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

山口大学大学院	学生会員	○藤井	猛	山口大学大学院	正会員	河村	圭
三井住友建設(株)	正会員	塩崎	正人	三井住友建設(株)	正会員	中村	隆史

1. 背景

山岳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)からの肌落ちが原因で,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, 切羽監視責任者による目視監視で行われている.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,落石等の予兆がないため,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[1]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ている.また,清水建設株 式会社[2]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ている.

著者らも図1に示されるように,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の開発を進め ている.本システムは,デジタルカメラやレーダーで はなく深度センサー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 で取得した深度情報の差分から移動物を認識するこ とが出来る.本稿では,特に本システムを用いた落下 物検知精度に関する検証を行った.なお,本研究では, 深度センサーとして Kinect v2 を使用した.

2. 切羽監視システム

本システムでは、「深度センサーを用いて 100mm

キーワード 切羽監視,深度センサー,画像処理

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院 創成科学研究科

TEL 0836-85-9534 E-mail:a096vgu@yamaguchi-u.ac.jp



図1 切羽監視システムのイメージ図

以上の大きさの落石を検知し, 警報を鳴らす」ことを 要件とした. 図2には,本システムにおける落石検 知の処理フローを示す.以下では,図2中の STEP1~5 の詳細について説明する.

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.また、取得した深度情報を輝度値 0(黒)~255(白)に正規化し、深度画像として表示する. 計測範囲外等で深度情報が取得できない箇所は、輝 度値 0(黒)で表示する.

STEP3:以下の式(1)に従って、STEP2で取得し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.なお、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)にする.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.

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

ここで、 $D_t(i,j)$ 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.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.Tは深度差 分閾値を示す.なお、 $I_t(i,j)$ または $I_{t-a}(i,j)$ の深度情 報が取得不可能な場合は、計算不可能として、システ ムの画面上では緑の領域で表示する.

STEP4:STEP3 で生成した差分画像に2回のオープ ニング処理を行い,ノイズ処理後画像を生成する.オ ープニング処理とは,二値画像を収縮した後に膨張 することで検出対象でない孤立したノイズを除去す ることが出来るノイズ処理手法の1つである.ここ で,図3(a) (b) (c) には,オープニング処理の例を示 す.図3より,オープニング処理によって画像上の 文字 j の周辺にある細かな白い点が除去されている ことが分かる.

STEP5:STEP4 で生成したノイズ処理後画像中に, 白い領域があれば,その領域を落下物と認識する.図 4(a)~(f)には,図2の処理フロー中に生成された画 像を示す.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(c)(d)には,STEP3 で生成された差分画像を示す. 最後に,図4(e)(f)には,STEP4 で生成されたノイズ



(a) 処理前画像 (b) 収縮後画像 (c) 膨張後画像図3 オープニング処理の例





(b) 落下中の深度画像

(a) 落下前の深度画像



(c) 落下前の差分画像





(e) 落下前のノイズ処理
 (f) 落下中のノイズ処理
 後画像
 後画像
 図4 落石検知の処理フロー中で生成された画像

処理後画像を示す. なお, (a) (c) (e) は, 落下物が画 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, 画像内に落下物が存在している状態の 処理の流れである.

3. 性能検証

本章では、本システムで Kinect_v2 を用いた場合に おいて、100mm 以上の大きさの落石を検知すること



図5撮影対象と撮影風景



図6 深度センサーからの距離に対する深度情報 の最大誤差

が可能な深度範囲を求めた.3.1 と3.2 では, Kinect_v2 の深度情報精度と画像分解能精度を検証した.深度 情報精度は,図5上のy軸方向の深度情報計測の正 確性を示す.画像分解能精度は,図5上のxz平面上 の分解能を示す.3.3 では,落下物を検知することが 可能な深度範囲内,また,深度範囲外で落下物を撮影 し,3.1 と3.2 で求めた検知が可能な範囲が正しいか を検証した.

3.1 Kinect_v2 による深度情報の精度検証

本節では, Kinect_v2 の深度情報を計測した. これ により,検出要件である 100mm の大きさの落下物を 検知するために,式(1)中の深度差分閾値Tを 100mm 以下にできる深度センサーからの距離の範囲を確認 した.

Kinect_v2 のカタログ上の深度情報取得範囲は 500mm~8000mm のため、本検証では、深度センサー からの距離 500mm, 2000mm, 4000mm, 6000mm, 8000mm に撮影対象を設置し深度情報を測定した.各 計測地点にて 1 秒間取得した深度情報の最大誤差か ら奥行方向の計測性能を確認した.

図5には、撮影対象と撮影風景を示す.さらに、図6には、深度情報の検証結果を示す.横軸は深度センサーと撮影対象との距離を、縦軸は深度センサーと撮影対象との距離に対して発生した深度情報の最大 誤差を示す.深度センサーからの距離が500mmの場 合は、深度情報がほとんど得られなかったため、測定 不能とした.安定して深度情報を取得できたのは深 度センサーからの距離が550mm以上の場合だった.

図6の結果より,深度センサーからの距離が離れ るほど,y軸方向の精度が低下することが示された. 深度差分閾値を100mm以下にできる範囲は,深度セ ンサーからの距離が550mm~8000mmである.深度セ ンサーが取得した深度情報の誤差による誤検知の発 生を減少させるためには,深度差分閾値を最大誤差 以上に設定する必要がある.また,もれなく落石を検 知するためには,閾値を低く設定する必要がある.上 記の理由により,8000mm以内の範囲で計測する場合 は深度差分閾値を40mmに,6000mm以内の範囲で 計測する場合は深度差分閾値を30mmに,4000mm以 内の範囲で計測する場合は深度差分閾値を15mmに, 2000mm以内の範囲で計測する場合は深度差分閾値を

3.2 Kinect_v2 による画素分解能の精度検証

本節では,深度センサーと被写体の距離に対する xz 平面上の画素分解能の検証を行った.具体的には xz 平面上で 100mm 四方の大きさの物が 5pixel 以上 に表示される深度センサーからの距離の範囲を確認 した.なお,オープニング処理を行う上で,収縮処理 を 2 回行ってもノイズと判定されず落下物として検 知が可能な条件が,被写体が 5pixel 以上で表示され ることである.

画素分解能の精度検証は, 3.1 の検証と同様の撮影 条件で撮影を行い,深度画像上の撮影対象の横幅画 素数を確認した.

検証結果を**表1**に示す. なお,深度センサーから 500mm と 8000mm の距離では,画像上に撮影対象 が確認できず,測定不可能であった.本検証の結果 より,xz平面上で 100mm 四方の大きさの物が 5pixel 以上の画素数で表示される範囲は,深度セン

表1 深度センサーからの距離に対する撮影対象の横

I	_	- <u> </u>
m 🗆	t et a l	
III A	нн	
'PHH'		77 40

深度センサーからの距離	撮影対象を表す横幅の		
(mm)	画素数		
500	計測不能		
2000	18~20		
4000	8~9		
6000	5~6		
8000	計測不能		

サーからの距離が 550mm~6000mm である.

3.1 と 3.2 の検証より, 100mm 以上の大きさの落下 物を検知することが可能な深度範囲は深度センサー から 550mm~6000mm となる.

3.3 検知可能範囲での落下物撮影検証

本節の検証では、前節までの検証結果より得られ た, 落下物を検知することが可能な深度範囲内, また 深度範囲外で 100mm の大きさの落下物を撮影した. 生成されたノイズ処理後画像を確認することで本シ ステムの検出性能の検証を行った. 図7(a)には、本 検証で用いた落下物を示す.また,図7(b)には,撮 影風景を示す.本節の検証では、落下物は壁面に近い 箇所で落下させ,深度センサーから壁面の距離は 6000mm, 6500mm, 7000mm で撮影した. 本結果より, 落下開始から落下終了まですべてのフレームにおい て検知できたのは、距離 6000mm の場合のみであっ た. 6500mm と 7000mm の場合では検知ができない 箇所が複数あった.本節の検証より,100mm以上の 大きさの落下物を検知することが可能な深度範囲が 前節の検証通り 550mm~6000mm であるということ が示された.

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、落下物を検知 するシステムの開発を行った.本システムの精度検 証を行った結果より、次の知見が得られた.Kinect_v2 では、深度センサーからの距離が 550mm~6000mmの 範囲であれば要件である 100mm以上の大きさの落下 物を検知できる.また、本システムのアルゴリズムを



図7 落下物と撮影風景

用いた場合,上記の範囲内で 100mm 以上の大きさの 落下物を検知できる.

今後の課題としては、ノイズによる誤検出を防ぐ ために、ノイズを減少させる別手法の考案が挙げら れる.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撮影実 験を行う必要がある.さらに、本稿の検証では監視時 間が数秒間と短い時間の撮影であったが、現場では 連続長時間の監視が想定されるため、長時間の監視 実験を行う必要がある.

謝辞:本研究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]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(2020/3/25 入手)
[2]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/newsrelease/2018/2018022.html(2020/3/25 入手)