

(63) ディープラーニングと幾何学的形状判定手法によるコンクリートのひび割れ自動検出

全 邦釘¹・大窪 和明²・三輪 知寛³・嶋本 ゆり⁴

¹正会員 愛媛大学准教授 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@cee.chime-u.ac.jp

²正会員 愛媛大学准教授 防災情報研究センター (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

³正会員 滋賀県庁 (〒520-8577 大津市京町四丁目1番1号)

⁴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)

近年、橋梁やトンネルなどのコンクリート構造物の劣化・損傷の顕在化が大きな問題となっており、適切に点検・記録を行うことが求められている。その中でひび割れは劣化の進行速度に影響を与えるため重要な指標の1つであるが、自動的に検出・評価する手法は確立されていないため、点検・評価・記録に膨大な手間が必要となっている。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。そこで本研究ではディープラーニングの一種である Convolutional Neural Network (CNN) を基とし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: deep learning, convolutional neural network, 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・損傷の顕在化が大きな問題となっており、適切に点検、評価、記録を行うことが強く求められている。しかし点検必要箇所は膨大な数に上る一方で、点検技術者の数は十分ではない。そこで、これらの点検、特にひび割れ検出の画像解析による自動化に関する研究が国内外で精力的に行われている。

Luxmoore の研究はその端緒であると考えられ、ホログラフィを活用したひび割れ検出手法とその適用範囲について議論がなされている¹⁾。国内では、亀田らによる報告が早期にあり、輝度値に注目した検出手法に関する検討が行われた²⁾。そこから撮影器具や計算機などのハード面、および画像解析アルゴリズムなどのソフト面での大幅な性能向上に伴い、様々な手法による検討が特に2000年以降なされてきた。国内での研究について、代表的なものを以下に挙げる。山口、橋本、伊藤らは文献(3)~(5)などで、Gray-scale Hough 変換やパーコレーション処理によるひび割れ検出手法を提案した。この手法は、ひび割れの直線性や連続性に注目すると検出性能が向上することを明示的に示した点で意義のあるものであった。

また、そういった幾何学的特徴を考慮した研究として、藤田、木元らによるヘッセ行列を用いた線延長処理や多重スケール線強調処理、および確率的弛緩法を用いたひび割れ検出手法がある^{6,7)}。

また、国外でも様々なアプローチによる研究がなされている。国内の研究と比較すると周波数解析をベースとした手法が多い傾向にあり、例えば Hutchinson and Chen は高速ハールウェーブレット変換を利用したひび割れ自動検出を行っている¹⁰⁾。また、Abdel-Qader らは高速ハールウェーブレット変換、高速フーリエ変換、Sobel オペレータ、Canny アルゴリズムの4種類のエッジ検出手法を比較し、その中で高速ハールウェーブレット変換が最も性能が高いことを50橋の撮影画像を基に示している¹¹⁾。他にも幾何学的特徴に着目した研究もあり、例えば Iyer and Sinha は曲率特徴の評価とモルフォロジー処理を利用してひび割れを検出している¹²⁾。さらに、Ward の Gaussian reflectance model にもとづいて双方向反射分布関数を求め、そこからひび割れを検出する方法を提示した Amarasingi らによる研究¹³⁾、二値化とノイズ処理、細線化処理を組み合わせた Lee らによる研究¹⁴⁾、Hough 変換とフィルタ処理に三次元解析を組み合わせた Sohn らによる研究¹⁵⁾など様々なものがある。

上述の手法はそれぞれ理にかなっているが、こういった画像解析による手法ではパラメータをどのように決定するかという問題が常にある。撮影対象および環境をある程度定めることで、それに適したパラメータを用いるというのは現実的な解決策の1つではあるが、最適手法などを利用して解決しようとしたアプローチもいくらかあり、例えば河村、佐藤ら是对話型遺伝的アルゴリズムにより閾値を自動的に決定する手法を構築している^{16),17)}。また西川らは木構造状の画像フィルタを遺伝的アルゴリズムにより構築し、その上でクラック幅や方向についても評価している¹⁸⁾。また著者らは、文献(19)~(21)において、ナイーブベイズ法や Random Forest による機械学習を画像解析に組み合わせることでパラメータを学習データより定める方法を提案した。これらの手法では、非正方形型フィルタなどを使って得られた画像を幾何学的特徴の特徴量としており、それらを用いた機械学習で構築した分類器による解析の結果、ひび割れ検出精度も良好であった。ただ、これらは人為的に定められた特徴量であるため最適なものである保証は無いという課題があった。人為的に定めることが可能な特徴量には、数的、量的、共に限界が自ずとある。

そこで本研究では、ディープラーニングの活用によるひび割れ検出手法の開発を行う。ディープラーニングは、多層ニューラルネットワークを用いた機械学習手法の一つであり、画像認識・音声認識等の分野で近年注目されている手法である。従来の機械学習手法では上述のように人為的に特徴量を指定する必要があったが、ディープラーニングでは対象を分類するための特徴量を与えずともよく、むしろ最適な特徴量を学習の過程で自動的に、かつ大量に得ることができる点に特長がある。ディープラーニングを用いたひび割れ検出手法もいくらか提案されているが、手法そのものが新しいこともありまだ端緒の段階にある。本研究では特に、ディープラーニングの一種である CNN (Convolutional Neural Network)²²⁾に、文献(21)で著者らが開発した、従来型の機械学習を基にした大局的形状判定手法を組み合わせることで、高い精度でひび割れ検出が可能となる手法を開発した。

2. ひび割れ検出手法

本研究で開発した手法では以下の手順に従いひび割れの検出を行う。まずグレースケール変換を行い、そして median フィルタを用いて影の影響を減らす前処理を行う。次いで、平均条件付きエントロピーを最小化するように推定された画素値分布を利用して、ひび割れの可能性が非常に低くなる画素値のしきい値を設定し、ひび割れの可能性がある画素のみを残すスクリーニングを行う。そ

して、学習データを元に訓練された CNN により、スクリーニングされた画素からひび割れを精度よく検出する。最後に後処理として、ひび割れは細長いことが多いという幾何学的形状を参考に、ノイズを減らす判定器を Random Forest により構築する。これにより影や汚れ、気泡跡などに妨げられず、ひび割れのみを精度よく検出できるようになる。本章では、これらの処理それぞれについて述べることとする。

(1) グレースケール変換

撮影画像をグレースケール画像に変換することで計算時間を短縮させる。本研究では、RGB成分に差がある落書き部を相対的に明るくすることでひび割れと誤認することを防ぐため、RGB成分の最大値を輝度値とするグレースケール変換を行った。

(2) median フィルタを用いた補正

撮影画像には光や影、汚れなどによる濃淡差があり、これらは精度を低下させる要因となるので、まずこれらの補正を前処理として行う。ここでは、既報²³⁾でも利用した median フィルタを用いた補正を前処理に用いた。

(3) ひび割れ画素のスクリーニング

次のステップで CNN によるひび割れ検出を行うが、CNN は計算負荷が相対的に高いため、このステップでは単純な計算によりひび割れではない可能性が非常に高い画素を抽出し、解析対象から取り除く。具体的にはしきい値による2値化を行うが、状況や環境の変化に対応できるしきい値を導出するため、まず平均条件付きエントロピーを最小化²⁴⁾するようなひび割れ画素群と背景画素群の分布を求める。そして、背景画素群の中でも 4σ 以下の輝度値である画素はほぼひび割れの可能性がないと考え、取り除くこととした。

(4) CNN によるひび割れ検出

ここではディープラーニングの一種である CNN により、ひび割れ部を検出する手法を構築する。CNN は人間の視覚野にある受容野をモデル化しており、画像認識の分野で高い性能を持つことが知られている。CNN についての詳しい説明は紙面の都合上難しいため、詳しくは文献(25)、(26)などを参照されたい。

ひび割れを検出するモデルを構築するために、ここでは、(3)でほぼ確実にひび割れではないと判定された画素を学習データとした。また、層の順番や数、ハイパーパラメータなどネットワークの構成は精度に影響を与える。これらについては、GoogLeNet を基本構造として、層の数やフィルタサイズ、入力画像サイズを微調整しながら決定した。



図-1 撮影画像2枚を例にした，本研究の手法による検出結果の例

(5) Random Forest によるひび割れ形状判定

前のステップまででひび割れ検出を行った後に，このステップでは画素群としての形状に着目する．まず，(4)までで抽出された画素について連結しているものをラベリング処理により同一の画素群として扱う．次いで，画素群ごとの面積，偏心率，細長さを表す指標を算出する．これらを特徴量として，高精度で汎化性能も高いことが知られている機械学習手法である Random Forest²⁷⁾により，ひび割れの形状と考えられないものはこれまでの検出結果から省くことで，最終的な結果とする．

3. 実画像による実験結果

本研究では既報¹⁹⁾でも用いたデータセットである，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²⁸⁾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．図-1 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-1 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-1 より明らかなように，精度よく検出できている様子がわかる．

4. まとめ

本研究では，ディープラーニングの一種である CNN を中心としたひび割れ検出手法を開発し，またその精度について確かめた．その結果，影や汚れなどがあり単純な検出手法では難しい画像でも，精度よくひび割れを検出することが出来ることがわかった．

今後の課題を以下に述べる．文献(20)や(23)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る。また、解析をすればするほど精度が向上する、半教師あり学習の仕組みを導入することで、現状の課題の1つとして認識している学習データの不足を補うことが可能と考え、現在研究を行っている。

参考文献

- 1) Luxmoore, A.: Holographic detection of cracks in concrete, *Non-Destructive Testing*, Vol.6, No.5, pp.258-263, 1973.
- 2) 亀田和昭, 中嶋亮, 杉村俊郎, 田中總太郎: ビデオカメラを使った画像処理システムのコンクリート構造物ひび割れ検出への応用, *日本リモートセンシング学会誌*, Vol.8, No.1, pp.45-50, 1998.
- 3) 山口友之, 橋本周司: Gray-scale Hough 変換を用いたコンクリート表面のひび割れ検出, *電子情報通信学会技術研究報告*, pp.57-64, 2004.
- 4) 伊藤厚史, 橋本周司: コンクリート表面の高精細画像計測, 第 66 回情報処理学会全国大会講演論文集, pp.565-566, 2004.
- 5) 山口友之, 橋本周司: 既設コンクリート構造物におけるひび割れ幅の実画像計測, *電気学会論文誌 C*, Vol.127, No.4, pp.605-614, 2007.
- 6) 藤田悠介, 三谷芳弘, 浜本義彦: 画像処理によるコンクリート表面のひび割れ抽出法, 非破壊検査, 第 56 巻 7 号, pp.371-377, 2007.
- 7) 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.
- 8) 木元 亮介, 藤田悠介, 河村圭, 浜本義彦: 画像処理によるコンクリート構造物のひび割れ計測の実用化に関する基礎研究, 第 26 回ファジィシステムシンポジウム, pp.874-879, 2010.
- 9) Fujita, Y. and Hamamoto, Y.: A robust automatic crack detection method from noisy concrete surfaces, *Journal of Machine Vision and Applications*, Vol.22, No.2, pp.245-254, 2011.
- 10) Hutchinson, T.C. and Chen, Z.: Improved Image Analysis for Evaluating Concrete Damage, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.20, No.3, pp.210-216, 2006.
- 11) 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.
- 12) Iyer, S. and Sinha, S.K.: Segmentation of Pipe Images for Crack Detection in Buried Sewers, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.21, No.6, pp.395-410, 2006.
- 13) Amarasiri, S., Gunaratne, M., and Sarkar, S.: Modeling of Crack Depths in Digital Images of Concrete Pavements Using Optical Reflection Properties, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.136, No.6, pp.489-499, 2010.
- 14) Lee, B.Y., Kim, Y.Y., Yi, S.T., and Kim, J.K.: Automated image processing technique for detecting and analyzing concrete surface cracks, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.9, No.6, pp.567-577, 2013.
- 15) Sohn, H.G., Lim, Y.M., Yun, K.H., and Kim, G.H.: Monitoring Crack Changes in Concrete Structures, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.20, pp.52-61, 2005.
- 16) 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.
- 17) 佐藤亮, 樋口陽一, 河村圭, 宮本文穂: 対話型遺伝的アルゴリズムによるひび割れ抽出システムの開発, *土木学会第 57 回年次学術講演会*, VI-104, pp.207-208, 2002.
- 18) 西川貴文, 吉田純司, 杉山俊幸, 斉藤成彦, 藤野陽三: 木構造状フィルタを用いたコンクリートのクラック抽出のためのロバストな画像処理システム, *土木学会論文集 A*, Vol.63, No.4, pp.599-616, 2007.
- 19) 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.
- 20) 全邦釘, 井後敦史: Random Forest によるコンクリート表面ひび割れの検出, *土木学会論文集 F3*, Vol.71, No.2, pp.I_1-I_8, 2015.
- 21) 嶋本ゆり, 大賀水田生, 全邦釘: 二段階の決定木を用いたコンクリート表面のひび割れ検出手法の提案, *土木学会四国支部技術研究発表会*, I-6, 2016.
- 22) LeCun, Y., Boser B.E., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard W.E., and Jackel L.D.: Backpropagation applied to handwritten zip code recognition, *Neural Computation*, Vol.1, No.4, pp.541-551, 1989.
- 23) 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.
- 24) Kittler, J. and Illingworth, J.: Minimum error thresholding, *Pattern recognition*, Vol.19, No.1, pp.41-47, 1986.
- 25) 岡谷貴之: 深層学習, 講談社, 2015.
- 26) 山下隆義: イラストで学ぶディープラーニング, 講談社, 2016.
- 27) Leo, B.: Random forests, *Machine learning*, Vol.45, No.1, pp.5-32, 2001.
- 28) Bishop C.M (元田浩, 栗田多喜夫, 樋口知之, 松本裕治, 村田昇訳): パターン認識と機械学習, シュプリンガー・ジャパン, 2007.