

3D スキャナによるトンネル切羽の突発的変位の リアルタイム検出

Real-Time Detection of Sudden Displacement of Tunnel Face Surface by 3D Scanner

○三瓶貴広*, 溝口知広*

○Takahiro Sapnei*, Tomohiro Mizoguchi*

*日本大学

*Nihon University

キーワード: トンネル切羽 (Tunnel Face Surface), 突発変化 (Sudden Displacement),
高速 3D レーザスキャナ (High-Speed 3D Laser Scanner),
リアルタイム検出 (Real-Time Detection)

連絡先: 〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1
日本大学 工学部 情報工学科 生産システム工学研究室
三瓶貴広, Tel.: 024-956-8825, E-mail: ceta17011@g.nihon-u.ac.jp

1. 緒 言

山岳トンネル掘削工事現場では, Fig.1 のような掘削の最先端面 (以下, 切羽と呼ぶ) の突発的な部分的崩落に作業員が巻き込まれる事故が発生している¹⁾. 崩落の原因や形態は様々であるが, その予兆として切羽が数ミリから数センチ程度突発的に変位し, その後数秒から数分以内に大きな崩落が発生することが知られている²⁾. 現状では切羽監視員の配置等の対策を講じているが, その変位を目視で確認することは極めて困難である. また変位の際に音が発生する場合もあるが, 周囲の作業音にかき消され, 聞き取ることが難しい. そのため, 切羽の僅かな変位をリアルタイムに検出し, 崩落前に作業員の避難を促すシステムが求められている.



Fig.1 トンネル切羽の例

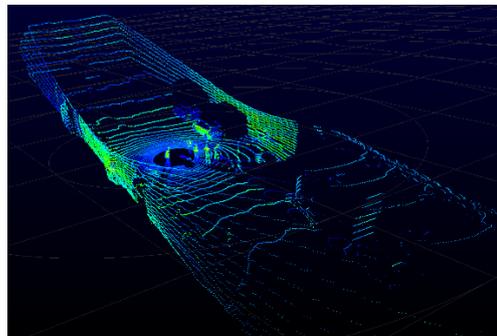


Fig.2 取得点群の例 (点数: 67,706)

1.1 関連研究

これを目的とした過去の研究例として、小泉らの例が挙げられる³⁾。この手法では、複数個のレーザ変位計を用いて、切羽面の指定した数点の変位を±0.3mmの精度で計測できる。しかしながら、計測箇所への物理ターゲットの設置や特殊スプレーの吹付け等の事前準備が必要となる。また、ターゲットや変位計の数に応じた計測しかできないため、それ以外の場所では変位が検出できない。一方Lemyら⁴⁾は、変位検出に地上型レーザスキャナを使用することを提案している。この手法では切羽面全体を高密度に計測できるが、全周計測に数秒を要し、リアルタイム検出には使用できない。中村ら⁵⁾は、RGBカメラを用いた切羽の変状抽出手法を提案している。この手法では切羽面全体を計測でき、撮影開始時と現在のフレームの差分から、岩石塊の落下の検出が可能である。しかしながら、切羽の一部が計測方向前後にわずかに変位する場合には、その変位検出が難しい。

1.2 本研究の目的

本研究では、高速3Dレーザスキャナを用い、数ミリから数センチ程度の切羽の突発的な変位のリアルタイム検出技術の開発を目的とする。本研究では、Velodyne HDL-32eを使用する。このスキャナの計測範囲は水平360deg、垂直41.3degであり、切羽の面的な計測が可能である。また事前準備は不要で、最大20Hzでの計測が可能であることから、突発的な変位の検出にも適用できる。なおこのスキャナは、歩行者検出⁶⁾やSLAM⁷⁾の目的で広く使用されているものである。このスキャナを用いてトンネル掘削現場を計測した例をFig.2に示す。

変位は通常、前後フレームの差分から計算できる。使用するスキャナは、カタログ上で

は計測精度が±2cm (1σ@25m)とあり、切羽のわずかな変位を捉えるには不十分である。この計測精度を、1フレーム計測時の距離精度と複数フレーム計測時の再現性に分けて考える。差分計算に使用するには、再現性が十分に高いことが要求されるため、計測フレームの平均化を行うことで、この誤差を緩和する。

Chanらの研究⁸⁾では、HDL-32eの静止物体の同一箇所を長時間計測した場合に、一定であるはずの計測距離が時間変化することが報告されている。この問題に対し、現場にある径の大きな円柱を利用し、この時間変化を緩和するキャリブレーション手法も提案している。しかしながらトンネル工事現場には様々な設備があり、大きな平面や円柱物体を搬入することは実用的ではない。そのため本研究ではキャリブレーションは行わず、変位検出の基準を時間とともに更新し、その算出精度を詳細に検証した。

2. 提案手法の概要

提案手法では、変位検出の前に複数フレーム計測を行い、これの平均をベースフレームとする。その後、取得したフレーム（カレントフレーム）ごとに、ベースとの差分を計算する。処理のフローをFig.3に示す。

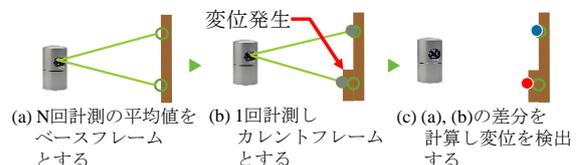


Fig.3 本提案手法の流れ

2.1 ベースフレームの作成

各フレームの点群 $P = \{p_i = (\theta_i, \phi_i, r_i)\}$ の各点 p_i の、水平角度 θ_i 、垂直角度 ϕ_i 、スキャナからの距離 r_i を用い、距離画像を作成する。水平角度分解能が 0.01deg であり、垂直にレ

一ザが 32 個搭載されていることから、水平 36,000 ピクセル、垂直 32 ピクセルの画像となる。これを N フレーム繰り返し、ピクセルごとに距離の平均値を算出し、ベースフレーム $B = \{b_{j,k}\}$ とする。

2.2 カレントフレームの作成

その後、取得したフレームごとの点群より、2.1 節と同様に距離画像を作成し、これをカレントフレーム $C = \{c_{j,k}\}$ とする。

2.3 変位の算出

ベースフレーム B とカレントフレーム C の対応するピクセル毎に、差分 $d_{j,k} = c_{j,k} - b_{j,k}$ を計算する。

3. 実験概要と考察

3.1 距離精度と再現性の検証

まずスキャナの距離精度の検証のため、平らな壁を約 2m の距離から 1 フレームのみ計測した。この点群に対し、最小二乗平面を当てはめ、平面との距離を算出した。この分布を Fig.4(a)に示す。次に複数回計測時の再現性の評価のため、同じ壁を 1,175 フレーム計測し、各ピクセルごとに計測距離の標準偏差を計算した。この分布を Fig.4(b)に示す。平面との距離の標準偏差は 4.3mm であり、最大では 16.5mm であった。一方で、各ピクセルの標準偏差の平均は 2.4mm であり、最大でも 6.1mm で、再現性が高いため差分計算に有効であると考ええる。

より高精度な差分検出のため、ベースフレーム数 N を 1 から 1,000 まで変更し、それぞれカレントフレームとの差分の検出精度を評価した。 N を増やすことで差分値の平均値がおおよそ 0mm でその標準偏差は 2.5mm に収束し、より安定に差分を検出できることが分かった。次節の実験では $N = 500$ に設定した。

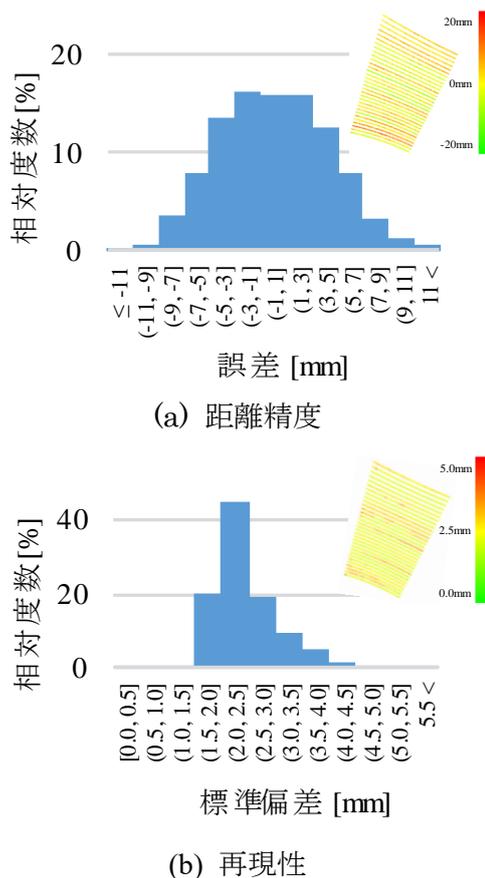


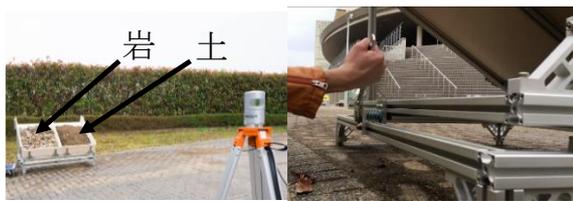
Fig.4 誤差分布と色表示結果

3.2 擬似切羽に対する変位の算出精度評価

Fig.5 のような、ねじを利用して 1mm 以内の精度でスライド可能な装置に、土と岩を乗せ、疑似切羽を作成した。変位量は 20mm 及び 0mm(変位なし)とし、Table 1 に示す 4 つの条件で変位前後の差分を 20 回計算し、その精度を評価した。Fig.6 は計測距離がおおよそ 5m, 20m の地点での結果である。

Table 1 計測条件

	計測角度 (水平, 垂直)	計測 対象
case1	0deg, 0deg	岩
case2	0deg, 0deg	土
case3	45deg, 10.67deg	岩
case4	45deg, 10.67deg	土



(a) 実験装置 (b) ねじによる変位
Fig.5 実験風景

Fig.6 より, case1, case2 では, 計測距離が 5m で変位量が 0mm の場合に最大誤差が発生し, 平均誤差が 2.0mm でその標準偏差は 2.2mm であった. 一方で, case3, case4 では, 計測距離が 20m で変位量が 20mm の場合に最大誤差が発生し, 平均誤差が-5.9mm でその標準偏差は 3.2mm であった. 角度が大きいため誤差が増大し, ばらつきも大きくなることが確認できた. この理由として, 岩や土は平滑でないことから, 変位前後で違う場所にレーザが照射され, その差分を計測したと考えられる.

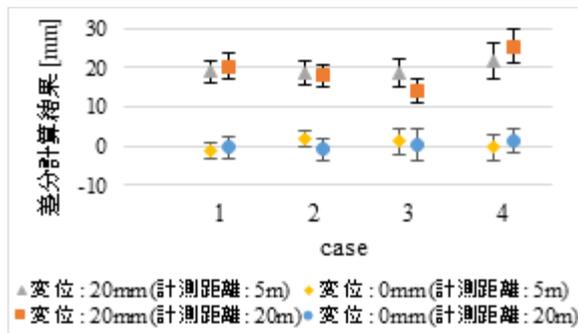


Fig.6 疑似切羽に対する差分計算結果

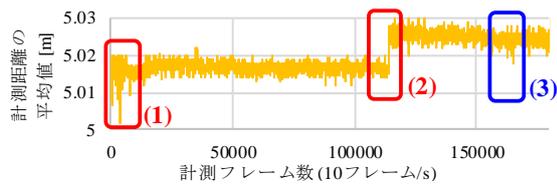
3.3 計測距離の時間変化の検証とその対策

立てかけた木板をおよそ 5m の距離から 15 時間連続で計測した. 時刻 t に取得したフレーム $f(t)$ における変位を検出するため, $f(t-100)$ から $f(t-1)$ までの直近 100 フレームに対し, 平均計測距離を計算し, その差分を評価した. 木板のほぼ正面に照射される点のうち, 垂直角度が 0deg に近い複数チャンネルの計測距離の時間変化と差分を計算した. 計測開始から 5 時間分の, 時間変化が確認できた 2

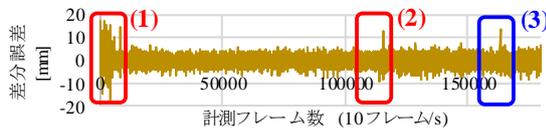
チャンネルの結果を Fig.7, Fig.8 に示す. 計測開始直後の時間変化の傾向として, 時間変化が確認できない場合, Fig.7(a)-(1) のように急激な時間変化が発生する場合, Fig.8(a)-(1) のように緩やかな時間変化が発生する場合の 3 パターンが確認できた. また, Fig.7(a)-(2) の 114,000 フレーム付近は計測開始から約 3 時間後の様子であるが, 急激な時間変化を確認できる. この急激な変化は, 計測を続けた 5 時間以降も同じ周期で発生していることが確認できた.

Fig.7(a) の 100 フレームの計測距離平均が安定している 50,000 フレームから 80,000 フレームにおける差分誤差を確認すると, 誤差平均が 0.0mm でその標準偏差が 2.0mm であった. Fig.8(a)-(1) の様な緩やかな時間変化に関しては, 100 フレームから 30,100 フレームにおける差分誤差を確認すると, 誤差平均が 0.0mm でその標準偏差が 2.5mm であり, 時間変化を緩和できている. Fig.7(a)-(1), (2) のような急激な時間変化では差分誤差が 10mm に達する場合があります. これら以外の, Fig.7(b)-(3), Fig.8(b)-(2) のように差分誤差が 10mm に達する場合には, ベースフレームの点数が少ないことや, カレントフレームの異常値があった事が考えられる.

101 フレームから 6,100 フレームの各ベースフレーム内の点数を Fig.9 に示す. 取得できる点数にはばらつきがあることが分かる. 計測を続けた 6,101 フレーム以降も同様の様子が確認できた. そのため, 計算のタイミングによっては, 点数が著しく低下し, 差分誤差が大きくなってしまう可能性が考えられる. 実用レベルで実装を行う際には, ベースフレーム内の点数に応じた重み付けなどを行い, 周囲の点も合わせて考慮するなどして, 複数点での評価を行う必要があると考える.

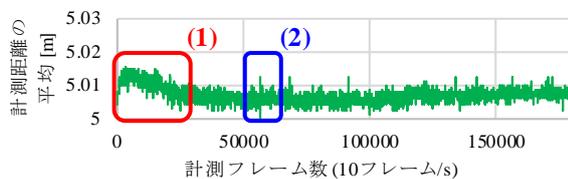


(a) 100 フレーム平均

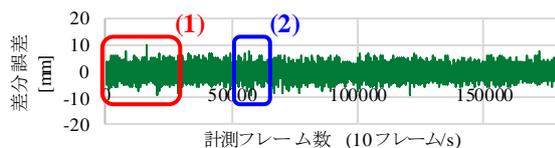


(b) 差分誤差

Fig.7 100 フレーム平均と差分誤差
(チャンネル ID: 15)



(a) 100 フレーム平均



(b) 差分誤差

Fig.8 100 フレーム平均と差分誤差
(チャンネル ID: 19)

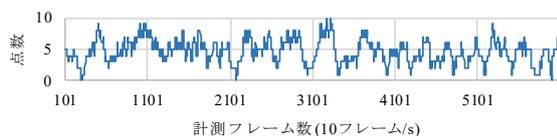


Fig.9 ベースフレーム内の点の個数の推移

4. 結言と今後の課題

本研究では、高速 3D レーザスキャナを用いた切羽変位のリアルタイム検出手法を提案し、様々な実験よりその性能評価を行った。その結果、ほぼ正面からの計測の場合、約 5mm 以上の変位であれば検出できる可能性を示した。今後の課題として、切羽の変位と作業者の動きの区別、粉塵や水分が付着した場合の精度検証、実用化に向けた警報発生の基準設定などが挙げられる。

謝 辞

本研究で用いた装置の製作は、日本大学工学部機械工学科の遠藤央先生にご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉川直孝, 他, “トンネル切羽の肌落ちによる死傷災害の調査分析と安定対策の検討”, 土木学会論文集 F6(安全問題), Vol. 67, No. 2, pp.I_125-I_130, 2011.
- 2) 竹林亜夫, 他, “切羽の不安定現象の分類と対策に関する考察”, トンネル工学研究論文・報告集, 第 9 巻, pp.1-8, 1999.
- 3) 小泉悠, 他, “山岳トンネルの切羽崩落予想システム: 切羽ウォッチャー”, 一般社団法人日本建設機械施工協会誌, 67(5), pp.15-18, 2015.
- 4) Lemy, F., et al., “A case study of monitoring tunnel wall displacement using laser scanning technology,” Proceedings of 10th IAEG Congress 'Engineering Geology for Tomorrow's cities', Nottingham, September 6-10, 2006, pp.482-493, 2006
- 5) 中村隆史, 他, “背景差分法を用いたトンネル切羽の変状モニタリングに関する研究”, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol. 42, (33), pp.113-116, 2017.
- 6) Asvadi, A., et al., “3D Lidar-based Static and Moving Obstacle Detection in Driving Environments: an approach based on voxels and multi-region ground planes,” Robotics and Autonomous Systems, Volume 83, pp.299-311, 2016.
- 7) Sheehan, M., et al., “Continuous Vehicle Localisation Using Sparse 3D Sensing, Kernelised Rényi Distance and Fast Gauss Transforms,” Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on, pp.398-405, 2013.
- 8) Chan, T., et al., “TEMPORAL ANALYSIS AND AUTOMATIC CALIBRATION OF THE VELODYNE HDL-32E LIDAR SYSTEM,” ISPRS Workshop Laser Scanning 2013, Volume II-5/W2, pp.61-66, 2013