

点群データを用いたブロック工の設計要素抽出に関する研究

中原 匡哉^{1,a)} 中村 健二² 田中 成典³ 寺口 敏生⁴ 関谷 浩孝⁴

受付日 2018年6月6日, 採録日 2018年12月4日

概要: 国土交通省では, 建設事業における生産性向上を目的とした取り組みとして, i-Construction が推進されている. この取り組みでは, UAV や地上設置型レーザスキャナ等の機器を用いて計測された点群データによる出来形管理の標準化が進められている. これらの基準では, 形状が平坦な土工や舗装工等を対象に, 設計面と計測した点群データの標高差を用いた面的な出来形管理方法を定めている. この方法では, 全体的な形状の一致のみを管理しており, 構造物のエッジは管理対象とはしていない. しかし, 法覆護岸工における法長のような設計要素は構造物の機能に直結するため, 正確な出来形値により管理する方が望ましい. 一方, 点群データからエッジを抽出する既存の手法をそのまま法覆護岸工やブロック積 (張) 工に適用した場合, 法面の形状やエッジの位置を誤認識し, 正しく設計要素を抽出できず, 正確な検査ができない. そこで, 本研究では, 計測した点群データと設計図書の平面図とを用いて設計要素を抽出可能な3次元モデルを生成する技術を開発し, その有効性を確認する.

キーワード: 点群データ, レーザスキャナ, 3次元モデル, エッジ抽出, i-Construction

Research for Extracting Design Elements of Block Construction Work Using Point Cloud Data

MASAYA NAKAHARA^{1,a)} KENJI NAKAMURA² SHIGENORI TANAKA³ TOSHIO TERAGUCHI⁴
HIROTAKA SEKIYA⁴

Received: June 6, 2018, Accepted: December 4, 2018

Abstract: The Ministry of Land, Infrastructure and Transport is promoting i-Construction for increasing productivity in the construction project. In this scheme, standardization of as-built management using three-dimensional measurement technologies such as UAV and terrestrial laser scanner is proceeded. In these standards, as-built management method using elevation difference between the design surface and measured point cloud data is established for these works. This method has controlled shape data of structure except edge information. However, design elements such as length of slope are directly linked to the functions of structures. It is desirable to check designed values such as length of slope effected to functions of structures. On the other hand, it is difficult to recognize shape of slope surface or edge position and inspect design elements at these works by existing methods of detecting edges from point cloud data. In this research, method for extracting design elements of block construction works using design drawings and point cloud data is proposed, and the method was evaluated in terms of usefulness.

Keywords: point cloud data, laser scanner, three-dimensional model, edge extraction, i-Construction

¹ 関西大学大学院総合情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kansai University, Takatsuki, Osaka 569-1095, Japan

² 大阪経済大学情報社会学部
Faculty of Information Technology and Social Sciences, Osaka University of Economics, Osaka 533-8533, Japan

³ 関西大学総合情報学部
Faculty of Informatics, Kansai University, Takatsuki, Osaka 569-1095, Japan

⁴ 国土交通省国土技術政策総合研究所

1. はじめに

近年, 国土交通省では, 建設事業における生産性向上を目的として i-Construction の導入を推進 [1] している.

National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land Infrastructure, Transport and Tourism, Tsukuba, Ibaraki 305-0809, Japan

a) k732803@kansai-u.ac.jp

i-Construction では、構造物を計測した 3 次元点群データ（以下、点群データ）を用いて、道路や河川土工の出来形検査を行う取り組みが実施されている。この取り組みでは、土工や舗装工等を対象として、カメラを搭載した UAV (Unmanned Aerial Vehicle) や地上設置型レーザスキャナを用いた出来形管理要領 [2], [3], [4] が順次規定されている。これらの要領では、設計時の 3 次元のモデルとレーザスキャナ等で計測した点群データとを比較して得られた平面部分の標高差に基づき出来形管理を行っている。

以上の出来形管理方法は、表面に凹凸がある河川堤防の法覆護岸工や石・ブロック積（張）工（以下、ブロック工）には適用が難しい。また、法覆護岸工の法長 [5] のように、設計図書上で定義された構造物の機能に直結する要素（以下、設計要素）は正確な出来形値で管理する方が望ましい。そのため、これらの構造物では、主に現場作業員による TS (Total Station) やメジャーを用いて構造物を垂直に一定の間隔で切断した断面（以下、管理断面）の形状を計測する方法が出来形管理に用いられている [6]。TS を用いる場合、観測用の目印としてトラバースピンを手動で計測地点に設置し、観測者が TS を操作して観測することで TS の設置位置とトラバースピンまでの距離を計測する。しかし、大規模な現場の場合、多数の計測地点を 1 点 1 点計測する必要があり、人的コストの増加が懸念される。また、検査する管理断面は一定間隔であるため、構造物全体の形状を正確に検査することができない。そのため、一度に広範囲の地点を計測可能な地上設置型レーザスキャナにより計測された点群データによる出来形管理の基準化が検討されている。しかし、レーザスキャナで計測する場合、各種構造物の形状を把握するためには、点群データの中から設計要素となるエッジ部分を正確に抽出する必要がある。

そこで本研究では、レーザスキャナにより計測した点群データから設計要素の算出に必要なエッジ上の点（以下、断面変化点）を高精度に抽出し、ブロック工の設計要素を抽出するための 3 次元の点で構成されるモデル（以下、3 次元モデル）を生成する技術を開発する。そして、竣工直後の現場での実験を通じて、ブロック工を対象とした地上設置型レーザスキャナによる出来形管理方法の有効性を検証する。

まず、2 章では、本研究が対象とする道路や河川土工の現場の環境や特性をふまえて、現場を計測した点群データからエッジを抽出する既存手法の調査を行い、ブロック工に適用した場合の課題を明らかにする。次に、3 章で、その課題を解決する設計要素抽出のための 3 次元モデル生成手法を提案する。そして、4 章で提案手法の最適なパラメータ値の検証を行い、5 章で最適なパラメータ値を用いて提案手法の有用性を確認する。最後に、6 章で、研究を総括するとともに今後の展望について述べる。

2. 本研究の対象環境

本章では、本研究が対象とする道路や河川土工の現場の環境や特性について説明する。そして、計測した点群データから設計要素の抽出に必要な既存の 3 次元モデルを構成するエッジ抽出手法を説明し、各手法をブロック工に適用した場合の課題を整理する。

2.1 本研究の対象環境

本研究で対象とする道路や河川土工の現場の環境を図 1 に定義する。本研究で対象とする道路や河川土工の現場は天端、法面、高水敷の 3 種類の面要素と面どうしが交差するエッジである法肩、法尻の 2 種類の線要素（以下、ブレイクライン）で構成され、設計図書の平面図上でそれぞれの設計値が定義される。法肩は天端と法面、法尻は法面と高水敷の境界線を示す。これらの現場では、施工する工種ごとに出来形管理における検査対象の設計要素が異なる。なかでもブロック工では、法面と高水敷の一部に図 2 に示すようなブロックを設置するため、ブロック面に係る設計要素を検査する。本研究で対象とするブロック工の環境を図 3 に定義する。ブロック工の出来形管理では、図 3 に示す横断面上におけるブロック面の長さ（以下、法長）を検査 [5] する。これらの法長（図 3 ℓ1, 図 3 ℓ2）をレーザスキャナで計測した点群データで検査するためには、現場全体を計測した点群データから図 3 に示すブロックの縁と法尻、ブロックの終端の 3 種類のエッジを自動で取得する必要がある。しかし、ブロック工の現場では、図 2 に示すような凹凸があるブロックが多数設置されているため、ブ

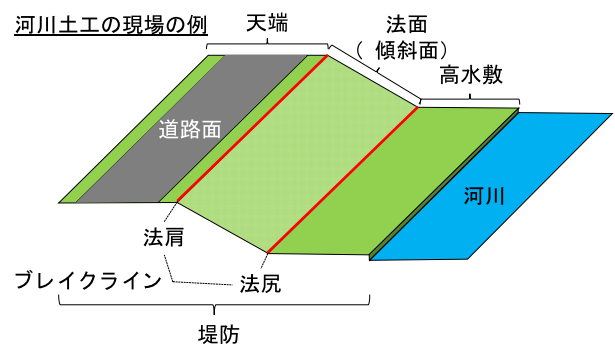


図 1 本研究で対象とする現場の環境

Fig. 1 Environment of the construction site in this research.



図 2 ブロック工で設置するブロックの例

Fig. 2 Example of blocks used in block work.

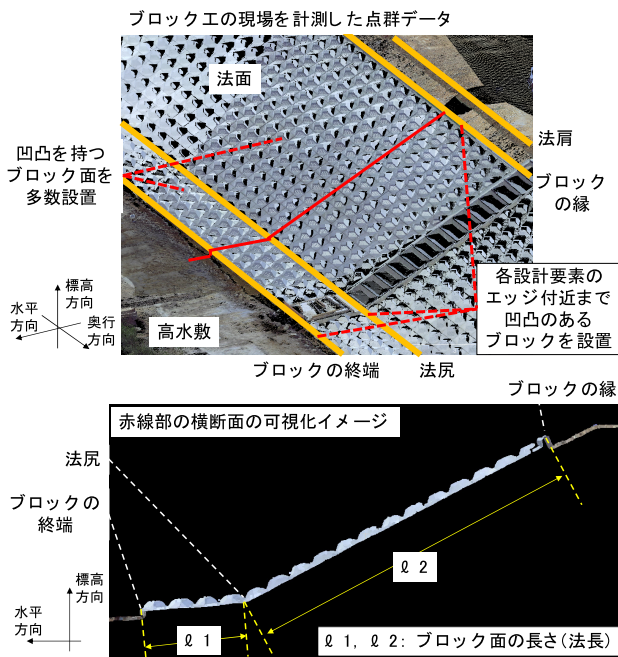


図 3 ブロック工の設計要素

Fig. 3 Design elements of block construction work.

ロックの縁、法尻、ブロックの終端とブロックの凹凸によるエッジが混在する。そのため、点群データからブロックの縁と法尻、ブロックの終端のエッジのみを抽出する手法が必要である。

2.2 既存のエッジ抽出手法

既存の点群データからエッジを抽出する手法は、近似平面の交線を用いる手法 [7], [8], [9], ブレイクラインの候補線を用いる手法 [10], [11], [12], 断面変化点を用いる手法 [13], [14], 3次元の面情報を復元する手法 [15], [16], [17], [18] が一般的である。

近似平面の交線を用いる手法 [7], [8], [9] は、整地後の法面や天端のような面を対象に近似平面を生成し、2つの近似平面の交線のエッジとして抽出する手法である。この手法は整地後の平坦な面で構成される河川土工の現場であれば、法面の近似平面を正確に算出できるため、高精度にエッジを抽出できる。

ブレイクラインの候補線を用いる手法 [10], [11], [12] は、点群データから取得した構造物の平坦部を囲む外形線をブレイクラインの候補線とし、これらの候補線を用いて断面変化点を抽出することを繰り返すことで河川堤防のエッジとする手法である。この手法は、法面が平坦な面で構成される河川土工の構造物であれば、法面の領域を正確に推定できるため、高精度にエッジを抽出できる。

断面変化点を用いる手法 [13], [14] は、河川土工の現場や道路を対象に異なる2面上の点どうしを結ぶ直線からの垂直距離が最大となる点を断面変化点として抽出する。そして、断面ごとに抽出した全断面変化点を道路面と壁面、ま

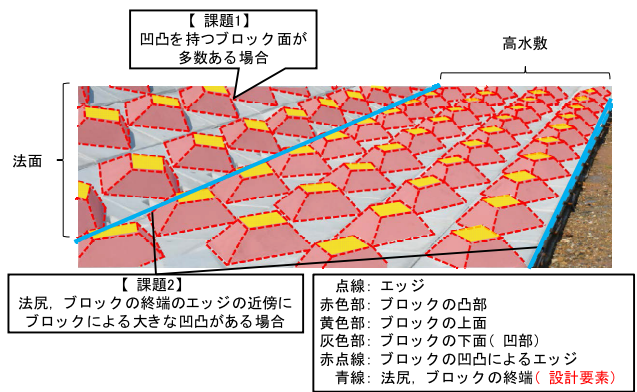


図 4 ブロック工の現場における課題

Fig. 4 Issues in the field of block construction work.

たは天端と法面が交差するエッジの点として抽出する手法である。この手法はエッジ付近に地物や大きな凹凸がない完成形状の河川土工の構造物であれば、垂直距離が最大となる点が確実にエッジの点となるため、高精度にエッジを抽出できる。

3次元の面情報を復元する手法 [15], [16], [17], [18] は、レーザスキャナで計測した点群データに対して、曲面近似を行い、計測範囲内の物体ごとの面情報を復元し、復元した面どうしの交線のエッジとして抽出できる。この手法はエッジを含む周辺を計測した点群データであれば、高精度にエッジを抽出できる。

2.3 既存手法をブロック工に適用した場合の課題

前述した既存手法 [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18] では、凹凸のない平坦部で構成された構造物の点群データからエッジを抽出する手法が提案されている。しかし、本研究で対象とするブロック工では、現場全体に凹凸のあるブロックが設置されるため、現場に必要な精度で設計要素となるエッジのみを抽出可能であることが示されていない。そのため、本節では、既存手法をブロック工に適用した場合に想定される課題を整理する。

ブロック工では、設計要素として図 3 に示すような法長 l_1 と l_2 の長さを抽出する必要がある。法長 l_1 は法尻とブロックの終端の間、法長 l_2 はブロックの縁と法尻の間にある凹凸を無視したブロック下面の全長である。しかし、いずれの既存手法も平坦な面で構成された完成形状の構造物を想定しており、既存手法をそのままブロック工に適用した場合、次に示す2つの課題が発生する。

1点目は、図 4 に示すように凹凸を持つブロックが多数ある場合、エッジを誤抽出するという課題である。ブロック工の現場は、図 3 に示すように護岸のために法面上に凹凸を持つブロックを多数設置する。そのため、近似平面の交線を用いる手法 [7], [8], [9] をそのまま適用した際には、法面と高水敷のブロックの下面の形状を推定し、推定した法面と高水敷の近似平面の交線を法尻として算出する必要

がある近似平面を生成するために使う点群データの範囲を小さくした場合、ブロックの凸部に対してブロックの下面の傾きと異なる近似平面が多数生成されることによりブロックの下面の形状を示す近似平面の特定が困難となるという課題がある。近似平面を生成するために使う点群データの範囲を大きくした場合、実際のブロックの下面よりもブロックの上面側にずれた位置にブロック下面の近似平面を誤推定するため、法尻のエッジを正しく抽出できないという課題がある。

ブレイクラインの候補線を用いる手法 [10], [11], [12] をそのまま適用した際には、凸型ブロックがある場合は法面の領域を広く、凹型ブロックがある場合は法面の領域を狭く誤推定するため、ブロックの縁、法尻、ブロックの終端のエッジを正しく抽出できないという課題がある。

3次元の面情報を復元する手法 [15], [16], [17], [18] をそのまま適用した際には、設計要素のエッジとブロックの凹凸部のエッジを混在して抽出するため、設計要素のエッジのみを正しく抽出できないという課題がある。

2点目は、図4に示すようにエッジの近傍に大きな凹凸がある場合、ブロックの縁、法尻、ブロックの終端のエッジを正しく抽出できないという課題である。ブロック工の現場は、図3に示すように法肩や法尻までブロックを設置する。そのため、断面変化点を用いる手法 [13], [14] をそのまま適用した際には、ブロックの凸部上のエッジ上の点を断面変化点として誤抽出し、ブロックの縁、法尻、ブロックの終端のエッジ上の点を抽出できないという課題がある。

3. ブロック工の設計要素抽出のための3次元モデル生成手法の提案

2章で論じた2つの課題から、本研究で対象とするブロック工において、設計要素となるエッジのみを正確に抽出するためには、「凹凸を持つブロックが多数ある場合にエッジを誤抽出しないこと」と「エッジの近傍に大きな凹凸がある場合でも、ブロックの縁、法尻、ブロックの終端のエッジを正しく抽出できること」が重要である。そのため、エッジ付近や法面上の凹凸面を考慮してエッジを抽出し、河川堤防におけるブロック工の設計要素を抽出するための3次元モデルを生成する技術を開発する。また、ブロックの幅や形状は図2に示すように現場ごとに多種多様であるため、本研究では、図5に示す凸型ブロックが均一の大きさと現場全体に設置されることを想定し、手法を開発する。

3.1 課題への対応方針

1点目の「凹凸を持つブロックが多数ある場合、エッジを誤抽出するという課題」に対しては、最下点抽出法 [19], [20], [21] を拡張し、確実なブロックの下面以外をブロックの凸部として除去することにより対応する。これにより、法面のブロックの下面のみを抽出できるため、法

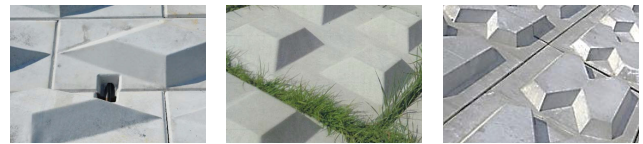


図5 凸型ブロックの例
Fig. 5 Example of convex block.

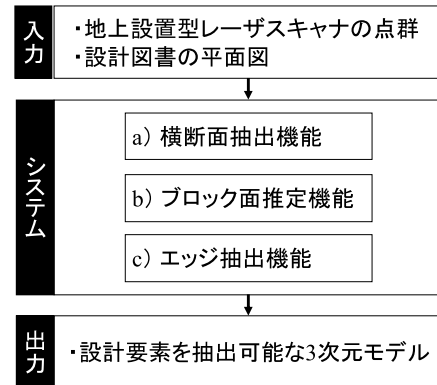


図6 提案手法の処理フロー
Fig. 6 Flowchart of proposed method.

面のブロックの下面の形状を正しく推定できる。2点目の「エッジの近傍に大きな凹凸がある場合、ブロックの縁、法尻、ブロックの終端のエッジを正しく抽出できないという課題」に対しては、施工時に利用される設計図書の平面図を点群データとともに入力し、設計図書の平面図で定義されたブロックの縁、法尻、ブロックの終端のエッジの線形情報を基に点群データのエッジを推定することにより対応する。設計図書の平面図には設計要素の抽出に必要なエッジの線形情報が記載されているため、エッジ付近に大きな凹凸がある場合でも設計要素のエッジのみを正しく抽出できる。

3.2 提案手法の概要

提案手法の処理フローを図6に示す。提案手法は、横断面抽出機能、ブロック面推定機能とエッジ抽出機能により構成される。横断面抽出機能では、既存手法 [10], [11], [12] と同様に入力された点群データを図7に示す河川堤防の長手方向を横断するように一定の幅で分割する。ブロック面推定機能では、「凹凸を持つブロックが多数ある場合、エッジを誤抽出するという課題」を解決するために、分割した点群データの中からブロックの凸部の点群データを除去する。そして、図4に示すブロックの下面部や図1に示す天端を計測した点群データとそれらを横断面上に投影した場合の近似直線を出力する。3次元モデル生成機能では、「エッジの近傍に大きな凹凸がある場合、ブロックの縁、法尻、ブロックの終端のエッジを正しく抽出できないという課題」を解決するために、設計図書の平面図上のエッジの線形と平坦部の点群データを用いて、エッジの点を抽出

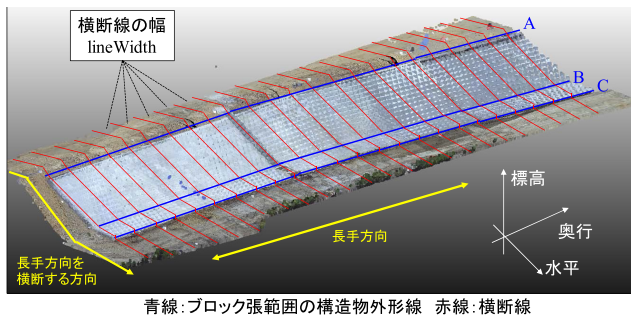


図 7 横断線により分割した点群データ

Fig. 7 Point cloud data divided by cross section line.

し、3次元モデルとして出力する。提案手法の入力データは、地上設置型レーザスキャナにより河川堤防を計測した点群データと設計図書の平面図とし、出力データは、点群データから抽出したエッジの点で構成された3次元モデルとする。

3.3 入力データの要件

ブロック工の施工現場を計測する場合、地上設置型レーザスキャナを設置可能な天端や高水敷の1地点からだけでは、ブロックの凹凸によるオクルージョンによりエッジを計測できない。そのため、本研究では複数地点にレーザスキャナを設置して、様々な角度から対象構造物を計測することとする。このとき、各地点の計測データは、計測位置を原点としたローカル座標系を付与された点群データであるため、重畳するには座標系を一致させる必要がある。そこで本研究では、櫻井らの提案手法 [22] により各地点の計測データの座標系を重畳し、入力データとする。

また、本システムで入力データとする設計図書の平面図には、エッジ以外の線形情報が多く含まれている。そのため、本研究では、線形の属性ごとにレイヤ名を定義した「CAD製図基準(案) [23]」に準拠したSXF図面を入力データの要件とする。このとき、地上設置型レーザスキャナによる点群データに対して平面図を重畳するため、レイヤ(D-BMK-SRVR)上の基準点のフィーチャに対して、平面直角座標系の座標値が含まれていることとする。

3.4 横断面抽出機能

本機能では、複数地点から計測した点群データと平面図を用いて、点群データを一定の幅ごとに分割し、河川堤防の長手方向に直交する横断面に投影する。

まず、設計図書の平面図から完成形状の構造物外形線が記載されたD-STRレイヤ上にあるブロックの縁(図8A)、法尻(図8B)とブロックの終端(図8C)の計3つの設計要素の抽出に必要な線形を抽出する。次に、横断線間に確実に平坦なブロックの下面を含むようにするため、図7に示すように「横断線の幅(lineWidth)」ごとに、抽出した線形に垂直な横断線を生成する。そして、図8のように横

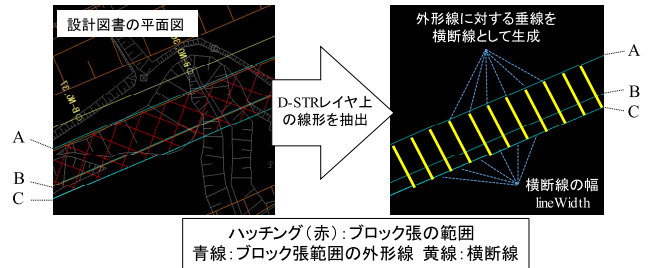


図 8 設計図書の平面図と横断線

Fig. 8 Design drawing and cross section lines.

断線で分割された範囲ごとに点群データを分割する。最後に、横断線を通る標高方向の面上に分割した点群データを平行投影変換する。

3.5 ブロック面推定機能

本機能では、ブロックの凸部を除去するため、投影変換した点群データから近似直線を生成し、ブロック下面の点群データを抽出する。

まず、投影変換した点群データの中からブロックを含む範囲を取得するため、法面と高水敷を計測した点群データを抽出する。このとき、設計図書の平面図上のブロックの縁、法尻とブロックの終端を指す線形と実際の構造物のエッジを計測した点列をつないだ線形が計測機器の誤差により完全には一致しない。そこで、法面と高水敷を計測した可能性が高い点群データのみを抽出するため、出来形管理要領 [3] で除外してよいと規定されているエッジの近傍 $\pm 5\text{cm}$ の範囲にある点群データを除外する。これにより、法面上と高水敷側の点群データのみを抽出できるため、近似直線の精度が向上すると考えられる。そのため、本研究では、設計図書の平面図上のエッジの近傍 $\pm 5\text{cm}$ の範囲にある点群データを除外して抽出するものとする(図9(i))。次に、抽出した点群データを「最下点の抽出幅(choiceWidth)」で分割し、ブロックの凸部を地表面以外のノイズ、平坦なブロックの下部を地表面と見立て、既存の地表面を抽出する手法である最下点抽出法 [19], [20], [21] を参考にして、分割した点群データごとに標高最低点を抽出する(図9(ii))。これにより、ブロックの凸部の点群データを除去しつつ、法面と高水敷側の平坦なブロックの下面の点群データのみを抽出できる(図9(iii))。最後に、抽出した法面と高水敷側の点群データに対して、最小二乗法を用いて近似直線を生成する。

3.6 エッジ抽出機能

本機能では、平面図の線形の周辺にある点群データの中からエッジの点を抽出し、3次元モデルとして出力する。

まず、エッジを含む点群データを取得するため、ブロック面推定機能で除外したブロックの縁と法尻、ブロックの終端の近傍 $\pm 5\text{cm}$ の範囲にある点群データを取得する

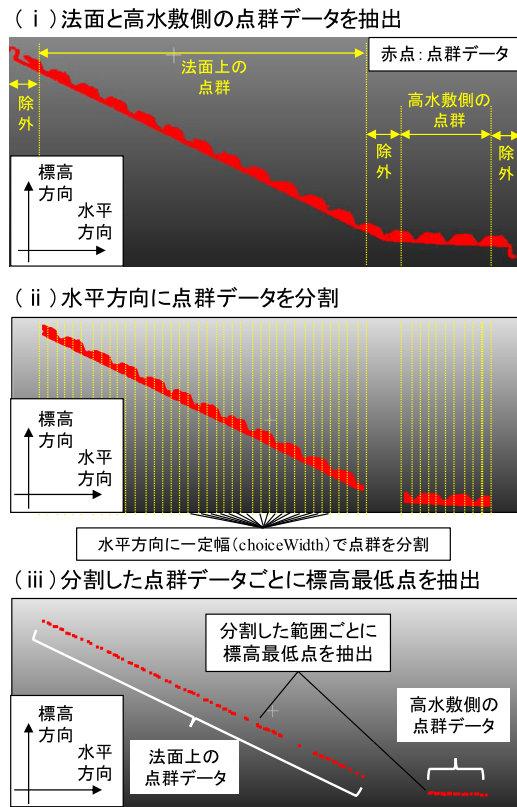


図 9 ブロック面推定機能
 Fig. 9 Block surface estimation function.

(図 10(i)). これらの点群データは、エッジ付近の点群であり、この中からエッジの最確値を検出することで高精度な 3次元モデルを生成できる。次に、ブロックの縁の近傍にある点群データの中から法面の近似直線に対して「近似直線との近傍距離 (nearDistance)」の範囲にある近傍点を取得し、取得した近傍の点群データの中から水平方向に最小となる点をブロックの縁を示すエッジの点とする (図 10(ii)). 同様に、ブロックの終端の近傍にある点群データの中から高水敷側の近似直線に対して「近似直線との近傍距離 (nearDistance)」の範囲にある近傍の点群データを取得し、近傍にある点群データの中から水平方向に最大となる点をブロックの終端を示すエッジの点とする (図 10(iii)). そして、ブロックの縁と終端を示すエッジの点を通る直線から最も垂直距離が大きくなる点を取得し、法尻を示すエッジの点とする (図 10(iv)). 最後に、横断面抽出機能で分割した全点群データに対して、ブロックの縁と終端、法尻を示すエッジの点を抽出し、逆投影変換を行うことで設計要素を抽出可能な 3次元モデルとして出力する。

4. 提案手法におけるパラメータの検証実験

4.1 実験目的

本実験では、ブロック工の出来形管理基準の検討に必要な諸元を明らかにするため、表 1 に示す提案手法で用いる

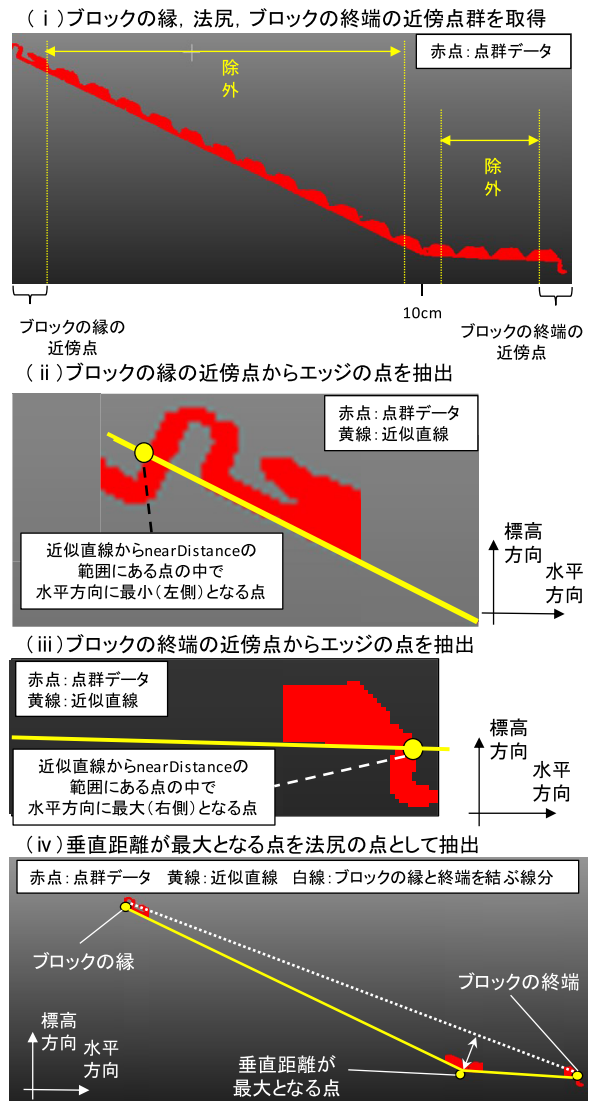


図 10 エッジ抽出機能
 Fig. 10 Edge extraction function.

表 1 提案手法のパラメータ

Table 1 Parameters of proposed method.

パラメータ	設定値 (m)	関連処理
lineWidth	0.300~4.800	横断面抽出機能
choiceWidth	0.010~0.500	ブロック面推定機能
nearDistance	0.010~0.100	エッジ抽出機能

3つのパラメータ lineWidth, choiceWidth, nearDistance に対して、最適な設定値を調査する。その際、各パラメータのパラメトリック解析の結果と実験対象現場との関係を考慮したうえで、最適な値を設定する。

4.2 実験条件

本実験を実施するにあたり、兵庫県加東市滝野地区の築堤工事の現場で地上設置型レーザスキャナを用いて計測を行った。現場の位置と計測対象を図 11 と図 12 に示す。計測対象は、長手方向に 200メートルの凸型ブロックを用



図 11 滝野地区築堤工事の位置

Fig. 11 Place of Takino embankment construction.



図 12 計測対象の環境

Fig. 12 Measurement environment.

表 2 地上設置型レーザスキャナの仕様

Table 2 Spec of terrestrial laser scanner.

名称	FARO
製品名	Focus3DX 330
製造会社	FARO 社
レーザクラス	Class1M
測距距離	0.6~330m
最大測距点数	976,999 点/秒
最大測定誤差	±2mm
計測位置からの距離ごとの計測点密度 (現地での事前計測による結果)	378,227 点/m ² @3m 42,289 点/m ² @5m 6,223 点/m ² @10m
計測可能範囲	水平 360 度, 垂直 305 度

いた法覆護岸工である。凸型ブロックの形状を図 5 に示す。地上設置型レーザスキャナは、土工の出来形管理で活用されている FARO 社の Focus 3D X 330 (以下, FARO) を用いる。FARO の仕様を表 2 に示す。本実験では、図 13 に示す複数地点、計測方向で、FARO を水平に設置し、計測方向を中心に水平 180 度、垂直 305 度の計測範囲を設定し、現場全体を計測する。このとき、天端または高水敷からの計測だけでは、ブロックの凸部によるオクルージョンによりブロックの凹部を計測できないため、天端と高水敷上に FARO を設置し、計測する。入力データは、既存手法 [22] により全地点からの計測データをすべて重畳した点群データとする。正解データは、現場で TS を用いて検査した管理断面の出来形検査結果とする。計測した点群データと管理断面の位置を図 14、各管理断面上の計測点密度を表 3 に示す。

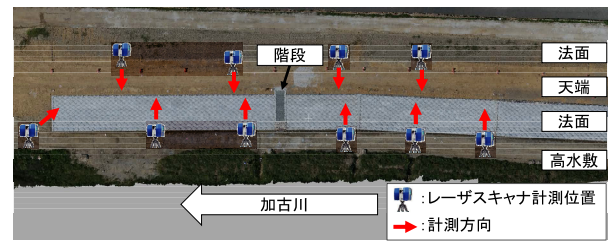


図 13 機器設置位置と計測方向

Fig. 13 Equipment installation position and measurement direction.

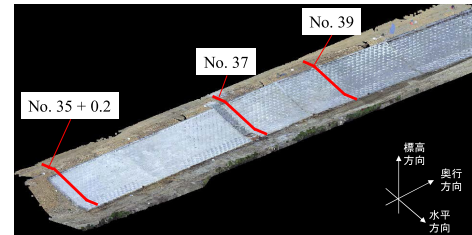


図 14 点群データと検査対象の管理断面

Fig. 14 Point cloud data and management section.

表 3 管理断面上の計測点密度

Table 3 Density of measurement point on management section.

管理断面	計測点密度 (点/m ²)		
	天端~ブロックの縁	ブロックの縁~法尻	法尻~ブロックの終端
No.35+0.2	36,727	22,743	97,225
No.37	250,941	80,750	52,048
No.39	7,048	72,369	43,812

4.3 パラメータの設定

提案手法で用いるパラメータとその設定範囲を表 1 に示す。「lineWidth」は、横断面抽出機能で点群データ全体を一定間隔の横断線で分割し、横断面に投影変換するための値である。「choiceWidth」は、ブロック面推定機能で横断面上の点群データを一定間隔に分割し、標高最低点を取得するための値である。「nearDistance」は、エッジ抽出機能で近似直線の近傍点を取得するための値である。

(1) linewidth

本パラメータは、横断面抽出機能において横断線の幅を設定する。本パラメータの適値を調査するため、ブロック幅を基準として横断線の幅 (lineWidth) を設定して評価実験を行う。本実験では、滝野地区築堤工事の測線 No.35+0.2 を通る横断線の法長とし、提案手法で算出した値と正解データである実測値とを比較して評価する。提案手法では、図 15 に示すように横断線の幅で分割した範囲内にブロック下面の計測点が含まれることを前提としているため、本実験で調査する横断線の幅には、ブロックの幅の 1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, 3, 4 倍の値, 0.300, 0.400, 0.600,

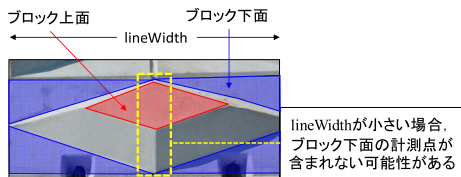


図 15 ブロックの上面と下面

Fig. 15 Top and bottom surface of block.

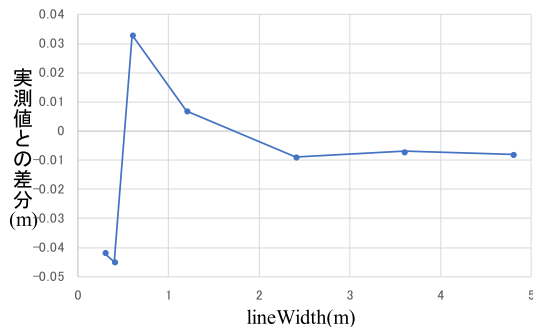


図 16 lineWidth の評価結果

Fig. 16 Evaluation results of "lineWidth".

1.200, 2.400, 3.600, 4.800 m を設定する. なお, 本実験では, 提案手法の他のパラメータに choiceWidth = 0.050 m, nearDistance = 0.030 m を設定する.

評価結果を図 16 に示す. 評価結果の実測値との差を確認すると, 横断線の幅を大きくするほど 0 に近づき, 法長の計測精度の向上が見られる. これは, 横断線の幅を広げるほどオクルージョンにより欠損した領域を計測した点の割合が減少するためと考えられる. そのため, 2.400~4.800 m の間の値を設定することで, 高精度なエッジを抽出できると考えられる. 一方, 4.800 m に設定した場合に実測値との差が広がる. これは, 構造物の微小なずれが累積し, 同一横断面上の点とするには幅が 4.800 m では広すぎることが原因と考えられる. そのため, 本研究では, パラメータ lineWidth にはブロックの幅の 3 倍である 3.600 m を設定する.

(2) choiceWidth

本パラメータは, ブロック面推定機能において最下点の抽出幅を設定する. 本パラメータの適値を調査するため, 最下点の抽出幅 (choiceWidth) を設定して評価実験を行う. 実験対象および評価方法は, パラメータ lineWidth の評価実験と同様とする. 本実験では, 最下点の抽出幅として, 0.010, 0.030, 0.050, 0.100, 0.200, 0.500 m を設定する. なお, 本実験では, 提案手法の他のパラメータに lineWidth = 3.600 m, nearDistance = 0.030 m を設定する.

評価結果を図 17 に示す. 評価結果の実測値との差を確認すると, 最下点の抽出幅に 0.010~0.050 m を設定した場合に高精度に法長を計測可能なことが分かる. これは, 横断線の幅が十分に大きく設定されているため, 最下点の抽

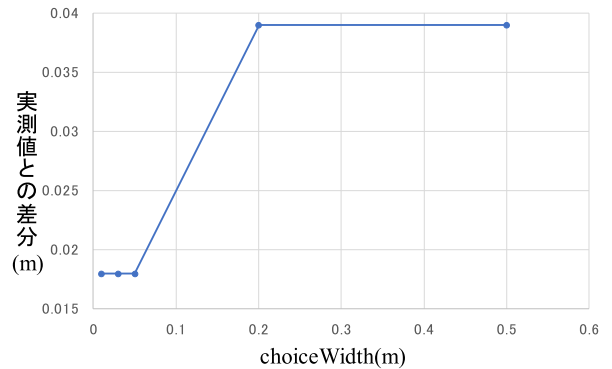


図 17 choiceWidth の評価結果

Fig. 17 Evaluation results of "choiceWidth".

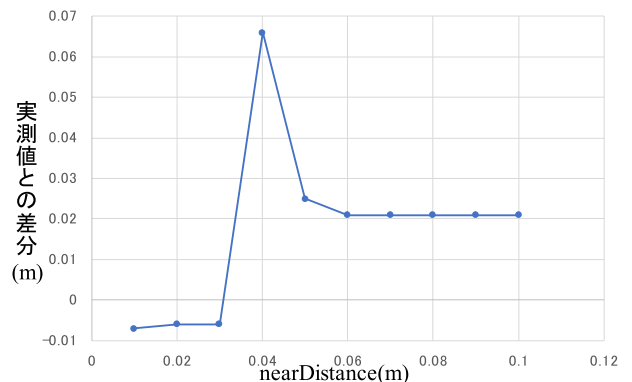


図 18 nearDistance の評価結果

Fig. 18 Evaluation results of "nearDistance".

出幅を小さくするほど高精度に法面等の近似直線の精度向上に寄与したものと考えられる. 本研究では, パラメータ choiceWidth に 0.010~0.050 m の中間値である 0.030 m を設定する.

(3) nearDistance

本パラメータは, 3次元モデル生成機能において, 近似直線との近傍距離を設定する. 本パラメータの適値を調査するため, 近似直線との近傍距離 (nearDistance) を設定して評価実験を行う. 実験対象および評価方法は, パラメータ lineWidth の評価実験と同様とする. 本実験では, 近似直線との近傍距離として, 0.010, 0.020, 0.030, 0.040, 0.050, 0.060, 0.070, 0.080, 0.090, 0.100 m を設定する. なお, 本実験では, 提案手法の他のパラメータに lineWidth = 3.600 m, choiceWidth = 0.030 m を設定する.

評価結果を図 18 に示す. 評価結果の実測値との差を確認すると, 近似直線との近傍距離に 0.010~0.030 m を設定した場合に高精度に法長を計測可能なことが分かる. 一方, 本パラメータについて, 極端に小さな値を設定すると, 計測点の密度が低い場合, エッジの計測点を抽出できない可能性がある. そこで本研究では, 可能な限り近似直線との近傍距離に大きな値を設定するため, 0.030 m を設定する.

これらの検証結果から, 提案手法の最適なパラメータ

値として, $lineWidth = 3.600\text{ m}$, $choiceWidth = 0.030\text{ m}$, $nearDistance = 0.030\text{ m}$ を設定する.

5. 3次元モデルを用いた設計要素の抽出実験

5.1 実験目的

本実験では, 提案手法の有用性を検証するため, 滝野地区築堤工事の計測データと出来形検査結果を用いて, ブロック工の出来形管理への適用可能性を評価する.

5.2 実験対象データ

5.2.1 点群データ

本実験では, 滝野地区築堤工事の現場で, 図 13 に示す複数の計測位置から取得した点群データを用いて 3次元モデルを生成する. 地上設置型レーザスキャナで計測された点群データは, 平面直角座標系の X, Y, Z 座標の点とする. 実験対象の点群データの生成手順を次に示す.

Step1. 複数の計測位置から得られた点群データを機器の設置位置および複数地点から計測されたターゲットの位置情報を用いて, 同一の平面直角座標系に変換して重畳する.

Step2. 重畳したデータには, 設置位置や入射角度の違いにより計測精度の異なるデータが混在するため, 重畳フィルタリング [22] を用いて高精度な点群データのみを抽出する.

5.2.2 正解データ

本実験では, 提案手法にて生成した 3次元モデルから設計要素を取得し, 正解データと比較することで精度評価を行う. 本実験の正解データは, 検証地点となる管理断面の法肩, 法尻の測点を TS にて計測することで生成する. TS による計測データは, 測点の位置を計測したデータであり, 平面直角座標系の X, Y, Z の座標の点とする.

5.2.3 実験内容

本実験では, 提案手法にて生成した 3次元モデルから設計要素である法長を取得し, 出来形検査時の TS による実測値である正解データと比較することで, 提案手法の有効

性を評価する. この際, 提案手法の有効性を評価するため, 点群データからブレイクラインを抽出する手法 [7], [8], [9] (以下, 「既存手法」とする) にて生成した 3次元モデルと比較する. また, 本実験では図 14 に示す 3カ所の管理断面を対象に評価する. 精度評価の実験手順を次に示す.

Step1. 提案手法および既存手法で 3次元モデルを生成する.

Step2. 管理断面の測点を通る横断線を基準に, 各 3次元モデルから, ブロックの縁, 法尻, ブロックの終端を取得する.

Step3. 取得した各点間の距離と正解データの各点間の距離を比較する. 比較する項目は, 出来形検査要領 [6] を参考に, 図 3 に示す法長 ℓ_1 , ℓ_2 を対象とする.

5.2.4 実験結果と考察

実験結果を表 4 に示す. 出来形管理基準及び規格値 [5] では, 構造物の法長が 3m 未満の場合は, $-50\text{ mm} \leq \text{法長} \leq 0\text{ mm}$, 3m 以上の場合は, $-100\text{ mm} \leq \text{法長} \leq 0\text{ mm}$ であれば出来形管理基準の規格値を満たすものと規定されているため, これらの範囲を本実験における合格値の範囲とする. 表 4 中の実測値との差が範囲内にある場合は, 実測値との差に下線を引くものとする.

また, 各手法で生成した提案手法と既存手法による 3次元モデルの可視化結果を図 19 と図 20, 横断面図の可視化

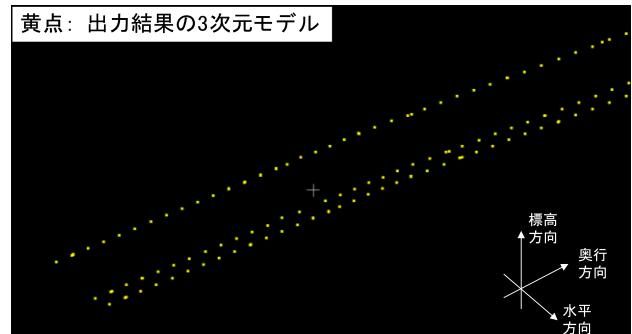


図 19 提案手法の可視化結果

Fig. 19 Visualization result using proposed method.

表 4 各手法で算出した値と実測値との比較結果

Table 4 Comparison result of slope lengths by proposed method, existing method vs. measuring.

法長	手法	計測値 (mm)			実測値との差 (mm)			合格値の範囲[5]
		No.35 + 0.2	No.37	No.39	No.35 + 0.2	No.37	No.39	
ℓ_1	実測値	1997	2013	2010	—			$-50\text{mm} \leq \ell_1 \leq 0\text{mm}$
ℓ_2		6642	6645	6665				$-100\text{mm} \leq \ell_2 \leq 0\text{mm}$
ℓ_1	既存手法	1812	2144	2237	-185	131	227	$-50\text{mm} \leq \ell_1 \leq 0\text{mm}$
ℓ_2		6675	6595	6476	33	-50	-189	$-100\text{mm} \leq \ell_2 \leq 0\text{mm}$
ℓ_1	提案手法	2015	2015	1993	18	2	<u>-17</u>	$-50\text{mm} \leq \ell_1 \leq 0\text{mm}$
ℓ_2		6636	6641	6682	<u>-6</u>	<u>-4</u>	17	$-100\text{mm} \leq \ell_2 \leq 0\text{mm}$

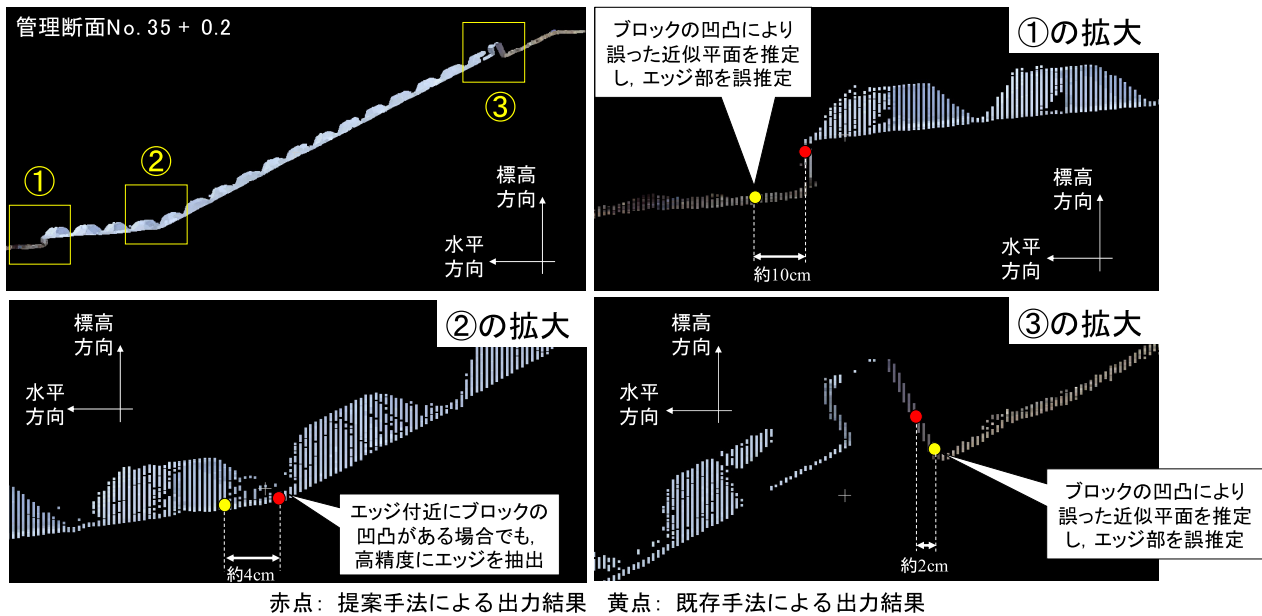


図 21 提案手法と既存手法による出力結果の可視化結果
 Fig. 21 Visualization result using proposed method and existing method.

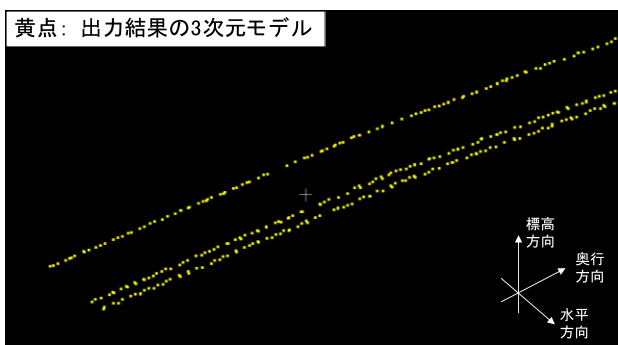


図 20 既存手法の可視化結果
 Fig. 20 Visualization result using existing method.

結果を図 21 にそれぞれ示す。なお、可視化結果については、No.35+0.2, No.37, No.39 ともに同様の傾向であったため、No.35+0.2 の可視化結果のみを示す。

まず、表 4 を確認すると、既存手法の場合、実測値との差は、最小で約 33 mm、最大で約 200 mm となり、いずれの管理断面においても合格値の範囲内の精度で法長を算出できなかったことが分かった。一方で、提案手法では、最小で 2 mm、最大で 18 mm となり、No.35+0.2 の法長 l_2 と No.37 の法長 l_2 , No.39 の法長 l_1 において合格値の範囲内の精度で法長を算出できたことが分かった。しかし、No.35+0.2 の法長 l_1 と No.37 の法長 l_1 , No.39 の法長 l_2 において、合格値の範囲内の精度で算出できなかった。No.37 の法長 l_1 については、FARO の計測精度が 2 mm であるため、機器の計測誤差が影響したためと考えられる。No.35+0.2 の法長 l_1 と No.39 の法長 l_2 については、表 3 より、No.35+0.2 の法長 l_1 の算出に必要なブロックの縁～法尻、No.39 の法長 l_2 の算出に必要な法尻～ブロックの末端を計測した点

の密度が不足し、ブロックの縁、法尻、ブロックの末端付近を FARO で十分に計測できなかったためと考えられる。このことから、提案手法は既存手法に比べて、適切に構造物のエッジの構成点を絞り込み、設計要素を抽出できたことが分かった。また、No.35+0.2 の法長 l_2 と No.37 の法長 l_2 , No.39 の法長 l_1 において、提案手法による 3 次元モデルの生成精度は、出来形管理要領で定める閾値内であるため、提案手法の出来形管理への適用可能性は高いと考えられる。次に、図 19 から図 21 の可視化結果を確認すると、既存手法よりも提案手法の方が正しくエッジの点を抽出できたことが分かる。

以上のことから、「凹凸を持つブロックが多数ある場合、エッジを誤抽出するという課題」と「エッジの近傍に大きな凹凸がある場合、ブロックの縁、法尻、ブロックの末端のエッジを正しく抽出できないという課題」を解消できた。しかし、本提案手法を実現場に適用する際には、以下の課題を解決する必要があると考えられる。

- ブロックの形状は多種多様であり、最適なパラメータが異なる可能性があるという課題

本実験では、ブロックの形状が統一された 1 現場のみを対象に実験を行ったため、計測地点間で大きな差異は発生しなかった。そのため、図 5 に示すブロックが設置された現場に対しては、事前実験で分析した 3 種類のパラメータを用いることで、高精度に法長を算出できると考えられる。しかし、法覆護岸工では、現場条件によって図 2 に示すように多様なブロックが導入される。これらのブロックの幅や形状は様々であるが、凸型ブロックであれば、本実験で用いた 3 種類のパラメータをブロックの大きさに合わせて適宜調整することで、提案手法により設計要素を抽出で

表 5 各手法で算出した値と実測値との比較結果

Table 5 Comparison result of slope lengths by proposed method, existing method vs. measuring.

計測方法	計測対象	合計所要時間	所要時間内訳		提案手法による 解析時間
			準備	現地計測	
メジャーによる計測	6 断面	2 時間	—	2 時間	—
FARO	現場全体	6 時間	1 時間	5 時間	約 6 分
UAV 写真測量		4 時間 20 分	4 時間	20 分	未実施

きると考えられる。しかし、凹型ブロックや自然石ブロックの場合には、提案手法をそのまま適用できない。凹型ブロックについては、図 15 に示す上面と下面が反転するため、ブロック面推定機能で、凸型ブロックとは逆に凹部を除去して上面を抽出する必要がある。そのため、標高最低点ではなく、標高最高点を抽出するように処理を変更することで対応できると考えられる。自然石ブロックについては、凸型ブロックや凹型ブロックの上面や下面のような平坦部がない場合がある。そのため、自然石ブロックへの対応については今後の課題と考えられる。

- 計測機器の種類や設置位置、角度および計測回数により、計測精度が影響を受けるという課題

本研究では、地上設置型レーザスキャナを複数の地点に設置し、その結果を重畳して高精度な点群データを取得した。しかし、その他の現場でも同様の計測を実施可能か検証が必要である。また、UAV や TS で計測した場合の検証も必要である。

- 計測と解析に時間がかかるという課題

i-Construction では、建設現場での生産性向上を目標としているため、開発技術の計測時間の省力化への貢献可能性が重要であると考えられる。検証実験で計測対象とした現場において、2 人の現場作業員が 50 m テープメジャーを用いて 6 断面を実測した場合に要した時間と提案手法で要した計測時間と解析時間を表 5 に示す。提案手法による解析時間は、本実験で計測した現場全体の点群データを用いて現場作業員が手作業で計測した断面と同様に 6 断面を対象に解析した場合の解析時間である。解析時間には 42,237,848 点の点群データの読み込み時間が含まれており、6 断面までを対象にした場合、解析時間が 1 断面増加するごとに、読み込み時間を除いた解析時間が線形的に約 20~30 秒ずつ増加した。なお、解析時の動作環境は、OS は Windows 10、メモリ 16 GB、CPU を Intel(R)Core(TM) i7-7700HQ、HDD は 1 TB である。

表 5 より、規定の測点を通る横断面のみを対象に検査する場合であれば、手作業により、1 断面 20 分で簡便に計測できるため、FARO を用いるよりも準備と計測にかかる時間的なコスト、金銭的なコストを非常に低く抑えることができると考えられる。一方、FARO を用いる場合、計

測した点群データと提案手法を用いることで任意の横断面を短時間で検査できる。そのため、現場全体の検査を行う場合や維持管理での活用を目指す場合には、手作業よりも FARO の方が現場導入時の効果が高いと考えられる。しかし、FARO を用いた提案手法は、計測準備に時間を要するため、生産性の観点で見ると小規模な構造物への適用は困難と予想される。本研究では、FARO を用いた提案手法の出力結果の検証を実施したが、表 5 に示す UAV 写真測量や導入が検討されている UAV 搭載型レーザスキャナを活用することで、より計測時間を短縮できるため、提案手法を小規模な構造物への適用できる可能性が高いと考えられる。そのため、提案手法の適用に適した計測方法、現場条件、解析時間の検証が必要である。

6. おわりに

本研究では、計測した点群データを用いてブロックの縁、法尻、ブロックの終端のエッジを抽出し、設計要素を抽出可能な 3 次元モデルを構築する技術を開発した。そして、実験を通じて既存手法の「凹凸を持つブロックが多数ある場合、エッジを誤抽出するという課題」と「エッジの近傍に大きな凹凸がある場合、ブロックの縁、法尻、ブロックの終端のエッジを正しく抽出できないという課題」を解消し、提案手法の有用性を検証した。また、提案手法は、20 m 間隔の管理断面のみを対象とした既存の出来形管理とは異なり、任意地点の横断面の検査においても利用 [12] できるため、施工の品質向上に寄与できると考えられる。

今後は、本研究を通して得られた課題を解消して様々な工種や現場への適用を進めるとともに、施工対象物の全数検査による品質向上の可能性を明らかにする予定である。

謝辞 本研究は、国土交通省国土技術政策総合研究所委託研究「平成 28 年度及び平成 29 年度点群座標データからの設計要素抽出手法に関する研究」により実施した。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

[1] 国土交通省：平成 28 年度から i-Construction で建設現場が変わります！新たに導入する 15 の基準及び積算基準について—平成 28 年 4 月からの ICT の全面的な活用に向けて、入手先 (<http://www.mlit.go.jp/common/001125408.pdf>)

(参照 2018-05).

[2] 国土交通省：空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案），入手先 (<http://www.mlit.go.jp/common/001230311.pdf>)（参照 2018-11）.

[3] 国土交通省：地上レーザスキャナーを用いた出来形管理要領（土工編）（案），入手先 (<http://www.mlit.go.jp/common/001249072.pdf>)（参照 2018-05）.

[4] 国土交通省：地上レーザスキャナーを用いた出来形管理要領（舗装工事編）（案），入手先 (<http://www.mlit.go.jp/common/001230309.pdf>)（参照 2018-05）.

[5] 国土交通省：土木工事施工管理基準及び規格値（案），入手先 (http://www.mlit.go.jp/tec/sekisan/sekou/pdf/300327kouji_sekoukanrikijun01.pdf)（参照 2018-11）.

[6] 国土技術政策総合研究所：TS を用いた出来形管理要領（護岸編）（試行案），入手先 (<http://www.nilim.go.jp/ts/download/ts.dekigata.revetment.140313.pdf>)（参照 2018-05）.

[7] 堀田富宝，岩切宗利：3次元点群からのエッジ抽出手法とその能力，画像電子学会誌，画像電子学会，Vol.43, No.3, pp.292-299 (2014).

[8] Ni, H., Lin, X. and Zhang, J.: Edge Detection and Feature Line Tracing in 3D-Point Clouds by Analyzing Geometric Properties of Neighborhoods, *Remote Sens*, ISPRS, Vol.8, No.9, p.710 (2016).

[9] 金野哲士，今野晃市：点群の平面性に基づく領域分割による稜線抽出法，情報処理学会研究報告グラフィクスとCAD，情報処理学会，Vol.1, No.13, pp.13-18 (2007).

[10] 川野浩平，田中成典，今井龍一，中村健二：レーザプロファイラデータを用いた河川空間の3次元モデル構築手法に関する研究，情報処理学会論文誌データベース，Vol.8, No.1, pp.55-72, 情報処理学会 (2015).

[11] 田中成典，今井龍一，中村健二，川野浩平：LP データを用いた震災前後の被害箇所の自動検出結果の可視化に関する研究，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.68, No.2, pp.I.197-I.205, 土木学会 (2013).

[12] 田中成典，中村健二，今井龍一，窪田 論，梅原喜政：LP データと河川定期中横断測量成果を用いた任意地点の横断図生成手法に関する研究，知能と情報，Vol.28, No.5, pp.810-825, 日本知能情報ファジィ学会 (2016).

[13] 田中成典，中村健二，山本雄平，今井龍一，窪田 論：MMS 点群データを用いた高架道路橋の線形の自動生成に関する研究，知能と情報，Vol.28, No.5, pp.826-845, 日本知能情報ファジィ学会 (2016).

[14] 田中成典，今井龍一，中村健二，窪田 論，梅原喜政：LP データと過年度の河川定期横断測量成果を用いた横断図生成手法に関する研究，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.70, No.2, pp.I.283-I.292, 土木学会 (2015).

[15] Aldoma, A., Vincze, M., Blodow, N., Gossow, D., Gedikli, S., Rusu, R. and Bradski, G.: CAD-model recognition and 6DOF pose estimation using 3D cues, *ICCV Workshops*, pp.585-592, IEEE (2012).

[16] Changmin, K., Joohyuk, L., Minwoo, C. and Changwan, K.: Fully Automated Registration of 3D CAD Model with Point Cloud from Construction Site, *28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, IAARC*, pp.918-922 (2011).

[17] Frome, A., Daniel, H., Ravi, K., Thomas, B. and Jitendra, M.: Recognizing Objects in Range Data Using Regional Point Descriptors, *Lecture Notes in Computer Science, ECCV*, Vol.3023, pp.224-237 (2004).

[18] Frank, M., Oliver, P. and Christoph, S.: Segmentation of 3D lidar data in non-flat urban environments using a local convexity criterion, *2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.215-220, IEEE (2009).

[19] Petzold, B., Reiss, P. and Stossel, W.: Laser Scanning-

Surveying and Mapping Agencies are Using a New Technique for the Derivation of Digital Terrain Models, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.54, No.1, pp.95-104, ISPRS (1999).

[20] 窪田 論，田中成典，中村健二，山本雄平，中原匡哉，多田野有司，世俣秀樹，野口信児，小坂孝幸，石川 巖，西本昌司：クレーン操縦者のための吊荷領域可視化システムの開発，電子情報通信学会誌 D，Vol.101, No.2, pp.154-171, 電子情報通信学会 (2018).

[21] 櫻井 淳，田中成典，中村健二，窪田 論，中原匡哉，平謙二：レーザスキャナを用いた施工現場の常時観測における地表面生成技術の開発，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.72, No.2, pp.I.219-I.230, 土木学会 (2017).

[22] 櫻井 淳，田中成典，中村健二，今井龍一，窪田 論，重孝浩一：レーザスキャナを用いた多地点計測における高精度な点群データの選択技術の開発，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.72, No.2, pp.I.209-I.218, 土木学会 (2016).

[23] 国土交通省：CAD 製図基準（案）平成 20 年 5 月，入手先 (<http://www.banno.co.jp/cals-guide/standard/sc03.pdf>)（参照 2018-11）.



中原 匡哉（正会員）

1992 年生。2016 年関西大学総合情報学部総合情報学科卒業。2018 年同大学大学院総合情報学研究科前期課程修了。現在，関西大学大学院総合情報学研究科知識情報学専攻博士課程後期課程在学中。システム設計等の研究開発に従事。2014 年から（株）関西総合情報研究所で活動。



中村 健二（正会員）

1981 年生。2009 年関西大学大学院総合情報学研究科総合情報学専攻博士課程後期課程修了。博士（情報学）。現在，大阪経済大学情報社会学部教授。博士（情報学）。2016 年度文部科学大臣表彰科学技術賞「科学技術振興部門」受賞。



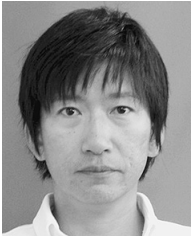
田中 成典（正会員）

1963 年生。1988 年関西大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了。博士（工学）。現在，関西大学総合情報学部教授及び社会空間情報科学研究センター長。2016 年度文部科学大臣表彰科学技術賞「科学技術振興部門」受賞。



寺口 敏生 (正会員)

1984年生。2003年関西大学総合情報学部総合情報学科卒業。2007年同大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。2009年同大学大学院総合情報学研究科博士課程前期課程修了。2012年同大学大学院総合情報学研究科博士課程後期課程修了。博士(情報学)。現在、国土交通省国土技術政策総合研究所社会資本マネジメント研究センター社会資本情報基盤研究室研究官。



関谷 浩孝

1971年生。1994年立命館大学工学部土木工学科卒業。1997年同大学大学院理工学研究科社会環境工学専攻博士前期課程修了。同年国土交通省(旧建設省)入省。技官として国土交通行政に従事。現在に至る。2004年南カリフォルニア大学公共政策学専攻博士前期課程修了。2016年筑波大学システム情報工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。