

# 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基礎研究

河村 圭<sup>1</sup>・藤井 猛<sup>2</sup>・塩崎 正人<sup>3</sup>・中村 隆史<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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 (Corresponding Author)

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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

<sup>4</sup>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、切羽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、切羽監視責任者による目視監視を義務付けている。しかし、工事現場には重機や作業員が多数存在し、落石等の予兆の発見が難し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、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発する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の提案と、提案したシステムを用いた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。そこで厚生労働省は、工事中の切羽を監視することを義務付けるガイドライン<sup>1)</sup>を2016年12月に発表した。そのガイドラインに従って、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、現場には粉じんが舞い、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、また落石の予兆が小さいため、変化が瞬間的であり目視では気付きにくいといった問題がある<sup>2)</sup>。

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、以下の研究が挙げられる。

中村ら<sup>3,4)</sup>また、久保田ら<sup>5)</sup>は、カラー情報を白黒の濃

淡値に変換し、背景差分法を用いて切羽の変状を移動物として検出するモニタリング手法を提案した。三瓶ら<sup>6)</sup>は、高速3Dレーザースキャナを用いて、連続フレーム間の差分から変位を算出する手法を提案した。谷卓ら<sup>7)</sup>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により切羽を常時連続監視するシステムを開発した。岩城ら<sup>8)</sup>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発するシステムを開発した。竹中土木株式会社<sup>9)</sup>は、高精度レーザー距離計を用いて、切羽の挙動を計測し、変位を検知した箇所の周辺をラインレーザーで切羽に直接描写すると同時に、変位状況を作業関係者の端末に送信する手法を開発した。

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発するこ

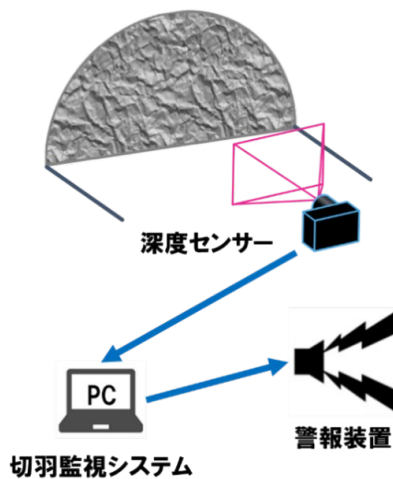


図-1 切羽監視システムのイメージ図

とにより危険を周知するシステムを開発している。この警報により、作業員が防御姿勢をとることが可能となる。なお、本研究では、落石発生後の検知が対象になっているが、将来的には、落石を事前に検知し、作業員が安全圏へ避難できることを最終的な目標としている。

本システムは、上記の既存研究で使用されているようにデジタルカメラやレーダーではなく、深度センサーを用いることを特徴としている。中村ら<sup>3)</sup>また、久保田ら<sup>9)</sup>のようにデジタルカメラを用いた場合は、落石と切羽との色差を区別する工夫が必要となる。また、岩城ら<sup>8)</sup>のようにミリ波レーダーを用いた場合は、取得する情報の点数が少なく切羽の変状をとらえきれないという問題がある。深度センサーは、デジタルカメラと同様の撮影方法で、深度センサーと被写体までの距離(以後、深度情報と記す)を画像として取得できることが特徴である。本稿では、30分程度の連続監視を想定した深度センサーを用いた落石検知手法の提案と検証を行った。

## 2. 切羽監視システムにおける落石検知アルゴリズム

本章では、切羽監視システムの落石検知アルゴリズムについて説明する。

本システムには、切羽の監視に深度センサーを用いる。深度センサーに関する応用研究として、例えば、松村ら<sup>10)</sup>は、睡眠時の人間を深度センサーを用いて撮影することにより無呼吸であるかを確認する手法を提案した。また、高橋ら<sup>11)</sup>は、天井に深度センサーを設置することで高齢者の深夜徘徊を防止するシステムを構築した。上記のように、深度センサーは基本的に人物をはじめ広く移動体検知の研究に応用されており、土木分野においても、深度センサーによる移動体検知の応用が期待される。そ

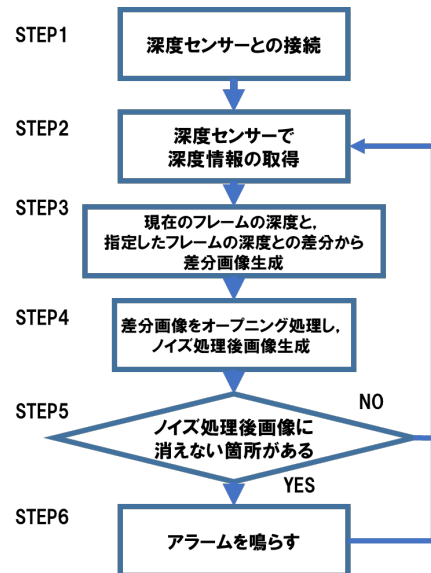


図-2 落石検知の処理フロー

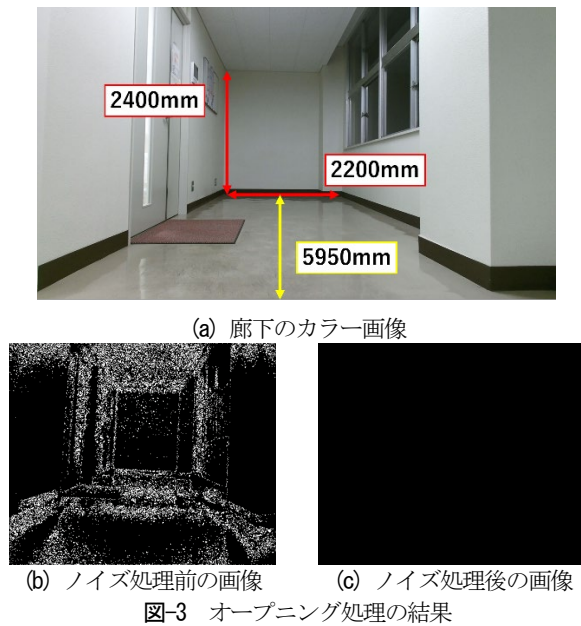
こで、本研究では切羽監視の落石検知に使用した。

本研究では、落石検知に用いる深度センサーの試験機として、ToF(Time of Flight)形式の深度センサーである Kinect v2 を使用した。ToF は、赤外線を照射してから物体からの反射波が到達するまでの時間を計測することにより、物体とセンサーとの距離を計測する。また、他の形式の深度センサーと比較して安価であることが特徴として挙げられる。これにより、実環境下で故障した場合でも容易に交換でき、低コストで運用が可能となる。ただし、ToF 形式の深度センサーには、撮影可能な距離が短いことや、センサー自身の耐久性が低いことが短所として挙げられる。さらに、赤外線を利用していることから鏡面反射の物体やエッジ部分などの深度情報が欠損する場合がある<sup>12)</sup>。上記の課題はあるが、本研究では、深度センサーの落石検知への応用のための基礎研究として、落石検知アルゴリズムを提案し検証を行った。

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、警報を発する」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、本研究では、STEP1 から STEP5 までの処理について検討した。

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、深度情報の計測値は、1mm 単位である。取得した深度情報は、0 から 255 の値に正規化し、深度情報を輝度値として表したグレースケール画像(以後、深度画像と記す)を作成し可視化する。また、深度情報が取得できなかった箇所は、適切な計算を進めるための前処理として、深度情報に



65535 を代入し、深度画像では輝度値 0(黒)として表示する。65535 という数値は、Kinect\_v2 から入力されないことがない数値である。さらに、ユーザーが指定した計測範囲外の箇所についても同様の処理を行うこととする。

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。

$$D_t(i, j) = \begin{cases} 255, & T_1 \leq |I_t(i, j) - I_{t-a}(i, j)| \leq T_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

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。得られた差分に上限と下限の閾値 $T_1$ ,  $T_2$ を設け、その範囲以内であれば、輝度値 $D_t(i, j)$ を 255(白)とする。以下では、差分の上限の閾値を深度差分閾値上限、下限の閾値を深度差分閾値下限と記す。一方で、得られた差分が深度差分閾値下限 $T_1$ 未満、または、深度差分閾値上限 $T_2$ より大きい場合は、輝度値 $D_t(i, j)$ を 0(黒)にして差分画像を生成する。差分画像上で白色として表示された箇所は、落石候補として判断する。

STEP4: STEP3 で生成された差分画像に 2 回のオープニング処理<sup>13)</sup>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、主に二値化された画像に行われる画像処理であり、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。収縮とは、注目画素の周辺画素である 8 画素に、1 画素でも輝度値 0(黒)の画素があれば注目画素の輝度値を 0(黒)に変換する処理である。また、膨張とは、注目画素の周辺画素である 8 画素に、1 画素でも輝度値 255(白)の画素があれば注目画素の輝度値を 255(白)に変換する処理であ

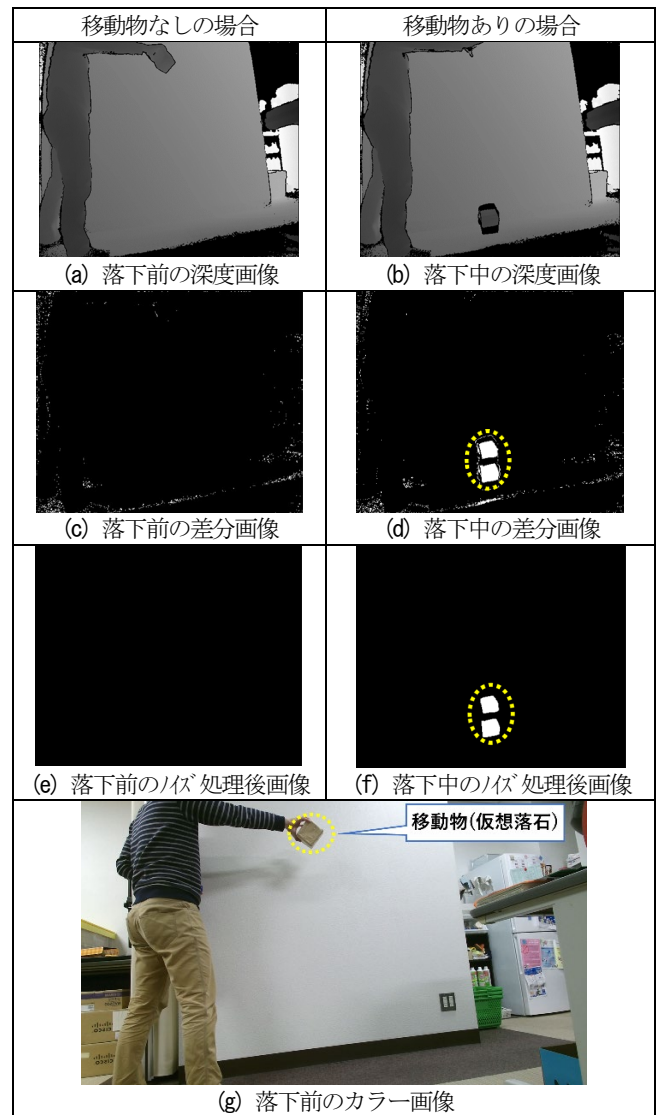


図-4 落石検知の処理フロー中で生成された画像

る。図-3 には、著者らが所属する大学の研究棟の廊下にて、移動物が存在しない壁のある空間を撮影し、STEP3 で生成された差分画像に 2 回のオープニング処理を行った結果を示す。なお、撮影は夜間に行った。ここで、図-3(a)には、撮影対象のカラー画像を示す。図-3(b)は、STEP3 で生成された差分画像であるが、撮影対象の一部がエッジ部分や鏡面体であることが原因<sup>12)</sup>で深度情報が欠損し、この結果として前後のフレームの深度情報に差分が発生し、移動物が存在すると誤認識され、白く表示されている箇所がある。また、図-3(c)は、STEP4 で生成されたノイズ処理後画像である。本結果より、オープニング処理によって、移動物が存在すると誤認識されている孤立した点、すなわち図-3(b)の白い箇所が除去されていることがわかる。

STEP5: STEP4 で生成されたノイズ処理後画像中に、白い領域が存在する場合は、その領域を移動物と認識する。図-4(a)から(f)には、人が落石を模した物体を落下させる直前と直後を撮影し、図-2 の各 STEP で生成された画

表-1 Kinect\_v2 の仕様

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

表-2 各オープニング処理後のノイズ画素数

|             |      |      |      |
|-------------|------|------|------|
| オープニング回数    | 0回   | 1回   | 2回   |
| ノイズ画素の割合(%) | 8.63 | 0.06 | 0.00 |

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を示す。(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を示す。

図-4 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-4 の(c), (d)には、STEP3 で生成された差分画像を示す。(c), (d)の画像には、白色の小さなノイズが発生しており、(d)の中央には移動物があることが確認できる。最後に、図-4 の(e), (f)には、STEP4 で生成されたノイズ処理後画像を示す。(e)は、真っ黒な画像であるが、これは移動物が検出されていない結果であり、ノイズが発生することなく移動物を監視できていることがわかる。移動物がある(f)では、黄円内の移動物を残して周囲のノイズを除去していることから、移動物を検知できているのがわかる。本 STEP で生成されたノイズ処理後画像中に白い領域がなければ、STEP2 へ戻り処理を繰り返す。白い領域があれば、STEP6 へ進む。また、(d),(f)内で移動物が 2 箇所あるのは、フレーム間の差分を取得する際に、「直前に移動物があった箇所」と「直後に移動物があった箇所」の両方を検出するためであり、正常な検知である。なお、図-4 の落下後の画像は落下前の 0.5 秒後である。最後に、図-4(g)には、物体が落下する前のカラー画像を示す。

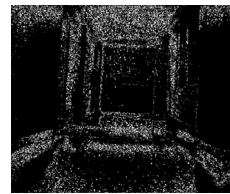
STEP6：警報装置を作動させ、STEP2 へ戻り、処理を繰り返す。

### 3. 切羽監視システムの信頼性確認実験

本章では、本システムが誤検出なく、正確に落石を検出できるかどうかを確認するために実施した実験について記述する。

#### (1) 事前調査

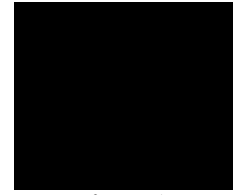
本節では、システムの検出要件である 100mm の大きさの移動物を認識できる条件を確認する実験を行った。ここで、表-1 に、Kinect\_v2 の基本的な仕様を示す。



(a) オープニング回数(0回)



(b) オープニング回数(1回)



(c) オープニング回数(2回)

図-5 オープニング処理した結果



図-6 撮影対象と撮影の様子

#### a) オープニング処理回数の確認

事前実験としてまず、図-2 の処理フローSTEP2 に必要なオープニング処理の回数を確認した。図-5 には、オープニング回数をそれぞれの条件で生成された差分画像を示す。

図-5 より、2 回のオープニング処理を行うことで、すべてのノイズを処理できることがわかった。また、表-2 には、図-5 の各撮影画像におけるノイズ(白い画素)の画素数の割合を示す。なお、全体の画素数は210788画素である。この実験より、短時間の撮影において、オープニング回数が 2 回であれば、全てのノイズの除去が可能であるとわかった。

#### b) 画像分解能(xy 平面)の精度実験

前項 a) の実験により、ノイズを除去するためのオープニング回数は 2 回必要であることがわかったため、100mm の大きさの移動物が 2 回のオープニング処理を行っても除去されない撮影距離を確認する実験を行った。オープニング処理 2 回で除去されない条件とは、検出要件である 100mm 四方の落下物が収縮 2 回で除去されないということである。すなわち、100mm 四方の物体は 25(5×5)画素以上で表示する必要がある、xy 平面での必要画像分解能は 20mm/画素以上となる。

そこで、100×100mm の撮影対象をセンサーから 500mm, 2000mm, 4000mm, 6000mm, 8000mm の地点に設置し、画像中に表示される撮影対象の横幅の画素数を計測した。図-6 には、撮影の様子を示す。図中の黄円内は撮影対象

表-3 各計測地点における撮影対象の横幅の画素数

| センサーと撮影対象の距離(mm) | 500   | 2000  | 4000 | 6000 | 8000 |
|------------------|-------|-------|------|------|------|
| 画素数(pixel)       | ×     | 18    | 8    | 5    | ×    |
| 理論値(pixel)       | 73.12 | 18.28 | 9.14 | 6.09 | 4.57 |

表-4 各計測地点における撮影対象の深度情報の誤差幅

| センサーと撮影対象の距離(mm) | 500 | 2000 | 4000 | 6000 | 8000 |
|------------------|-----|------|------|------|------|
| 誤差幅(mm)          | ×   | 5    | 11   | 26   | 30   |

表-5 検出要件を満たす条件

|                     |          |
|---------------------|----------|
| 深度差分閾値下限 $T_1$ (mm) | 30       |
| 深度差分閾値上限 $T_2$ (mm) | 8000     |
| オープニング回数            | 2        |
| Kinect_v2 からの距離(mm) | 550~6000 |

表-6 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 | 4回目 | 5回目  |
|------|-----|-----|-----|-----|------|
| 誤検出数 | 2   | 4   | 0   | 0   | 1    |
| 撮影回数 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 |
| 誤検出数 | 0   | 7   | 0   | 3   | 1    |

である。表-3 には、画像中の撮影対象の横幅の画素数を確認した結果と、その理論値を示す。センサーから撮影対象の距離が 500mm と 8000mm の地点では、深度情報を取得できなかった。表-3 の結果より、センサーから 6000mm の地点で撮影対象を表示する横幅の画素数が 5 画素となることから、画像分解能(xy 方向)を考慮した Kinect\_v2 で計測可能な距離は、550mm~6000mm とした。

#### c) 深度情報(z 方向)の精度実験

前項 b) では、画像分解能(xy 方向)における Kinect\_v2 で計測可能な距離を検証した。本項では、Kinect\_v2 で計測される深度情報の誤差(z 方向)が 100mm 以上の場合も、100mm の大きさの移動物を認識できなくなることから、前項 b) と同じ条件で深度情報の誤差幅を計測した。表-4 には、その結果を示す。センサーから撮影対象の距離が 500mm の地点では、深度情報を取得できなかった。

表-4 より、すべての条件において深度情報の誤差が 100mm 以下となることから、奥行方向(z 方向)の分解能における 100mm の大きさの移動物が計測可能な範囲は、550mm~8000mm とした。

#### d) 撮影条件を満たした落下物検出実験

前項 b) 画像分解の精度確認実験では、センサーの xy 方向の分解能における計測可能な距離がわかった。さらに、前項 c) 深度情報の精度実験の実験結果では、センサーの z 方向の分解能における計測可能な距離がわかった。これらの結果により、xyz 方向全ての方向において検出要件を満たす撮影距離は、550~6000mm となる。

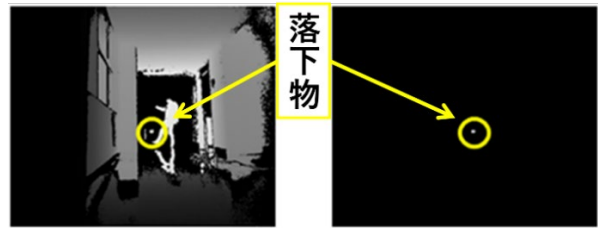


図-7 検証実験の際の深度画像とノイズ処理後画像



図-8 実験風景

検出要件を満たす条件を表-5 に示す。この条件で 100mm の大きさの落下物が検出できるかを確認するために、センサーから 6000mm の位置で落下物(100mm 四方)を落下させ、撮影した。図-7 には、撮影の際の深度画像とノイズ処理後画像を示す。図-7 の黄円内が落下物である。図-7 より、オープニング処理によって不要なノイズは除去され、落下物のみが表示されていることがわかる。

#### (2) 連続監視実験

前節より、検出要件を満たす条件での撮影において、ノイズ処理が可能であることがわかったが、短時間での撮影結果であった。本節では、長時間の連続監視に対する信頼性を確認する実験を行った。

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、表-5 の条件で長時間撮影を行った。また、30 分間連続の撮影を 10 回(合計 300 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-8 に実験風景を示す。表-6 には実験結果を示す。表-6 の結果より、本システムを用いた場合、300 分間に、18 回の誤検出が発生しており、落石検知システムとして利用するための信頼性が十分でないことがわかった。図-9 には、本実験で撮影された深度画像の例を示す。図中の黄色の円内は、長時間監視で誤検出が集中して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、

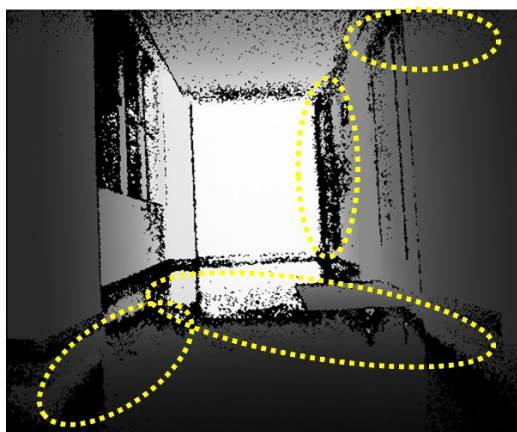


図-9 取得した深度画像と誤検出が集中した箇所



(a) ある時間に取得した深度情報を基に生成した深度画像



(b) 画像(a)の1フレーム後に取得した深度情報を基に生成した深度画像



(c) 画像(a)の黄枠内を拡大 (d) 画像(b)の黄枠内を拡大した様子

図-10 深度情報が不安定な箇所の具体例

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。図-10(a)から(d)には、深度情報が不安定な箇所の具体例を示す。図-10(a)は、ある時間に取得した深度情報を基に生成した深度画像である。続いて、図-10(b)は、図-10(a)の1フレーム(0.02秒)後に取得した深度情報を基に生成した深度画像である。最後に、図-10(c)と(d)は、図-10(a)と(b)の同座標にある黄枠内を拡大した画像である。図-10より、1フレーム間で、深度情報を取得できていない輝度値0(黒)の画素と、深度情報を取得できている画素が変動していることがわかる。輝度値0(黒)の画素は、深度情報として65535という数値が代入されているため、差分を計算した際に得られる差分の値が大きくなり、誤って落石候補として検出される。

さらに、上記以外の誤検出の例として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。

#### 4. 追加機能の提案と信頼性実験

本章では、3章の連続監視実験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。さらに、追加したそれぞれの機能の信頼性を検証した。

##### (1) 追加機能の提案

本節では、3章の実験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について説明する。図-11には、追加機能の処理フローを示す。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、落石候補として判断する差分の範囲を縮小できる機能を追加した。2章STEP3にて説明した深度差分閾値下限 $T_1$ と深度差分閾値上限 $T_2$ に対して、変更

を加える機能である。本研究では、深度差分閾値上限 $T_2$ を8000mmから1000mmに変更した。この $T_2$ の変更により、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他に、トンネル建設現場では、センサー付近を通過する人や建機への反応の防止も期待できる。図-12には、STEP2-1の差分閾値を縮小する機能の具体例を示す。 $T_2$ が1000mmの場合では、図-12上側の移動物Aの様に、センサーからの距離が5500mmの場合は、切羽との差分は500mmとなるため、移動物Aは、落石候補として認識される。しかし、図-9下側の移動物Bの様に、センサーからの距離が1000mmの場合

は、切羽との差分は 5000mm となるため、移動物 B は、落石候補として認識されない。

STEP2-2 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、落石候補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偶発的な誤検出を処理対象外とすることができる。本実験では、連続フレーム数の条件は、3 枚以上と設定した。

## (2) 提案機能を追加した場合の長時間監視実験

本節では、前節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、以下の 3 条件で実施した。

条件 1：STEP2-1 の機能のみの場合

条件 2：STEP2-2 の機能のみの場合

条件 3：全ての追加機能を搭載した場合

実験条件の詳細を表-7 に示す。なお、実験で用いた撮影画像は、3 章 2 節に行った実験と同じ画像を使用している。また、3 章 2 節の実験と同様に、30 分連続監視中に発生した誤検出の回数によってシステムの信頼性を評価した。ここで、表-8 に、実験結果を示す。条件 1 と条件 0 の誤検出数を比較すると、すべての撮影回数において、誤検出数が変化していない。このことから、本実験条件では、誤検出の原因となった差分は、30mm 以上 1000mm 以下である。また、条件 2 と条件 0 の誤検出数を比較すると、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。この結果から、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わかった。さらに、すべての機能を含む条件 3 では、誤検出は発生しなかったことから、今回追加した機能によって、本システムの精度が向上したと言える。

## 5. 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、長時間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場合があり、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、誤検出をなくすことができた。このことから、今回の実験条件では誤検出は、3 フレーム以上連続していないことがわかった。

今後の課題として、本研究での簡易実験では、誤検出

### STEP2

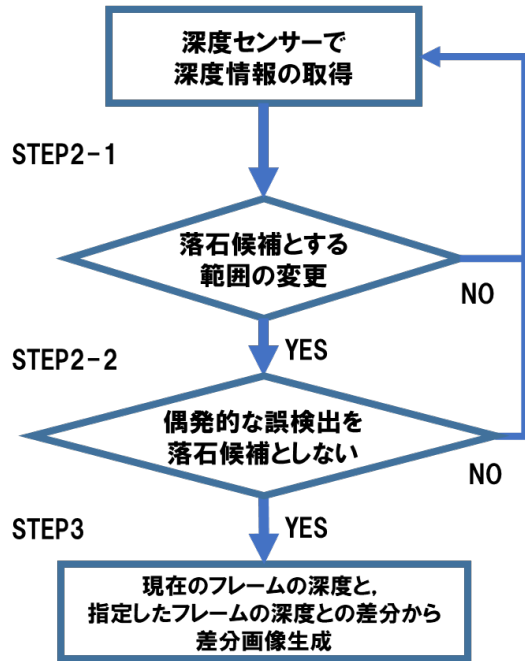


図-11 追加機能の処理フロー

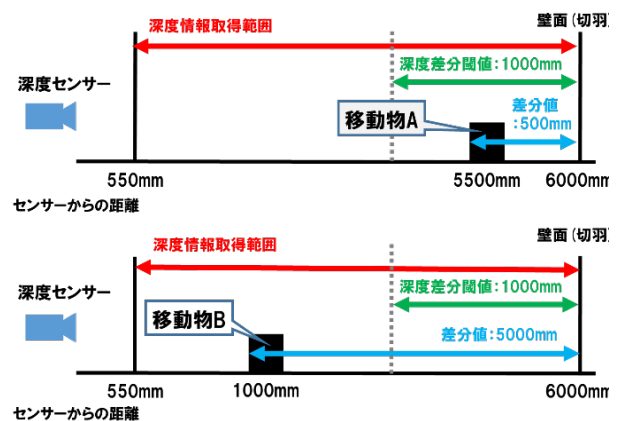


図-12 差分閾値を縮小する機能の具体例

表-7 新機能を追加した長時間撮影の実験条件

| 条件                  | 条件 1 | 条件 2 | 条件 3 |
|---------------------|------|------|------|
| 深度差分閾値下限 $T_1$ (mm) | 30   | 30   | 30   |
| 深度差分閾値上限 $T_2$ (mm) | 1000 | 8000 | 1000 |
| 必要連続フレーム枚数          | 1    | 3    | 3    |

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、粉塵や切羽の凹凸等の悪条件により、検知精度が低下すると考えられる。そのため、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。

表-8 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 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 条件1  | 2   | 4   | 0   | 0   | 1   | 0   | 7   | 0   | 3   | 1    |
| 条件2  | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    |
| 条件3  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    |

## 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/seisakunitsuite/bunya/0000149309.html>>，(入手 2020.3.20).
- 2) 厚生労働省：トンネル建設工事の工法等について，<<http://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-11201000-Roudoukijunkyo-Soumuka/0000145122.pdf>>，(入手 2020.10.15).
- 3) 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，pp226-233，2017.
- 4) 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.
- 5) 久保田恭行，西山哲，矢吹信喜，福田知弘，手塚仁，尾畑洋，村上治：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，第45回土木情報学シンポジウム講演集，Vol.45，pp.225-228，2020.
- 6) 三瓶貴広，溝口知広：3D スキャナによるトンネル切羽の突発的変位のリアルタイム検出，計測自動制御学会東北支部第312回研究集会，Vol.312-8，2017.
- 7) 谷卓也，古賀快尚，青木智幸，高市一馬：落石を予知・警報する切羽監視システム「TiAlert Tunnel」の開発，大成建設技術センター報，No.51，pp.47-1-8，2018.
- 8) 岩城英朗，多田浩幸，青野泰久，能美仁，白井郁夫，能美陽：トンネル切羽モニタリングに向けたミリ波高速イメージングレーダーの性能確認，土木学会全国大会第74回年次学術講演会，CS9-22，2019.
- 9) 竹中土木：山岳トンネル工事における「切羽監視の新技術」，<<https://www.takenaka-doboku.co.jp/news/detail/178.html>>，(入手 2020.10.15).
- 10) 松村太陽，久下沼聖之，永島彰人，小野隆：深度センサを用いた睡眠時無呼吸症候群の自動判別，電気学会論文誌 A，139 巻 11 号，pp.573-578，2019.
- 11) 高橋裕基，中島翔太，北園優希：Kinect センサによる深夜徘徊防止システムの開発，産業応用工学学会全国大会2013 講演論文集，pp.42-43，2013.
- 12) 石井，目黒：カラー情報を用いたデプスデータの Hole 除去，日本大学生産工業部第48回学術講演概要，pp.323-326，2015.
- 13) 奥富正敏：デジタル画像処理，pp.179-180，日興美術株式会社，2004.

(Received October 22, 2020)  
(Accepted February 10, 2021)

## FUNDAMENTAL STUDY ON DEVELOPMENT OF TUNNEL FACE MONITORING SYSTEM USING A DEPTH SENSOR

Kei KAWAMURA, Takeru FUJII, Masato SIOZAKI and Takashi NAKAMURA

There is still a relatively high incidence of work accidents during the mountain tunnel construction when compared to the incidence rates in the other construction industry. In the tunnel construction, it is important to monitor the deformation of tunnel face in order to prevent the accidents. Especially, the workers are injured due to the rock fall events at a work site. Therefore, the authors propose the method to detect the fall of rock by using a depth sensor and image processing in the paper. The experimental results show the effectiveness of the proposed method.