

画像処理技術による構造物検査手法の高精度化

鵜飼 正人* 長峯 望**

Development of a Highly-precise Inspection System for Railway Structures Using Image-Processing Techniques

Masato UKAI Nozomi NAGAMINE

We have developed an image processing algorithm which detects cracks and diagnoses the degree of the soundness of the tunnel wall, the viaduct base plate, the handrail or slab track aiming at establishing a highly-precise and highly-efficient inspection system of railway structures. We propose the view on multiresolution analysis using the most appropriate resolution image based on the candidate deformation to be detected. Applying the technique of connecting adjacent image flames smoothly, we have developed a method of creating the high definition panorama image of a huge railway structure, and a technique of normalizing the distance in the track extension direction on the basis of a landmark. Furthermore, we have also developed a technique of grasping the progress of a crack from time-series images taken at different times. This paper reports those techniques with the image-processing result.

キーワード：トンネル、高架橋、軌道、全般検査、画像処理、ひび割れ、変状進展

1. はじめに

前報¹⁾で、代表的な鉄道構造物であるトンネルを対象として、ひび割れや漏水などの変状を検出する基本的なアルゴリズムについて報告した。鉄道構造物検査においては、変状を精度よく検出する技術のみならず、変状がどの程度進展したかを把握する技術が求められている。変状の進展を客観的に捉えられる、高精度・高効率な構造物検査システムの構築をめざして、トンネルや高架橋床板、高欄などの土木構造物、さらにはコンクリートスラブ板などの軌道構造物に発生するひび割れなどの変状を高精度に検出し、計測した特徴量を基に変状の進展を精度よく捉える画像処理アルゴリズムを開発した。本稿では、これら手法について画像処理結果と共に報告する。

2. トンネル変状検査のための画像処理手法

2.1 多重解像度画像を用いた変状検出処理

元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た（図1）。個別検査で必要とされる位置精度を考えると、変状によっては、その位置や長さなどをサブミリオーダーで把握している必要はない。例えば、不鮮明な画像でも検出できる対象物に対しては、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でき、

処理速度も向上する。圧縮率の高い画像を使用すれば、コンクリート表面に局在する微細なひび割れや目地を抑制した状態で、マクロ的特徴に着目した処理が可能となる。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し、漏水やケーブル等の検出に有効である。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。本手法によれば、検査の信頼性向上と作業の効率化が期待できる。処理フローを図2に示す。

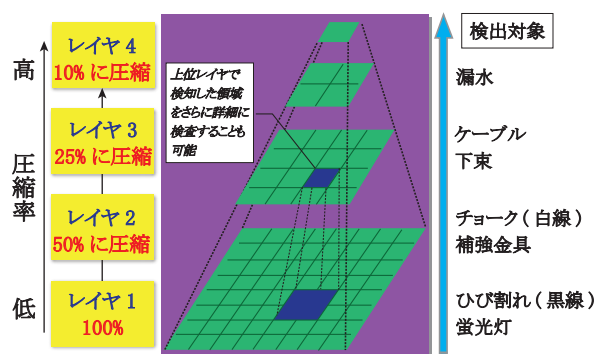


図1 多重解像度表現によるレイヤ画像管理

2.2 サブピクセル精度のひび割れ検出処理

線状の“領域”を表現するために、ひび割れを閉輪郭線とその中心線でモデル化する。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（デジタル画像の場合、微分は輝度値の差分となる）の高い部分を抽出するような、ガウシアンスムージングカーネルの偏微分を適用した²⁾。本処理は撮影解像度の1/10程度のサブピクセル精度の結果が得られるので、高

* 信号・情報技術研究部

** 信号・情報技術研究部 信号システム研究室

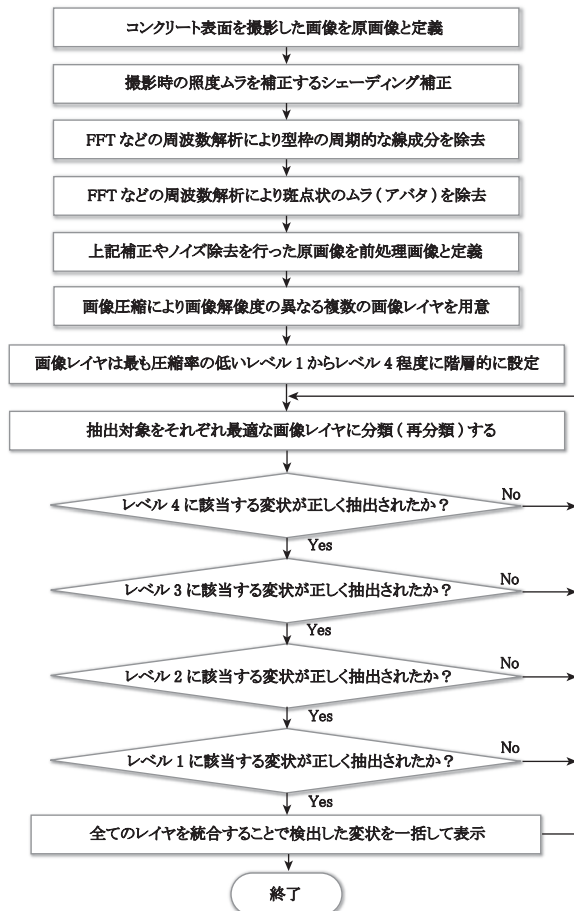


図2 多重解像度分析の処理フロー

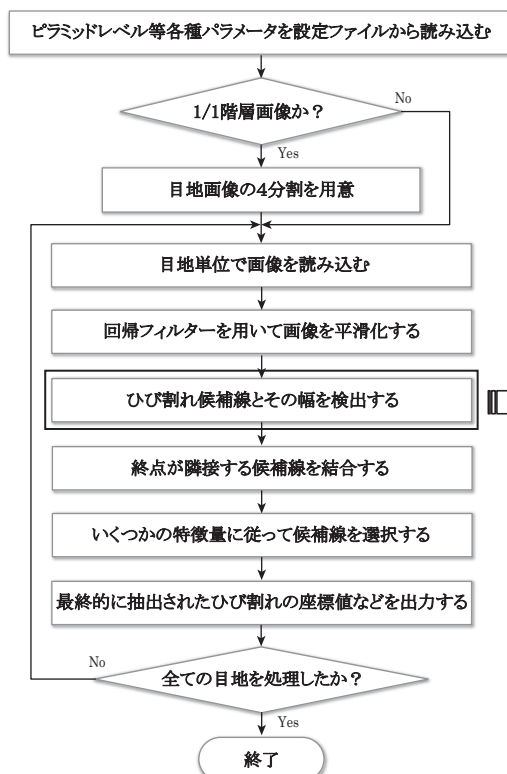


図3 トンネルのひび割れ検出アルゴリズム(階層レベル1の場合)

精度な画像計測が可能である。

多重解像度分析において、非圧縮の画像を用いてトンネルのひび割れを検出する処理アルゴリズムを図3に示す。トンネルは、コンクリート打設の都合で10数mおきに作られる目地単位で管理されているので、予め元画像を目地単位に分割しておく。検出感度を左右する3つのパラメータ(平滑化係数、微分値の上限閾値及び下限閾値)を操作しながら、幅0.5mm程度のひび割れを検出する。このパラメータを評価した結果、一般的な明るさ、一般的な汚れ度合いのトンネル壁面の場合、平滑化係数 σ を0.9、微分値の上限閾値を6.0、下限閾値を0、並びに終点が隣接する候補線を結合する際の閾値(離れ)を50画素以下とすると、概ね良好な結果が得られることがわかった(図4)。また、 σ は検出したいひび割れ幅の $1/2\sqrt{3}$ 程度に設定すると良いことが分かった。

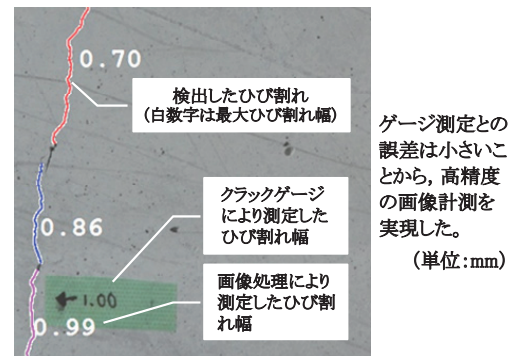
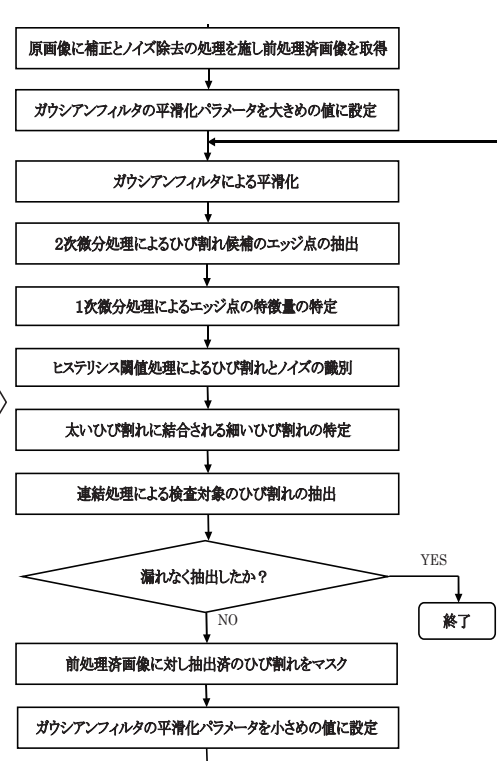


図4 最適パラメータ値によるひび割れ検出結果



3. 高架橋検査のための画像処理手法

高架橋の床板に見られる、はつり跡に対して、その特徴に基づく検出法を提案し、テスト画像によりその性能を検証した。検出手順を図5に、はつり跡に対する形状計測結果を図6にそれぞれ示す。

- (a) 元画像を読み込む。
- (b) 輝度値が0以上127以下の領域を抽出する（閾値処理）。
- (c) 抽出した領域と元画像の論理積で対象領域を絞り込む。空などの明らかに明るい部分をマスクできる。
- (d) 画像のコントラストを強調する。
- (e) サブピクセル精度のエッジを抽出する。
- (f) エッジを線分、円または楕円弧に分類し、その中から長さが230画素以上の線分のみを抽出する。
- (g) 線分方向（角度）が水平に近い線分を抽出する。
- (h) 線分方向（角度）が垂直に近い線分を抽出し、その中から内側の線分を抽出する。(g)の結果と併せて、ハンチ内面の領域（台形）を確定する。

これに対して、台形の頂点座標を基に正射影変換を施すことで、図6(b)に示すような、ハンチ内面の正対化画像に対する計測結果が得られる。

4. 高欄パノラマ画像生成と変状検出手法

保守用車などにハイビジョンカメラと照明装置を搭載し、走りながら高欄を連続撮影し、動画の各コマの一致する点を次々に自動推定して、移動した分だけつなぎ合わせていくことで高精細のパノラマ画像を作成する技術を開発した³⁾(図7)。画像の拡大縮小や回転に対して不変なSURF特徴量⁴⁾(例えば、角やエッジに現れる輝度変化の大きい所)を高速に検出し、隣接する画像フレーム間で当該特徴点の対応付けを行い、画像を重ね合わせる。図8に速度45km/hでの撮影の様子を、図9に結合済み画像の例をそれぞれ示す。10mおきに設置されているキロ程銘板をパターンマッチングにより自動的に検出し、これを基準に線路延長方向の画素ピッチが等間隔になるよう補正し、距離の正規化を行った。銘板の無い区間については、電化柱を基に補正した。上り線を左右反転して、上下線とも向かって左側が起点となるように画像を張り合わせたので、現場の台帳と同じイメージで閲覧できるようになっている。サブピクセル精度でのひび割れ検出と、最大ひび割れ幅計測を行った結果を図10に示す。

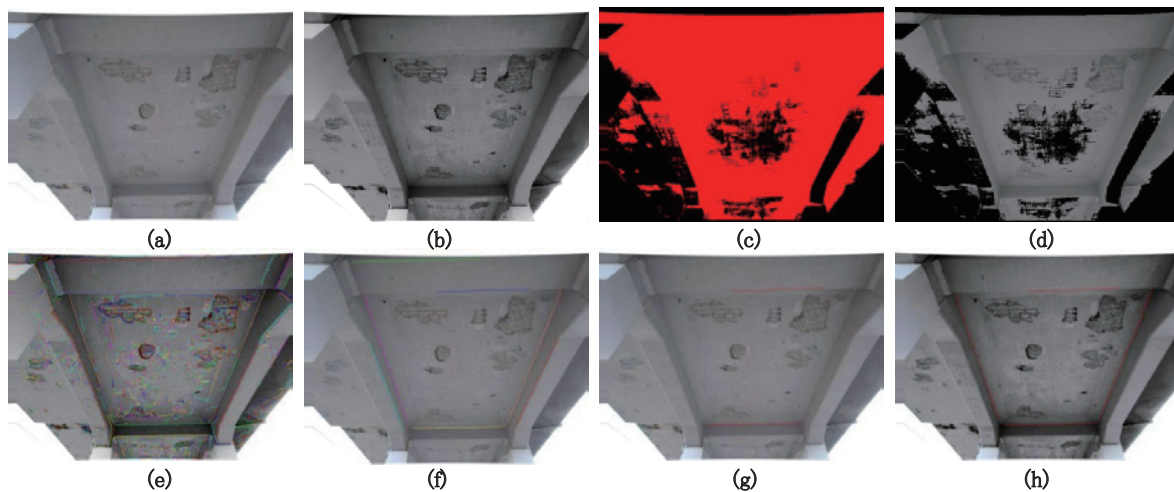
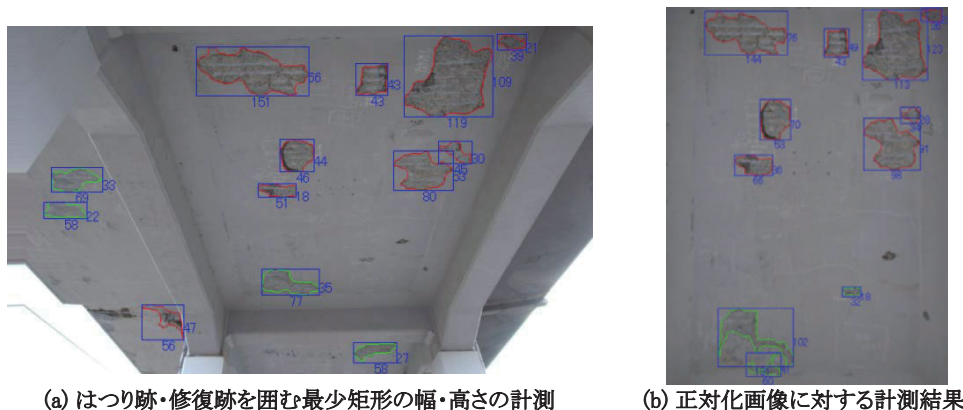


図5 高架橋はつり跡・修復跡の検出処理の流れ



(a) はつり跡・修復跡を囲む最少矩形の幅・高さの計測

(b) 正対化画像に対する計測結果

図6 検出したはつり跡・修復跡に対する画像計測結果（単位：画素）

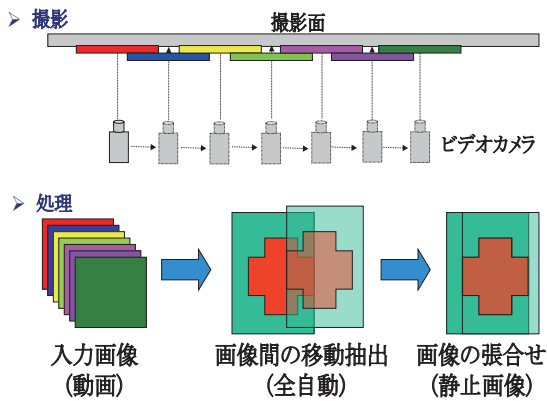


図7 パノラマ画像処理の原理



図8 高欄撮影の様子

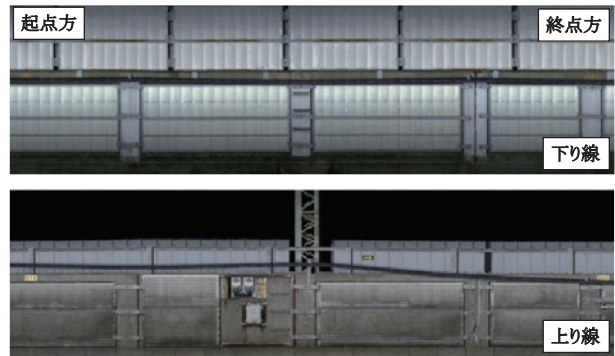
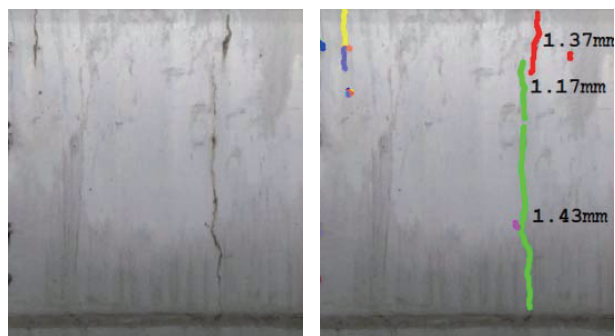


図9 距離補正済み高欄画像の帳票出力例



(a) 元画像

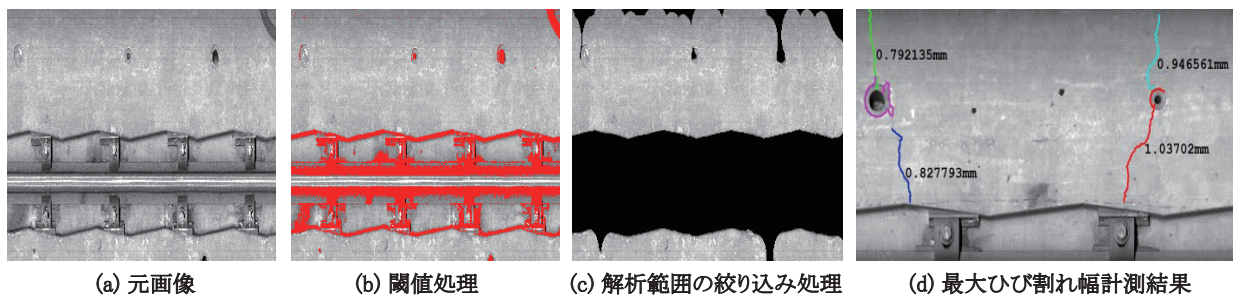
(b) 最大ひび割れ幅計測結果

図10 高欄のひび割れの自動検出結果

5. 軌道スラブ板検査のための画像処理手法

1画素以下の高い精度で扱うことができるサブピクセル処理を用いて、コンクリートスラブ板及び締結部材に発生するひび割れを検出する画像処理手法を開発し、実

画像で検出性能を確認した。撮影された画像が全体に暗いトーンだったので、前処理としてトーンカーブを調整して輝度を補正した。ひび割れ検出の処理手順を図11に、実際のひび割れを検出した結果を図12に、スラブ締結部に発生したひび割れの検出結果を図13に示す。



(a) 元画像

(b) 閾値処理

(c) 解析範囲の絞り込み処理

(d) 最大ひび割れ幅計測結果

図11 スラブ板のひび割れ検出処理の流れ

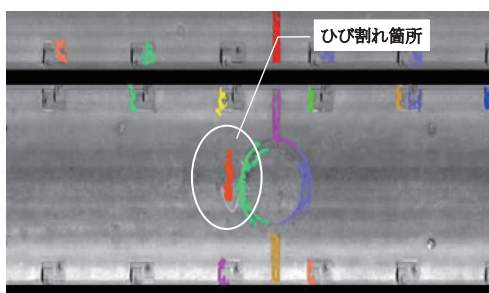
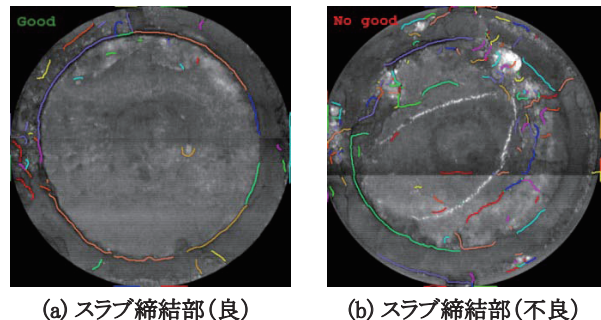


図12 スラブ板のひび割れ(丸印)検出結果



(a) スラブ締結部(良)

(b) スラブ締結部(不良)

図13 スラブ締結部材のひび割れ検出結果

6. ひび割れの進展を検出するアルゴリズム

6.1 画像の重ね合わせによらない進展計測手法

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、進展を正確に計測するためには、基準となるランドマークを用いて、画像を精密に正規化することが考えられるが、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、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。

具体的には、線幅が1画素の2値画像の黒の部分は図14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・識別を行った。特徴点でひび割れを表現した例を図15に示す。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、画像認識を行う上で有効な手段である。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た。

実際のひび割れは徐々に成長するため、図16に示すような加速試験を実施した。载荷試験機を用いて試験体に加力し、徐々にひび割れを発生させながら、ひび割れが進展してゆく画像を撮影し、時系列画像とした。開発したアルゴリズムを以下に示す。

- ①高精度でひび割れ計測を行うために、サブピクセル精度を持つ点列データ XLD (Extended Line Discription) オブジェクトを使用して、1時刻目の画像に対してひび割れ検出処理を実行し、特徴解析により前記特徴量の座標と数を算出する。次に、各枝の交差点⇄端点間距離、最大ひび割れ幅を計算し、記憶する。
- ②2時刻目の画像に対して、1時刻目のひび割れ重心から一定の範囲内に、ひび割れ(重心)の有無を調べる。
- ③当該領域にひび割れ有りと判断した場合は、①と同様に前記特徴量の座標と数を算出し、種類と個数の一致度を調べることで、同一のひび割れか否かを判定する。
- ④同一のひび割れの場合は、各枝の交差点⇄端点間距離を計算する。1時刻目の対応する交差点⇄端点間距離と最大ひび割れ幅とを比較し、進展を検出する。
- ⑤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する。

6.2 検出アルゴリズム評価のための画像処理実験

開発したひび割れの進展を検出するアルゴリズムを評価するための実験を行った。加速試験で撮影した異なる3時刻画像に対して、ひび割れの自動検出と特徴点の抽出を行った。端点のみを追跡する方法では、回転や平行

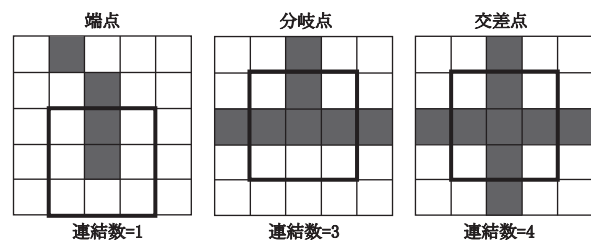


図14 画素の連結性に着目した特徴点

端点	分岐点	交差点	穴の数	合計
6	0	2	0	8

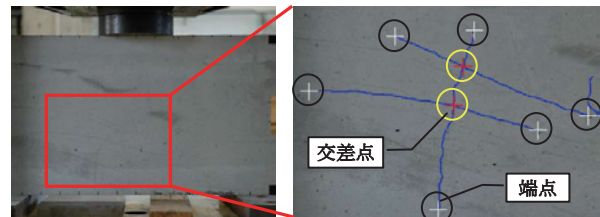


図15 特徴点でひび割れを表現した例



図16 载荷試験機によるひび割れ発生加速試験

移動が発生した場合にはこれらシフト量を含んだ数値が観測されるので、真の進展量が得られない。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、端点と分岐点もしくは交差点間距離に着目した。

抽出した特徴点から端点⇄交差点間距離を計測した結果を図17(a)(b)(c)に、さらに撮影時刻の違いによる位置ズレを想定して、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し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17(d)(e)(f)に示す。また、それぞれの端点⇄交差点間距離の推移を見るためのレーダーチャートを図18に示す。

図18(a)のチャートから、端点間距離⑤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、他の端点間距離には殆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。

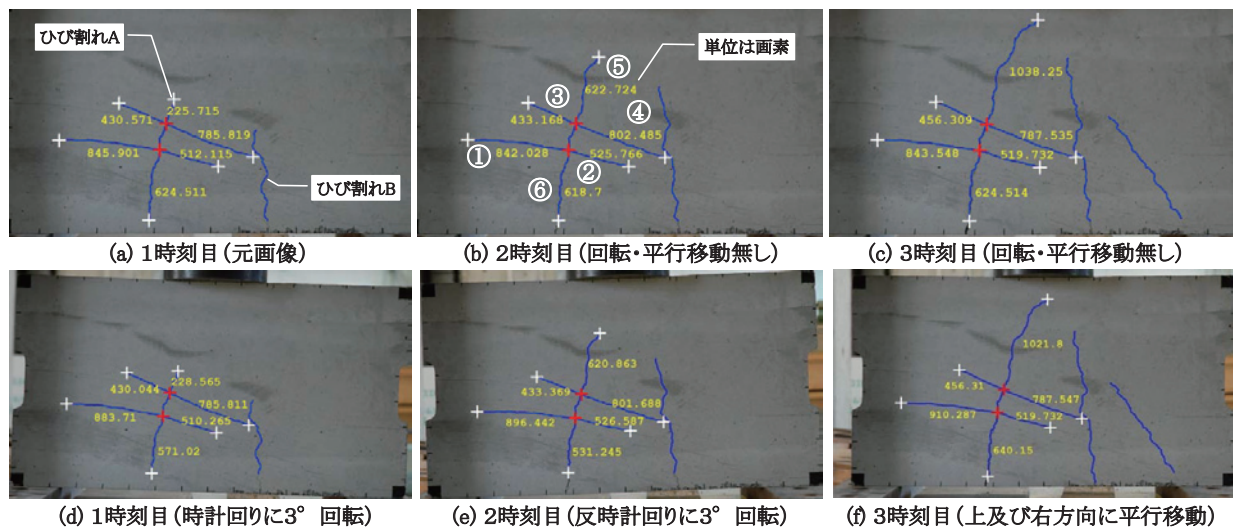


図 17 異なる 3 時刻画像に対するひび割れと特徴量の検出結果

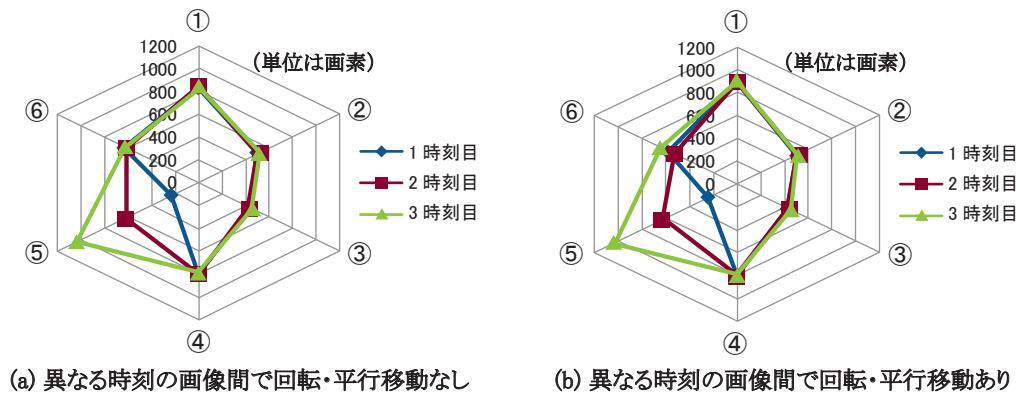


図 18 異なる 3 時刻画像における端点⇄交差点間距離

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 17 (a) 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 時刻にはそれぞれ 18.5mm と 6.3mm 進展したことがわかった。

7. まとめ

開発した画像処理手法について以下にまとめる。

- (1) 検出対象に応じて最適な解像度の画像を利用する多重解像度処理を提案した。
- (2) 一つのひび割れに対しても、ひび割れ幅に応じて平滑化を施した画像を複数用意して、最終的にそれぞれの検出領域を結合する階層化処理の考え方を提案した。
- (3) 高架橋床板を対象として、はつり跡や剥離などの変状を検出するアルゴリズム、斜めに撮影された歪んだ画像を正対した画像に補正する手法を開発した。
- (4) 画像の張り合わせ手法により高欄の高精細のパノラマ画像を作成する技術を開発した。キロ程銘板等を基に、線路延長方向の距離を正規化する手法を考案した。

- (5) コンクリートスラブ板及び締結部材に発生する 0.5mm 程度のひび割れを検出する画像処理手法を開発し、長大軌道画像で検出性能を確認した。
- (6) ひび割れの端点と分岐点/交差点間の距離を追跡することで、画像の重ね合わせによらずにひび割れの進展を検出するアルゴリズムを開発した。

文 献

- 1) 鵜飼正人, 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, Vol.20, No.10, pp.47-52, 2006
- 2) 鵜飼正人, 長峯望: コンクリート構造物検査のための画像処理手法の開発, 第 20 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2013), 電気学会, 2013
- 3) 鵜飼正人, 長峯望, 唐木大輔, 中川晋一: 長大鉄道構造物検査に有効なパノラマ画像処理技術, 第 49 回鉄道サイバネ・シンポジウム, 2012.11
- 4) 中部大学藤吉研究室: SURF:Speeded Up Robust Features, 2009