トンネル建設現場における肌落ち被害リスクを低減するシステムの基礎的実験

山口大学大学院　学生会員　○田村　大智
山口大学大学院　正会員　林　久資
熊谷組　正会員　青木　宏一
山口大学大学院　フェロー会員　進士　正人

1. はじめに

山岳トンネルの建設現場では，切羽付近において掘削直後の地山の岩盤や土砂が崩れ落ちる「肌落ち」による労働災害が問題となっている．この肌落ち災害は，平成 12 年以降の 10 年間で被災者 47 名のうち 6%にあたる 3 名が死亡し，36%にあたる 17 名が休業 1 ヶ月以上となるなど重篤度の高い災害である [1)]．この肌落ち災害に対して厚生労働省は「肌落ち災害防止に係るガイドライン」を取りまとめ，切羽付近での作業を行う場合には専任の切羽監視員による監視を義務付けている [2)]．しかしながら，監視員による監視では見落とし・見間違いなどの人的ミスが発生することが容易に予見される．加えて，熟練技術者が減少傾向にあることなどの理由から切羽監視員の補助を行い，肌落ち災害を未然に防ぐための監視システムが必要であると考えられる．

切羽の監視に関する既存の研究としては，対象物までの距離を簡易に計測できるデプスカメラや対象物の色を計測できる RGB カメラを用いた監視システムの導入が報告されている．しかし，これらの研究では岩塊の落下を検知したり，肌落ちが起こる直前のわずかな切羽の変状を検知することで被害を防止するとしているが，切羽近傍の人員を避難させるには時間が不足する．

そこで，本研究では肌落ち災害を未然に防止することを目標に，①肌落ちが起こる直前の切羽形状を記録し，機械学習により肌落ちのリスクが高い場所を学習するシステム，②任意のタイミングで大量に切羽形状を計測し，そのデータをもとに三次元数値解析を行うことで肌落ちを予測するシステムの開発を目指している．ここでは前者の基礎的研究として，市販のカメラを用いて肌落ちを検知するシステムと切羽形状を計測するシステムの開発を行った．

2. 肌落ち災害抑制のための基礎的実験の概要

2-1. 実験概要

実験では実際のトンネル建設現場を想定し，**図-1** に示す切羽模型から1m～10mまで1m間隔で撮影を行う（**図-2**）．そして，RGBカメラによる肌落ち検知実験では，切羽模型上で2cm，4cm，6cm，8cm，10cm四方の落石模型を下方向に滑らせて検知可能な物体の大きさを検討した．デプスカメラによる肌落ち検知実験では，切羽模型上で10cm四方，厚さ1cm～8cmの落石模型を下方向に滑らせて検知可能な物体の厚さを検討した．さらに，デプスカメラによる形状計測実験では，1cm幅の階段となっている切羽模型の形状を計測し計測可能な凹凸の幅を検討した．

2-2. システムに用いた切羽監視カメラ

本研究では，Intel製のカメラ「RealSense_D435i」(以下，切羽監視カメラと称す)を使用する．この切羽監視カメラは，RGBカメラとデプスカメラを搭載している．ここでは，RGBカメラとデプスカメラによる動体検知と，デプスカメラによる凹凸判定を行った．

2-3. RGBカメラによる肌落ち検知システム

このシステムでは，切羽監視カメラに搭載されているRGBカメラから得られた画像から移動物体を抽出することで肌落ちの検知を行う．この移動物体の抽出にはフレーム間差分法を用いる．ここで，フレームとは動画のうち1コマの静止画像を指し，あるフレームとその前後のフレームの3枚を用いて，差分画像を2枚作成する．差分画像とは，RGB画像をグレースケールに変換し，前後のフレーム間で画素ごとにグレースケール値の差を計算して，閾値を超えた画素を白色，超えていない画素を黒色とした二値画像である．この2枚の差分画像から白い部分が重なる箇所

キーワード　山岳トンネル，肌落ち，労働安全，動体検知
連絡先　〒755-8611　山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院創成科学研究科　進士研究室　TEL0836-85-9332

© Japan Society of Civil Engineers

を抽出することで移動物体を検知する．移動物体を検知した場合は，パソコンディスプレイに「検知しました」と表示させるシステムを作成した．

2-4. デプスカメラによる肌落ち検知システム

このシステムでは，切羽監視カメラに搭載されているデプスカメラから得られた深度データを用いて移動物体を抽出することで肌落ちの検知を行う．深度データとは，1 枚のフレームの中で画素ごとに記録されているカメラから被写体までの距離データの行列式である．この深度データを前後のフレームで画素ごとに差分計算を行い，閾値を超えた場合に物体が移動していると判定する．移動物体を検知した場合は，2-4 と同様の通知を行う．

2-5. デプスカメラによる切羽形状計測システム

このシステムでは，2-3 と同様にして得られた深度データを点群データとして扱うことで切羽形状の計測を行う．得られた深度データは三次元散布図で表示し，対象物の凹凸形状を可視化する．

2-6. 実験結果

RGB カメラによる動体検知の実験結果を**表-1** に示す．対象物までの撮影距離が延びるにつれて検知可能な落石寸法が大きくなるという結果を得た．デプスカメラによる動体検知の実験結果を**表-2** に示す．対象物までの撮影距離が 1m，2m の場合はそれぞれ厚さ 3cm，5cm 検知可能であるが，3m 以降では検知不可能という結果を得た．次に切羽形状計測システムでの計測結果を**表-3** に示す．また，一例として 1m のケースの三次元散布図を**図-3** に示す．1m のケースでは 1cm の凹凸が計測可能であると判断できる．2m の場合では，1m のケースと同様のコンター図により 8cm の凹凸が計測可能であると判断できたが，3m 以降では計測不可能という結果を得た．

3. まとめと課題

本研究では，肌落ち災害を防止するための基礎的研究として，切羽監視カメラを用いて肌落ち検知システムと切羽形状計測システムを開発し，各システムの適用範囲を検討した．対象物までの撮影距離は RGB カメラでは 10m 以内，デプスカメラでは 2m 以内であることが判明したが，今後は実際に施工現場でも実験を行い，室内実験の結果が妥当なものかを検討したい．

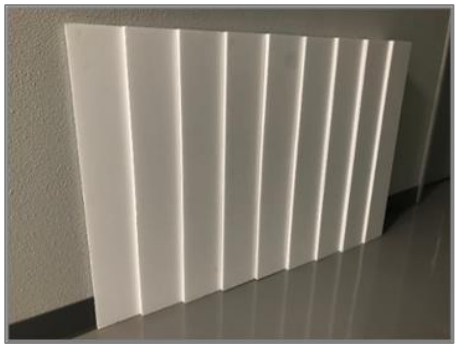

図-1 切羽模型

図-2 実験概要

表-1 RGB カメラによる動体検知の実験結果

撮影距離	1m	2m	3m	4m	5m
落石模型の寸法	2×2cm	2×2cm	2×2cm	2×2cm	4×4cm
撮影距離	6m	7m	8m	9m	10m
落石模型の寸法	4×4cm	4×4cm	6×6cm	8×8cm	10×10cm

表-2 デプスカメラによる動体検知の実験結果

撮影距離	1m	2m	3m	4m	5m
落石模型の厚さ	3cm	5cm	—	—	—

表-3 デプスカメラによる形状計測の実験結果

撮影距離	1m	2m	3m	4m	5m
計測可能な凹凸幅	1cm	8cm	—	—	—

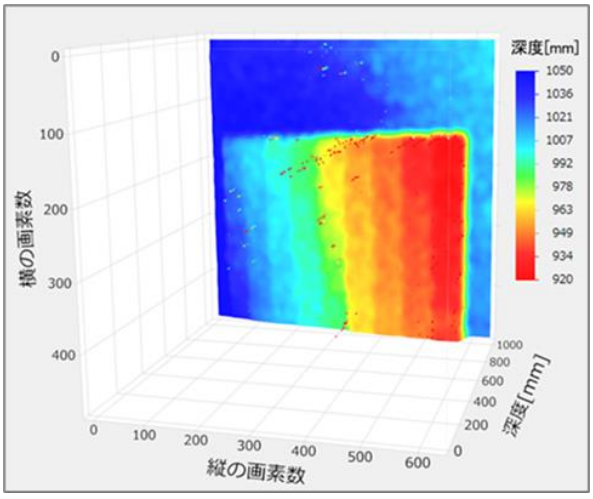

図-3 1m のケースの形状計測結果

参考文献

1) 労働安全衛生総合研究所：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，pp.4-8，2012
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について，pp.4-5，2018

© Japan Society of Civil Engineers