

小型PCとウェブカメラによる リアルタイム岩盤崩落検知システムの開発

戸邊勇人^{1*}・伊達健介¹・横田泰宏^{1*}・宮嶋保幸^{1*}・山下慧^{1*}・川内見作^{2*}

¹鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²National University of Singapore (21 Lower Kent Ridge Road Singapore 119077)

*E-mail: tobeh@kajima.com

山岳トンネル工事において切羽の崩落の前兆である落石を検知することは、施工の安全上重要である。現在、この検知は熟練作業員の目視判断に依存しているため、しばしば見落としが発生している。そのため、見落としのない検知手法が様々に開発されており、その中の代表的なものとして、切羽の動画解析が挙げられる。しかし、既往の解析法には、カメラの振動や重機等の移動など、落石の誤検出となる要因を除去しきれない欠点があった。そのため我々は、背景の変化の検出により振動の影響を除去する技術と、移動体の速度の検出により落石以外の落下物を除去する技術を開発した。さらに、これらの技術を小型のPCとカメラに組み込むことにより、携行性に優れた落石検知システムを製作することができたので報告する。

Key Words : safe construction, tunneling, rock fall, video analysis, single board computer

1. はじめに

山岳トンネルの工事では、掘削直後の不安定な切羽で作業を行うことが多いため、切羽からの岩塊の崩落の発生が重大な災害につながる危険性を有している。そのため、切羽作業に先立って切羽観察を行い、切羽状況を確認した上で、適切な対策を施すことにより、作業上の安全を確保する必要がある¹⁾²⁾。

しかしながら、現状の切羽観察は、切羽作業の担当者や地質技術者による目視判断に依存しているため、個人差や見落としが生じることがある。切羽作業の安全性を向上するには、このような判断の個人差や見落としのない判断手法を確立していくことが重要である³⁾。

昨今、自動運転分野に代表されるように、カメラ映像をもとに道路や歩行者をリアルタイムに検出する画像認識技術が急速に発展してきている。そのため我々は、このような最新の画像認識技術に着目し、リアルタイム岩盤崩落検知技術の開発を行ってきた。動画から落石を認識する手法としては、背景差分法のように動画のフレーム間の差異を検出する方法が代表的である。しかしながら、切羽の周辺には作業員や重機など多くの移動体が存在しており、これらをすべて除去することが困難であった。また、切羽を撮影するカメラを重機などに設置することから、動画はカメラの振動による影響を受けやすい欠点があった。

そこで我々は、新たに開発した、背景の変化を検出し振動を除去するアルゴリズムと、動画中の移動体を検出するためのアルゴリズムを活用することにより、リアルタイムに岩盤崩落を検知できるシステムを製作した。そのシステムの概要と現場での検出例について報告する。

2. リアルタイム岩盤崩落検知技術の概要

切羽における大規模な崩落が発生する前には、小さな落石の発生が前兆として確認されることが多い。この前兆をリアルタイムに検知し、注意喚起することは、切羽における施工の安全性を確保する上で非常に重要である。



図-1 システム外観

我々は、これまでに切羽押出し変位計測によるリアルタイムトンネル切羽変状監視システムを開発し、主に進行性の軟岩・土砂地山における切羽崩落の回避を図ってきた⁷⁾。一方で、より突発的で不連続な切羽の分析にはその前兆である小さな落石の監視が重要となる。その目的のためには、対象断面の細かな変化を面的に検知できるカメラ映像による解析がより適していると考えられる。カメラ映像は1秒間30枚程度の写真（フレーム）を撮り、それらをつなぎ合わせることで映像化している。そのフレームを時系列で比較し、背景差分法等の手法を用いることで、落石などによる映像に生じた変化を抽出できる。しかし、単純に適用するだけでは、手振れによる疑似的な物体の移動や、重機あるいは作業員の実際の物体の移

動も認識してしまい、上手く落石だけを抽出することが難しく、それを精度良く分析するためには高速な動画解析が可能な重厚なコンピュータが必要であった。

そこで、新たな動画解析のアルゴリズムを構築し、このアルゴリズムに則ったプログラムを小型のシングルボードコンピュータ（JetsonNano, CPU:HMP Dual Denver 2MB L2+Quad ARM A57/2MB L2, GPU:NVIDIA Pascal 256 CUDAコア, メモリ:8GB）に搭載した上で、ウェブ会議等に使用する安価な動画撮影カメラ（1280×720ピクセル, フレームレート30fps）からの動画を解析させることで、現場でも使用可能な携行性の高いシステムとして開発した（図-1）。これにより、実際に現場で発生する落石を検知することができる。

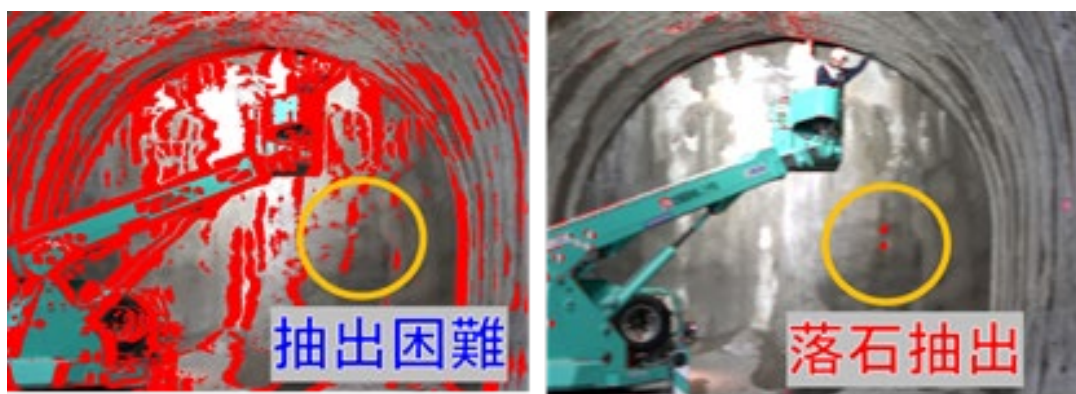


図-2 振動除去前後の比較（10cm角の落石検知実験）

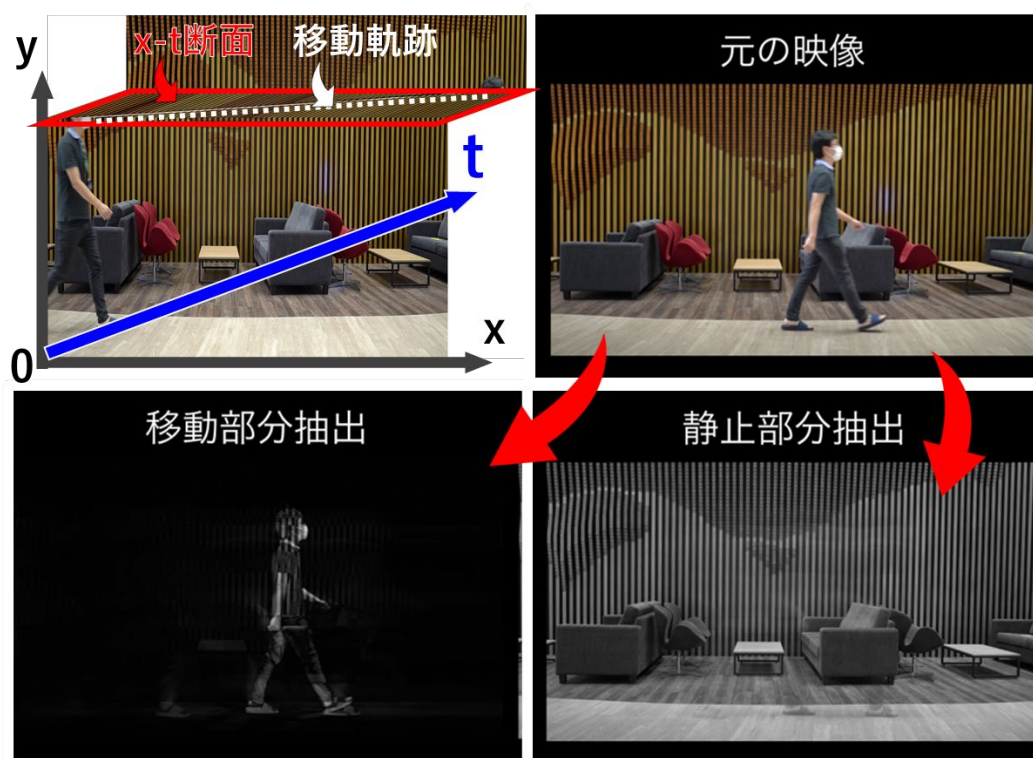


図-3 時空間画像解析技術の概要と使用例

3. 構築したアルゴリズムの特徴

今回開発したシステムに用いた、動画解析の2つのアルゴリズムの特徴を述べる。動画解析に要する時間は約0.2秒であり、ほぼリアルタイムで解析が可能である。

第1は、振動除去に対応した技術である。前述のとおり、工事現場で撮影された映像は、手振れや重機振動など疑似および実際の移動の影響を常に受ける。そのため、既存の画像解析アルゴリズムでは、それらの映像のブレも落石の発生と誤認してしまう可能性がある。そこで、映像の前後の風景変化からカメラがどのように振動したのかを推定し、ブレを軽減するアルゴリズムを実装した(図-2)。具体的には、映像の前後の風景変化からカメラがどのように移動したのかを推定し、移動しなかった部分だけを切り出して動画にすることで、あたかも手振れが無かったように自動編集するアルゴリズムとした。このアルゴリズムは、スポーツなどの振動が激しい対象物の撮影に特化しているアクションカメラに実装しているものと類似していると考えられる。

このアルゴリズムの検証結果を図-2に示す。この図の左側の画像は、意図的に大きな振動をカメラに与えながら、岩石の落下状況を撮影した生データの分析結果である。ここで、赤色で着色した範囲は全て物体の移動を検出した領域である。落石は、高所作業車から作業員が10cm角の岩石を落下させることで擬似的に撮影を行った。振動除去前では、落石がこれらのノイズ(赤色で着色した範囲)に紛れており、単独で抽出することが困難な結果となった。その一方、図-2の右側の画像は、新たに実装したアルゴリズムを同じ映像に適用して分析した結果である。カメラの振動によって発生したノイズが適切に除去されており、10cm角の落石が明確に抽出できた。

第2は、時空間画像解析技術(Spatio-Temporal image processing)を活用したノイズ除去技術である。時空間画像とは、平たく言えば動画データのことであり、静止画(x軸とy軸のみをもった画像)を、時間軸(t軸)方向に積み重ねx,y,tの3軸をもった画像データを意味する(図-3の左上)。この時空間画像をx軸とt軸に平行な面(x-t断面)として切り出すと、静止した背景はt軸に平行な線として抽出される。これに対し、x軸方向に移動した物体は、x-t断面上ではx軸とt軸に対して角度を持った線(移動軌跡)として抽出される(図-3の左上)。この移動軌跡とx軸とt軸のなす角度を検出することにより、移動物体の速度が算出できる⁹⁾。また、x軸だけでなくy軸も考慮することにより、移動物体の移動ベクトルをより詳細に算出できる。このようなアルゴリズムを用いることで、動画データから移動物体のみを抽出したり(図-3の左下)、それとは逆に、静止部分だけを抽出すること

ができる(図-3の右下)。そして、移動物体のうち、下方向に加速的に移動(落下)する物体のみを抽出することにより、落下物でない移動物体(ノイズ)を除去することができる。

4. 実現場での検出結果

本システムを実際の現場において落石検知の検出に用いた結果を記す。図-4は、実際の施工中に現場職員が撮影した動画から崩落の前兆となる細かい落石を高精度に検知した事例である。天端付近で小さな落石が発生した直後から落石を認識し、落下していく過程を十分に追跡できていることが確認できる。このときのカメラと切羽の距離は約10mであり、検出限界は約1cmであった。当該の切羽では幸いなことに大規模な切羽崩落の発生には至らなかったものの、このように確実に前兆を捉えることができれば、迅速な避難指示や有効な対策を講じることが可能となると考えられる。

5. おわりに

今回、振動除去技術と軸間画像解析技術を活用したノイズ除去技術を動画解析に適用することにより、切羽の岩盤崩落(落石)を検出するシステムを開発した。この

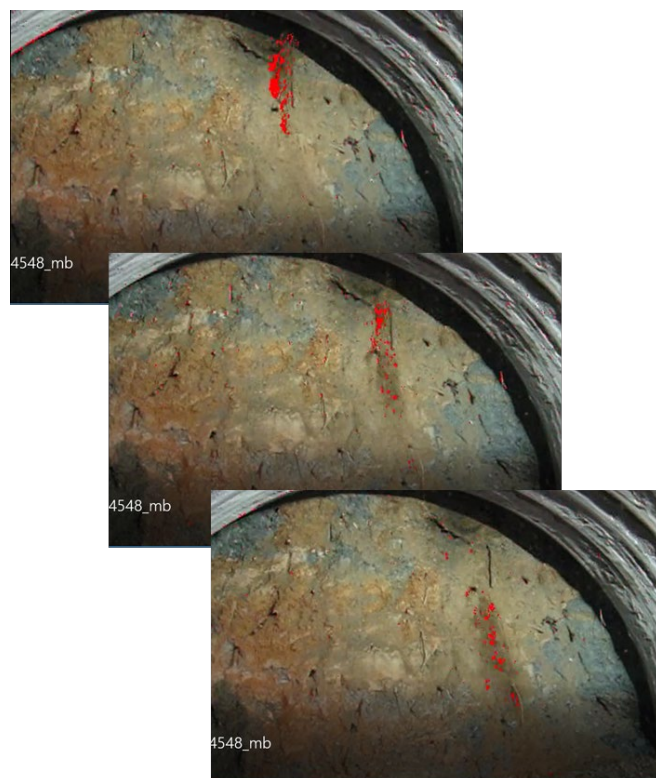


図-4 施工中の現場において撮影した動画の落石検出結果

システムを実際の現場で撮影した擬似的な落石の動画に適用したところ、数cm径程度の小さな落石を検出することができた。落石の検出は、三脚等に固定したものだけでなく、作業員が手持ちで撮影した動画でも可能であった。このシステムは、テレビ会議で使うような廉価なカメラと、小型のシングルボードコンピュータから構成されているため携行性に優れており、重機への搭載だけでなく、作業員の手持ちでも撮影・検出可能である。

しかしながら、山岳トンネル坑内では粉塵や滴水など、本システムのような電子機器の使用には過酷な環境である。そのため今後、現場環境における性能と耐久性能を評価し、実際のトンネル現場における適用性を確認していくことが重要である。トンネル坑内での使用に耐えるシステムとすることにより、装薬中や支保工建込み中に起こりうる切羽の崩落の前兆を実用的に検知できる技術として活用することができる。

さらに、本技術を継続的に運用することで、従来は記録に残らなかった切羽の崩落情報についても、落下物の形状、大きさ、個数、および落下速度などの詳細な要素までデジタルデータとして記録することができる。地質ごとに多くの落石データが蓄積されれば、そのデータをもとにして切羽の崩落の危険性を予知できる新たなデジタル指標が定められることとなると考えられる。これにより、我々は効率的で安全な山岳トンネルの施工に寄与できると考えている。

参考文献

- 1) 宮嶋保幸, 福島大介, 西澤勇佑, 戸邊勇人: 切羽の定量評価に基づくロジスティック回帰による鏡吹付厚さの決定手法, 土木学会第 75 回年次学術講演集, VI-659, 2020.
- 2) 戸邊勇人, 宮嶋保幸, 白鷺卓, 山本拓治: 山岳トンネル切羽の剥落危険度評価システムの開発と現場への適用, 第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.81-86, 2019.
- 3) 白鷺卓, 宮嶋保幸, 山本拓治, 西川幸一, 福田博之: トンネルの施工穿孔データを利用したオンタイム切羽評価と前方予測, トンネル工学報告集, 第 27 巻, I-19, pp.1-5, 2017.
- 4) H.Tobe, Y.Miyajima, S.Shirasagi, T.Yamamoto: New Method for Predicting the Risk of Rock Fall from Tunnel Face, *Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM 2019)*, pp.1761-1768, 2019.
- 5) 戸邊勇人, 宮嶋保幸, 白鷺卓, 山本拓治: 山岳トンネル切羽の剥落危険度評価システムの開発と現場への適用, 第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.81-86, 2019.
- 6) 齋藤宏樹, 成田望, 横田泰宏, 山本拓治, 伊達健介, 小泉悠: 山岳トンネル切羽変状監視システムの現場適用事例, 土木学会第 70 回年次学術講演集, VI-689, pp.1377-1378, 2015.
- 7) 伊達健介, 横田泰宏, 宮嶋保幸, 戸邊勇人, 山下 慧, 川内見作, 丹野嘉信: カメラ映像分析によるリアルタイム岩盤崩落検知技術, 土木学会第 76 回年次学術講演集, VI-445, 2021.
- 8) 奥富正敏ほか: デジタル画像処理, 財団法人 画像情報教育振興協会, 2004.

REAL TIME DETECTION SYSTEM FOR ROCK FALL BY APPLYING SINGLE BOARD COMPUTER AND SMALL CAMERA

Hayato TOBE, Kensuke DATE, Yasuhiro YOKOTA, Yasuyuki MIYAJIMA,
Kei YAMASHITA and Kensaku KAWAUCHI

Safe tunnel construction requires detection of rock fall, which often causes collapse from the tunnel face. Currently, this detection depends upon the visual judgment by skilled workers, thus overlooking of rock falls sometimes occurs. Therefore we have developed a technology not to overlook rock falls applying video analysis. The technology can completely eliminate the factors which cause false detection of rock falls, such as camera vibration and movement of construction machines. By installing these technologies into a single board computer and a small camera, we were able to manufacture a portable rock fall detection system.