

道路のモルタル吹付法面に対する 亀裂検出と亀裂幅測定のための画像処理に関する研究

矢部 嘉人^{1,a)} 前田 佐嘉志^{1,b)} 鶴田 直之^{1,c)}

概要：近年、道路法面の崩壊を防ぐ定期点検の人材・予算・時間不足が問題となっている。本研究では、特にモルタル吹付法面を対象に、亀裂検出・亀裂幅計測の自動化を画像処理と Structure from Motion 技術との組合せにより実現した。本稿では、実験結果の地質コンサルタントによる外部評価に基づき有用性を示す。

A Research on Image Processing for Detection and Width-Measuring of Cracks on Shotcrete Road Slopes

YOSHITO YABE^{1,a)} SAKASHI MAEDA^{1,b)} NAOYUKI TSURUTA^{1,c)}

Abstract: Recently, road slopes face an increased risk for collapse and frequent periodical inspections of road slope are required so that human resource, budget and time are no longer sufficient. In this paper, we develop an image processing algorithm, which includes a structure from motion technique, for detection and width-measuring of cracks on shotcrete slope. We show experimental results, an evaluation by an engineering geologist and the effectiveness of our approach.

1. はじめに

近年、道路法面の老朽化が進行しており、法面の変状・崩壊が発生する危険性が増している。これを予防するためには法面の点検を定期的に行うことにより変状を把握する必要があるが、点検を行うための人材・予算・時間が現状では不足しており、十分な点検が行われていない。中でもモルタル吹付法面は老朽化によって内部の空洞化が発生することが問題となっており、その兆候はモルタル表面に入る亀裂から読み取ることができる。よって亀裂の数や亀裂幅の情報はモルタル吹付法面の状態を調べるために非常に重要になる。

法面の亀裂検出や亀裂幅の測定を行う際には、以下のような点が問題となる。

(A) 初回点検時に観測箇所が限定され、以後観測が行わ

れない箇所が存在する

(B) 点検する亀裂の選定は専門家に依り、計測できる亀裂の数が限られる

(C) 手が届かない箇所の計測が難しい

本研究では、この亀裂の点検を画像処理技術を用いて自動化することにより、点検にかかる人的、金銭的、時間的コストを軽減させ、かつ (A),(B),(C) の問題を解消することを試みた。

本稿では、まず研究の概要について述べ、亀裂検出、亀裂幅計測を自動化するための手法を提案する。また、実験結果とそれに対する専門家の外部評価により本研究の有用性を示す。

2. 提案手法

今回開発したシステムでは、まず法面を撮影した動画をフレーム分割し、次に Structure from Motion による法面の 3D モデルの作成と本研究で開発した亀裂検出プログラムによる法面画像からの亀裂検出・亀裂幅座標取得とを行い、最後に実世界とスケール合わせした 3D モデ

¹ 福岡大学
Fukuoka University, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180, Japan
^{a)} tl121318@cis.fukuoka-u.ac.jp
^{b)} maeda@tl.fukuoka-u.ac.jp
^{c)} tsuruta@fukuoka-u.ac.jp

ルに亀裂幅座標を投影し, 3D モデル上で亀裂幅の推定を行う。

図 1 が本システム全体のフローチャートである。

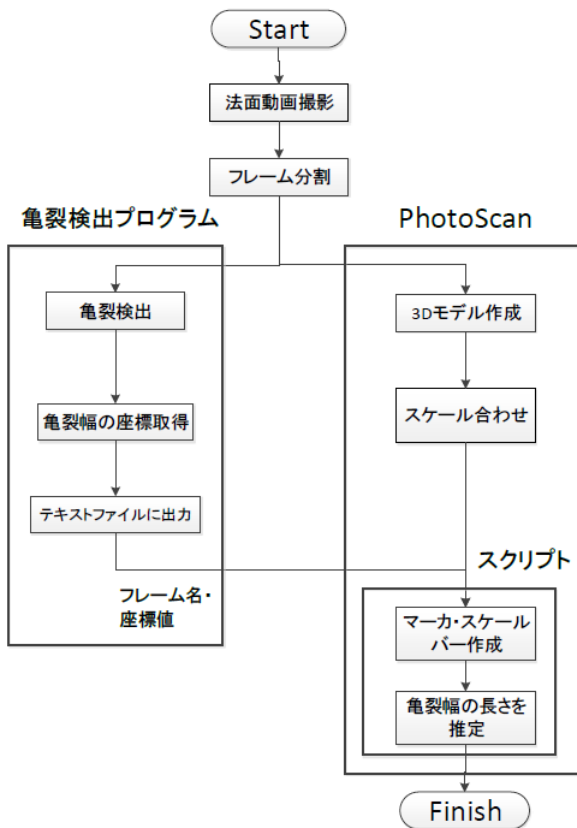


図 1 全体フローチャート

3. 3D モデル作成

本研究では Structure from Motion の実装として, PhotoScan[1] という商用のソフトウェアを利用しており, フレーム分割した画像群を PhotoScan に入力することで 3D モデルを作成する。

亀裂点検の目的に応じて以下のように撮影方法を変える。

- 亀裂の検出を重視する場合
車にカメラを固定し, 車上から法面の動画を撮影する。法面全体を把握できる巨大な 3D モデルを作成できるが, 亀裂幅の正確な推定には向かない。
- 亀裂幅の推定を重視する場合
法面に近づいて動画を撮影する。法面の全体像は把握できないが, 接写している分亀裂幅を正確に推定できる。

4. 亀裂検出プログラム

2 節の通り, 亀裂検出プログラムは亀裂の検出と亀裂幅の座標取得からなる。

4.1 亀裂検出

本プログラムでは法面画像に写っている亀裂を色が暗く, 折れ線で近似できるものであると定義し, 以下の手順で亀裂の検出を行う。

- (1) 入力画像の白黒反転
色が暗い亀裂部分を強調する。
- (2) 線検出フィルタリング
解像度ピラミッドを作り, 線検出フィルタリングを行うことで画像内の直線らしい領域を残し, そうでない領域を小さくする (詳細は 4.1.1 節)。
- (3) ラベリング
ラベリング処理 [2] を行い, 小さくなった領域を閾値処理によって削除することで, 線らしい領域のみが残った画像を作成する。
- (4) Hough 変換
Hough 変換 [3] による直線検出を行い, 亀裂を直線の集まりとして検出する。入力画像上に検出した亀裂を描画した画像を亀裂検出画像として保存する。
画像入力から亀裂検出画像を得るまでの画像データの流れを図 2 に示す。

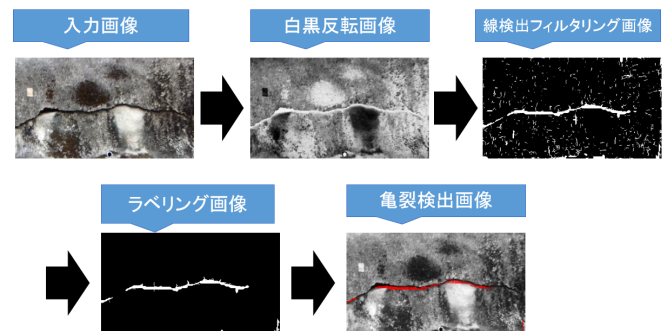


図 2 画像データの流れ

4.1.1 線検出フィルタリング

線検出フィルタリングとは, 濃淡画像上の線らしい領域を残し, そうでない領域を小さくする手法である。

具体的には, 図 3 のような 1 つの線検出フィルタとそれに対応した 2 つの領域検出フィルタを用意して, 入力画像に対して畳み込み [4] を行う。入力画像を f , 出力画像を g , 大きさ $W \times W$ のフィルタを h としたときの畳み込みの式を式 1 に示す。

$$g(x, y) = \sum_{n=-W}^W \sum_{m=-W}^W f(x-m, y-n)h(m, n) \quad (1)$$

線検出フィルタを用いた畳み込みの結果の画素値の方が大きい場合はその画素値を採用し, 領域検出フィルタを用いた場合の結果の画素値の方が大きい場合はその画素は直線ではなく領域であるため, 画素値を 0 にする。

この線検出フィルタを様々な直線のパターンに合わせ

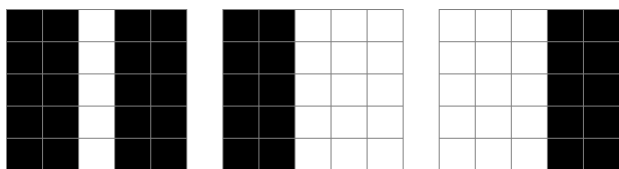


図 3 線検出フィルタと領域検出フィルタ（90 度の直線の場合）

て計 56 個用意して同様の処理を行い、得られた 56 枚のフィルタリング画像の間で画素値の比較を行い、最大値を採用していく。以上の一連の処理を複数回繰り返すことにより、直線らしい部分は残り、そうでない部分は小さくなった画像を得ることができる。

ただし、この手法で検出できるのは幅 1 ピクセルの直線のみである。そこで図 4 のように入力画像の解像度ピラミッドを作成し、上位レベルの画像から順に線検出フィルタリングを行う。そしてその結果を一枚の画像に合成することで、様々な幅の線を検出することができる。

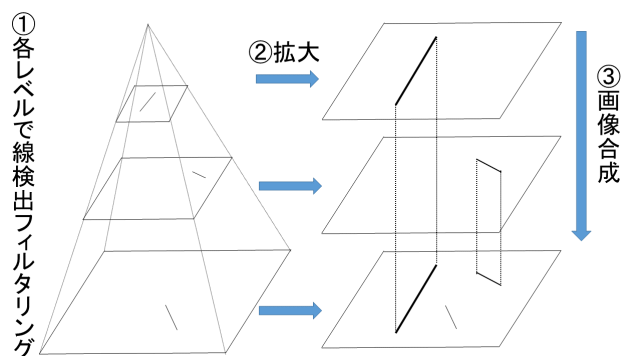


図 4 解像度ピラミッドによる線検出フィルタリングの階層化

4.2 亀裂幅の座標取得

Hough 変換によって得られた直線情報を適応的閾値処理 [5] により得られた二値画像上に投影した上で亀裂幅の座標取得を行う。具体的には、図 5 のように検出された直線に沿って垂直方向に幅を計測していき、得られた座標値の組の中で二点間の距離が最も長い物をその直線に対応した幅であるとする。こうして得られた座標値情報

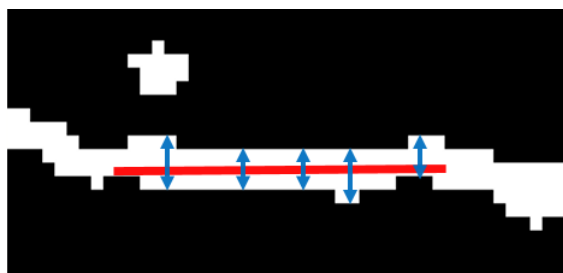


図 5 亀裂幅座標の探索

と入力した画像のファイル名をテキストファイルに出力して、亀裂検出プログラムは終了する。

5. スクリプトによる亀裂幅の自動推定

PhotoScan は GUI ソフトウェアであるため、通常はマウスクリックやキーボード入力によって操作するが、Python スクリプトを用いて PhotoScan の操作を自動化するための API[6] も公開されている。これを利用して、下記の手順で亀裂幅の長さの推定を行うスクリプトを作成した。

- (1) 亀裂検出プログラムが出力したテキストファイルから使用した画像名と亀裂幅の座標情報を読み込む
- (2) 読み込んだ二次元座標値を PhotoScan で作成した法面の 3D モデル上のマーカとして投影する
- (3) マーカ間をスケールバーで結び、スケールバーの長さを亀裂幅の長さとして推定する
- (4) (2) と (3) を全ての座標値の組に対して実行する

PhotoScan では入力したフレーム画像の二次元座標と 3D モデル上の三次元座標との間の対応関係が保存されているため、亀裂検出プログラムで取得した亀裂幅の二次元座標を 3D モデル上のマーカとして設置することができる。

以上により、亀裂が入っている箇所 (図 6(a)) とその幅の長さ (図 6(b)) を PhotoScan 上で確認することが可能になる。



(a) 亀裂幅に設置されたマーカ・スケールバー

Scale Bars	Distance est (m)
☐ point 21_point 22	0.019461
☐ point 15_point 16	0.019581
☐ point 17_point 18	0.020267
☐ point 11_point 12	0.020437
☐ point 33_point 34	0.022563
☐ point 41_point 42	0.022563
☐ point 23_point 24	0.022668
☐ point 25_point 26	0.023016
☐ point 9_point 10	0.024173
☐ point 31_point 32	0.025150
☐ point 20_point 20	0.026176

(b) スケールバーの長さの推定値

図 6 スクリプト実行結果

6. 評価実験

6.1 実験概要

本システムを評価するにあたって、亀裂幅を正確に推定するために法面に近づいて撮影する状況を想定し、実際のモルタル吹付法面を対象にして亀裂検出・亀裂幅推

定機能の精度検証実験を行った。

本実験では図7の二つのモルタル吹付法面を対象に実験を行った。以後図7(a)の凹凸が激しい法面を法面A、図7(b)の傾いている法面を法面Bと呼称する。



(a) 法面 A



(b) 法面 B

図7 実験対象の法面

6.2 亀裂検出機能

亀裂検出機能については、本実験では点検の対象とする亀裂が既に定まっている状況であるため、対象の亀裂を正確に検出できるかどうかを評価の基準とする。具体的には、亀裂検出プログラムによって得られた亀裂検出画像を使用し、検出された直線の総本数の内、亀裂上の直線本数の割合を適合率として評価に用いた。

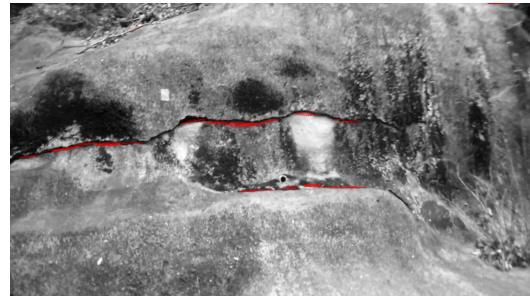
実験の結果、亀裂検出画像は図8のようになり、適合率は法面A、法面Bでそれぞれ72%,59%となった。

6.3 亀裂幅推定機能

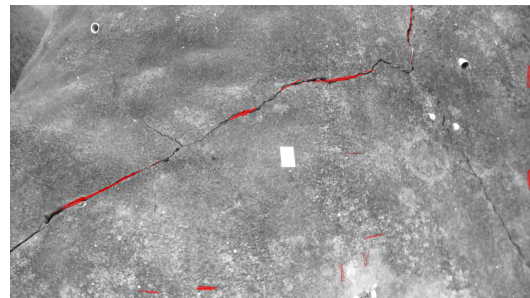
亀裂幅推定機能の評価には本システムの最終結果となる亀裂幅が投影された3Dモデルを使用する。具体的には、3Dモデル上の亀裂幅の箇所の一部に1からNまで番号をつけて、その位置の亀裂幅を実際の法面に対してメジャーで測定し、実測値とする。本実験では法面Aに対しては10箇所の亀裂幅を測定し、法面Bに対しては7箇所の亀裂幅を測定した。

こうして記録した実測値と本システムによる推定値との誤差を算出していき、それを平均した平均誤差を評価に用いた。

実験の結果、平均誤差は法面A、法面Bでそれぞれ



(a) 法面 A



(b) 法面 B

図8 亀裂検出画像

4.8mm,3.2mm となった。

7. 考察と外部評価

7.1 亀裂検出機能

図8より、法面A,B共に対象である画面中央の亀裂を検出できていることが分かる。ただし、法面Aにおいては図9の段差の部分が直線として誤検出された。原因として、段差によって直線のような画素値の差が生まれ、その箇所が線検出フィルタリング時に線らしい領域として残ったことが考えられる。

また、法面Bにおいては図10の染みの部分の誤検出が目立った。通常、染みのような部分は領域であると見なせるため、線検出フィルタリングによって小領域化された上でラベリング処理によって消去される。この場合は線検出フィルタリングの繰り返し回数が少なかったために領域が小さくならず、ラベリング処理を行っても消去されなかったと考えられる。ただし、線検出フィルタリングを繰り返す回数を多くしすぎると画素値があまり低くない亀裂も小領域化されて消えてしまうため、領域の消去と亀裂の正確な検出はトレードオフの関係にあると考えられる。

7.2 亀裂幅推定機能

法面Aは実測値の平均が22.2mmである亀裂に対して平均誤差4.8mmという結果になり、法面Bは実測値の平均が13.1mmである亀裂に対して平均誤差3.2mmとなった。誤差が生じる原因として、以下のものが考えられる。

- 作成した3Dモデルが粗く、ミリメートル単位の亀裂

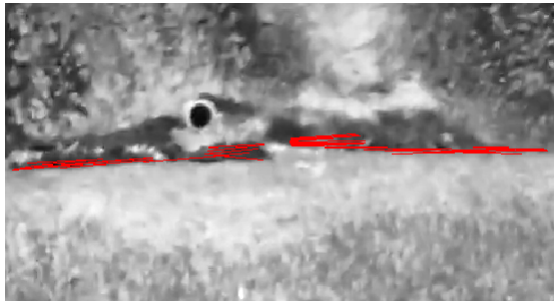


図 9 段差部分の誤検出

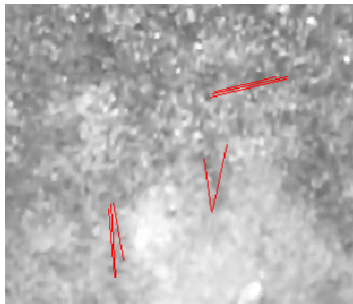


図 10 染みの部分の誤検出

幅を正確に推定できていない

- スケール合わせのために設置したマーカーがずれており、正確なスケール合わせができていない

7.3 外部評価

以上の結果を、共同研究者である地質コンサルタントの方に提出し、外部評価を依頼したところ、以下のような評価を得た。

- 適合率は不十分であり、改善が必要
- 平均誤差は現段階では十分と評価する
- 本システムによる法面点検の人材・予算・時間不足の解消が期待できる
- 実用化には経年変化への対応が必須である

亀裂幅の経年変化情報は、法面の老朽化や空洞化の進行度合いを測る上で非常に重要な指標である。本システムの実用性を厳密に評価するためには、経年変化観測の実装を行い、その精度を指標とする必要がある。

8. おわりに

本研究では、モルタル吹付法面の亀裂検出・亀裂幅計測を画像処理を用いて自動化することを試みた。亀裂検出に関しては画像上に写る亀裂を色が暗い折れ線で近似できるものであると定義し、線検出フィルタリング・ラベリング処理・Hough変換を用いて実現し、亀裂幅計測に関してはStructure from Motion技術によって法面の3Dモデルを作成し、3Dモデル上に亀裂幅を投影して長さの推定を行うことで実現した。

また、本システムの外部評価として、亀裂検出機能は不

十分な精度だが、亀裂幅推定機能は現段階では十分な精度であり、実用化には経年変化への対応が必須であるとの回答を受けた。

今後の課題として、亀裂の定義の厳密化による亀裂検出機能の精度向上と亀裂幅の経年変化観測機能の実装とが挙げられる。亀裂の点検を行う上で、亀裂幅の経年変化情報は非常に重要である。よってこの機能を実装し、経年変化観測の精度検証を行うことで、亀裂検出・亀裂幅推定に関する具体的な数値目標を設定することができると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、地質コンサルタントとして多くのご協力を頂いた香月裕宣氏（株式会社ジオテック）と栗原靖史氏（有限会社ケイ・スタイル）に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Agisoft PhotoScan, <http://www.agisoft.com/>
- [2] ラベリング処理アルゴリズム, <http://imaging-solution.blog107.fc2.com/blog-entry-193.html>
- [3] 本田裕紀:路頭写真からの亀裂およびその3次元情報の検出に関する研究, 福岡大学, 2012
- [4] OpenCV 2.1 documentation:画像フィルタリング, http://opencv.jp/opencv-2.1/cpp/image_filtering.html#cv-filter2d
- [5] OpenCV 2.2 documentation:その他の画像変換, http://opencv.jp/opencv-2svn/cpp/miscellaneous_image_transformations.html#cv-adaptivethreshold
- [6] PhotoScan Python Reference Release 1.2.0, Agisoft LLC, November 18, 2015