

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

藤岡 大輔^{1*}・中村隆史²・西山哲³・中岡健一¹

¹株式会社大林組 技術研究所 地盤技術研究部（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

²岡山大学大学院 環境生命科学研究科（〒700-8530 岡山市北区津島中新野3-1-1）

³岡山大学 環境生命科学研究科（〒700-8530 岡山市北区津島中新野3-1-1）

*E-mail: fujioka.daisuke@obayashi.co.jp

山岳トンネル工事の切羽災害を防止するため、作業中は常に切羽の状態を監視することが重要である。大規模崩落の発生の前兆として、時間遅れの違いはあるものの小規模な落石が見られることがある。このような微小な落石を目視によって把握することができず、大規模崩落に巻き込まれるといったケースの切羽災害を防止するために、画像処理技術である「背景差分法」を切羽監視に適用し落石検知を試みた。本報告では、背景差分法による画像処理により落石検知が可能であること、実際のトンネル切羽監視への適用には切羽岩盤の画像と同時に取り込まれる作業員や重機などのノイズ除去が必要であり、その方法を検討し、適用事例を示した。

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

1. はじめに

山岳トンネル工事の切羽作業では、2000年から2010年までに全42件の肌落ち・落石による死傷病災害が発生している。被災した全死傷者45名の内、65%が休業4日以上となっており、肌落ち災害は一度発生すると重篤な災害に繋がりがやすくなっている¹⁾。厚生労働省からは「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止に係わるガイドライン」が策定され、これまでの労働安全衛生関係法令と相まって、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されている²⁾。大規模な崩落が発生する前には、時間遅れに違い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、このような予兆がある場合には、大規模崩落に至るまでの間に、作業員に対して切羽からの速やかな退避を促すことが重要となる。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、複数の重機や人が錯綜する中で、切羽全体のごく一部で生じる微小な変化を確実に目視で捉えることは困難であり、作業員の退避が遅れて肌落ち災害が発生していた。

そこで筆者らは、切羽の一部で生じる落石などの微小な変化を「変状」と称し、これを検知するために、非接触で面的かつリアルタイムに計測が可能な画像処理技術を利用した切羽監視システムについて検討を行ってきた^{3,4)}。

本研究では、画像処理技術として一般的な動体検出手法である「背景差分法⁵⁾」の切羽監視への適用性を検討した。背景差分法は、2枚の画像(直前と現在の画像)の色の变化を比較し、その差を変状として抽出する手法である。本手法は非常に少ない計算量で瞬時に解析が可能であり、実際のトンネル坑内の照明環境であっても、小さな岩石の落下まで抽出が可能であるため、切羽監視への適用性は高い。しかし、実際の切羽に適用するためには、人や重機の動きや、粉塵・振動によるノイズを除去し、小さな落石のみを変状として検知する必要がある。

本報告では、背景差分法について概説し、背景差分法を実際の切羽監視に適用するため、監視領域やマスク領域の設定、ノイズフィルターや変状判定といった切羽監視の手順を示し、各閾値の設定について検討した結果を述べる。また、ビデオカメラ等で構成されるリアルタイム切羽監視システムの案を示したのち、実際の切羽映像の解析事例から肌落ち災害の発生リスク低減への可能性について示す。

2. 背景差分法の原理

背景差分法は、背景と見なす直前の画像と現在の画像において、同一画素における色の变化を求めることで移

動物体を検出する手法である(図2-1)。

背景差分法の画像処理手順⁴⁾を図2-2に示す。

- ① ビデオカメラから取得したカラー画像 F_n をグレースケール画像(輝度画像)に変換し、入力画像 I_n とする。カラー画像は色情報であるRGB値(R:赤, G:緑, B:青, それぞれ0~255)で構成されており, RGB値に重みを付けてグレースケール値(0~255)に式(1)で変換する。グレースケール値は以後, 輝度と記す。

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

- ② 直前の入力画像 I_{n-1} を α で重み付けし, 平均画像 A_n を式(2)で更新する。平均画像 A_n も輝度画像である。 $n=2$ のとき, すなわち最初のカラー画像が入力画像 I_1 となる場合は式(3)で計算する。平均画像は過去の入力画像を参照し, 重み付け平均するため, それぞれの入力画像だけで生じたノイズを低減できる。

$$\begin{cases} A_n = (1 - \alpha)A_{n-1} + \alpha I_{n-1} & (n \geq 2) \\ A_n = I_{n-1} & (n = 2) \end{cases} \quad (2)$$

- ③ 平均画像 A_n と入力画像 I_n との差の絶対値(輝度差)である差分画像 D_n を計算する。

$$D_n = |I_n - A_n| \quad (4)$$

- ④ 差分画像 D_n の閾値を超える値(輝度差)を持つ画素を抽出し(閾値以下の輝度差を0として D_n を更新する), 入力画像 I_n と更新された差分画像 D_n と足し合わせた出力画像 U_n を出力する。出力画像は撮影された映像に変状箇所を重ねて表示した画像となる。

$$U_n = I_n + D_n \quad (5)$$

- ⑤ ①~④を繰り返す。閾値を超えて抽出された画素が, 設定されたサイズ以上の塊となって表れた場合は, 変状ありとして警告を発する。

(b) 累積領域選択

計測開始から数秒間の間, 背景差分法により動体検出を行い, 動体として検出された画素周辺を除外した領域を設定する。ここでも閾値を超える輝度差があった画素を動体として抽出しているが, このとき抽出された動体は, 変状ではなく人や重機, 装薬時の脚線といった切羽の前を移動する計測対象外の物のことである。まず, 動体として抽出された画素を累積していき, それらの画素周辺から指定した半径の範囲で, 除去領域を設定する。

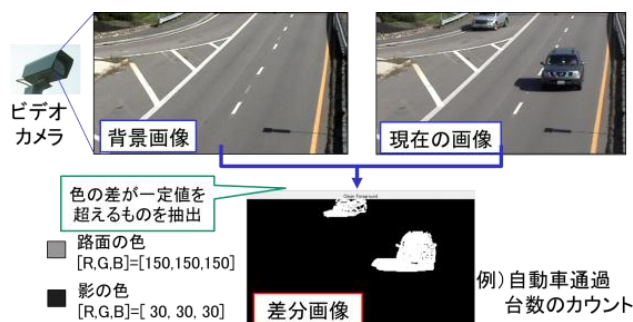


図2-1 背景差分法の動体検出の例

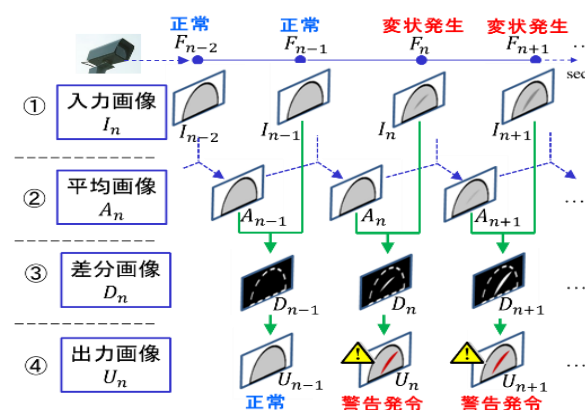


図2-2 背景差分法の画像処理手順⁴⁾

3. 背景差分法の切羽監視への適用

背景差分法を実際の切羽監視に適用するためには, 作業中の人や重機の動きを隠し, 粉塵や振動によるノイズを除去し, 落石といった変状のみを検出する必要がある。図3-1に背景差分法を使った切羽監視への適用フローを示す。なお, 背景差分法の一連の画像処理には技術計算言語であるMATLABを利用した。

(1) 監視領域の設定

第1フレームの取得後, 監視領域の設定として以下の方法を行う。

(a) 任意形状選択

任意に(矩形, 自由形状)を監視領域を選択することができる。自由形状選択では, 複数箇所の選択が可能であるため, 詳細に監視領域を設定することが出来る(図3-2)。

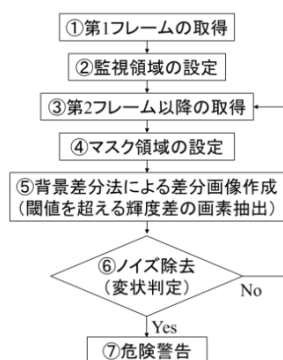


図3-1 切羽監視への適用フロー

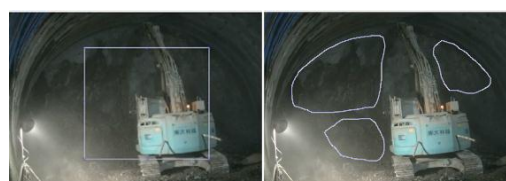


図3-2 監視領域の設定(左: 矩形, 右: 自由形状複数)

累積領域を除去することによって、送風で揺らぐ脚線といった、同じ地点を繰返し動くものを変状として誤検出させないように監視領域を設定することができる。

輝度差の閾値を小さくすると、照明の明滅や重機の影の動きといった輝度差が小さいものまで抽出できるが、映像が持つノイズも含めて抽出してしまう恐れがある。

図3-3に、10秒間動体検出を行って設定した累積領域除去を行った例を示す。輝度差閾値を徐々に大きくするとノイズが除去されていき、最終的に10としたとき、ノイズは抽出されず脚線の動きだけを抽出し、脚線周辺を除外領域として設定することができた。これによって、脚線の動きを無視した状態で、吹付けコンクリート面の変状を監視することができる。

(2) マスク領域の設定

監視領域を設定後においても、監視領域内の重機が動いたり、人が監視領域内に入ってくる場合がある。大きな動きは、3章(3)で述べる方法でノイズとして除去されるが、重機の動きの場合は、アームの大きな動きに合わせて油圧ホースが揺れるといった小さい動きも含まれているため、このような小さい動きがノイズとして除去されない場合が多い。人の動きも同様であり、大きい動きの中に小さい動きを多く含んでいる。これらの動きを変状として誤検出しないため、人や重機、それらの周辺を監視領域から隠すマスク領域を設定することが有効である。

マスク領域の設定には、エッジ抽出を使った方法を用いる。エッジとはグレースケール画像において輝度が急に変化する箇所であり、人や重機のエッジを抽出し輪郭や模様を2値化した。図3-4にエッジ抽出を使ったマスク領域の設定の例を示す。まず、グレースケール画像のエッジ抽出を行う。続いて、エッジ抽出された画素周辺から指定した半径の範囲で、マスク領域を設定する。エッジ抽出では、重機や照明、鋼製支保工の輪郭や模様が抽出されており、これらをまとめてマスク領域として設定することができた。マスク領域の設定は、第2フレーム以降にフレーム毎に行うため、マスク領域は重機の動きを追従できる。

(3) ノイズフィルタの設定

図3-5にノイズフィルタならびに変状判定の流れを示す。背景差分法で作成された差分画像は、輝度差閾値を超える画素が抽出される。抽出された画素が塊として複数連結されている場合、それらを一つの移動体として捉える。ノイズフィルタとして、まず移動体面積(画素数)と移動体個数においてノイズの識別を行い、最終的に移動体幅から変状か否かを判定する。

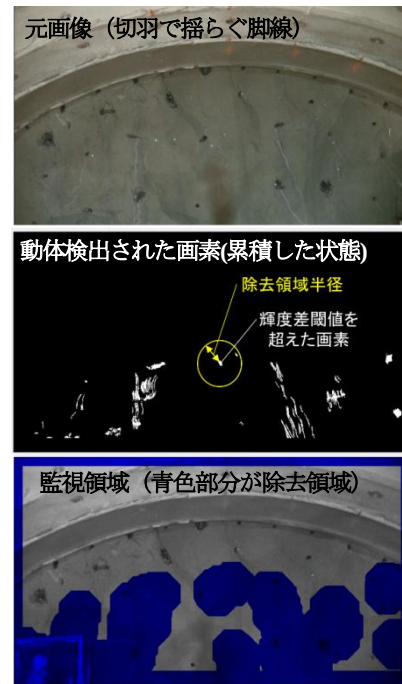


図3-3 監視領域の設定(累積領域除去)



図3-4 エッジ抽出を使ったマスク領域の設定

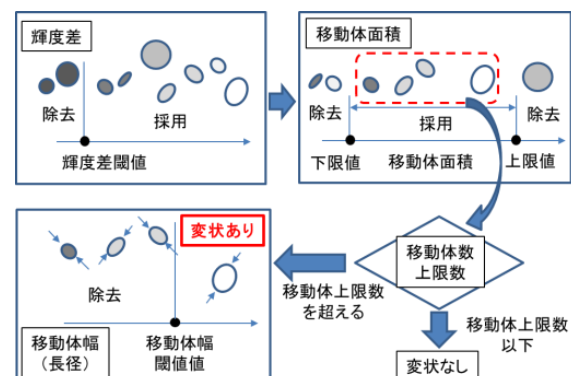


図3-5 ノイズフィルタと変状判定の流れ

(a) 移動体面積

移動体面積(画素数)の上限値と下限値を設定し、下限値未満のものと上限値を超えるものをノイズとして除外する。下限値を設定することで、粉塵などによる移動体を取り除くことができる。ただし、落石を抽出した移動体の面積が下限値を下回った場合、その落石を見落とすことになる。上限値の設定では、人や重機などの大きな動きを取り除くことができる。したがって、崩落の規模が大きな肌落ちはノイズとして除去されてしまうが、肌落ちの予兆となる可能性のある小さな落石を捉えることにより、肌落ち災害のリスクは低減できると考えられる。

(b) 移動体上限数

移動体上限数を設定し、一つのフレームにおいて上限値を超える多くの移動体が抽出された場合、切羽に変状があったと判断せずに、映像に異常があったと判断し、すべてノイズとして除去する。例えば、ビデオカメラが大きく振動した場合や粉塵が舞い上がった場合などに移動体個数が設定値を上回り、ノイズとして除去される。移動体面積と同様に、移動体上限数の設定次第で、多数の移動体が表れる大規模な肌落ちが発生した場合は、これらをノイズとして除去してしまう可能性がある。

(c) 移動体幅閾値

移動体幅閾値(pixel)を設定し、移動体幅が閾値以上の場合、変状として検知し、危険警告を発する。移動体幅は長径を採用する。

動体の縦幅となり14pixelとなる。移動体の長径は移動体の形状から算定され14.5pixelとなった。変状判定のための移動体幅は10 pixelと設定すれば、長径を採用するため変状として検出される。この移動体を変状として検出後、十数秒後に肌落ちが発生した。そのため、このケースでは小さな落石を検出後に危険警告を発すれば、作業員を切羽から退避させることができることになる。肌落ちの予兆を検出してから数秒しかない場合でも、危険箇所から飛び退く動作が行えるため、肌落ち災害発生リスクの低減が可能であると考えられる。

(2) 移動体面積下限値と移動体幅閾値

移動体面積下限値と移動体幅閾値は、面積と幅は関係性があることから同じ問題として扱う。移動体面積下限値は、誤検出を減らすためには大きいほうがよいが、落石を見逃さないためには小さいほうがよい。移動体幅閾

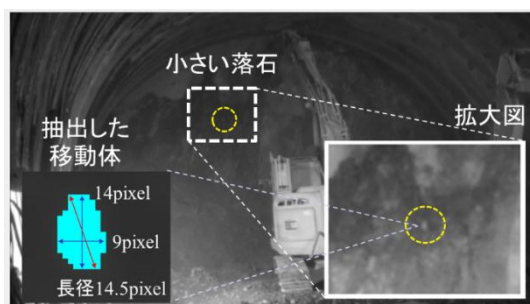


図4-1 小さい落石と抽出した移動体（掘削映像A）

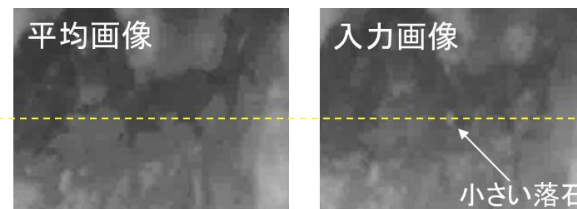


図4-2 落石周辺部の平均画像と入力画像

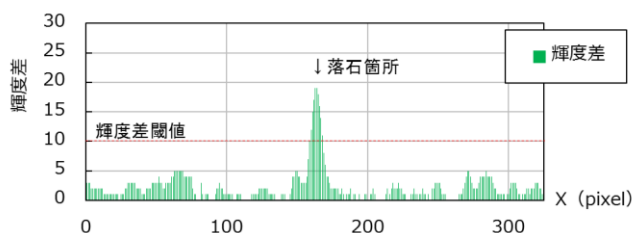


図4-3 落石周辺部の平均画像と入力画像の輝度差

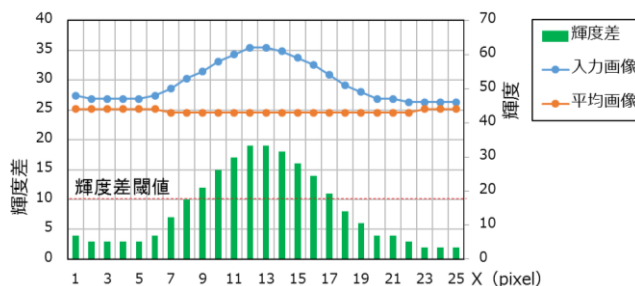


図4-4 落石箇所の平均画像と入力画像の輝度と輝度差

4. 各閾値の設定

(1) 輝度差閾値と入力画像の重み

式(5)の輝度差閾値は10程度、式(2)の入力画像の重み α は0.01程度と設定すると、トンネル坑内の照度であっても落石の抽出が可能である⁴⁾。図4-1は機械掘削時に小さい落石を撮影し、移動体として抽出した例である。この動画を掘削映像Aと呼ぶこととする。図4-2に入力画像ならびに平均画像を落石周辺部で切り取った図を示す。平均画像は落石発生前となるため、落石は写っていない。入力画像の重み α は0.01とした。図4-3には、図4-2中の落石の位置に水平破線が引かれた位置における平均画像と入力画像の輝度差を示す。図中央の突出したデータが落石箇所の輝度差である。落石箇所以外の地点の輝度差は照明の明滅等によって生じたノイズであり、その範囲は0～5であった。そのため、輝度差閾値が10程度あれば、これらのノイズを除去し、落石箇所を抽出することが確認できる。図4-4に落石箇所の平均画像と入力画像の輝度と輝度差を示す。輝度差閾値を10とした場合、輝度差閾値を超える画素は9pixelとなり、この値は抽出された移動体の横幅となる。鉛直方向も同様に計算すると、移

値は落石の大きさを想定できれば設定することができる。4章(1)で紹介した掘削映像Aは、トンネル幅が約15mであり、画像上のトンネル幅は1500pixelで撮影されているため、この計測の分解能は $15000\text{mm}/1500\text{pixel}=10\text{mm/pixel}$ となる。肌落ちの予兆となる落石のサイズを100mmと仮定すると、この落石を検出するには移動体幅の設定値を10pixelにする必要がある。必要な分解能が得られない場合は、より高画素なカメラや望遠レンズ等の導入が必要である。表4-1に掘削映像Aで検出された小さい落石の移動体の長径と短径、面積を示す。移動体の形状から考えると、例えば5画素の面積を持つ移動体があった場合、この移動体を作ることができる最大の移動体幅は、画素を一列に5つ並べたときの5pixelとなることから、移動体の面積は必ず長径よりも大きくなる。ここでは、移動体面積下限値を移動体幅閾値と同じとし、移動体面積が移動体幅閾値を超える全ての移動体を抽出するようにした。このように、ノイズフィルターを通過した移動体の移動体幅で変状の判定を行うこととした。

(3) 移動体面積上限値

移動体面積上限値は一意に決定することができない。仮に大きめの値を設定しておき、人や重機の動きを誤検出してしまうようであれば、上限値を小さくしていくことが現実的な運用方法である。

(4) 移動体上限数

移動体上限数を小さくすると、肌落ちの予兆として落石が多数発生する場合に、これらを見逃してしまう。移動体上限数も移動体面積上限値と同様に、仮に大きめの値を設定し、ノイズとして取り除けない粉塵等が頻発する場合は少しずつ小さくしていく必要がある。

5. リアルタイム切羽監視システム案

リアルタイム切羽監視システムは、掘削サイクルの中で作業員が切羽に近づく工程となる「支保工建込み」、「装薬」において運用する。図5-1に切羽における機器の配置例、図5-2に機器構成図を示す。ビデオカメラは、切羽から10～20m離れたトンネルジャンボ運転席天井などにノートPCと共に設置する。ビデオカメラとしてノートPCに接続できるUSBカメラを採用し、USBカメラで取得された動画は、リアルタイムでノートPCに転送され、画像処理とデータ保存、モニタリング結果の表示が行われる。画像処理結果で切羽に変状が検知された場合、パトランプといった警報装置で作業員に切羽からの退避を促す。落石発生から警告までの所要時間は0.5秒程度である。ノートPCはiPadと通信されているため、切羽監

視責任者が持つiPadでノートPCの操作が行えるとともに、モニタリング状況を把握することができる。

6. 実際の切羽での適用事例

上述した監視領域とマスク領域の設定やノイズフィルター、変状判定を用いて、切羽の掘削映像に背景差分法を適用した事例を示す。掘削映像であるため、切羽面の監視領域が狭くなっている。ノイズフィルターと変状判定の設定値はいずれの掘削映像でも同じである(表6-1)。

(1) 掘削映像A

掘削映像Aは、ブレイカーによる切羽掘削状況を撮影したものである。監視領域設定として、撮影範囲全域を指定し、10秒間待機し累積領域除去範囲(除去領域半径128pixel)を設定する。マスク領域設定はエッジ抽出による方法とした(除去領域半径77pixel)。図6-1にはモニタリング画面と抽出された移動体を示す。累積領域除外範囲とマスク処理を組み合わせることで、複雑な動きする重機の影響をすべて取り除くことができた。また、マスク処理はフレーム毎に行うため、重機の動きに追従させる

表4-1 抽出された移動体の寸法と面積

No.	長径 (pixel)	短径 (pixel)	面積 (画素数)	変状 判定	No.	長径 (pixel)	短径 (pixel)	面積 (画素数)	変状 判定
1	14.5	8.9	99	○	9	5.7	4.0	14	×
2	17.8	12.6	173	○	10	8.6	3.6	22	×
3	7.0	4.8	25	×	11	7.7	4.3	23	×
4	8.7	4.1	24	×	12	4.8	3.9	11	×
5	7.6	3.7	18	×	13	5.0	3.3	12	×
6	6.7	5.0	23	×	14	6.5	3.1	14	×
7	10.7	7.1	51	○	15	5.8	4.2	18	×
8	6.7	3.7	18	×	16	5.7	4.8	19	×

移動体幅閾値10pixel

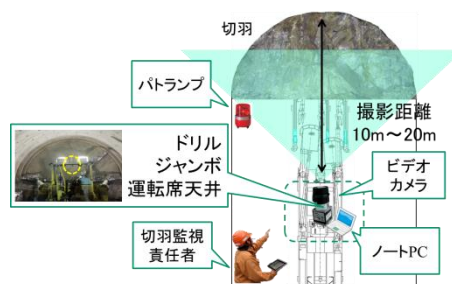


図5-1 切羽における機器の配置例

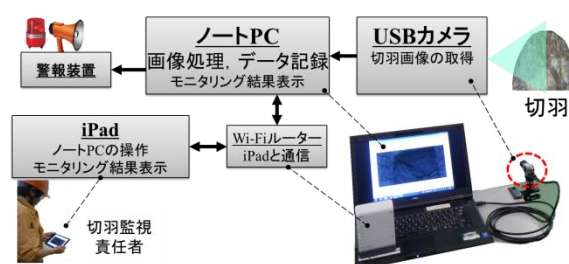


図5-2 リアルタイム切羽監視システムの機器構成図

ことができた。モニタリング画面では、抽出された移動体を水色、変状箇所は黄色円で表示される。結果として、二つの移動体の変状として検出された。

(2) 掘削映像B

掘削映像Bは、ロードヘッダによる切羽掘削映像である。監視領域設定として、吹付けコンクリートが映っている箇所を指定し、マスク領域設定はエッジ抽出による方法とした(除外領域半径77pixel)。図6-2には、モニタリング画面と抽出された移動体を示す。マスク領域設定により、吹付け面以外の領域を除外することができた。結果として、二つの移動体の変状として検出した。その他にも移動体を抽出しているが、いずれも移動体幅閾値を下回っているため、変状として検知されていない。

7. まとめ

切羽の大規模崩落の予兆となる微小な落石が生じた場合、これを検知するため、画像処理技術である背景差分法を適用した切羽監視システムの開発を行った。

- 閾値を適切に設定することにより、落石を捉えることができた。
- 切羽での適用には、監視領域とマスク領域の設定、ノイズフィルタの設定値、変状判定の閾値の設定が重要であり、それらの設定値の目安を示した。
- これらの手法に警報機構を追加することで、大規模崩落前に作業員を切羽から退避させ、肌落ち災害の発生リスクを低減できる可能性を示した。

現場適用に当たっては、その都度、現場の状況に合わせた各種の設定値を決定して運用していく必要がある。

参考文献

- 1) 吉川直孝, 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, 第67巻, 2号, pp.125-130, 2011

- 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, 2016
- 3) 藤岡大輔, 畑浩二, 西山哲: 特徴点追跡手法を用いた岩盤構造物の変状モニタリングに関する研究, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, III-381, 2017
- 4) 中村隆史, 藤岡大輔, 沖西将弥, 西山哲: 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, 第42回土木情報学シンポジウム講演集, 2017
- 5) 松阪喜幸: デジタル画像処理[改訂新版], 画像情報教育振興協会, pp.286-289, 2015

表6-1 ノイズフィルタと変状判定の設定値

輝度差閾値	10
入力画像重み α	0.01
移動体面積上限	300画素
移動体面積下限	10画素
移動体幅閾値	10pixel
移動体上限数	10個

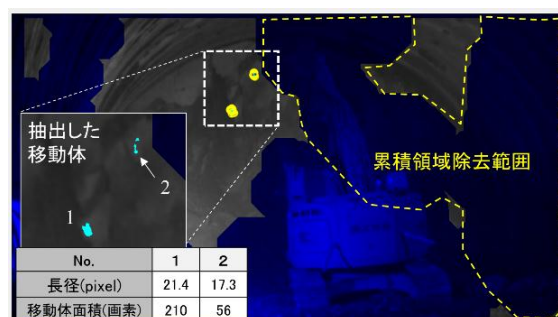


図6-1 モニタリング画面と抽出した移動体(掘削映像A)

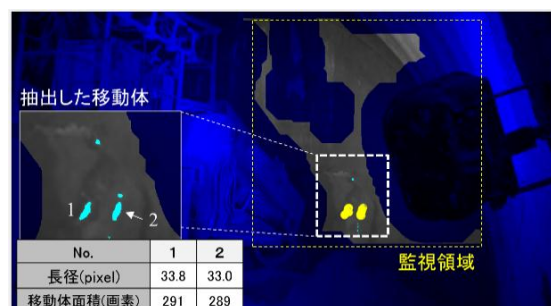


図6-2 モニタリング画面と抽出した移動体(掘削映像B)

DEVELOPMENT OF TUNNEL FACE REAL TIME MONITORING SYSTEM USING IMAGE PROCESSING

Daisuke FUJIOKA, Takafumi NAKAMURA,
Satoshi NISHIYAMA, Kenichi NAKAOKA,

In order to prevent labour accidents due to rock fall event in tunnel face, it is important to always monitor behavior of face during work. However, it has been difficult to visually grasp minute changes by visual monitoring by the director responsible for face monitoring. Therefore, we have been developing tunnel face monitoring system using image processing that can be measured in a planar and in real time. As a result of studying the applicability of "background subtraction", it was found that the small falling rock could be detected even during work. In application examples, by detecting small fallig rock before a major collapse, we indicated possibility that the risk of accidents due to rock fall can be reduced.