

〔論文〕

片側袖壁付RC柱の終局せん断耐力評価に関する研究 (その2 画像処理を用いたひび割れ検出及び長さ算出手法の検討)

呉 濟元*¹・松本 豊*²・島添 稔*³・小田 まり子*⁴・八坂 亮祐*⁵・新井 康平*¹

Experimental Study on Shear Strength for Reinforced Concrete Column with Wing Wall on One Side (Part2 Crack Detection and Length Calculation Method Using Image Processing)

Jewon OH*¹, Yutaka MATSUMOTO*², Jin SHIMAZOE*³, Mariko ODA*⁴
Ryosuke YASAKA*⁵ and Kohei ARAI*¹

Abstract

For damage classification of a building, the soundness of the structure is evaluated based on superficial visual information through a field survey, which can be extremely dangerous and may require specific expertise. This study used image processing to detect cracks and analyze the degree of crack damage. Images of the cracks were captured using a 4K camera during the reinforced concrete (RC) column loading test. Image processing was used to determine the presence or absence of cracks by edge detection, contour detection, and color detection. The degree of damage to the cracks was analyzed using image processing. Edge detection accuracy varied depending on the parameters, and objects that did not crack could also be detected. The results obtained for contour detection depended on the brightness of the image. For color detection, cracks were detected using a method that splits and combines input images. In this study, the length of the straight line of cracks was calculated to analyze the degree of damage. However, it was difficult to evaluate the length of bent cracks.

Key Words : Image processing, Crack detection, Color detection, Canny, Threshold, OpenCV

1. 緒 言

我が国では、大地震によって多くの建物が被災している。地震発生後、建物の被災区分判定には多くの専門家・技術者が現地調査に出向き、表面的な視覚情報から被災状況を評価している⁽¹⁾。しかし、コンクリート内部の劣化状況を表面的な視覚情報から判断することは困難であり、危険性を伴う現地の調査は、安全性を保つことが難しい。また、その評価には長年の経験と専門知識が必要である。近年、国土交通省の「点検支援技術性能カタログ(案)」が発表され、知識と技能を有する者が定期点検を行う際に必要な点検支援技術を用いるようになってきた⁽²⁾。

これを踏まえ、筆者らは危険な現地で調査を行わずに済む、画像データを用いた人工知能(Artificial Intelligence, AI)により鉄筋コンクリート(Reinforced Concrete, RC)のひび割れの有無、検出、ならびに被災度を評価するシステムの開発を試みた。深層学習(Deep learning)技術は日々進化しており、RC分野においても、せん断破壊型RC柱の損傷度識別⁽³⁾⁽⁴⁾、角欠けの検出、材料劣化床版の疲労劣化など、ひび割れの検出にAIを応用した既往研究が多くみられる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本研究では、片袖壁付きRC柱のせん断耐力に関する実験的研究⁽⁷⁾(以下、せん断力実験)にも取り組んでおり、その実験過程で得られるRC柱のひび割れ画像を時系列データとして機械学習に用いることを検討している。最終的には、ひび割れを検知するだけでなく、ひび割れがどのような方向に進展し、破壊メカニズムに達するかを未来予測するシステムの構築を視野にいれている。

AIを用いたひび割れの検出既往研究として、全ら⁽⁸⁾⁽⁹⁾はRandom Forestによる機械学習を組み合わせたひび割れ検出手法を検討した。撮影画像の光や影、汚れなどによる濃淡差を補正するため、medianフィルタ、Gaussianフィルタを用いて前処理を行った。前処理を行うことで顕著な影や汚れが存在する画像においても極めて良好にひび割れを検出できた。さらに、画像をグレースケールに変換してノイズを除去した後、影や汚れを排除した画像を学習したCNNモデルと組み合わせることで、既存手法と比較してひび割れの判定精度が大きく向上した。藤田ら⁽¹⁰⁾は教師有り深層学習モデルを用いたひび割れの自動抽出システムを構築し、野村ら⁽¹¹⁾はリアルタイムにひび割れの有無・領域をスクリーニング可能なシステムを開発した。また、

*¹ AI応用研究所, *² 建築・設備工学科, *³ 電子情報システム工学専攻, *⁴ 情報ネットワーク工学科, *⁵ PCサポートセンター

3つの種類の解像度が違う入力画像を用意してひび割れの分類を比較した。誤検出は解像度に関わらず発生したが、解像度が高いほどひび割れの検出精度が高かった。山根ら⁽¹²⁾は Mask R-CNN を用いてひび割れのみならず、P コン跡および型枠跡もそれぞれ学習させて、より高い精度でひび割れの検出を行った。しかし、ひび割れ検出において、元画像の端部でわずかにひび割れが検出できていない箇所があった。高橋ら⁽¹³⁾は画像分類、物体検出、領域分割の3つの目的で Matlab 2020a を用いた損傷発生を画像診断で行った。森田ら⁽¹⁴⁾は地震後に撮影した RC 柱の画像を対象として損傷度 I・II78 枚、III60 枚、IV77 枚、V108 枚の各損傷度の画像を用いて教師有り学習を行い、RC 柱の損傷度を判定した。モデルは AlexNet と VGG16 の学習済みモデルを用いた結果、損傷度 I・II と損傷度 V は正しく推定できた。肥田ら⁽¹⁵⁾および Lu ら⁽¹⁶⁾は建物の外観の画像データから被害の有無を判定する手法の検討を行った。また、CNN による被害判定結果を地図上に表示し、被害の地理的分布を把握する手法を構築した。モデルの精度は検証データが 96%、未知データに対しても 96% 程度の高い正答率を得た。

こうした既往研究では、学習済みモデルを用いてひび割れの有無検出について研究が行われてきたが、学習前のデータ前処理や損傷度の解析方法については十分に研究がなされていないのが現状である。そこで、本研究では、片袖壁3体の静的加力実験時に 4K カメラで撮影した画像に対して、Canny 法⁽¹⁷⁾のエッジ抽出、Threshold 法⁽¹⁸⁾の輪郭検出、HSV⁽¹⁹⁾の色検知を施し、学習データのの前処理方法について検討を行う。また、目視によるひび割れの有無分類を行い、ひび割れがある画像を対象に画像処理を用いてひび割れの長さを算出した結果について報告する。

2. ひび割れの動画像データ収集及びデータ前処理方法

せん断耐力実験体^(註1)では、実物大の 1/3 スケール試験体 3 体を製作し、せん断耐力への程度影響を及ぼすか実験的に評価した。このせん断耐力実験において、Fig.1 のように 4K カメラを正面に設置し、ひび割れが発生する試験体の様子を動画撮影した。撮影は、せん断耐力実験開始から終了まで連続的に行い、3840×2160 画素の高画質 (4K)、30FPS に設定し、動画データ (*.MP4) で保存した。また、ひび割れ有無を機械学習する前処理として、以下の手順でひび割れの有無分類に向けたエッジ検出・輪郭検出・色検出を行い、ひび割れの有無画像データを蓄積した。

- (1) その 1 の実験中に撮影した RC 柱の動画 (3 時間、サイズ: 30.2 GB) を必要な部分のみ編集し (27 分、サイズ: 1.96 GB) の静止画に切り出した。
- (2) 撮影画像に対して OpenCV⁽²⁰⁾を用い、Canny 法と Threshold 法による平滑化^(註2)、ノイズ除去を試みた。
- (3) エッジ検出後の画像を、著者らが目視によりひび割れの有無を判別した。
- (4) 画像を 300×300 サイズに変換し、PNG 形式画像データとして保存した。
- (5) OpenCV を用いてひび割れの長さを検出した。

以上の手順でせん断耐力実験時に撮影した画像を用いて、画像処理によるひび割れ検出を行った。また、画像処理結果に基づき、目視により有無判別を行い機械学習の入力画像データとして、それぞれの実験体の画像データを蓄積した。

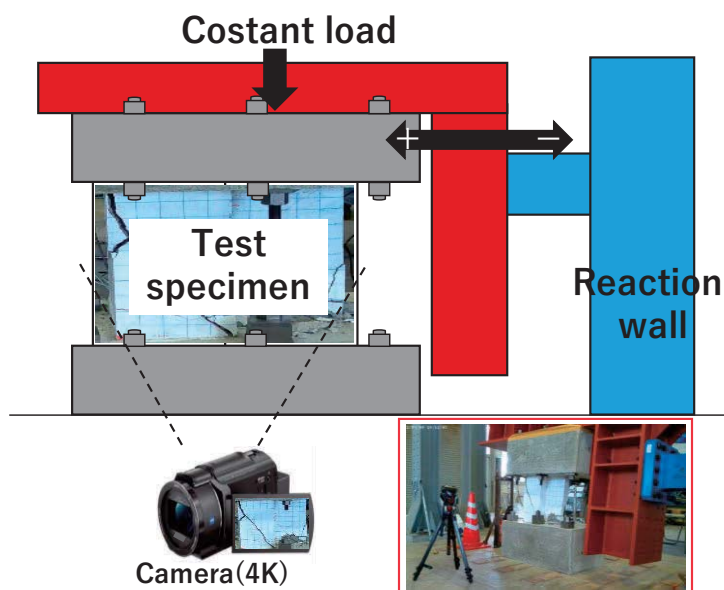


Fig 1. Image data acquisition

3. ひび割れの有無検出

ひび割れの有無検出はせん断耐力実験で撮影した動画を用い、ひび割れが発生した部分を中心に画像を抽出した(Fig.2). 抽出したひび割れの有無画像を用いて Canny 法 (エッジ検出), Threshold 法 (輪郭検出), HSV (色検出) の3つの方法に基づき、画像処理によるひび割れの検出を試みた. 画像処理に使用するパソコンの性能を Table.1 に示す.

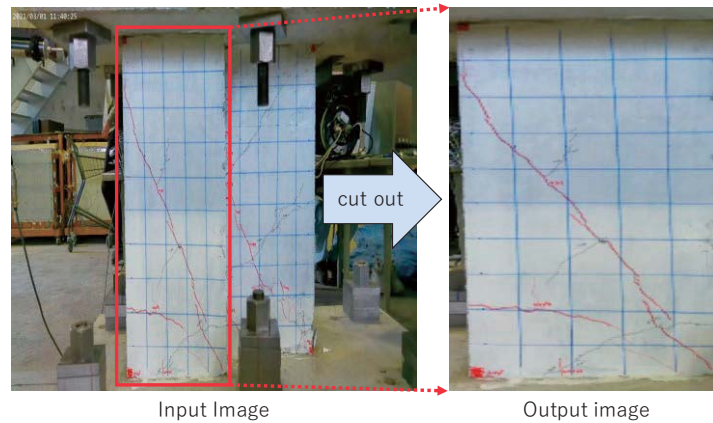


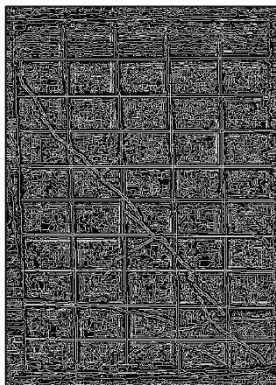
Fig 2. Extraction of experimental specimens with cracks

Table.1 PC performance

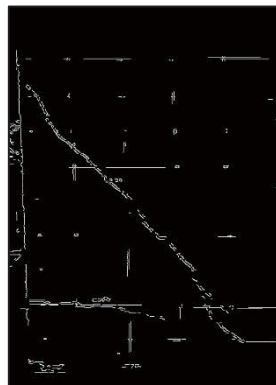
CPU	Intel(R)Core(TM)i9-10900K @3.70 GHz
RAM	32 GB
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3090
capacity(SSD)	500 GB

3・1 Canny 法を用いたエッジ検出

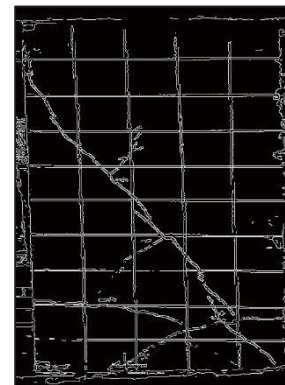
エッジ検出^(註3)は一方の方向にピクセル値が急激に変わる地点を示す垂直エッジと水平エッジを検出する方法である. せん断力実験で得られた画像内のひび割れのエッジ検出を行った. Fig.3 にエッジ検出によるひび割れの検出結果を示す. エッジ検出はパラメータの調整によってエッジの検出度が異なる. パラメータの値が小さいほどノイズが多く発生し、ひび割れが見にくい(Fig.3(A)). また、パラメータの値が大きいほどノイズは少ないが、検出したひび割れの一部分がノイズと一緒に削除されることが分かる(Fig.3(B)). このようにパラメータをどの程度調整すれば見やすく検出できるのか探る必要がある. そのため、筆者らは OpenCV の Track Bar^(註4)を用いて適切なパラメータを検討した. 最適なパラメータを設定した結果、最もひび割れが分かりやすく検出できた(Fig.3(C)). しかし、ひび割れではない(ガイドライン)ものも同時に検出するため、今後行う機械学習の学習データ利用やひび割れの損傷度の分析を行う際にはひび割れだけ抽出、画像処理などが必要である.



(A) Minimal parameters (Min=0, 70)



(B) Maximal parameters (Max=200, 70)

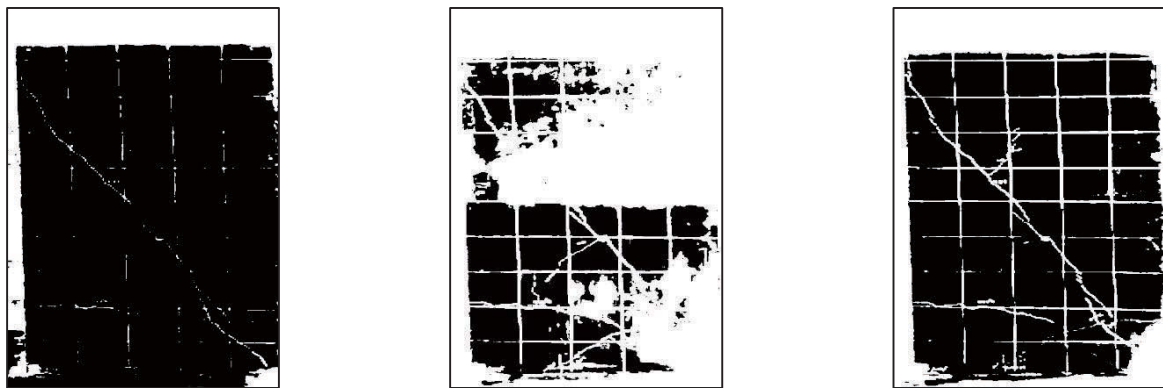


(C) Optimal parameters (Op=70, 70)

Fig 3. Edge detection using the Canny method

3・2 Threshold 法を用いた輪郭検出

輪郭検出^(註5)は、Canny 法のエッジ検出と同様に OpenCV を用いて輪郭を検出する方法により行った。輪郭検出とは画像の画素値がしきい値より大きければ白を割り当て、そうでなければ黒を割り当てる手法で入力画像を二値化される。また、入力画像の撮影状況などによって画像上の領域ごとに明るさが異なるため期待した結果が得られ難い。そのため、領域ごとに補正值のしきい値処理を行うことでより良い結果が得られる。しきい値をどのように設定するかによってひび割れの輪郭検出結果が異なる(Fig.4)。そのため、Track Bar を用いてしきい値の調整を行った。本研究では、しきい値の変更範囲は 120~190、最大値は 255、Threshold type は THRESH_BINARY_INV に設定してパラメータを最適化した。最低のしきい値を設定した場合は、検知された輪郭全体が薄く見える(Fig.4(A))。また、最大のしきい値を設定すると画像半分が白色として出力されている(Fig.4(B))。しきい値を 150 に設定した結果が最もひび割れの輪郭が検出できた(Fig.4(C))。



(A) Minimal parameters (Min=120, 255) (B) Maximal parameters (Max=190, 255) (C) Optimal parameters (Op=150, 255)

Fig 4. Contour detection using the Threshold method

3・3 HSV 色空間モデルを用いた色検出手法

せん断力実験では、実験中に目視でひび割れを確認し、ひび割れが発生した場所を実験者が赤色で塗りつぶしている。正加力時に発生したひび割れを黒色、負加力時は赤色でマーキングを行い、加力方向別で分類した。そのため、色を検出すれば、ひび割れが検出できるのではないかと考えた。本研究では、HSV 色空間モデル^(註6)を用いて赤色（負加力時のひび割れ検出）と青色（実験体のガイドラインを検出し色変換によるひび割れ検出）を中心に検出した。しかし、入力画像をそのまま利用すると効率良く色検出ができなかった。そのため、Fig.5 のように入力画像を分割し、分割したそれぞれの画像を用いて色を検出した。赤色で塗りつぶされたひび割れを検出した後、他の色は白い背景に変更する方法と、実験体のガイドラインの青色を検出し、白色に変更する方法を試みた。また、それぞれの色を検出した後は、分割した画像を結合させることで画像を元のサイズに戻す。Fig.6 に色を検出した結果を示す。画像を分割して色検出を行っても領域によって明るさが異なり、また、パラメータを調整しても効率良く色検出ができなかった部分も見られた。

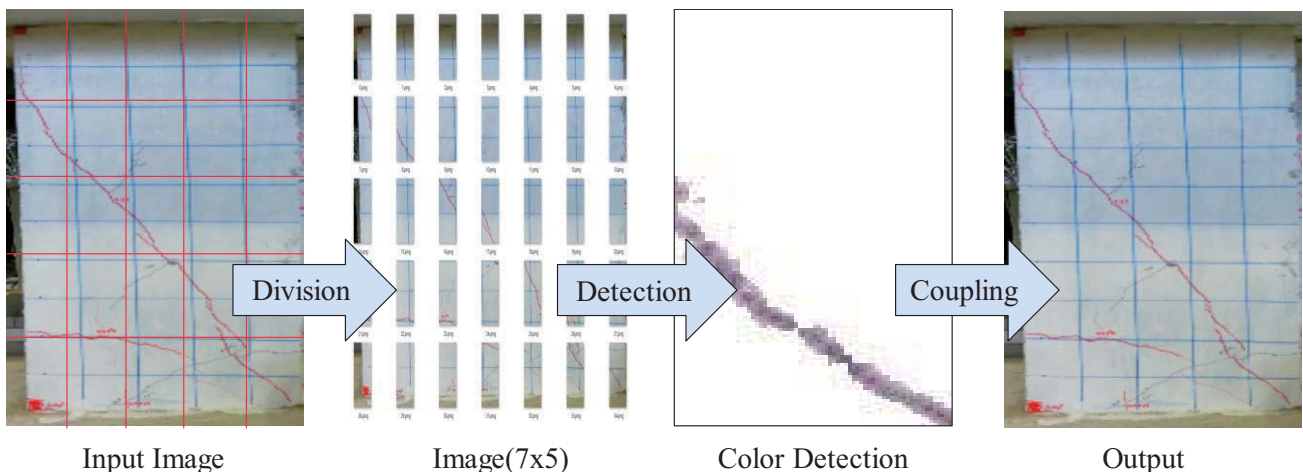


Fig 5. Color Detection Procedure

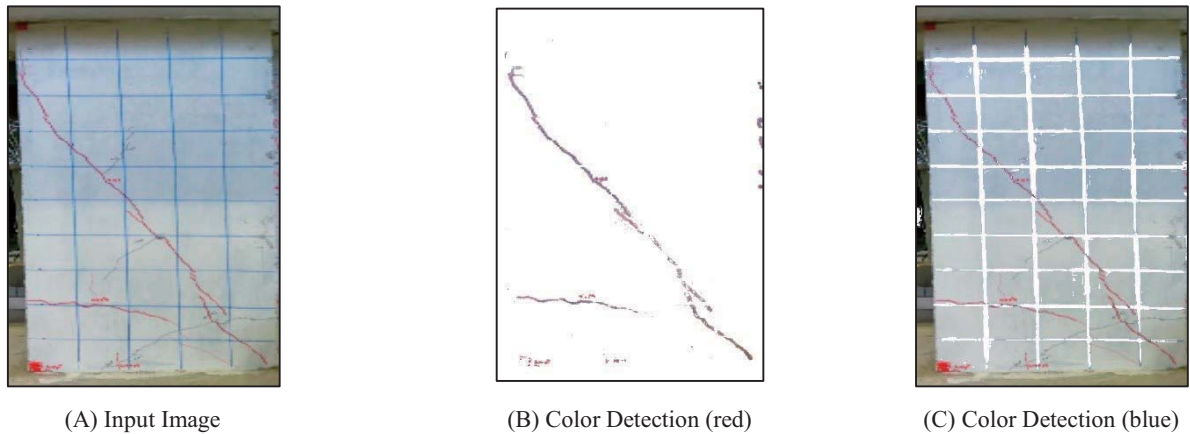


Fig. 6 Color detection results by HSV model

4. ひび割れの長さの検出方法

ひび割れ長さの検出を OpenCV により検出を行った。本研究では、ひび割れの長さを直線に算出する方法を考えた。Fig.7 に斜めのひび割れがある画像を用いて長さを求めた結果を示す。ひび割れの長さを算出するには式(1)~(4)を用いて入力画像の 1 ピクセルあたり長さを求めた上、ひび割れの長さを算出した。入力画像は 300px × 300px のひび割れ画像を用いて Threshold 法による二値化を行う。二値化のひび割れが発生しているピクセルを検索し、ひび割れが発生している最初の座標と最終の座標を取得した後、座標に基づき赤色の直線を画像上に線を引く。赤色の直線を RGB の数値データを用いてピクセルを数え、長さを算出した。本研究で用いたひび割れの画像では、ひび割れの長さの計測は 45.0 mm、算出値は 43.8 mm で、97.3%の精度で合致していた(Fig.7(C))。ただし、曲がったひび割れを対象とした場合は入力画像の角度変更や画像分割など画像処理の手法を工夫する必要があった。

$$dots = \sqrt{(w^2 + l^2)} \quad (1)$$

$$dpi = dots \div inch \quad (2)$$

$$px = 25.4 \text{ mm} \div dpi \quad (3)$$

$$L_t = px_t \times px \times cv \quad (4)$$

ここで、 $dots$ は入力画像の対角線の画素数[dots]、 w は入力画像の横の画素数[dots]、 l は入力画像の縦の画素数[dots]、 dpi は入力画像の解像度[dots/inch]、 $inch$ は入力画像の対角線の長さ[inch]、 px は入力画像の 1 ピクセルあたりの長さ[mm/pixel] (1 inch=約 25.4 mm)、 L_t はステッカー間の全長さ[mm]、 px_t は色付きのピクセル数の合計[pixel]、 cv は撮影距離における補正係数[mm]である。

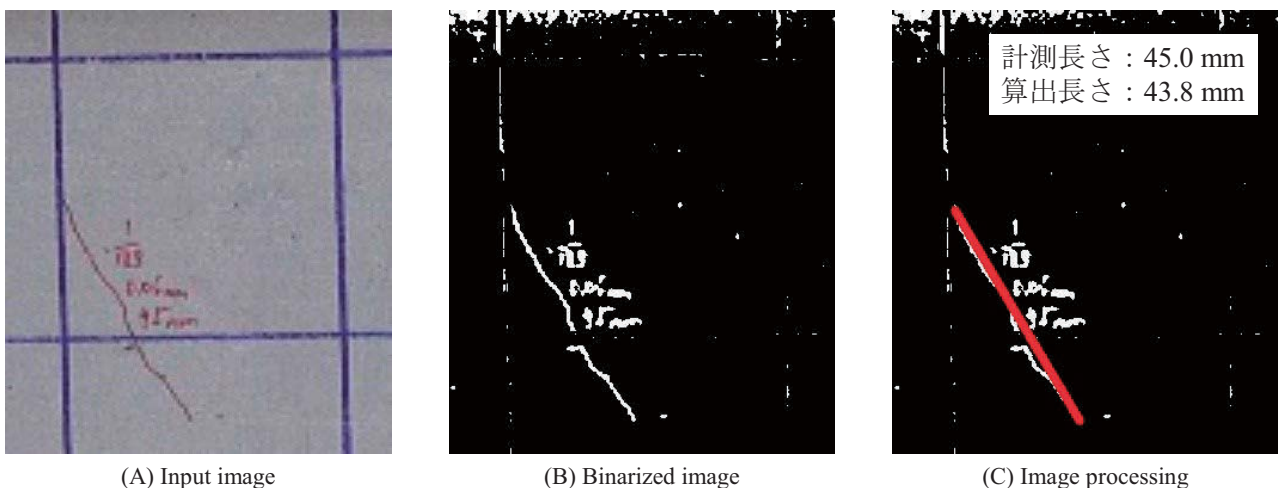


Fig.7 Results for length of cracks

5. 結 語

本研究では、片袖壁3体の静的加力実験時に4Kカメラから得られたRC柱画像を用いてひび割れの前処理方法としたエッジ検出、輪郭検出、色検出によるひび割れの抽出を試みた。また、画像処理を用いてひび割れの長さを算出した。得られた結果を以下に示す。

(1) エッジ検出によるひび割れの検出はパラメータの調整によって検出したひび割れの見やすさが異なることがわかった。OpenCVのTrack Barを用いることで簡単にパラメータの調整ができた。また、この方法ではひび割れに属しない画像も検出するため、ひび割れを中心に検出する場合は画像の分割・サイズ変更などの調整が必要となる。

(2) 輪郭検出は画像上の明るさによって得られる結果が大きく異なることがわかった。ひび割れの輪郭を検出した画像は二値化で出力するため、エッジ検出よりひび割れの有無が分かりやすかった。

(3) 色検出は入力画像をそのまま用いると検出精度が低下することがわかった。そのため、画像を分割してそれぞれの画像を用いて色検出を行った後、結合させる方法を考案した。

(4) ひび割れの画像から損傷度を算出する際には入力画像の1ピクセルあたりの長さを求めた上、直線距離の長さを算出する方法を考案した。この場合、直線状ひび割れには有効であるが、曲がったひび割れに対しては正確な評価を行うことが難しかった。

(5) 実際の地震被害現場でひび割れを検出においても、本研究で述べたエッジ検出・輪郭検出を利用することでひび割れの検出が可能である。また、入力画像サイズに応じたひび割れの長さの算出手法を用いることで、ひび割れ長さの予測ができると考えられる。

謝 辞

本研究は、せん断力実験の際、建築・設備工学科の松本豊教授の研究室に撮影の協力を頂きました。また、2022年度AI活用演習の選抜クラスに参加したコンクリート系の活動班の情報ネットワーク工学科の赤野伸悟氏、塚原将太郎氏、建築・設備工学科の松岡正吾氏、機械システム工学科の田島駿也氏の協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

注 釈

(1) 本研究では、せん断力実験体3本の実験時に撮影した動画を用いてそれぞれの動画を編集し、ひび割れの有無の静止面に切り出した画像データを蓄積した。実験体1本あたりひび割れの有無画像800枚程度を300px×300pxのサイズとしてまとめた。

(2) 平滑化は、連続的なデータに大きく乖離しているデータなどを微細な変動や不連続性を弱くし、除去して滑らかにする操作によって行った。これは、画像の視認性を向上させるための処理である。

(3) エッジ検出は以下の手順で行った。

① ノイズ削減

画像中のノイズに対して画像を平滑化し、ノイズを削減する。

② 画像の輝度勾配を見つける

①で平滑化された画像を用いて一次微分に基づく垂直エッジ検出、水平エッジ検出するSobelフィルタによる縦方向と横方向の1次微分を取得し、2つの微分画像からエッジの勾配と方向を求める(注(1)～注(2))。

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

垂直エッジ検出 水平エッジ検出

$$Edge_{Gradient}(G) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad \text{注(1)}$$

$$Angle(\theta) = \tan^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad \text{注(2)}$$

ここで、 G_y : 縦方向、 G_x : 横方向

③ 非極大値の抑制

勾配の方向と強度を計算した後エッジと関係ない画素を取り除く。

④ ヒステリシスを使ったしきい値処理

③で検出されたエッジの内、正しいエッジとそうでないものを区別する。区別するためには Min と Max のしきい値を用いる。画素値の微分値が Max 以上であれば正しいエッジとみなし、Min 以下の値であればエッジではないとみなして除外する。

- (4) Track Bar の位置によって指定した色を表示する簡単なプログラムである。ウィンドウには 3 個の Track Bar が表示され、これを動かすことにより表示される色が変わる。Track Bar は青、緑、赤色の数値の指定ができる。以下の引数によって簡単に色の変更ができる。

第 1 引数は、Track Bar の名前

第 2 引数は、第 1 引数で指定した Track Bar が表示されているウィンドウの名前

第 3 引数は、Track Bar のデフォルト値

第 4 引数は、Track Bar の取りうる最大値

第 5 引数は、Track Bar の位置が変わる度に呼び出されるコールバック関数

- (5) Threshold 法は、下記の第 1 引数～第 4 引数を用いて入力画像の輪郭を検出し、二値化処理を行った。

第 1 引数は、グレースケール画像を入力画像とする。

第 2 引数は、しきい値で、画素値を識別するために使われる。

第 3 引数は、最大値で、しきい値以上の値を持つ画素に対して割り当てられる値である。

第 4 引数は、Threshold type を設定するものである。

以下に Threshold type を示す。

- ・ THRESH_BINARY : ピクセル値が threshold より大きければ maxval(255 白色), あるいは 0(黒)
- ・ THRESH_BINARY_INV : ピクセル値が threshold より大きい場合は 0, もしくは maxval
- ・ THRESH_TRUNC : ピクセル値が threshold より大きい場合はしきい値, あるいはピクセル値のまま割り当て
- ・ THRESH_TOZERO : ピクセル値が threshold より大きければピクセル値そのまま, 小さければ 0 割り当て
- ・ THRESH_TOZERO_INV : ピクセル値が threshold より大きければ 0, 小さければピクセル値そのまま

- (6) HSV 色空間モデルは、色相(Hue)、彩度(Saturation Chroma)、明度(Value Brightness)の三つの成分からなる色空間を検出するモデルである。色相は色の種類である赤、青、黄色の 0~360 の範囲、彩度は色の鮮やかさの 0~100% の範囲、明度は色の明るさを 0~100% の範囲のパラメータ調整で色を検出する。

文 献

- (1) 国土交通省, 防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン検討委員会, https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_tk_000088.html (参照 : 2022.9)
- (2) 国土交通省, 点検支援技術性能カタログ, <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/> (参照 : 2022.9)
- (3) 國友 弘隆, 吉岡 智和, RC 方立壁を対象とした学習済み損傷度識別器のせん断破壊型 RC 柱への応用, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 61 号, pp.377-980, 2022. 3
- (4) 堀口 賢一, 本澤 昌美, 野村 侖生, 北原 剛, AI を用いたコンクリートのひび割れ自動検出技術の実用化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.1277-1282, 2021
- (5) 横山 広, 龍田 斉, 野村 貴律, 安東 祐樹, 長井 宏平, AI 画像分析を活用した RC 床版疲労遷移点の検知に関する研究, 土木学会, 構造工学論文集 Vol.66A, pp.783-790, 2020. 3
- (6) 横山 広, 龍田 斉, 野村 貴律, 中村 拓郎, 榎谷 浩, 長井 宏平, AI 画像分析による反応性骨材使用 RC 床版の疲労劣化検知に関する研究, 土木学会, 構造工学論文集 Vol.67A, pp.628-635, 2021. 3
- (7) 松本 豊, 上原 修一, 野口 聡仁, 吳 濟元, 栗原 和夫, 小田 まり子, 片袖壁付き RC 柱のせん断耐力に関する実験的研究 その 1 実験概要と結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.285-286, 2022. 9
- (8) 全 邦釘, 井後 敦史, Random Forest によるコンクリート表面ひび割れ検出, 土木学会論文集 F3(土木情報学), VOL.71, No.2, pp.1-8, 2015
- (9) 全 邦釘, 嶋本 ゆり, 大窪 和明, 三輪 知寛, 大賀 水田生, ディープラーニングおよび Random Forest によるコンクリートのひび割れ自動検出手法, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.73, No.2, 297-307, 2017.

- (10) 藤田 悠介, 小林 圭太, 浜本 義彦, 深層学習を用いたひび割れ抽出の効率化および高精度化, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.77, No.1, pp.14-21, 2021.
- (11) 野村 泰稔, 村尾 彩希, 阪口 幸広, 古田 均, 深層畳み込みニューラルネットワークに基づくコンクリート表面のひび割れ検出システム, 土木学会論文集 F6(安全問題), Vol.73, No.2, pp.189-198, 2017.
- (12) 山根 達郎, 全 邦釘, Deep learning による Semantic Segmentation を用いたコンクリート表面ひび割れの検出, 構造工学論文集 Vol.65A, pp. 130-138, 2019. 3
- (13) 高橋 賢作, 高橋 典之, 損傷発生時期を考慮した RC 部材の地震ひび割れ画像診断, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.2, pp.853-858, 2021.
- (14) 森田 高市, 坂下 雅信, ディープラーニングによる RC 柱の損傷度判定に関する検討, 日本建築学会技術報告集, 第 27 巻 第 66 号, pp.756-760, 2021. 6
- (15) 肥田 剛典, 八百 山太郎, 高田 毅士, ディープラーニングによる地震時建物被害判定と被害の地理的分布推定手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.417-418, 2022. 8
- (16) Youcun Lu, Lin Duanmu, Zhiqiang (John) Zhai, Zongshan Wang, Application and improvement of Canny edge-detection algorithm for exterior wall hollowing detection using infrared thermal images, Energy and Buildings, 274 (2022) 112421
- (17) Canny 法, http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_imgproc/py_canny/py_canny.html?highlight=canny (参照 : 2022.9)
- (18) Threshold 法, http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_imgproc/py_thresholding/py_thresholding.html (参照 : 2022.9)
- (19) HSV(色空間の変換)モデル, http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_imgproc/py_colorspaces/py_colorspaces.html?highlight=HSV (参照 : 2022.9)
- (20) OpenCV, <https://opencv.org/> (参照 : 2022.9)