

# 画像処理によるトンネル構造物ひび割れ検査精度の向上

鵜飼 正人\*

## Improvement of Detection Accuracy of Tunnel Cracks Using Image Processing

Masato UKAI

Our previous RTRI report presented a basic crack detection algorithm. However, the technology which detects the crack automatically with high accuracy is strongly requested. In this report, we describe the algorithm developed by us as given below. We have developed image inpainting algorithm which removes noise element efficiently, and the new image processing algorithm which detects a closed crack, a water leak, and a repair part, and improved the accuracy of diagnosis of tunnel health. Further, we have developed the image browser which can show continuous image of the tunnel efficiently, and the image editor which can joint or delete cracks by using pixel information. As a result, the detection accuracy of the crack has been improved and the practicability of application of this detection system has fairly progressed.

キーワード：鉄道，トンネル，ラインセンサ，ひび割れ，サブピクセル画像処理

### 1. はじめに

トンネル構造物の維持管理において、ひび割れなどの変状は基本的に目視検査に依存している。構造物は概して長大で広大であるため、その作業量は膨大となる。特に暗いトンネル内では、微細なひび割れまで見逃さずに捉えることは難しい。検査者の個人差によるばらつきもあり、作業時間を要するだけでなく、精度や客観性の点でも問題を抱えている。ひび割れ抽出ソフトと言われるものも見られるが、現状では自動抽出の性能は十分とは言えず、半自動処理がほとんどである。このような諸問題に対し、1次元ラインセンサカメラを中心とした車上撮影システムと、画像のつなぎ合わせにより全周展開画像を生成する地上システムとから構成されるトンネル覆工変状検査システムを開発し、実用化した。

前報<sup>1)</sup>で、代表的なトンネル変状の一つであるひび割れを抽出する基本的な画像処理アルゴリズムについて報告した。さらなる検出精度の向上をめざして、ノイズ成分を効率よく除去する画像修復アルゴリズム、閉合ひび割れや漏水、補修箇所などの抽出を目的とした新しい画像処理手法を追加すると共に、トンネルの連続画像を効率よく表示するビューア機能、ひび割れ抽出結果を対話的に編集できるエディタ機能を開発したので、報告する。

### 2. inpainting 手法による画像修復アルゴリズム

トンネル壁面を撮影した画像には、ひび割れ以外にも

型枠や汚れ、ケーブル等の成分が映っており、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。特に閉合ひび割れのように、細かい幾何学的な特徴から判断して検出する場合は、ノイズの影響を極力排除する必要がある。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）を自動的に修復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のに画像補完の代表的な手法である inpainting<sup>2)</sup> を適用した。inpainting 手法自体は既知のアルゴリズムである。

まず抽出したい構造物をテンプレートとして登録し（図1）、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検索した当該領域を補間する。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。この過程が画像修復と呼ばれ、あたかもこれらの構造物が無い画像が生成される（図2）。不要成分が除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、80%の確度で検出できるようになった（図3）。

\* 信号通信技術研究部（信号）

特集：信号通信技術

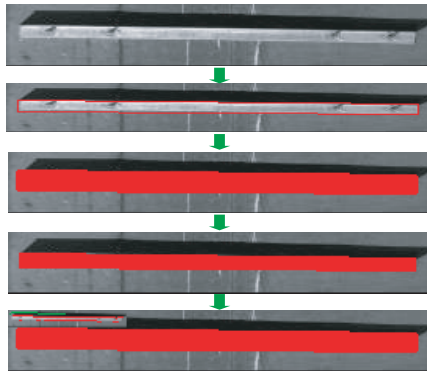
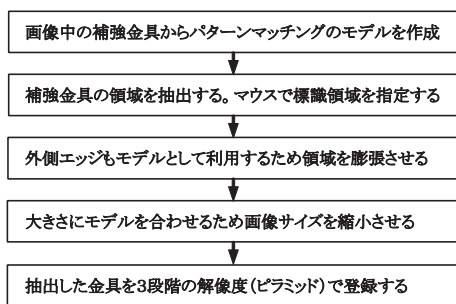
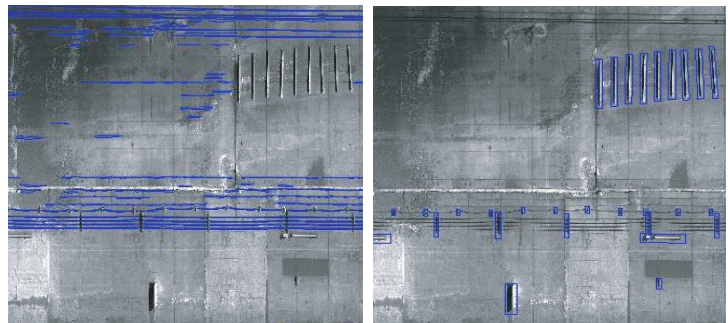
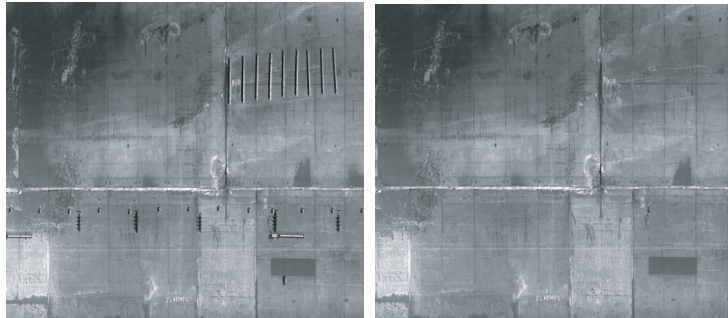


図1 除去する構造物のテンプレート登録処理



(a) ケーブル領域の抽出処理 (b) テンプレートマッチングにより抽出された各種構造物



(c) ケーブル領域を背景画像で補完 (d) 補強金具等の構造物領域を背景画像で補完

図2 inpainting手法による壁面画像の補完

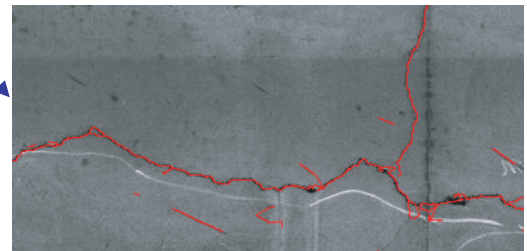
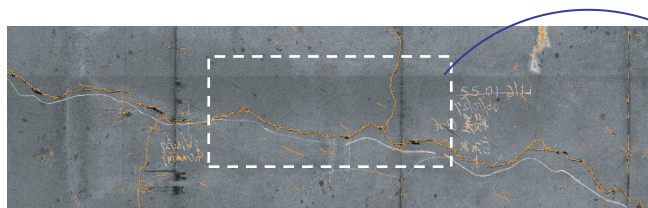


図3 修復処理後画像に適用したひび割れ検出の結果

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抽出するアルゴリズムを検討した。

まず、元画像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抽出する。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4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]以内にあり、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した。図5に示す画像処理プログラムを作成し検証を行った結果、閉合ひび割れを精度よく検出できることを確認した(図6)。

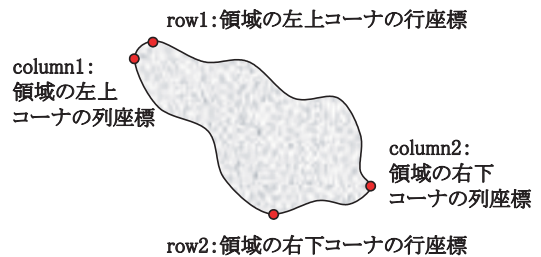


図4 領域特徴解析における各座標

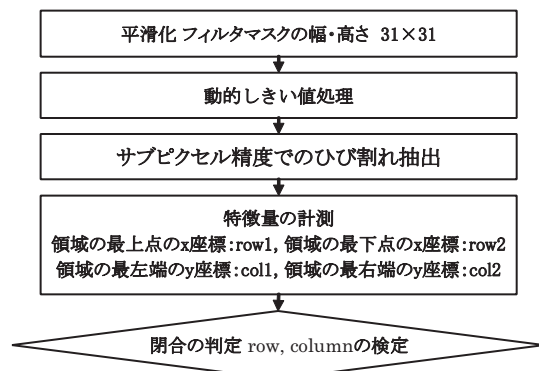


図5 閉合ひび割れ抽出の処理フロー

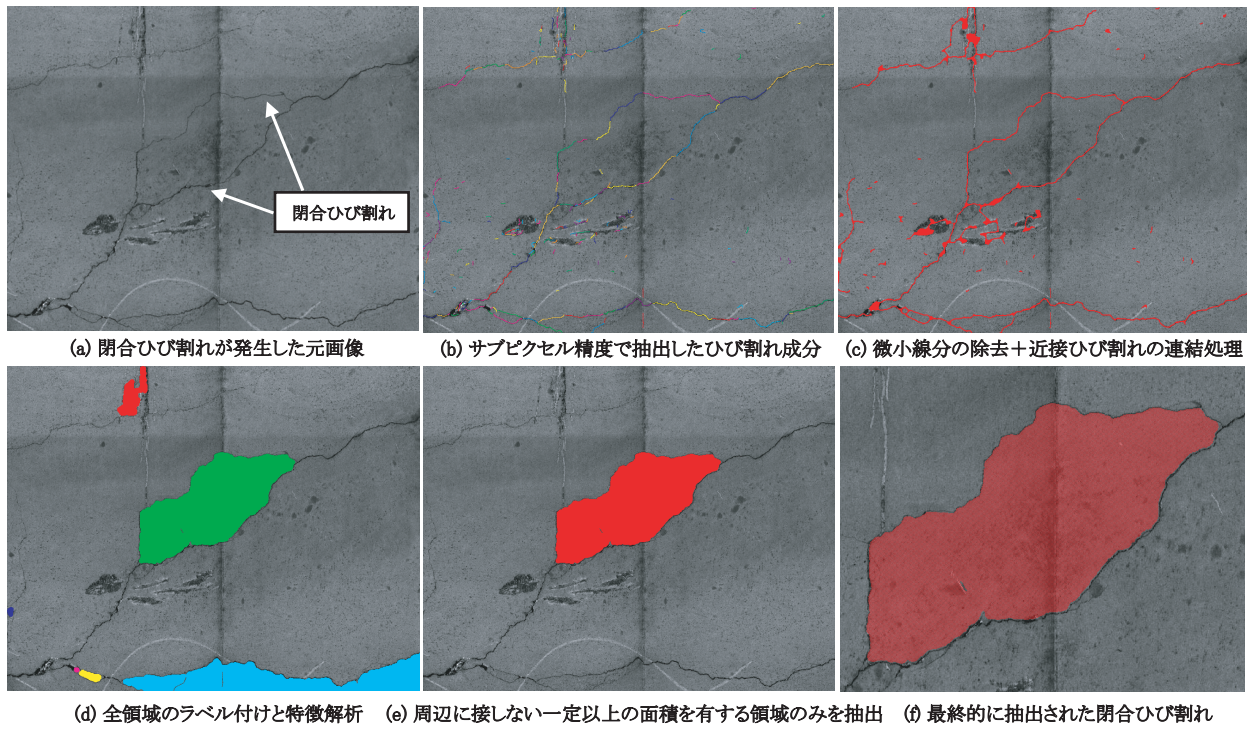


図6 閉合ひび割れの検出プロセス

#### 4. 漏水の検出アルゴリズムの開発

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検出アルゴリズムを検討した。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しきい値処理で、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濃淡値0~100の範囲でかつ、幅 > 50pixel, 高さ > 80pixel を満足する領域を抽出する。領域の穴埋め、周囲領域の閉合処理を行い、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7に、処理プロセスを図8に示す。

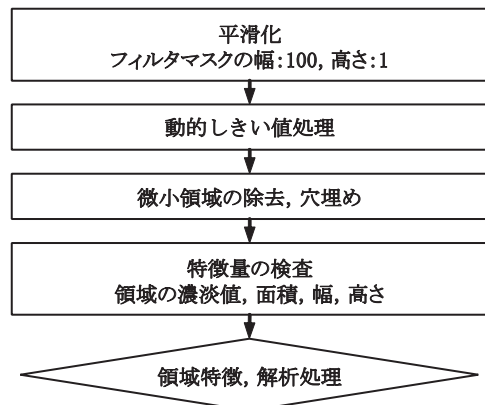


図7 漏水の検出処理フロー

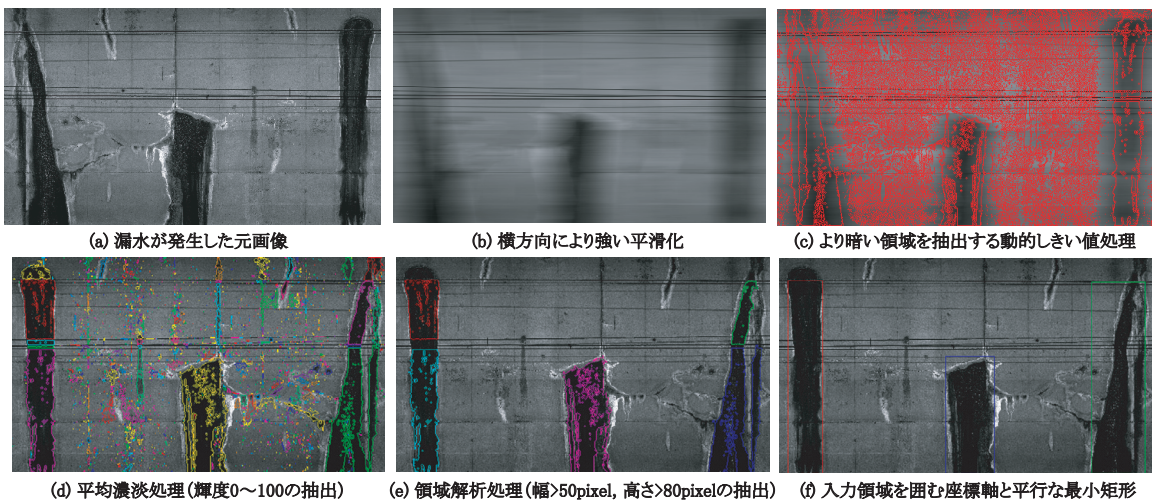


図8 漏水の検出プロセス

特集：信号通信技術

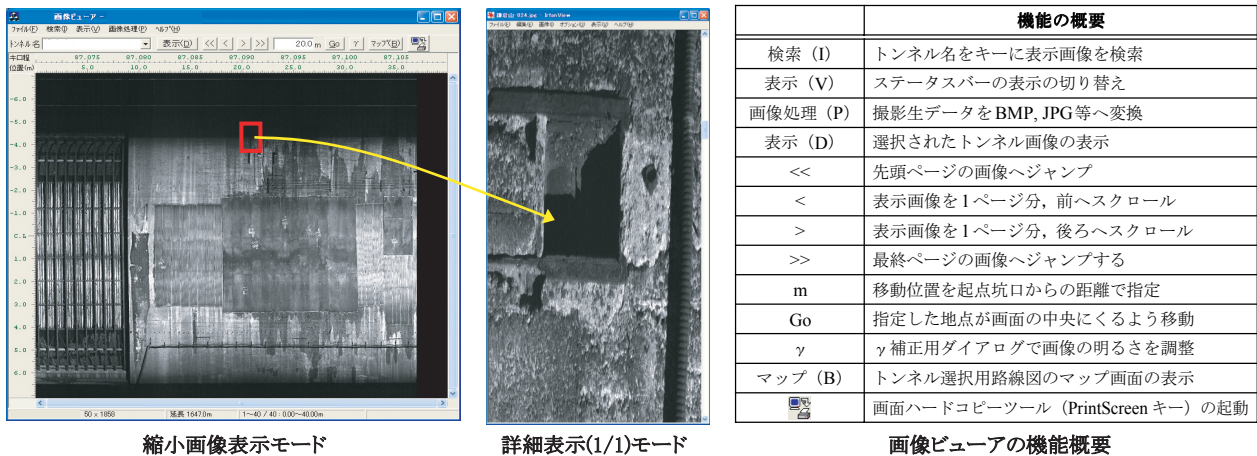


図9 トンネル壁面画像ビューア

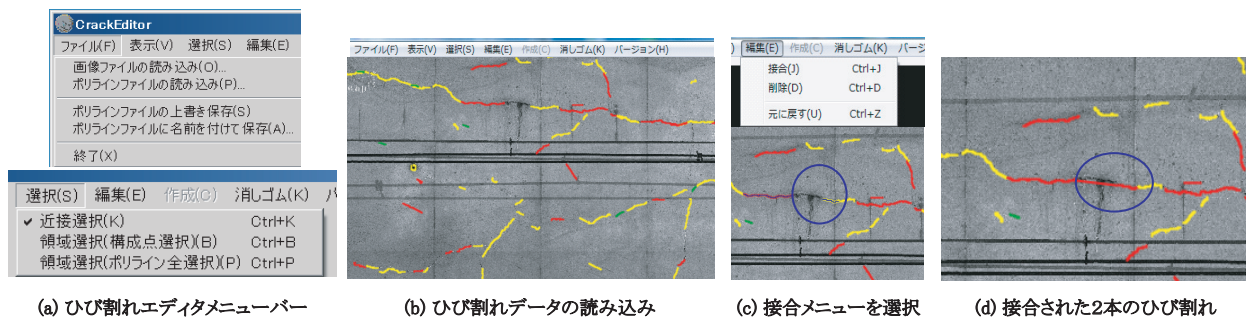


図10 ひび割れエディタ（接合操作の例）

5. 画像ビューアプログラムの開発

トンネル検査車で撮影された膨大な画像データを、パソコン上で効率よく検索・閲覧できるプログラム tunnelviewer を開発した。高解像度の無圧縮元画像から、可逆圧縮した縮小画像までを階層的に管理し、必要な解像度で高速にスクロール表示できるようにした (図9)。今後は、上下左右反転により任意の表示向きに変更したり、トンネル延長方向の撮影ピッチに対応できるように、表示倍率を動的に変更する機能などを追加していく予定である。

6. 対話型ひび割れ編集プログラムの開発

実用的な抽出結果を得ることを目的として、検出したひび割れに対して、接合や削除等の編集機能を有するひび割れエディタを開発した。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、これを適宜編集し再度保存する。画像ファイルが一番下のレイヤーに、ひび割れデータはその上にオーバーレイで表示し、重ねて見えるようにしている。また画像ファイルのみ、ひび割れデータのみを表示させることもできる。

基本的に“選択”されたひび割れが編集操作の対象となる。マウスでクリックしたポイントから最も近くのひび割れに対して、構成点を含む全線を選択する近接選択、マウスで描いた矩形部分 (ラバーバンド) に存在するひび割れが選択される領域選択がある。さらに後者

は、ひび割れの一部が選択矩形にかかる場合は、矩形内に含まれる構成点のみが選択される構成点選択と、ひび割れの一部でも選択矩形にかかった場合は、そのひび割れ全てが選択されるポリライン全選択モードが選べる。

現状の編集機能は「接合」と「削除」である。接合に際しては3本以上の接合のし方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、現在選択されているひび割れの構成点を削除する。また、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 機能を組み込んでいる。

7. おわりに

本研究では、ひび割れ検出精度の向上を中心に、ひび割れ以外の変状の自動検出手法についても検討した。今回開発した画像処理アルゴリズムや作成したソフトウェアについては、鉄道現場で試用を始めており、今後実用導入が図られるものと期待される。

文献

- 1) 鶴飼正人, 長峯望: 「画像処理を用いたトンネル覆工ひび割れの高精度検出手法」鉄道総研報告, Vol20, No.10, 2006.10
- 2) Marcelo Bertalmio, et al.: “Image Inpainting,” In Proc. SIGGRAPH 2000, July 2000, pp.417-424.