

画像処理技術を用いてトンネルを検査する

鵜飼 正 人

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る。従来の目視やスケッチにかわり、ラインセンサカメラ及び高精細ビデオカメラを用いて覆工表面の高精細な展開画像を生成する技術、ひび割れを自動的に抽出する画像処理アルゴリズム、並びにトンネルの健全度診断につながるひび割れの進展計測手法について、具体的取り組みを紹介する。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ている。

キーワード：トンネル、全般検査、ひび割れ、画像処理、ラインセンサカメラ

1. はじめに

鉄道分野においても、高度成長期に建設されたインフラ設備が、高齢化・老朽化の時期を迎えているが、安全で安定した鉄道輸送サービスを提供し続けるためには、これら設備を健全な状態に維持しなければならない。トンネルを始めとした多くの鉄道設備は、「目視による状態の把握」が維持管理の基本となっている。ところが、目視検査は検査員の判断に左右されるため客観性に問題がある上、見落としが発生する可能性もある。また、目で確認するためにはその現場に行かなくてはならないが、頻繁に行くことは困難である。さらに今後、少子高齢化が進むと、検査保守要員の確保が困難になることが予想される。これら課題の解決に向けて、高精度な画像を効率よく記録し蓄積・伝送する技術、画像解析により設備の健全度を診断する画像処理技術に期待が寄せられている。本稿では、鉄道総研が取り組んでいるトンネルひび割れ検出のための画像処理を中心に、概要を紹介する。

表ー1 トンネル覆工表面の撮影・記録システム

手法	概要	実績
ラインセンサカメラ	トロリや軌陸車に搭載したラインセンサカメラで、走行しながら覆工面を撮影し、得られる連続走査画像から展開図を作成	鉄道総研 JR
レーザー	レーザービームを搭載した専用の検査車で全周をスキャニングし、画像処理を施して連続画像を得、展開図を作成	JR
エリアカメラ	トロリや軌陸車に搭載したビデオカメラで、走行しながら覆工面を撮影し、得られた動画像からイメージモザイク処理により、覆工面の2次元パノラマ画像を得、展開図を作成	鉄道総研
赤外線カメラ	走行しながらヒータで覆工面を強制加熱し、赤外線放射量を赤外線カメラで撮影し、画像処理後、剥離を検出。可視カメラ（CCD）によりクラック、漏水などを検出し、展開図を作成	地下鉄等

2. トンネル覆工表面撮影技術

(1) トンネル覆工表面の撮影・記録システム

トンネルの維持管理において、従来の目視観察・スケッチにかわり、覆工表面の鮮明な映像を連続的に撮影し、画像処理を行うことで変状展開図を作成したり、ひび割れなどの変状の自動抽出や健全度判定を行う技術が、鉄道総研や各鉄道事業者で研究され開発されている（表ー1）。代表的なものに、鉄道総研で開

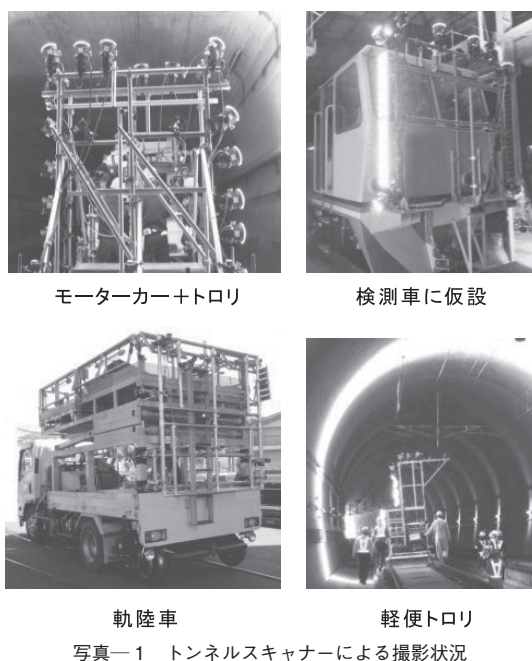
発した「トンネルスキャナー」¹⁾、JRのトンネル覆工表面撮影車「TuLIS」²⁾や「SATUZO」³⁾などがある。

(2) トンネルスキャナーの概要

(a) ラインセンサカメラ方式

高速・高解像度のラインセンサカメラを用いて、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。撮影速度は約20 km/hと高速で、1回の走行で数10キロの連続撮影が可能であ

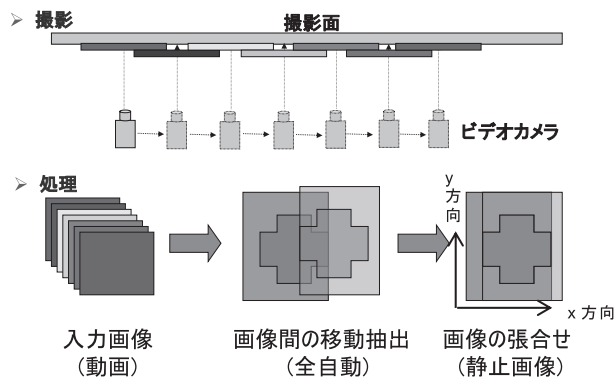
る。なお撮影装置は、工事用トロリのみならず、軌陸車や軌道検測車など様々な車両で使用できるように設計されている。車上では撮影・記録のみを行い、地上で撮影した画像を処理して全周の展開画像を作成する。静止した状態でラインセンサカメラのフォーカスを調整する機能や、撮影画像に対してカメラブレやトンネル断面及び延長方向の歪みを補正する機能を備えており、高精度な展開画像を効率よく作成することが可能となっている。多様な撮影形態を備えたトンネルスカナーの撮影状況を写真—1に示す。



写真—1 トンネルスカナーによる撮影状況

(b) 高精細ビデオカメラ方式

ビデオカメラ映像から、広視野・高解像度の2次元パノラマ画像を生成するものである。撮影動画は毎秒数十コマの静止画像から構成されるが、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する（図—1）。ただし、算出した



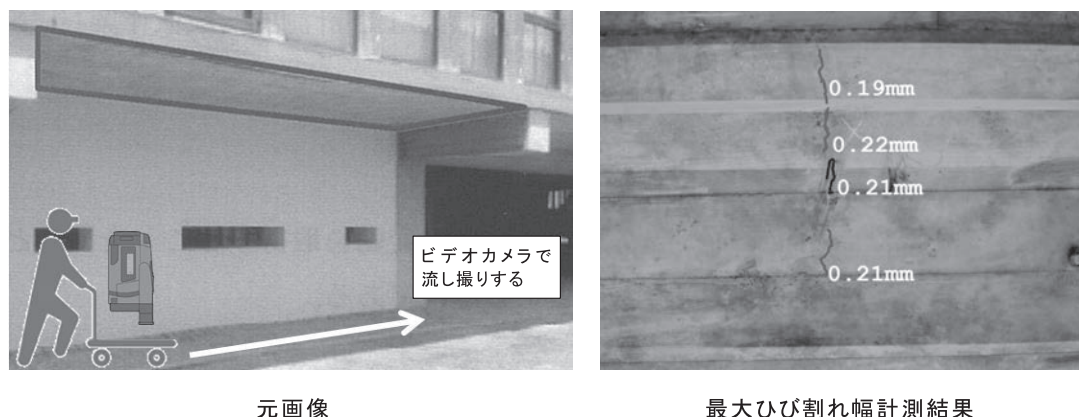
図—1 パノラマ画像生成の原理

値に極端な外れ値があれば除外する。移動方向に沿って、移動した幅だけ切り出した短冊状の領域を静止画に貼り合わせる。x方向及び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、欠落や食い違いの少ない高精度のパノラマ画像が得られる。また、台車に乗せたカメラ、或いは手持ちカメラの映像からでも作成できるので、撮影自体は非常に手軽に行うことができる。張り出しスラブの下を台車で引いて撮影した映像からパノラマ画像を作成し、画像処理により0.2mm程度の微細なひび割れを検出した例を図—2に示す。

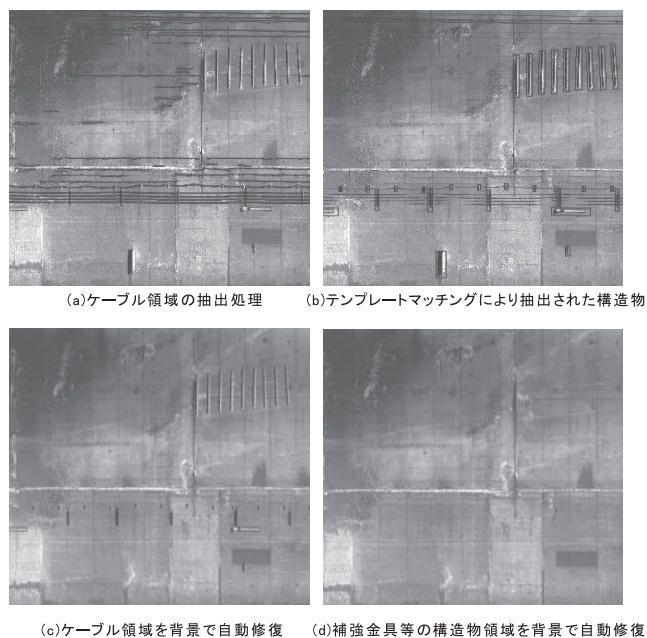
3. 展開画像に対する前処理

(1) 画像修復の方法

一般的な撮影画像には、ひび割れ以外にもケーブルや型枠などの地物が入り組んで映っている。この状態でひび割れ検出処理を行うと、これらひび割れ以外の地物もしばしば抽出されるので、検出性能が悪くなる。そこで、対象物の輪郭とその法線方向の濃淡値の変化に着目した方法で地物を検出し、当該領域を周辺画素で自動的に補間して、壁面のみの画像を生成する画像修復(inpainting)を適用した（図—3）。不要な地物が除去



図—2 張り出しスラブのひび割れ検出結果



図—3 画像修復 (inpainting) 手法による壁面画像の生成

された画像においては、ひび割れ検出の誤りが減り、inpainting が有効な前処理であることを確認している。

(2) 距離の正規化のための補正処理

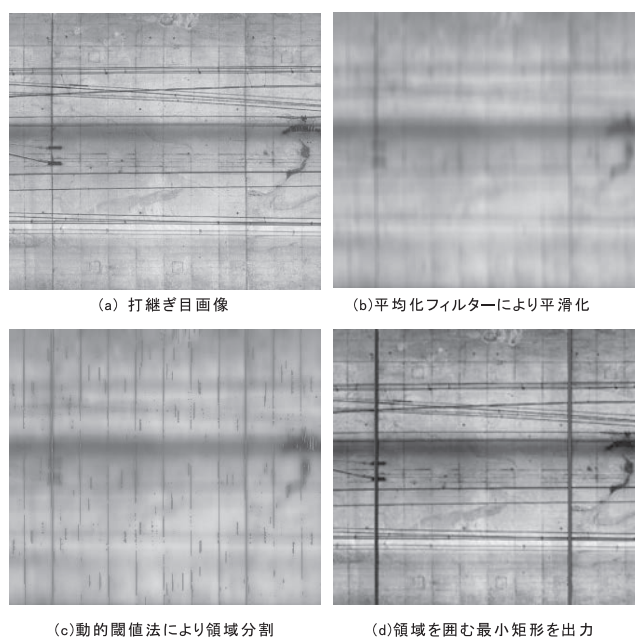
線路のカーブや撮影車の速度の影響で、撮影画像のトンネル延長方向の画素間隔にばらつきが出る。このまま処理を行うと、寸法計測など精度のよい画像処理は期待できない。ただし、画素間隔を一定にする正規化補正をトンネル全長に対して行おうとすると、計算負荷が大きく、かつ精度や処理時間が課題となる。そこで、覆工スパン単位で正規化補正を行うこととした。ただし、撮影画像は短冊状に分割された状態で記録されているので、画像から自動的に打継ぎ目を検出し、これをもとにスパン画像を生成した。打継ぎ目の自動検出と距離補正手法について、以下に述べる。

(a) 打継ぎ目の自動検出

周囲との輝度差により打継ぎ目を検出しようとする、打継ぎ目と近い明るさのノイズも一緒に多く検出されてしまい、打継ぎ目だけを抽出することが難しいという課題がある。そこで、打継ぎ目は垂直方向に延びる暗い直線成分であるという特徴に着目し、まず元画像に対して、打継ぎ目と同じ垂直方向に重み付けした平均化処理を適用する。次に、動的閾値法を用いて得られた平均化画像と元画像の差分を取ると、打継ぎ目の候補領域が抽出されるので、一定サイズ以上の高さを有する領域を打継ぎ目として検出した(図—4)。

(b) スパン単位での距離補正

検出した打継ぎ目をもとにスパン画像を切り出し、その距離に応じて画像を拡大(内挿)もしくは縮小(間

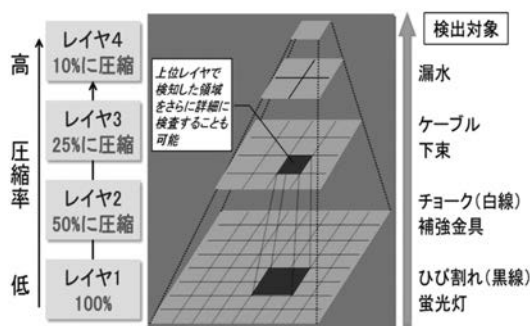


図—4 打継ぎ目の自動検出処理結果

引き) することで正規化補正を行う。内挿/間引きの補間方法は、上下左右四つの近傍画素から当該画素の輝度値を決定する、双線形補間を適用した。なお、10数mの標準的なスパン画像一枚あたりの処理時間は約3秒であった。

(3) 多重解像度化による抽出処理の最適化

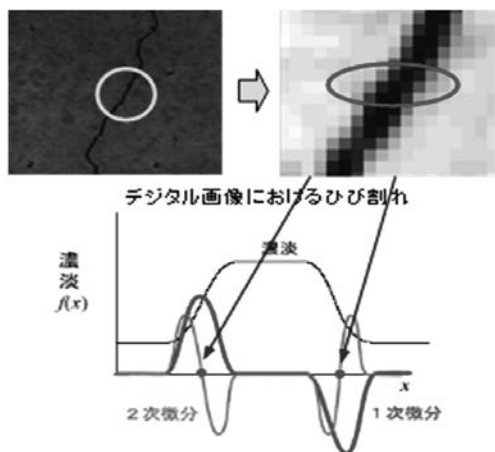
実際の詳細検査を考えると、全ての変状について位置や長さをmm単位以上の精度で把握している必要はない。そこで、撮影画像に対して画像圧縮を行い、解像度の異なる画像を用意する。不鮮明な画像でも検出できる変状に対しては、圧縮率の高い画像を利用することでノイズの影響を軽減することができる。これは高周波成分を抑えるローパスフィルタを適用した状態に相当する。一方、微細なひび割れを検出する際には、圧縮率の低い画像を使用する。このように、検出対象毎に最適な圧縮率の画像を使用する、多重解像度化の考えを提案した(図—5)。本手法により、変状検出の信頼性が向上すると共に、処理速度が向上した。



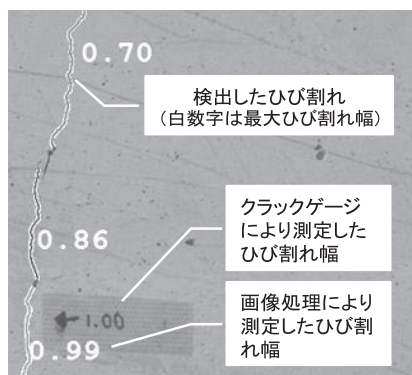
図—5 解像度の異なる画像のレイヤ管理

4. 高精度のひび割れ検出画像処理

図—6に示すように、ひび割れの輪郭部分は、領域の外側から内側に向けて暗くなる所なので、ガウス関数による平滑化に1次微分を加えてエッジを抽出し、ひび割れ候補とした。ひび割れの検出性能を左右する三つのパラメータ（平滑化係数、2次微分値の上限／下限閾値）を操作しながら、幅約0.5 mmのひび割れを検出できることを確認している（図—7）。な



図—6 サブピクセル処理（輝度勾配の微分）



ゲージ測定との誤差は小さいことから、高精度の画像計測を実現した。
(単位：mm)

図—7 最適パラメータ値によるひび割れ検出結果

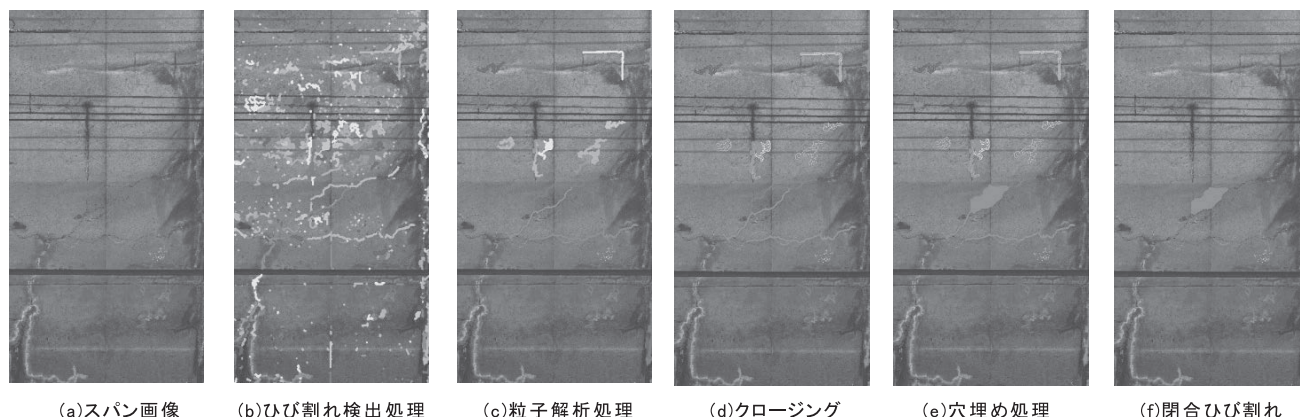
お、本処理はサブピクセル精度の結果が得られるので、高精度な画像計測が可能である。また、天端部に発生するトンネル延長方向のひび割れは注意する必要があるため、部位と方向に対して検出感度を調整できるようにしている。

ひび割れ同士がつながって、幾何学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、はく落の危険性が高まる。この閉合ひび割れを、自動的に抽出する画像処理を検討した。まず、スパン画像に対してサブピクセル精度でひび割れ成分を検出する。近接する線成分を連結した上で、長さが閾値以下の線を除去する。画素領域を膨張させた後に収縮させるクロージング処理により小さな穴を閉じた画像と、その画像に対して穴埋め処理を行った画像との差を求める。その結果残った、一定以上の面積を有する領域を閉合ひび割れであると判定した。画像処理結果を図—8に示す。

5. ひび割れの進展の計測

ひび割れの進展は、ひび割れの有無と共に正確に把握することが求められている。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るが、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ない。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上で差分をとる必要があるが、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ある。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着目して、進展を追跡する手法を開発した。

線幅が1画素の2値画像の黒の部分は、端点、分岐点、交差点に分類できる（図—9）。計測実験で使用



図—8 閉合ひび割れの自動検出処理結果

したひび割れの特徴点を図-10に示すが、画像の回転や平行移動に対しても端点と交差点の距離は変わらないので、撮影条件の変化にロバストである。検出した特徴点からこの距離を計測した結果を図-11に、さらに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時刻目画像は上及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-12に示す。また、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-13に示す。図-13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る。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ない。また(b)の結果を見ても、(a)とほぼ同一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る。以上か

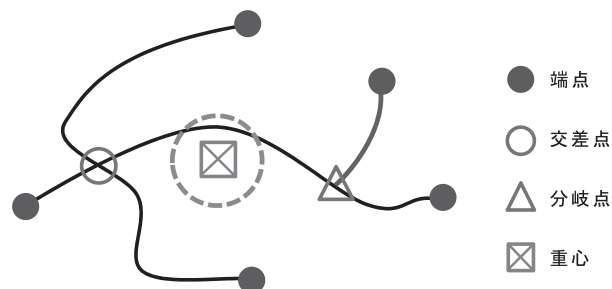


図-9 画素の連結性に着目した特徴点

端点	分岐点	交差点	穴の数	合計
6	0	2	0	8

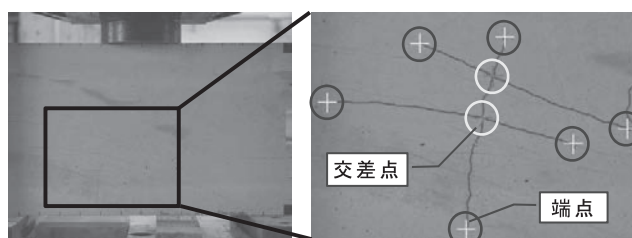


図-10 特徴点でひび割れを表現した例

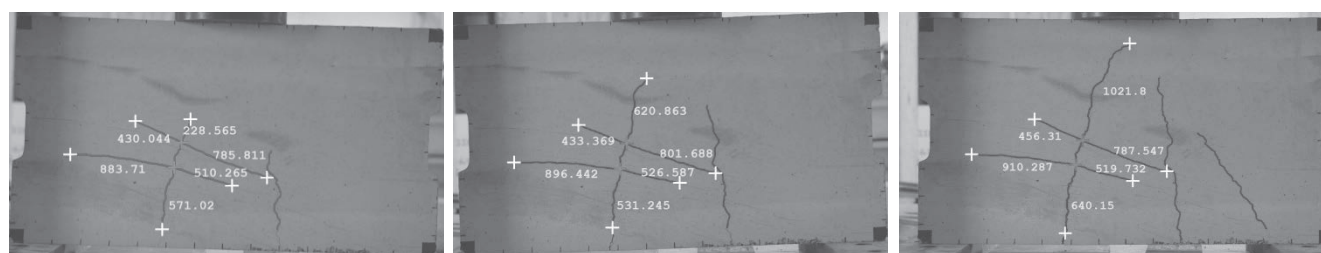


(a) 1時刻目(元画像)

(b) 2時刻目(回転・平行移動無し)

(c) 3時刻目(回転・平行移動無し)

図-11 回転・平行移動のない画像による検出結果

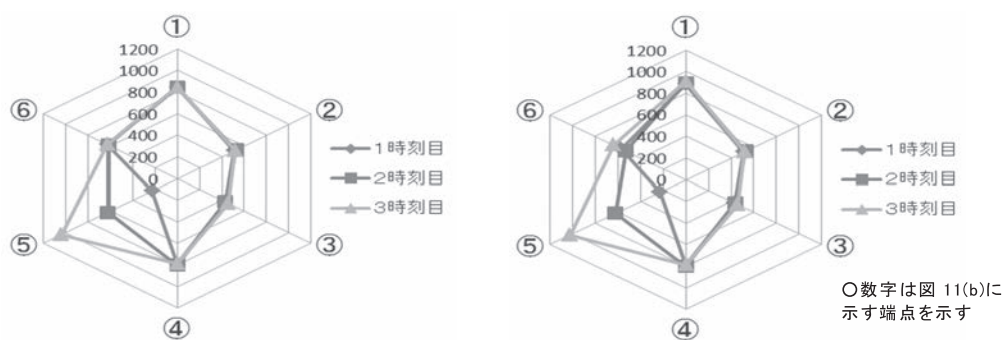


(a) 1時刻目(時計回りに3°回転)

(b) 2時刻目(反時計回りに3°回転)

(c) 3時刻目(上及び右方向に平行移動)

図-12 回転・平行移動を加えた画像による検出結果



(a) 異なる時刻の画像間で回転・平行移動なし

(b) 異なる時刻の画像間で回転・平行移動あり

図-13 異なる3時刻画像における端点と交差点の距離

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—11に示すひび割れAが、2時刻目に縦方向に62.8 mm、横方向に22.8 mmの地点まで進展し、さらに3時刻目にはそれぞれ18.5 mmと6.3 mm進展したことがわかった。

6. おわりに

トンネル覆工表面の撮影技術、展開画像に対する前処理、並びにひび割れの検出と進展の計測を行う画像処理手法を紹介した。目視検査の高度化には画像処理の活用が期待されているので、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きたいと考えている。

JCMA

《参考文献》

- 1) 鵜飼正人・長峯望, 「新しい画像処理技術によりトンネルの高精度検査を実現する」, RRR, Vol.69, No.12, pp24-27, (2012)
- 2) 下山貴史・三宅浩一郎, 「鉄道土木構造物の維持管理マネジメントについて」, 建設マネジメント技術, 2010年1月号, pp.22-27 (2010)
- 3) 松尾廣和・櫛田正人, 「トンネル覆工検査の精度向上等の取り組み」, 土木学会第57回年次学術講演会, (2002)

〔筆者紹介〕

鵜飼 正人（うかい まさと）
公益財団法人鉄道総合技術研究所
主管研究員

