

ステレオカメラを用いた切羽監視システムの開発

Development of tunnel face supervising system by stereo cameras

キーワード

切羽監視, ステレオカメラ, 安全性の向上,
中心極限定理

大江 隆史*, 伴 享*, 小野 知義**,
中田 範俊***, 藤川 保****

研究概要

山岳トンネル工事における掘削最先端となる切羽は、地山が露出しており、岩石の落下等による肌落ちと言われる重篤性の高い災害が発生する。厚生労働省は、「山岳トンネル工事における肌落ち災害防止ガイドライン」を公表しており、その中で切羽作業の常時監視を専任とする「切羽監視責任者」を選任することを定めている。しかし、人の監視だけでは限界があるため、監視を補助することを目的として、ステレオカメラを用いた切羽監視システムの開発を行った。

その結果、測定環境ごとに設定値の調整を必要とするが、トンネル坑内環境においてステレオカメラの計測値から切羽の変位を検知し、危険を知らせるシステムを開発することができた。

1 はじめに

山岳トンネル工事において、掘削の最先端である切羽では地山が露出しており、その付近では岩石が落下するなどして、「肌落ち災害」と言われる災害が度々発生する。平成24年3月に公表された一般社団法人日本トンネル専門工事業協会アンケートの結果によると、平成12年から22年までに起きた肌落ち災害の内、6%が死亡し36%が死亡未満休業1月以上となっており、発生した場合の重篤度が高い災害となる¹⁾。

こうした背景から、平成28年12月には厚生労働省から「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止ガイドライン」が公表され、これまでに2回の改正が行われている²⁾。ガイドラインでは、肌落ち災害防止のために事業者が講じるべきこととして、切羽作業の常時監視を専任とする「切羽監視責任者」を選任するように定められている。しかし、切羽監視責任者を選任したとしても、人間の目で捉えることのできる肌落ち現象には限界がある。そこで著者らは、切羽監視責任者の監視を補助することを目的として、ステレオカメラを用いた切羽監視システム（以下、本システム）の開発を行った。

2 切羽監視システム

2.1 ステレオカメラ

ステレオカメラとは、人間の目を模したカメラで、複数のカメラから入力された画像を基に、奥行方向の距離をリ

表-1 ステレオカメラの仕様

基線長	視差有効画素数	フレームレート	視差検出画角
100mm	1024×720	60fps	約50°
カメラレンズ	センサー解像度	距離検出範囲	距離精度(奥行方向)
標準	1280×960	1m~30m	3%@5m, 5%@10m



写真-1 ステレオカメラ本体



写真-2 コード同士の接合部の防護(開)

* 技術センター 土木研究部, ** 札幌支店, *** 土木事業本部 技術推進部, **** 土木事業本部

アルタイムで計測できるカメラである（写真-1）。

主に自動運転技術の分野で使用されることが多く、そのため安価で測距精度が比較的高いという特徴を持っている。測距原理は、ステレオマッチングと三角測量を応用したものである。同時刻に撮影された複数枚の写真に対して同じ対象物が写っている画素がどこかをそれぞれ求め（ステレオマッチング）、対象物の映っている画素同士の差分（視差値）を画像全体で計算する。そうして求めた視差値から、三角測量の原理を用いて距離を算出する。

本システムで使用した機器の仕様を表-1に示す³⁾。

2.2 システムの全体像

本システムの全体像を図-1に示す。監視システムは測距用のステレオカメラ2台、データ処理用の本体PC1台、警告用のパトランプ1台、それらをつなぐコードと三脚で構成されている。本システムは、ステレオカメラで距離を計測し、本体PCでデータの処理を行い、設定した基準値以上の変状が見られた場合に警告音とともにパトランプの色を変化させることで、付近の人に危険を知らせることが可能となっている。また、パトランプは緑、黄、赤の3色に変化させることができるため、危険度に応じた発光の変化が可能である。

本システムはトンネル坑内で使用することを前提としているため、本体PCは耐衝撃、耐震動、防塵、防滴などの性能を持つものを採用している。また、PCとステレオカメラをつなぐコードの長さを延長する場合、コードとコードの接合部が弱点とならないように防雨カバーを装着している（写真-2、3）。

2.3 計測方法

ステレオカメラと本体PCを接続し、専用のソフトウェアを起動させる。起動後、ステレオカメラを計測位置に配置し、初期計測を完了すれば切羽の計測が始まる。

ソフトウェア上では、ステレオカメラで監視できている範囲や計測されている視差値、設定した時間毎の切羽の変位などが確認できる（図-2）。また、使用者は任意のエリアを計測対象外として設定することができるため、切羽付近の状況に対応することができる（図-3）。

3 変位計測手法

3.1 中心極限定理による計測の安定化

本システムは、切羽からステレオカメラまでの距離を7~10mと想定して開発している。よって、表-1から分かるように、ステレオカメラによって計測されるデータは、奥行方向に3~5%の誤差を持っている。切羽監視を目的としている以上、このような誤差はできる限り減らす必要がある。そこで、“奥行方向のデータを1秒間に60回取得できること”を生かし、次のような処理を行った。

ステレオカメラからは、1024×720画素の1画素ごとに対応する距離データが取得できる。これを縦横それぞれ任意

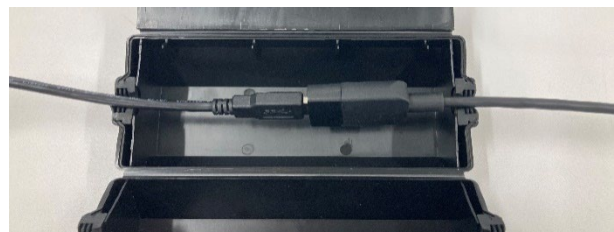


写真-3 コード同士の接合部の防護(開)



図-1 切羽監視システムの全体像

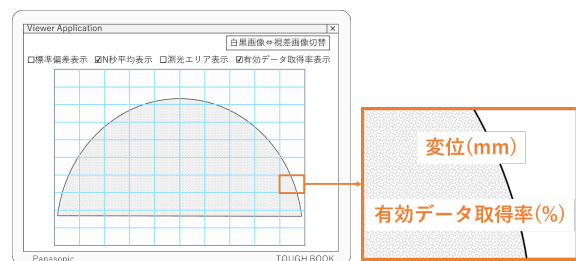


図-2 ソフトウェア起動画面のイメージ図

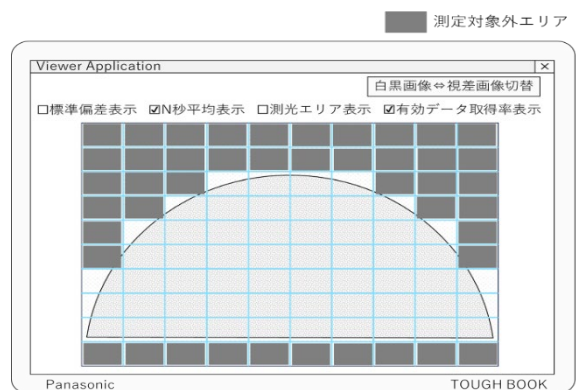


図-3 測定対象外の領域設定

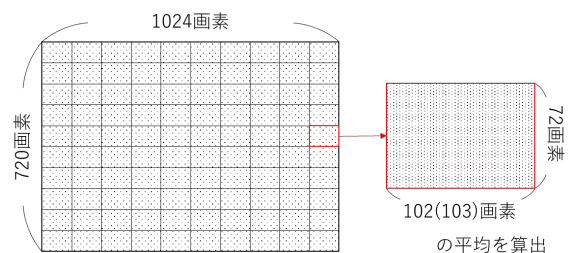


図-4 エリア分割のイメージ (10×10分割の場合)

のエリアに分割し、エリアごとに平均する(図-4)。次にエリアごとに平均した値を、任意の時間で平均する。

平面を計測するとした場合、これらの処理によって、標準偏差(バラツキ)は式(1)のようになる。ただし、実際の計測では計測対象が平面でないこと、計測環境の影響によって画素あたりの1秒間に取得できるデータ数が変わることなどから、式(1)で求められるバラツキよりも大きくなることが考えられる。

$$\sigma \times \frac{1}{\sqrt{1024 \times 720 \div n^2}} \times \frac{1}{\sqrt{60 \times m}} \quad (1)$$

ここで、 σ : ステレオカメラのデータの標準偏差
 n : 縦横の分割数, m : 平均化する時間(s)

3.2 変位の算出について

本システムでは、使用者が設定したエリア・時間ごとに、3.1節で説明した方法で距離平均を算出したものを基に、1秒前の結果との差を変位として算出している(図-5)。そして、算出した変位が設定した閾値を超えた場合、パターンランプを通じて光と警告音で知らせる。

3.3 平均化と変位に与える画素の影響度について

3.1節の平均化によって、ステレオカメラによって取得されるデータのバラツキが抑制される一方で、1画素が変位の算出に与える影響は、分割されたエリアの画素数によって変動し、画素数が多ければ多いほど影響は小さくなる。そして、分割されたエリアが1mm変位したと判定できる物体の大きさとその変位量の関係は、式(2)によって求めることができ、表-2はその計算結果例である。

$$M = Z - \frac{1}{\frac{1}{Z-1} - \frac{p-p'}{p \times Z}} \times \frac{p'}{p} \quad (2)$$

ここに、 M : 分割されたエリアが1mm動いたと判定できる物体の変位量
 Z : ステレオカメラから切羽面までの距離
 p : 分割されたエリアの画素数
 p' : 変位した物体の画素数

3.4 障害物の除去

トンネルで運用することを考えた場合、計測中にステレオカメラと切羽の間に人や建設機械が横切ることが想定される。この課題に対して、次のような処理を行った。

まず、ソフトウェア起動後の初期計測において約10秒かけて、画素ごとに距離データの平均値(以下、初期値)を取得する(図-6)。そして、初期値と画素ごとに計測される距離を比較し、その差が設定値よりも大きくなった場合、その距離データを除外する(図-7)。除外することによ

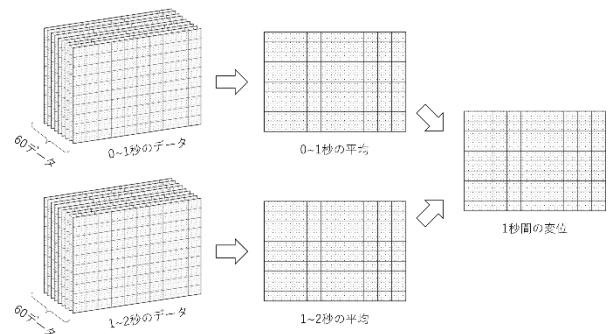


図-5 変位の算出イメージ

表-2 分割されたエリアが1mm変位したと判定できる物体の大きさと変位量の関係

分割数	物体の大きさ	切羽とカメラの距離	
		7m	10m
20×20 分割	10cm×10cm	7.5 mm	15.3 mm
	15cm×15cm	3.3 mm	6.8 mm
	20cm×20cm	1.9 mm	3.8 mm
	25cm×25cm	1.2 mm	2.4 mm
10×10 分割	10cm×10cm	29.8 mm	60.8 mm
	15cm×15cm	13.3 mm	27.1 mm
	20cm×20cm	7.5 mm	15.3 mm
	25cm×25cm	4.8 mm	9.8 mm
7×7 分割	10cm×10cm	60.6 mm	123.3 mm
	15cm×15cm	27.1 mm	55.2 mm
	20cm×20cm	15.3 mm	31.1 mm
	25cm×25cm	9.8 mm	19.9 mm

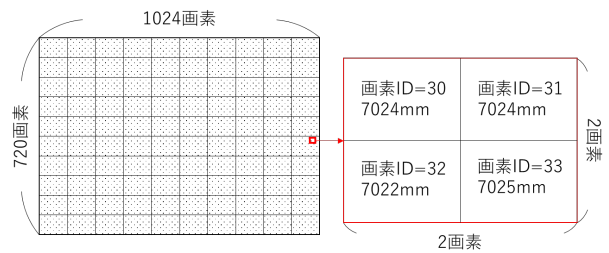


図-6 初期計測によって取得される画素ごとの平均距離



図-7 初期値を基にした障害物の除外

て、エリアごとの平均値を出す際に使用されるデータ（有効データ）の数は少なくなる。本システムでは、計測結果の安定化のため、有効データ÷エリアの画素数（有効データ取得率）が使用者の設定した値を下回った場合、そのエリアを自動的に測定対象外エリアとしている。そのため、障害物の遮り方によっては、測定対象外エリアが発生する。

4 トンネル坑内環境での動作試験

4.1 2023年12月時試験

本システムの動作を確認するために、2023年12月に2日間のトンネル坑内環境での動作試験を行った。1日目はこれまでの開発で行ってきた試験環境に近い状態での動作試験（図-8）を行い、2日目はこれまで行ってこなかった実際の工事作業中での動作試験を行った（図-9）。その結果、1日目の試験ではシステムの正常な動作を確認することができた。しかし、2日目の工事作業中での動作試験において、有効データ取得率の低下による測定対象外エリアが多発した（図-10）。

4.2 2024年5月時試験

2023年12月に行った試験を受けて、2024年5月に追加の動作試験を行った。試験場所は、2023年12月に行ったトンネルとは別のトンネルである。試験では、次の2つのことについて検証を行った。

1つ目は、ステレオカメラの設置位置や照明環境などを変化させることで、有効データ取得率の低下による測定対象外エリアの発生がどのように変化するかを検証した。その結果、システムの動作環境に応じた露光や計測データを平均化する時間の調整、また測定対象外エリアとする閾値の引き下げなどを行うことで、測定対象外エリアの発生を抑制することができた（写真-4）。

2つ目は、3.4節で述べた障害物の除去機能が正常に動作するかを検証した。本システムで初期計測を終えた後に、建機を本システムと切羽の間に横切らせ、建機が映り込んだエリアの有効視差データ取得率が低下しているかを確認した（写真-5）。その結果、掘削機が映り込んだエリアの有効視差データ取得率は低下し、その値が設定値を下回った箇所については測定対象外エリアとして扱われることが確認できた（図-11）。

5 まとめと今後の課題

山岳トンネル工事における切羽監視責任者を補助することを目的とし、ステレオカメラによって得られる距離データを基にした切羽監視システムを開発した。ステレオカメラによって取得される距離データのバラツキは、時間方向と面方向の平均化法により抑えることができた。しかし、トンネル坑内環境での動作試験の結果、照度の影響によって有効データ取得率が低下するため、使用者による設定値の調整が必要であることが確認された。

開発された本システムは、当社トンネル現場において導



図-8 動作試験様子（1日目）



図-9 動作試験様子（2日目）

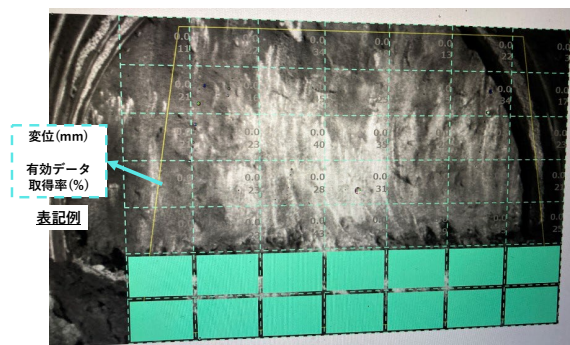


図-10 測定対象外エリア多発の様子

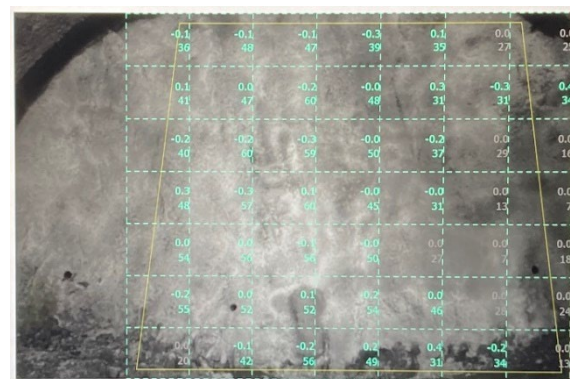


写真-4 測定対象外エリア発生抑制の様子

入を行っており、今後は測定環境の変化による設定値の自動調整やドリルジャンボへの搭載による利便性の向上、計測機器・データ処理手法の変更による変位検出能力の向上などを目標として開発を継続する。

謝辞

本開発は、加賀 FEI 株式会社との共同開発として実施したものである。開発にあたってご尽力頂いた加賀 FEI 株式会社をはじめ、関係者の皆様に謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉川直孝, 伊藤和也, 豊澤康男, 堀智仁, 玉手聡: 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, 労働安全衛生総合研究所技術資料, JNIOOSH-TD-No.2 (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, <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000149309.html> (2024/10/16 時点)
- 3) ITDLab 株式会社: ISC-100 A4 チラシ和文修正版アウトライン化 20200710, https://itdlab.com/wordpress/wp-content/uploads/2020/12/isc100_profile_j.pdf (2024/10/30 時点)

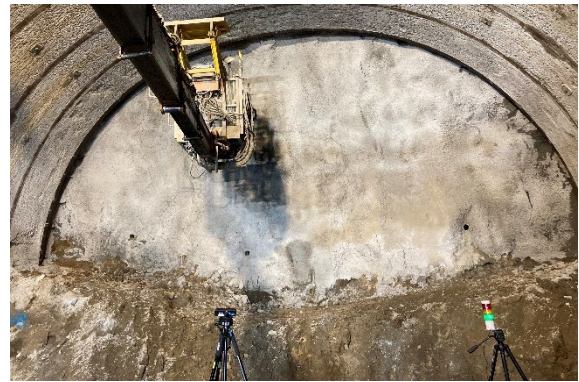


写真-5 障害物の除去機能検証の様子

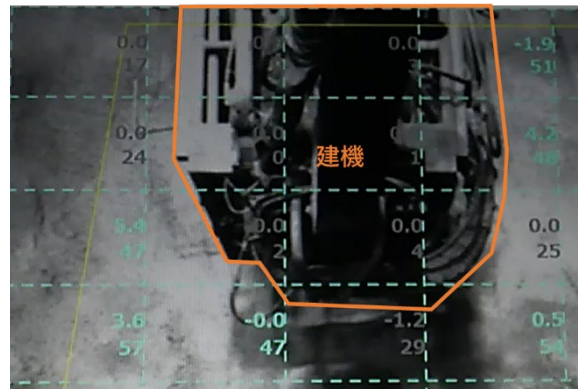


図-11 建機の横切りによって有効視差データ取得率が低下している様子