



岩盤における不連続面の自動推定に向けた 3次元点群データの可変格子分割法*

松川 瞬¹ 板倉 賢一²
早野 明³ 鈴木 幸司⁴

Variable-Box Segmentation of a Three-Dimensional Point Cloud for Automatic Estimation of Discontinuities in Rock Mass

by Shun MATSUKAWA^a, Ken-ichi ITAKURA^a, Akira HAYANO^b and Yukinori SUZUKI^{a*}

- a. Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto, Muroran, 050-8585, Japan (*Corresponding author, E-mail: yuki@epsilon2.csse.muroran-it.ac.jp)
b. Japan Atomic Energy Agency, Hokushin432-2, Horonobe-cho, Hokkaido, 098-3224, Japan

LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) detects a rock mass surface as a point cloud, and three-dimensional configurations of the rock mass can be obtained from the point cloud. In previous studies, algorithms to estimate discontinuities from a point cloud have been developed. In those algorithms, it is necessary to determine geological parameters in advance. DiAna(Discontinuity Analysis) is a Matlab tool which was developed for geo-structural analysis of rock mass discontinuities. It is a semi-automatic tool. DiAna segments a point cloud into bounding boxes to estimate the surface of a rock mass. However, an expert's skills necessary to determine the appropriate size of the bounding boxes for DiAna. We developed the VBS (Variable-Box Segmentation) algorithm to determine the appropriate box size depending on the location of the point cloud and to estimate the surface of a rock mass. The VBS algorithm consists principally of three processes: large box segmentation, small box segmentation, and merging. The small boxes are merged to obtain an appropriate box size. The surface of the rock mass is estimated using the point cloud in the box. The performance of the VBS algorithms was evaluated using point clouds obtained by a geological survey. For evaluation, we estimated reference rock mass surfaces manually using the point cloud and geological sketches by geologists. Similarities among the respective reference surfaces and the surfaces estimated using the VBS algorithm were measured. Similarities among the respective reference surfaces and the surfaces estimated using the DiAna algorithm were also measured. The similarities among them were compared using standard competition ranking. The results of comparison showed that the VBS algorithm estimated planes more accurately for the reference planes than the DiAna algorithm. Therefore, the VBS algorithm determines appropriate box sizes automatically depending on the location of the point cloud and estimates the surface appropriately.

KEY WORDS: Geological Mapping, Discontinuity, LIDAR, Point Cloud, DiAna, Variable-Box Segmentation

1. はじめに

土トンネルや高レベル放射性廃棄物の地層処分などの様に地下岩盤内に空洞を建設する場合、坑道周辺岩盤の力学的安定性や水理特性などを評価する¹⁾。一般的には、対象とする岩盤の不連続面分布モデル等を構築してシミュレーションに供するが、そのためには不連続面の空間分布特性や形状、透水性などの物理的特性を事前に把握しなければならない²⁾。ここで言う不連続面とは、断層・節理・層理面と言った岩盤の連続性を分割する面³⁻⁴⁾のことである。地下施設建設時においては、坑道壁面に分布する不連続面を坑道壁面の地質観察(以下「壁面観察」)により取得し、モデル化に利用する。

坑道掘削時における壁面観察は、掘削直後の露出した岩盤を対

象として、地質専門家の目視観察により行われる。その際、落石による労働災害の危険性があるため、露出した岩盤の直下への立ち入りが禁止されることがある⁵⁾。この場合、地質専門家が岩盤に接近できないため、クリノメーターを用いた簡易計測により行われる地層の層理面や亀裂の方位計測結果は、地質専門家の計測技量に依存する。また、地層処分事業の処分場建設において想定されている坑道掘削の総延長は200km以上である⁶⁾。すべての坑道に対して壁面観察を実施する場合、多くの地質専門家が投入されるが、壁面観察の結果は地質専門家に依存するため、観察区間毎の観察結果の品質や取得できるデータ量に差が生じることが懸念される。この問題を解決するためには、作業の省力化と観察結果の品質の平準化が必要である。

そのために昨今注目を集めているのが、3Dレーザースキャナである⁷⁻¹⁰⁾。3Dレーザースキャナは、Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR) と呼ばれるリモートセンシングを行う観測装置の一種である。スキャン対象にレーザーパルスを放射し、反射したパルスを収集することで、対象の3D形状を「点群」として取得する。点群は、対象の1点を表す座標とその反射強度を持つ点の集合である⁸⁾。

*2017年3月14日受付 2017年9月27日受理

1. 室蘭工業大学大学院 工学専攻 博士後期課程

2. 正会員 室蘭工業大学大学院 工学研究科 教授

3. 正会員 JAEA 幌延深地層研究センター 研究員

4. 室蘭工業大学大学院 工学研究科 教授

【著者連絡先】TEL: 0143-46-5435 (室蘭工業大学・鈴木)

E-mail: yuki@epsilon2.csse.muroran-it.ac.jp

キーワード: 地質観察, 不連続面, LIDAR, 点群, DiAna, 可変格子分割

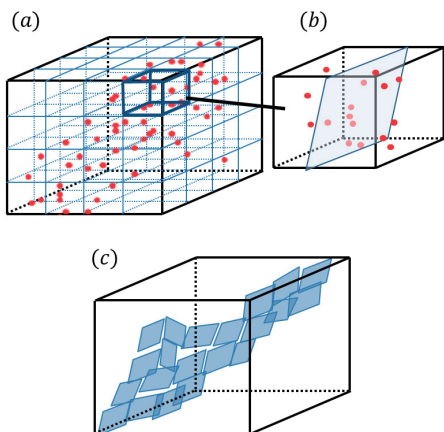


Fig.1 Algorithm of DiAna. (a) The point cloud is segmented into cubic bounding boxes. When the point cloud in the box is considered to be noise, the point cloud in the box is removed. (b) A plane is estimated so as to fit the point cloud in the box. (c) The estimated planes are merged when they have similar normal vectors.

3D レーザースキャナは、対象の3D形状を素早く一定の精度で取得する事を可能にする。そのため、従来の地質観察・壁面観察手法に比べ平準的なデータを少ない労力で点群から取得する事が期待され、2000年前半以降、様々な研究が行われてきた。Slobらは2002年に点群データから不連続面を取得できることを明らかにし⁸⁾、2007年に同一平面上に存在する点群を領域成長法でグループ化して不連続面を取得した⁹⁾。また、Feketeらは坑道の点群データから詳細な3次元の特徴を取得できる事を明らかにし、不安定な場所の特定や分離した不連続面の結合、表面の粗さの解析に応用した¹⁰⁾。Sturzeneggerらは鉱山で計測した壁面観察結果・LIDARデータ・写真測量データからそれぞれ手動で不連続面を取得し、不連続面の位置や向き、長さ、粗さ、曲率の違いを調査した¹¹⁾。日本でも、石濱らが坑道切羽面の点群からメッシュを作成して不連続面を取得する方法を開発し、3Dレーザースキャナによる計測を地質観察作業へ適用した際のメリットについて考察している¹²⁾。

しかし、上記の研究における観察結果は、専用のソフトウェアを用い手動で試行錯誤的に不連続面を決定する場面が多く、未だ作業労力を要す上に処理結果が個人の技量に依存する。そこで、手動の操作を減らし、点群から半自動的に面を推定して表面形状を近似し不連続面を取得する研究もある。Vögeらは点群からメッシュを作成し、5つの処理(平滑化、エッジ検出・マスクング、破砕部検出・マスクング、不連続面識別、不連続面セットのクラスタリング)を通して面を推定し不連続面を取得するPlaneDetect¹⁵⁾と呼ばれるアルゴリズムを開発した。またGigliらは、メッシュを作らずに点群を立方格子で分割し、各格子内で面を推定し不連続面を取得するDiscontinuity Analysis (DiAna)¹⁶⁾と呼ばれるアルゴリズムを開発した(Fig. 1)。DiAnaでは、まず点群を一定の大きさを持つ格子で分割する(Fig. 1a)。その際、点の分散が閾値以上となる格子をノイズ(計測誤差)と考え除去する。次に、各格子内の点に対し、最小二乗法で面をフィッティングする(Fig. 1b)。最後に、ある格子内の面の法線に対して、周辺の格子内の面の法線が類似している場合、それらは同一の面を成していると思われ格子を併合する。併合後の格子から1枚の面を推定するために、併合後の格子内の点群を用いて再度面をフィッティングする。以上の操作で面を推定し、表面形状を近似した後、不連続面を取得する。

PlaneDetectとDiAnaを比較すると、手動で設定するパラメー

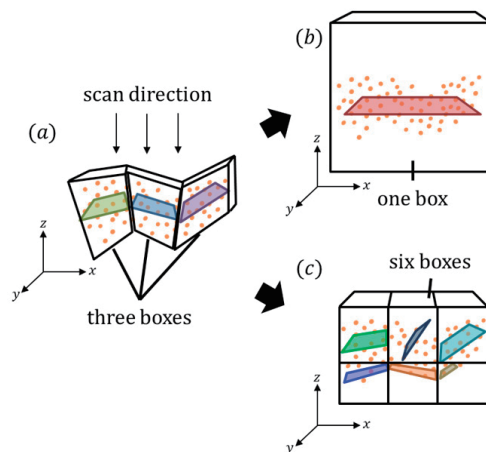


Fig.2 (a) The case in which the point cloud is segmented into three bounding boxes with appropriate sizes. (b) The case in which the point cloud is segmented into one bounding box with a larger size. (c) The case in which the point cloud is segmented into six bounding boxes with smaller sizes. The three planes in the lower boxes and a plane in the center box of the upper boxes are estimated inappropriately. Colors are assigned to the planes to improve visibility.

タの数に違いがみられる。PlaneDetectでは1)平滑化の重み, 2)平滑化の反復回数, 3)マスクの領域, 4)マスクの閾値, 5)法線ベクトルの分散の閾値, 6)隣接判定の半径, 7)クラスタ数, の7つのパラメータを手動で設定する。DiAnaはPlaneDetectに比べて手動で設定する必要のあるパラメータの数が少なく, 1)立方格子のサイズ, 2)ノイズ除去に用いる分散の閾値, の2つである。パラメータ空間は複雑であり, 多くのパラメータを人間の手で同時に最適化するの是非常に困難である。すなわち, 膨大な点群データの処理においては, 必要なパラメータの少ないアルゴリズムほど有利である。よってDiAnaはPlaneDetectに比べてパラメータチューニングが容易である利点がある。また面の推定方法についても, 手動で設定したパラメータに基づき隣接点同士を結んでメッシュを作成する手法に比べ, 最小二乗法は面と点群との誤差の尤度を最大にする²⁰⁾ため, 人間の技量に依存する処理がなく自動的な処理を行っていると言える。

しかし, DiAnaでは不連続面を取得する前処理として点群から面を推定するが, 面の推定処理を実行する前に手動で適切な格子サイズとノイズ除去の分散の閾値を設定する必要がある。Fig. 2は, 本来3つの面で構成される点群を, 適切な格子サイズ(Fig. 2a), 大きい格子サイズ(Fig. 2b), 小さい格子サイズ(Fig. 2c)で分割し面を推定した際の問題の一例である。適切な格子サイズで分割した場合, 不連続面の段差を正確に表現できる(Fig. 2a)。しかし, この点群に対し大きい格子を設定して1つの面をフィッティングした場合, 格子のサイズが大きくなり本来3つの格子が必要な点群が1つの格子に収まり, 3つの面を1枚の面で近似することになる(Fig. 2b)。ここでは, Fig. 2aの様な面が確認できない。またFig. 2cは小さい格子サイズで分割した図で, Z軸方向に格子が2段作られている。坑道壁面の表面がこの様に複数段存在することは考えにくく, Fig. 2cでは面の適切な近似が行われていないと考えられる。以上の様に, DiAnaでは格子サイズが適切でないと表面形状を正確に近似する事ができない。また, ノイズ除去の閾値によっては, 正確に近似できていた面を構成する点群も除去されるため, 適切な閾値を設定する必要がある。

しかし, 坑道壁面の点群データは, 表面形状が複雑な上に埃や塵・湧水による反射などの影響を受けやすい。実際に手動で適切なパラメータを設定するには数ミリメートル単位での格子サイズ

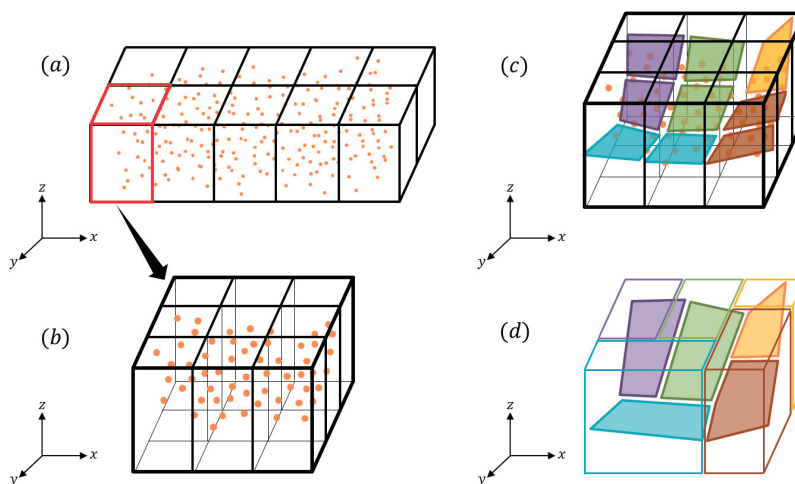


Fig.3 Flow diagram of the VBS. (a) In the first process, point cloud is segmented into large bounding boxes. (b) As the second process, each large bounding box is also segmented into nine bounding sub-boxes. (c) shows estimated planes from points in the bounding sub-boxes. The same color is applied to the planes whose normal vectors are similar each other. The bounding boxes are merged when their normal vectors are similar. The plane is estimated from the point cloud merged bounding sub-boxes as shown in (d).

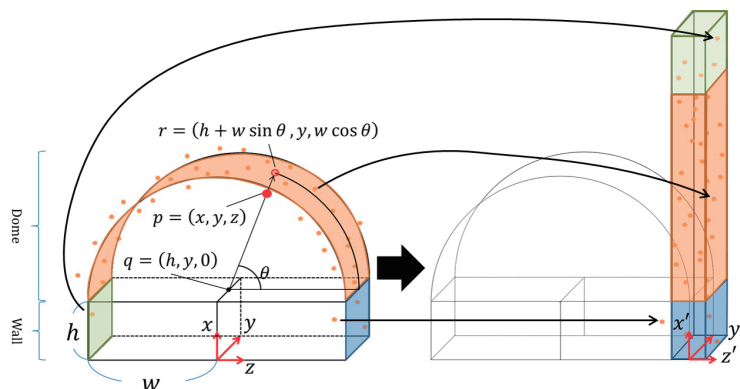


Fig.4 Coordinate transform of point the cloud obtained from a gallery wall into the coordinates of a rectangular parallelepiped.

の調節, また数平方ミリメートル単位での閾値の調節が必要で利用者の熟練を要し, 長距離の坑道では多くの時間を要する。よって, 地質観察の課題である作業の省力化と準標準化の観点からは不十分である。

我々はこれまで, 坑道壁面から取得された点群の分割手法に関して検討してきた²¹⁻²²⁾。本研究ではこれまでの方法を発展させ, 不連続面を取得する前処理として, 点群を分割する格子のサイズを場所によって自動的に変更して点群から面を推定し坑道壁面の表面形状を近似する可変格子分割アルゴリズム (Variable-Box Segmentation Algorithm:VBS) を開発し, 実験においてその有効性を確認した。本論文では, 2章にてVBSについて説明, 3章でVBSの性能を評価するために行った実験について, 4章で結果について論じ, 5章で本研究のまとめと課題を示す。

2. VBS

VBSは, 「大格子分割」「小格子分割」「結合」の3つのプロセスから成る。Fig. 3はVBSの処理の流れ図である。大格子分割プロセスでは点群を大きいサイズの立方格子で分割し (Fig. 3a), 小格子分割プロセスでは大格子をさらに小さいサイズの小格子で分割した後 (Fig. 3b), 各小格子の中で面をフィッティングする (Fig. 3c)。結合プロセスでは各小格子間で類似した面を領域成長法で結合して, 結合した格子内に含まれる点群から面を推定し,

坑道壁面の表面形状を近似する (Fig. 3d)。VBSは, 大格子分割に用いる格子サイズのみをパラメータとして必要とする。

2・1 前処理

本研究の対象とする坑道壁面は馬蹄形であるが, 点群が曲面状に配置されている箇所では格子サイズを扇状に変える必要があり, 大格子分割プロセスが複雑になる。また曲面上に存在する不連続面においては, 法線が曲面に沿って変化するので, 結合プロセスが複雑になる。以上の処理を簡便化するため, 設計上の掘削断面を基準にして, z軸方向に凹凸情報を持つ様に引き延ばす形で点群データを座標変換し, 直方体に展開する (Fig. 4)。この変換による取得データへの影響であるが, 本研究では全て変換後の点群データを処理し, 変換後の点群データ同士で形状の比較を行っているため, 考慮していない。

変換前の点の座標を $p = (x, y, z)$, トンネル1区間における設計上の掘削断面の横幅を $2w$, 天蓋部と側壁部の境界線であるスキャンラインまでの高さを h , 奥行 y における天蓋部の中心を $q = (h, y, 0)$, 線分 pq と z 軸とのなす角度 θ (rad) を, 直線 pq と天蓋部との交点を $r = (h + w \sin \theta, y, w \cos \theta)$ とする。投影後の座標 (x', y', z') は, スキャンライン下右側壁部 (Fig. 4 青) では

$$(x', y', z') = (x, y, z - w) \dots \dots \dots (1)$$

スキャンライン上天蓋部 (Fig. 4 橙) では

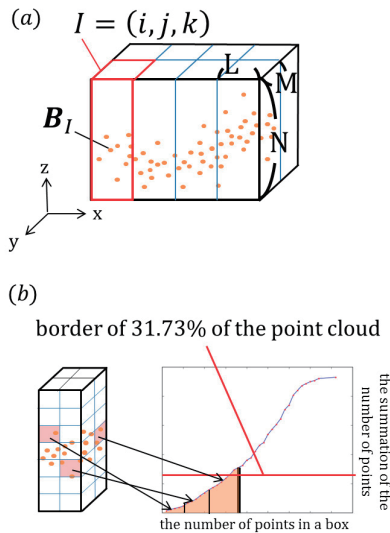


Fig.5 (a) The point cloud is segmented into bounding boxes with sizes of (L, M, N) for the x, y, z coordinates, respectively. They are large boxes and one of them is shown by red frames. (b) The large bounding box is divided into tiny boxes to remove noise.

$$(x', y', z') = (h + w\theta, y, |r| - |p|) \dots \dots \dots (2)$$

スキャンライン下左側壁部 (Fig. 4 緑) では

$$(x', y', z') = (-x + h + w\pi, y, -z - w) \dots \dots \dots (3)$$

となる。VBSを用いて処理を行う点群データは、全て以上の様に xy 平面上の座標と z 方向の凹凸情報を持つものとする。以下、全ての点の座標は変換後の座標とする。

2・2 VBSの詳細

2・2・1 大格子分割

ここでは、VBSの詳細について述べる。まず、大格子分割プロセスにて、点群を大格子で分割する (Fig. 5a)。分割された格子には、 x, y, z 軸にそって格子番号 $I = (i, j, k)$ を割り当てる。また、格子番号を正の整数にするため、 $p_{min} = (\min(x), \min(y), \min(z))$ を原点とする。よって、格子サイズを $s = (L, M, N)$ 、点群 P をとすると、 I 番目の格子に含まれる点群 B_I は

$$B_I = \{p \in P | (iL, jM, kN) \leq p - p_{min} < ((i+1)L, (j+1)M, (k+1)N)\} \dots \dots \dots (4)$$

と表される。

次に、以降のプロセスでのノイズの影響を低減するため、各大格子内で計測誤差が大きい点群を取り除く (Fig. 5b)。取り除く点群は、計測誤差の分布を正規分布と仮定し、分布の平均から標準偏差の範囲外の誤差を持つ点群とする。ここで、大きい誤差は生起確率が低い。よってそのような誤差を含む点は少なく、その点周辺の点数も少ない。そこで、大格子を Fig. 5b 左の様に極小格子で分割し、各極小格子内に含まれる点数の少ない (点密度の低い) 格子から順に点数を累積する。正規分布において平均値から標準偏差以内にある確率が 68.27% である事から、累積した点数の総点数に対する割合が 31.73% を超えた際に、それまで累積した極小格子に含まれる点群を計測誤差が大きい点としてすべて取り除く。Fig. 5b 右は横軸に格子内の点数、縦軸に累積点数を表した概念図で、赤い線が、累積点数の総点数における割合が 31.73% となるラインを表している。この概念図では、極小格子に含まれる点数を昇順に累積していった際、3つ目の極小格子で 31.73% を超える。Fig. 5b 左にある赤い極小格子が点数を累積した格子である。これらの格子に含まれる点を計測誤差が大きい点

と見做し、除去する。

2・2・2 小格子分割

小格子分割プロセスでは、ノイズ除去された大格子を 3×3 個の小格子に分割し、各小格子内にて線形最小二乗法で面をフィッティングする。点群を分割した小格子内の、小格子番号 J の点群 B_J^I は $B_J^I \subseteq B_I$ かつ $B_J^I \cap B_K^I = \phi$ ($B_K^I \subseteq B_I, K \neq J$) である。また、 x, y, z の3次元空間上での面の方程式 $F = ax + by + cz + d = 0$ において、フィッティングする面の高さ成分 z は

$$z = -\frac{a}{c}x - \frac{b}{c}y - \frac{d}{c} \dots \dots \dots (5)$$

と表せる。最小二乗条件は、ある小格子内の i 番目の点の座標を (x_i, y_i, z_i) 、 B_J^I の要素数を n として

$$f(B_J^I) = \sum_{i=0}^n (z_i - z)^2 = \sum_{i=0}^n (z_i - \frac{a}{c}x_i - \frac{b}{c}y_i - \frac{d}{c})^2 \rightarrow \min \dots \dots \dots (6)$$

と表すことができ、 $\alpha = -\frac{a}{c}, \beta = -\frac{b}{c}, \gamma = -\frac{d}{c}$ とすると

$$f(B_J^I) = \sum_{i=0}^n (\alpha x_i + \beta y_i + z_i + \gamma)^2 \rightarrow \min \dots \dots \dots (7)$$

となる。(7) 式を満たす α, β, γ を求め、 $c = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}}, a = -c\alpha,$

$b = -c\beta, d = -c\gamma$ を得る。この時、 $\vec{v} = (a, b, c)$ がフィッティングされた面の法線ベクトルである。

ここで、最小二乗法はいくつかの前提条件の下で行われる最尤推定法の一つであり²¹⁾、その前提の1つに「推定される面と点との誤差の分布形が正規分布である」事がある。しかし、小格子分割にて大格子を分割した際に格子サイズが小さ過ぎる場合、点群の水平方向における分散に対し垂直方向における分散が大きくなる箇所がある。つまり、分布系が一様分布に近づき最小二乗法の前提条件を満たさない点群を持つ格子となり、不適切な面が推定される。その様な小格子に対しては、2・2・3に記す結合プロセスにて、隣接する小格子と領域成長法で結合させ、格子のサイズを大きくすることで適切な面の推定を図る。

しかし、適切な面と不適切な面との法線の類似度は大幅に異なる。不適切な面を持つ小格子が適切な面を持つ小格子に囲まれていた場合、不適切な面を持つ小格子の領域が成長しない。よって、適切な面・不適切な面を判別し、領域成長の処理を分岐させて格子を結合する必要がある。

面の適否は、誤差分布の尖度を算出して分布形状の正規分布からの乖離度を計り²³⁾判別する。尖度 k は、面と点 p_i の誤差 ϵ_i を、小格子内の点群の数を n 、標本平均 μ ・標本分散 σ^2 を

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i \dots \dots \dots (8)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\epsilon_i - \mu)^2 \dots \dots \dots (9)$$

とした時、

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n (\epsilon_i - \mu)^4}{\sigma^4} - 3 \dots \dots \dots (10)$$

で求まる。

ノイズの分布を正規分布と仮定した場合、誤差分布はベルカーブ状となる。また、ノイズが少ない点群の場合、フィッティングされた面の精度が良く、分布の分散が低く平均値付近での度数が高い。よって、適切な面をもつ小格子の誤差分布の尖度は、正規

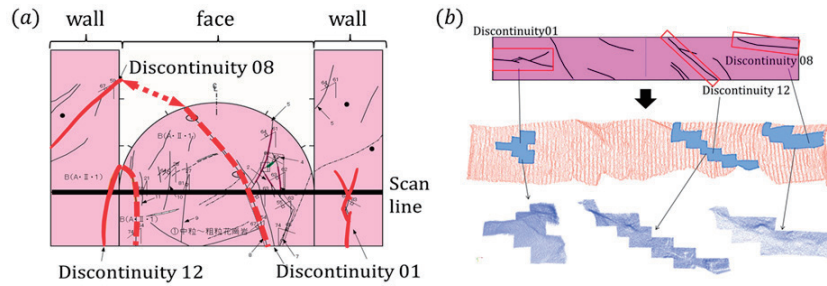


Fig.6 (a) Discontinuity sketches by geologists for No. 54 gallery. The sketch consists of three parts: left wall, face, and right wall. Red lines describe discontinuities. Red broken lines in the face describe discontinuities which cross scanline and get up to the wall. (b) The sketches of the left and right walls are described in the upper panel. Red rectangles indicate discontinuities. The middle panel shows the parts of the extracted point cloud. The lower panel shows the sets of extracted point clouds. The figures are the sketches collections provided from Mizunami Underground Research Laboratory and these were partially revised by authors²⁵⁾.

分布の尖度よりも大きい事が期待される。そこで、 $k \geq 0$ であればその面は適切であると判断し、そうでなければ不適切と判断する。
2・2・3 結合 結合プロセスでは、面の法線ベクトルの類似度を用い、各大格子内にある小格子同士を領域成長法で結合し、格子サイズを大きくしながらクラスタを形成していく。形成された各クラスタをそれぞれ1つの格子として扱うことで、大格子が異なる大きさを持つ複数の格子で分割される。

小格子分割プロセスにおいて適切とされた面を持つ小格子は、隣接した小格子のうち、どこかのクラスタにも所属せず、法線の類似度が閾値以上あるものと結合して、クラスタを形成する。不適切とされた面を持つ小格子は、隣接した面の中で最も類似度の高い法線を持つ格子と結合し、クラスタを形成する。このとき、結合する格子が既にいずれかのクラスタに含まれていた場合、不適切な面を持つ格子もそのクラスタに含まれる。

法線ベクトルの類似度は、 \vec{v} と \vec{u} を法線ベクトルとして、コサイン距離

$$d_{cos} = \frac{\vec{v} \cdot \vec{u}}{|\vec{v}| |\vec{u}|} \dots\dots\dots (11)$$

で求める。コサイン距離の閾値は試行錯誤的に決定し、おおよそ15°のずれを許容する0.93を用いた。このプロセスにより、最小二乗法で各クラスタ内に求まった面を、VBSにより推定された面とする。

3. 実験

VBSの性能を評価するために、岐阜県瑞浪市にある瑞浪超深地層研究所の深度300m研究アクセス坑道にて、RIEGL社のLMS-Z360iにより取得されたLIDARデータに対してVBSを適用し、同じデータに対しDiAnaに基づいた処理を行った結果とVBSでの結果を比較する実験を行った。深度300m研究アクセス坑道は71回の掘削サイクルによって掘削され、1回の掘削サイクル毎の掘削長は1.0~1.7mである。壁面観察も掘削サイクル毎に行われ、それぞれの観察区間には主立坑側から順に管理番号が振られている²⁴⁾。3Dレーザースキャナによる壁面のスキャンも、同様に区間毎に行われている。本実験では、地盤工学会の岩盤分類に基づき、断層の影響が少なくB級岩盤と評価される区間(観察区間No.31~No.71)を対象にVBSを適用した。中でも、掘削前から天然の不連続面が明らかに存在するであろう8区間分(No.54~No.61)のLIDARデータを用いて、実験を行った。

対象とする不連続面は、地質専門家により観察された不連続面のうち、スキャンラインと交差しており1m以上の長さを持つ主要な不連続面に限定した。この条件は、スキャンライン法^{5, 25-26)}

で不連続面の大きさと方向および密度の分布を評価するために、必要な不連続面を効率良く標準的に取得する観点から設定された⁵⁾。Fig. 6は壁面観察により得られた切羽面・壁面のスケッチ²⁷⁾に、見やすさのため一部変更を加えたものである。Fig. 6aは区間No.54のスケッチで、黒色の直線がスキャンライン、赤色の実線が対象とする不連続面を表している。赤色の破線は切羽に存在する不連続面で、それぞれ壁面にある不連続面08と12に繋がっている。不連続面08は壁面上ではスキャンラインと交差していないが、切羽上で交差しているため、本実験の対象とする。スキャンラインは、全区間共通して底面から1.2mの高さに設定してある。Fig. 6bは区間No.54において実験に用いる不連続面部分の点群を選び出す手順を示している。まず、区間No.54の壁面部分のスケッチ(上)とNo.54の点群データ(中)を見比べ、不連続面部分を確認する。スケッチ上の赤い囲いが実験に用いる不連続面を示している。次に、スケッチに沿い不連続面部分の点群を含む大格子を選び出す(中・青い箇所)。実際に選ばれた点群が図下の青い点群である。以上の手順にて、全ての区間において実験に用いる不連続面部分を確認し、それらの点群を含む大格子を選び出した。

実験と評価は以下の手順で行った。まず、推定された面の精度を評価する際に用いる参照面を、手動で作成した。参照面は、各区間の点群を大格子で分割し、点群を点群処理ソフトウェアParaView²⁸⁾で表示させて専門家のスケッチや壁面の写真と比較しながら不連続面を表す点群を含む格子を抽出した後、各格子に対して

- (1) 区間内の主要な不連続面を含む格子からの目視による面の推定 (Fig. 7a, b)
- (2) 各格子内の点群を目視で複数のクラスタに分割し、手動でノイズ除去 (Fig. 7c)
- (3) 各クラスタに対して最小二乗法で面をフィッティング (Fig. 7d) の3つの処理を施して作成した面である。

次に、VBSアルゴリズムによって点群から面を推定し、推定した面と参照面との類似度を求めた。ここで、VBSと参照面とはノイズ除去手法やクラスタの構成が異なるため、格子内の点群の要素数や面フィッティングに用いられた点も異なると考えられる。すなわち、ほぼ全てのVBSのある小格子内の点群の集合 B_{Vbs}^J と参照面のある小格子内の点群の集合 B_{ref}^K について、 $|B_{Vbs}^J - B_{ref}^K| > 0$ または $|B_{ref}^K - B_{Vbs}^J| > 0$ である。このことから、ある不連続面全体において $B_{share} = B_{Vbs}^J \cap B_{ref}^K$ となる共通要素の集合 B_{share} について、 $p_i \in B_{share}$ となる共通点 p_i ごとに B_{Vbs}^J による面と B_{ref}^K による面との類似度を算出し、全ての点の類似度の平均値から不連続面単位での類似度SIMを求めた。

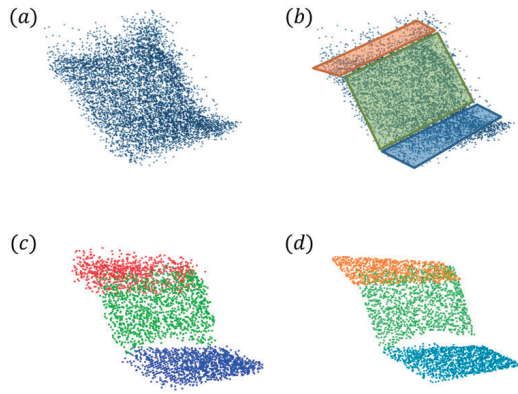


Fig.7 Estimation of reference planes based on the point cloud and geological sketches manually. (a) shows the original point cloud. (b), (c), and (d) show the processes to estimate a reference plane.

ここで、ある小格子 B_{vbs}^j が成す面と B_{ref}^k が成す面とが類似している時、面の法線のコサイン距離が1に近づくほか、各小格子の共通要素以外の要素の数 $|B_{vbs}^j \cup B_{ref}^k - B_{share}|$ も0に近づく。すなわち小格子に含まれる点が類似しているため、参照面のクラスと類似したクラスがVBSにより推定されたと考えられる。従って、線形最小二乗法がただ1つの解を持つことから面の誤差分布も類似しており、その分布上の点の位置も類似している必要がある。よって、分布上の点の位置に近いほど面の類似性が高く、遠いほど類似性が低いと考えられる。そこで、面と点の誤差を考慮した係数 η_i を求め、 η_i を用いて (11) 式による法線のコサイン距離 d_{cos}^i を補正した。この補正後のコサイン距離を、ある共通点における面の類似度とした。係数 η_i は、点 p_i における誤差 ϵ_e と ϵ_r を各誤差分布の平均と標準偏差で正規化した z_e^i と z_r^i を用いて導出した。この時、を平均値とした正規分布を考えると、 z_e^i と z_r^i の差 $|z_e^i - z_r^i|$ の99.73%は分散3以内にあることから、

$$\eta_i = \begin{cases} 1 - \frac{|z_e^i - z_r^i|}{3} & \text{if } |z_e^i - z_r^i| \leq 3 \dots\dots\dots (12) \\ 0 & \text{others} \end{cases}$$

で係数 η_i を求めた。

以上より、ある不連続面に対する類似度 SIM を、共通点の数

を n として、各共通点における面の類似度の平均値

$$SIM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i \cdot d_{cos}^i \dots\dots\dots (13)$$

で求めた。

次に、DiAnaに基づいた3つの処理（点群の立方格子分割・ノイズ除去・最小二乗法による面推定）を行うプログラムを作成し、このプログラムで推定した面と参照面との間での類似度を(13)式にて算出した。最後に、VBSでの類似度とDiAnaでの類似度を比較した。また、それぞれの不連続面を表す点群をParaView上に表示し、目視で不連続面を判別してその形状を比較した。

なお今後、分かりやすさのため、不連続面は「区間番号 - アルファベット」の形で記述する。アルファベットは、壁面観察シートにて不連続面に割り当てられた番号に対して、昇順にA,B,C...と割り当てる。例えば Fig. 6にある区間 No.54の不連続面 01は54-A、不連続面 08は54-B、不連続面 12は54-Cとなる。実験で用いた格子の大きさは、大格子で $0.2 \times 0.2 \times 0.4$ (m)、極小格子で $0.02 \times 0.02 \times 0.02$ (m)、小格子で $0.067 \times 0.067 \times 0.4$ (m) を用いた。大格子の初期値は数回の試行により定めた。DiAnaでの格子サイズは、大格子と同等の大きさである $0.2 \times 0.2 \times 0.2$ (m)、中間程度のサイズ $0.1 \times 0.1 \times 0.1$ (m)、小格子と同等の大きさである $0.067 \times 0.067 \times 0.067$ (m) の3つのサイズを用いた。以下それぞれ DiAna_L, DiAna_M, DiAna_S とする。

4. 結 果

はじめに、VBSで推定した面と参照面との類似度と、DiAnaで推定した面と参照面との類似度のグラフを Fig. 8に示す。Fig. 8を見ると、多くの不連続面でVBS(青)が全体的に高く、次いでDiAna_M(緑)とDiAna_S(灰)、DiAna_L(黄)の順となっていた。

4・1 分散分析による類似度の平均値における有意差の確認

まず、Fig. 8に示した類似度の平均値に有意差が存在するか、分散分析²⁹⁾を使って確認した。本研究では、1つの不連続面において推定された面と参照面との共通点の類似度を、ある1つの母集団から得られた標本と見做した。よって、要因1つ、水準がVBSとDiAna_L, DiAna_M, DiAna_Sの4つ、共通点の類似度を要素とする一元配置分散分析(対応なし)を実行した。なお、要素数はそれぞれ異なる。帰無仮説と対立仮説は、

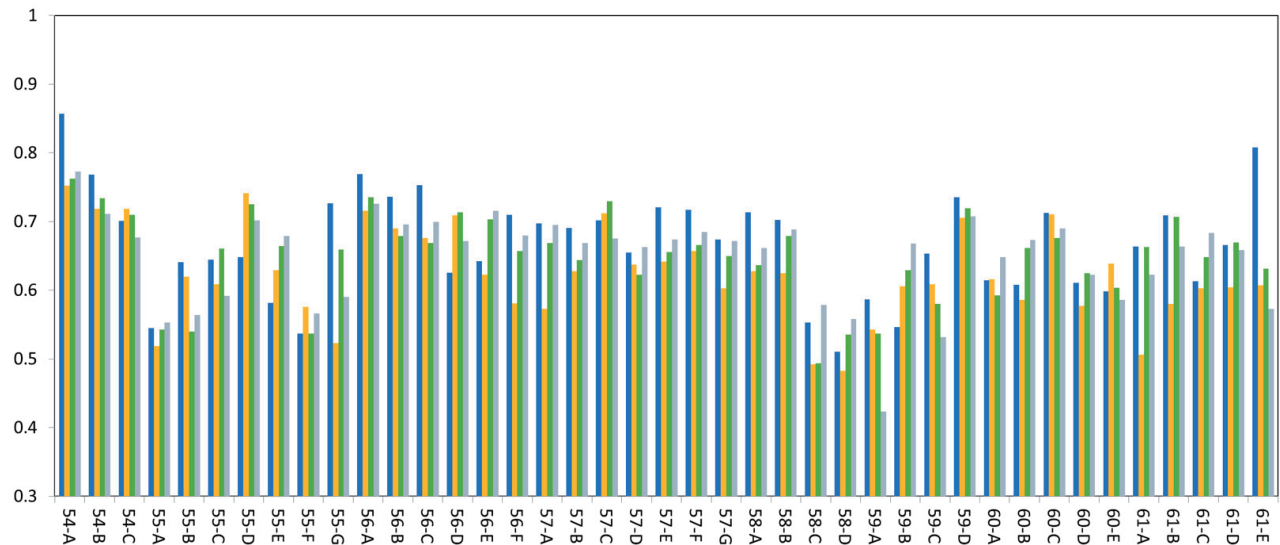


Fig.8 Bar chart of the SIMs. The horizontal indexes are discontinuities of the respective galleries and the vertical axis shows SIMs. The blue bar indicates the SIMs of the VBS algorithm. Yellow, green and gray bars indicate the SIMs of the DiAna_L, DiAna_M, and DiAna_S algorithms, respectively.

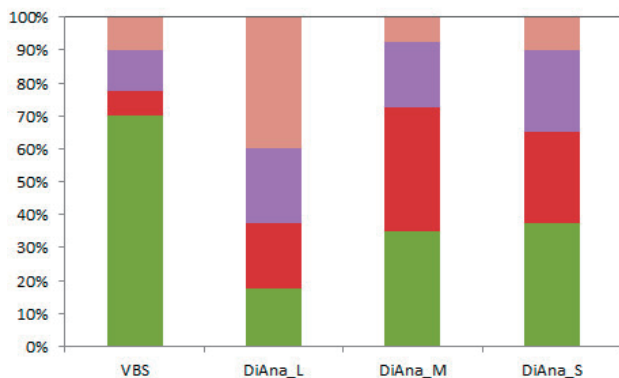


Fig.9 Stacked bar chart of the ranking of similarity among VBS and DiAna algorithms. The green bar indicates the rate of the 1st rank. Red, purple and brown bars indicate the rates of the 2nd, 3rd and 4th ranks, respectively. The horizontal indexes are algorithms.

帰無仮説：全ての水準において平均値が等しい

対立仮説：2つ以上の水準間において平均値が等しくないとした。また、計算には統計解析用のソフトウェアである R version 3.0.2³⁰⁾を用いた。

分散分析では、計41個の不連続面のうち55-Fを除く40個の不連続面において5%水準で有意となり、帰無仮説が棄却され平均値に有意差があることが確認された。また、5%水準を満たさなかった不連続面55-Fについては、10%水準で有意傾向があった。以下、不連続面55-Fを除き、有意差が確認できた40個の不連続面を比較に用いた。

また、各水準間での有意差を調べるため、TukeyのHSD検定²⁹⁾で多重比較を行った。こちらでは、不連続面40個において、VBSとDiAna_L, DiAna_M, DiAna_Sのうち2つを取る組み合わせ計240組について有意差を検定した。その結果、240組中約70%となる166組が5%水準で有意となった。しかし、約30%となる74組においては有意とならなかった。

4・2 類似度の平均値における順位比較

次に、40個の不連続面について、(13)式で求めた各アルゴリズム間での各不連続面におけるSIMに順位をつけ、順序尺度にて比較を行った。順位付けは、ある不連続面で求めた各アルゴリズムでのSIMについて、最も高い値を持つアルゴリズムを1位、次に高い値を2位、3位、最も低い値を4位とした。また、比較のために順位積み上げ棒グラフと平均値を求めた。

ここで、4・1の多重比較にて有意とならなかった組は、類似度の母平均がほぼ同じであり、すなわち2つの面がおおよそ同程度の精度で推定されていたと考えられる。よって本研究では、類似度の順位付けをする際、それらの組は同じ母集団から標本化された値を持つと見做し、同順位として扱った。その際、複数の組で有意とならない場合、例えばVBS - DiAna_M, DiAna_M - DiAna_S, DiAna_S - VBSの間で有意とならない場合は、VBS, DiAna_M, DiAna_Sは同順位とした。しかし、DiAna_S - VBSの間では有意となるような場合は、全てを同順位に扱うのは妥当でない。その様な場合、VBS - DiAna_M, DiAna_M - DiAna_Sの間でのp値を比べ、大きい数値を持つ組を同順位として扱った。また、例えばVBSが1位かつDiAna_LとDiAna_Mが2位となる場合、DiAna_Sは4位とした。

Fig.9は順位積み上げ棒グラフで、緑が1位の割合、赤が2位、紫が3位、茶が4位の割合を表す。また、横軸がアルゴリズムを、縦軸が順位積みの割合を表す。Fig.9を見ると、1位となる割合が最も大きいのがVBSで、次いでDiAna_S, DiAna_M, DiAna_Lと続いていた。VBSとその次に大きいDiAna_Sとを比べると、

Table 1 Summation, average and standard deviation of the number of ranks.

	VBS	DiAna L	DiAna M	DiAna S
Number of Rank 1	28	7	14	15
Number of Rank 2	3	8	15	11
Number of Rank 3	5	9	8	10
Number of Rank 4	4	16	3	4
Summation	65	114	80	83
Average	1.625	2.850	2.000	2.075
Standard deviation	1.055	1.145	0.934	1.023

約2倍の数の不連続面について、VBSの類似度の方が高い順位となった。また、4位となる割合はDiAna_Lが最も大きく、次いでDiAna_S, VBS, DiAna_Mとなっていた。また、Table 1はその順位となった回数と順位との総和、平均、標準偏差を示している。順位積みの総和は、順位とその順位となった回数の積から求めた。平均は総和を不連続面の数40で割った値であり、標準偏差はこれらの値を用いて求めた。VBSは1位の数が最も多く、順位積みの総和・平均が最も低くなっていた。

以上の結果から、VBSは平均類似度においてDiAnaと同等以上の性能であった。しかしDiAnaでは点群から面を推定する際、点群と推定面との分散の閾値が必要となる。分散の閾値は点群の分割サイズに依存し、手動で試行錯誤的に決める必要がある。本実験においても、値の設定とアルゴリズムの実行を繰り返し、適切であると目視にて判断した値を用いている。VBSでは格子サイズの決定のみを必要とし、またボトムアップ的に面を推定する。そのため、手動による試行錯誤的な作業の労力や、判断の依存性もない。すなわち、省力化と平準化を実現しつつ既存の面推定アルゴリズムと同等以上の性能を持つことから、VBSは点群からの面推定において有効なアルゴリズムであると考えられる。

また、統計解析用ソフトRのexactRankTestsパッケージver 0.8-28³¹⁾を用いてウィルコクソンの順位和検定を行い、VBS, DiAna_L, DiAna_M, DiAna_Sのうち2つを取る組み合わせそれぞれにおいて平均順位積みの有意差を検定した。帰無仮説・対立仮説は

帰無仮説：2群間において平均値が等しい

対立仮説：2群間において平均値が等しくない

とした。その結果、DiAna_M - DiAna_Sの間を除く全ての平均順位積みに有意差があることが確認できたことから、VBSの優位性が統計的に確認できた。

4・3 目視での比較

目視比較の一例として、不連続面54-Aを取り上げる。54-Aには、格子内の面がFig.7の様に単純な階段状となっている大格子が存在する他、斜めに走る面や分岐箇所のように複雑な形状の面を持つ大格子が存在しているため、VBSの近似例を効果的に記載できる。不連続面54-Aに対し、不連続面と判断される面の輪郭線を目視でなぞった図をFig.10に示す。図はそれぞれ参照面(Fig.10b), VBSで推定した面(Fig.10c), DiAna_L, DiAna_M, DiAna_Sで推定した面(Fig.10d,e,f)を表している。なお、図の面は全て点群で表現されている。

地質観察結果(Fig.10a)を見ると、不連続面54-Aは左端から不連続面が発生しており、途中で分岐してフォーク状に斜めに発達する特徴を持つことがわかる。これについて、参照面は分岐箇所と斜めに発達する不連続面を自然に表現していた。VBSも、大格子から小格子へ分割し小格子を結合した事で、分岐箇所と斜めの不連続面を階段状に表現する事ができた。

しかし、DiAnaで推定した面にはFig.2で示した問題が起き、不適切な面が推定されていた。Fig.10にて青い楕円で囲んだ箇

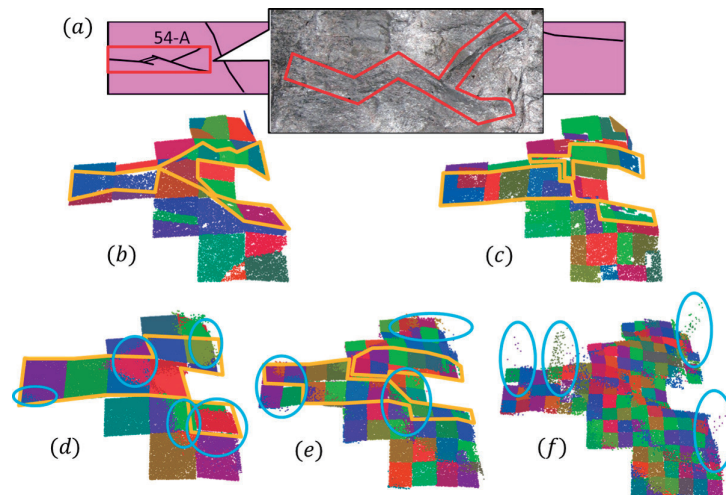


Fig.10 Discontinuity surfaces of the discontinuity 54-A were determined manually (yellow polygons). (a) The part of discontinuity surfaces surrounded by a red bounding box in a geological sketch and a photo. (b-e) The surfaces estimated by reference planes, VBS algorithm and DiAna algorithms with boxes of large and middle sizes. (f) Planes estimated by the DiAna_S algorithm. No surfaces were found in (f). Light blue ellipses show the parts of the point cloud that generated inappropriate planes. Colors are assigned to the planes to improve visibility.

所がその一例を示している。DiAna_Lでは格子サイズが大きく、段差や分岐、斜めの面を全て一枚の面で推定するため、格子内に存在する段差や分岐・斜めの面を表現できなかった。また、ノイズが大きくz軸方向に複数格子ができ、青い楕円内では面の上にも面が推定されていた。DiAna_Mは参照面やVBSと類似した線となっていることが分かるが、DiAna_Lと同様の問題が起きていた。DiAna_Sでは垂直方向に広がる面が推定されている他、z軸方向に複数格子ができる問題が発生しており、不連続面の稜線を目視で確認することができなかった。他の不連続面についても、DiAnaで不適切に推定された面がVBSでは適切に推定されている箇所が存在した。

5. まとめ

本研究では、3Dレーザースキャナにより得られた3次元点群データから自動的に面を推定し坑道壁面の表面形状を近似するために、VBSを開発した。VBSは、点群を大きいサイズの立方格子で分割した後、さらに小さいサイズで分割した格子の中で面をフィッティングし、類似した面を領域成長法で結合していくことで場所に適した格子サイズを自動的に定めて、格子内に含まれる点群から面を推定する。この時、大まかに定めた大格子のサイズのみを処理のパラメータとして必要とし、パラメータ決定に必要な試行が少ない。

実験では、目視で作成した参照面とVBSで推定した面との類似度と、参照面とDiAnaで推定した面との類似度を比較し、VBSの性能を評価した。その結果、目視での比較と類似度の平均値の順位での比較において、VBSが最も参照面と類似していた。

以上より、VBSは大格子サイズのみをパラメータとして定めることで、自動的に点群から面を抽出できる。また、格子を点群の分布により適切なサイズで分割する事により、DiAnaアルゴリズムに比べ目視での点群分割・面推定に類似した結果を得ることができた。よって、VBSは3次元点群データを用いた地質観察作業の省力化と平準化に有用である。

謝辞 3次元レーザースキャナ計測を含めた研究坑道の壁面地質調査は、(国研)日本原子力研究開発機構および大林・大成・安藤ハザマ特定共同企業体の技術者によって実施された。ここに付

記して謝意を表する。

References

- 1) 原子力発電環境整備機構：地層処分安全確保，NUMO-TR-11-01 (2011)，6章，pp.1-162.
- 2) 鈴木俊一，本島貴之，井尻裕二，青木広臣：土木学会論文集C，**65** (1) (2009)，185-195.
- 3) 川越健：RRR (Railway Research Review)，**Vol.63** (10) (2006)，p.38.
- 4) 地盤工学会基準部：土と基礎，**51** (8) (2003)，67-75.
- 5) 鶴田忠彦，笹尾英嗣：応用地質，**56** (6) (2016)，298-307.
- 6) 原子力発電環境整備機構：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性，NUMO-TR-04-01 (2004)，4章，pp.1-48.
- 7) S.Slob, B.van Knapen, R.Hack, A.K.Turner and J.Kemeny: Transportation Research Record, **1913** (1) (2005)，187-194.
- 8) S.Slob, R.Hack and A.K.Turner: Proc. ISRM International Symposium-EUROCK 2002, (ISRM, Lisboa, 2002)，pp.87-94.
- 9) S.Slob, H.R.G.K.Hack, Q.Feng, K.R.öshoff and A.K.Turner: Proc. 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, (ISRM, Lisboa, 2007)，pp.299-302.
- 10) S.Fekete, M.Diederichs and M.Lato: Tunnelling and Underground Space Technology, **25** (2010)，614-628.
- 11) M.Sturzenegger and D.Stead: Engineering Geology, **106** (3-4) (2009)，163-182.
- 12) 石濱茂崇，片山政弘，手塚仁，青木宏一：日本応用地質学会研究発表会講演論文集，(日本応用地質学会，2011)，pp.111-112.
- 13) C.Coşarçea, A.Joceca and A.Savu: RevCAD Journal of Geodesy and Cadastre, **9** (2009)，116-124.
- 14) A.Cuartero, J.Armesto, P.G.Rodríguez and P.Arias: Sensors, **10** (11) (2010)，10128-10145.
- 15) M.Vöge, M.J.Lato and M.S.Diederichs: Engineering Geology, **164** (2013)，155-162.
- 16) G.Gigli and N.Casagli: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, **48** (2011)，187-198.
- 17) M.Lato, M.Diederichs, D.J.Hutchinson and R.Harrap: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, **46** (1) (2009)，194-199.
- 18) G.Vassiliou: Sensors, **12** (8) (2012)，11249-11270.
- 19) J.Mah, C.Samson and S.D. McKinnon: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, **48** (6) (2011)，932-941.
- 20) 中川徹，小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析プログラムSALS，(東京大学出版会，東京，1982)，pp.29-53.
- 21) 松川瞬，板倉賢一，鈴木幸司，早野明：Proc. The 78th National Convention of IPSJ, (IPSI, Tokyo, 2016)，DVD, chapter 2, pp.55-56.
- 22) S. Matsukawa, K. Itakura, Y. Suzuki and A. Hayano: Proc. The 9th Eurosim Congress on Modelling and Simulation, (IEEE, America, 2016)，pp.516-517.
- 23) 池田孝博，青柳領：発育発達研究，**53** (2011)，23-35.
- 24) 早野明，板倉賢一：Journal of MMIJ, **133** (4) (2017)，76-86.
- 25) 新見健，大澤英昭，柳沢孝一，杉原弘造，吉田英一，瀬尾俊弘，北山真：釜石鉱山における地層科学研究第一フェーズ総括報告書一，(動力炉・核燃料開発事業団，1994)，pp.15-18.
- 26) 木村強，陶野郁雄，江崎哲郎：応用地質，**32** (1) (1991)，1-8.
- 27) 川本康司，窪島光志，石橋正祐紀，鶴田忠彦，笹尾英嗣，池田幸喜，見掛信一郎，原郁夫，山本勝：JAEA-Data/Code 2012-009, (Japan Atomic Energy Agency, 2012).
- 28) Kitware, 2013b Kitware ParaView 3.98 (2013), <http://paraview.org/>
- 29) 山田剛史，杉澤武俊，村井潤一郎：Rによるやさしい統計学，(オーム社，東京，2008)，pp.160-174.
- 30) R Development Core Team, R version 3.0.2 (2013), <https://www.r-project.org/>
- 31) T. Hothorn and K. Hornik: Exact Distributions for Rank and Permutation Tests version 0.8-28, CRAN (2015), <https://cran.r-project.org/web/packages/exactRankTests/index.html>