

9. 作山古墳の三次元測量データから 樹木形状を除去する方法について

(1) 目的

本論文では、航空機からの三次元レーザー測量による作山古墳（岡山県総社市）の地形データについて、樹木等の形状を除去する手段を検討した。

これまで私たちが行ってきた従来のデジタル測量は、トータルステーションを用いて手作業で遺跡表面の座標値を国土座標で1点ずつ計測を行う、というものである。その際同じ箇所を重複して計測することを避けるため、遺跡地表の計測範囲全面にピンポールを刺し、計測済の点はピンポールを抜く。この作業を繰り返し、遺跡全体の地形を計測する。

この測量によるメリットは、計測点を人が選択できるため、地表面のみのデータを得ることができ、得たデータを測量後直ちにGIS等の解析に用いることができることである。

その一方、デメリットもある。それはデータ取得に時間と労力が非常にかかる、ということである。1例として、岡山大学考古学研究室が行った造山古墳（岡山県岡山市）のデジタル測量がある。これは筆者も参加した測量作業だったが、毎年9月の1ヶ月間を用い、毎日10人前後の人員が作業して2005～2007年の3カ年も時間がかかった（合計の作業時間は約3ヶ月）。得たデータ点数は約12万点であり、作業した甲斐はあったが、さらに効率よく短時間で遺跡を測量する手段を検討する必要があった。

この労力と時間を低減できる測量手段として、航空機からの三次元レーザー測量がある。ただしこの三次元レーザー測量にも問題点がある。本論文ではその問題点を解決する手段を検討し、実際に行ったプログラム作成とデータ処理の内容を記す。

(2) 航空機からの三次元レーザー測量の問題点

この測量は航空機から地表面にレーザーを照射し、レーザーが当たった点の座標を計測するものである。今回の検討では、岡山県総社市にある作山古墳の三次元レーザー測量をアジア航測に委託して行ったが、作業は約1日、得られた点数も約1,100万点であり、従来のデジタル測量と比較すると、大幅な労力削減ができた。

その一方で問題点もある。それは測量範囲全体を空からレーザー照射で機械的に行うため、地面だけでなく地表に生えている樹木の形状も計測してしまう、ということである。

地表と樹木の形状が混在した測量データの断面図を図9.1に示す。図9.1より地面と樹木上面を識別することができる。データ点数は約1,100万点あるため樹木形状のデータのみを手作業で除去することは非常に困難であり、プログラムを作成し樹木形状データのみを自動除去する必要があった。そこで次章に記す考え方を用い、樹木形状データを自動除去した。

(3) 樹木形状データ除去の考え方

3-1 ラスタを用いた地表データの抽出

(1) ラスタデータの作成

測量データが分布する範囲のうち、必要な領域を含むラスタデータを作成する。ラスタ各点の標高値はとりあえず0とする。

ラスタの間隔は適切な値を設定しなければならない。この値を適切に設定しなければ、次のような

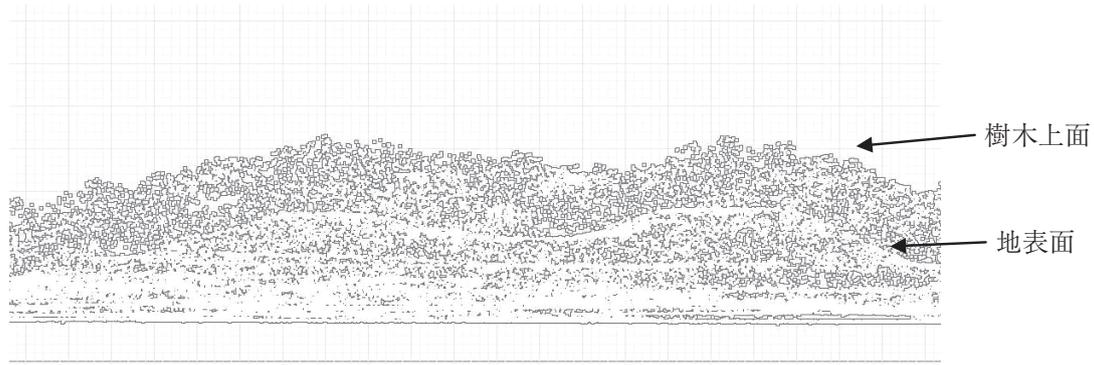


図9.1 測量データ断面図（地形と樹木が混在したデータ）

問題が生じる。

- ・ラスタ間隔大：処理後の地形データが粗くなり、細かい地形の様子を検出することができない。
- ・ラスタ間隔小：ラスタデータの容量が大きくなり過ぎ、樹木除去処理やCG表示処理の際、処理に時間がかかりCG表示できない場合もある。

造山古墳デジタル測量の際は約0.5～1mの間隔で計測しており、この程度の間隔でも細かい地形の様子を検出することができた。そこで今回の作山古墳データ処理でも、約0.5m間隔で地表点の検出を行うこととし、ラスタ間隔は0.5mとした。

(2) ラスタ標高値の決定

三次元測量データとラスタデータの模式図を図9.2に示す。

今、図9.2に示した格子点Fに注目し、格子点Fを中心とした一辺0.5m（＝ラスタ間隔）四方の領域を考える（図9.2の破線で示した領域）。

この破線で示した範囲内の全三次元測量データの標高値を調べ、最も標高が低い点を検出する。その後、格子点Fのx、y、zを、最も標高が低い点のx、y、zの値に置き換える。つまり格子点Fを、0.5m四方の中で最も標高が低い点に移動させる。この処理により大部分の樹木データを除去す

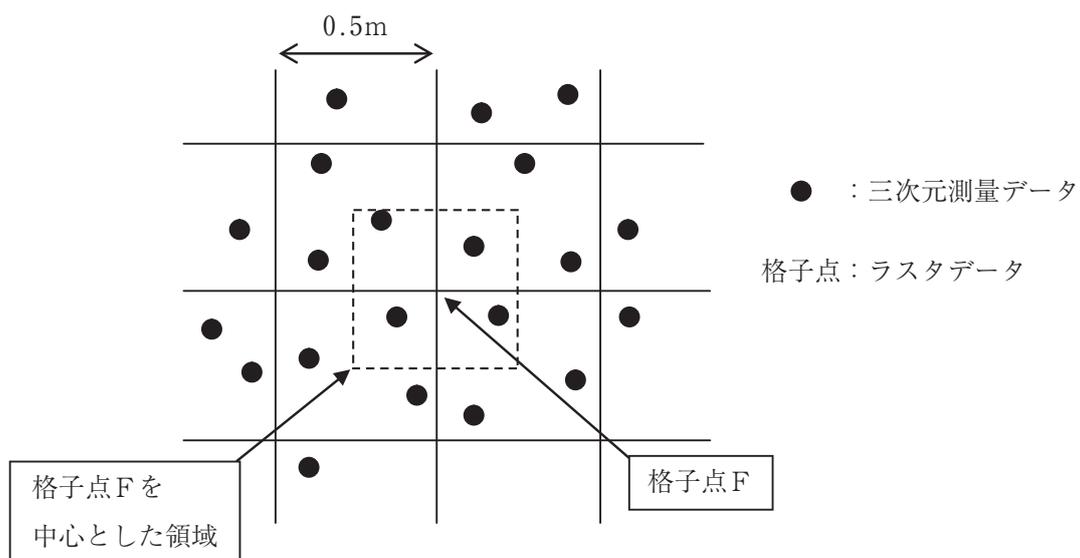


図9.2 三次元測量データとラスタデータの模式図



図9.3 ラスタ間隔0.5mの地形データ（データが大きいため墳丘周辺のみ表示）

ることができ、地形のおよその形状を検出することができる。図9.3にこの処理を行った作山古墳データを示す。

図9.3では、作山古墳のおよその形状を見ることができる。所々に見られる突起は0.5m四方の範囲内に全く地表面のデータが含まれていない箇所である。ラスタ間隔を広く設定すると、図9.2の破線で示した範囲が広くなり地表面データを検出しやすくなるため突起は少なくなる。逆にラスタ間隔を小さくした場合は、破線の範囲が小さくなるので地表面データを検出しづらくなり、突起が増える。

3-2 地形の概型形状データの作成

図9.3で示した処理結果（以下、比較する点）では、0.5m四方の範囲に地表データが全くない箇所があり、そのような箇所に不自然な突起が生じる。この突起を除去するため、地形の概型がわかる形状データ（以下、概型形状データ）を作成し、図9.3の処理結果と標高の比較を行う。そして比較する点の標高値が（概型形状データ標高+しきい値）より高い場合、その箇所は突起部分であると判定し、標高値を概型形状データの標高値に修正する。

この時、概型形状データは地形全体の大まかな形がわかるものでよく、細かい地形の差異は一致しなくてよい（しきい値により細かい地形の差異は無視される）。

概型形状データは、3-1で示した方法を用い、ラスタ間隔を広めにしたラスタを作成することで得ることができる。今回の検討では、ラスタ間隔1m、2m、3m、4mの概型形状データを作成して突起の除去を行った。それぞれのラスタ間隔の形状を図9.4-1～4-4に示す。

これらの図より、ラスタ間隔を広くするほど突起は少なくなるが、細かい地形は潰れて見られなくなってしまうことがわかる。

3-3 比較する点が概型形状データ上のどの領域に入るかの判定

3-1で得たラスタの比較する点は、次に示す考え方で概型形状データ上のどの位置に来るか（どの3点の領域に入るか）の判別を行う。

概型形状データの点は、x、yを近傍の最も標高が低い点のx、yに合わせているため直角に交わる格子状にはならない。しかしファイル内のデータ順序はラスタデータなので、そこから比較する点にだいたい近い点を算出することができる。

具体的には、概型形状データの配列(1,1)の点から比較する点までのxの差(Δx)、yの差(Δy)を算出し、配列(1,1)からxが Δx 、yが Δy 離れた概型形状データの点を算出する。この点を点A

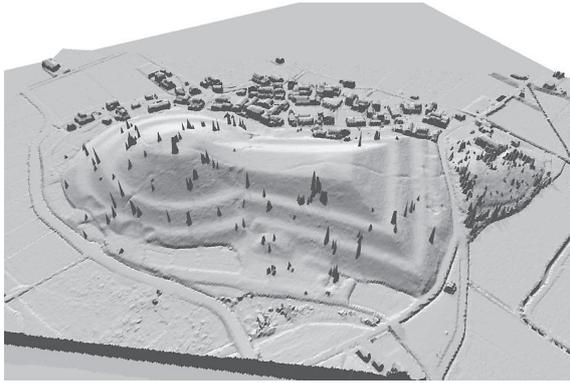


図 9.4-1 ラスタ間隔 1 m の形状

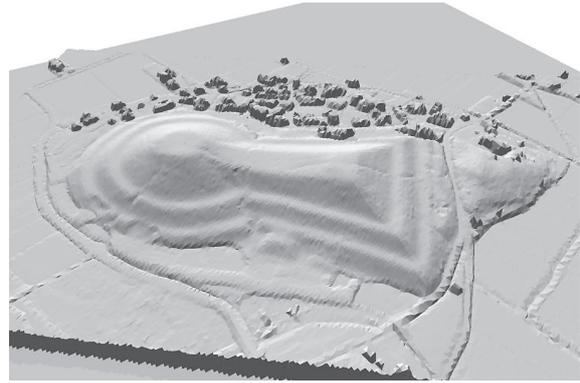


図 9.4-2 ラスタ間隔 2 m の形状

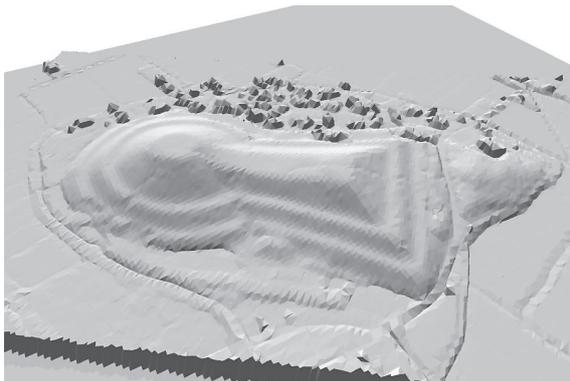


図 9.4-3 ラスタ間隔 3 m の形状

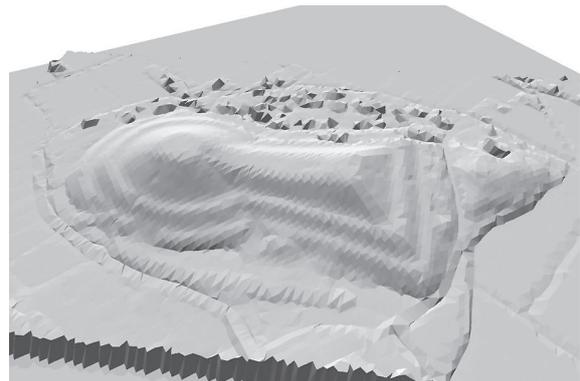


図 9.4-4 ラスタ間隔 4 m の形状

とする。

次に、比較する点が点Aの周りのどの領域に入るか、判別を行う。点Aの周囲には図9.5に示すように、点Aを中心とする8つの領域（三角形）が存在する。それぞれの領域を反時計回りに①～⑧とする。

今、例として③の領域に注目して、次の方法により、比較する点が③の三角形内に含まれるかどうかの判別を行う。

図9.6に示すように、点A以外の点をそれぞれ点B、点Cとし、比較する点を点Pとする。

まず、三角形 ABC の面積を計算する。次に図7-1や図7-2の破線で示すように、点Pを頂点の一つとする、三角形 PAB、三角形 PBC、三角形 PCA それぞれの面積を計算する（三角形面積の算出にはヘロンの公式を使用）。もし点Pが三角形 ABC の中にある場合は図9.7-1のようになり、それぞれの三角形の面積には以下の関係式が成立する。

$$\text{三角形 ABC} = \text{三角形 PAB} + \text{三角形 PBC} + \text{三角形 PCA} \quad \dots\dots\text{式[1]}$$

もし点Pが三角形 ABC 内に入らない場合は、図9.7-2のようになる。そして三角形 ABC の面積は3つの面積の和より小さくなり、式[1]は成立しない。この考え方をを用いて、比較する点が点A周囲の領域①～⑧のどこに入るかを判定する。

3-4 三角形 ABC 上の標高値算出

前節で述べたように、真上から見た時比較する点Pがどの三角形の中に含まれるかを判別することができた。しかし立体的に考えると、比較する点Pと三角形 ABC の関係は図9.8のように示すことができ、比較する点Pと三角形 ABC の標高差を算出するためには、比較する点Pを三角形 ABC

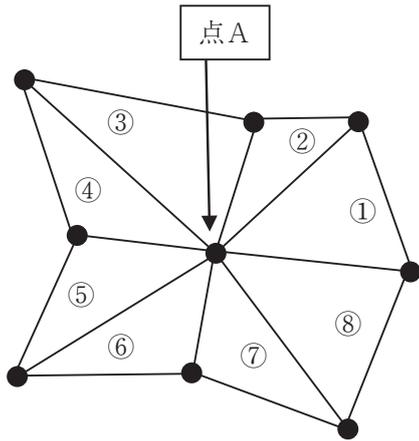


図9.5 点A周囲の8つの領域 模式図

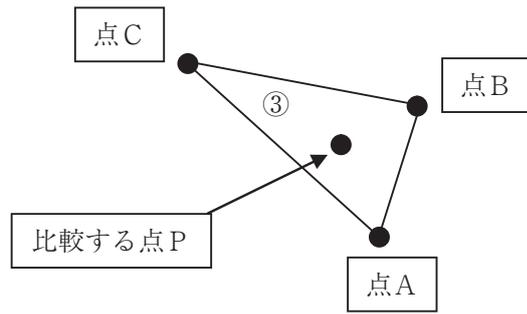


図9.6 領域③の三角形概略図

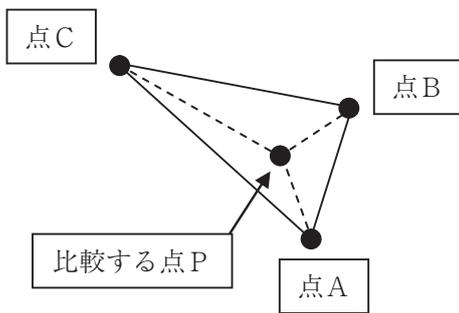


図9.7-1 点Pが領域③に入る場合

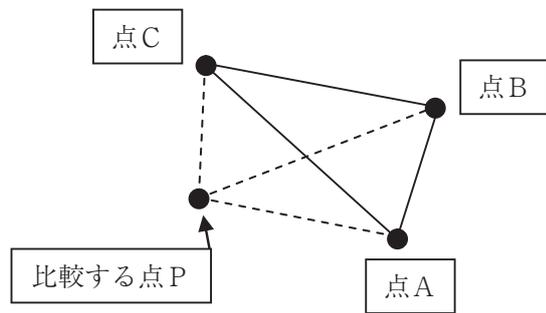


図9.7-2 点Pが領域③に入らない場合

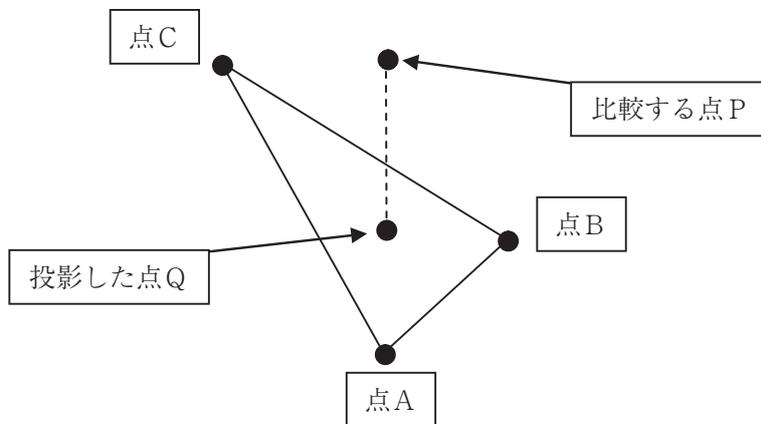


図9.8 比較する点Pと三角形ABCの立体的な関係

上に投影した点Qの標高値を計算しなければならない。そこで投影した点Qの標高値を計算するため、平面の式の算出を行う。

通常、平面は、その面が通る3つの点を定めることによって1つの平面が成り立つ。その平面上の任意の点を $Q(x, y, z)$ とすると、その平面の式はベクトルを用いて次のような考え方で算出することができる。

なお、ベクトルとは、速度や力、磁束など、方向と大きさを持つ物理量を表すもので、簡単にいえば矢印である。その矢印の始点を原点とした時、終点(矢印の先)の位置をベクトルの成分とするこ

とで、数学的に扱うことができる。

いま、その平面が必ず通る3つの点A、B、Cの座標を以下のようにおく。

点A : (x_a, y_a, z_a)

点B : (x_b, y_b, z_b)

点C : (x_c, y_c, z_c)

すると、ベクトル AB 及びベクトル AC は、次のように表される。

ベクトル AB = $(x_{ab}, y_{ab}, z_{ab}) = (x_b - x_a, y_b - y_a, z_b - z_a)$

ベクトル AC = $(x_{ac}, y_{ac}, z_{ac}) = (x_c - x_a, y_c - y_a, z_c - z_a)$

次に、求める平面に垂直なベクトル（法線ベクトル）を算出する。法線ベクトルはベクトル AB 及びベクトル AC に垂直なベクトルなので、ベクトル AB とベクトル AC のベクトル積を計算することで求めることができる（図9.9参照）。

ベクトル積とは、2つのベクトルに直交するベクトルを計算するための手法で、中学理科の電気で学ぶフレミングの左手の法則などは、ベクトル積を利用したものの一例である（磁界方向と電流方向の垂直方向に力が働く、というもの）。

今、求めたい法線ベクトルを (x_v, y_v, z_v) とおくと（v : vertical）、法線ベクトルはベクトル AB とベクトル AC のベクトル積により次のように求めることができる。

法線ベクトル = (ベクトル AB) × (ベクトル AC)

$x_v = y_{ab} \times z_{ac} - z_{ab} \times y_{ac}$

$y_v = z_{ab} \times x_{ac} - x_{ab} \times z_{ac}$

$z_v = x_{ab} \times y_{ac} - y_{ab} \times x_{ac}$

次に、平面上の点A (x_a, y_a, z_a) と、平面上の任意の点Q (x, y, z) を結んだベクトルは、以下のよう表すことができる（図9.10参照）。

ベクトル AQ = $(x - x_a, y - y_a, z - z_a)$

このベクトル AQ は、先ほど求めた法線ベクトルと直交するため、ベクトル AQ と法線ベクトルの内積は必ず0となる。これを式で表すと、次のようになる。

ベクトル AQ · 法線ベクトル = 0

$(x - x_a) \times x_v + (y - y_a) \times y_v + (z - z_a) \times z_v = 0$ ……式[2]

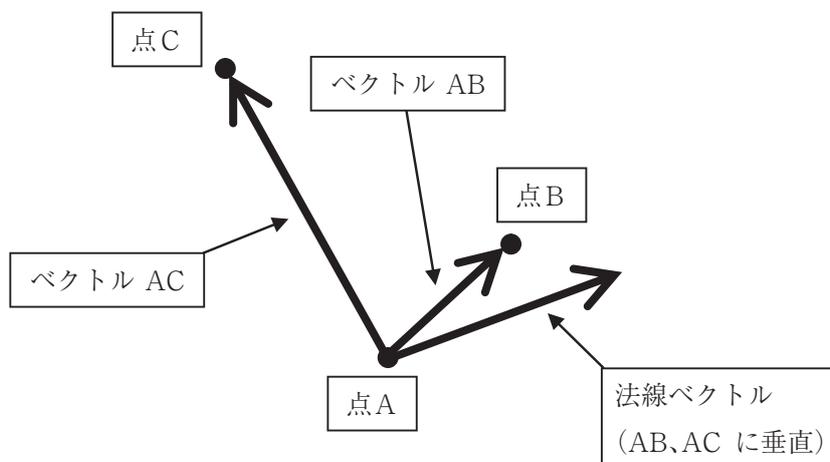


図9.9 ベクトル AB、ベクトル AC、法線ベクトルの関係

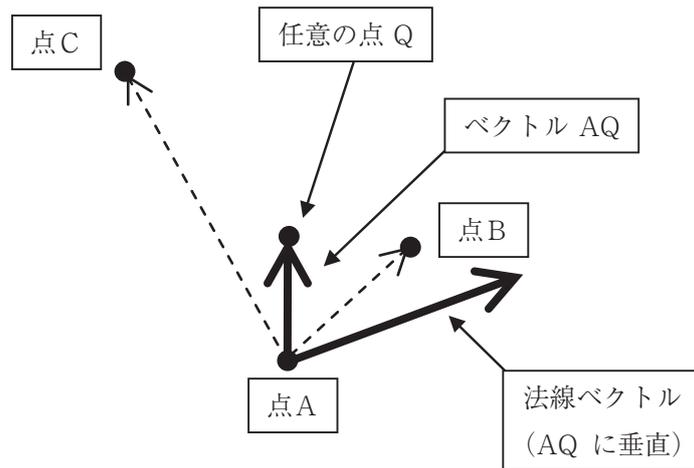


図 9.10 ベクトル AQ と法線ベクトルの関係

ここで求めた式[2]が、平面の式となる。この式を用い、3点A、B、Cからベクトル AB 及びベクトル AC とその法線ベクトルを求め、式[2]の x と y に比較する点Pの x と y を代入することで、平面に投影した点Qの z (標高値) を算出することができる。

3-5 比較する点Pと投影した点Qの標高差の算出

前節で述べた考え方をを用いることで、比較する点Pを三角形 ABC 上に投影した点Qの標高値を算出することができた。あとはその標高差を求め、その値が設定したしきい値より大きい時、比較する点Pは樹木の点であると判断する。

このしきい値とは、概形形状データより何メートル以上飛び出していたら樹木とみなす、という値を表したものである。このしきい値が大きすぎると、2~3mほどの明らかに樹木を表す突起でも除去することができなくなる。逆に小さすぎると、概形形状データよりわずかでも大きければ樹木と判断され、細かい地形が均されてしまう。本検討では、しきい値を0.5mに設定し、点PとQの標高差が



図 9.11 樹木を除去した結果 (データが大きいため墳丘周辺のみ表示)

これより大きい場合に樹木であると判別した。

なお当初しきい値は1.5mを使用していたが、後にしきい値を0.5mにして処理したところ、より小さな突起を除去でき、突起以外の細かい地形が潰れないことを確認した。そのため検討後半では最終的に、しきい値を0.5mとした。

点Pが樹木であると判別された場合、比較する点Pの下にある地表面の標高は投影した点Qの標高に等しいとみなし、点Pのzを点Qのzに置き換える。この処理を行うことで、樹木の形状データを除去し、地表面だけのデータを得ることができる。樹木を除去した結果を、図9.11に示す。

(4) まとめ

今回の検討で、数学的手法を用いて地形データを抽出することができた。これにより、三次元レーザー測量データを有効に用いることができるようになった。今後のデジタル測量では、従来の手作業による測量ほど手間をかけることなく、遺跡の測量データを得ることが期待できる。

また今回の測量データで、作山古墳の西側に土手状地形を発見することができた。現在も多くの専門家にご検討いただいているが、周濠と周堤の一部である可能性がある。その場所は現在一部が畑として利用されており、地上からもその地形を認識することができる。その延長上は草木に覆われた荒地となっており容易に観察することはできないが、土手状地形がさらに延びている可能性もある。今回のレーザー測量データから地形全体を俯瞰視することができるようになり、その観察から土手状地形が周濠と周堤の一部である可能性がさらに高まった。

レーザー測量データは地表面の下草を完全に除去できていない可能性があるため、たとえレーザー測量でも下草を徹底的に刈らなければ正確な地形を計測することは困難である。しかし樹木を除去して地形を計測できるという点において、今回の発見は、改めて航空機からのレーザー測量の有効性を再認識させられるものであった。今後この手法を用いた調査でどのような新発見がなされるか、大変楽しみである。

なお、航空機からの測量手段として、他に写真測量がある。写真測量はレーザー測量と異なり、たとえ葉の隙間の先に地表面があったとしても画像の周りの状況から2枚のステレオ画像の対応する点を検出する。そのため、葉の隙間の先にある地表面ではなく隙間の位置を検出してしまい、図9.1で示したような樹木上面と地表面が混在したデータとならない。従って今回の手法で処理を行っても樹木部分が突起として表れず、樹木形状を除去することができない。写真測量データに対してはそれに適した別の処理方法を検討する必要がある、今後取り組んでいきたい課題である。

謝 辞

今回の検討を行うにあたり、岡山大学考古学研究室の新納泉教授には、作山古墳の三次元レーザー測量データをご提供いただき、今回の検討を行うきっかけをいただきました。また倉敷作陽大学の澤田秀実準教授には、写真測量のデータをいただき、今回の処理方法とは別の、写真測量データに適した処理方法検討の必要性を認識する機会をいただくことができました。ここに、両先生とお世話になった皆様に、厚く御礼申し上げます。