

(60) Random Forestによるコンクリート表面ひび割れの検出

全 邦釘¹・井後 敦史²

¹正会員 愛媛大学助教 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: chun.pang-jo.mj@chime-u.ac.jp

²学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科 修士課程 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: igo.atsushi.11@cee.chime-u.ac.jp

コンクリート構造物のひび割れは劣化の進行速度に大きな影響を与えるため、健全度診断のための重要なパラメータの1つとして定められており、各種点検要領ではひび割れ幅や位置、長さを記録するように定められている。しかしその計測は必ずしも容易ではなく、また、点検員の技量等によって判定がばらつくという主観性の問題もある。

これらの問題の解決のため、撮影画像からひび割れを自動検出するという研究が国内外の様々な機関において行われているが、現状ではこれらの手法が完成しているとは言い難い。そこで本研究ではRandom Forestによる機械学習を画像解析に組み合わせたひび割れ検出手法を構築した。また、実際の撮影画像を用いた実験の結果、高い精度であることを確認した。

Key Words : random forest, image analysis, crack detection, concrete

1. はじめに

近年、橋梁やトンネルなどのコンクリート構造物の劣化や損傷が顕在化しており問題となっている。これらの適切な点検、維持管理のために平成26年7月に国土交通省より橋梁定期点検要領¹⁾や道路橋定期点検要領²⁾、道路トンネル定期点検要領³⁾などが施行され、その中でコンクリート構造物の場合、ひび割れ、うき、剥離、鉄筋露出などに着目して点検するように指定されている。ひび割れはその中でも非常に重要な指標の1つであり、近接目視や、必要に応じてクラックスケールなどによりひび割れの位置、長さ、幅などを計測し、その結果をもとに健全度を診断し、対策区分を判定するように定められている。しかし点検員によって判定がばらつくという主観性、非定量性の問題が目視点検には常につきまとう。また、高所や狭隘部などではそもそも目視点検が難しいという問題もある。

そこで撮影画像からひび割れを自動検出するという研究が国内外の様々な機関において行われており⁴⁾⁶⁾など、著者らも文献(7)、(8)で画像統計量を利用して検出性能の高い自動検出手法の開発を行っている。しかし、コンクリートのひび割れの存在する状況や環境は非常に多様であり、その多様性に比して画像解析によるひび割れ検出手法は未だ十分に揃っていないと著者らは考えている。

現在行われている点検では、目視やスケッチといった初歩的な作業にほとんどの管理者、点検員は頼っており、画像解析を利用している一部の管理者も限定的な使用にとどまっていることもその1つの傍証である。すなわち、数多く同様の研究がなされているにもかかわらず、現段階では手法の蓄積が必要な状況にある。

そこで、我々は画像解析手法と機械学習を組み合わせることで、ひび割れを精度よく検出する手法の開発を行った。ひび割れの検出はコンクリートだけでなくアスファルト舗装でも求められているものであり、文献(9)や(10)で著者らはナイーブベイズ法や決定木による機械学習を画像解析に組み合わせ、アスファルト舗装のひび割れを精度よく検出する手法を提案している。この手法を発展させることで、コンクリートのひび割れについても高い精度で検出できることを確認したので、本論文で報告する。

2. 機械学習によるひび割れ自動検出手法

上述のように、著者らはアスファルト舗装のひび割れを精度よく検出する手法を既に提案している。アスファルト舗装の撮影画像の解析という目的を考えた場合、

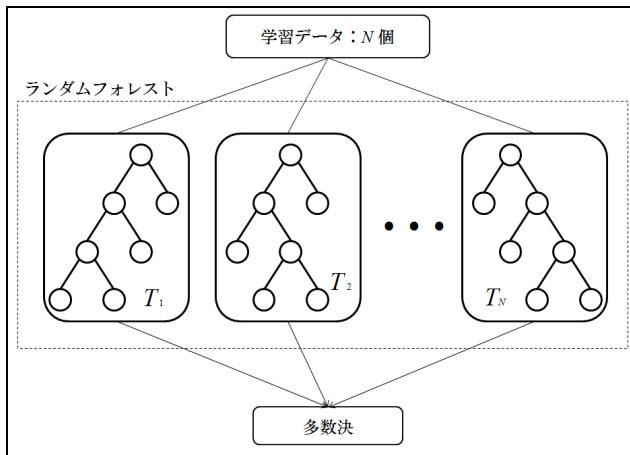


図-1 Random Forest の概念図

例えば 1 枚の写真で撮影可能な領域が 2m 四方だとすると、1km 程度の距離でも解析しないといけない写真は数百枚から数千枚のオーダーになってしまうため、精度だけでなく計算速度にも強い配慮を行うことが求められていた。そこで文献(9)や(10)ではナイーブベイズ法や決定木¹¹⁾といった、計算速度の高い手法を用いていた。

しかし、コンクリートのひび割れを解析したいケースは、アスファルト舗装の場合と多くの場合異なり、そのような多数の写真を撮影・解析する必要はない。すなわち、計算速度はやや遅くてもより性能のよい手法を用いるのが望ましい。そこで本研究では上述の手法と比較してやや計算速度は遅いものの、高精度で汎化性能も高い Random Forest¹²⁾を用いることとした。概念図を図-1に示す。Random Forest はランダムに選ばれた学習データおよび説明変数から構築される複数の決定木の結果を合わせてクラス分けを行うアルゴリズムであり、アンサンブル法の一つである。アンサンブル法は多数の弱学習器を使用して高精度な予測を達成する手法と定義でき、Random Forest 以外にもバギングやブースティングなどが挙げられるが、Random Forest はそれらよりも一般的に精度がよく、また計算が速いことが報告されている^{12),13)}など。

Random Forest は上述のように複数の決定木の結果から分類を行うものであるが、複数の決定木は元のデータ集合から重複を許容した上でランダム選択された複数個のサブセットから作成する。決定木の成長には CART (classification and regression trees)を用いた。CART において、ノード t でデータを分割する際の基準は、式(1)で表される不純度と言われる指標の低下率が最大になるように決定される。ここでは不純度としてジニ係数を用いた。

$$\Delta GI(t) = P_L GI(t) - P_L GI(t_L) - P_R GI(t_R) \quad (1)$$

$GI(t)$ はノード t におけるジニ係数、 P_L, P_R は、分割する前、分割した後の左側、分割した後の右側の個体の比率、 t_L, t_R は分割した後の左側および右側のノードである。

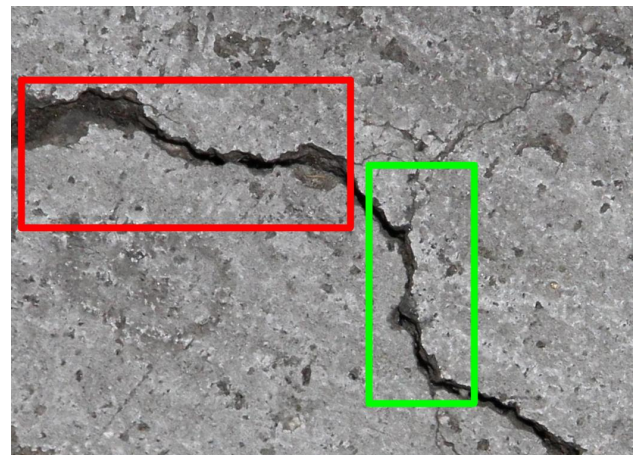


図-2 縦長・横長フィルタの概念図

ジニ係数は以下の式(2)のように定義される。

$$\begin{aligned} GI(t) &= \sum_{i \neq j} p(C_i | t) p(C_j | t) \\ &= \sum_{i=1}^n p(C_i | t) (1 - p(C_i | t)) \\ &= 1 - \sum_{i=1}^n p(C_i | t)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

上式で n はクラス数、 $p(C_i | t)$ はノード t でクラス i のデータが選ばれる確率である。すなわち、右辺第 1 項はノード t における誤り率を意味しており、よって式(1)はもっとも誤り率を減らすことが出来るような決定木の分岐を行っていくということに対応している。

本研究で構築する手法は、画像内の画素全てについてひび割れかどうか判定することを目指す。すなわち、Random Forest の出力として得られるのはある着目画素がひび割れかどうかの分類である。一方で入力として Random Forest に与えるデータは、着目画素の特徴量の集合である特徴ベクトルということになる。

ある着目画素がひび割れかどうか判定するためのもっとも有力な特徴は、その着目画素の輝度値である。ひび割れは周辺画素と比較して相対的に暗く、すなわち輝度値が低いことが多い。そこで本研究でも着目画素の輝度値を特徴量として用いるが、それだけでは一定の精度の検出結果しか得ることができない。何故なら、コンクリートの撮影画像は影や汚れ、ノイズなどひび割れ以外にも輝度値が低い要素が様々に存在しており、輝度値だけで判定するとこれらをひび割れと誤認識してしまうためである。

そこで本研究では、文献(10)にならい、着目画素の周辺画素の輝度値も特徴と考える。ひび割れ画素の隣接画素はやはりひび割れ画素であることも多く、ひび割れ部分は暗い画素の集合体になっていることが多い。すなわち、着目画素の周辺画素の輝度値も低くなっていることが多いため、有効な特徴量となる。文献(10)では、その

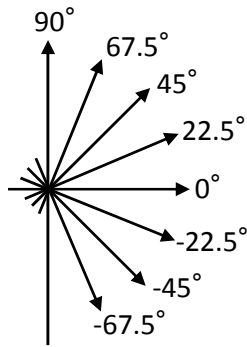


図-3 フィルタの方向

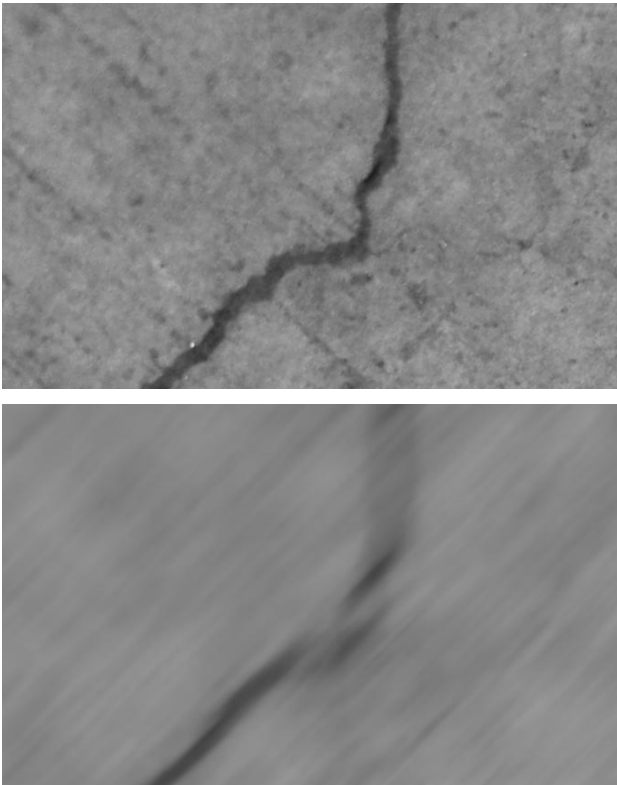


図-4 斜め方向フィルタの適用例（上図：元画像、下図：適用後）

ような特徴量を得るために画像フィルタを用いていた。例えば着目画素を含む周辺 3×3 の領域の輝度値の平均値を特徴量として得たい場合、 3×3 の平均値フィルタを撮影画像に適用するというを行っていた。またそれに加え、アスファルトの場合、交通方向およびその直角方向にひび割れが卓越ということを考慮し、例えば縦方向に長いフィルタや、逆に横方向に長いフィルタを用いて縦方向あるいは横方向に長く続くひび割れを強調するようにしていた（前ページ図-2）。

しかしアスファルト舗装と異なり、コンクリート構造物の場合、例えばせん断ひび割れなどの斜め方向ひび割れもある。そこで、縦横の2方向だけでなく、斜め方向のフィルタも考慮に入れることとする。具体的には、図-3のように22.5度刻みで合計8方向を考慮に入れる

こととする。

例えば図-4に45度でサイズ 5×41 の平均値フィルタを適用した例を示す。斜め方向のひび割れを的確に強調できている様子がわかる。ここでは、フィルタサイズとしては 5×5 、 5×15 、 5×41 の3種類、フィルタの種類としてはガウシアンフィルタ、中央値フィルタの2種類を用いることとした。

3. 実画像による実験結果

本研究では橋梁の床版、桁、建物の内壁など様々な状況下で撮影したデジタル画像43枚（画素数 5184×3456 ）を用いて leave-one-out 交差確認法¹¹⁾により本手法の有効性の検証を行った。leave-one-out 交差検証では、全ての画像枚数を N 枚とすると、 $N-1$ 枚の画像を学習に用い、その学習結果を用いて残り1枚を解析するということを N 回繰り返す。また、実際に本手法を実用化する際には影や汚れの影響を強く受ける写真も含まれるということを考慮し、そのような影や汚れを多く含む画像についても解析対象としている。次ページの図-5に撮影画像のうちの3枚を例として、本論文で提案した手法によるひび割れ検出結果を示す。なお図-5は、上図が撮影画像、下図が検出結果を意味しており、ひび割れと検出した部分を赤色で示している。

図-5に示した画像は、そのどれも影や汚れを多く含み、従来の手法ではこれらを誤検出してしまうことが多かった。しかし図-5より明らかなように、本研究の手法はこれらについて非常に適切に区別がついている。ただし、図-5の右側の撮影画像では、コンクリートのPコン跡をひび割れと誤検出してしまっている。Pコン跡は画像内ではひび割れとほぼ同様の性質を持っているためその判定が難しく、本研究の枠組みではほぼ不可能と言える。しかしその一方で人間の目にはPコン跡を見分けるのは極めて容易であり、それはPコン跡が円形であるという特徴を持っていることによるものである。円形特徴はハフ変換を用いれば検出できる可能性があり、文献(8)でもその適用性について検討しているが、計算時間が非常に長く、またしきい値の設定も人為的な微調整が必要であるなど難点も多い。一方で、判別が非常に容易なため、これらの跡については人間が微調整するという発想もあり得ると考えている。

4. まとめ

本研究では、Random Forestによる教師あり機械学習法と非正方形型のフィルタを用いた画像処理を組み合わせ

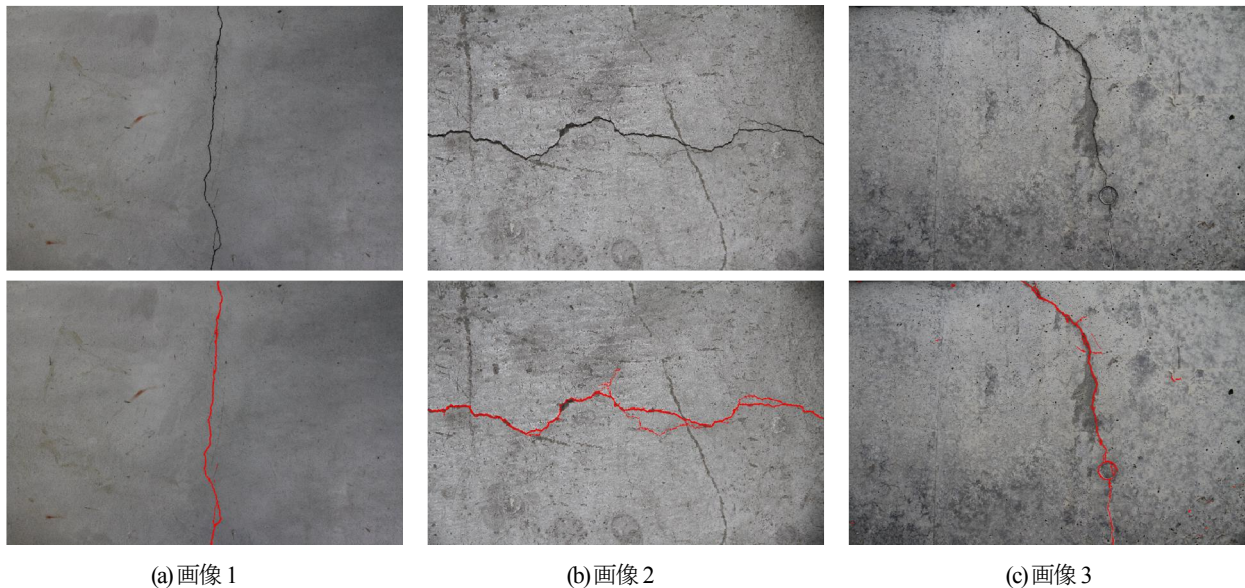


図-5 ひび割れ検出結果例

ることで、コンクリート表面のひび割れ検出手法を構築し、そしてその精度について確かめた。その結果、影や汚れが厳しい画像においても極めて良好にひび割れを検出できることがわかった。

今後の展望を以下に述べる。文献(7)で構築した手法と本研究で構築した手法を比較した場合、全体的な精度は似ているものの、少しずつひび割れ検出結果が異なっている。すなわち、検出を得意とするひび割れの傾向がそれぞれ異なっていることを意味しており、これらを組み合わせればよりよい検出手法となることが期待され、現在研究を行っている。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局 国道・防災課：橋梁定期点検要領，2014。<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo3_1_6.pdf>，(accessed 2015.7.22)。
- 2) 国土交通省道路局 国道・防災課：道路橋定期点検要領，2014。<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo4_1.pdf>，(accessed 2015.7.22)。
- 3) 国土交通省道路局 国道・防災課：道路トンネル定期点検要領，2014。<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo3_1_9.pdf>，(accessed 2015.7.22)。
- 4) 藤田悠介，中村秀明，浜本義彦：画像処理によるコンクリート構造物の高精度なひび割れ自動抽出，土木学会論文集 F，Vol.66，No.3，pp.459-470，2010。
- 5) 河村圭，宮本文穂，中村秀明，佐藤亮：対話型遺伝的アルゴリズムによるデジタル画像からのひび割れ抽出，土木学会論文集，No.742/VI-60，pp.115-131，2003。
- 6) Abdel-Qader, I., Abudayyeh, O., and Kelly, M.: Analysis of Edge-Detection Techniques for Crack Identification in Bridges, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.17, No.4, pp.255-263, 2003。
- 7) 全邦釘，片岡望，三輪知寛，橋本和明，大賀水田生：統計的特徴および幾何学的特徴に着目したコンクリート表面ひび割れの画像解析による検出，土木学会論文集 F3，Vol.70，No.2，pp.I_1-I_8，2014。
- 8) 全邦釘，井後敦史，橋本和明：画像解析によるひび割れ検出とハフ変換による型枠跡および P コン跡の同定，コンクリート工学年次論文集（印刷予定）。
- 9) 全邦釘，橋本和明，片岡望，蔵本直弥，大賀水田生：ナイーブベイズ法によるアスファルト舗装撮影画像からのひび割れ自動検出手法，土木学会論文集 E1，Vol. 70，No. 3，pp.I_1-I_8，2014。
- 10) 蔵本直弥，全邦釘：決定木によるアスファルト舗装ひび割れの検出，第 18 回応用力学シンポジウム，100029，2015。
- 11) Bishop C.M：パターン認識と機械学習，シュプリンガー・ジャパン，2007。
- 12) Leo, B.: Random forests, *Machine learning*, Vol.45, No.1, pp.5-32, 2001。
- 13) 金明哲：決定木と集団学習，ESTRELA, No. 133, pp.62-67, 2005。