

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

VOL. 60 No. 2 September 2021

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF
MARITIME, PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

テンプレートマッチングを応用した堤体位置検出解析手法の 開発

松村 聡*・水谷 崇亮**・酒井 勝***・
崎本 昌稔****・松村 秀倅****・竹内 えり****

要 旨

近年、施工管理や維持管理などを目的として、レーザーや音波を用いた構造物などの形状計測や位置計測が盛んに行われている。計測技術が高度化し、より精細な点群データが得られるようになって一方、膨大な点群データから必要とする特徴量を効率良く把握するデータ処理方法が求められている。

本研究では、防波堤などの構造物を計測して得られた点群データから、例えば各堤体の天端高や隣接堤体の目地ずれ量といった特徴量を把握するための堤体位置検出解析手法を新たに提案した。点群データから堤体位置を検出する解析手法として、ここでは主に画像処理分野で利用されているテンプレートマッチングを応用した。提案する解析手法によって妥当な堤体位置が検出されることを確認した上で、本解析手法を既存の測量データ処理ソフトウェアへ実装した。実装する上では、実務利用における利便性に配慮して、堤体番号や計測時点の異なる複数の堤体を解析可能で、且つ解析時間を大幅に短縮する解析条件の設定が可能なものとした。

本研究では、熊本港の防波堤を対象としてレーザーとマルチビームによる現地計測を行い、得られた点群データを使って堤体位置検出解析を行った。本解析結果から算出した天端高と、当現場で定期的に行われている水準測量や点群データから直接読み取った天端高を比較し、計測や解析の精度や適用性を考察した。

キーワード：テンプレートマッチング、点群データ、位置検出

* 地盤研究領域 基礎工研究グループ 主任研究官
** 地盤研究領域 基礎工研究グループ長
*** 国土交通省 九州地方整備局 熊本港湾・空港整備事務所 企画調整課長
**** 大洋エンジニアリング株式会社 コンサルティング事業本部 測量部
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5057 Fax：046-844-0618 E-mail：matsumura-s@p.mpat.go.jp

Development of analytical method to detect position of breakwater applying template-matching

Satoshi MATSUMURA *

Takaaki MIZUTANI **

Masaru SAKEI ***

Masatoshi SAKIMOTO ****

Hideyuki MATSUMURA *****

Eri TAKEUCHI *****

Synopsis

For the sake of construction management or maintenance of structures, a 3-dimensional scanning measurement with laser or sonic wave has been recently often performed. With a development of the measuring technique, meanwhile, a processing method to extract necessary information faster and more easily from an enormous point cloud data obtained by the measurement is required.

In this study, the authors proposed a new processing method to detect a position of breakwater from point cloud data applying template-matching to measure, for example, a crest height or a gap distance between neighboring levee bodies. The proposed processing method was implemented into a commercial software to process point cloud data with further improvement for faster calculation and higher usability.

The authors performed a laser and multibeam measurements of a breakwater in Kumamoto port and analyzed positions of it with the proposed processing method. In the report, the authors discussed an accuracy and a usefulness of the results comparing with the results of leveling regularly performed and the positions manually read from the point cloud data.

Key Words: Template-matching, point cloud data, position detection

* Senior researcher, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
** Head of Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
*** Director of Planning and Coordination Division, Kumamoto Port and Airport Office, The Kyushu Regional Development Bureau
**** Survey Department, Consulting Headquarters, Taiyo Engineering Co., Ltd.
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan National Research and Development Agency,
National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology, Port and Airport Research Institute
Phone: +81-46-844-5057 Fax: +81-46-844-0618 E-mail: matsumura-s@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨	1
1. はじめに	4
2. 解析手法	5
2.1 概要	5
2.2 解析手順	6
2.3 解析プログラムの動作確認	8
2.4 解析ソフトウェアへの実装	9
3. 現地計測	10
3.1 概要	10
3.2 計測方法とその得失	10
3.3 計測結果と事前処理	12
3.4 形状検出による天端高の算出方法	13
4. 解析結果	14
4.1 概要	14
4.2 解析結果と天端高の比較	14
4.3 各種精度に関する考察	18
5. 今後の展望と課題	20
6. おわりに	22
謝辞	22
参考文献	22

1. はじめに

施工管理や維持管理等を目的として、近年ではレーザーや音波を用いた構造物の形状計測や位置計測が盛んに行われている（松本ら，2009；渡部・田中，2012）。このような計測で得られるデータは、3次元の座標値をもつ点の集合体であり、点群データと呼ばれる。点群データは単なる点の集合体であるため、例えば堤体全体を計測した点群データから天端高等の必要な特徴量を知りたい場合には、点群データから天端面を特定し、特定された天端面から天端高を算出するといった処理が必要となる。このとき、各点がもつ情報は基本的に座標値であることから（ただし、レーザー計測では反射強度も取得される）、点群データ中のどの点が天端面に属する点か、すなわちどの点が実際に天端面を計測して得られた点かデータ上は容易に判断できない。そのため、点群データを実際にPC上に可視化等した上で、天端面を計測したとみられる点を解析者がある程度手動で特定するか、その特定作業を自動化して処理する必要がある。対象が1函であれば容易だが、防波堤全函について、さらに天端面だけでなく側壁や底面に関する特徴量も必要な場合には、相当な労力を要する。

高精細な計測装置を用いたり、同じ計測範囲を複数回計測したりすることによって、点群データの点密度は高くなる。一般的に、点密度が高くなると、被写体のより詳細な形状やより正確な位置を把握することができる。その反面、点密度が高くなると、データ量が大きくなるため、点群データをPC上で可視化して無理なく操作したり、特徴量を求める処理をするためには、高い処理性能を持つPCや膨大な解析時間が必要となる。点群データから必要な特徴量を知るために、その都度点群データを操作または処理することは計算負荷が高く、難しい作業となる。

点群データから対象物の特徴量を把握し、形状検出するために、これまでに種々の解析手法が開発されている。その中で最も一般的に利用される手法の1つがエッジ抽出法である。松沼ら（2010）、阿部ら（2011）は、鋼部材や配管が複雑に混在するプラント施設を対象として、レーザーสキャンによって得られた点群データを写像した距離画像および明暗画像（レーザーの反射強度を示す画像）から、エッジ抽出により円柱面や矩形面の検出を試みた。さらに、レーザー計測では対象物の輪郭線付近でノイズが増大することがあるため、この課題解決のため安定した（すなわち、誤抽出の少ない）エッジ抽出法を検討した。堀田・岩切（2014）は、所定の近傍領域に含まれ

る点群の法線ベクトルを求め、相対的な法線ベクトル勾配からエッジ抽出する方法を提案した。この結果、様々な角度で交差する2面間のエッジが抽出できることを確かめている。一方、3面以上が異なる角度で交差する場合には全てのエッジを抽出できない場合があるなど課題も残されている。また、横山・近津（2010）は、城壁をレーザースキャンした点群データから、石垣を構成する個々の石材の輪郭線を抽出するために、可変型矩形マスクを用いた平坦性評価によって、平坦度の変化が大きい箇所を輪郭線として抽出する方法を検討した。その結果より、石材の輪郭線が良好に抽出されているが、一方で石材表面に生えるコケなどを誤抽出したとみられる輪郭線も確認でき、目標とする輪郭線のみを忠実に抽出することの難しさがわかる。このように、エッジ抽出法は実績のある一般的な処理方法であるが、エッジ付近でノイズが発生し易いことやエッジの誤抽出に対する処置には課題も残されている。

渡部・田中（2012）は、羽田空港D滑走路の不同沈下状況を把握するために、レーザー스キャナを搭載した車両を走行させながら地表面を計測し、効率的な計測条件やデータ処理法を検討した。本検討では1m×1mのメッシュ毎に点群の標高を単純平均して地表面形状を可視化するなど比較的簡易なデータ処理を行っているが、滑走路のように広大な計測範囲であっても、計測時の相対的な誤差が十分小さいこと、すなわち計測時点における地表面形状を十分な精度で計測可能であることを確認した。

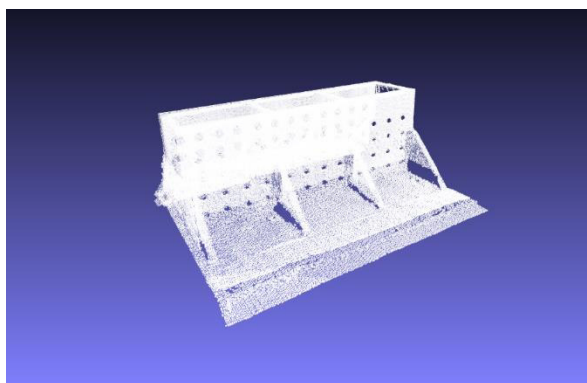
城壁の石材や地表面形状の例のように、計測対象物の形状が不規則である場合や時間変化する場合には、得られた点群データを処理して形状を検出する方法が有効であると思われる。一方、本研究では、形状が既知である対象物の位置情報を知りたい場合に、エッジ抽出などにより形状を検出するのではなく、既知形状と類似する点群配置が現れる位置を検出することが有効ではないかと考えた。すなわち、防波堤のように設計図面あるいは出来形などからその形状を予め特定でき、且つ一般的に供用期間中もその形状が変わらない構造物（ケーソンのような剛な構造体）については、その形状を表した面データをテンプレートとして、テンプレートマッチング（例えば、G. Bradski and A. Kaehler, 2013）の要領で点群データ中で堤体が存在する位置を検出するという解析手法（以下、堤体位置検出解析という）である。テンプレートマッチングとは、画像処理分野で広く利用される解析技術であり、詳しくは後述する。これにより得られた堤体の位置情報から、天端高であれ法線位置であれ必要な特徴量を容易に算出することができる。さらに、テンプレート

マッチングで同定した堤体の位置情報が面データとして得られるため、点群データと比べて、データ量が非常に小さいことから、高い処理性能をもつPCを必要とせず、データの取扱いが容易である。

本研究では、堤体位置検出解析プログラム（松村ら，2019）を開発するとともに、それを点群データ等の測量データを処理するための既存の解析ソフトウェアへ実装した。そして、図1aに示される熊本港に設置された軟弱地盤着底式防波堤（以下、軟着堤という）を対象として、現地計測を行い、計測結果から堤体位置検出解析を行った。図1bは、設置された軟着堤を実際に現地計測して得られた点群データの例を示している。本稿では、2.において堤体位置検出解析手法の詳細および解析ソフトウェアへの実装における要点を述べる。3.では、本解析手法の妥当性確認を目的として実施した現地計測の詳細および得られた点群データの事前処理について述べる。4.では、水準測量で得られた天端高や、点群データを他の方法により処理した算出した天端高と本解析結果を比較するとともに、解析精度や解析時間について考察した。これらの結果を踏まえて、5.では今後の展望や課題について整理した。



a) 堤体（設置前）



b) 点群データ（設置後）

図1 軟弱地盤着底式防波堤

2. 解析手法

2.1 概要

本研究では、点群データを用いて堤体位置を検出するために、テンプレートマッチングを応用した解析手法を考えた。テンプレートマッチングとは、画像処理分野で広く利用される解析技術であり、テンプレート画像に一致する（あるいは最も類似する）部分を探索画像の中から検出する技術である（図2.1）。一般的には画像中にある物体認識等に用いられており、土木工学分野でも地盤変状（White J. D. et al. 2003）や風・水の流れなどの可視化に用いられることがある。点群データを用いたテンプレートマッチングと、画像を用いたテンプレートマッチングでは、探索領域の中からテンプレートに類似する形状等の特徴を検出する際の計算方法が異なるものの、対象データからテンプレートの特徴を探索、検出するという基本的な考え方は同じである。

テンプレートマッチングを応用して堤体位置を検出するとは、すなわちCADなどによって予め作製しておいた堤体の形状データ、すなわちテンプレートを用いて、その形状と最も類似する点群配置が点群データ上のどこに位置するかを探索、検出することであり、検出された位置を堤体が実際に存在する位置とみなす。このときに、堤体の形状がテンプレート形状と合致していると仮定することで、堤体の位置情報を面データとして取得することができ、特徴量の抽出が容易となる。実際には、堤体の形状がテンプレート形状と合致しているという保障はないため、解析結果（点群データと堤体の位置情報）を見ながら、位置情報が正しく検出されていることを確認する。

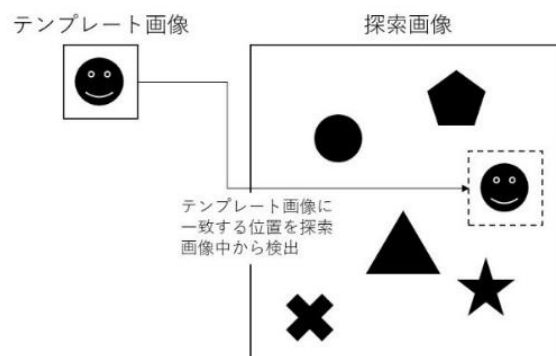


図2.1 画像解析におけるテンプレートマッチングのイメージ

2.2 解析手順

図 2.2 は、本解析の 2 次元的な概念図を示している。本解析では、探索対象の点群データ中においてテンプレートの位置を少しずつ移動させながら、移動した各位置での点群配置とテンプレート形状の一致度を評価する。そして、最も一致度の高い位置が実際に堤体が存在する位置として検出される。

画像を対象としたテンプレートマッチングでは、テンプレート画像と探索画像から、それぞれの画素値の二乗差分、乗算あるいは相互相関などを求めて一致度を評価する (G. Bradski and A. Kaehler, 2013)。一方、本解析では、点群データを直接用いて (すなわち、点群データから変換される距離画像や明暗画像を用いないで) テンプレートマッチングを行うため、上述のような画像を対象とした方法は利用しない。仮に、距離画像や明暗画像を用いる場合でも、画像に映った対象物の方向に応じてテンプレートを写像するといった追加の処理が画像毎に必要なと思われる。本解析では、一致度を評価するための指標として、テンプレート形状を構成する面と点群中の各点との距離の合計を用いた。すなわち、その距離の合計が最も小さくなる位置を実際に堤体が存在する位置と考えた。図 2.2 に示されるように、点群データに対して、(n)ステップから(n+5)ステップまで長方形のテンプレートを移動させた場合、各ステップで点群とテンプレートを構成する線の最短距離の合計が計算される。本例では(n+2)ステップ目でテンプレート形状と点群データの一致度が最も高く、本ステップの位置が実際にテンプレートに合致する長方形 (堤体) が存在する位置として検出される。このような指標は、点群データを直接用いてテンプレートマッチングを行う上で最も単純且つ直感的な方法と思われるが、後述される結果のように人間が手動で対象物の位置を検出した結果と比較しても、検出精度が劣っていることはない。一方、解析には更なる効率化や高速化が望まれるので、マッチング手法、すなわちどのような指標で一致度を評価するかについては今後も検討の余地がある。

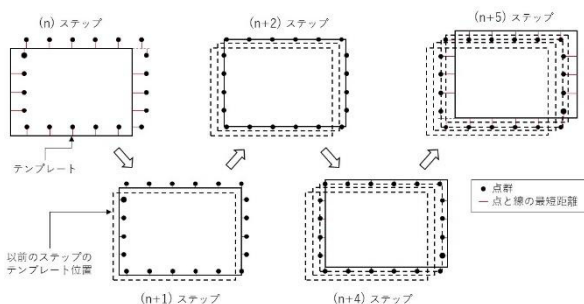


図 2.2 解析の 2 次元的な概念図

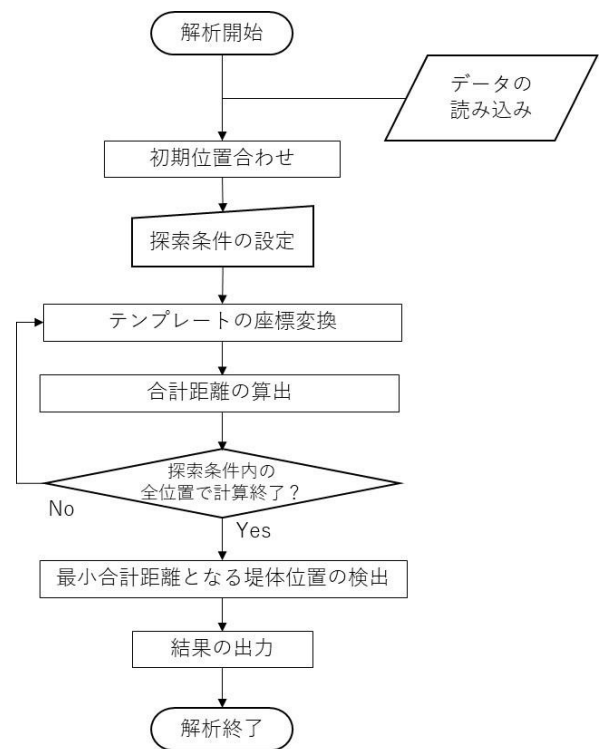


図 2.3 解析フロー

図 2.3 は、本解析のフローを示している。フロー中の各項目の詳細は以下の通りである。

(1) データ読み込み

本解析では、点群データとテンプレートデータの 2 つのデータを読み込む。解析に用いる点群データは、各点の 3 次元座標が一行毎に記述されたテキストデータである。

テンプレートデータには、CAD 等を用いて堤体形状を予め作図し、STL 形式 (Standard Triangulated Language) として出力したデータを用いる。STL 形式とは、対象形状の表面に三角形の面群を敷き詰めることによってその形状を表現するものである。データ内には各三角形の頂点座標および法線ベクトルの座標が敷き詰められた面数分記述されている。

なお、現地計測結果を対象として解析する場合、ここで読み込まれる点群データは、後述される事前処理を行った点群データである。

(2) 初期位置合わせ

一般に、テンプレートは CAD 等で作成した際の原点座標近くに位置すると思われるが、現地計測により得られた点群データは数 m~数 km 離れた基準点からの座標を示している。そのため、堤体位置検出解析を行う際の前処理として、(1) で読み込まれた両データの大きかな初期位置合わせを行う。後述の実装されたソフトウェアでは解析者

が手動で初期位置合わせを行うが、これに限らず、例えば両データの重心や両データに対してそれぞれ外接矩形(全ての点あるいは面を包含する矩形)を作成した場合に各外接矩形の図心などを機械的に合わせるなどしても良い。

(3) 探索条件の設定

探索条件として鉛直, 水平および回転方向の探索範囲と探索間隔を設定する. このとき, 探索間隔とは, テンプレートを数センチメートル毎, 数度毎に移動させながら点群データとの一致度を計算する際, 一致度を計算するときにテンプレートを移動させていく距離や回転角度の間隔を指している. 探索間隔の設定では, 現地計測の精度や解析に要する時間を考慮して設定することが重要である.

(4) テンプレートの座標変換

本解析では, 点群データ中で堤体が存在する位置を検出するために, テンプレートの位置を少しずつ移動させながら, 一致度を計算する. このとき, 図 2.4 で示されるようにテンプレートを構成する面群に対して 3 次元の座標変換が必要となる. そこで, 画像処理において一般的に利用されるアフィン変換によって, テンプレートの座標変換を行った. アフィン変換とは, 平行移動と形状の線形変換を行うものであり, 図 2.5 に示されるように平行移動のほか, 回転, 拡大縮小, せん断変形から構成される. 本解析では, 解析対象の堤体が剛体であることを前提としていることから, 拡大縮小およびせん断変形を考慮せず, 平行移動および回転のみを考慮した座標変換を行った.

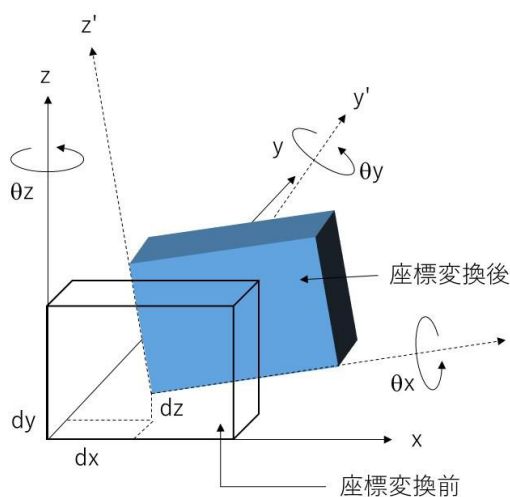


図 2.4 3次元の座標変換

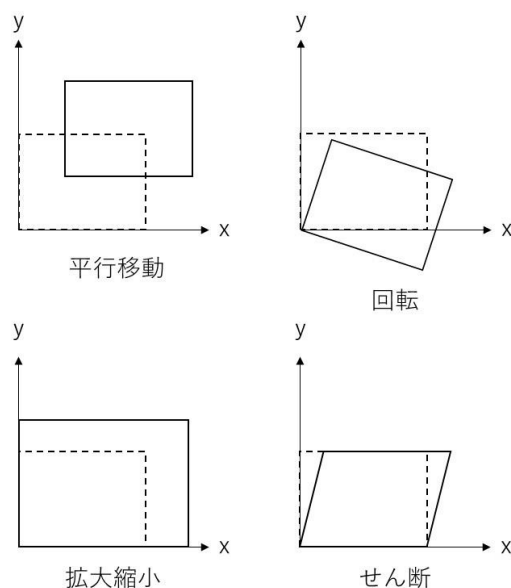


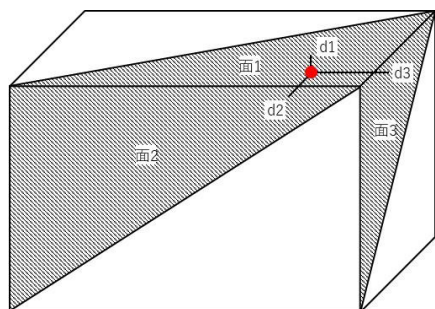
図 2.5 アフィン変換の移動・変形パターン

(5) 合計距離の算出

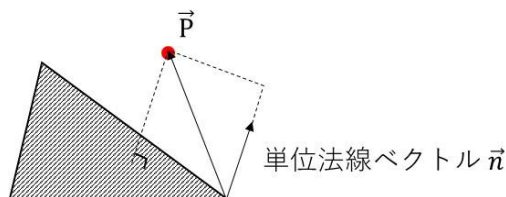
点群データ中の各点とテンプレートの各面との距離を算出する. 図 2.6a は, ある 1 点と面 1~3 との距離 $d_1 \sim d_3$ を示している. 各距離の関係が $d_1 < d_2 < d_3$ とすると, この点は面 1 を計測して得られた点として考えられる. このように, 点とテンプレートの各面との距離を全て算出し, 最小距離を抽出する. 全点について最小距離を計算し, その合計距離を算出する.

なお, 図 2.6b で示されるように点と面との距離は, 点と面の 1 頂点を結ぶベクトル P と面の法線ベクトル n の内積によって求められる. このとき, STL 形式データには既に各面の法線ベクトル座標が記述されているため, 点群座標と法線ベクトル座標から点と面の距離を容易に算出できる.

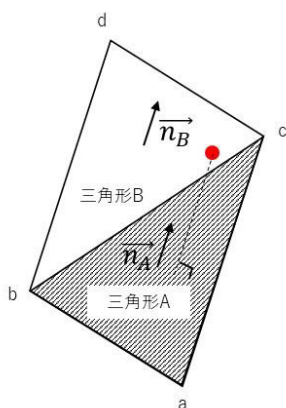
STL 形式データでは, 1 つの四角形面を表現するために少なくとも 2 つの三角形面が必要となる. また軟着堤のように複雑な形状になると, 同一平面上に複数の三角形面が形成される. そのため, 点とある 1 平面との距離を算出する際に, 同一平面上の複数の三角形面に対して距離計算を行うことは計算時間の無駄である. 本解析では, 図 2.6c で示されるように複数の三角形面が同一平面上にある場合には, 代表のある 1 つの三角形面 (図中, 三角形 A) を含む無限に広がる平面との距離を計算する.



a) 点と各面との距離の大小関係



b) 点と面との距離



c) 同一平面上にある三角形の取り扱い

図 2.6 合計距離の算出方法

(6) 最小合計距離となる堤体位置の検出

上述 (4) で座標変換された各位置でのテンプレートの面群と点群との距離の合計が上述 (5) で算出された。ここでは、最も合計距離が小さくなった位置が、堤体が実際に存在する位置として検出される。このとき、検出された位置を起点として、上述 (3) に戻り、さらに細かな探索条件を設定した上で再度解析を行い、より正確な堤体位置を検出しても良い。

(7) 結果の出力

テンプレートの初期位置から上述 (6) で検出された堤体の位置までのテンプレートの回転量・変位量やそのときの最小合計距離や点と面の距離の平均が結果として出力される。よって、堤体の特徴量、例えば堤体の天端高などを知りたいときには、出力されたテンプレートの回転量・変位量から別途求めれば良い。

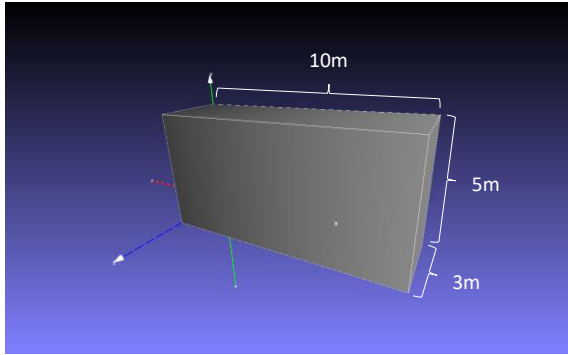
2.3 解析プログラムの動作確認

本解析プログラムが前項の処理を正しく行い、最適な堤体位置を検出することを確認するために、仮想のテンプレートおよび点群データを作成し、解析を行った。

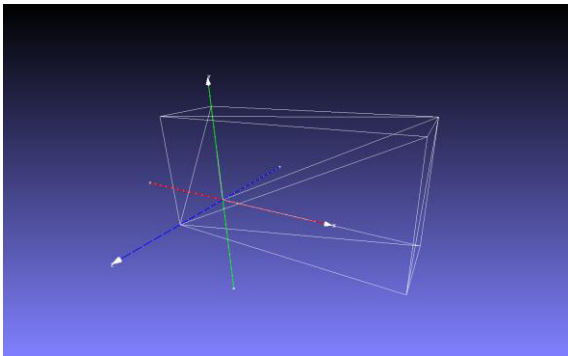
図 2.7a は、作成したテンプレートを示している。堤体寸法は、幅 10m、奥行き 3m、高さ 5m とした。図 2.7b は、テンプレートをワイヤフレームで表示したものである。前述の通り、STL 形式のデータであることから、堤体の各面が 2 つの三角形面から構成されていることがわかる。そのため、同一平面上にあって解析に不要な三角形面を除去し、図 2.7c に示す面データを用いて解析を行った。このとき、図 2.7b から図 2.7c のようにテンプレートを簡略化することで、距離計算を行う面数が 12 から 6 に減少されることから、計算時間もおおよそ半減されることとなる。

図 2.7d は、この仮想堤体を計測したとして得られた点群データを示している。ただし、テンプレートに対して x, y, z 方向の平行移動量 $(dx, dy, dz) = (50, -150, 50)$ (mm)、回転移動量 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = (1.0, 1.0, 2.0)$ (deg) だけ移動した位置に存在するものとして点群データを作成した。また、計測の正確度を 15mm 程度と仮定して、すなわち真の距離に対して計測結果が ± 15 mm 以内の範囲でばらつきをもつものと仮定して点群データを作成した。さらに、各面に存在する点群の点密度が等しくなるように点群データを作成した。ばらつきをもつデータの作成には、C 言語の乱数発生関数 (rand 関数) を使用した。作成した点群データの点数は 4750 点である。

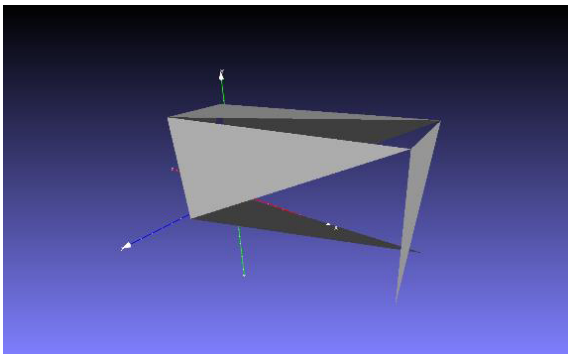
上述のようにテンプレートおよび点群データを作成し、両者を用いて堤体位置検出解析を行ったところ、堤体が $(dx, dy, dz) = (50, -150, 50)$ (mm)、 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = (1.0, 1.0, 2.0)$ (deg) だけ変位した位置に存在することを検出した。図 2.7e は、検出された位置に配置したテンプレートを示している。図には、テンプレートの初期位置を併せて示した。このとき、検出された位置での各点と面との合計距離は 35440.5mm となった。これを点数 (4750 点) で除すと、各点と面の平均距離は約 7.46mm となる。これは、各面に対して ± 15 mm 以内でランダムに点群を配置したことを考えると、合理的な平均距離と言え、堤体位置を正しく検出したものと判断できる。



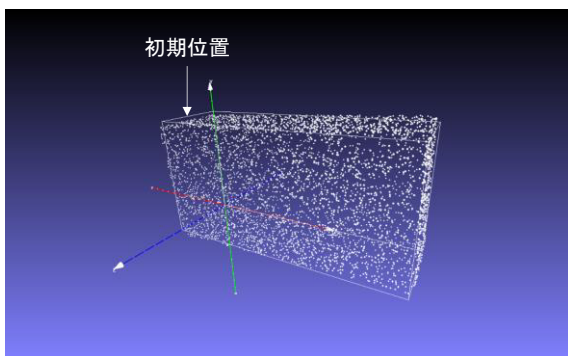
a) テンプレート



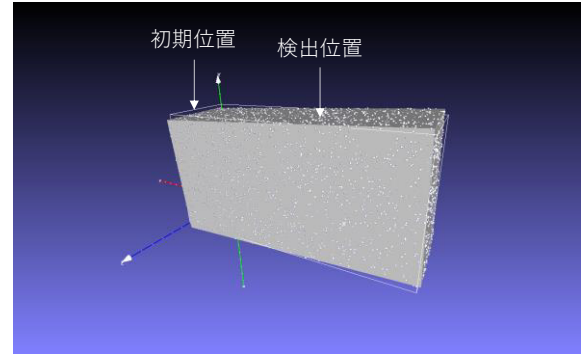
b) テンプレートのワイヤフレーム表示



c) 解析に用いた面データ



d) 点群データ



e) 解析結果

図 2.7 仮想堤体および点群データを用いた解析

2.4 解析ソフトウェアへの実装

点群データ等の測量データを処理するための解析ソフトウェア (ScanSurveyZ) における処理機能として、上述の解析プログラムを実装した。本ソフトウェアには、点群データを処理、解析するための多様な機能が備わっている。そのため、本解析プログラムを新たに実装することによって、堤体位置検出解析に用いる入力データに前処理をしたり、解析結果を使って必要な特徴量を算出することができる。実装するにあたっては、より効率的に堤体位置検出解析を行うため、以下のような変更や機能の追加を行った。

(1) 原点座標の変更

前項で述べた解析プログラムでは、原点座標をテンプレートの隅に位置する頂点としていた (図 2.4, 参照) が、テンプレートの外接矩形の圆心に原点座標を変更した。これは前者の場合、探索範囲が原点から遠く離れるほど、わずかな回転でもそれに伴う変位量が大きくなり、回転方向の細かな探索が難しくなるためである。

(2) テンプレート位置調整機能の追加

テンプレートと点群データの初期位置合わせを精緻に行うことは、解析時の探索範囲を小さくし、計算時間を短縮する上で有効である。本ソフトウェアでは、解析対象となるテンプレートと点群データを読み込んだ後、おおまかな初期位置合わせのために、各データの外接矩形の圆心を合わせる処理を行う。その後、図 2.8 に示される操作パネルを操作することによって、グラフィカルに (=PC 画面上で移動量を確認しながら) 平行方向および回転方向に任意の移動量だけテンプレートを動かし、初期位置を合わせることができる。

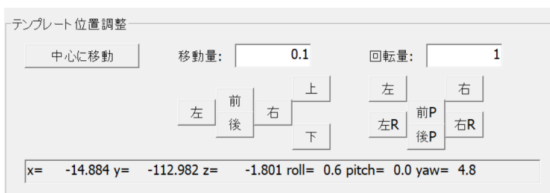


図 2.8 テンプレート位置調整のための操作パネル

(3) 探索間隔が異なる 2 段階探索の実施

効率良く探索を行うために、探索間隔が異なる 2 段階の探索条件を設定することが可能となっている。1 段階目の粗い探索で検出された位置を新たな初期位置として、2 段階目の細かい探索を連続的に行うことができ、これにより短い解析時間でより精緻な探索を行うことができる。

(4) 解析対象点群の選定

今回の検討で解析対象とした軟着堤の場合には、堤体の底版上に土砂がいくらか堆積しており、現地計測によって底版ではなく堆積土砂の表面を計測してしまうことから、明らかに土砂を計測していると見られる部分を解析対象の点群データから除去する必要がある。本ソフトウェアでは、読み込んだ点群データ中で標高が最も高い位置から所定の標高までの範囲に含まれる点群を抽出して、すなわち所定の標高以下の点群を無視して、解析を実行できるようになっている。

(5) 継時的な解析の実施

軟着堤の場合には、沈下量の確認が重要であり、定期的な現地計測が必要となる。このように定期的に現地計測が実施される場合には、各計測時点間の変化量（例えば、堤体沈下量など）を把握したいことがある。そこで、本ソフトウェアでは、2 計測時点間での変化量を把握するために、最初の時点での解析によって検出された堤体位置を、次の時点での解析の初期位置とすることが可能となっている。

3. 現地計測

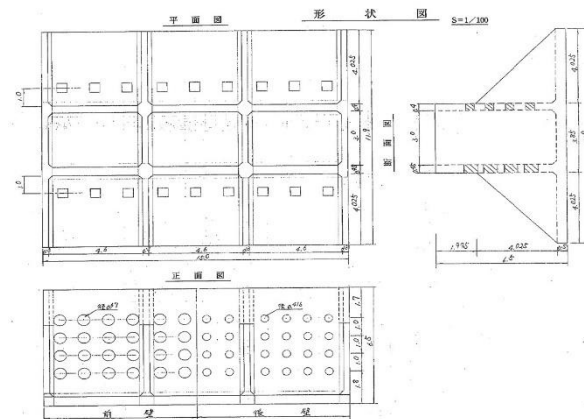
3.1 概要

本研究では、熊本港（夢咲島地区）防波堤（南）に設置された軟着堤を対象として後述する方法により現地計測を実施し、点群データを取得した。図 3.1 は、現地計測時の写真および堤体の形状図（VII工区の例）を示している。現地計測は、計測精度の検証や年々増加する堤体沈下量を把握するために、2018 年～2020 年の間に年 1 回合計 3 回実施された。いずれも計測時期は 6 月～8 月である。2020

年の計測時までには 177 函の堤体が設置されており、防波堤の総延長は約 2.8km である。



a) 現地計測時の写真



b) 堤体の形状図：VII工区の例（図中、単位 m）

図 3.1 熊本港における現地計測

3.2 計測方法とその得失

表 3.1 は各計測年で実施した計測方法の一覧を、表 3.2 は使用した計測装置の性能一覧を、表 3.3 は計測条件の一覧をそれぞれ示している。なお、表 3.3 中の点群密度は、計測されたある堤体 1 函に対して調べたものであり、点群密度は計測時の天気や海象条件などにも影響されるため参考値である。また、図 3.2 は、船上計測により計測可能な範囲を図示したものである。堤体の気中部はドローンまたは船上に設置したレーザースキャナによる計測を、水中部は船下に設置されたマルチビームスキャナによる計測を行った。この他、船上およびドローンには、IMU（慣性計測装置）および GNSS（Global Navigation Satellite System, 衛星測位システムの総称）がそれぞれ設置されており、計測中の船体（または、機体）の動揺や位置が常時計測されている。後述の点群データは、これらの計測値を基に船体（または、機体）の動揺補正を行った結果を使用

している。いずれの計測方法も短時間で広範囲を計測することができる 3 次元計測技術であるが、一連の計測によって分かったそれぞれの得失を挙げると以下のようになる。

船上計測は、レーザースキャナによって気中部を、マルチビームスキャナによって水中部を同時計測できるという利点がある。今回軟着堤の場合には、約 2.6km におよぶ堤体を 1~1.5 時間で計測できたほか、船上で各装置を確認、操作できるため、装置との距離感を把握し易く、周囲の人や装置の安全面においても有効である。一方で、GNSS の受信アンテナが堤体や海面に近いことによるマルチパスの影響や、低速 (1.5~2.0m/秒) で航行しながら計測することで波浪状況によっては不規則な動揺の影響などが計測結果に現れるといった欠点があった。ここで、マルチパスとは、衛星から送信された電波が建造物や地表等に反射、屈折することで複数のルートを通して受信されることによって、受信アンテナと衛星間の測距に誤差が生じることをいう。また、不規則な動揺の影響とは、GNSS による位置情報の取得と船の動きの間に生じる時差がデータ上の誤差として現れることを指している。この他、熊本港のように潮位差が大きい場合(今回の計測期間中には約 3~4.8m) には、干潮時にレーザースキャナの設置高さが不足し、堤体天端部を計測することが困難になるといった欠点もある。他方、設置高さを高くすると、上述のような動揺による影響も大きくなることから、今回の場合には計測範囲(主として、堤体天端部)と計測誤差がトレードオフの関係になっていることがわかった。

ドローンレーザー計測は、堤体に対して真上から計測対象をスキャンできる点と、GNSS により位置情報を取得する上でドローン上空の視界が良好なためマルチパスの影響が少ないという利点がある。一方、ドローンのバッテリー容量が限られていること、計測可否や計測結果が天候に大きく左右されることが欠点であった。また、ドローンレーザー計測特有の現象として、ドリフト特性の影響が確認された。ドリフト特性の影響については、4.3 で考察する。

このように船上あるいはドローンによるレーザー計測では、上述のような得失がそれぞれ考えられるものの、天候や波浪状況が良好な場合には、点群密度が高く、計測精度が高い 3 次元計測が可能で、堤体など比較的単純な形状をもつ構造物の形状や位置検出に有効な計測方法であると考えられる。

一方、マルチビーム計測に関して、近年水中レーザー計測技術も開発されているが、熊本港のように濁りの強い水中では適用が難しいため、水中部の計測にはマルチビーム計測が今のところ有効な計測方法と考えられた。ただし、

レーザー計測に比べると点群密度や計測精度が低いという欠点がある。

表 3.1 計測方法一覧

計測年	計測範囲	レーザー		マルチ ビーム
		ドローン	船上	
2018	気中(天端)	—	△(V)	—
	気中(側壁)	—	○(V)	—
	水中	—	—	○(S)
2019	気中(天端)	○(V)	△(V)	—
	気中(側壁)	△(V)	○(V)	—
	水中	—	—	○(N)
2020	気中(天端)	○(V)	△(V)	—
	気中(側壁)	△(V)	○(V)	—
	水中	—	—	○(N)

表中、○：計測可、△：一部計測可、—：対象外または計測不可を示す。また、(V)：VUX-1、(S)：SONIC2024、(N)：NORBIT_iWBMS は使用した計測装置を示す(表 3.2 参照)。

表 3.2 計測装置性能一覧

計測装置 名称	計測性能		
	確度	精度	分解能
VUX-1	10mm	5mm	0.001 度(角度)
SONIC2024	—	—	12.5mm
NORBIT_iWBMS	—	—	10mm

表中、確度：真値に対する計測値の整合度、精度：同じ距離を繰り返し計測した場合の再現度、分解能：計測値の最小単位である。

表 3.3 計測条件一覧

a) 2018 年

計測方法	回 数	航行 速度	対堤体 距離	計測 函数	点群 密度
ドローン	—	—	—	—	—
船上	4	1.5~2.0	10~20	171	6000
マルチ	4	1.5~2.0	10~20	171	260

b) 2019年 (表 3.3 続き)

計測方法	回数	航行速度	対堤体距離	計測函数	点群密度
	回	m/s	m	函	点/m ³
ドローン	1	5.0	30	80	700
船上	1	1.5~2.0	10~20	177	10000
マルチ	3	15~2.0	10~20	177	210

c) 2020年 (表 3.3 続き)

計測方法	回数	航行速度	対堤体距離	計測函数	点群密度
	回	m/s	m	函	点/m ³
ドローン	3	80	35	177	750
船上	4	1.5~2.0	10~20	177	6800
マルチ	3	1.5~2.0	10~20	177	400

表中の点群密度は、ドローンレーザー計測では天端、船上レーザー計測では側壁（気中）、マルチビーム計測では側壁（水中）の点群データを参照した。

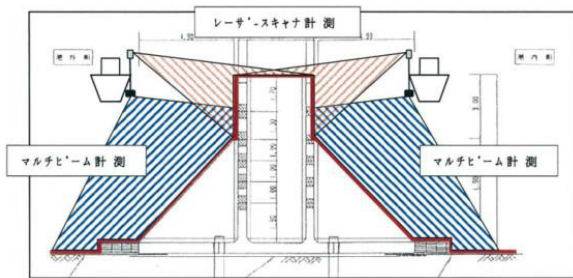


図 3.2 船上計測の計測範囲

3.3 計測結果と事前処理

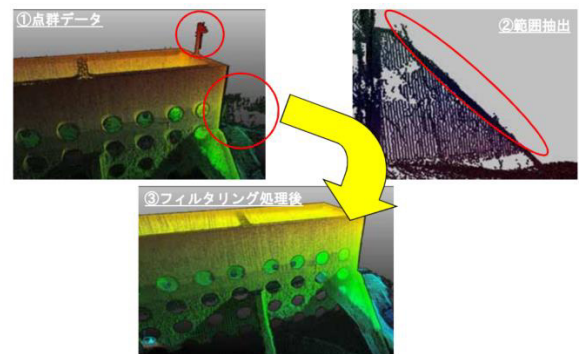
計測によって得られる点群データは、様々な要因（降雨や濁りなど）によるノイズや解析に不要な点群（例えば、堤体上に設置された設備や堤体にとまった鳥など）を含み、また当然ながら工区や堤体毎に区別されていない膨大な数値データの集まりである。そのようなデータから解析に必要な入力データを作るために、いかに効率良く事前処理を行うかは重要な問題である。一方、本研究では堤体位置検出解析の開発に主眼を置いたため、多大な労力を要する方法であるが、点群データを処理する汎用ソフトウェア（WingEarth）で目視および手作業による以下の事前処理を行った。

図 3.3 は、事前処理作業を図示したものである。はじめに、図 3.3a 中の円で囲まれた範囲のように、目視によって確認できる明らかに堤体ではない物体を計測した点群

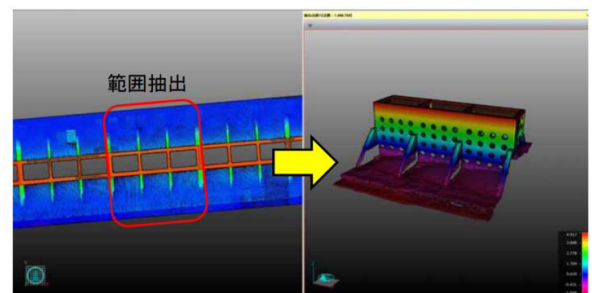
や、堤体部に比べて極端に点群密度が低く、浮遊したような点群の範囲を指定し、この範囲内にある点群を除去した。その後、図 3.3b のように、隣接する堤体を計測したとみられる点群に注意しながら、1 函 1 函堤体毎に点群データを分離し、異なる点群データファイルとして保存した。

図 3.4 は、各計測年に取得された点群データから上述の事前処理を行ったVII工区 No. 52 堤体の点群データ例を示している。点群によって軟着堤の形状が忠実に再現されており、各計測年の結果を比較しても目視ではあまり違いがないように見受けられる。ここで示される堤体 1 函あたりの点群数は、計測年によってやや違いがあるものの、およそ 120 万~140 万点であった。

本研究では、このように事前処理された No. 52~No. 61 堤体 10 函の点群データを対象として、堤体位置検出解析を行った。また、その結果から算出される各堤体の天端高を、水準測量結果（ただし、2017 年、2019 年、2020 年の結果であり、2018 年は未実施）および 3.4 に示される形状検出による天端高の算出結果と比較した。

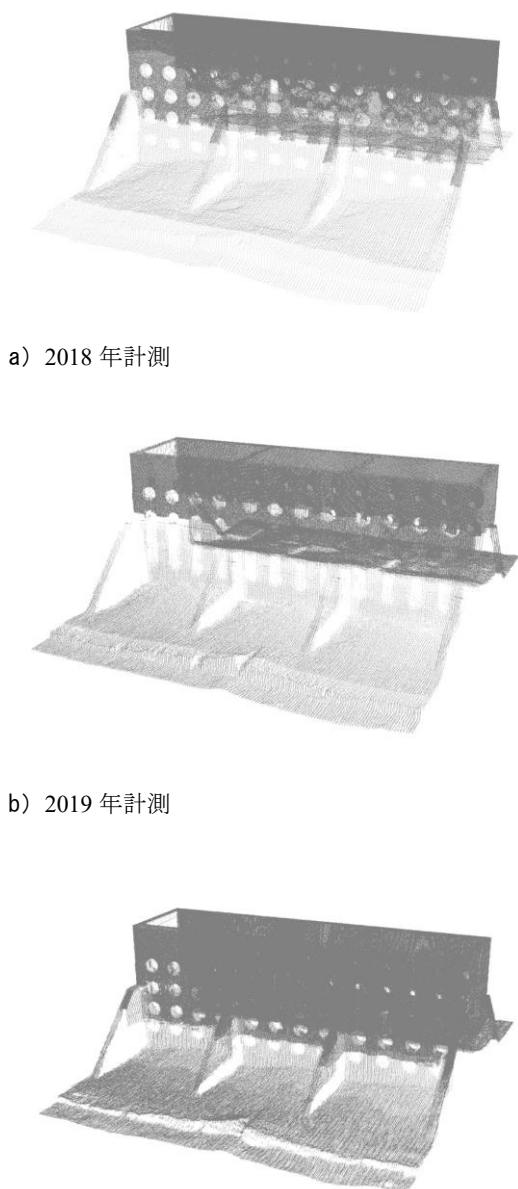


a) 不要な点群のフィルタリング処理



b) 堤体毎の点群データの分離

図 3.3 点群データの事前処理作業



c) 2020 年計測
 図 3.4 事前処理された点群データ (No. 52 堤体の例)

3.4 形状検出による天端高の算出方法

テンプレートマッチングによる堤体位置検出解析結果と比較するため、点群データから目視や手作業によって天端面形状を検出し天端高を算出した。堤体位置検出解析ではテンプレートを予め作成し、計測された点群データ中でそのテンプレートを移動させながら最適な堤体位置を検出する。これに対して、天端面形状を検出する方法では、天端に相当する平面を点群データから目視で検出し、検出された平面の頂点から天端高を算出する。この方法では、

目視による誤差が含まれるものの、後述するように何度か試行を繰り返すことによって、精度良く天端高を算出できる。一方、手作業となるため多大な労力を要するというデメリットがある。

図 3.5 は、本方法の作業フローおよび各過程の概念図を示している。各過程で行う処理は以下の通りである。なお、ここでの処理は点群データを処理するための汎用ソフトウェア (Galaxy-Eye) を使用した。

(1) データの読み込み

3.3 の方法で事前処理された点群データを読み込む。

(2) 面の作成 (図 3.5b)

読み込まれた点群データから、目視によって堤体天端部 4 隅を計測したとみられる範囲の点群を選定し、これらの点群を使って 4 つの面データを作成する。このとき、各 4 隅はおおよそ 20~25cm 角、厚み (高さ方向) 3~5cm 程度の範囲とした。次に、当ソフトウェアの処理機能を用いて、作成した 4 つの面データを合成し、1 つの平面を作成する。

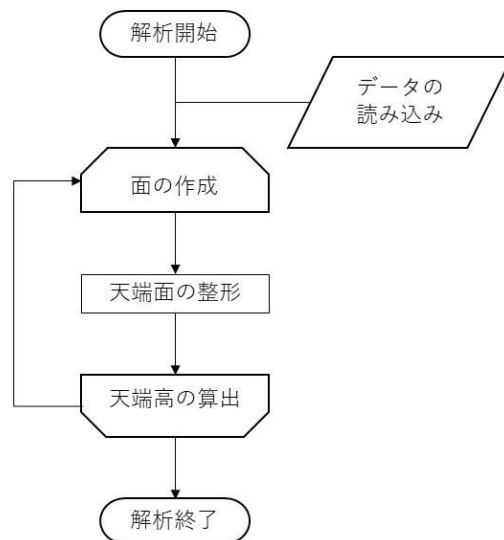
(3) 天端面の整形 (図 3.5c)

当ソフトウェアの処理機能を用いて、(2) で作成した平面を天端外縁まで拡大し、天端面を作成する。天端外縁の位置は目視で特定した。

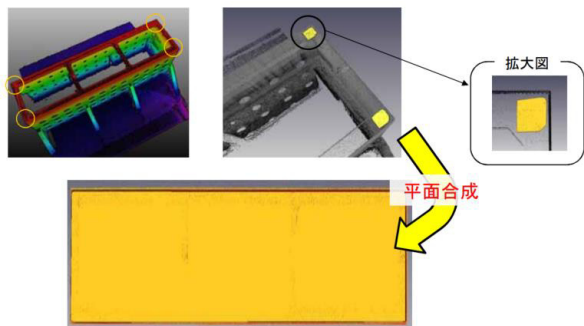
(4) 天端高の算出 (図 3.5d)

(3) で作成した天端面における 4 隅の頂点座標から天端高を出力した。

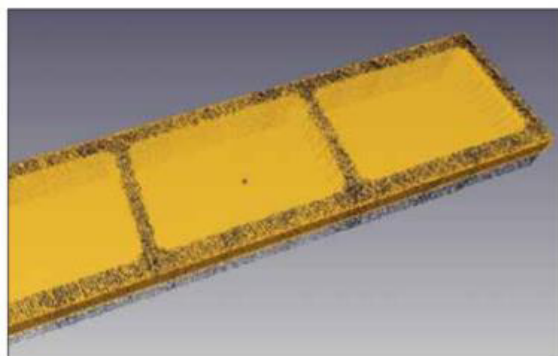
(2) ~ (4) の処理は、目視による誤差を含むと考えられるため、これらの作業を複数回繰り返し行い、算出した天端高が ±5mm 程度の範囲に収まることを確認した。



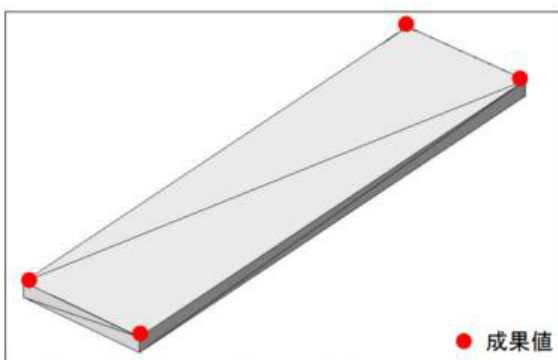
a) 作業フロー
 図 3.5 形状検出による天端高算出の過程



b) 面の作成過程



c) 天端面の作成過程



d) 天端高の算出点

図 3.5 (続き) 形状検出による天端高算出の過程

4. 解析結果

4.1 概要

VII工区, VIII工区に跨る No. 52~No. 61 堤体の計 10 函を計測した点群データについて, 3.3 で述べた事前処理を行った。そして, 事前処理された点群データについて, 2 で述べた堤体位置検出解析を行った。以下では, その解析結果を示すとともに, 解析結果から算出された各堤体の天端高を水準測量結果および 3.4 で述べた形状検出による

方法により算出した天端高と比較した。また, これらの結果に基づいて, 計測や解析に関する各種精度について考察した。なお, 以下では, 堤体位置検出解析による方法を TM, 形状検出による方法を SD をいう。

4.2 解析結果と天端高の比較

図 4.1 は, 2018 年の計測結果を用いて解析を行った結果例を示している。点群データと解析データより, 天端高による定量的な比較は後述の通りであるが, 全体的に概ね堤体位置が正しく検出されていることがわかる。特に, 特徴的な点として図 4.1a に示す通り, No. 59 および No. 60 堤体の境界で不等沈下による大きな段差が生じていることが点群データからもわかる。これに対して, 図 4.1d の解析結果を見ると, そのような隣接堤体に生じた段差を捉えるように堤体位置が検出されていることがわかる。

図 4.1e は, 解析結果の出力項目を示している。解析結果は, 図中に示す項目の一覧が CSV 形式のファイルとして出力される。各出力項目は以下のようなものである。

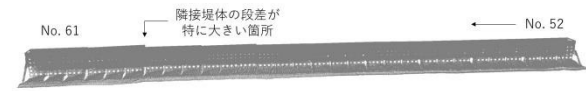
「対象堤体」は, 解析を実施したファイル名(本例では, 「計測年_堤体番号」)を示している。

「解析初期位置からの移動量」は, 初期位置合わせを行った解析の初期位置から, 解析によって検出された位置までの移動量を示している。

「最小合計距離とその平均値」は, 検出された堤体位置において各点群と最も近い面との距離を合計した値, さらにそれを点数で除した平均距離である。2.2 「(6) 最小合計距離となる堤体位置の検出」に関する処理に相当する。このとき, 平均距離は, およそ 0.05m 以下になった。つまり, 点群に対して検出された堤体位置のずれが平均して 0.05m 以下であることを示している。

「解析時間」, 「解析条件」は, 堤体位置検出に要した解析時間および点群データやテンプレートに関する解析条件を示している。

「解析結果」では, 検出された堤体位置の面データに基づいて, 天端 4 隅の標高, 平均天端高 (=天端 4 隅の標高を平均した値), 堤体の傾きが出力されている。



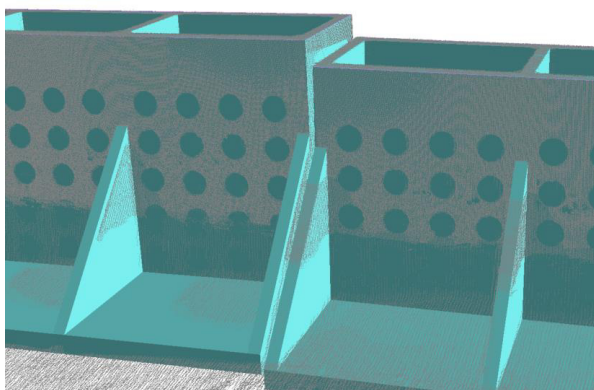
a) 解析に用いた点群データ



b) 解析で検出された堤体位置にあるテンプレート



c) a)の点群データとb)のテンプレートの重ね合わせ



d) No. 59 および No. 60 堤体付近の拡大

対象堤体	解析初期位置からの移動量	最小合計距離とその平均値	解析時間	解析条件	解析結果 (天端高4隅, 平均天端高, 堤体傾き)												
No. 52	0.07	0.05	0.04	0.1	0.152638194	0.013049	165.84	1108004	158	19	4.736208	4.867098	4.805197	4.751536	-0.044119	0.752761	0.728901
No. 53	-0.01	0.1	0.04	0.1	0.189120311	0.014886	165.287	1110304	149	19	4.897341	4.778123	4.738788	4.920793	-0.742028	0.840842	0.812172
No. 54	0.00	0.2	0	0.1	0.120840189	0.024489	168.232	1124985	149	19	4.807218	4.707986	4.710347	4.806713	-0.782022	0.209815	0.112499
No. 55	0	0	-0.02	0.1	0.174916112	0.013743	169.871	1182929	150	19	4.808024	4.736073	4.730395	4.808482	-0.797036	0.662233	-1.506412
No. 56	0.00	0.2	-0.02	0.1	0.146116710	0.015689	167.820	1165875	149	19	4.720469	4.811843	4.817036	4.687544	-0.709151	0.021949	-0.209151
No. 57	0.00	0.0	-0.01	0.2	0.200530812	0.018468	164.232	1184682	148	19	4.711294	4.718443	4.744209	4.699053	-0.729897	0.022302	-0.209151
No. 58	0.01	0.05	-0.01	0.2	0.233342317	0.020239	169.152	1202891	150	19	4.712196	4.615229	4.827023	4.722239	-0.837522	1.109614	-0.129491
No. 59	0.11	0.1	-0.01	0.2	0.184742706	0.013221	162.919	1188804	148	19	4.706605	4.671335	4.691927	4.723081	-0.789703	1.078467	-0.102844
No. 60	-0.17	0.12	-0.1	0.5	0.520484029	0.024483	176.418	1110587	148	19	4.789102	5.032873	5.032004	4.739294	0.046883	0.780274	1.298387
No. 61	0.00	0	0.02	0.2	0.170830877	0.016440	167.171	1218979	148	19	4.732708	4.877249	4.848333	4.836468	0.846481	0.732301	1.792256

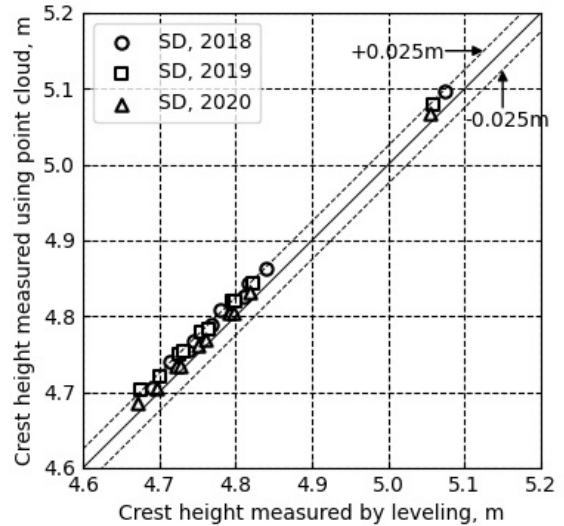
e) 解析結果の出力項目

図 4.1 解析結果 (2018 年計測, No. 52~No. 61 堤体)

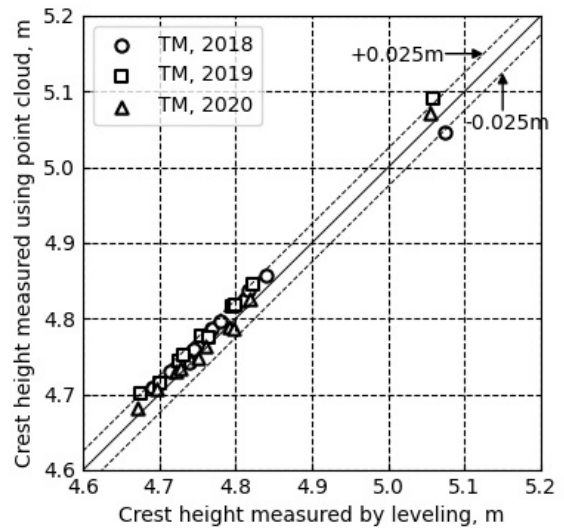
図 4.2 は, No. 52~No. 61 堤体について, 水準測量による平均天端高と形状検出による算出方法 (SD) および堤体位置検出解析 (TM) による平均天端高との関係を示している. 図より, いずれの計測年およびいずれの算出方法においても, 水準測量結果に対して図中点線で示すおよそ $\pm 0.025\text{m}$ の誤差範囲になっている.

表 4.1~表 4.3 は, No. 52~No. 61 堤体について各計測年の解析結果をまとめたものである. 2018 年には水準測量が実施されておらず, 2017 年の結果と比較しているため参考値である. 2019 年, 2020 年の結果を見ると, テンプレートマッチングによる堤体位置検出解析の結果は, 水準測量に対して誤差の平均が 0.021m 以下, 標準偏差 0.007m 以下となっている. 一方, 形状検出による算出結

果は, 水準測量に対して誤差の平均が 0.022m 以下, 標準偏差 0.003m 以下となっている.



a) 形状検出による算出方法 (SD) との比較



b) 堤体位置検出解析 (TM) との比較

図 4.2 水準測量による天端高との比較

表 4.1 2018 年の天端高一覧

	水準測量 (L)				形状検出による算出方法 (SD)						テンプレートマッチング (TM)							
	港内側-1	港外側-2	港内側-3	港外側-4	平均値	港内側-1	港外側-2	港内側-3	港外側-4	平均値	Lとの差	港内側-1	港外側-2	港内側-3	港外側-4	平均値	Lとの差	SDとの差
No.52	4.878	4.854	4.763	4.743	4.810	4.892	4.870	4.779	4.758	4.825	0.015	4.895	4.867	4.782	4.754	4.824	0.015	0.000
No.53	4.767	4.759	4.718	4.715	4.740	4.781	4.778	4.733	4.729	4.755	0.015	4.787	4.778	4.706	4.697	4.742	0.002	-0.013
No.54	4.696	4.704	4.674	4.684	4.690	4.711	4.721	4.690	4.700	4.706	0.016	4.733	4.738	4.683	4.687	4.710	0.021	0.005
No.55	4.688	4.742	4.796	4.848	4.769	4.704	4.760	4.818	4.874	4.789	0.021	4.706	4.766	4.808	4.868	4.787	0.019	-0.002
No.56	4.768	4.833	4.662	4.718	4.745	4.791	4.856	4.681	4.745	4.768	0.023	4.812	4.832	4.688	4.707	4.760	0.015	-0.008
No.57	4.700	4.761	4.670	4.727	4.715	4.725	4.788	4.695	4.757	4.741	0.027	4.748	4.759	4.700	4.711	4.730	0.015	-0.012
No.58	4.914	4.938	4.696	4.714	4.816	4.943	4.964	4.723	4.745	4.844	0.028	4.924	4.952	4.723	4.751	4.838	0.022	-0.006
No.59	4.849	4.845	4.716	4.710	4.780	4.884	4.879	4.739	4.734	4.809	0.029	4.885	4.871	4.723	4.710	4.797	0.017	-0.012
No.60	5.289	5.318	4.831	4.858	5.074	5.300	5.352	4.852	4.878	5.096	0.022	5.303	5.353	4.739	4.789	5.046	-0.028	-0.049
No.61	4.968	4.902	4.779	4.711	4.840	5.000	4.922	4.804	4.726	4.863	0.023	4.946	4.877	4.836	4.768	4.857	0.017	-0.006
平均値											0.022						0.011	-0.010
標準偏差											0.005						0.014	0.014
※水準測量については、平成29年度熊本港(夢咲島地区)堤体挙動観測水準測量結果とする。																		

表 4.2 2019 年の天端高一覧

	水準測量 (L)				形状検出による算出方法 (SD)						テンプレートマッチング (TM)							
	港内側-1	港外側-2	港内側-3	港外側-4	平均値	港内側-1	港外側-2	港内側-3	港外側-4	平均値	Lとの差	港内側-1	港外側-2	港内側-3	港外側-4	平均値	Lとの差	SDとの差
No.52					4.795	4.889	4.866	4.773	4.750	4.820	0.024	4.864	4.870	4.761	4.767	4.816	0.021	-0.004
No.53					4.726	4.775	4.771	4.730	4.725	4.750	0.024	4.766	4.773	4.716	4.723	4.744	0.018	-0.006
No.54					4.675	4.709	4.718	4.688	4.697	4.703	0.028	4.692	4.726	4.677	4.711	4.701	0.026	-0.002
No.55					4.754	4.701	4.756	4.803	4.855	4.779	0.025	4.711	4.731	4.823	4.843	4.777	0.023	-0.002
No.56					4.731	4.778	4.841	4.665	4.728	4.753	0.022	4.793	4.829	4.673	4.709	4.751	0.020	-0.002
No.57					4.700	4.707	4.768	4.674	4.735	4.721	0.021	4.719	4.753	4.678	4.712	4.715	0.015	-0.006
No.58					4.800	4.922	4.944	4.696	4.718	4.820	0.020	4.921	4.943	4.693	4.714	4.818	0.018	-0.002
No.59					4.765	4.855	4.852	4.716	4.712	4.784	0.019	4.820	4.852	4.700	4.732	4.776	0.011	-0.008
No.60					5.058	5.295	5.323	4.832	4.864	5.079	0.021	5.314	5.335	4.845	4.867	5.090	0.032	0.012
No.61					4.823	4.978	4.907	4.778	4.710	4.843	0.020	4.897	4.881	4.809	4.793	4.845	0.022	0.002
平均値											0.022						0.021	-0.002
標準偏差											0.003						0.006	0.005

表 4.3 2020 年の天端高一覧

	水準測量 (L)					形状検出による算出方法 (SD)					Lとの差	テンプレートマッチング (TM)					Lとの差	SDとの差
	港内側-1	港外側-2	港内側-3	港外側-4	平均値	港内側-1	港外側-2	港内側-3	港外側-4	平均値		港内側-1	港外側-2	港内側-3	港外側-4	平均値		
No.52	4.859	4.836	4.744	4.725	4.791	4.874	4.851	4.760	4.737	4.806	0.015	4.884	4.858	4.719	4.693	4.789	-0.002	-0.017
No.53	4.748	4.743	4.699	4.698	4.722	4.761	4.755	4.714	4.708	4.735	0.013	4.748	4.762	4.700	4.714	4.731	0.009	-0.004
No.54	4.677	4.687	4.655	4.666	4.671	4.692	4.700	4.672	4.681	4.686	0.015	4.672	4.705	4.657	4.690	4.681	0.010	-0.005
No.55	4.669	4.724	4.777	4.830	4.750	4.683	4.738	4.785	4.839	4.761	0.011	4.710	4.709	4.788	4.787	4.749	-0.001	-0.013
No.56	4.751	4.816	4.645	4.702	4.729	4.760	4.821	4.649	4.710	4.735	0.006	4.777	4.811	4.657	4.691	4.734	0.005	-0.001
No.57	4.683	4.745	4.652	4.710	4.698	4.690	4.751	4.658	4.719	4.705	0.007	4.699	4.731	4.683	4.715	4.707	0.010	0.003
No.58	4.896	4.921	4.676	4.695	4.797	4.904	4.928	4.680	4.704	4.804	0.007	4.866	4.886	4.689	4.709	4.787	-0.010	-0.017
No.59	4.830	4.826	4.698	4.692	4.762	4.839	4.838	4.702	4.700	4.770	0.008	4.834	4.826	4.700	4.692	4.763	0.001	-0.007
No.60	5.270	5.299	4.809	4.839	5.054	5.283	5.314	4.824	4.851	5.068	0.014	5.287	5.300	4.842	4.854	5.071	0.017	0.003
No.61	4.947	4.883	4.755	4.689	4.819	4.966	4.895	4.768	4.697	4.832	0.013	4.915	4.901	4.750	4.736	4.825	0.007	-0.006
平均値											0.011						0.004	-0.006
標準偏差											0.003						0.007	0.007

表 4.1～表 4.3 中, (L) : 水準測量, (SD) : 3.4 で示された形状検出による算出方法, (TM) : 2. で示された堤体位置検出解析による結果をそれぞれ示す.

4.3 各種精度に関する考察

前項で示した解析結果を評価する上で、位置検出の精度に影響を与え得る要因とその影響度を把握することが重要である。ここでは、(1) 計測装置が持つ計測精度、(2) 計測方法が計測結果に与える影響、(3) 解析方法によって決まる解析精度について以下のように考察した。

(1) 計測装置が持つ計測精度

計測装置が持つ計測精度は、公称の精度、確度や分解能に相当するものと考えられる。今回計測に用いた装置では表 3.2 に示した通りであり、10mm 前後の測距性能ということになる。

(2) 計測方法が計測結果に与える影響

ここでは、2020 年に実施された水準測量結果を真値として、同年に実施されたドローンレーザー計測結果を、3.4 で示された形状検出による方法 (SD) により算出された天端高と比較し、計測方法が計測結果に与えた影響を考察した。図 4.3 は、No. 1~No. 177 堤体に対して SD による方法で算出した平均天端高と水準測量による平均天端高の較差を示している。本年のドローンレーザー計測では、一度の飛行で堤体全函 (No. 1 から No. 177 に向かって) を計測したところ、No. 140 堤体付近まではおよそ較差が ±20mm 程度に収まり、良好な計測精度で計測された。No. 140 堤体は防波堤がちょうど屈曲している箇所付近に位置し、図 4.3b 中の丸囲い部のように、これより沖側 (堤体番号が大きい側、また図 4.3b 中の右側) に向かって較差が 20mm~56mm と急激に大きくなっている (図 4.3a)。

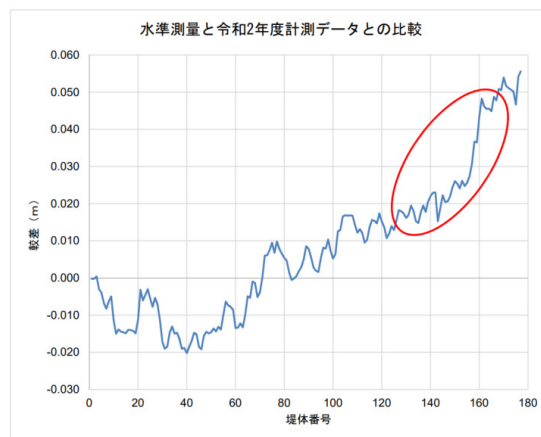
この要因として、IMU (慣性計測装置) のドリフト特性が影響しているものと考えられる。ここで IMU は、ドローンの姿勢角 (水平面に対する前後、左右方向の傾斜角で、pitch 角、roll 角、yaw 角と呼ばれる) と加速度を随時取得するセンサーであり、飛行開始後、計測開始前に姿勢角の初期化が必要となる。

レーザー計測では GNSS により装置自身の位置を捉え、IMU でレーザーを発射した方向を計算することによって、3 次元座標を持つ点群データを取得している。GNSS および IMU の性能を最大限引き出すためには、計測開始前に以下の作業工程が必要となる。すなわち、GNSS ではフライト前後に計測値が FIX 状態 (計測値が数センチメートル程度以内に落ち着いた状態) になるまで静置すること、IMU では計測値の角速度が安定するまで 8 の字飛行やターニング飛行することが必要となる。なお、本現地計測においても、事前にこれらの作業を実施した。

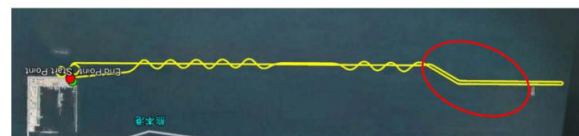
ドリフト特性とは、ジャイロが静止している状態での出力値のずれを表し、時間の経過と共に継続的にずれが大きくなる現象である。図 4.3 に示される較差は、計測中の旋

回飛行や長時間の飛行によって IMU の誤差が累積して大きくなったことが主な要因と推察される。

上述の結果から、今回の現地計測の条件では、計測開始から直線飛行を続けた No. 140 堤体までの航跡や計測時間 (約 5 分 25 秒) 以内においてドローンレーザー計測による計測精度が ±20mm 程度であった。



a) 水準測量との較差



b) ドローンの航跡

図 4.3 ドリフト特性による計測精度の低下傾向

(3) 探索間隔が解析に与える影響

精度を左右する解析条件として、探索間隔、すなわち最適な堤体位置を検出するために、どの程度細かく探索を行うかが最も重要なパラメータであると考えられる。ここでは、探索間隔が解析結果に与える影響を調べるために、以下のような検討を行った。

No. 52 堤体の点群データ (2020 年計測) とテンプレートを対象として、予め回転方向のみ目視で初期位置合わせを行った上で (roll 角 : 0.5 度、pitch 角 : -0.1 度、yaw 角 : 5.0 度)、平行方向には 30cm 以内で各方向に故意に位置をずらした解析用入力データを作成した (図 4.4a)。その後、このように作成したデータを用いて、探索間隔を様々に変更して解析を行い、解析結果に与える探索間隔の影響を調べた。探索範囲は平行 3 方向 -0.5~0.5m で一定として、探索間隔を 0.005m~0.5m の範囲で変更した。このとき、探索間隔が 0.02m~0.5m の範囲では 2.4 で示した 2 段階の探索間隔を設定せず、1 段階のみの探索間隔で解析を行った。これに対して、探索間隔が 0.005m~0.02m の範囲で

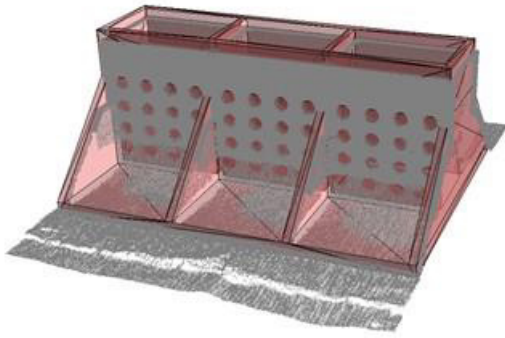
は2段階の探索間隔を設定し、1段階目では0.1mとして探索を行い、その後2段階目で探索間隔を0.005m~0.02mの範囲で変更した。なお、上述の全ての解析ケースで、回転方向の探索は行っていない。また、点群データの下方には底版に堆積した土砂を計測したと見られる点群が多く存在することから、点群データ中の高さ方向に上半分の範囲に含まれる点群を用いて解析を行った。この時、解析に用いた点群数は約75万点である。

図4.4b~図4.4dは、探索間隔と各解析結果との関係を示している。図中、1stepは探索間隔を1段階のみ設定したケース、2stepsは探索間隔を2段階に設定したケースをそれぞれ示している。図4.4bより検出された位置における点と面の平均距離をみると、探索間隔が大きい場合には平均距離も大きく、探索間隔が小さくなるにつれて平均距離が徐々に小さくなり、やがて平均距離が収束するような傾向を示している。これは、探索間隔が大きいと、点群データと大きく離れた位置に堤体位置が検出されるため、各点と最も近い面の距離も大きくなるためである。しかし、探索間隔を小さくすることによって、すなわちより細かい移動距離間隔で堤体位置を探索することによって、点群データに近い堤体位置が検出されるため、平均距離も小さくなる。しかし、上述のように計測装置の精度や計測方法によって決まる計測精度が0.025m程度以下と考えられるため、図4.4bで示されるように探索間隔が0.02m以下では平均距離はほぼ変わらず、0.024m程度で収束していることがわかる。

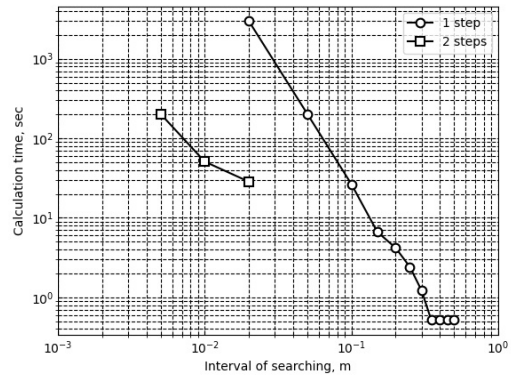
図4.4cより天端四隅の高さを平均した平均天端高をみると、探索間隔が比較的大きい範囲では、平均天端高が大きく振動しているが、探索間隔が小さくなるにつれて急激に収束する傾向が確認される。探索間隔が0.01mや0.005mの場合には、平均天端高が4.803mとなり、形状検出による算出方法(SD)の結果である4.806mとほぼ一致する結果となっている。また、同年同堤体の水準測量結果が4.791mであることから、その差は0.012mであり、良好な結果を示している。他方、探索間隔0.2mから0.02mの間で平均天端高が同じ値を示し、探索間隔0.01mにおいて天端高がやや小さくなる(真値に近づく)ことがわかる。これは、解析前の初期位置合わせの結果、点群データとテンプレートがほぼ0.2mの距離に配置された状態となり、探索間隔が0.2mにおいて真値にかなり近い堤体位置が検出されたため、探索間隔を0.15m、0.1m・・・と小さくしても結果的に探索間隔0.2mの場合と同じ堤体位置が検出されたものと考えられる。そして、探索間隔がさらに小さい0.01mでは、探索間隔0.2mでは検出されない、さらに真値に近い堤体位置が検出されたものと考えられる。

図4.4dは、探索間隔と解析時間の関係を示している。探索間隔を1段階のみ設定した1stepにおいて、探索間隔0.35m以下の結果を見ると、探索間隔が小さくなるにつれて解析時間が(対数グラフ上で)線形に増加していることから、探索間隔を小さくすることによって、解析時間が加速度的に増加することがわかる。このとき、探索間隔0.02mで約3000秒の解析時間を要した。これに対して、探索間隔を2段階に設定し、2段階目の探索間隔を同じく0.02mとした場合には、約30秒、すなわち約1/100の解析時間で1段階の解析結果と同じ堤体位置(図4.4c)を検出している。

これらの結果より、解析条件によって決まる精度、あるいは解析条件とりわけ探索間隔の決定方法について、以下のように考察される。計測値が真値である場合、明らかに解析精度=探索間隔であり、探索間隔を小さくすれば、解析精度をいくらでも高めることができる。一方で、当然ながら計測装置や計測方法によって点群データの計測精度がある値に決まることから、この値を大きく超えるような小さい探索間隔を設定して解析を行うことは、無駄な解析時間を費やすだけで有効ではない。よって、探索間隔は計測精度程度あるいはそれより小さめに設定すれば良く、解析精度=探索間隔であるが、実務上は探索間隔は計測精度に依存するものと考えられる。図4.4cからわかるように、探索間隔0.02mから0.01mまで小さくすることによって、検出される天端高がより真値に近づいている。しかし、探索間隔を0.005mまでさらに小さくしても計算時間は増えるものの検出される天端高は変わらない結果となっている。このように探索間隔を小さくしても、検出される位置情報が変わらない場合には、既に検出された位置情報が真値に近いことが考えられる。その場合、探索間隔をさらに小さくして解析を継続するべきかどうか判断するための指標として、点群データ中の各点と最も近い面との距離の平均値が参考になる。すなわち、今回水準測量の天端高を真値とした場合に、本解析による天端高の誤差がおよそ±0.025mの範囲であったことから、点群データ中の各点と最も近い面との距離の平均値が0.025mを下回れば、解析結果の誤差に近い位置情報が検出されたものと判断される。

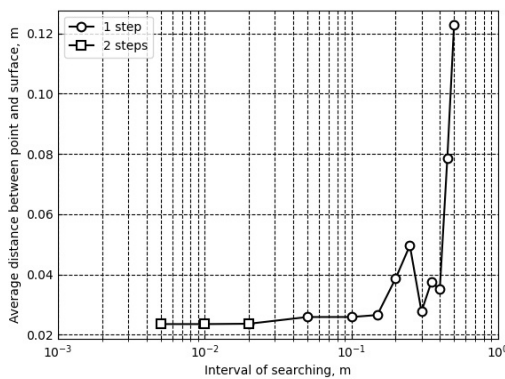


a) 探索開始前（初期位置合わせ後）

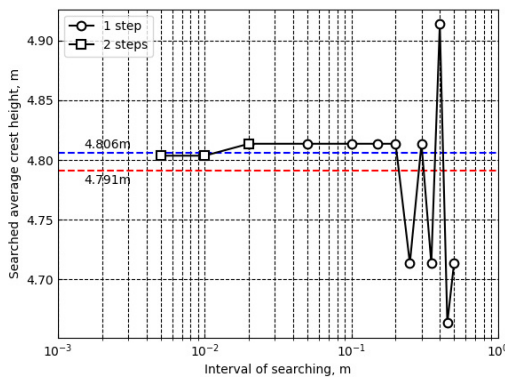


d) 解析時間

図 4.4 探索間隔の影響



b) 点と面の平均距離



c) 平均天端高

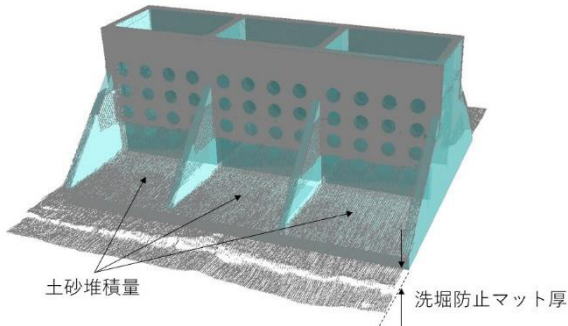
5. 今後の展望と課題

本研究で開発した堤体位置解析手法で各堤体の位置を検出し、それらの位置に配置された面データや頂点情報を利用することによって、本稿で示した天端高のほか例えば隣接する堤体の目地開き量や目地ずれ量を用意に求めることができる。また、形状検出による算出方法 (3.4) のように点群データから面データを作成し、天端や堤体形状などを復元する方法とは異なり、本解析手法では堆積土砂など堤体以外の対象と堤体とを分離することが可能となる。これによって、図 5.1a に示されるように、軟着堤の場合には例えば底版に堆積した土砂の量や図中に示されるような洗掘防止マットの厚さ等を推定することが可能となる。

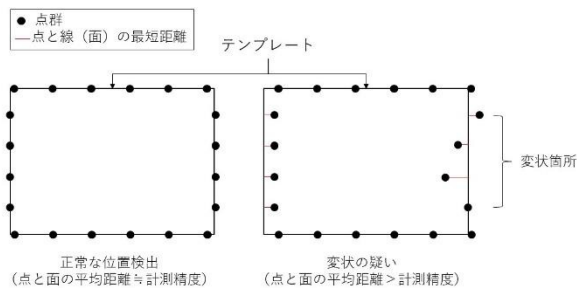
また、図 5.1b 左に示されるように、堤体位置が問題なく検出された場合には、その位置において各点と面の平均距離が計測精度程度になると考えられる。そのため、もしこの平均距離が計測精度と大きく異なる場合には、図 5.1b 右に示されるように堤体が欠損するなど、なんらかの変状が生じている可能性があるものとしてスクリーニングできる可能性がある。ただし、点群データに現れるほどその変状が大きい必要があり、例えばコンクリート構造物のひび割れなど、今回の計測精度では検知できないような小さな変状は発見することができない。

さらに、テンプレートは STL 形式の汎用的な面データファイルであることから、数値解析モデルとして利用することが可能である。図 5.1c は、商用の 3 次元有限要素解析ソフトウェア (PLAXIS3D) を使って、軟着堤のテンプレートを読み込み、作成した地盤解析モデル例を示している。ただし、PLAXIS3D で読み込むために、FreeCAD (フ

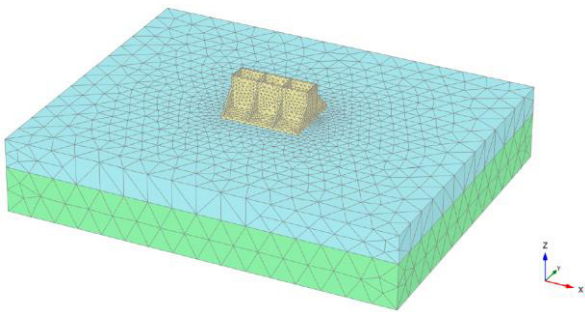
リーの CAD ソフトウェア) を用いて, STL 形式を STEP 形式 (面データを扱う中間ファイルの一種で, 仕様の異なる CAD ソフトウェアでも読み込み可能なファイル形式) に変換している. このように, 堤体の面データを予め準備しておくことで, 現地計測では堤体位置検出解析のテンプレートとして, 数値解析では堤体の解析モデルとして利用が可能である.



a) 堤体位置検出後のテンプレートと点群データ



b) 変状堤体のスクリーニングに関する概念図



c) 数値解析モデルとしての活用

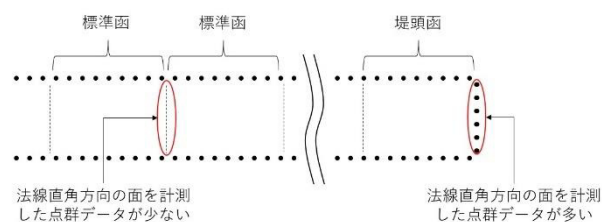
図 5.1 各種データや解析結果の活用

一方, 課題を挙げると以下のようなになる.

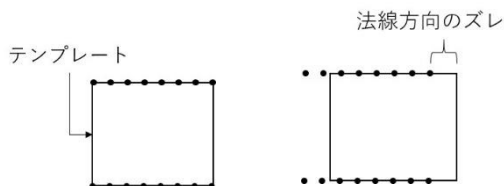
図 5.2a のように標準函 (堤頭函以外の堤幹部となる堤体) を計測すると, 隣接堤体との境界面はレーザーや音波が届かず計測ができないため, 法線直角方向の面を計測した点群数が相対的に少なくなり, 法線方向の面を計測した点群数が卓越する. この場合, 図 5.2b がテンプレートと

点群データの理想的な検出位置, 理想的な解析結果であるが, 現在の解析手法では, 実際には図 5.2c の位置を検出した場合とテンプレートと点群データが示す一致度はほぼ等しいものと判定される. これは, 解析に用いられるテンプレートの各面を方向だけが決まった無限に広がる平面として考えているためである. このようにすることで, 解析中に各面を範囲指定するような条件分岐等の処理が不要となり, 高速な解析を実現している. しかし, その反面, 点群数に著しい偏り, 配向性がある場合には上述のような堤体位置の誤検出が発生する. 現状では, 法線方向の探索範囲を限定することにより, 図 5.2b のように法線方向に大きくずれた位置を検出しないようにしているが, 今後解決すべき課題である. なお, 点群数に偏りのある点群データであっても, 図 5.2d のような法線直角方向のズレは, 点と面の平均距離が大きくなるような方向のズレであり, 最終的にはこの方向のズレを小さくするように図 5.2b や図 5.2c のような堤体位置が検出される.

その他, 今回の現地計測では堤体の気中部に対してレーザー計測, 水中部に対してマルチビーム計測を行ったため, 水面を境に点群密度や計測精度が大きく異なるデータが混在するが, それらの違いが解析結果に与える影響を今後検証する必要がある. 点群密度が大きく異なるデータが混在していると, 点群密度が高い方の位置に引っ張られるように堤体位置が検出されるものと予想される. これに対する対策として, 点群密度が高い範囲の点を間引き, 全体で点密度を平均化することが考えられるが, それによって位置検出の精度が低下しないように注意が必要である. または, 必要な特徴量が天端高に限定されるような場合には, 天端高付近の点群データのみを用いて解析を行うといった方法が考えられる.

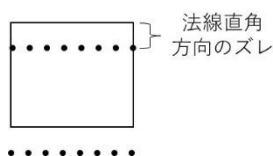


a) 取得される点群データの概念図



b) 理想的な検出位置

c) 法線方向のズレ



d) 法線直角方向のズレ

図 5.2 点群データの偏りと堤体位置の誤検出に関する課題

6. おわりに

本研究では、現地計測によって得られた点群データから堤体位置を検出し、各函の天端高など必要な特徴量を把握するために、テンプレートマッチングを応用した堤体位置検出解析手法を開発した。また、開発した解析プログラムを商用の測量データ処理ソフトウェアに実装した。

熊本港に設置された軟弱地盤着底式防波堤を対象として、現地計測を行い、得られた点群データについて堤体位置検出解析を行った。一連の結果より、計測装置や計測方法による計測精度が 25mm 程度以下であることから、これらをやや上回る解析精度、すなわち探索範囲を設定し解析を行うことによって、計測精度に近い精度で堤体位置を検出できることを確認した。

昨今の ICT や i-Construction の広がりを鑑みると、構造物の維持管理等を目的として、レーザー計測等によって得られた点群データを活用する機会が益々増えるものと思われる。それに伴って、膨大な点群データを効率良く処理し、必要な情報を最大限引き出す処理技術、解析技術の開発が強く望まれる。本研究で開発した解析技術が今後他の防波堤や構造物の検査に適用され、点群データを取り扱う解析技術の 1 つとして役立てられれば幸いである。

(2021年8月5日受付)

謝辞

解析プログラムの開発にあたっては、九州地方整備局の市田氏、中村氏にご助言を頂いた。また、解析ソフトウェアへの実装にあたっては、株式会社ビーシステムの佐藤氏、飯村氏にご協力を頂いた。末筆ながら記して謝意を表します。

参考文献

- 阿部佑二, 池田邦彦, 増田宏 (2011): 大規模点群からのエッジ抽出を用いた円柱面と矩形面の検出(第2報), 精密工学会学術講演会講演論文集, I76, pp. 717-718.
- 堀田富宝, 岩切宗利 (2014): 3次元点群からのエッジ抽出法とその能力, The Journal of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan, Vol. 43, No. 3.
- 松沼千央, 阿部佑二, 増田宏 (2010): 大規模点群からのエッジ抽出を用いた円柱面と矩形面の検出, 精密工学会学術講演会講演論文集, B07, pp. 63-64.
- 松村聡, 水谷崇亮, 市田輝喜 (2019): テンプレートマッチングを利用した防波堤の位置検出手法の開発, 第74回土木学会年次学術講演会, VI-772.
- 松本さゆり, 片倉景義, 吉住夏輝 (2009): 水中音響レンズを用いた超音波式三次元映像取得装置の開発, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 48, No. 4.
- 横山大, 近津博文 (2010): 平坦性評価に基づく点群データからの城壁のブレイクライン抽出と三次元 CAD データの自動作成, 写真測量とリモートセンシング, VOL. 49, No. 4, pp. 241-250.
- 渡部要一, 田中政典 (2012): 不同沈下測定を目的とした車載型レーザースキャナ測量, 港湾空港技術研究所資料, No. 1263.
- G. Bradski and A. Kaehler (2013): 詳解 OpenCV コンピュータビジョンライブラリを使った画像処理・認識, O'REILLY, pp. 216-221.
- White, J. D., Take, A. W. and Bolton, D. M. (2003): Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, *Geotechnique* 53, No. 7, 619-631.

港湾空港技術研究所報告 第60巻 第2号

2021.9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2021) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。