。

このような地表面からの樹木の除去が求められる状況において、地上レーザ測量から得られる三次元点群データから地表面を効率的に検出するため、注目点を含む微小領域に対する面の平坦度に着目し、平坦度により微小領域を平坦部分 (地表やビル壁面等) と非平坦部分 (樹木や下草等) とに分類する方法が発表されている (横山, 近津, 2004)。この平坦性評価を用いた手法では、平坦性の高い (凹凸の少ない) 地形と平坦性の低い (凹凸の激しい) 樹木の分類は容易となっているが、凹凸の変化が激しい地形と大木、手すりや看板の下部である杭状のものが混在している場所から地形のみを抽出することは実現されていない。

本研究では、この平坦性評価を用いた方法に加え、最近の地上据置型レーザスキャナで用いられているデータ処理技術であり、反射エコーに含まれている直近のターゲットを示す First Target や最奥のターゲットを示す Last Target 等の異なる信号の種類を処理し、抽出する「エコーデジタル処理技術」を用いながら、平坦性評価を用いた手法とエッジ特徴量を用いた方法の組み合わせや主成分分析を用いた方法と

いった複数の手法による遺跡の計測結果から樹木等の地形以外のデータを自動で除去する能力について比較を行い、樹木の除去プロセスを追加することで、地形計測結果から樹木を自動で除去する手法の検討を行った。さらに、樹木の自動除去を行った後の地形に対して周辺の状況から推測される理想的な点の位置関係を用いることで、誤除去した地形データの復活を行う方法についても検討を行った。

2. 地形計測データからの樹木の自動除去

遺跡を対象としたデジタルアーカイブデータの作成に関しては、経年変化による劣化や地震による地形崩壊、土地開発に伴う破棄前の調査などにおいて現在の状態を詳細に記録する必要性があり、詳細な地形情報や平坦部分と非平坦部分の境界 (稜線、溝の端部) であるブレイクラインを記録している。文化財のブレイクライン (稜線) の記録については、従来は手計測やトータルステーション、写真測量、レーザスキャナなどを用いた方法が採用されているが、膨大な労力と時間をかけて行われているため、作業の自動化が求められている (山内他, 2008, 西村他, 2012)。

最近のレーザスキャナでは、照射するレーザの反射データを瞬時に分析する「エコーデジタル処理技術」も活用されるようになってきている。よって、合理化が求められている文化財や地形計測などの分野で地上据置型レーザスキャナを用いた計測の後、計測した地形情報から遺跡の調査結果として不要なデータとなる樹木を効率的な方法で自動除去を行う場合、図 1 に示す作業フローとなる。

遺構の計測のうち、横穴墓群遺跡を対象としたデジタルアーカイブでは記録対象である斜面の中腹などに多数の樹木が存在するため、地形から樹木を自動で除去する必要がある。樹木に関するデータを除去するにあたって地形変化を観察する場合、遺跡部分の地形はなだらかな連続した変化となっているのに対し、樹木部分は急激な変化が連続している。そのため、注目点とその周辺の形状を考慮した平坦性評価を行うことである程度の地形と樹木の自動分類が可能となる。

さらに、近年の地上据置型レーザスキャナでは、照射するレーザの反射データに基づき、反射データの状態を瞬時に分析する「エコーデジタル処理技術」も活用されるようになってきている。従来、この技術は航

図1 地上据置型レーザスキャナを用いた樹木の自動除去にかかわる作業フロー

図2 反射信号分類イメージ

空機搭載レーザスキャナで用いられていたデータ処理技術だが、地上据置型レーザスキャナの場合は対象物に向けたレーザの反射信号を図2に示すように First ターゲット、Last ターゲット、Others ターゲット、Single ターゲットに分類することができる。すなわち、樹木の葉が重なる部分のようにレーザが葉群の空隙を通り抜けるような場合には、反射信号が複数検出されることとなる。この複数の検出された信号については、最初の反射として検出された位置を First ターゲット、最後の反射として検出された位置を Last ターゲット、その途中で検出された反射信号を Others ターゲット、壁面を計測した時のような複数の反射信号が検出されないデータは Single ターゲットとして定義されている。そこで本研究では、平坦性評価手法に加え、反射データも活用した樹木の自動除去を行うことにした。

図3(a)は、本研究の計測対象である埼玉県吉見百穴（古墳時代後期の横穴墓群の遺跡）を表1に示す地上据置型レーザスキャナを用い、角度振角を 0.04deg とした計測で取得した色付点群データであり、計測範囲は水平方向で約 190m の広さとなる。また、計測結果には地形と樹木以外に、観光地であるために建物、歩道の階段や手すり、立看板といったものが計測結果に含まれている。図3(b)~(e)は樹木を含んだ遺跡(地形)

(a) 計測対象（色付点群データ）

(b) First ターゲット

(c) Last ターゲット

(d) Others ターゲット

(e) Single ターゲット

図3 反射信号別計測結果

表1 レーザスキャナ諸元

機種名	VZ-400
メーカー	リーグル
測定範囲	～350m（高速モード）
スキャンング角	垂直：±50°（100°） 水平：±180°（360°）
スキャンング速度	122,000ポイント/秒
測定精度	標準：±5mm
本体サイズ・重量	308mm（長さ）×φ180mm（直径）， 9.6kg

を計測した際の反射信号別の計測結果であり、樹木の葉などの部分は First ターゲットとして検出されることが確認される。また、Single ターゲットにおいて樹木の葉の部分と推定されるデータが存在するが、これは葉の後ろの部分にデータが存在しない、葉の厚みで後方にレーザが通らないなどの理由により、Single データとして検出されたデータと推定される。そのため、樹木などの自動除去を行う場合には一部の樹木の葉のデータを考慮する必要があるが、Single ターゲットのみを対象とすることで確実に葉の部分と断定される部分を除外した検討を行うことができる。

なお、図3の計測データでは、Single ターゲットは全体の約77%のデータ量、First ターゲットは約11%、Last ターゲットは約10%、Others ターゲットは約2%という内訳となっている。

3. 点群データからの樹木除去方法

3.1 平坦性評価手法

地上据置型レーザスキャナを用いた地上レーザ測量では、機器を中心として放射方向にレーザ光を掃射しながら三次元点群データを取得する。それに伴い、レーザスキャナから計測点までの距離によって点密度が変化するため、計測結果の一つである距離画像上で一定サイズのマスクを設定しても各マスクに対する辺の実長が同じ大きさになるとは限らない。本研究では、図4に示すように三次元点群データに基づいて作成される距離画像上に、注目点を中心とした3×3ドットを最小サイズとする矩形マスクを最初に設定し、各点に対応付けられている三次元データから矩形マスクの1辺の実長を求め、その長さが縦横共に過去の研究（横山, 2004）によって活用されている所定の長さ（0.3m×

図4 可変矩形マスクの適用イメージ

0.3m) になるまで距離画像上のマスクサイズを拡大する。

次に、マスクの4隅と外周中央の計8点およびマスク中央に位置する注目点の合計9点を用いて8つの三角形を作成した後、三角形頂点の三次元データを用いて各三角形の法線ベクトルを算出する。算出した三角形の法線ベクトルは、三角形のベクトル成分の平均を求めることで合成法線ベクトルを算出し、算出した合成法線ベクトルを矩形マスク（参照領域）に対する法線ベクトルとする。ところで、法線ベクトルの方向は注目点が地上であるか、壁面であるか、等によって様々な方向を取るようになる。そこで、マスク内に含まれるすべての三次元点群データについてマスクに対する法線ベクトルの向きがZ軸と平行になるように注目点を中心として座標変換を行い、面の向きがXY平面にほぼ平行な状態とした後に、マスク内に含まれる全点群データのZ値から面の凹凸に対する標準偏差を求める。このように本研究では画像上に予め定められた大きさの矩形マスク（参照領域）を設定し、その向きを法線ベクトルによって揃えることで、参照領域に対する平坦度を算出する。本研究では座標変換後の面の凹凸に対する標準偏差を注目点での平坦性を表す指標（単位：m）として定義する。

図3(a)に示した遺構計測結果に対し、計測結果に基づいて作成された距離画像と受光強度画像、平坦度画像を図5に示す。距離画像は、地上据置型レーザスキャナから遠距離になるほど白色で表現されており、受光強度画像はレーザの反射度合いで色を表現している。また、図5(c)の平坦度画像は、計測結果から算出した平坦度を用いることで作成した平坦度画像であり、平坦度が大きいほど白色で表示しているが、この図から樹木の葉部分などの遺跡のデータを残すためには不要

(a) 距離画像

(b) 受光強度画像

(c) 平坦度画像

図5 遺跡を対象とした計測結果

なデータが白色に近い色として表現されていることが確認される。

遺跡を対象としたレーザスキャナ計測結果からの樹木の自動除去において、図3に示した計測結果のうち、Single, Last ターゲットにおいてデータが確認される点のみを注目点として平坦性評価手法を適用し、樹木と判断されたデータを除去した結果を図6に示す。なお、本研究では地形と樹木を分けるとされる平坦度を植込みと道路脇護岸の中間となる0.030mを設定し、それ以上となる点を樹木として除去することとした。また、レーザが透過しない最終到達点である Single, Last データに対してレーザが透過する First, Others データは全体の13%程度のデータ量となる。平坦性評価手法を適用するにあたり、大きな影響は与えないが、すべての計測点に対して平坦度の算出を行う場合に比べて多少なりとも計算に要する負荷を減らすことが可能となるため、遺跡計測結果からの効率的な樹木の自動除去を行うことが可能となる。しかし、図6の除去結果では一部に樹木のデータが部分的に残っており、追加プロセスによる樹木の除去が必要となることが確

認された。

3.2 エッジ特徴量を用いた樹木の自動除去方法の追加

図6では平坦性評価を用いた手法によって多くの枝葉の部分を効率的に除去できることが確認されたが、太い幹のように局所的にみると平面と判断されると思しき場所が除去しきれていないため、本研究では平坦性評価と反射データの組み合わせに加え、新たな樹木除去プロセスを検討した。

新たな樹木除去プロセスの検討にあたり、図6の結果において削除すべきデータを確認した結果、樹木の幹や枝などの円筒形の形状であることが判明した。一方、残すべきデータは地形であり、凹凸の連続した形状のため、図6で確認されているデータから円筒形に近い形状のデータを削除することにした。円筒形の形状を認識するにあたっては、注目点を中心とした局所的な面の向きを解析し、円筒形をなすような変化を示す部分を樹木として認識する方法が考えられる。

一方、画像処理においては色の変化を分析することでエッジ抽出が行われるが、このエッジ特徴量をベク

樹木の
データが
部分的に
残留

図6 平坦性評価による自動除去結果

トルで表示する方法がある(杉山, 阿部, 1997)。この方法においては, (1)式にしたがって画像上の注目点におけるエッジの方向性を算出し, (1)式中にある XY 方向成分は(2)式によって算出する。

$$\vec{h}(x, y) = (h_x(x, y), h_y(x, y)) \quad (1)$$

ここに,

$\vec{h}(x, y)$: 注目点におけるエッジのベクトル, $h_x(x, y)$, $h_y(x, y)$: 注目点におけるエッジベクトルの x, y 成分

$$\begin{aligned} h_x(x, y) &= \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} f(x + r \cos \theta, y + r \sin \theta) w(r) \cos \theta dr d\theta \\ h_y(x, y) &= \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} f(x + r \cos \theta, y + r \sin \theta) w(r) \sin \theta dr d\theta \end{aligned} \quad (2)$$

ここに

$w(r)$: 重み関数, r : 注目点からの画像上の距離

さらに, エッジベクトルの方向成分を用いてエッジの方向 $\theta(x, y)$ を算出する式を(3)式として定めている。

$$\theta(x, y) = \arctan(h_y(x, y)/h_x(x, y)) \quad (3)$$

本方法では画像の輝度値を使用するが, 本研究で対象としているデータは三次元の位置情報をもつ点群データであるため, この方法をそのまま適用することはできない。しかし, 図 5(a)に示すように点群データから距離画像などを作成しており, 距離画像上の各点には三次元位置情報だけでなく, 法線ベクトルなどの各種データを対応付けることが可能となっている。そのため, 距離画像上の点と各点に対応付けられている各種データを用いることで, 本方法を活用することが可能となる。

本研究では, 樹木を除去するために円筒形に近い形状のデータを除去することになっているが, 特に法線ベクトルの変化に着目することにした。すなわち, 円筒形の法線ベクトルの変化に着目した場合, 枝が伸びる軸方向に対して水平面となる方向になる法線ベクトルは大きく変化する。そのため, 最初に距離画像上での X 方向, Y 方向の各軸の法線ベクトルの変化を検討し, 距離画像上での変化の方向性を確認する。この過程により, 距離画像上の上下方向, 左右方向のいずれに樹木が伸びているかが判別できる。つぎに樹木の伸びに対して水平面となる方向, すなわち距離画像上で確認された樹木の伸びている方向が上下方向であれば左右方向に位置する隣接点について法線ベクトルの変化を検討し, 樹木の伸びている方向(上下方向)を示す軸周りの法線ベクトルの変化が他の二軸に比べて大きい注目点については樹木であると判断し, 計測結果から除去することにした。

遺跡を対象としたレーザスキャナ計測結果からの樹木の自動除去において, 図 3 に示した反射信号別計測結果のうち, Single ターゲットについて平坦性評価手法を適用した結果を図 7 に示す。Single データに対して平坦性評価手法を適用することで, すべての計測点に対して平坦度の算出を行う必要性がないために, 遺跡計測結果からの効率的な樹木の自動除去を行うことが可能となる。しかし, 太い幹を持つ樹木の根元部分などのデータについては除去しきれない状況にある。

しかし, 樹木は細長い形状であるために面の向きを正確に判断することが難しく, 地形の稜線のような部分も形状によっては樹木と判断される可能性が高いため, 追加の樹木除去方法を追加するなどのように本方法をこれ以上深く検討することはできないと判断し

図7 エッジ特徴量をベクトルで表示する方法による樹木除去結果

た。

3.3 主成分分析を用いた樹木の自動除去方法の検討

樹木の除去方法を新規に検討するにあたって樹木の形状を再確認すると、分岐はあるが基本的には筒状の形状の集合体であり、注目点を中心として隣接する点との位置関係を分析することで樹木の検出が可能になると推測される。

一方、情報学の分野では統計的な手法を用いてデータの傾向分析を行う主成分分析という方法がある。主成分分析は、複数の結果変数からなる変量データを統計的に扱う多変量解析に含まれる手法であり、構成されるデータから相関係数行列 R を算出し、第一固有値（最大固有値） λ_1 に対応する固有ベクトルから第一主成分 z_1 を算出した後、さらに構成するすべての多次元データについて主成分を算出する。さらに、それぞれの主成分の寄与率、累積寄与率、因子負荷量、主成分得点を算出し、最後に算出した各種データに基づいて、データの傾向を分析するものである（上田，2003，永田，棟近，2001）。

本研究で取り扱うデータは三次元データであり、変数が3となる場合の主成分分析プロセスが必要となり、最初にデータの標準化を(4)式によって行う。

$$u_1 = \frac{x_1 - \bar{x}_1}{s_1}, \quad u_2 = \frac{x_2 - \bar{x}_2}{s_2}, \quad u_3 = \frac{x_3 - \bar{x}_3}{s_3} \quad (4)$$

ここに、

u =標準化データ、 x =変数、 $\bar{x}$ =変数の平均、
 s =変数の標準偏差

さらに、第一主成分 z_1 を(5)式によって算出する。

$$z_1 = a_1 u_1 + a_2 u_2 + a_3 u_3 \quad (5)$$

ここに、

a =固有ベクトル

なお、主成分の算出にあたっては固有ベクトルになんらかの制限を設けない場合はいくらでも大きい値となるため、次式の条件を設定する。

$$a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1 \quad (6)$$

上記の(5)式、(6)式を使用して、第一主成分 z_1 であれば分散 V_{z_1} が最大となる $[a_1, a_2, a_3]$ を算出するが、その解は(7)式に示す相関係数行列 R の第一固有値 λ_1 に

対応する固有ベクトルとなる。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{x_1 x_2} & r_{x_1 x_3} \\ r_{x_2 x_1} & 1 & r_{x_2 x_3} \\ r_{x_3 x_1} & r_{x_3 x_2} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここに、

r =相関係数

すなわち、下記の(8)式と(6)式に基づいて固有値 λ を算出する。

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{x_1 x_2} & r_{x_1 x_3} \\ r_{x_2 x_1} & 1 & r_{x_2 x_3} \\ r_{x_3 x_1} & r_{x_3 x_2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \lambda \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3変数の主成分分析においては、第二固有値 λ_2 を R の第二固有値に対応する固有ベクトルとして算出し、同様にして第三固有値 λ_3 まで算出する。さらに、三次元点群データに対して主成分分析を実施し、算出した固有値については、構成する場所によって下記の性質を持つとされている（伊達，2012）。

柱状点： $\lambda_1 \gg \lambda_2 \approx \lambda_3$

平面上点： $\lambda_1 \approx \lambda_2 \gg \lambda_3$

その他の点： $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \lambda_3$

ここに、

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$$

固有値の傾向を示す状況については、柱状点では図8(a)に示すようにX軸方向、Y軸方向でのデータのばらつきに比べ、Z軸方向でのデータのばらつきが大きい。すなわち、1軸方向のみでの変動が大きくなっているために第一固有値である λ_1 のみが大きな値として算出される。一方、平面上の点では先ほどの柱状点とはことなり、X軸方向、Y軸方向でのデータのばらつきがほぼ同じになるのに対し、Z軸方向でのデータのばらつきが極端に小さくなる。すなわち、2軸方向での変動幅が大きくなるために第一固有値と第二固有値である λ_1, λ_2 が同じような結果として算出されるのに対し、第三固有値である λ_3 のみが小さな値として算出される。さらに、その他の点ではX軸方向、Y軸方向、Z軸方向の各軸方向でのデータのばらつきが等しい状態であるため、柱状点や平面上点とは異なり、変動幅が等しい状態となっているため、各固有値間での

図8 固有値傾向の状況図

結果は大きな違いがない結果が算出される。

本研究では、計測データから地形や樹木の幹の部分、樹木の枝葉（樹冠）の部分など、各部の固有値の比率の違いを算出し、フィルタリングを行うことで計測結果からの樹木の除去を検討した。なお、主成分分析を用いて樹木の除去を行う場合、注目点を柱状点、平面上点、その他の点のいずれに分類するかが問題となる。閾値を手動で決定することも可能であるが、その根拠を問われるために本研究では閾値を自動で設定する手法を検討した。閾値の探索にあたり、今回の主成分分析においては $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の三種類の閾値を設定する必要があるが、樹木に相当する柱状点の分類を行う場合、 λ_2, λ_3 については同じ値を閾値として設定するため、実質“ λ_1 ”と“ λ_2, λ_3 ”の2種類の閾値を自動で探索することとした。

主成分分析を行う際には $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の三種類の閾値を変化させることで、受光強度画像で確認されるデータの点数が変化し、徐々に閾値を変化させることでデータ点数の変化を追跡することが可能となる。今回は2

種類の閾値を探索する必要があるが、同時に閾値を探索することは難しい。よって、まず“ λ_2, λ_3 ”を固定して“ λ_1 ”の変化が安定する閾値を探索し、その後、探索した“ λ_1 ”を固定して“ λ_2, λ_3 ”の変化が安定する閾値を探索する。その後、“ λ_2, λ_3 ”と“ λ_1 ”の固定を繰り返して両閾値に変化がなくなるまで探索を繰り返すこととした。

閾値の自動探索手法を取り入れた主成分分析の結果を図9に示す。

主成分分析で樹木を除去した場合、一部の幹の部分や樹木の根の部分については形状や地形部分の影響もあって柱状部分と認定されないために除去されていないため、地形情報の記録からは樹木の根のような部分についても除去する必要がある。このような部分を除去するにあたり、本研究では注目点と隣接する点を距離画像上で横方向に探索し、点間の距離が所定の距離内である点を連続した点群であると認定した後にその点群の形状を把握することとした。

点間距離を算出するにあたり、本研究ではレーザス

樹木のデータが
部分的に残留

図9 主成分分析による樹木除去結果

図10 隣接点の位置関係検討概念図

キャナ計測が水平・垂直方向ともにあらかじめ指定された一定角度でレーザスキャナを中心とした放射方向でレーザ光を照射していることに着目した。すなわち、図10に示すように最初にレーザスキャナから注目点までの距離を算出した後、あらかじめ算出している垂直・水平方向の振角から連続した場所を計測した場合の隣接点までの理想的な距離を(9)式によって算出する。次に計測データから算出した注目点と隣接する点間の距離と理想点間距離を比較し、距離の差がほとんどない場合にはその隣接点は誤除去されたデータであると判断することとした。なお、推測した2点間距離と実際の2点間距離の比較における判断の閾値は、2点間の位置関係が正対した状態から見て奥行き方向に45度の傾きを持っている場所が存在する場所までを含めるため、推測した理想点間距離の1.5倍までの距離にある点を連続した点群であると認めることとした。

$$\begin{aligned}\Delta r_z &= r \times \tan \varphi \\ \Delta r_x &= r \times \cos \varphi \times \cos \omega \\ \Delta r_y &= r \times \cos \varphi \times \sin \omega \\ \Delta r &= (\Delta r_x^2 + \Delta r_y^2 + \Delta r_z^2)^{1/2}\end{aligned}\quad (9)$$

ここに、

r ：レーザスキャナから注目点までの斜距離

ω ：垂直方向振角， φ ：水平方向振角

$\Delta r_x, \Delta r_y, \Delta r_z$ ： x, y, z 軸方向の点間距離

(Z 軸を天頂方向と一致させた場合)

Δr ：注目点と隣接点（復活候補）までの理想距離

連続した点群であるとした点の集団（グループ）については、構成する各点の x 座標データと y 座標データと最小二乗法を用いて円の半径を算出し、連続した点群が一定半径以内であると判断される場合についてはその集団は樹木の幹の部分を表す点群であると判断し、自動除去の対象とすることとした。なお、本研究では実在の樹木の実測データから根の部分の樹木の半径（閾値）を0.2m（直径：0.4m）として設定し、それ以下の半径と推測される点群については計測結果から除去した。その結果を図11に示す。

図7の結果に比べ、樹木の根元まで除去できていることから、主成分分析と円形部の除去プロセスの組み合わせによる樹木除去手法の有効性が確認される。しかし、一部の地形が過剰に除去されているため、地形を記録するという目的からすると、削除した地形を何らかの形で復元することが望ましい。

図11 主成分分析に加え円形部の除去プロセスを追加した結果

4. 誤除去後データの復活方法

平坦性評価法を用いて取得した平坦度に対して、閾値以上の点を樹木の葉部分などであるとして一律に計測結果から除去した場合、建屋の角（エッジ）部分や奥行き異なる斜面が重なっている部分の端部のような平坦度が大きくなりやすい部分も同時に誤って除去される。一方、主成分分析と円形部の除去プロセスを組み合わせた方法を用いた場合でも固有値傾向と設定される閾値によって円形部であると判断された場所は誤って削除される。この誤除去に関しては、重み付平均内挿法など周辺の計測結果から推測して補間データを作成することも考えられるが、計測結果は存在しているので、誤除去前のオリジナルのデータを可能な限り復活させることが望ましい。

本研究では過剰に除去された地形部分の復活を行うため、図10に示した理想とする隣接点の位置関係を類推する方法を活用することとした。すなわち、距離画像上で存在する点を探索し、隣接する点で削除された点がないか探索、さらに存在する点と削除された点の間の距離が一定値以下となる場合は過剰除去点であると判断し、復活することとした。なお、点の位置関係を探索する際には、画像距離上の注目点の左右方向と下方向に探索方向を限定し、上方向には探索しないことで地表から生える樹木などを復活させないようにした。また、点間距離の閾値については、自動除去を行う際と同じく推測した理想点間距離の1.5倍以下の距離にある隣接点を復活することとした。図11の結果に対して隣接点間の位置関係を類推する手法を用いた誤除去データの復活結果を図12に示す。

理想距離を用いて隣接点の位置関係を類推する本手

法の適用により、手すりのように手動での除去が必要な部分が確認されるが、樹木の根元まで除去した状態を維持しつつ、目視によって樹木と思われるほぼ全ての部分を自動で除去し、さらにまとまった形での地形情報を記録できることが確認された。この結果に伴い、理想点間距離を用いた誤除去データの復活方法に関する有効性が確認された。

5. ま と め

本研究ではデジタルドキュメンテーションデータの作成の合理化を目的に、地上据置型レーザスキャナを用いて樹木が含まれる遺構（地形）を計測した結果から、樹木などの地形以外のデータを自動で除去する方法について検討を行った。

樹木の自動除去を行うにあたり、平坦性評価を用いた手法とエッジ特徴量を用いた方法の組み合わせや、主成分分析を用いた方法を検討し、主成分分析を用いた方法に加え、最小二乗法を用いた円形の認識による樹木の自動除去を実現した。なお、主成分分析を用いた樹木の自動除去に関しては、理想点間距離を用いて誤除去した地形データの復活を行うことで、まとまった地形情報の記録が可能となることも併せて確認した。このように、地上据置型レーザスキャナを用いた地形計測結果から樹木の自動除去を行うことにより、文化財のデジタルドキュメンテーションへの活用が期待されるだけでなく、多方面への応用も期待される。

具体的な応用先としては、航空レーザからでは判別が困難な詳細な地表面形状の記録や樹木を認識していることに着目し、樹木の樹幹や位置などを活用することも考えられる。今後は、除去精度の向上や効率化の向上、樹木の除去を行った後の精度のよい地形の補間

図12 誤除去データの復活結果

方法の確立が課題と考えている。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、リーグルジャパン株式会社の松田重雄様、佐々木公一様から地上据置型レーザスキャナによる遺構の計測データをご提供いただきました。ここに改めて謝意を表します。

(受付日2015.5.8, 受理日2015.9.18)

参考文献

1. 池内克史, 大石岳史, 2010. 3次元デジタルアーカイブ, 東京大学出版会
2. 上田尚一, 2003. 主成分分析, 朝倉書店
3. 大野和則, 永谷圭司, 秋山英久, 2010. レスキューロボットの地図構築, 日本ロボット学会誌, 28(2), pp.169-172
4. 押尾晴樹, 浅輪貴史, 梅干野晃, 宮坂 聡, 2013. 航空機 LiDAR を用いた市街地における樹木の三次元情報の整備手法 その3 voxel モデリングによる樹冠外形の再現, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.861-862 とリモートセンシング, 43(3), pp.22-29
5. 杉山岳弘, 阿部圭一, 1997. エッジベクトル抽出器と複数エッジの解析, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J80-D-II, No. 6 pp.1379-1389
6. 伊達宏昭, 2012. MMS 計測点群からの柱状物体抽出, 動体計測研究会講演資料
7. 永田 靖, 棟近雅彦, 2001. 多変量解析法入門, サイエンス社
8. 西村正三, 原 健司, 木本啓介, 松田 浩, 2012. 3D レーザ・デジタル画像を用いた軍艦島計測と損傷図作成, Journal of JSPRS, pp.46-53
9. 山内裕之, 巽 耕一, 脇登志夫, 2008. 皇居東御苑内本丸中之門石垣の修復工事と石垣修復支援システム, 建設の機械化/建設の施工企画, pp.47-52
10. 横山 大, 2004. 地上据置型レーザスキャナを用いた地形計測のためのフィルタリング手法に関する研究, 写真測量
11. Abdul Nurunnabi, David Belton and Geoff West, 2012. Robust Segmentation for Multiple Planar Surface Extraction in Laser Scanning 3D Point Cloud Data, 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012), pp.1367-1370
12. Anita Schilling, Anja Schmidt, Hans-Gerd Maas, 2012. Principal Curves for Tree Topology Retrieval from TLS Data, Proceedings of SilviLaser 2012, ISPRS
13. Ee Hui Lim, David Suter, 2009. Ground filtering and vegetation mapping using multi-return terrestrial laser scanning, Computer-Aided Design, vol. 41, pp.701-710.
14. Francesco Pirotti, Alberto Guarnieri, Antonio Vettore, 2013. Ground filtering and vegetation mapping using multi-return terrestrial laser scanning, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 76, pp.56-63
15. I. Satomos, M. Leordeanu, 2003. Automated Feature-based Range Registration of Urban Scenes of large scale., IEEE Internal Conference of Computer Vision and Pattern Recognition, Vo. 2, pp.555-561.
16. N. Brodu, D. Lague, 2012. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 68, pp. 121-134
17. Sooyoung Kim, Thomas Hinckley, David Briggs, 2011. Classifying individual tree genera using stepwise cluster analysis based on height and intensity metrics derived from airborne laser scanner data, Remote Sensing of Environment 115 (2011), pp.3329-3342
18. T. Sugiyama, K. Abe, 1995. Edge Height and reliability, Proc. ACCV '95, Singapore, Vol. II, pp. 410-414.