

(40) 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

全 邦釘¹・片岡 望²・三輪 知寛²・橋本 和明³・大賀 水田生⁴

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@ehime-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)

³正会員 西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社 (〒760-0072 香川県高松市花園町3-1-1)

⁴正会員 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

近年コンクリート構造物の損傷状態を定量的かつ簡便に評価することを目的として、コンクリート表面を撮影し、画像解析によりひび割れを自動検出するという手法が多く研究されている。それぞれ特長を持つ優秀な手法であるが、その一方でそれらが一般化しているとはいいがたく、いまだスケッチなどに頼られていることが多いのが現状である。筆者らはこの問題の解決には、解析手法を更に蓄積し、知見を深めていくことが重要であると考え、本論文ではその一環として、統計的特徴および幾何学的特徴に着目したひび割れ検出手法を提案する。そして本手法を様々なコンクリート構造物から撮影された画像に適用したところ、状況の変化に対して頑健であり、精度が高いことが確かめられた。

Key Words : crack detection, image analysis, concrete, binarization

1. はじめに

高度経済成長期のわずかな間に橋梁やトンネルなどのコンクリート構造物は数多く建設されたが、それらは近年中に、あるいは現在既に補修が必要となっている。限られた予算を有効活用し、コスト面・安全面から最適な維持管理計画を作成するためにはこれら構造物の劣化を精度良く評価することが必要である。そこで我が国では、これらコンクリート構造物の損傷状態を把握することを目的として点検が行われはじめており、ひび割れはその中でも非常に重要な指標である。例えば国土交通省による橋梁定期点検要領(案)¹⁾では、ひび割れ幅および間隔に着目して5段階評価を行い、また必要に応じてひび割れの発生位置やその範囲・状況をスケッチするというものになっている。あるいは簡易点検として、遠望目視により作業員が5段階評価などで判定するのみといったものも実際は多い。しかし、これらの点検は主観的・非定量的なものに非常になりやすく、また高所や狭隘部などの近接が難しい箇所では、そもそも目視点検が難しいという問題もある。

そこでコンクリート表面を撮影し、画像解析によりひび割れを自動検出するという手法が国内外において近年多く研究されている。この手法は定量的なものとなることが期待され、また人間が近づけない箇所についても評

価が可能な場合があり、さらに現場では写真を撮影するだけでいいので点検時間を大幅に削減できると考えられ、メリットが大きい。

しかし研究が進んでいる一方で、現状ではこのような手法が一般化しているとはいえず、一部の企業で限定的な使用がなされているのみという状態にある。これは、コンクリートのひび割れの存在する状況や環境が非常に多様であり、その多様性に比して画像解析によるひび割れ検出手法が、数多く研究されているにもかかわらず未だ十分に揃っていないことが原因であると考え、すなわち、現段階では手法の蓄積が必要な状況にある。また、ある画像群のひび割れ検出のために最適化された手法が必ずしも他の状況で最適でないということも多い。

そこで本研究では状況の変化に頑健な手法の構築を目指し、統計的特徴および幾何学的特徴に着目したひび割れ検出手法を提案する。そして本手法の有効性を確かめるために、様々な構造物から撮影されたコンクリート構造物のひび割れ画像の解析を行い、良好な結果を得た。

2. ひび割れ検出手法

本研究で提案するひび割れ検出手法のフローチャートを図-1に示し、また以下に簡単に説明を行う。

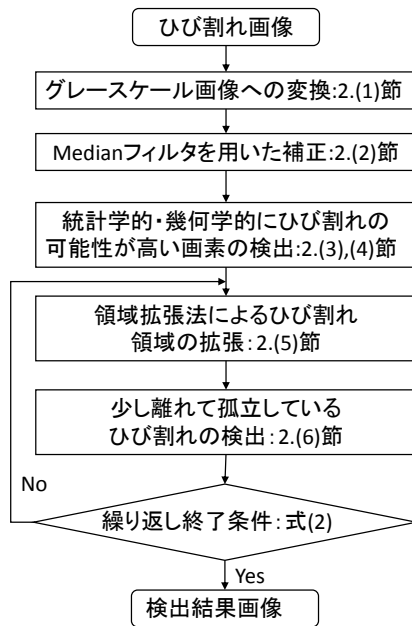


図-1 本研究で提案する手法のフローチャート

(1) グレースケール画像への変換

まず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。ここではRGB成分の最大値をグレースケール画像の輝度値とした。これは、一般的なひび割れ部やコンクリート表面部はRGB成分がほぼ等しい一方で、落書きなどはRGB成分に差があるため、最大値を取ればこれら落書き部が相対的に明るくなり、ひび割れと誤認識することが防げるということを意図している。

(2) medianフィルタを用いた補正処理

光や影、汚れなどによる濃淡差を補正するための前処理としてmedianフィルタを画像に適用するというのはよく行われており²³⁾など、本研究でもこれを用いる。

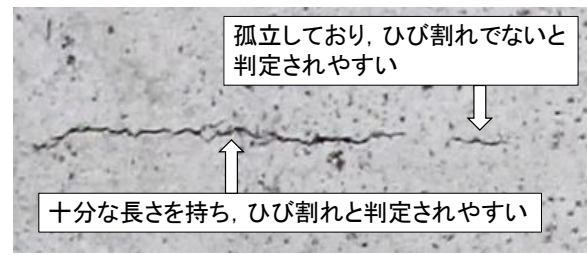
(3) ひび割れの可能性が非常に高い画素の検出

(2)で補正を行った画像から、ひび割れである可能性が非常に高い画素を検出する。本研究ではそのための閾値を、状況や環境の変化に対応できるようにKitlerの方法⁴⁾と呼ばれる手法で統計的に導出する。

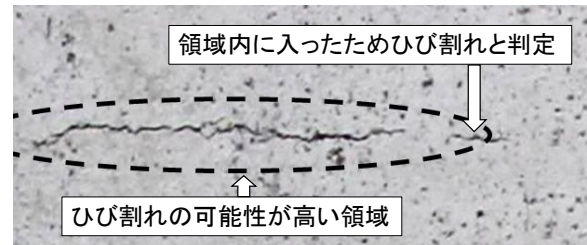
このようにして解析対象画像の画素値分布を2クラスに分けた後に、ひび割れ部と背景部の平均値と標準偏差をそれぞれ求める。以下、ひび割れ部の平均値と標準偏差を μ_c, σ_c 、背景部の平均値と標準偏差を μ_b, σ_b とする。これらの値を用いて、ひび割れの可能性が非常に高い画素を検出するための閾値 t_1 を以下の式(3)のように求める。

$$t_1 = \min(\mu_c, \mu_b - 4\sigma_b) \quad (1)$$

背景部の 4σ である画素は背景である確率が相当低いと考えられ、その値とひび割れ部の平均値の小さい方を、ひび割れの可能性が高い画素を検出するための閾値とする。



(a)



(b)

図-2 孤立ひび割れを検出するための楕円領域の例

(4) 幾何学的基準による判定

(3)で検出された画素群について連結要素を特定し、それぞれの連結要素について幾何学的特徴より更にひび割れ候補を絞る。ここでは特にひび割れの特徴である長細さの指標として周辺長²⁾/面積に着目し、これが閾値以下であれば(3)の検出結果から省いた。

(5) 領域拡張法によるひび割れ領域の検出

ここでは領域拡張法⁹⁾により、(4)で検出しきれなかったひび割れの検出を行う。本研究では、以下のような流れで領域拡張の処理を行った。

- 1) (4)で検出した画素に隣接する画素で、輝度値が t_1 より小さいものを検出する。 t_1 は、 t_1 より少し明るめの輝度値として $t_1 = t_1 + \alpha\sigma_c$ とする。
- 2) 1)で検出された画素を(4)で検出した連結要素に統合し、またその画素に隣接する画素で輝度値が t_1 より小さいものを検出する。
- 3) 検出できる画素がなくなるまで2)を繰り返す。

(6) 孤立したひび割れの検出

領域拡張法によれば、やや輝度値が高くなっても繋がっているひび割れは検出することができるが、図-2(a)に示すように人間の目では同じひび割れだと認識するものの見かけ上は孤立しているひび割れも存在し、これらは領域拡張法では検出できない。これらを検出するために、図-2(b)の模式図に示すようにひび割れが存在する可能性の高い領域を楕円として求め、その領域内で一定の条件を満たせばひび割れとして検出することとする。この楕円のパラメータはひび割れ部の幾何学的パラメータにより決定される。

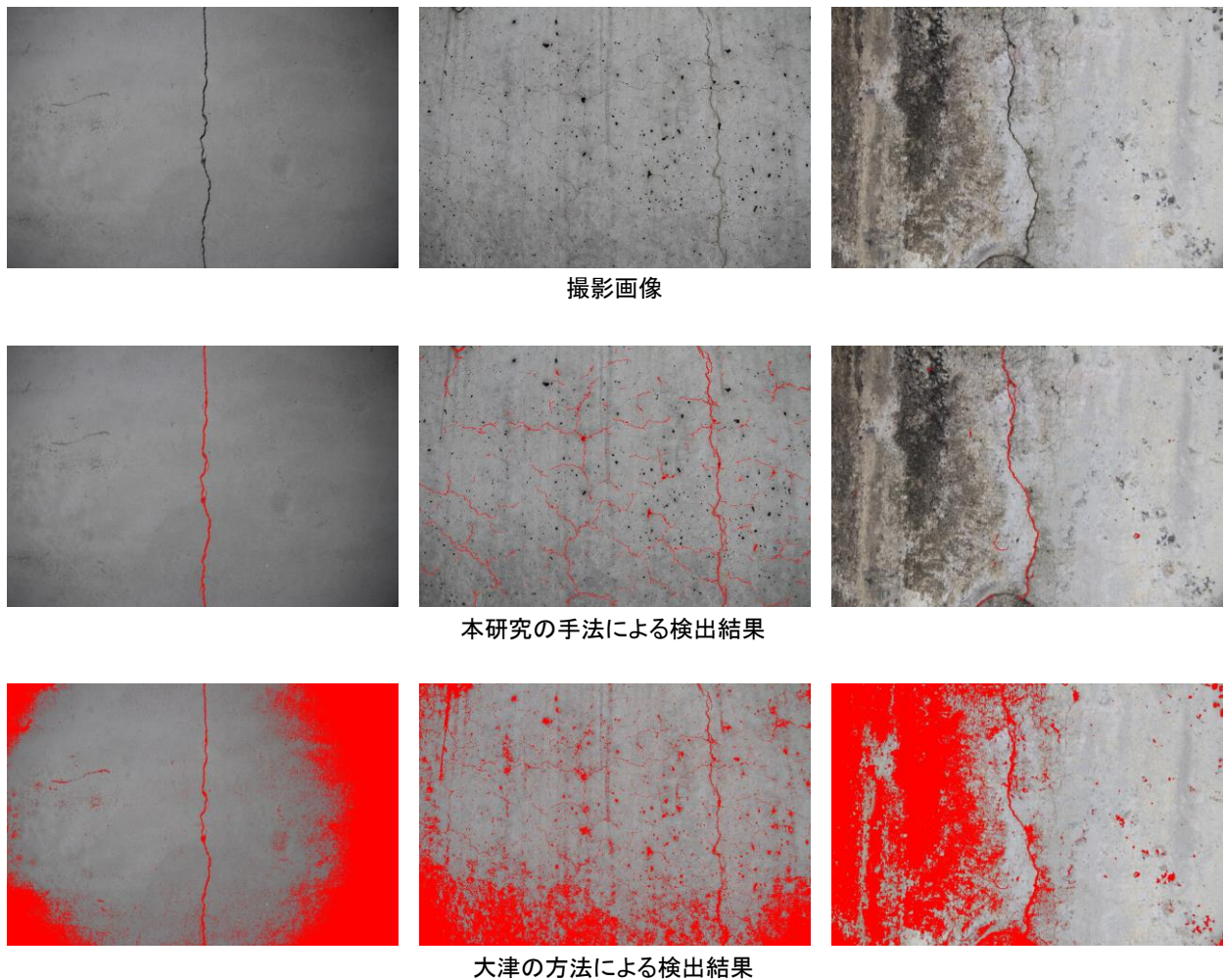


図-3 撮影画像3枚を例にした本研究の手法による検出結果と大津の方法による結果の比較

(7) 繰り返し処理

ここまで行った検出処理の(5), (6)を繰り返すことでさらに検出精度を向上させる。まず繰り返し回数が p 回目の時、(5)の a を $0.1p$ とし領域拡張を行う。そして、(6)と同様に楕円の式を用いて孤立したひび割れの検出を行う。繰り返し回数を増やすことで検出されるひび割れ領域は増えるわけであるが、繰り返しの過程で急激に突然増えた場合、閾値 t が背景画素の多くをひび割れと判定してしまうほど大きくなってしまっていると考えられる。そこでこれらを考慮し、以下のように繰り返しの終了条件を設定した。

$$\begin{cases} t_r < \mu_c + 2\sigma_c & \text{or} \\ n_p > n_{p-1} + 3(n_{p-1} - n_{p-2}) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 n_p は繰り返し回数 p 回目の時にひび割れと判定した画素数である。 p 回目の繰り返しでこの終了条件の式(2)を満たした場合、 $p-1$ 回目の結果を最終結果とする。

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 ）を対象として、上述の手法によりひび割れの検出を行った。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た。図-3に撮影画像のうち代表的な3枚、そして本論文で提案した手法による結果を示す。また、既往の研究はソースコード等が公開されていないためそれらと比較することが大変難しいが、文献(2)など様々な研究では大津の方法（判別分析法）⁹⁾による結果と比較されており、本研究でも比較対象として図-3に示している。

図-3の左側の撮影画像は影を多く含む画像である。本研究の手法では影は主に(2)のメディアンフィルタで除去することができるため非常に良好な結果が得られている一方、大津の方法では単純に画素値で判別するために精度が悪くなっている。図-3の中間にある撮影画像は、

表-1 提案手法および大津の方法の定量的な比較

	本研究の提案手法	大津の方法
感度	0.8410	0.9560
適合率	0.4965	0.0120
F値	0.5801	0.0234
特異度	0.9958	0.6229

細かいひびを多く含む画像である。これらの細かいひび割れの幅は1~3ピクセル程度であるが、そのような細かいひび割れについてもよく検出できている。大津の方法では左側の撮影画像と同様に影の部分も多くひび割れと誤検出してしまっていることに加え、画像真中あたりに見られる少し薄い水汚れの線などをひび割れとして誤検出してしまっている。本研究の手法でこの水汚れの線を誤検出しないのは2.(4)や2.(6)節で考慮している幾何学的特徴量を用いた判定基準によるものであり、その有効性がわかる。図-3の右側にある撮影画像は、汚れを多く含むものである。この汚れについても左側の撮影画像で用いたメディアンフィルタによる補正、および中間の撮影画像で用いた幾何学的特徴により適切に除去でき、それにより本研究の手法は大津の方法と比較して非常に精度よくひび割れを検出できている。

そして、手作業によりひび割れを検出した結果を正解画像として、文献(2)に倣い適合率・感度・特異度の3指標によって本手法の検出結果、および比較対象として大津の方法による二値化結果を評価した(表-1)。ここで感度は正解画像におけるひび割れ画素の中でどの程度解析結果においてもひび割れとして検出されたかという割合、特異度は正解画像においてひび割れではない画素(以下、背景画素)の中でどの程度解析結果においても背景画素として検出されたかという割合、適合率は解析結果でひび割れ画素として検出された中でどの程度正解画像においてもひび割れ画素であったかという割合として定義される。また、それに加えて、感度と適合率の両方を同時に評価するためにF値⁷⁾についても求めた。

大まかに見ると本研究の手法の指標が良好であるが、感度で比較すると大津の方法のほうが高い。これは、大津の方法による二値化では曖昧なものは全てひび割れと判定しているためであり、そのために逆に適合率・特異度は大幅に低くなっている。特に適合率に着目すると、大津の方法により検出された結果のわずか1.2%のみが人間が指定したひび割れということの意味しており、まともな検出ができていないことがわかる。感度、適合率を同時に評価する指標であるF値を見ても、本研究で提案する手法は感度では大津の方法にやや劣っているが適合率で非常に優るため大きな差がついている。このように定量的な検討においても本研究で提案する手法は精度よくひび割れを検出できていることが明らかとなった。

4 まとめ

本研究では、幾何学および統計的パラメータに着目した画像解析によるコンクリート表面のひび割れ検出手法を提案し、そしてその精度について確かめた。特に、ひび割れ部と背景部の輝度値を統計的に扱って閾値を定めていく部分(2.(3), 2.(5))や、幾何学的パラメータを用いて実質は繋がっているはずであるが画像上では孤立しているひび割れを検出していく部分(2.(6))は新規性があり、また効果的であった。この手法により一般的に非常に解析が難しい、影や汚れを多く含むようなひび割れ画像からもひび割れを良好に検出できるようになった。

今後の課題を以下に述べる。図-3、表-1に示すように非常に検出結果は良好ではあるが、未だに検出しきれていない部分も存在する。この検出は非常に難しいが、手法を今後更に蓄積していくことで解決することができると考えている。

また、現状では、2.(2)のmedianフィルタのフィルタサイズや、式(1)の α の前の係数である4など、少ないながらもやや人為的に値が決定されている部分が存在する。解析結果はこれらの数字に敏感ではなく、大きく結果は変わらないが、これらの値について機械学習を活用することで最適値を求めることが可能であると考えており、現在研究を行っている。

謝辞：本研究の一部は、JST 育成研究「コンクリート構造物のひび割れ自動検出技術の開発と、FPGA による高速化」により行われました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：橋梁定期点検要領(案),国土交通省国道・防災課, 2004.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Kittler, J. and Illingworth, J.: Minimum error thresholding, *Pattern recognition*, Vol.19, No.1, pp.41-47, 1986.
- 5) Adams, R. and Bischof, L.: Seeded Region Growing, *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE Transactions on, Vol.16, No.6, pp.641-647, 1994.
- 6) 大津展之：判別および最小 2 乗基準に基づく自動しきい値選定法, 電子通信学会論文誌 D, pp.349-356, 1980.
- 7) 金森敬文, 竹之内高志, 村田昇：パターン認識 (R で学ぶデータサイエンス 5), 共立出版, 2009.