

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 画像処理技術を用いて トンネルを検査する

トンネルの通常全般検査は、「十分な照明を用いて徒歩等により目視を行い」と規定されているように、目視検査が維持管理の基本となっています。従来の目視やスケッチにかわり、覆工面の高精細なパノラマ画像を生成する技術や、ひび割れを自動的に抽出する画像処理手法について紹介します。さらに、ひび割れ発生後の挙動把握につながる進展計測手法についても紹介します。これらの技術は、トンネル検査の高度化に寄与するものと考えられます。



鵜飼 正人  
Masato Ukai  
信号・情報技術研究部  
主管研究員  
[専門分野]画像処理、  
画像認識、情報処理

## 設備検査・保守に関する画像 処理技術

トンネルや橋りょうをはじめとした多くの鉄道設備では、外観目視による状態把握を行うことを基本としていますが、この目視検査は検査員の主観に左右されるうえ、膨大な作業量となっています。このような検査保守業務の状況下において、安全性の維持・向上と保全の効率化を両立させるのは簡単ではなく、その実現のためには、画像をはじめとしたICT技術の活用による適切な支援が不可欠であると考えて

います。

画像を利用した技術開発の取り組みの一例として、橋りょう部材の防食機能の劣化、コンクリートひび割れ、床版ひび割れなどの検知に画像解析技術が活用されています。赤外線法によるコンクリートはく離検知は、コンクリート内部の浮きによって起こる熱の伝導の特性変化に着目した手法です。その他、補修・補強材の損傷や定着部の異常検知にも赤外線法が活用されています。

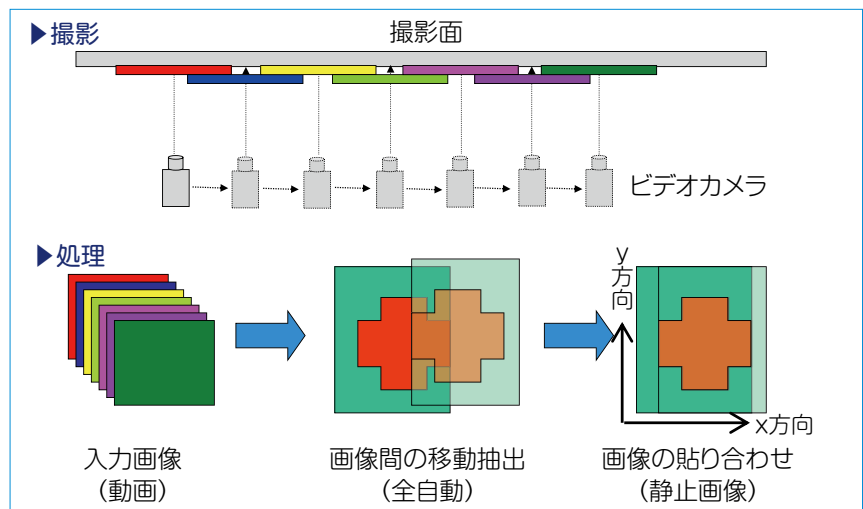


図1 パノラマ画像生成の原理



図2 張り出しスラブのひび割れ検出結果

### ビデオからパノラマ画像

代表的なトンネル検査車の撮影方式は、レーザー光線を走査しながら走行するレーザースキャン方式や、ラインセンサーカメラ方式などですが、ビデオ映像から生成するパノラマ画像方式が最近注目されています。

パノラマ画像とは、複数枚の画像を貼り合わせた、広視野・高解像度の画像のことですが、ビデオ映像から直接パノラマ画像を生成する技術を開発しました。ビデオ映像は毎秒数十コマの静止画像から構成されます。図1に示すように、撮影された映像から、隣接するコマの一致する点を次々に自動推定して、移動量を算出します。コンクリート床版のように、比較的一様な模様の場合、異なる部位同士が一致することがあります。そこで、算出した移動量の数値に外れ値がないか、妥当性をチェックしながら移動方向に沿って、短冊状の領域を静止画に貼り合わせます。x方向およびy方向にずらしながら処理するので、画像の振れや撮影速度の変動に対しても、欠落や食い違いのない、精度の良いパノラマ画像が作成できます。

画像の貼り合わせ手法により高精細のパノラマ画像を作成する技術を開発し、張り出しスラブに対してパノラマ画像を生成しました。当該パノラマ画像から、0.2mm程度の微細なひび割

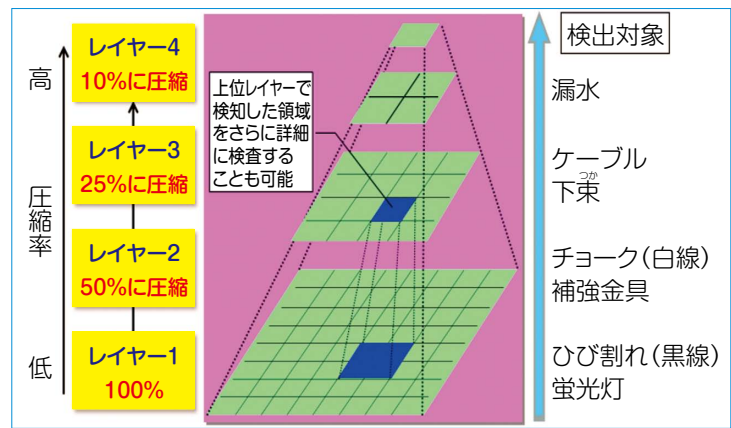


図3 多重解像度表現によるレイヤー画像管理

れを正しく検出できることを確認しました(図2)。

### 多重解像度画像を用いた変状検出

撮影画像に対して異なる解像度の画像を用意し、検出対象毎に最適な圧縮率の画像を使用する多重解像度の考え方を提案しました(図3)。例えば、不鮮明な画像でも検出できる変状に対しては、圧縮率の高い画像を利用することで、ノイズの影響を軽減することができます。これは高周波成分を抑えるローパスフィルターを適用した状態に相当します。一方、微細なひび割れを検出する際には、圧縮率の低い画像を使用します。本手法により、変状検出の信頼性が向上すると共に、処理速度が向上しました。

### 高精度なひび割れ検出手法

ひび割れ幅に対する一般的な検出要求0.5mmに対して、トンネル検査車の撮影解像度はおよそ1mmですので、このままでは要求のひび割れを検出することができません。そこで、解像度を高める手法を適用しました。まず、ひび割れを輪郭線と中心線からなる「領域」としてモデル化しました。輪郭線周辺は、領域の外側から内側に向けて暗くなる所なので、画像の微分値の高い部分を抽出する独自のフィルター処理を適用し、画素境界を精度よく求めます。本手法によれば、画素分解能の1/10程度にまで解像度を高めることができるので、高精度な画像計測が可能となります。

検出感度を左右する3つのパラメーター(平滑化係数 $\sigma$ 、微分値の上限しき

い値highおよび下限しきい値low)を操作しながら、幅0.5mm程度のひび割れが検出できるように調整しました<sup>1)</sup>(図4)。

### 処理パラメーターの最適化

一般的な画像処理アルゴリズムは、基本処理の組み合わせ(処理フロー)とその処理パラメーターから構成されます。ひび割れ検出の性能を左右するこの画像処理パラメーターは、作業者が試行錯誤で設定していました。それに対し、代表的なコンクリート表面に対して良好な検出結果が得られる基準値を予め用意し、このパラメーターのセットを選択するようにしました。個々の数値を調整する必要がないので、熟練者でなくてもひび割れを検出できるようになりました。

### 画像の重ね合わせによらない進展計測手法

変状の進展は、変状の有無と共に正確に把握することが求められています。前回検査時の画像と今回の画像を比較するためには、画像の精密な重ね合わせが必要となりますが、走行状態など撮影条件が異なるため、そのままでは重ね合わせることができません。一般的に異なる時期の画像には、平行移動や回転、スケールの変化が内在するため、基準となる標点を用いて、画像を精密に正規化したうえで差分をとる必要がありますが、このような手法で実画像全体を精密に重ね合わせることは困難です。そこで、画像の重ね合わせによらない方法として、ひび割れ形状を表す画素の連結性に注目して、進展を追跡する手法を開発しました。

具体的には、線幅が1画素の2値画像

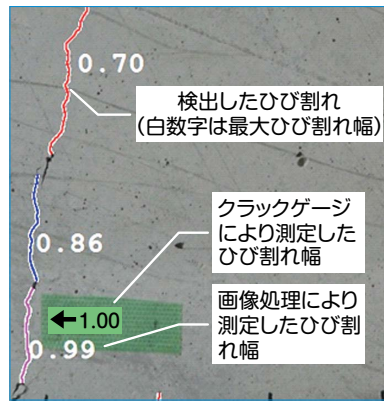


図4 最適パラメーター値によるひび割れ検出結果

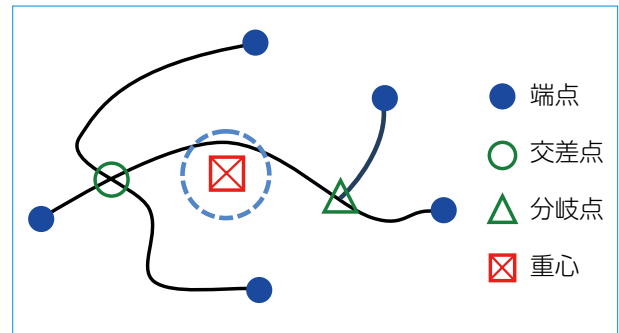


図5 画素の連結性に着目した特徴点

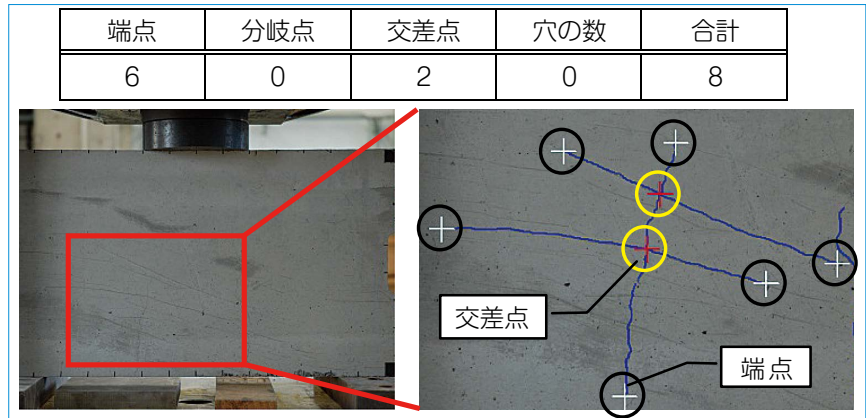


図6 特徴点でひび割れを表現した例

の黒の部分は図5に示すように、端点、分岐点、交差点に分類できるので、各特徴を調べることによって図形の認識・識別を行いました。特徴点でひび割れを表現した例を図6に示します。画像の回転・平行移動・スケール変化に対しても特徴は維持されるので、画像認識を行ううえで有効な手段となります。これら特徴量から計測される点間距離などを評価することで、ひび割れの進展を検出する手法を開発しました。そのアルゴリズムを以下に示します。

- ①1時刻目の画像に対して前述のひび割れ検出処理を実行し、特徴解析により先に示した特徴量の座標と数を算出します。次に、各枝の端点と交差点の距離、最大ひび割れ幅を計算します。
- ②2時刻目の画像に対して、同様のひび割れ検出処理を実行します。
- ③結果画像に対し、1時刻目のひび割れ重心から一定の範囲内(破線の円)

で重心の有無を調べます。

- ④円内にひび割れの重心が存在した場合は、②で得られたひび割れの中から、該当する重心を持つひび割れの特徴量の種類と個数を調べて、同一のひび割れか否かを判定します。
- ⑤同一ひび割れの場合は、各枝の端点と交差点の距離を計算します。1時刻目の対応する端点と交差点の距離と最大ひび割れ幅とを比較し、進展を検出します。
- ⑥以降、得られた時系列画像に同様の処理を繰り返すことでひび割れの進展を検出します。

### アルゴリズム評価のための確認試験

実際のひび割れは徐々に成長するため、加速試験を実施しました。載荷試験機を用いて試験体に力を加えて、徐々にひび割れを発生させながら、ひび割れが進展していく画像を撮影し、

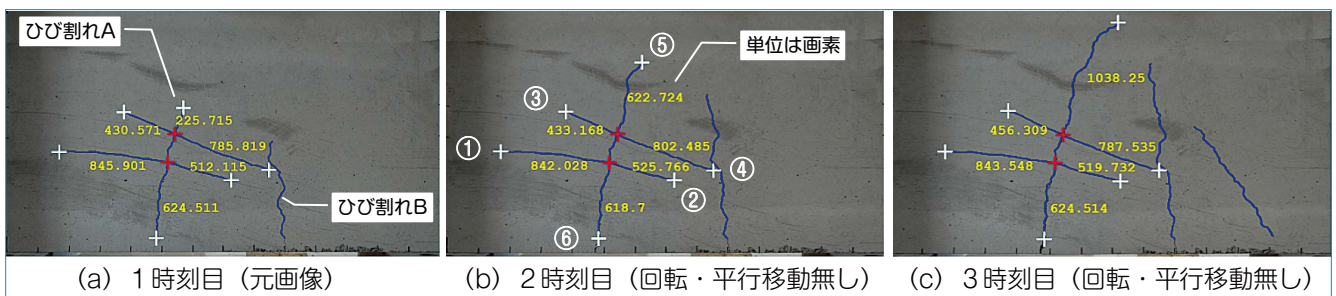


図7 回転・平行移動のない画像による検出結果

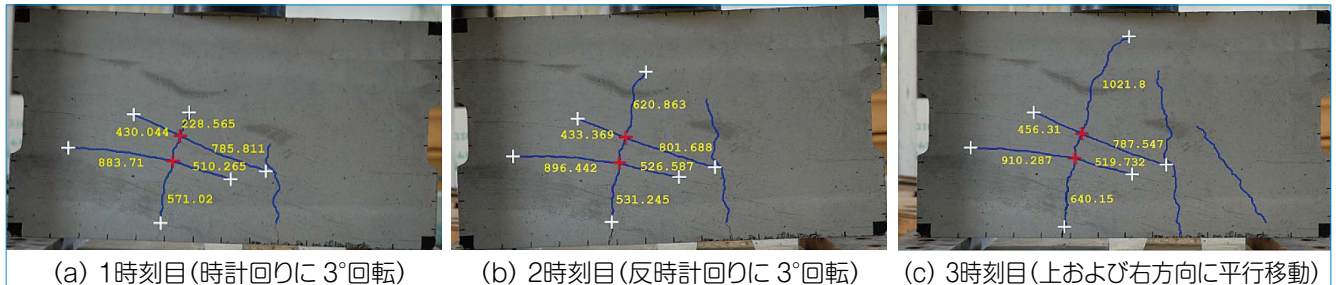


図8 回転・平行移動を加えた画像による検出結果

時系列画像としました。

開発したアルゴリズムを評価するため、まず加速試験で撮影した異なる3時刻画像に対して、ひび割れの検出と特徴点の抽出を行いました。端点のみを追跡する方法では、回転や平行移動が発生した場合にはこれら移動量を含んだ数値が観測されるので、真の進展量が得られません。そこで、回転や平行移動が発生しても特徴量が維持される、端点と交差点の距離に着目しました。検出した特徴点からこの距離を計測した結果を図7に示します。また、撮影時刻の違いによる位置ズレを想定して、同じ状況を1時刻目画像は時計回りに3°回転、2時刻目画像は反時計回りに3°回転、さらに3時刻目画像は上および右方向に平行移動させて撮影した画像を用いて、同様に距離を計測した結果を図8に示します。そして、それぞれの端点と交差点の距離の推移を示すレーダーチャートを図9に示します。

図9のチャートから、端点⑤と交差点の距離が伸びたこと、つまりひび割れAが上方に進展したことがわかります。一方、他の端点と交差点の距離にはほとんど変化が見られません。また(b)の結果を見ても、(a)とほぼ同一

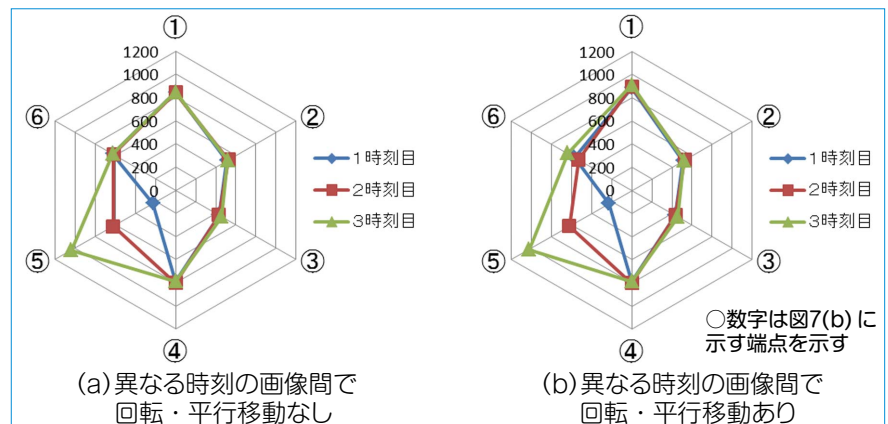


図9 異なる3時刻画像における端点と交差点の距離

の軌跡が得られていることから、位置ズレの影響を受けることなくひび割れの進展を検出できています。以上から、画像の回転・平行移動に対しても特徴が維持されることが実証されました。

端点座標の移動量から実際の進展量を計算したところ、図7に示すひび割れAが、2時刻目に縦方向に62.8mm、横方向に22.8mmの地点まで進展し、さらに3時刻目にはそれぞれ18.5mmと6.3mm進展したことがわかりました。

### おわりに

高精度・高効率なトンネル検査の実現に資する画像処理技術として、①解像度の異なる画像を用いて、ノイズの

影響を抑えたひび割れ検出手法を開発しました。②開発した手法により、熟練者でなくてもひび割れを検出できるようになりました。③変状の進展性については、ひび割れの端点を追跡する画像の重ね合わせによらない計測手法を提案しました。

今後は、トンネル特有の知見を反映した実用性の高い検査手法の開発を、引き続き実施していく予定です。RRR

### 文献

- 1) 鵜飼正人, 長峯望: 画像処理技術による構造物検査手法の高精度化, 鉄道総研報告, Vol.28, No.11, pp.11-16, 2014