

切羽監視システム開発のための基礎的研究

田村 大智¹・林 久資²・青木 宏一³・進士 正人⁴

¹学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail:a021veu@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 山口大学大学院助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail:hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 株式会社熊谷組 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2番1号)
E-mail: koaoki@ku.kumagaigumi.co.jp

⁴フェロー会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail:shinji@yamaguchi-u.ac.jp

山岳トンネルの建設現場では、切羽付近において岩盤や土砂、吹付コンクリート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。そのため、専任の切羽監視員を配置することが義務付けられている。しかしながら、熟練技術者の減少や見落としの可能性などの理由から監視員の補助を行い、肌落ち被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。そこで本研究では、切羽の3次元形状から肌落ちリスク領域を抽出するシステム並びに肌落ちを検知するシステムを開発し、それらを組み合わせることによって肌落ち被害を未然に防ぐシステムの開発を目指している。そ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の形状を計測するシステムの開発を行った。

Key Words: rock fall, tunnel worker's safety, motion detection, tunnel face measurement

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。(独)労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所の調査によると、この肌落ち災害は、平成12年以降の10年間で47名が被災し6%にあたる3名が死亡、36%にあたる17名が休業1ヶ月以上となっており重篤度の高い災害であることがうかがえる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。

そのため、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短時間で計測できるデプスカメラや一般的な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^{3,4)}。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。

本研究では肌落ち災害を未然に防止することを目指とし、(i)肌落ちを検知するシステム、(ii)切羽の形状を計測するシステムを開発する。この両システムを組み合わせることで、肌落ちの頻発する箇所や切羽の突出した箇所を肌落ちリスクの高い箇所として警告するシステムの開発を目指している。本報告では、市販されているカメラを用いて(i)肌落ちを検知するシステム、(ii)切羽の形状を計測するシステムの開発を行った。また、室内実験を行うことで各システムの適用可能距離を検討した。さらには、実際のトンネル建設現場でも適用実験を行い、室内実験の結果と照らし合わせるとともに現場環境がシステムに及ぼす影響について検討を行った。

2. 切羽監視システムの開発

本章では、市販のカメラをコンピュータに接続し制御することで作成した切羽監視のための2つのシステムについて述べる。

(1) 切羽監視カメラおよびシステムの構成

本研究では、(i) 肌落ちを検知するシステムと (ii) 切羽の形状を計測するシステムの開発に際して、表-1に示したように (i) では一般的な RGB カメラ、(ii) では撮影対象物までの距離をリアルタイムで計測することができるデプスカメラを使用する。

使用したカメラを図-1に示す。このカメラは Microsoft 製の「Azure Kinect」(以下、切羽監視カメラと称す。)であり、RGB カメラと ToF (Time-of-Flight) 方式のデプスカメラを搭載している。ToF 方式とは、図-2に示すように計測対象物に赤外線を照射し、対象物に反射して戻るまでの時間と光の速度から対象物までの距離を算出する方式である。

以上の切羽監視カメラを用いて (i) 肌落ちを検知するシステムと (ii) 切羽形状を計測するシステムの開発を行った。これらのシステムの制御やデータ処理には、プログラミング言語 Python を使用した。

(2) 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 RGB 画像から移動物体の抽出を行うことで肌落ちの検知を行う。ここでは、画像処理ライブラリの OpenCV を用いて、フレーム間差分法により移動物体を抽出する。フレーム間差分法の概要を図-3に示す。この方法では、1つのフレーム画像における移動物体を抽出するために、前後のフレーム画像と合わせた3枚のフレーム画像を使用する。ここで、フレーム画像とは動画のもととなる1コマの静止画像を指す。3枚のフレーム画像をそれぞれ時系列順に n フレーム目の画像 A、n+1 フレーム目の画像 B、n+2 フレーム目の画像 C とする。これらの3枚のフレーム画像から連続する2枚の画像、画像 A と画像 B、画像 B と画像 C の2組において差分画像を作成する。差分画像を作成する際には、フレーム画像の RGB 値をグレースケールに変換する。RGB 値からグレースケールに変換する式を(1)に示す。

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

R : 赤の値, G : 緑の値, B : 青の値

この式によって、赤、緑、青の各色が 0~255 の値で表現された RGB 画像が黒~白の 0~255 の 256 階調で表現されたモノクロ画像となる。このモノクロ画像を用いて差分画像を作成する。差分画像とは、2枚のフレーム

表-1 各システムで使用するカメラ

	使用するカメラ
(i) 肌落ち検知システム	RGB カメラ
(ii) 切羽形状計測システム	デプスカメラ (ToF 方式)



図-1 Azure Kinect (切羽監視カメラ)

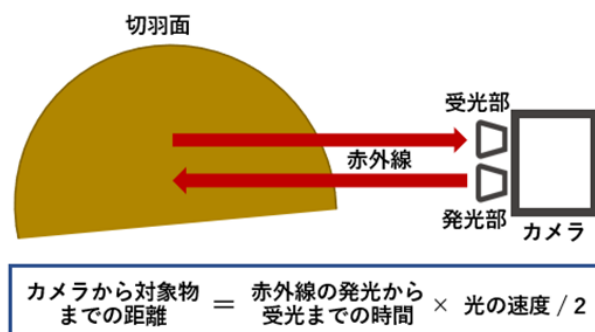


図-2 ToF 方式のイメージ図

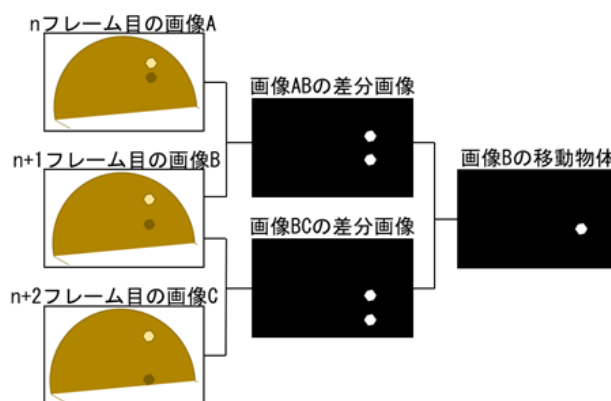


図-3 フレーム間差分法の概要

画像について、それぞれ同じ位置にある画素のグレースケールの値の差分を計算し、設定した閾値を超えた画素を白色、閾値を超えなかった画素を黒色とした二値画像である。次に、作成された2枚の差分画像を比較し論理積(2枚の画像で白色の部分が重なる部分)を抽出する。つまり、3枚のフレーム画像の中で物体が移動している場合、RGB 値に変化があるためグレースケールの値にも変化が生じ、その部分が二値画像で白い部分となる。その白い部分が重なる部分を抜き出すことで外形が抽出される。このようにしてフレーム画像の中から移動物体

を抽出する。以上の処理を RGB カメラから得られるフレーム画像に対してリアルタイムに行うことで肌落ちの検知を行う。移動物体を検知した場合には、図-4のように通常時は緑色となっている信号を赤色にすることで警告を行う仕組みを取り入れた。

以上により、RGBカメラに映る移動物体を検知することが可能となった。しかしながら、実際のトンネル施工現場では、重機や作業者の動体検知による誤検知をしてしまう恐れがある。そこで、落下する移動物体のみ検知し、それ以外の移動物体は検知しない処理を取り入れた。具体的には、図-5のように RGB カメラから得られる画像の上下に2本の測線を設け、この上の測線に移動物体が重なったのちに下の測線に重なった場合にのみ警告信号を出すことで、落下物のみを検知することが可能となる。

(3) 切羽形状計測システム

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る深度データを点群データとして扱うことで切羽の形状把握を行う。深度データとは、デプスカメラに写る物体の三次元座標を記録したデータのことである。撮影される動画のうち、とある時間の1フレームを静止画像として着目し、その静止画像の深度データを取得した。ここで、実際に屋内における1.5m先の壁面を計測し深度データを1枚の三次元散布図に表示したものを図-6に示す。この三次元散布図は、縦軸が取得した画像の縦の画素数、横軸が横の画素数、奥行きが深度を表している。また、深度をコンターで表現しており、深度の値が小さいほど赤色で、大きいほど青色で示している。デプスカメラではこのようなデータが取得できる。

以上より、形状計測を行う際には深度データを取得し、三次元散布図にプロットすることで切羽形状をモニタリングすることが可能になった

3. 室内実験

本章では、開発した (i) 肌落ちを検知するシステムと (ii) 切羽の形状を計測するシステムの両システムに関して室内実験を行い、各システムの適用可能距離を検討した。

(1) 実験概要

室内実験ではトンネル建設現場を想定し、カメラから10m先に図-7に示す切羽模型を設置し、カメラと切羽模型の距離を1m～10mまで1m間隔で変化させて撮影を行う(図-8)。

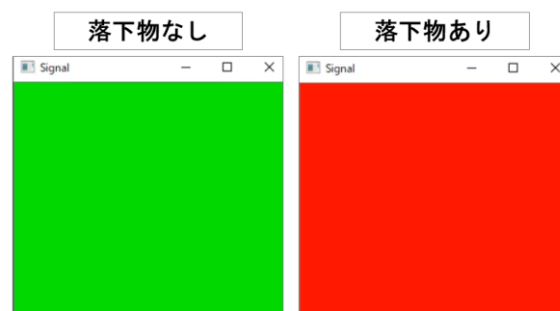


図-4 肌落ち検知システムの信号の例



図-5 肌落ちを検知するための測線のイメージ

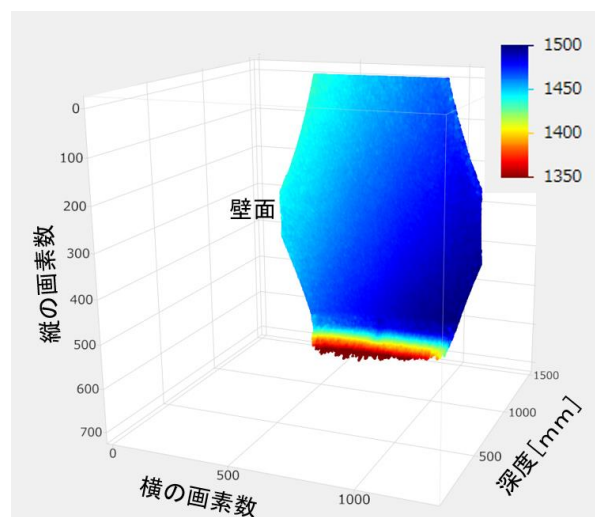


図-6 壁面を計測した深度データ

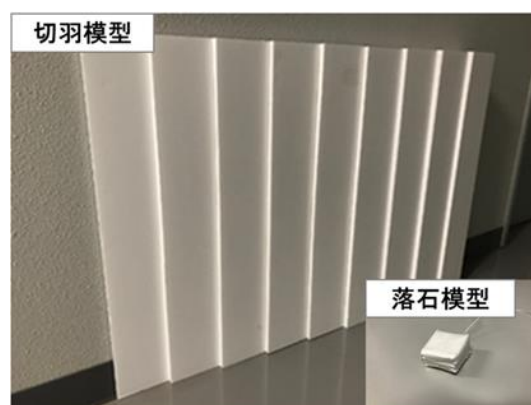


図-7 切羽模型と落石模型

肌落ち検知実験では、切羽監視カメラに搭載されている RGB カメラを用い、切羽模型上で 2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 10cm 四方で厚さ 1cm 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．一例として，2cm 四方の落石模型を図-7 に示す．

形状計測実験では，切羽監視カメラに搭載されているデプスカメラによ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．ちなみに，切羽模型は図-7 に示すように 1cm 幅の階段状となっている．

(2) 実験結果

まず，肌落ち検知実験の結果を表-2 に示す．この表は，切羽監視カメラと切羽模型までの各距離における落石模型の検知可能な最小寸法を示した．撮影距離に着目すると 10m においても 4cm 四方の落石模型を検知することができることが分かった．撮影距離が短くなるほど小さい寸法の落石模型を検知できた理由としては，撮影距離が長くなるほど 1 画素あたりの像の距離も長くなるため，撮影距離が短い方が小さい寸法にも対応できたと考えられる．

次に，形状計測実験の結果を表-3 に示す．この表には，各距離における計測可能な最小凹凸幅を示した．撮影距離に着目すると，4m までは 1cm の幅を計測できていることがわかる．一例として撮影距離 1m の測定値（深度データ）から三次元点群データを生成し，プロットしたものを図-9 に示す．この図を見ると，切羽模型の 1cm の凹凸幅をコンターにより表現できていることがわかる．一方で，5m では 5cm 以上の凹凸幅であれば計測可能，6m 以降では切羽模型の幅である 8cm 以上の凹凸であれば計測できることがわかった．

以上より，肌落ち検知実験では 10m 離れた地点においても 4cm 四方の落石模型が検知できることを確認した．形状計測実験では 4m 離れた地点まで幅 1cm という微小な凹凸が計測可能で，5m の地点では急激な凹凸の変化がある箇所であれば計測できることを確認した．

4. 現場実験

本章では，実際に施工中の山岳トンネルにて現場実験を行った結果を示す．このトンネルは，ロードヘッダーやブレーカーを使用した機械掘削で施工されている．実験は切羽監視カメラを用い，RGB カメラによる肌落ち検知実験およびデプスカメラによる切羽形状計測実験を行い，室内実験の結果と比較するとともに現場環境で受ける影響について検討した．

(1) 実験概要

現場実験では，切羽面から最短 3m の地点から最長 10m の地点まで 1m 間隔で撮影を行う．RGB カメラによる肌落ち検知実験では，図-10 に示す落石大（直径 20cm

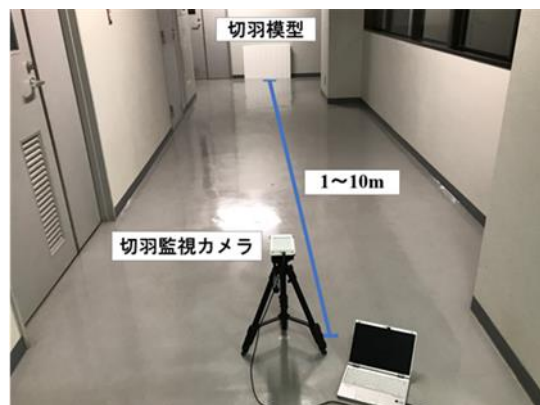


図-8 実験概要

表-2 肌落ち検知実験（室内）の結果

撮影距離	1m	2m	3m	4m	5m
検知可能な最小寸法	2×2cm	2×2cm	2×2cm	2×2cm	2×2cm
撮影距離	6m	7m	8m	9m	10m
検知可能な最小寸法	2×2cm	2×2cm	2×2cm	4×4cm	4×4cm

表-3 形状計測実験（室内）の結果

撮影距離	1m	2m	3m
計測可能な最小凹凸幅	1cm	1cm	1cm
撮影距離	4m	5m	6m~
計測可能な最小凹凸幅	1cm	5~8cm	8cm~

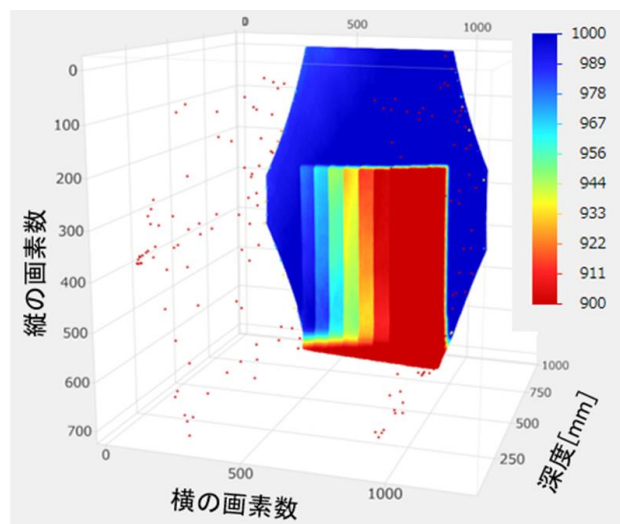


図-9 撮影距離 1m の形状計測結果

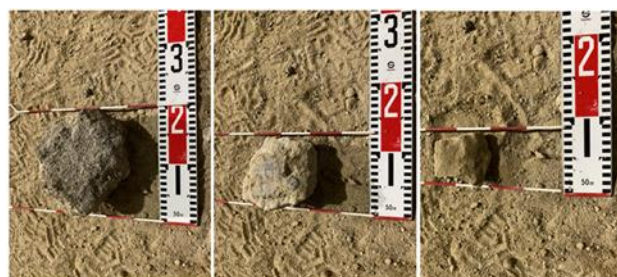


図-10 各落石の大きさ

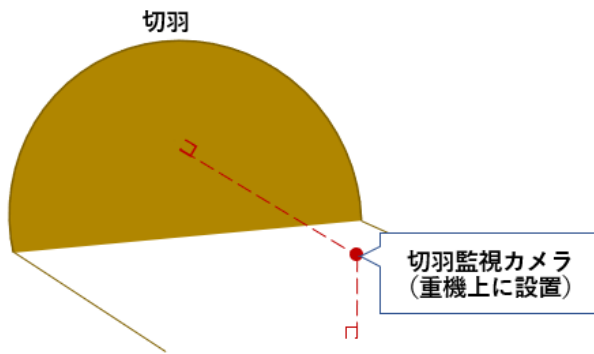


図-11 カメラの設置位置のイメージ

程度)，中（直径 13cm 程度），小（直径 9cm 程度）を高さ 7.5m の切羽近傍から高所作業車を用いて落下させ、検知可能な落石の大きさと撮影距離の関係を取得した。デプスカメラによる切羽形状計測実験では、図-11 に示したように地面と水平かつ切羽面と直角になるように作業車上に切羽監視カメラを設置し、切羽面の形状を計測した。実際に計測した切羽面の画像を図-12 に示す。

(2) 実験結果

RGBカメラによる肌落ち検知実験の結果を表-4に示す。この表は、測線の幅を 50pixel と設定し各撮影距離において落石大，中，小を落下させた場合に、落石を検知した場合は○と示してある。表-4 からわかるように、全てのケースにおいて落石を検知できることが分かった。現場実験では最小で直径 9cm の落石を使用した。室内実験の結果から 4cm 四方の落石模型も検知できることが分かっているため、現場環境においてもさらに小さな落石や長い撮影距離で検知できる可能性が示唆される。

次に、デプスカメラによる形状計測実験の結果を表-5 に示す。この表は、各撮影距離において図-12 の赤枠で囲った切羽中央付近にある掘削痕が計測できていれば○、計測できていなければ×と示してある。室内実験の結果と同様に、撮影距離 5m までは掘削痕のような急激な凹凸の変化を計測できることがわかる。また、計測結果の一例として撮影距離 3m の計測結果を図-13 示す。黒枠で囲った部分、画像中央付近に掘削痕が確認できる。しかしながら、白枠で囲った画像の端付近において明確に計測できていない箇所が確認できるが、これは切羽面と直角にカメラの視準軸を調整した場合、照射した赤外線が画像中央付近であれば切羽からの反射光は安定してカメラで受光するが、像の中心から離れた箇所であれば反射光のカメラでの受光不安定になることが考えられる。



図-12 計測した切羽面

表-4 肌落ち検知実験（現場）の結果

撮影距離	落石の大きさ		
	大	中	小
4m	○	○	○
5m	○	○	○
6m	○	○	○
7m	○	○	○
8m	○	○	○
9m	○	○	○
10m	○	○	○

表-5 形状計測実験（現場）の結果

撮影距離	3m	4m	5m	6m
計測可能な掘削跡	○	○	○	×
撮影距離	7m	8m	9m	10m
計測可能な掘削跡	×	×	×	×

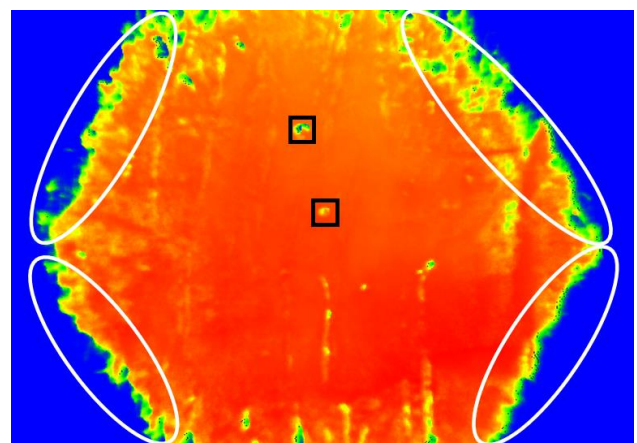


図-13 撮影距離 3m のコンター図

4. まとめと今後の課題

本研究では、トンネル建設現場において肌落ち災害を未然に防ぐシステムの開発を目標に、基礎的研究として

(i) 肌落ちを検知するシステムと (ii) 切羽形状を計測するシステムの開発を行った。また、切羽監視カメラを用いて室内実験を実施することで、撮影距離の違いにおける精度の検討を行った。この室内実験を踏まえた上で、実際に施工中のトンネルで現場実験を行ったが、(i) 肌落ち検知システムでは、実験を行った全てのケースにおいて落石を検知できることがわかった。さらには、より小さい落石や長い撮影距離での検知の可能性も確認できた。(ii) 切羽の形状を計測するシステムでは、室内実験と同様に撮影距離 5m の地点までは急な凹凸の変化を計測できることがわかった。また、切羽面と直角にカメラの視準軸を調整したときにカメラの中心部の切羽計測は精度良く行えるが、撮影距離が長くなるほど画像端の箇所の計測が難しくなるという知見が得られた。以上の結果より、実際の現場環境に対応するには、複数台のカメラを使用して計測範囲を広げるといった対応が課題として挙げられる。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 20K05005 の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

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.
- 3) 中村隆史，西山哲，藤岡大輔：ビデオカメラを活用したトンネル切羽崩壊のモニタリング手法に関する研究，土木学会中国支部第 69 回研究発表会，VI-6，pp.383-384，2017.
- 4) 中村隆史，請関大海，塩崎正人，河村圭：デブスカメラを用いたトンネル切羽監視システムの開発における基礎研究，土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会，VI-735，2019.

(2020. 8. 7 受付)

A BASE STUDY FOR DEVELOPMENT OF TUNNEL FACE MONITORING SYSTEM

Daichi TAMURA, Hisashi HAYASHI, Koichi AOKI and Masato SHINJI

At the construction site of a mountain tunnel, an assignment of supervisor is required to be assigned to mountain tunnel because of the problem of occupational accidents caused by the collapse of rock in the vicinity of the tunnel face. However, for reasons such as human error and the decrease in the number of skilled technicians, a monitoring system is needed to assist the monitors and prevent damage from rock falls. The aim of this study is to develop a system that detects rock falls and measures the shape of tunnel face, and to develop a system that prevents the damage from rock fall by combining them. As a basic research, we developed a system that detects rock falls and measures the shape of tunnel face using a commercial camera. In addition, the distance to be applied to each system was studied by laboratory experiments, and the influence of the actual field environment on both systems was studied by field experiments.