

ラインセンサカメラを用いたトンネル変状検査システム トンネルスキャナー

鵜飼 正人・下田 一也

トンネル覆工表面の高精度な展開画像を、低コストで効率的に撮影できる、ラインセンサカメラを中心とした撮影装置「トンネルスキャナー」を開発した。専用の撮影車によらず、工所用トロなどにカメラ・照明を搭載して撮影する。撮影速度は約 20 km/h と高速で、単線トンネルは 1 回、複線トンネルは上下線各 1 回の走行で全断面を撮影する。1 回の走行で数十 km の連続撮影が可能である。さらに、ひび割れや漏水などの変状を自動的に検出し、その幅や長さなど精度良く計測する、トンネル全般検査に適用可能な画像処理手法を開発した。本報では、開発した撮影装置ならびにひび割れなどの変状を自動的に検出する画像処理手法について報告する。

キーワード：トンネル，変状，ひび割れ，ラインセンサカメラ，画像処理

1. はじめに

コンクリート構造物の目視検査は、検査員の主観に左右される上、膨大な作業量となるため、検査精度の向上と作業の効率化が望まれている。

鉄道トンネルの維持管理業務のうち、全般検査はすべてのトンネルを対象として 2 年ごとに実施され、基本的に目視や打音によって変状を抽出し、健全度を判定している。近年、これら人手による検査方法に代わって、レーザ¹⁾ やハイビジョンカメラを用いたトンネル検査システム²⁾ が開発され、その効果が報告されている。これらの背景としては、高性能で低価格な画像処理ハードウェアが出現し、これにより画像処理技術の適用可能性が高まったことが挙げられる。

我々は、ラインセンサカメラを用いてトンネル覆工面の高精度な展開画像を撮影する「トンネルスキャナー」装置と、ひび割れや漏水などの代表的な変状を自動的に検出し、その幅や長さなどをサブピクセル精度で計測する、トンネル全般検査に適用可能な画像処理手法を開発した。

2. トンネルスキャナー撮影装置

(1) 撮影装置の概要

トンネルスキャナーは、撮影専用の車両を使用するのではなく、カメラ・照明など必要最低限の装置を、工所用車や保守用車に搭載して撮影するものである。

この際、ラインセンサの光軸がトンネル断面方向になるようにカメラを取り付け、単線トンネルは 1 回の走行で、複線トンネルは上下線各 1 回の走行で全断面を撮影することができる。基本的に車上では撮影・記録のみを行い、地上で撮影データをオフライン処理する。本装置は、撮影速度、記録時間ならびに記録容量において、他のトンネル覆工面撮影装置に比べ大幅な性能向上を実現している。開発したトンネルスキャナーの外観を写真-1 に示す。

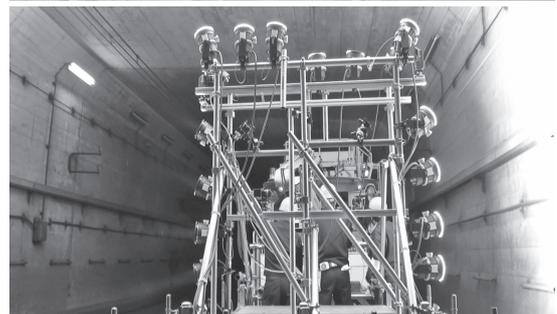
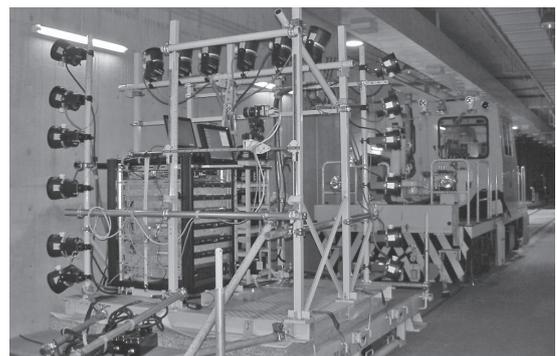


写真-1 トンネルスキャナーの外観

鉄道トンネルの場合、一般的に検査業務は、夜間の数時間程度の列車間合いで実施される。また検査精度に関しては、幅1mm以下のひび割れを検出したいという要求がある。これらの要件を満たすためには、撮影速度と撮影解像度が重要な鍵となる。この撮影速度は要求解像度とラインセンサのスキャン速度によって決まる。他のほとんどの撮影装置の速度が数km/h程度であるのに対し、本装置の現段階での設定速度は20km/hと高速なので、一晩の作業間合いで数十kmの連続撮影が可能である。

(2) 撮影解像度の算出

ラインセンサカメラの仕様を表一に示す。ラインセンサカメラによる撮影では図一に示すように、素子の向きはトンネル断面方向と一致する。撮影解像度に関しては、断面方向はカメラ画素数によって、延長方向は車両の走行速度とスキャン速度によって決まる。通常の撮影では、設計解像度を縦横約0.8mm/pixelとしている。

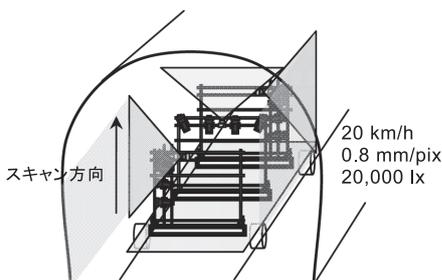
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad M = \frac{b}{a} = \frac{np}{Lx} \quad Lx = \left(\frac{a}{f} - 1 \right) \times np$$

$$a = \left(\frac{Lx}{np} + 1 \right) \times f \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここにLxはトンネル壁面の視野、npはラインセンサの全画素長、aはトンネル壁面～レンズ間距離、bはレンズ～ラインセンサ間距離、fは焦点距離、並びにMは光学系倍率である。5,150画素のカメラで解像度

表一 ラインセンサの仕様

画素数 (bit)	5150
画素サイズ (μm)	7 (H) × 7 (V)
素子長 (mm)	36.05
駆動クロック (MHz)	40
感度 (V/(lx·s))	120
飽和露光量 (lx·s)	0.0416
データレート (MHz)	40
ビデオ出力	Camera Link 8 bit/10 bit
外形寸法 (mm)	64(W) × 70(H) × 114.5(D)
レンズマウント	Nikon



図一 ラインセンサのスキャン方向

0.8 mm/pixelを得るためには、一台のカメラの視野幅は4,120mmとなる。実際の撮影条件 np=36.05 mm, f=20 mm を代入すると、カメラ取り付け位置は

$$a = \left(\frac{4,120}{36.05} + 1 \right) \times 20 = 2,305.7 \text{ (mm)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となり、壁面から約2.3m離れた位置にカメラを取り付ければよい。また延長方向に関して、撮影速度20km/hで0.8mm/画素の解像度を得るために必要なスキャン速度は

$$Vscan = 0.8 \div \left(\frac{20}{3,600} \right) = 144 \text{ (}\mu\text{s)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり性能内に収まっている。

なお、スキャン用の同期信号として、たとえば車輪回転パルスを利用すれば、車両速度が変化しても延長方向の距離ピッチは一定となる。ところが、モーターカーやトロリーの車輪回転パルスは、簡単には取得できないという課題がある。そこで車両は定速走行するという前提で、本装置では通常、車両速度に対応した一定のスキャン速度で撮影している。

(3) フォーカス調整機能

ラインセンサカメラの場合、静止状態でのフォーカス調整が難しいため、効率よく、正確にピントが合わせられるかどうかポイントとなる。そこでフォーカスの合焦度合が、映像信号波形の形状特徴として表れることに着目し、一次微分値のヒストグラムを用いて、波形の先鋭度合いを評価する解析手法を考案した。このようにフォーカスの合焦度合を定量化することで、誰でも正確にピントを合わせることが可能となった。

3. 展開画像 (マスタ画像) 作成

本章では、トンネルスキャナーで撮影した画像から展開画像を生成する手順を説明する。

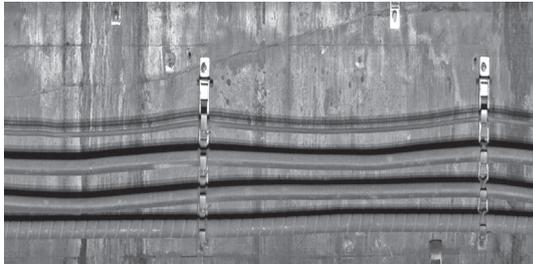
(1) コントラスト改善処理

トンネル壁面の汚れのため、全体的に暗く、コントラストの低い画像が撮影される場合がある。画像の輝度ヒストグラムを見ると、暗い部分にヒストグラム分布が偏っている。そこで、ヒストグラムを線形変換して輝度値の分布を0～255まで広げて、鮮明な画像に改善した。修正後の輝度値は、

修正後の輝度値 = 255 × (各画素の輝度値 - 輝度値の最小値) / (輝度値の最大値 - 輝度値の最小値) となる。なお、正規化して最大値を255にあわせている。この処理により、コントラストが高くなった改善



①撮影元画像



②輝度レベル補正後画像

写真一2 コントラスト改善処理

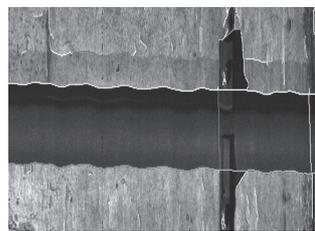
後の画像を写真一2に示す。

(2) カメラブレ補正処理

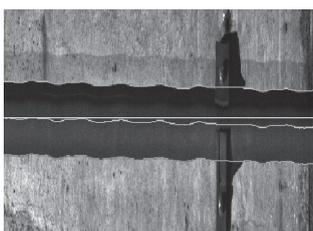
車両振動に伴いカメラがぶれると、撮影画像に揺らぎが発生する場合がある。ラインセンサカメラはセンサが1次元であるため、カメラが上下方向に振動すると、階段状にずれたような画像となる。そこでこのズレを1ライン単位で補正する手法を検討した。本来直線であるはずの電線ケーブルなどの構造物を手がかりに、波状のエッジからズレ量を計測し、ラインごとにそのズレ量だけシフトして補正する。特別なセンサを用いることなく、写真一3に示すような良好な画像を得ることができた。



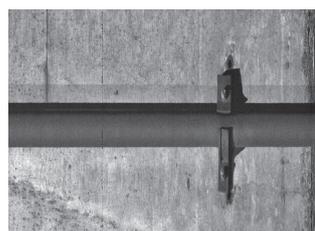
①補正前元画像



②ケーブルのエッジ抽出



③両側線の平均線近似



④シフト処理による補正後画像

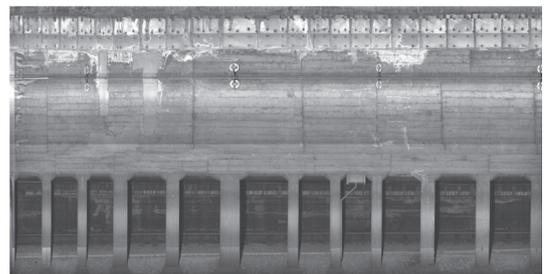
写真一3 カメラブレ補正処理

(3) トンネル断面方向の歪み補正処理

撮影画像には、レンズ周辺部で画像が歪む歪曲収差以外に、例えば馬蹄形のトンネルを撮影した場合、トンネル壁面が複雑な曲面であることから、曲率の違いにより断面方向の画素ピッチが変化するという歪みが発生する。そこで、この画素ピッチを一定にする正規化処理アルゴリズムを開発し、テスト画像を用いて検証実験を行った結果、歪みが正しく補正されることを確認した。

(4) トンネル延長方向の正規化処理

ラインセンサカメラのスキャンスピードは一定なので、車両速度が変化すると、トンネル延長方向の画素ピッチが変化する(伸縮した画像になる)という課題を抱えている。そこで、撮影用ラインセンサカメラとは別に軌道などを撮影するカメラを準備し、当該カメラで記録された画像に対して、微小時間間隔における前後の画像の輝度データから速度ベクトルを算出するアルゴリズムを検討した。得られた速度情報を基に、画像の正規化処理を行った結果、写真一4に示すように延長方向の画素ピッチが一定な画像が得られた。



①撮影元画像 (本来等間隔の桁のピッチが不揃い)

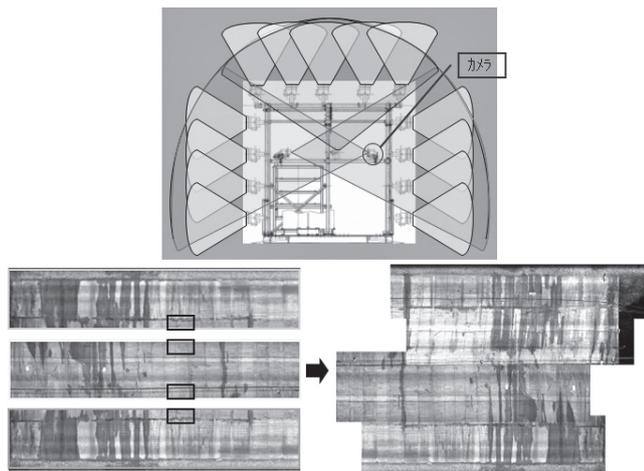


②正規化処理後画像 (桁のピッチが等間隔)

写真一4 延長方向の正規化処理

(5) 各カメラ画像の接合処理

図一2に示すように、トンネル断面方向に複数のカメラで分割して撮影した画像をつなぎ合わせて一枚の展開画像を作成する。一般的には、隣接する画像内で重複して映っている領域に対して、人間が切り取り位置を指定することで重ね合わせを行っている。しかしこの方法では、接合精度が良くない上、データも膨



複数台のカメラで覆工面を分割して撮影し、各カメラの画面をつなぎ合わせる

図一 各カメラ画像の接合処理

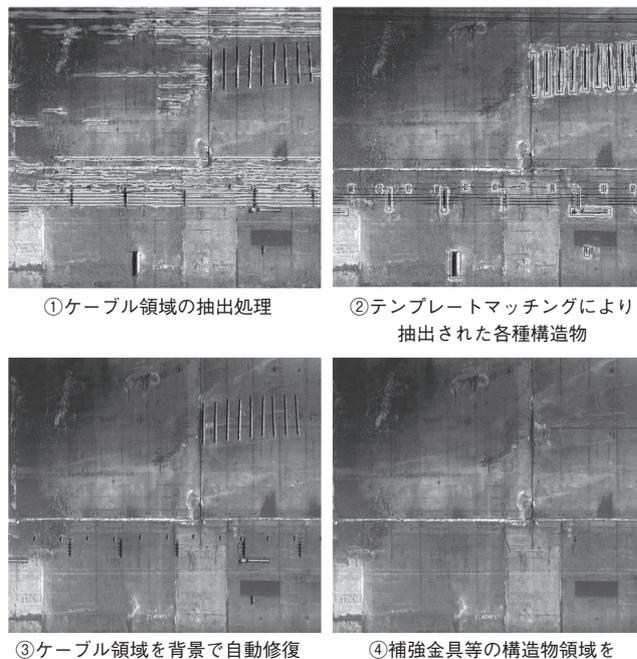
大になるので、精度向上と効率化が課題であった。そこで、マッチングを自動化するために、パノラマ画像などを生成する際に用いられるイメージモザイク手法を適用した結果、精度良くつなぎ合わせができるようになった。

4. 画像処理手法を用いた変状検出手法の開発

(1) 画像補間技術を用いたノイズ成分の除去

トンネル壁面画像には、ひび割れ以外にも型枠や汚れ、ケーブル等が映っており、通常の画像処理はひび割れ以外の対象にも一律に作用するので、ひび割れだけを選択的に処理することができない。そこで、これら画像内の不要部分を取り除いた上で、取り除かれた領域（欠損領域）を自動的に補間するアルゴリズムを検討した。蛍光灯、架線等の構造物を画像中から抽出して、壁面のみを生成する画像補間手法³⁾を適用した。

まず抽出したい構造物をテンプレートとして登録し、スケールの変化に対応した形状ベースのパターンマッチングでこれらを抽出する。本検索手法においては、濃淡値を適用するのではなく、物体の特性を定義する輪郭データと、その法線方向の濃淡値の勾配データを適用する。これにより隠ぺいや乱れのある画像にも極めて頑強な検索を実現する。スケールに関しては、モデルの大きさの0.8～1.2倍まで探索するようにしている。次に、テクスチャを考慮しながら周辺のトンネル壁面画素で探索した当該領域を補間する。つまり、当該領域が新しい濃淡値で覆われるまで、周囲の画像の完全な部分からコピーする。この過程を繰り返すことで、写真一5に示すようにあたかもこれらの構造物が無いような画像が生成される。不要成分が除



写真一 5 画像補間手法による壁面画像の生成

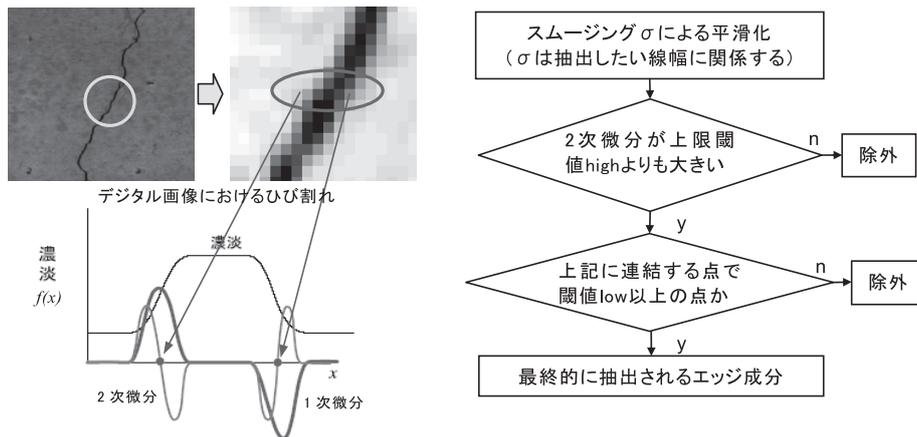
去された画像に対してひび割れ検出処理を行ったところ、ケーブルや構造物が誤って検出されることがなくなり、変状検出に有効な前処理手法であることを確認した。ただし、ケーブル近傍に存在する変状は、一緒に除去される可能性もあるので、マスク領域に対しては別途検出処理を行うようにしている。

(2) サブピクセル精度のひび割れ検出アルゴリズム

展開画像から、代表的な変状のひとつであるひび割れを、自動的に検出する画像処理手法を検討した。

周辺に比べて黒っぽい線状の領域というひび割れの特徴に着目して、ひび割れを輪郭線でモデル化する。輪郭線周辺はコントラストが急激に変化する部分なので、画像の微分値の高い部分を抽出するようなフィルタ^{4),5)}を適用した。検出感度を左右する3つのパラメータ（平滑化係数 σ 、ヒステリシスを考慮したエッジ抽出の上限の閾値 high、および下限の閾値 low）を操作し、幅0.5 mm程度のひび割れを検出する。

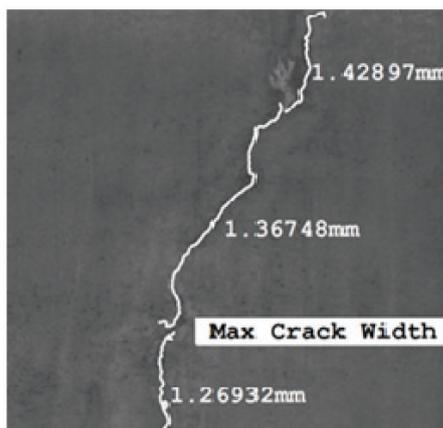
本アルゴリズムでは、エッジ強度の強い（太いひび割れの可能性が高い）成分に対しては、その端点からさらに伸びるひび割れや、枝分かれするひび割れ、連結するひび割れがないかを、きめ細かく検査する。1次微分処理においては、本来のひび割れ以外にも、ノイズを誤って検出したり、逆に目的とするひび割れが得られない場合がある。そこで、これらノイズの検出を抑制して、本来のひび割れを検出する手順を図一3に示す。確実と思われるエッジ要素、つまり閾値上限



図一三 ヒステリシス閾値を適用したひび割れ検出の高精度化

High を超えるエッジ強度を持つエッジ画素を求める。次に許容できる低い閾値 Low 以上のエッジ強度を持つエッジ画素を求め、そのうちで High で求めた確実と思われるエッジと結びつく画素のみを選ぶ。これら以外の画素はすべて除外する。検出実験により評価した結果、一例として $\sigma = 2.3$, $high = 0.7$, $low = 0$ に設定すると、比較的良好な検出結果が得られた。

本手法により、本来のひび割れ情報を保ちながら、ノイズを抑えることが可能となり、検出性能の大幅な向上を実現した。また、本処理はサブピクセル精度の結果が得られるので、写真一六の最大ひび割れ幅計測結果が示すように、高精度な画像計測が可能となっている。さらにトンネルクラウン部などはより詳細な検査ができるように、ひび割れの発生部位や方向に応じて、検出感度を調整できるようにしている。

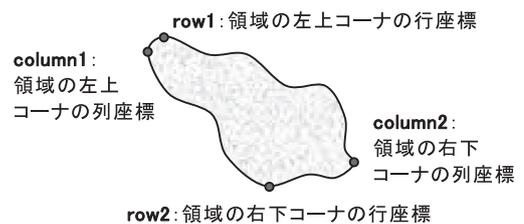


写真一六 最大ひび割れ幅の計測結果

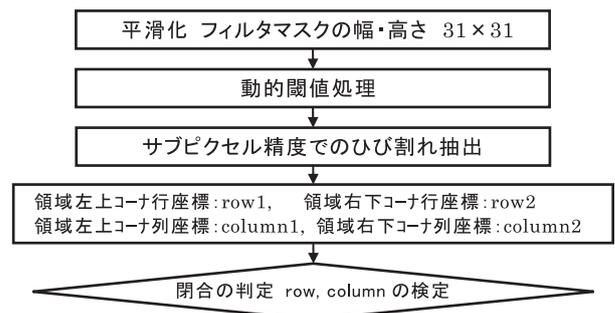
(3) 閉合ひび割れの検出アルゴリズム

ひび割れ同士がつながって、幾何学的に閉じた領域となる“閉合ひび割れ”が発生すると、当該部分のコンクリートが落下する剥落の危険性が高まる。この閉合ひび割れを自動的に検出するアルゴリズムを検討した。

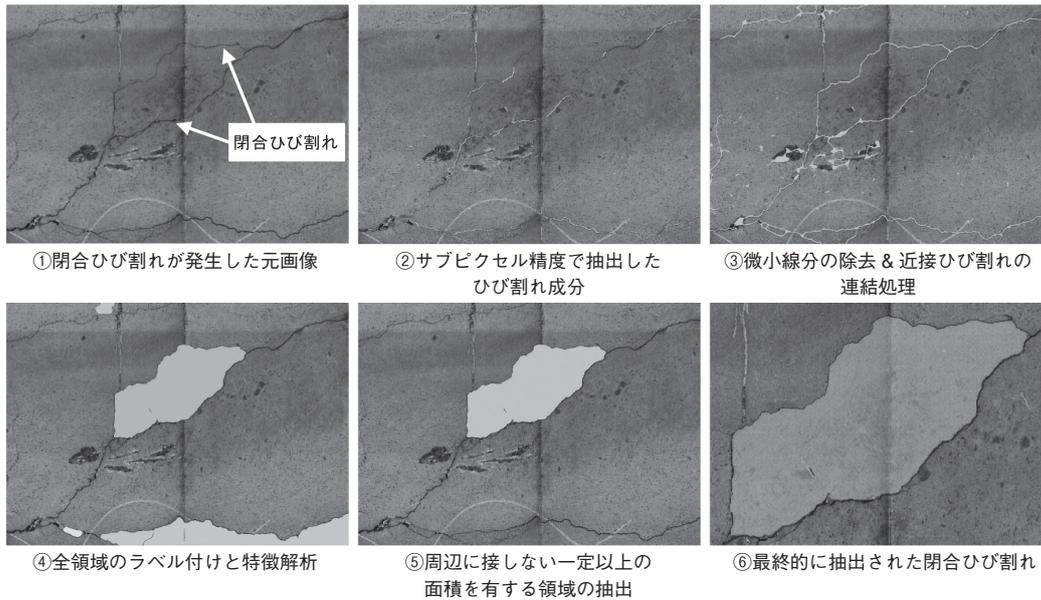
一般的な閉合ひび割れのサイズをカバーする面積だけオーバーラップするように分割した処理領域に対して、撮影解像度以上のサブピクセル精度でひび割れ成分を検出する。プロブ（領域）解析により、一定以下の面積の微粒子を除去し、かつ近接する線成分同士を連結する。次に全ての領域に対してラベル付けを行い、各領域の左上及び右下コーナの座標値を検定する。図一四に示す、領域左上コーナの列座標 column1、領域右下コーナの列座標 column2とも背景の [1, width] 以内であり、かつ領域左上コーナの行座標 row1、領域右下コーナの行座標 row2とも [1, height] 以内であれば、当該領域は閉合ひび割れであると判定する。図一五に示す画像処理プログラムを作成し性能を検証した結果、閉合ひび割れを精度よく検出できることを確認した（写真一七）。



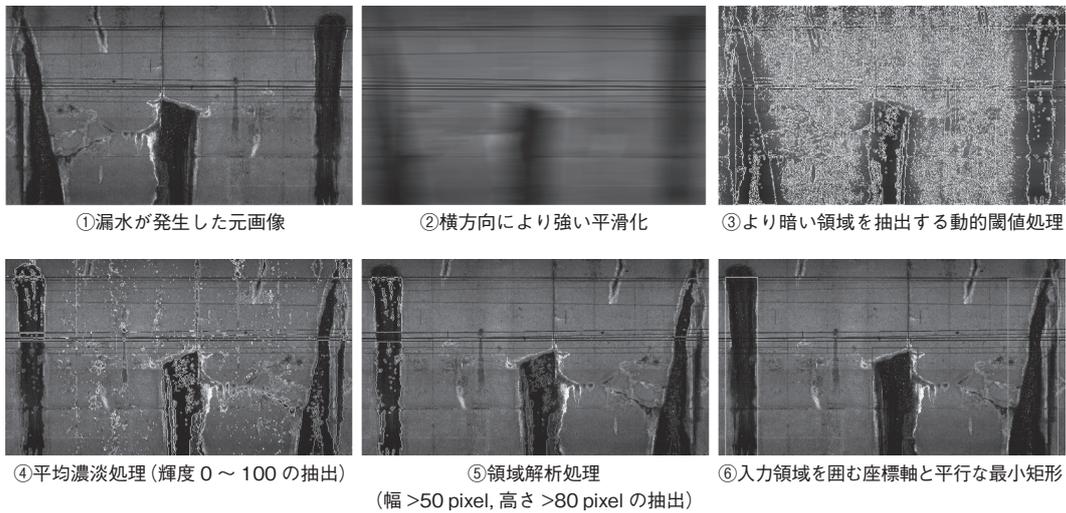
図一四 領域特徴解析における各座標



図一五 閉合ひび割れの検出処理フロー



写真—7 閉合ひび割れの検出処理結果

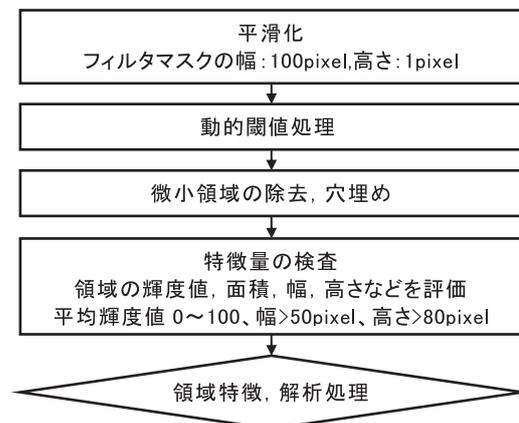


写真—8 漏水の検出処理結果

(4) 漏水の検出アルゴリズム

一般的な漏水は、ひび割れ等からしみ出た水が、壁面をつたって鉛直方向に流れ落ちる黒っぽい跡として確認される。この特徴に着目して、最初に横方向に強い平滑化をかけ、輝度むらや輝度変化の影響を受けにくい動的閾値処理で、背景に比べてより黒い領域を抽出する。次に小さなノイズを除去し、標準的な漏水の平均輝度値の範囲でかつ、一定の幅と高さを有する領域を抽出する。領域の穴埋め、周囲領域の連結処理を行い、最終的に当該領域を囲む座標軸と平行な最小矩形を漏水として検出する。処理フローを図—6に、処理結果を写真—8に示す。なお、本手法は漏水のみならず、全体的に白く粉をふいたようなエフロレセンス、鉄バクテリアなどの茶褐色の堆積物が付着した

領域、さらにはコールドジョイントの検出にも適用できる。

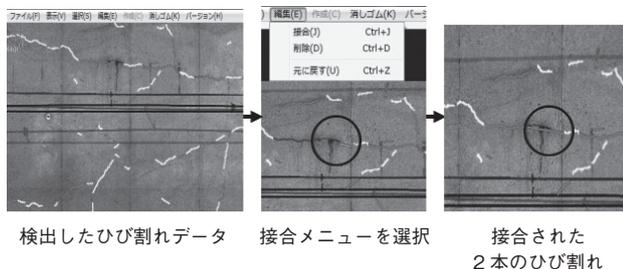


図—6 漏水の検出処理フロー

5. 対話型変状編集ツールの開発

実用的な検出結果を得ることを目的として、検出した変状に対して、接合や削除等の編集機能を有する変状編集ツールを開発した。例えばひび割れデータは、CSV形式の“ポリラインファイル”に保存されているので、これを適宜編集し更新保存する。画像ファイルとひび割れデータの表示レイヤを独立して管理しているので、画像ファイルのみ、ひび割れデータのみ、並びにオーバーレイ表示が可能である。

ひび割れの場合、主に使用するのは接合、削除、消しゴムである。接合に際しては3本以上の接合の状態は一意に決まらないため、2本選択時のみ接合可能とした。接合部分は最も近いひび割れ構成点同士とした。削除は、選択されたひび割れの構成点全て、もしくは一部を削除する。ひび割れの途中の構成点データが削除された場合は、残りのひび割れデータに新たなID番号を付与する。消しゴムは選択の有無に関係なく、なぞった領域を全てクリアする。接合・削除・消しゴムの各一操作分に対して、現在の処理を取り消し、一つ前の状態に戻すUndo機能を備えている。ひび割れ編集ツールの操作画面例を図一7に示す。



図一7 ひび割れ編集ツールの操作画面例

6. おわりに

ひび割れ等の変状を検出するうえでノイズとなる領域を補間する画像修復手法、トンネル健全度診断の重要な評価指標となるひび割れ、閉合ひび割れ、漏水の自動検出アルゴリズムを開発した。今回開発した手法

は、非接触的検査手法を用いたコンクリート欠陥診断システムの重要な要素技術の一つとして利用できるものと考えている。

トンネルスキャナーは2006年度から本格的な導入を開始し、2011年9月末現在12社23路線と、着実に撮影実績を伸ばしている。近接目視相当以上の撮影解像度(0.5mm～1.0mm/画素)を有し、鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編 トンネル)⁶⁾によれば、通常全般検査における目視に代え得る手法の一つとして、トンネルスキャナーが挙げられており、鉄道事業者においても安心して導入いただいている。画像処理に関しては、汎用装置を使用していることから、導入コストを抑えながら、ITの技術革新の恩恵を利用できる、費用対効果の高いシステムとなっている。今後もさらなる実用性を備えたシステムへの機能向上を行い、実用導入の促進を図っていきたい。

JCMA

《参考文献》

- 1) 奥野昇：レーザー光線による覆工コンクリートのひび割れ調査法の高性能化，土木学会論文集，Vol.67, No.788, pp.195. 2005.3.
- 2) 幡旗敏行：方向サイズ可変フィルタを用いた下水道内面ひび割れ候補画素の検出，電気学会論文集C, Vol.126, No.6, pp.744-751 2006.
- 3) Marcelo Bertalmio, et al.: "Image Inpainting," In Proc. SIGGRAPH 2000, July 2000, pp.417-424
- 4) 谷口慶治：画像処理工学 基礎編，応用編 共立出版.
- 5) 高木幹雄：画像解析ハンドブック，東京大学出版会.
- 6) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編 トンネル)，丸善，平成19年1月.

[筆者紹介]

鶴飼 正人 (うかい まさと)
(公財) 鉄道総合技術研究所
信号通信技術研究部 信号
主任研究員



下田 一也 (しもだ かずや)
(株)ジェイアール総研情報システム
技術推進本部 技術推進部

