

## (57) 画像解析技術を用いた トンネル切羽の落石監視手法の研究

久保田 恭行<sup>1</sup>・西山 哲<sup>2</sup>・矢吹 信喜<sup>3</sup>・福田 知弘<sup>4</sup>  
手塚 仁<sup>5</sup>・尾畑 洋<sup>5</sup>・村上 治<sup>6</sup>

<sup>1</sup>学生会員 大阪大学大学院 環境エネルギー工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)  
E-mail: kubota@it.see.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 岡山大学教授 環境生命科学研究科 (〒700-0803 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

<sup>3</sup>フェロー会員 大阪大学教授 環境エネルギー工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)  
E-mail: yabuki@see.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 大阪大学准教授 環境エネルギー工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

<sup>5</sup>正会員 (株)熊谷組 土木事業本部トンネル技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1)

<sup>6</sup>非会員 つくばソフトウェアエンジニアリング(株) 第2システム部3課  
(〒101-0041 東京都千代田区神田須田町 2-6-1)

トンネル工事での肌落ち災害を防止するため、作業中は切羽の状態を常時継続的に監視する必要がある。切羽での大規模な崩壊の予兆として、崩壊までの時間に差はあるものの小規模な落石が見られる場合があるが、目視では落石の確認が困難であるため、大規模崩壊に巻き込まれ、重大災害に繋がる可能性がある。そこで、筆者らは背景差分法を基に落下物である落石を検出する処理を導入した切羽監視手法を提案した。本研究では、粉塵といった微小な物体や映像のノイズの除去について検討した後、肌落ち災害を想定した切羽での映像を用いて画像解析を行った。その結果、目視による監視では確認が困難な小規模な落石を検出ができ、肌落ち災害の発生リスクを軽減できる可能性を示した。

**Key Words:** tunnel face, monitoring, rockfall, image processing, background subtraction

### 1. はじめに

山岳トンネルの建設工事では、掘削面である切羽の肌落ち災害による作業員の死傷災害が問題となっている。平成12年以降の10年間には、死傷者を含む肌落ち災害が42件発生した<sup>1)</sup>。被災者の6%が死亡し、42%が休業一ヶ月以上となっており、肌落ち災害は一度発生すると重篤な災害に繋がりやすい。厚生労働省は「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止に係るガイドライン」を策定し、切羽災害防止のため常時継続的に切羽の変状を監視する必要があるとしている<sup>2)</sup>。切羽での大規模な崩壊が発生する前には、崩壊までの時間に差はあるものの小規模な落石が見られる場合があることから、このような予兆を監視し、大規模崩壊に至るまでに、作業員に対して切羽から速やかな避難を促す必要がある。これまでは、切羽監視責任者による目視監視が行われているが、複数の重機や作業員が錯綜する中で、切羽のごく一部に生じる微小な変化である落石を確実に目視で捉えることは困難である。また、切羽の微小な変化を計測す

る既往の研究では、三次元的な画像計測<sup>3)</sup>が行われているが、リアルタイムな計測が困難であり、また、レーザー距離計を用いた切羽変位計測<sup>4)</sup>では、計測点数が限られるため面的な計測が出来ないといった課題が挙げられる。そこで、中村ら<sup>5)6)</sup>が、背景差分法を軸に領域分割を用いて落石を監視する手法を提案したが、重機や作業員の影の動きなどを落石として誤検出するため、落石のみを正確に検出することが困難であった。

そこで筆者らは、落石は鉛直下方向の落下物であることから、中村らの背景差分法を軸とした方法を基に鉛直下方向の落下物である落石を検出する処理を導入した切羽監視手法を提案する。

本研究では、切羽監視手法について概説した後、室内実験、切羽での映像から、粉塵といった微小な物体や映像のノイズの除去について検討した。そして、大規模崩壊の予兆となる落石を想定した映像を用いて、鉛直下方向の落下物を検出する処理で落石を検出できるか検証を行った。その結果、小規模な落石の検出ができ、肌落ち災害の発生リスクを軽減する可能性を示す。

## 2. 切羽監視手法の概要

### (1) 切羽監視手法

提案する切羽監視手法では、切羽後方の重機にビデオカメラを設置して切羽を撮影し、取得したフレームから画像解析によって落石を検出する。落石を検出した場合は、警報装置が作動し作業員に警告を促すものである。画像解析の手順は、背景差分法により移動体を検出し、鉛直下方向の落下物を検出する処理で落石を検出する。このように逐次フレームを取得し、一連の処理を短時間で繰り返し行うことで、リアルタイムな監視を行う。

### (2) 背景差分法による移動体の出力

背景差分法とは背景画像と現在のフレームである入力画像の同一位置の画素における色の变化の差を求めることで移動体を検出する手法である。本研究では、RGB値それぞれが8bitのフレームを、白黒の濃淡に変換したグレースケール画像を用いる。グレースケール画像に変換することは、人間の知覚特性を保持し、計算コストを軽減できる利点がある。第 $n$ フレームにおけるグレースケール画像は以後、入力画像 $I_n$ とし、その画素値を濃淡値と記す。変換式は式(1)を用いた<sup>7)</sup>。

$$I_n(x, y) = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1)$$

ここに、

$R$ : 赤の明度,  $G$ : 緑の明度,  $B$ : 青の明度

背景画像 $A_n$ の設定では、落下中の落石の影響が反映され、同一の落石により移動体が2個発生したと検出することを防ぐため、14, 15フレーム前の $I_{n-14}$ ,  $I_{n-15}$ の平均値として更新する。本研究では、映像のフレームレートは全て30fpsであるため、0.5秒間の待機時間を経た後、切羽監視手法による落石の検出を開始する。

背景差分法の処理の流れを図-1と以下に示す。

- 1) フレームを取得し、入力画像 $I_n$ に変換する。
- 2) 14, 15フレーム前の入力画像 $I_{n-14}$ ,  $I_{n-15}$ の平均値より背景画像 $A_n$ を更新する。

$$A_n = 0.5I_{n-14} + 0.5I_{n-15} \quad (2)$$

- 3) 入力画像 $I_n$ と背景画像 $A_n$ の濃淡値の差の絶対値である差分画像 $D_n$ を作成する。

$$D_n = |I_n - A_n| \quad (3)$$

- 4) 差分画像 $D_n$ の閾値を超える濃淡値を持つ画素を移動体の検出箇所とし、フレーム上に黄色で表示した出力画像 $U_n$ を作成する。

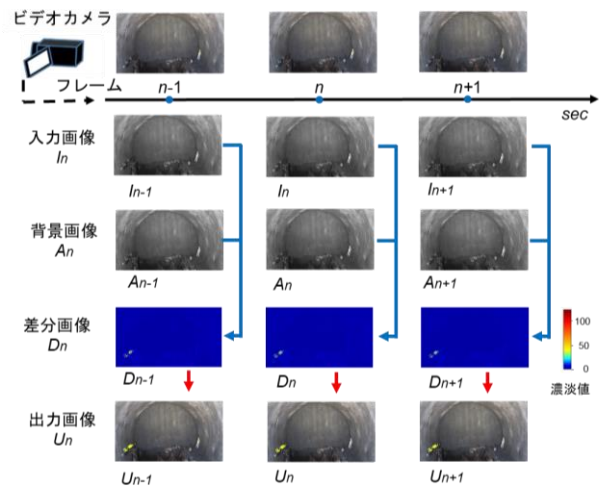


図-1 背景差分法の概要と移動体の検出

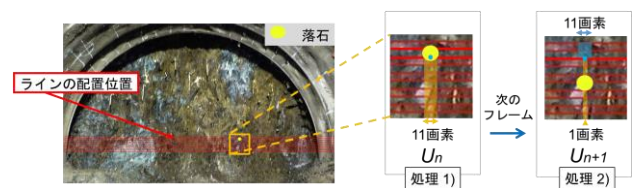


図-2 ラインの設置と落石検出のアルゴリズム

- 5) ステップ1から4を繰り返す。

差分画像 $D_n$ の濃淡値が大きい画素は、移動体により大きな濃淡値の変化が生じた部分となる。 $D_n$ はグレースケール画像であると濃淡値の差が分かりにくいいため、カラー画像に変更して説明を行う。また、粉塵といった微小な物体や、映像のノイズを除去するため、出力画像 $U_n$ の作成時に濃淡値の差、画素の連結数に閾値を設ける。落石が発生した場合も、閾値以上の濃淡値の変化が生じると考え、閾値以上の画素を持つ箇所を落石の候補となる移動体とした。

### (3) 落下物の検出

落石は鉛直下方向の落下物であることから、落下物を検出する処理を導入した。

まず、図-2に示すように切羽に対して横断方向の画素線上に、同一の落石が少なくとも3フレーム連続で確認されるよう等間隔にラインを配置する。そして、落石が発生すると、出力画像 $U_n$ のライン上に落石が検出され、次のフレームである $U_{n+1}$ では、より鉛直下方向の位置に落石が検出されるといった動きを3フレーム間で2回連続繰り返す。以上の点に留意し、ステップaからcに示す落石検出の処理を作成した。

- a)  $U_n$ のライン上で連結する閾値以上の濃淡値の差を持つ画素ごとに $x$ 座標の平均値を算出する。ただし、 $U_n$ の鉛直上方向の $x$ 座標 $\pm 5$ 画素のライン上に移動

体が検出されるものは除く。

- b) 次のフレーム  $U_{n+1}$  で、1)で求めた画素の鉛直下方向のライン上で移動体が検出され、鉛直上方向の  $x$  座標  $\pm 5$  画素のライン上に移動体が検出されない。
- c) a), b)の処理を3フレーム間で2回連続満たせば、警報装置を作動する。

ステップ a から c では、ライン上で閾値以上の濃淡値の差を持つ連結した画素に着目しているため、重機や作業員がライン上に映った場合や、複数の落石が同時に発生した場合も落石のみ検出する可能性がある。本研究では解析時間を考慮せず、撮影した全てのフレームに対して解析を行った。

### 3. 各閾値の設定

トンネル坑内の限られた照度では、一律な照度で切羽を撮影できないため、濃淡値の差の変化がどの程度あれば背景差分法による落石の検出が可能か把握する必要がある。本章は、落石を模擬した動画で、落石の検出に必要な濃淡値の差の閾値について検証した。また、落石と見えず差分画像の閾値以上の濃淡値の差を持つ画素に含まれるノイズを除去するために必要な画素の連結数の閾値についても検証した。



図-3 室内実験の概要

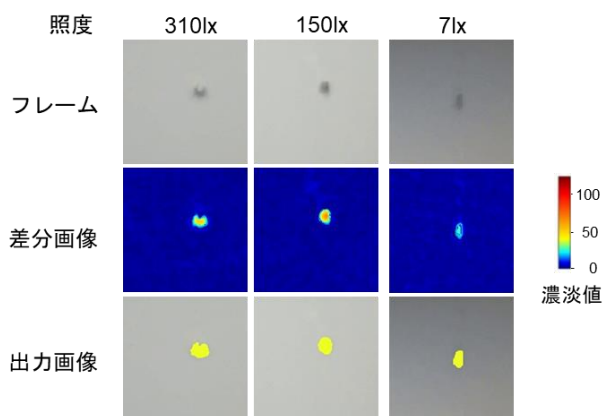


図-4 照明別の解析結果

#### (1) 濃淡値の差の閾値の検討

室内実験の概要を図-3に示す。カメラの設定は、解像度 1280×720pixel、フレームレート 30fps とした。実験では落石を模擬して径深 70mm の白球が落下する過程を白色の壁を背景に撮影した。撮影距離は 5m と 10m の2種類、落下物発生箇所の垂直面の照度は照明の明るさを調整して、310、150、7lx の3種類とし、6つの条件下で落下物を 10回発生させた。

撮影距離を 5m とした時の落下物発生箇所の解析結果の一例を図-4に示す。図の画像は上段図から入力画像、差分画像、出力画像、また図中の左列ほど照度が高い照明での結果である。濃淡値の差の閾値を大きくすれば、ノイズを除去できるが落石を見落とす可能性も上がる。落下物を見落とさなく検出するため、濃淡値の差の閾値によるパラメータスタディを行い、落下物発生中の全フレームで落下物が移動体として検出される濃淡値の差の閾値を求めた。その結果、濃淡値の差の閾値を 7 以下にすることで、全フレームで落石を検出できた。

#### (2) 画素の連結数の閾値の検討

トンネル坑内では、粉塵といった微小な物体や、映像のノイズにより、差分画像で閾値以上の濃淡値の差を持つ画素が生じる可能性がある。そこで、濃淡値の差の閾値を 7 とし、図-5の赤色の枠に示すトンネル坑内の映像の切羽領域の不動部分を対象に閾値以上の濃淡値の差となる画素の連結数を求めた。その結果、図-6に示すように画素の連結数は最大で 13pixel であった。これより、出力画像上で画素の連結数の閾値を 13pixel とすることで、点在するノイズを除去できる。本研究では、濃淡値の差の閾値を 7、画素の連結数の閾値を 13pixel とした。

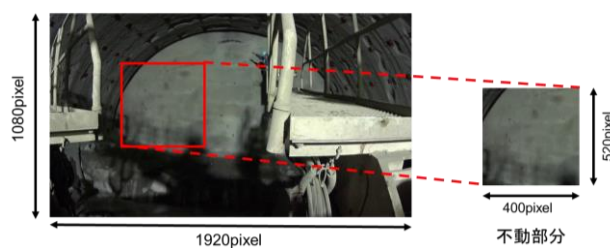


図-5 撮影映像のフレーム

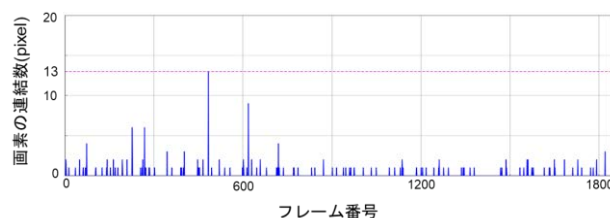


図-6 画素の連結数の解析結果

#### 4. 切羽映像での落石の検出

本章では、切羽前で作業員が発生させた落石を切羽の大規模崩壊の前兆となる落石と見立て、落石を検出できることを検証する。

##### (1) 掘削映像の概要

映像のフレームを図-7に示す。トンネル幅が約11.8mの切羽の前で、図-7の黄色の枠で囲む箇所から落石を発生させ、表-1に示す解析条件のもと、落石を検出できるか検証を行った。

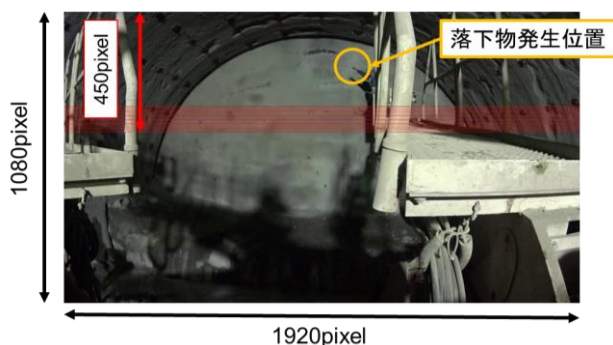


図-7 落石検出の過程

表-1 解析条件

項目	値
ラインの本数	21本
ラインの間隔	5pixel
ラインとフレーム上端の距離	350~450pixel
解像度	1920×1080pixel
濃淡値の差の閾値	7
画素の連結数の閾値	13pixel

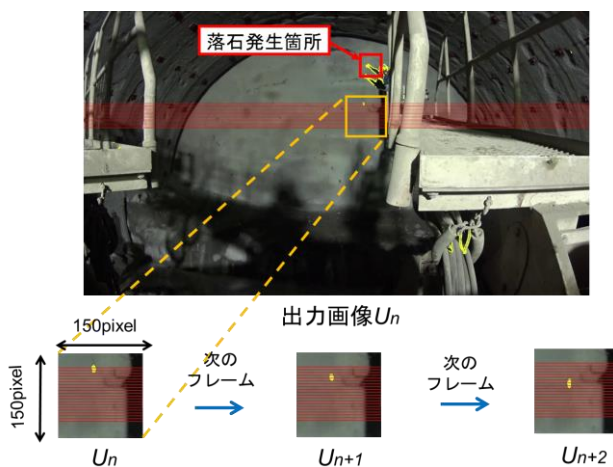


図-8 落石検出の過程

##### (2) 掘削映像の解析結果

落石がライン上にある時刻の出力画像を図-8に示す。その結果、ライン上で3フレーム連続で落石を移動体として検出できており、設置したラインによる処理で落石を検出することができた。また、作業員や重機の動きにより生じた移動体がライン上に発生したフレームも確認されたが、落石として誤検出することはなかった。

#### 5. まとめ

本研究では、切羽の大規模崩壊の前兆となる落石を監視するために、粉塵といった微小な物体や映像のノイズの除去について検討した。そして、切羽の大規模崩壊の前兆となる落石を想定した映像を用いて、落下物である落石を検出する処理の導入により、落石を検出することができた。以上より、画像解析によって、切羽の大規模崩壊の前兆となる落石の監視を行うことが可能であり、肌落ち災害の発生リスクを軽減する可能性があると言える。一方、解析範囲内に落石以外の移動体が多く含まれた場合は、誤検出が生じる可能性があることや、リアルタイムに解析を行う必要がある。今後、実トンネルでの運用実績を積み重ね、システムの改良を重ねることで解析精度向上に努めていく次第である。

#### 参考文献

- 古川直孝, 伊藤和也, 堀智仁, 玉手聡, 豊澤康男: トンネル切羽の肌落ちによる死傷災害の調査分析と安全対策の検討, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol.67, No.2, pp.125-130, 2011.
- 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, <<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000149309.html>>, (入手 2020.05.30) .
- 西山哲, 大西有三, 龍明治, 中井卓巳: トンネル施工管理のためのデジタル画像計測法の研究, 日本材料学会, Vol.59, No.3, pp.189-191, 2010.
- 熊谷幸樹, 寺島佳宏, 吉田良勝: 切羽安全監視システムの開発と不良地山での試験適用, 土木学会第66回年次学術講演会論文集, VI-327, 2011.
- 中村隆史, 藤岡大輔, 中岡健一, 西山哲: トンネル切羽の変状モニタリングのための画像解析技術の研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.73, No.2, pp.226-233, 2017.
- 藤岡大輔, 中村隆史, 西山哲, 中岡健一: 画像処理技術を利用したリアルタイム切羽監視システムの開発, 第45回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, Vol.45, pp.55-60, 2018.
- Francesco, C, Alessandro, V: *Machine Learning for Audio, Image and Video Analysis*, Springer London, pp.67-68, 2015.