3D LiDAR と高解像度カメラを併用した切羽監視システムの開発

佐藤工業（株）　正会員　○大江　隆史
佐藤工業（株）　正会員　小山　広光，中谷　幸一
シャープ（株）　大森　圭祐，水木　健光

1.　はじめに

山岳トンネル工事における掘削の最先端である切羽では，機械化や自動化が進む昨今においても，装薬作業など，作業員が切羽近傍に立ち入る場面がある。そのため，切羽近傍に立ち入る作業員が，切羽からの岩石や土砂の落下による肌落ち災害や崩落などの重篤な災害に巻き込まれることが懸念される[1)]。

厚生労働省は，山岳トンネル工事における肌落ち災害の防止を目的として，2016 年 12 月に「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」を策定した[2)]。同ガイドラインでは，事業者が講ずべき措置として，切羽への立入禁止措置，肌落ち防止計画の策定・実施・変更，切羽監視責任者の選任，具体的な肌落ち防止対策などが定められており，切羽監視責任者による監視を補助する対策の一つとして切羽変位計測が位置付けられている。切羽監視は，これまで主として切羽監視責任者の目視により行われてきた。しかし，肌落ちの前兆となる微小な変位や局所的な変状を目視のみで常時把握することには限界がある。したがって，切羽監視責任者の判断を補助し，切羽変位を定量的かつ連続的に把握できる監視技術が求められる。

これまで著者らは，切羽監視責任者の監視を補助することを目的として，ステレオカメラを用いた切羽監視システムの開発を行ってきた。しかし，トンネル坑内では照度変化，施工機械や作業員の写り込み，粉じん，湧水および切羽面の凹凸など，画像計測に影響を及ぼす要因が多い。特に，坑内の照度変化によってステレオカメラによる 3 次元データの取得率が低下し，計測が不安定になる場合があることが課題であった[3)]。

そこで，坑内環境の変化による影響を低減し，切羽面に生じる 3 次元的な変位を把握することを目的として，3D LiDAR（以降，LiDAR）と高解像度カメラ（以降，カメラ）を併用した切羽監視システムを新たに開発した。LiDAR は対象面までの距離情報を直接取得できるため，切羽軸方向，すなわち切羽面に対する前後方向の変位検出に適している。これに対し，カメラは切羽表面の模様や凹凸に基づく画像特徴を高密度に取得できるため，切羽面内方向，すなわち切羽面に沿った上下・左右方向の変位検出に適している。

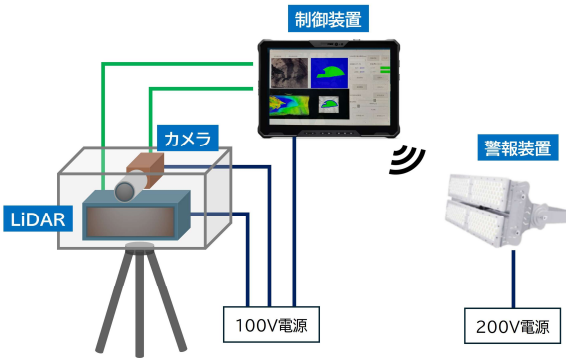
開発にあたり，まず当社技術センター内に構築した模擬切羽を用いて，LiDAR とカメラのキャリブレーション方法および変位検出アルゴリズムを検討し，切羽面内方向および切羽軸方向の変位検出性能を確認した。その後，実施工環境下における適用性を確認するため，当社施工中の山岳トンネル工事において本システムの実証試験を行い，切羽変位の表示機能および障害物除外処理の動作を確認するとともに，切羽監視責任者による監視を補助するシステムとしての適用可能性を確認した。

本報では，LiDAR とカメラを併用した切羽監視システムの概要を示すとともに，模擬切羽を用いた変位検出実験により確認した基本性能について述べる。さらに，実トンネル工事現場における実証試験結果に基づき，実施工環境下における切羽監視補助システムとしての適用可能性および今後の課題について述べる。

2.　切羽監視システムの概要

(1)　システム構成

図－1 に本システムの構成概要を示す。本システムは，



図－ 1　切羽監視システムの構成概要

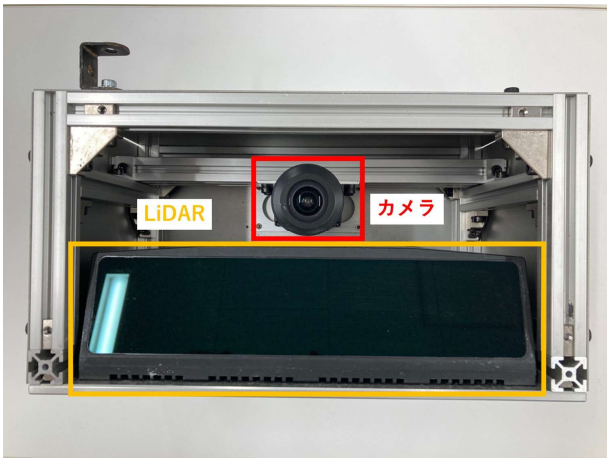
キーワード　切羽監視，3D LiDAR，安全性の向上，高解像度カメラ，切羽変位検出，肌落ち
連絡先　〒300-2658　茨城県つくば市諏訪 C30 街区 1 佐藤工業株式会社 土木研究部　TEL 070-3223-6143

LiDAR，カメラ，タブレット PC（制御装置）および警報装置で構成される。切羽から 7～10m 離れた位置に LiDAR およびカメラを設置し，切羽面を連続的に計測する。取得した点群データおよびカメラ画像は制御装置であるタブレット PC に入力され，変位検出処理により算出した変位量をリアルタイムに表示する。また，算出した変位量があらかじめ設定した閾値を超えた場合には，無線接続された警報装置の赤色灯を点灯させる。これにより，作業員に異常を知らせ，切羽近傍からの退避を促す。

本システムの特徴は，LiDAR とカメラを併用し，切羽軸方向および切羽面内方向の変位をそれぞれ検出する点にある。LiDAR は，切羽面までの距離情報を点群データとして取得できるため，切羽軸方向，すなわち切羽面に対する前後方向の変位検出に用いる。一方，カメラは高解像度画像により切羽表面の画像特徴を取得できるため，切羽面内方向，すなわち切羽面に沿った上下・左右方向の変位検出に用いる。これらを組み合わせることで，切羽に生じる 3 方向の変位を監視可能とする。

(2)　使用機器およびキャリブレーション

本システムを構成する LiDAR およびカメラの主要仕様を**表－1** に示す。また，**図－2** に計測システムの外観を示す。LiDAR には Leishen 社製 LS500W1 を，カメラには Allied Vision 社製 GT2460C を用いた。カメラには焦点距離 5mm のレンズを装着した。LiDAR およびカメラは，模擬切羽を用いた変位検出実験および実トンネル工事現場における実証試験のいずれにおいても，各 1 台使用した。**表－1** に示す最大フレームレートは各機器における 1 秒間に取得できるデータ数の最大値であり，計測条件に応じて実際の取得フレームレートを設定した。



図－2　計測システムの外観

LiDAR とカメラは上下に配置しているため，同一の切羽面を計測した場合に取得される点群データと画像データの座標系は一致しない。そのため，本システムでは，点群データとカメラ画像を対応付けるためのキャリブレーションを行う。キャリブレーションでは，所定のキャリブレーションボードを LiDAR およびカメラでそれぞれ計測し，LiDAR 座標系とカメラ画像座標系の対応関係を算出する。算出したパラメータを用いて点群データおよびカメラ画像の対応関係を求め，両者を同一の切羽領域として扱えるようにする。

(3)　変位検出および障害物除外

本システムでは，計測開始時または任意の時刻に取得したデータを基準データとし，その後に取得したデータと比較することで切羽変位を算出する。点群データでは，基準データと各時刻の点群データを比較することにより，切羽軸方向の変位を算出する。一方，カメラ画像では，切羽表面の画像の変化を時系列で評価することにより，切羽面内方向の変位を算出する。

点群データには計測誤差や時間経過に伴う変動が含まれる。そのため，空間方向および時間方向の平均化処理を行い，計測値のばらつきを抑えることで，短期的に生じる比較的小さな変位の検出性を向上させる。一方で，検出閾値未満のごくわずかな変位が累積する場合も想定されるため，長期的な変位の監視も必要となる。長期的な監視では，時間経過に伴う変動誤差の影響を考慮した上で，計測開始時の初期値との差分に基づき，比較的大きな変位や累積的な変位を監視する。

表－1　使用機器および主要仕様

機器	型番	主な仕様
LiDAR	LS500W1	**測定点数**：375 **万点/秒**，**画角**：120°×73°，**測定精度**：±2cm，**最大フレームレート**：10fps
カメラ	GT2460C	**画素数**：2464×2056，**画角**：80.7°×70.7°，**焦点距離**：5mm，**最大フレームレート**：23fps

トンネル施工中の切羽計測では，作業員や施工機械が計測範囲内に写り込む場合がある。これらを切羽面の変位として扱うと誤検知の要因となるため，本システムでは点群データを用いて障害物判定を行う。各フレームに対して，切羽面とは異なる位置に存在する点群を障害物として判定し，該当する領域のデータを変位算出対象から除外する。さらに，LiDAR とカメラのキャリブレーション結果を用いて障害物領域をカメラ画像上にも反映し，カメラ画像による切羽面内方向変位の算出においても障害物領域を除外する。

3. 模擬切羽を用いた変位検出実験

(1) 実験目的

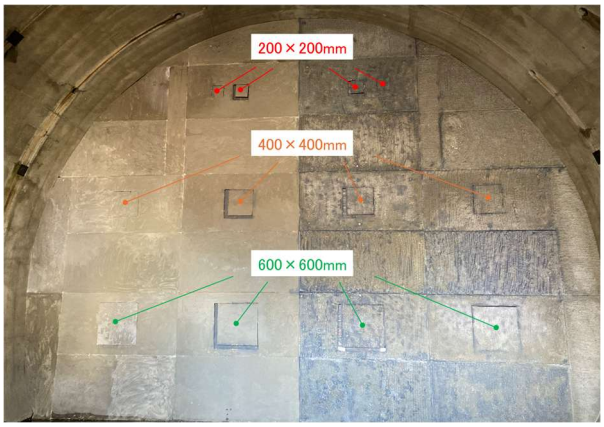
本システムを実トンネル工事現場に適用するにあたり，制御された条件下において，LiDAR およびカメラによる変位検出性能を確認する必要があるため，当社技術センター内に構築した模擬切羽を用いて，切羽軸方向および切羽面内方向の変位検出実験を実施した。

本実験では，変位方向，変位量，変位速度および変位部寸法を制御可能な模擬切羽を用い，各条件における変位検出の可否を確認した。また，点群データについては，空間方向および時間方向の平均化処理を行い，平均化条件が切羽軸方向の変位検出結果に及ぼす影響を確認した。

(2) 模擬切羽および実験条件

図－3 に模擬切羽と変位部寸法を示す。模擬切羽は，木製型枠および発泡スチロールブロックを基材とし，その表面に薄層のモルタルを施工した構造である。また，向かって右側の発泡スチロール表面にはウレタンを配置した上でモルタルを施工し，表面起伏条件を左右で異ならせた。

変位部寸法は，200×200mm，400×400mm，600×600mm の 3 種類とした。各変位部は，上下，左右および奥行きの 3 方向に独立して変位を与えられる構造とし，背面に設置したモーターにより変位方向，変位量および変位速度を制御し，任意の条件で繰り返し変位を与えることを可能とした。



図－3　模擬切羽と変位部寸法

表－2 に実験条件を示す。実験では，変位量を 10，30，50mm の 3 段階，変位速度を 5，10，15，20mm/s の 4 段階とした。切羽面から計測システムまでの距離は約 7.8m，切羽面における平均照度は約 200lx と設定した。なお，変位量については，切羽面内方向変位の実験では 50mm，切羽軸方向変位の実験では 10，30，50mm とした。

表－2　実験条件

項目	条件
変位部寸法	200×200,400×400,600×600 (mm)
変位方向	上下,左右,奥行
変位量	10,30,50 (mm)
変位速度	5,10,15,20 (mm/s)
計測距離	約 7.8 (m)
平均照度	約 200 (lx)

本実験では，点群データを用いて切羽軸方向の変位を算出する際，計測誤差の影響を低減し，変位量の安定化を図るため，空間方向および時間方向の平均化処理を行った。**表－3** に空間方向の平均化処理の条件を示す。空間方向の平均化処理では，平均化サイズを 3 段階設定し，平均化条件が変位検出結果に及ぼす影響を確認した。なお，平均化実寸法は，LiDAR から計測対象までの距離を 7.8m とした場合の平均化範囲の実寸を表す。また，以降に示す実験結果では，時間方向の平均化処理における平均化フレーム数を 4 フレームとした場合の結果を示す。時間方向の平均化

表－3　空間方向の平均化処理の条件

パターン	平均化サイズ	平均点群数	平均化実寸法 (mm)
平均①	1.8°×1.8°	98.9	245.1×245.1
平均②	2.6°×2.6°	206.3	354.2×354.2
平均③	3.4°×3.4°	352.8	463.4×463.4

処理では，平均化フレーム数を増加させることで計測値のばらつきを低減できる一方，変位発生から検出までの時間が長くなる。そのため，本実験ではばらつきの低減効果と検出の遅延のバランスを考慮し，平均化フレーム数を 4 フレームに設定した。

(3) 実験結果

表－4 に切羽面内方向変位の検出結果を，**表－5** に切羽軸方向変位の検出結果を示す。表中の検出結果は，変位部のみ検出できた場合を○，変位部以外の領域も検出（誤検知）された場合または変位部が不検出であった場合を×として整理し，軸方向変位については検出閾値 10mm における検出可否を示している。なお，変位速度による検出結果の差は限定的であったため，全変位速度の結果をまとめて示した。

切羽面内方向変位については，変位量を 50mm として実験を行った。**表－4** に示すように，上下方向および左右方向のいずれにおいても，変位部寸法および表面起伏（凹凸）条件によらず，変位部を検出できることを確認した。この結果より，切羽表面のカメラ画像の変化を時系列で評価することで，切羽面内方向に生じる変位を安定して検出できた。

一方，切羽軸方向変位については，**表－5** に示すように，点群データの空間平均化処理条件により検出結果に差が生じた。変位部寸法 400×400mm および 600×600mm では，いずれの平均化条件においても概ね変位部を検出できた。変位部寸法 200×200mm では，平均化サイズが大きい条件において変位部が不検出となる場合があった。これは，変位部寸法に対して空間方向の平均化範囲が大きい場合，変位していない周辺領域の点群も平均化処理に含まれるため，平均化後の変位量が小さく評価されたことが要因と考えられる。特に，変位部寸法 200×200mm では，平均化実寸法が変位部寸法と同程度またはそれ以上となる条件があり，変位量が検出閾値を下回ったものと考えられる。

また，変位量が小さい条件ほど不検出となる場合が多く，特に変位量 10mm では多くの条件において不検出となった。これは，検出閾値と同程度の変位を対象としているため，計測誤差や平均化処理による変位量低減の影響を受けやすかったものと考えられる。

表－4　切羽面内方向変位の検出結果

変位部寸法	凹凸	変位量	変位方向	検出結果
600×600mm	大	50mm	上下	○
			左右	○
	小		上下	○
			左右	○
400×400mm	大		上下	○
			左右	○
	小		上下	○
			左右	○
200×200mm	大		上下	○
			左右	○
	小		上下	○
			左右	○

表－5　切羽軸方向変位の検出結果

変位部寸法	凹凸	変位量	平均①	平均②	平均③
600×600mm	大	50mm	○	○	○
	小		○	○	○
400×400mm	大	50mm	○	○	○
		30mm	○	○	○
		10mm	○	○	×
	小	50mm	○	○	○
		30mm	○	○	○
		10mm	○	×	×
200×200mm	大	50mm	○	○	×
		30mm	○	×	×
		10mm	×	×	×
	小	50mm	○	×	×
		30mm	○	×	×
		10mm	×	×	×

以上の結果より，LiDAR とカメラを併用することで，模擬切羽における切羽面内方向および切羽軸方向の変位を検出可能であることを確認した。また，点群データを用いた切羽軸方向変位の検出では，対象とする変位部寸法に応じて空間方向の平均化サイズを適切に設定する必要があることを確認した。

4. 実トンネル工事現場における実証試験

(1) 実証試験の目的

前章で述べた模擬切羽実験では，変位方向，変位量，変位速度および変位部寸法を制御した条件下において，本システムによる切羽軸方向および切羽面内方向の変位検出性能を確認した。一方，実トンネル工事現場では，切羽面の凹凸，湧水，粉じん，照度や照明角度の変化に加え，作業員や施工機械の写り込みなど，計測に影響を及ぼす要因が多い。また，切羽監視責任者による目視監視を補助するためには，切羽変位を連続的かつ安定的に把握することが求められる。

そこで，実施工環境下における本システムの適用性を確認することを目的として，当社施工中の山岳トンネル工事で本システムの実証試験を行った。実証試験では，装薬作業時の切羽監視を対象とし，切羽変位の算出結果をタブレット PC に表示できること，および作業員や施工機械の写り込みを障害物領域として除外できることを確認した。

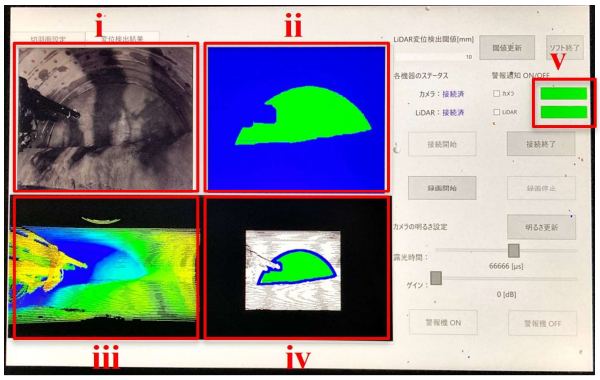
(2) システムの配置および運用方法

実証試験では，切羽から 7～10m 程度離れた位置に LiDAR およびカメラを設置し，切羽面を連続的に計測した。**図－4** に実トンネル現場における計測システムの配置状況を示す。LiDAR およびカメラは切羽面全体が計測範囲に含まれるように配置し，取得した点群データおよび画像データをタブレット PC に入力した。タブレット PC では，変位検出処理および障害物除外処理を行い，算出した切羽変位を画面上に表示した。



図－4　システムの配置状況

また，警報装置は現場作業への影響を考慮し，設置しなかった。算出した変位量があらかじめ設定した閾値を超えた場合には，通常の変位表示に加え，閾値超過をタブレット PC 上に表示した。装薬作業中に作業員やドリルジャンボなどの施工機械が計測範囲内に写り込む場合は，2 章(3)で述べた障害物除外処理により，該当領域を変位算出対象から除外した。

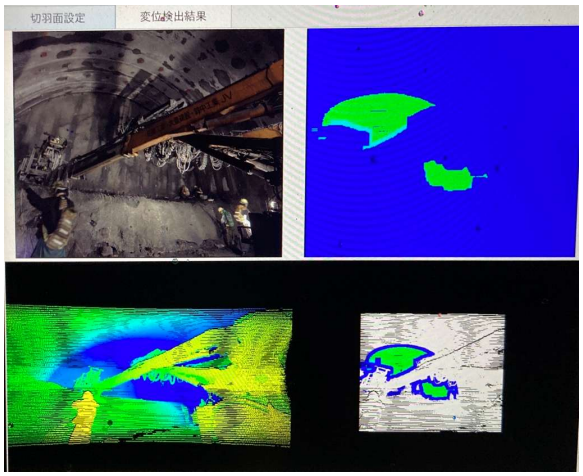


図－5　変位表示画面の例

(3) 実証試験結果

実証試験では，装薬作業時において，点群データおよびカメラ画像を取得し，切羽変位の算出結果をタブレット PC 上に表示できることを確認した。**図－5** にタブレット PC における変位表示画面の例を示す。図中の i～v は，それぞれ画像データ，切羽面内方向変位，点群データに基づき作成した距離マップ，切羽軸方向変位，異常変位の判定結果を示す。表示画面では，切羽軸方向および切羽面内方向の変位量を確認でき，切羽監視責任者が切羽の変位状況を把握するための補助情報として利用できることを確認した。

また，装薬作業中には，作業員やドリルジャンボなどの施工機械が計測範囲内に写り込む場面が確認された。**図－6** に障害物除外処理の例を示す。障害物除外処理により，作業員や施工機械に対応する領域を変位算出対象から除



図－6　障害物除外処理の例

外することで，これらの写り込みを切羽面の変位として扱わずに変位算出を行えることを確認した。

以上より，本システムは実施工環境下においても，切羽監視責任者による目視監視を補助するシステムとして適用可能性を有することを確認した。一方で，異常変位の検出閾値については，現場条件や施工段階に応じた設定が必要である。今後は，実トンネル工事現場での計測データを蓄積し，切羽状態や施工条件に応じた閾値設定方法を検討するとともに，検出精度の向上を図る必要がある。

5. 考察

模擬切羽実験では，制御された条件下において，本システムの基本的な変位検出性能を確認した。切羽面内方向の変位については，カメラ画像の変化を評価することで変位部寸法および表面起伏条件によらず検出できることを確認した。一方，切羽軸方向の変位については，点群データの空間平均化サイズが検出結果に影響した。特に，変位部寸法に対して平均化範囲が大きい場合には，変位していない周辺領域の点群が平均化処理に含まれるため，変位量が小さく評価される傾向があった。また，変位量が検出閾値と同等の場合には，計測誤差や平均化処理による変位量低減の影響を受けやすく，不検出となる場合があった。このことから，切羽軸方向の変位検出では，現場で検出したい変位の規模に応じて平均化サイズおよび検出閾値を適切に設定する必要がある。

実証試験では，作業員や施工機械の写り込みを伴う実施工環境下で本システムを試験的に運用した。障害物除外処理により，作業員やドリルジャンボなどを切羽面の変位として扱わずに変位算出を行うことができ，タブレット PC 上の表示により，切羽監視責任者が変位状況を把握するための補助情報を提供できることを確認した。これらの結果から，本システムは実施工環境下においても切羽監視責任者による目視監視を補助するシステムとしての適用可能性を有すると考えられる。

一方で，実用化に向けては，監視目的に応じた異常変位の検出閾値を設定する必要がある。そのため，実トンネル工事現場での計測データを蓄積し，切羽状態や施工条件に応じた閾値設定方法を検討するとともに，検出精度の向上を図ることが重要である。また，実証試験では，本システムの設置作業に時間を要する場面があったため，現場作業への負担を低減できるよう，設置性および操作性の改善が必要である。

6. まとめ

本論文では，切羽監視責任者による目視監視を補助することを目的として，LiDAR とカメラを併用した切羽監視システムを開発し，模擬切羽を用いた変位検出実験および実トンネル工事現場における実証試験により，その適用性を検討した。得られた結果を以下に示す。

- LiDAR により切羽軸方向の変位を，カメラにより切羽面内方向の変位を算出することで，切羽に生じる 3 方向の変位を監視可能なシステムを構成した。
- 模擬切羽を用いた変位検出実験により，切羽面内方向および切羽軸方向の変位を検出できることを確認した。また，点群データを用いた切羽軸方向の変位検出では，現場で検出したい変位の規模に応じて，空間方向の平均化サイズおよび検出閾値を設定する必要があることを確認した。
- 実トンネル工事現場における実証試験では，切羽変位の算出結果をタブレット PC 上に表示できることを確認した。また，障害物除外処理により，作業員や施工機械の写り込みを切羽面の変位として扱わずに変位算出を行えることを確認した。
- これらの結果より，本システムは切羽監視責任者による目視監視を補助するシステムとして，実施工環境下での適用可能性を有することを確認した。

今後は，実トンネル工事現場での計測データを蓄積し，監視目的に応じた異常変位の検出閾値の設定方法を検討するとともに，検出精度の向上を図る。また，現場作業への負担を低減するため，設置性および操作性の改善を進める。

■ 参考文献

1)　吉川直孝，他：トンネルの切羽からの肌落ちによる労働災害の調査分析と防止対策の提案，労働安全衛生総合研究所技術資料，JNIOSH-TD-No.2（2012）

2)　厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン（2026/08/07時点）

3)　大江隆史，他：ステレオカメラを用いた切羽監視システムの開発，土木学会全国大会第 80 回年次学術講演会，VI-562，2025.9