

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

鉄道構造物の目視検査は、客観性、作業効率、安全性などの面で課題があります。鉄道総研では、ラインセンサー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」、ハイビジョンカメラを用いて、高架橋高欄などを走りながら連続撮影し、この映像から高精細のパノラマ画像を生成する技術、及び、ひび割れを自動的に抽出し、その幅や長さを高精度に計測する、構造物の全般検査に適用可能な画像処理手法を開発しました。

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信
情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道



鵜飼 正人
Masato Ukai
信号・情報技術研究部
信号システム研究室
主任研究員
〔専門分野〕画像処理、
パターン認識



長峯 望
Nozomi Nagamine
信号・情報技術研究部
信号システム研究室
副主任研究員
〔専門分野〕画像処理、
パターン認識

はじめに

トンネルをはじめとした鉄道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ます。鉄道総研では、ラインセンサー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、ひび割れを自動的に抽出し、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ました¹⁾。

さらに、ハイビジョンビデオカメラを用いて、高架橋高欄などを走りながら連続撮影し、この映像から画像の張り合わせ（イメージステッチング）により、高精細のパノラマ画像を作成する手法を開発しました²⁾。

またこれまでは、画像の線路延長方向の距離の正規化が課題でしたが、画像関連による非接触速度計（画像エンコーダー）を用いたり、パターンマッチングにより自動抽出したキロ程銘板や電柱を基準に、距離補正するアルゴリズムを考案しました。

ここでは、長大鉄道構造物の検査に

有効な2つの撮影手法と、新しい画像処理技術について紹介します。

トンネルスキャナー

トンネルスキャナーは、専用の撮影車によらず、工事用トロッコなどにカメラ・照明を搭載して撮影します。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ます。一般的なトンネルの検査は、夜間の数時間程度の列車間合いで実施されます。トンネルスキャナーの撮影速度は20km/hと高いので、一晩に30km程度の連続撮影も可能です。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処理します。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ます。トンネルスキャナーの外観を図1に示します。

トンネルスキャナーを、軌道検測車などの自律的に走行できる車両に搭載して撮影する方式も検討しました。これにより、原則、路線ごとに必要であった機材の設置・撤去などに係る手間が軽減し、検査コストを削減することができました。

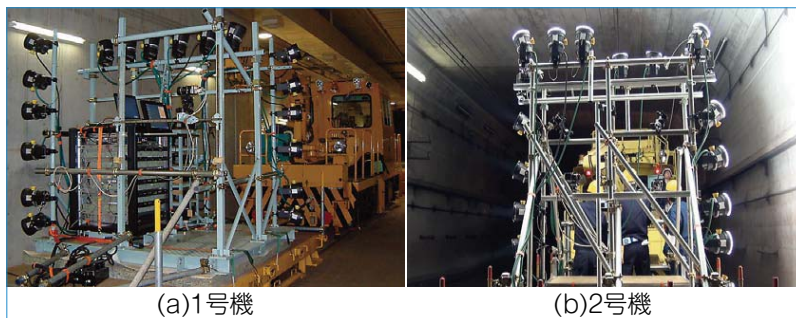


図1 トンネルスキャナーの外観



図2 軌道検測車に搭載したLED照明装置

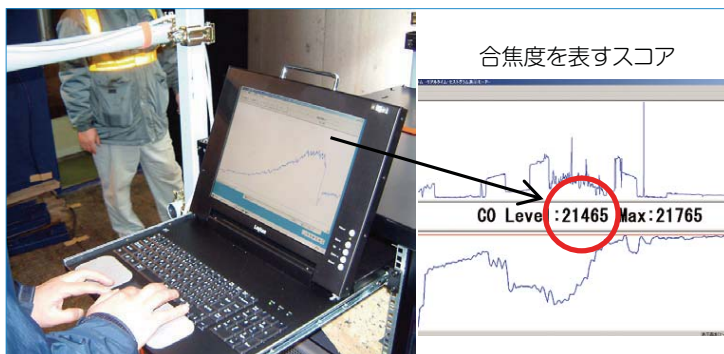


図3 フォーカス調整作業の様子

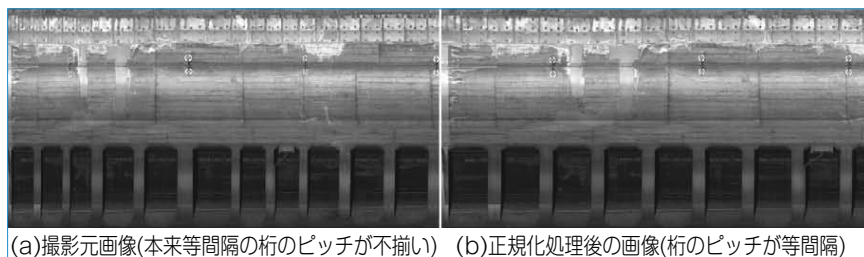


図4 トンネル延長方向の正規化処理

また、撮影装置一式を車内に設置できるので、トロでの作業に比べ、作業性と安全性が向上しました。

LED照明装置の実装

暗いトンネル内でラインセンサーカメラを使用するので、強力な照明装置が必要です。現状はメタルハライドランプ(HMI)を使用していますが、一灯当たりの消費電力は約700Wで、これを十数灯使用するため、容量の大きな発電機が必要となります。また、灯具自体高価なうえ、交換用ランプも非常に高価なため、機材コストの面で課題を抱えていました。

近年、照明機材として使用されているLEDは、省電力・低発熱という特徴が目立っていますが、照度不足と配光特性が課題でした。ところが近年、

これらの技術課題が解決され、現行灯体の代替機としての可能性が出てきました。性能評価の結果、ラインセンサーカメラでの撮影に最適な配光特性と輝度性能を有するLEDモジュールを選定し、改良したLED電源と共に、実用を開始しました。LEDモジュールを多数連続することで、現行のHMI照明とほぼ同等の照度が得られています。なお、今回のLED照明(6連続/1ユニット)は、HMI照明に比べて、重量で約1/3、消費電力で約1/4、コストで約1/6となっています。撮影車への搭載状況を図2に示します。

フォーカス調整機能

ラインセンサーカメラの場合、カメラと被写体間の相対移動がなければ画像は得られません。通常、本番撮影前

にテスト撮影を行い、この画像を見ながらフォーカス調整をしています。実際の運用では、テスト走行が難しい場合もあります。我々は、フォーカスの合焦点と映像信号波形の形状に相関があることに着目し、一次微分値(画素の階調の変化量)のヒストグラムを用いて、波形の先鋭度合いをスコア値で評価する手法を考案しました。合焦点を境にピントが外れてくるとスコア値が小さくなるので、この値をモニターしながら、ピーク値近傍でフォーカスリングを合わせます。従来に比べ格段に調整時間が短縮した上、個人差も殆どないので、安定した画像を得ることができました。フォーカス調整作業の様子を図3に示します。

延長方向の正規化処理

ラインセンサーカメラは通常、内部同期で動作させますので、スキャンスピードは一定となり、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します。結果として、図4(a)のような伸縮した画像になります。そこで、撮影用ラインセンサーカメラとは別に軌道等を撮影し、微小時間間隔における前後の画像の移動量から速度を算出するアルゴリズムを開発しました。得られた速度情報を基に正規化処理を行った結果、図4(b)に示すように、延長方向の画素ピッチが一定に補正された画像を得ることができました。

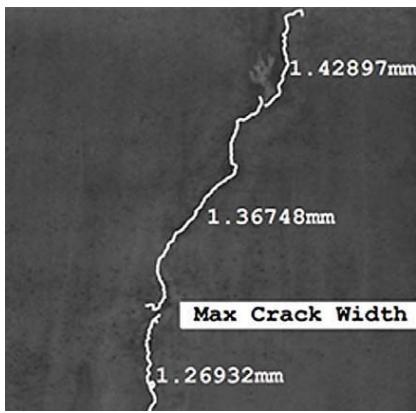


図5 最大ひび割れ幅の計測結果

ひび割れの自動検出

代表的な変状であるひび割れを、自動的に検出する画像処理手法について述べます。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します。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ーを適用しました。検出感度を左右する3つのパラメーター（平滑化係数、微分値の上限しきい値及び下限しきい値）を操作し、幅0.5mm程度のひび割れを検出します。さらに、枝分かれるひび割れや、連結するひび割れがないかをきめ細かく検査します。また、本処理はサブピクセル（撮影解像度以上の）精度の結果が得られるので、**図5**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ます。さらにトンネル天端部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ます。

閉合ひび割れの検出

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ります。この閉合ひび割れの検出手法について述べます。

一般的な閉合ひび割れが十分含まれるサイズに分割した処理領域に対して、サブピクセル精度でひび割れ成分を検

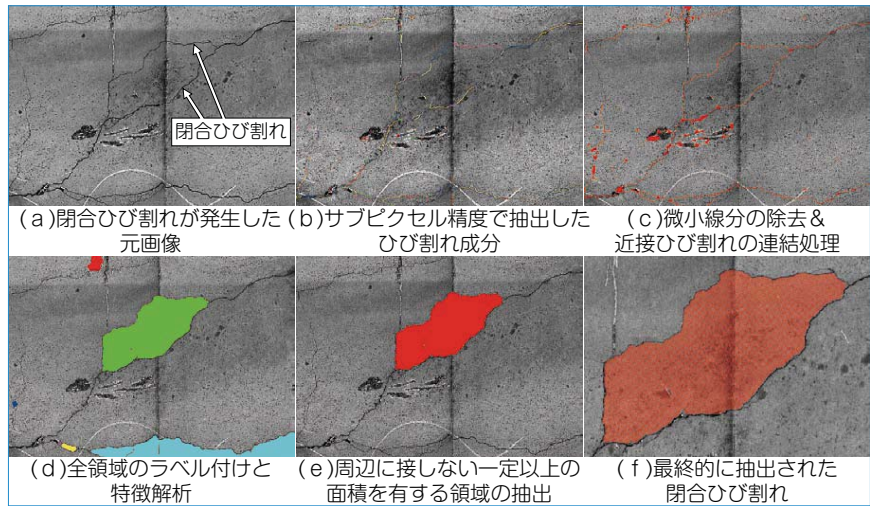


図6 閉合ひび割れの検出結果

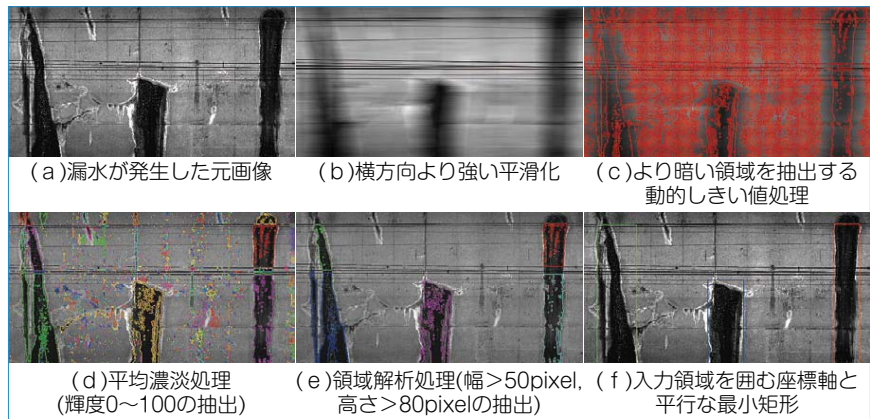


図7 漏水の検出結果

出します。次に、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します。次に全ての抽出成分に対してラベル付けを行い、個々の左上及び右下コーナーの座標値を検定します。左上コーナーの列座標、右下コーナーの列座標とも処理領域の左右の境界に接しておらず、かつ左上コーナーの行座標、右下コーナーの行座標とも処理領域の上下の境界に接していなければ、当該成分は閉合ひび割れであると判定します。閉合ひび割れの検出結果を**図6**に示します。

漏水の検出

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ます。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

きい値処理で、背景に比べてより黒い領域を抽出します。次に微小なノイズを除去し、標準的な漏水の平均輝度値の範囲にあり、かつ、一定の幅と高さをもつ領域を抽出します。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します。漏水の検出結果を**図7**に示します。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（時間をおいてコンクリートを打設した場合に生じるコンクリート打継部の不連続な面）の検出にも適用可能です。

ビデオからパノラマ画像

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

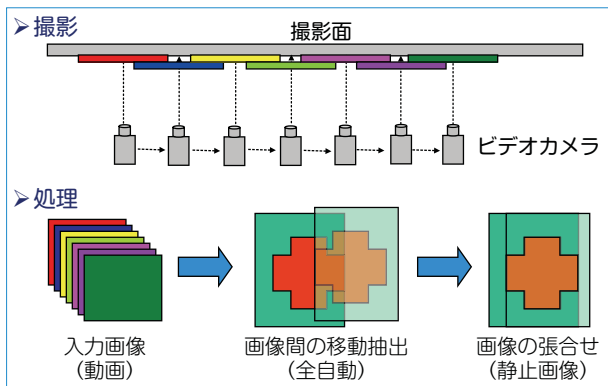


図8 パノラマ画像処理の原理

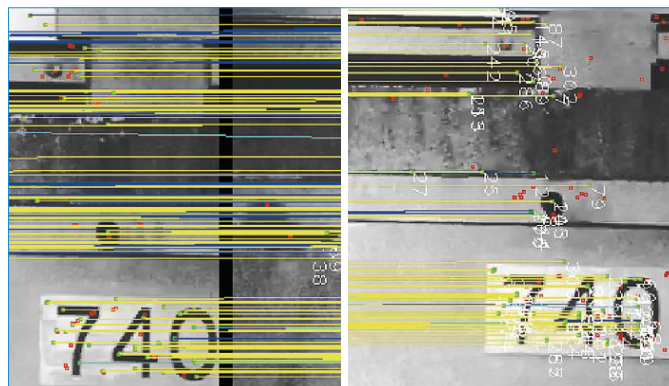


図9 SURF アルゴリズムによる特徴点对応付け結果



図10 結合済み画像の例

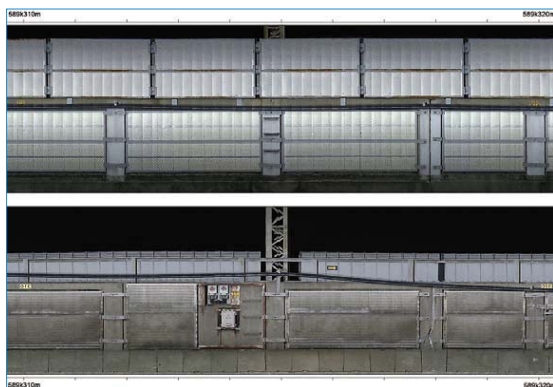


図11 高欄画像の連続帳票(上下線2段組み)

パノラマ画像を生成する技術について、高欄撮影を例に述べます。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8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(図9)。高欄画像のように、似たような壁面や背景の夜空など、比較的一様な模様の画像の場合、異なる部位同士が一致することがありました。そこで、算出した移動量の数値に外れ値等が無いが、妥当性をチェックしながら移動量と移動方向に沿って、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。

シマツチングにより自動的に検出し、これを基準に、線路延長方向が等ピッチになるよう内挿補間し、距離の正規化を行いました。銘板の無い区間については、上下線画像に映る電柱を基に補正しました。

作成したパノラマ画像は長大画像なので、これを効率的に閲覧できるように画像ビューアを作成しました。線路延長方向の距離の正規化により、画面上部のキロ程目盛と実画像との位置は正確に合っています。図10に結合済み画像の例を示します。

作成した高欄画像を、上り/下り線を2段に配置して一括印刷するプログラムを作成しました。下り線は見上げ、上り線は見下げの状態ですので、上下線とも向かって左側が起点側となつて

さらに、最終工程でつなぎ目のブレンド処理を施すことで、画像品質の向上を図りました。

延長方向の距離の正規化

10mおきに設置されているキロ程銘板を、形状(輪郭)に基づくパター

おり、上下線の各地点は完全に一致しています。なお、上り線は見下げのため文字が反転していますが、上下線の位置が一致していることで、作業視点の画像として、非常に見やすくなっています。図11に印刷帳票の例を示します。

おわりに

鉄道構造物の高精度検査を実現する新しい撮影技術、変位の自動抽出などの画像処理技術を紹介しました。画像処理に関しては、汎用装置を使用しているので、費用対効果が高く、ICTの恩恵が得られるシステム構成となっております。また、自律走行トンネルスキャナーのように、鉄道事業者側の意見や要望をうまく取り入れ、実用性の高い技術になっています。[RRR]

文献

- 1) 鷓飼正人：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、鉄道総研報告、Vol.24, No.3, 2010.3
- 2) 鷓飼正人：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