

(13) 深度センサーを用いた トンネル切羽監視システムに関する研究

藤井 猛¹・河村 圭²・塩崎 正人³・中村 隆史⁴

¹ 学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科電気電子情報系専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: a096vgu@yamaguchi-u.ac.jp

² 正会員 山口大学大学院准教授 創成科学研究科電気電子情報系専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: kay@yamaguchi-u.ac.jp

³ 正会員 三井住友建設株式会社 技術本部建設情報技術部
(〒104-0051 東京都中央区佃 2-1-6)
E-mail: MasandoShiozaki@smcon.co.jp

⁴ 正会員 三井住友建設株式会社 技術本部建設情報技術部
(〒104-0051 東京都中央区佃 2-1-6)
E-mail: t-nakamura@smcon.co.jp

トンネル建設工事において、落石等の事故により作業員への被害が発生している。被害の主な原因として、トンネル建設工事現場における掘削の最先端(以後、切羽と記す)からの肌落ちが挙げられる。そこで、厚生労働省は、切羽の監視方法として、切羽監視責任者が目視監視を行うとしている。しかし、工事現場には重機や人が多数存在し、切羽全体の把握が難しく、落石等の予兆が小さいといった問題がある。そこで著者らは、切羽の監視を強化するために、カメラやセンサーを使用して工事中の切羽をリアルタイムで撮影し、落石があった場合に警報を鳴らすことで危険を周知するシステムを開発している。本研究では、30分程度の連続監視を想定した落石検知手法を提案するとともに、簡易実験の結果を示す。

Key Words : tunnel face, depth sensor, image processing, moving object recognition

1. はじめに

切羽からの肌落ちが原因で、トンネル建設工事における作業員への労働災害が発生している。現在の切羽監視方法は、2016年12月に厚生労働省が発表したガイドライン¹⁾を基に、切羽監視責任者による目視で監視が行われている。しかし、現場には重機や作業員が多数存在しており、切羽全体の把握が難しく、また落石と崩落の予兆が小さいため、変化が瞬間的なものは目視では気付きにくいといった問題がある。

このような背景から、切羽全体の常時監視と監視精度の向上を行うために切羽監視の自動化が求められている。切羽監視に関する既存研究では、次のシステムが提案されている。大成建設株式会社²⁾は、デジタルカメラを用いて高速デジタル画像撮影を行い、撮影した画像を高速処理することで切羽を常時連続監視するシステムを開発した。また清水建設株式会社³⁾は、デジタルカメラとミ

リ波レーダーを用いて、基準値を超える変位量や変位速度を検知した際にアラートを鳴らすシステムを開発した。

著者らも、図-1に示すように、工事中の切羽をリアルタイムで撮影し、落石があった場合に警報を鳴らすことで危険を周知するシステムを開発している。本システムは、デジタルカメラやレーダーではなく、深度センサ

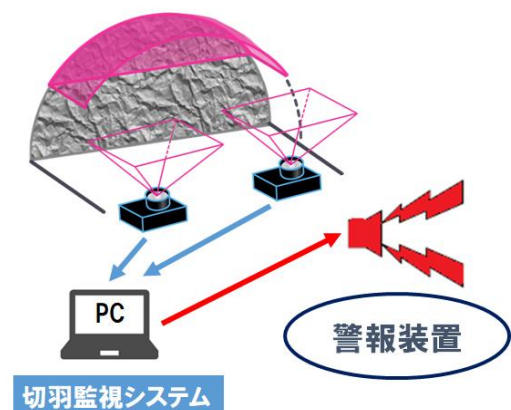


図-1 切羽監視システムのイメージ図

表-1 kinect_v2 の仕様

深度画像解像度	512×424(pixel)
深度計測方法	Time of Flight
深度計測範囲	500~8000mm
視野	(水平)70° (垂直)60°

一を用いることを特徴としている。深度センサーを用いることで、色彩情報に左右されずに切羽を撮影し、ユーザーが指定した深度範囲内で取得された深度情報の差分から移動物を認識することができる。本稿では、30分程度の連続監視を想定した落石検知手法の提案と検証を行った。なお、本研究では、深度センサーの試験機として安価に利用可能な Kinect_v2 を使用した。ここで、表-1に、Kinect_v2の基本的な仕様を示す。

2. 切羽監視システム

本研究で開発する切羽監視システムは、「深度センサーを用いて100mm以上の大きさの落石を検知し、警報を鳴らす」ことを要件とする。図-2には、本システムの落石検知の処理フローを示す。以下では、図-2中のSTEP1からSTEP6を説明する。なお、本研究で扱う範囲は、STEP1からSTEP5である。

STEP1：深度センサーとPCを接続する。

STEP2：STEP1で接続した深度センサーから深度情報 $I_t(i, j)$ を取得する。ここで、 $I_t(i, j)$ は時間 t における画像座標 (i, j) の深度情報を示す。なお、深度情報とは、深度センサーから被写体との距離を1mm単位で計測した情報である。取得された深度情報は、システムによって輝度値0(黒)~255(白)に正規化され、深度画像として表示する。計測範囲外等の理由で深度情報が取得されない箇所は、深度情報に65535を代入し、輝度値0(黒)で表示する。

STEP3：以下の式(1)に従って、STEP2で取得されたフレームの深度情報 $I_t(i, j)$ と、その時点から a 枚前のフレームの深度情報 $I_{t-a}(i, j)$ との差分を計算する。

$$D_t(i, j) = \begin{cases} 255, & |I_t(i, j) - I_{t-a}(i, j)| \geq T \\ 0, & |I_t(i, j) - I_{t-a}(i, j)| < T \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 a は何枚前のフレームとの差分を計算するかを示すフレーム枚数である。 $D_t(i, j)$ は、時間 t における画像座標 (i, j) の差分画像の輝度値を示す。得られた差分が深度差分閾値 T 以上の場合は、輝度値 $D_t(i, j)$ を255(白)とする。一方で、深度差分閾値 T 未満の場合は、輝度値 $D_t(i, j)$ を0(黒)にして差分画像を生成する。すなわち、差分画像中で白色として表示された箇所は、落石候補として判断される。

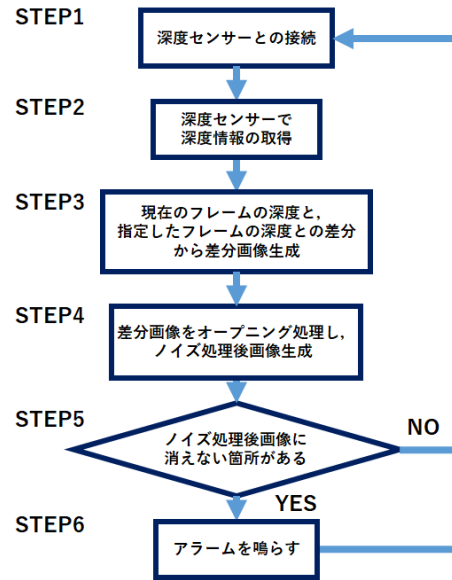


図-2 落石検知の処理フロー

STEP4：STEP3で生成された差分画像に2回のオープニング処理⁴⁾を行い、ノイズ処理後画像を生成する。オープニング処理とは、二値画像中で値が異なる境界部分を収縮した後に膨張することにより、検出対象でない孤立したノイズを除去することができるノイズ処理手法のひとつである。

STEP5：STEP4で生成されたノイズ処理後画像中に、白い領域があれば、その領域を移動物と認識する。図-3(a)から(f)には、図-2で生成された画像を示す。

図-3中の(a), (b)には、STEP2で取得した深度情報から生成された深度画像を示す。続いて図-3の(c), (d)には、STEP3で生成された差分画像を示す。最後に、図-3の(e), (f)には、STEP4で生成されたノイズ処理後画像を示す。なお、(a), (c), (e)は、移動物が画像内に存在しない状態の処理の流れである。一方で(b), (d), (f)は、画像内に移動物が存在している状態の処理の流れである。本STEPで生成されたノイズ処理後画像中に、白い領域が無ければ、STEP2へ戻り、処理を繰り返す。白い領域があれば、STEP6へ進む。

STEP6：警報装置を作動させ、STEP2へ戻り、処理を繰り返す。

3. 連続監視での信頼性実験及び追加機能

本章では、2章で開発したシステムが30分程度の連続監視に利用できるかを検証した。さらに、長時間監視に必要なとされる新たな機能を提案し、それぞれの機能の信頼性を検証した。なお、信頼性は、30分連続監視中に

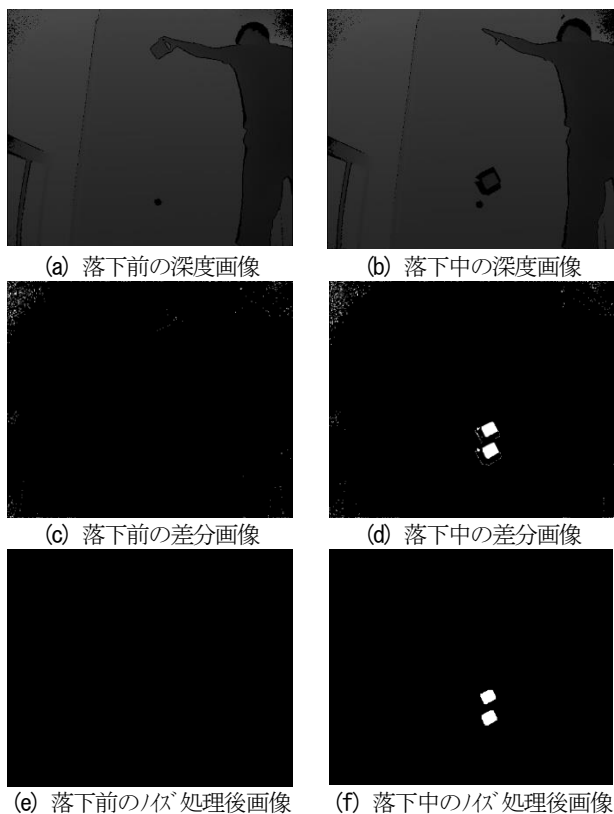


図-3 落石検知の処理フロー中で生成された画像

表-2 検出要件を満たす条件

深度差分閾値 T	30mm
オープニング回数	2回
Kinect_v2からの距離	550~6000mm

表-3 長時間撮影による誤検出数

撮影回数	1回目	2回目	3回目
誤検出数	49	49	65

発生した誤検出の回数によって検証した。

(1) 長時間監視実験

本実験は、2章で開発したシステムを用いて、移動物が存在していない箇所を長時間監視した。表-2は、2章で開発したシステムを用いて、検出要件である100mmの大きさの移動物を検出するための各パラメータ条件である。これらの値は、Kinect_v2の仕様と事前実験により決定した。本実験では、Kinect_v2を切羽と想定した壁面から5950mmの位置に設置し、長時間撮影を行った。また、30分間連続の撮影を3回(合計90分間)行い、誤検出の回数を調査することで本システムの信頼性を確認した。ここで、図-4に撮影風景を示す。さらに、表-3には、実験結果を示す。表-3の結果より、本システムを用いた場合、約1分間に、2回程度の誤検出が発生している。図-5には、本実験で撮影された深度画像の例を示す。図-5の黄色の円内は、長時間監視で誤検出が集中して



図-4 実験風景



図-5 取得した深度画像と誤検出が集中した箇所

発生した箇所である。このような箇所は、カメラの画角の端領域であることや、壁や天井の隅であることなどの傾向があった。これらの領域では、Kinect_v2による深度情報の取得が不安定であり、深度情報が取得できる場合と取得できない場合が繰り返されることから、深度情報の差分値が大きくなり誤検出の原因となっていた。さらに、出現頻度は高くないが、Kinect_v2の近くで浮遊した埃に反応し、誤検出が発生する箇所もあった。

(2) 追加機能の提案

本節では、上記の誤検出数を減少させるために、2章の機能に追加する新たな機能を検討した。図-6には、追加機能の処理フロー図を示す。これらの機能は、図-2のSTEP2とSTEP3の間に追加される。

STEP2-1では、差分画素値 $D_t(i, j)$ の計算において、深度情報が取得できていない領域(深度情報取得不可領域)もしくは計測範囲外との差分を処理対象外とする機能を追加した。具体的には、前後の連続フレームにおいて、深度情報が取得できない場合と取得できる場合が繰り返されるとき、また、ユーザーが指定した計測範囲以外の深度情報が取得されたときは深度差分を処理対象としない機能である。これにより、深度情報が不安定である箇所からの誤検出を抑制することができる。

STEP2-2では、2章STEP3にて説明した深度差分閾値 T に対して、さらに条件を追加する機能である。具体的には、算出された深度情報の差分が、深度差分閾値下限 T_1 (今回は30mm)以下、または、深度差分閾値上限 T_2 (今回は1000mm)以上の場合、深度差分を処理対象にしない。

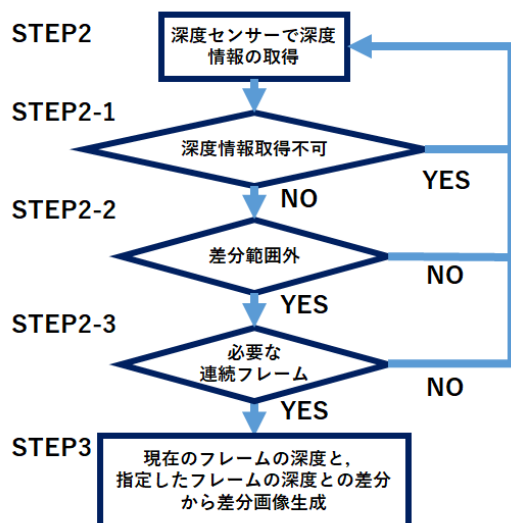


図-6 追加機能の処理フロー図

表-4 新機能を追加した場合の長時間撮影による誤検出数

撮影回数	1回目	2回目	3回目
条件1	0	3	2
条件2	12	13	5
条件3	1	0	5
条件4	0	0	0

この T_2 の追加により、Kinect_v2付近で発生する埃などからの誤検出を防止することが期待できる。なお、本システムは深度情報が取得できない領域の深度情報には65535が代入されるため、 T_2 の制約は、STEP2-2の条件も含むことになる。

STEP2-3では、落石など検出対象物は連続的に検出されることを前提として、一定のフレーム数以上連続で移動物を認識しない場合は、移動物として検知しない機能である。これにより、深度情報の取得が不安定な領域で発生する連続性のない散発的な誤検出を処理対象外とすることができる。本研究では、連続フレーム数の条件は、3枚以上とした。

(3) 提案機能を追加した場合の長時間監視実験

本節では、3章にて説明した追加機能の効果を検証した実験について記述する。

実験条件は、条件1としてSTEP2-1の機能のみの場合、条件2としてSTEP2-2の機能のみの場合、条件3としてSTEP2-3の機能のみの場合、条件4として全ての追加機能を搭載した場合の4通りで行った。

また、追加機能以外の条件である、深度差分閾値 T_1 、オープニング回数、壁面までの距離は、3章(1)で行った長時間監視実験と同じ条件で実験を行った。ここで、表-4に、実験結果を示す。

条件1, 2, 3の誤検出数の結果をみると、すべての条

件において、機能追加前よりも誤検出数が低下している。このことから、深度情報取得不可能な領域、また深度差分の値が一定値より大きな領域、さらに誤検出に連続性がない領域を計算対象外とすることが誤検出を抑制することに効果があることが分かる。さらに、すべての機能を含む条件4では、誤検出は発生しなかった。

4. まとめ

本研究では、切羽監視の自動化を目的に、深度センサーから取得した深度情報を処理し、連続監視を可能とするための画像処理手法を提案した。本研究では、追加機能が搭載されていないシステムの場合、移動物が存在していない箇所を、移動物ありと誤認識するケースが多く、信頼性が低かった。しかし、追加機能をシステムへ搭載することによって、誤検出を無くすことができた。このことから、誤検出の主要原因は、深度情報取得不可能な領域との差分と連続性のない差分であることが分かった。しかし、条件1を内包する条件2の実験において、誤検出が増加した原因は不明である。

今後の課題としては、本研究での簡易実験では、誤検出の抑制効果のみを検証したことから、システム要件である100mmサイズの移動体検知の性能は未検証である。また、実環境での撮影では、粉塵等の悪条件により検知精度が低下すると考えられる。このため、本システムで、より実環境に類似した環境での性能検証実験を行う必要がある。

謝辞：本論文の作成にあたり、システムの構築にご協力頂いた有限会社テクノフラッシュの車田茂美氏、本多健治氏に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 厚生労働省：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/seisakunit-suite/bunya/0000149309.html>>, (入手 2020.3.20).
- 2) 大成建設：大成建設トンネル切羽落石監視システム、
<https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2017/171208_3410.html>, (入手 2020.3.25).
- 3) 清水建設：清水建設切羽崩落振動監視レーダーシステム、
<<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2018/2018022.html>>, (入手 2020.3.25).
- 4) 奥富正敏：デジタル画像処理, pp.179-180, 日興美術株式会社, 2004.