

論文 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

全 邦釘*1・井後 敦史*2・橋本 和明*3

要旨: コンクリート表面の撮影画像の解析によりひび割れを自動的に検出する手法は種々研究されているが、特定の撮影環境に依存した手法も多い。著者らはそういった問題の解決を試み、環境変化に対して頑健性の高い手法を開発したが、型枠跡をひび割れと誤検出してしまうという問題も抱えていた。これは輝度値の明暗に基づいてひび割れの判定を行っている既往のほとんどの手法に共通する問題でもある。そこで本研究ではハフ変換に基づき型枠跡や P コン跡を検出する手法を提案する。

キーワード: 画像解析, ひび割れ, 自動検出, ハフ変換

1. はじめに

橋梁やトンネル等のコンクリート構造物について、適切な維持管理戦略の策定等を目的として点検が行われている。ひび割れはその中でも重要な指標であり、例えば国土交通省による橋梁定期点検要領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⁾などでも近接目視や、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環境依存性が低く頑健な自動検出手法の開発を行っている。しかし、著者らの開発した手法も含めて、画像解析による自動検出手法では一般的にひび割れの判定を輝度値の明暗に基づいて行っているため、ひび割れと同様にやや暗い部分である型枠跡や P コン跡をひび割れと誤認識してしまうという問題がある。これら型枠跡などの画像内の面積はひび割れと比較すると大きいことが多いため、これらが存在するとひび割れの自動判定精度が大きく減少してしまう。そこで本論文では、画像から直線や円を検出する画像解析手法であるハフ変換を利用して型枠跡や P コン跡などを自動的に検出、同定する手法を提案する。

2. ひび割れ検出手法

本章では、文献(7), (8)において著者らが提案したひび割れ検出手法について簡単にまとめる。その処理フローを図-1に示す。なお、全ての処理は自動で行われる。

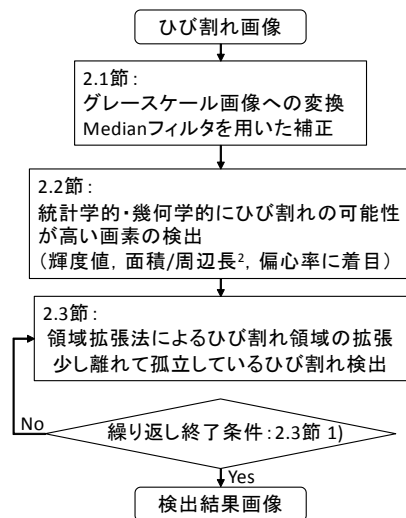


図-1 文献(7), (8)での処理フロー

2.1 前処理による影や汚れの軽減

コンクリートやひび割れは基本的に RGB 成分がほぼ同じであり、フルカラー画像からグレースケール画像に変化させてもほとんど変わらない。そこで撮影画像をグレースケール画像に変換し、計算時間を短縮させる。一般的なグレースケール画像は RGB 成分の平均値、あるいは NTSC 係数による加重平均を輝度値として採用するが、ここでは RGB 成分の最大値を採用した。これは、落書きなどは RGB 成分が異なることが多く、最大値を取れば相対的に落書き部が明るくなり、ひび割れと誤認識してしまう可能性を減らすことを意図している。

そしてグレースケール画像に変換した後、median フィルタを用いて影や汚れの補正処理を行う。例えば、図-2(a)のような影が存在するグレースケール画像に median フィルタ (フィルタサイズ 41×41) を適用すると、図-2(b)のように大局的な色の変化のみを持つ画像を得るこ

*1 愛媛大学 工学部環境建設工学科助教 Ph.D. (正会員)

*2 愛媛大学 工学部環境建設工学科

*3 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 技術部副部長 (正会員)

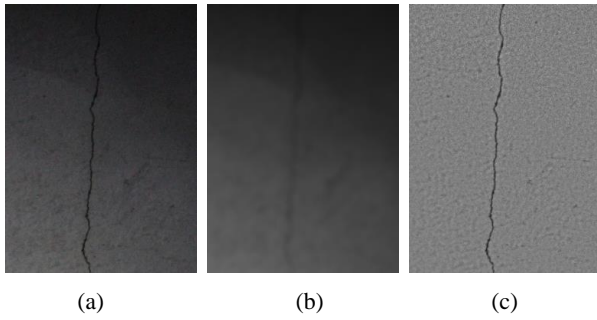


図-2 median フィルタによる影の補正例

とができる。この図-2(a)を図-2(b)で式(1)のように正規化することで、図-2(c)のように影や汚れの影響を軽減した画像が得られる。

$$I_c(x, y) = 128I_a(x, y) / I_b(x, y) \quad (1)$$

上式で x, y は着目する画素の画像内座標、 I_a は図-2(a)に示す元画像、 I_b は図-2(b)に示す median フィルタ適用後画像、 I_c は図-2(c)に示す結果画像である。

なお、本研究では 5184×3456 pixel (1pixel あたりの寸法は約 0.15mm) という非常に大きな撮影画像の解析を行っているが、これをそのまま掲載すると不鮮明になるため、適宜トリミングしたものを示すこととする。

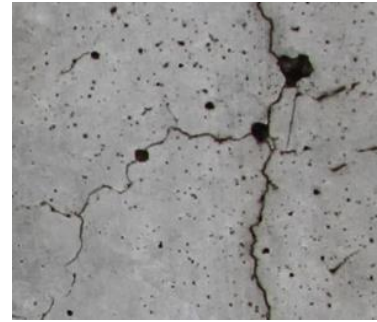
2.2 ひび割れの可能性が高い領域の抽出

前処理を行った画像を二値化処理することで、ひび割れの可能性が非常に高い領域を抽出する。二値化の際の最適なしきい値は撮影環境等により変化するため、常に同じ値をしきい値として用いて画像解析を行うことは不適當である。そこで本手法では二値化処理でのしきい値を、統計的な手法により自動的に決定する。

まず、ひび割れ画素の集合とそうでない画素の集合がそれぞれ輝度値を確率変数とする正規分布に従うと仮定し、Kittler の方法⁹⁾によりそれらを分離する。そして、ひび割れ画素の集合の輝度値の平均値および標準偏差 μ_c, σ_c 、ひび割れではない画素の集合の輝度値の平均値および標準偏差 μ_b, σ_b を求めた後、ひび割れの可能性が非常に高い画素を抽出するためのしきい値 t_1 を以下の式に従い決定する。

$$t_1 = \min(\mu_c, \mu_b - 4\sigma_b) \quad (2)$$

このように輝度値のみに着目してまずひび割れの可能性の高い領域を検出した後に、それぞれの領域の幾何学的特徴に着目する。まず、一定以下の面積の領域についてはノイズであることが多く、そのような領域をひび割れ候補から除外する。また、ひび割れは線状であるということに着目し、面積/周辺長²および偏心率についても、以下の式(3)のように対ひび割れか判定する基準とした。



(a)



(b)

図-2 ひび割れの可能性が高い領域の検出

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{面積} \geq 100\text{pixel} \quad \text{and} \\ \text{面積} / \text{周辺長}^2 \leq 1 \quad \text{and} \\ \text{偏心率} \geq 0.97 \end{array} \right. \quad (3)$$

上の条件で面積・周辺長は画像内の領域および周辺長の pixel 数、偏心率は、連結要素の領域と同じ 2 次モーメントを持つ楕円の偏心率とする。図-2 に検出例を示す。図-2(a)は元画像、図-2(b)は検出結果であり、白色部がひび割れの可能性が高い領域として検出されていることを意味している。図(a)と(b)を比較すればわかるように、特に細かいひび割れはこの段階では検出されておらず、次節の手法でこれらの検出を行う。

2.3 細かいひび割れや孤立したひび割れの検出

図-2(b)まででひび割れの可能性の高い領域を自動的に検出できたが、細かいひび割れは検出できていない。そこで医用画像処理の分野でよく用いられる手法である領域拡張法¹⁰⁾により、ひび割れとして検出された画素に隣接している画素のうち、2.2 節の条件は満たさないもののやや輝度値が低く暗い画素についてはひび割れとして新たに検出する。これを新たに検出される画素がなくなるまで繰り返し、細かいひび割れを検出する。以下に具体的なアルゴリズムを示す。

- 1) 式(3)で検出した画素に隣接する画素で、輝度値が t_r より小さいものを検出する。 t_r は、 t_1 より少し明るめの輝度値として $t_r = t_1 + 0.1\sigma_c$ とする。
- 2) 1)で検出された画素を式(3)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_r より小さいものを検出する。

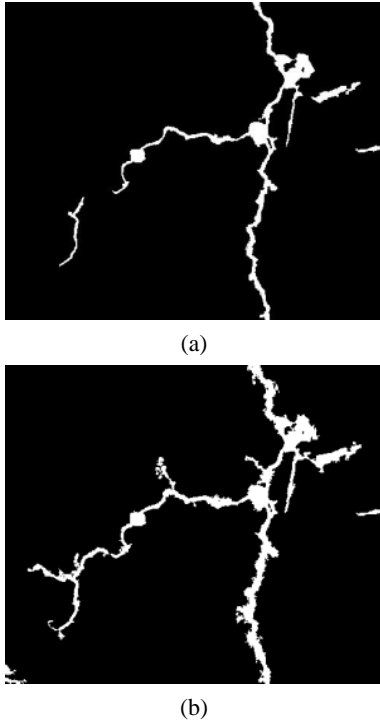


図-3 領域拡張法による細かいひび割れ検出

3) 検出できる画素がなくなるまで2)を繰り返す。

また、人間の目で見ると繋がっているひび割れでも画像上は孤立しているひび割れというも存在する。そこで、隣接している画素だけではなく、ひび割れから少し離れた画素のうちやや暗い画素についても同様にひび割れとして検出するようにする。

図-2の画像にこの処理を行った結果を図-3に示す。図-3(a)は領域拡張法での繰返しの途中段階、図-3(b)は最終的な結果である。徐々にひび割れ領域が拡張していき、最終的に良好に検出できている様子がわかる。

2.4 実画像による実験結果

2.1節から2.3節までの手法により、橋梁の床版や建物の内壁など様々な状況下で撮影した画像からひび割れの検出を行った。その結果の例を次ページの図-4に示す。また既往の研究と比較することが可能であれば示したいところであるが、それらの研究ではソースコードが公開されていないため実際には比較が困難である。そこで同様な目的の研究でよく比較対象とされている大津の方法¹¹⁾による判別結果について示す。なお大津の方法は既に確立された方法であり、アルゴリズムやソースコードについても各所で公開されている。それぞれ、上図が原画像、中図が本手法による検出結果、下図が大津の方法による結果である。ただし、前述のように原画像が非常に大きいため、トリミングして一部を拡大している。

本手法では影や汚れがあっても非常に精度よくひび割れが検出できているが、大津の方法では影などが存在すると急に精度が悪くなっている。その一方で画像Dか

らFのように型枠跡やPコン跡がある場合にそれらをひび割れと誤認識している様子も見られる。次節以降で、ハフ変換に基づきこれらを除く手法を提案する。

3. ハフ変換による精度の向上

図-4の結果に示すように、型枠跡などがある場合にはこれらをひび割れと評価してしまうことがあるため、自動検出の精度が悪くなる。そこで、型枠跡については直線であること、Pコン跡については円形であることを利用して、ハフ変換によりこれらを同定し、ひび割れとしての検出結果から省くことで自動検出の精度を向上させる手法を提案する。ハフ変換は直線や円、放物線などのパラメータで表現できる図形を画像中から検出するための手法である¹²⁾。

例えば直線検出の場合だと文献(13)の方法が一般的である。画像内の任意の直交座標 (x, y) を通る直線について、原点から直線に下ろした垂線の長さ ρ と、垂線と x 軸のなす角 θ で以下の式(4)のように表現する。

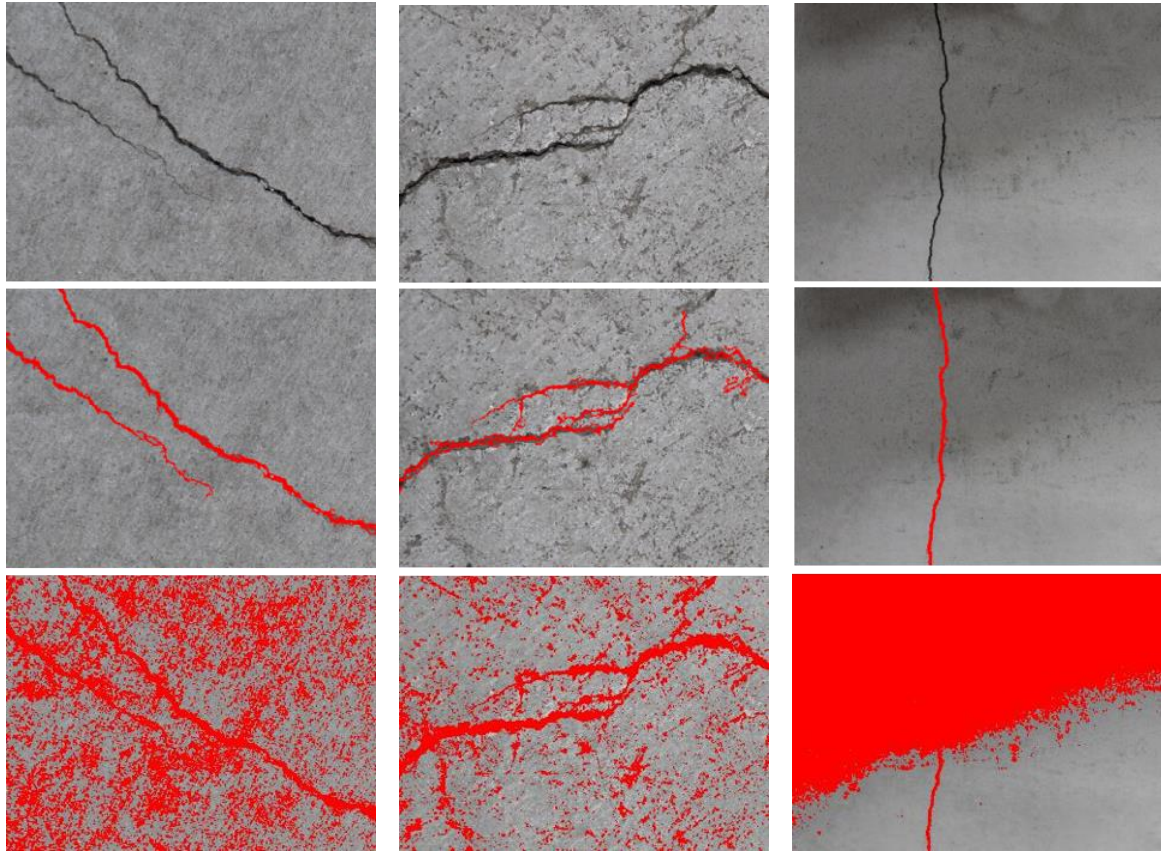
$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4)$$

(ρ, θ) は直線を表現するパラメータなので、同一直線上にある任意の点からは同様の ρ, θ が得られることとなる。すなわち、2章の手法で得られる検出結果の座標を $\rho-\theta$ 空間に射影すると、直線性が強い型枠跡については、ある特定の (ρ, θ) の組み合わせが多数となるため、その数があるしきい値を超えた場合に直線性が非常に強いとみなし、型枠跡であると判定することとする。本研究では ρ, θ の値を四捨五入して (ρ, θ) の数をカウントし、しきい値1500を超えた組み合わせがある場合、それを直線検出結果とした。また、更に精度を向上させるため、一般的に型枠跡は水平方向か鉛直方向であることを考慮し、 $-10^\circ < \theta < 10^\circ$ か $80^\circ < \theta < 100^\circ$ の範囲の場合のみを型枠跡候補として評価することとした。

前章で示した、型枠跡がある画像D,Eから検出した結果を図-5(a), (b)上図に示す。赤色部分がひび割れ部、緑色部分がハフ変換による結果である。非常に適切に型枠跡を検出出来ている様子が見てとれる。

さらに、文献(14)で円形状のハフ変換による抽出について詳しく議論されており、その手法を用いて画像Fに見られる円形のPコン跡についても検出を試みた。結果を図-5(c)上図に示すが、適切に検出できている様子が見てとれる。

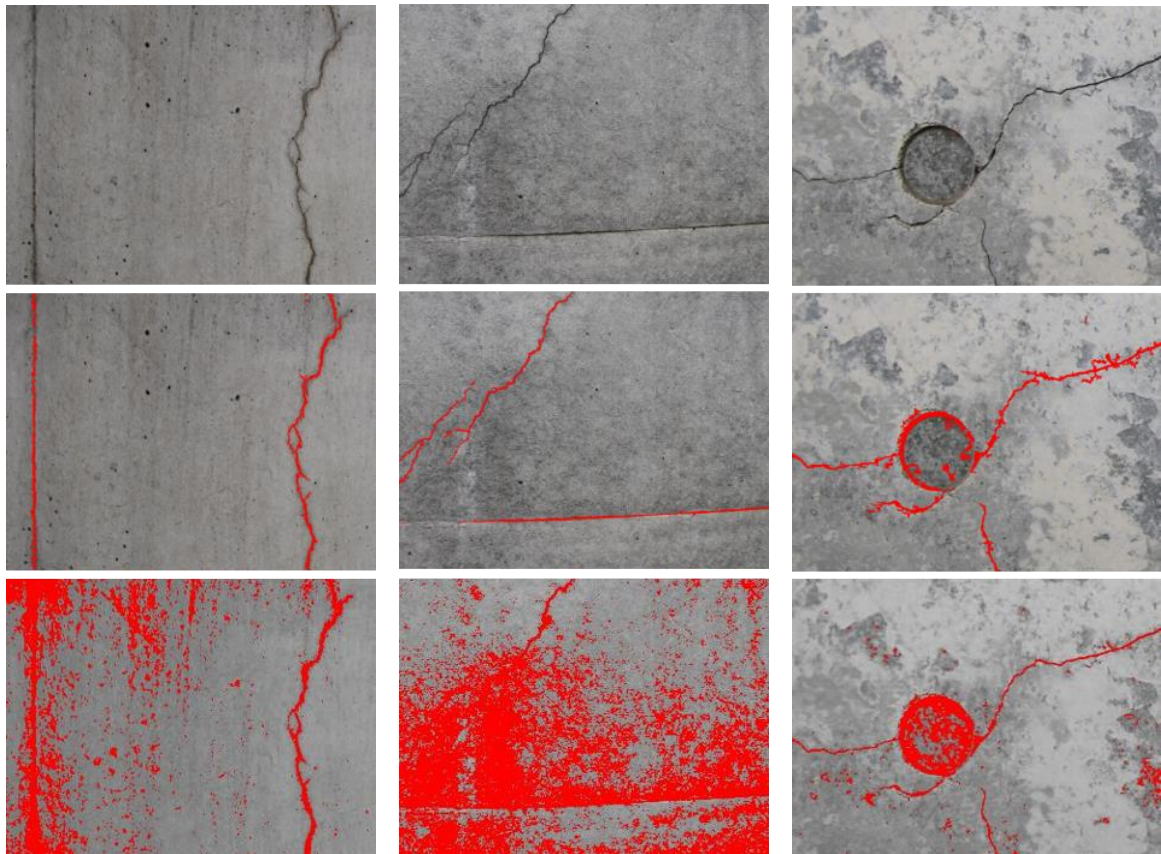
このようにハフ変換を用いると型枠跡部およびPコン跡部を良好に判定できるため、このハフ変換による結果線とその周辺画素をひび割れ検出結果から除外することで図-5(a)~(c)下図に示すように精度が向上する。



(a)画像 A

(b)画像 B

(c)画像 C

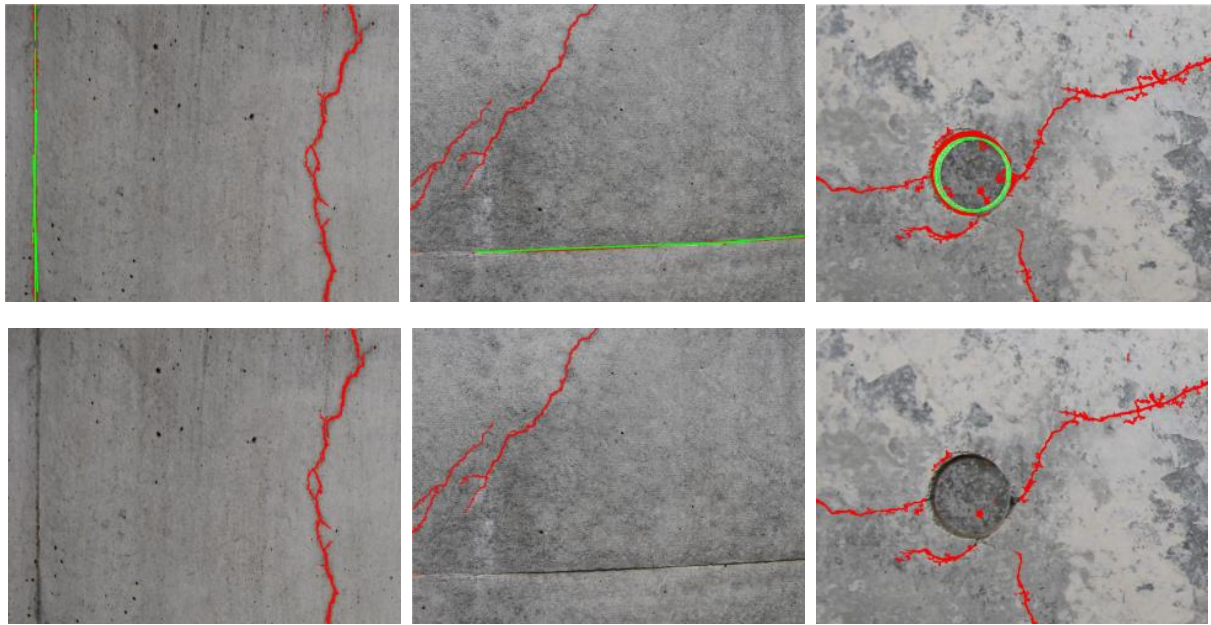


(d)画像 D

(e)画像 E

(f)画像 F

図-4 ひび割れ検出結果例（上図：原画像，中図：本手法による検出結果，下図：大津の方法による検出結果）



(a) 図-4(d)の型枠跡検出結果 (b) 図-4(e)の型枠跡検出結果 (c) 図-4(f)のPコン跡検出結果
 図-5 ハフ変換による型枠跡およびPコン跡の検出（上図）とそれによる除去（下図）

表-1 クラス分類の混合行列

| 検出結果 \ 正解 | ひび割れ | ひび割れでない |
|-----------|------|---------|
| ひび割れ | TP | FP |
| ひび割れでない | FN | TN |

4. 解析結果

本節では、ひび割れを著者らの手作業により検出した正解画像と比較し精度を定量的に評価した。その際の指標として、正解率、感度、特異度、適合率、F値の5指標を用いた。これら5指標は以下の式(5)から(9)のように定義される。なお、式中のTP, TN, FP, FNはそれぞれ True Positive, True Negative, False Positive, False Negative の略であり、表-1のように定められる。

$$\text{正解率} = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (5)$$

$$\text{感度} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (6)$$

$$\text{特異度} = \frac{TN}{FP+TN} \quad (7)$$

$$\text{適合率} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (8)$$

$$F\text{値} = \frac{2 \times \text{感度} \times \text{適合率}}{\text{感度} + \text{適合率}} \quad (9)$$

次ページの表-2に画像AからFを評価した結果を示す。画像DからFについては、ハフ変換により型枠跡部およびPコン跡部を検出して除外する前後の結果も示している。また比較のため、大津の方法による結果も示す。ただし、大津の方法による結果からは型枠跡やPコン跡をハフ変換により省けるほど精度がよくないため、表内の除外後の欄にはN/Aと記載してある。

表より明らかなように、提案手法はほとんどの面で大津の方法の精度を上回っており、特にひび割れ画素として検出された結果の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である適合率に大きな差がある。すなわち、大津の方法の適合率が著しく低いのは誤検出が多いということであり、またそれは図-4, 5で示した結果画像からも明らかである。一方で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である感度に関しては大津の方法は提案手法を上回っているが、これはしきい値を低くして曖昧なものをひび割れと判定しているためであり、低い適合率と高い感度は表裏の関係にある。そこで適合率と感度を同時に評価する指標であるF値に着目すると、提案手法が非常に高く、提案手法がひび割れを良好に検出できている様子がわかる。

また、画像DからFについて、型枠跡やPコン跡をハフ変換を利用して除去した場合、当然ではあるが感度以外の全ての指標において精度が向上しており、本論文で提案した手法の有効性を示しているといえる。

表-2 定量的な指標による精度検証および比較

| | 提案手法 | | | | | 大津の方法 | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 正解率 | 感度 | 特異度 | 適合率 | F 値 | 正解率 | 感度 | 特異度 | 適合率 | F 値 |
| 画像 A | 0.998 | 0.873 | 0.998 | 0.733 | 0.797 | 0.642 | 0.996 | 0.640 | 0.015 | 0.029 |
| 画像 B | 0.989 | 0.611 | 0.996 | 0.747 | 0.672 | 0.750 | 0.984 | 0.746 | 0.655 | 0.123 |
| 画像 C | 0.999 | 0.820 | 0.999 | 0.767 | 0.793 | 0.712 | 0.936 | 0.712 | 0.011 | 0.022 |
| 画像 D/型枠跡除外前 | 0.995 | 0.943 | 0.995 | 0.286 | 0.439 | 0.675 | 0.992 | 0.675 | 0.006 | 0.013 |
| 画像 D/型枠跡除外後 | 0.997 | 0.943 | 0.997 | 0.427 | 0.588 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 画像 E/型枠跡除外前 | 0.994 | 0.985 | 0.994 | 0.224 | 0.366 | 0.571 | 1.000 | 0.570 | 0.004 | 0.009 |
| 画像 E/型枠跡除外後 | 0.996 | 0.985 | 0.996 | 0.316 | 0.479 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 画像 F/P コン跡除外前 | 0.992 | 0.889 | 0.993 | 0.207 | 0.336 | 0.756 | 0.940 | 0.755 | 0.008 | 0.016 |
| 画像 F/P コン跡除外後 | 0.994 | 0.889 | 0.994 | 0.243 | 0.381 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |

5. まとめ

本研究では、統計的な手法を活用した自動ひび割れ検出手法に、型枠跡や P コン跡をハフ変換によって同定する手法を組み合わせることで、高い精度でひび割れを検出できることを示した。

今後の課題を以下に示す。本論文ではハフ変換の判定のためのしきい値を経験的に定めたが、例えば 1pixel あたりの距離などから求めることも出来ると考えられる。また、今回用いた画像には存在しなかったが、撮影時の光の加減によって P コン跡の上半分や下半分のみが暗くなるような状況も考えられる。しきい値をある程度低くしないとそのような跡は検出できないと考えられるが、その場合誤検出も増えてしまうと思われる。このような誤検出を防ぐためには、例えば結果画像にモルフォロジー演算を行ってからハフ変換をするなどの工夫が必要と考えており、今後の研究課題である。

参考文献

- 1) 国土交通省：橋梁定期点検要領，2014.6.
- 2) 国土交通省：道路橋定期点検要領，2014.6.
- 3) 国土交通省：道路トンネル定期点検要領，2014.6.
- 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, 2010.9.
- 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, 2003.9.
- 6) 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, No.1, pp.52-61, Jan.2005.

- 7) 三輪知寛，片岡 望，大賀水田生，全 邦釘：領域拡張法を用いたコンクリート表面のひび割れ自動化判定手法の構築，土木学会四国支部技術研究発表会，I-21, 2014.5.
- 8) 全 邦釘，片岡 望，三輪知寛：統計学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，第 39 回土木情報学シンポジウム，pp.141-pp.144, 2014.9.
- 9) Kittler, J. and Illingworth, J.: Minimum error thresholding, Pattern recognition, Vol.19, No.1, pp.41-47, Jan.1986.
- 10) Adams, R. and Bischof, L.: Seeded Region Growing, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, Vol.16, No.6, pp.641-647, Jun.1994.
- 11) 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, Vol.J63-D-4, pp.349-356, 1980.4.
- 12) 高木幹雄，下田陽久：新編 画像解析ハンドブック，東京大学出版会，2004.9.
- 13) Duda, R. O. and Hart, P. E.: Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures, Communications of ACM, Vol.15, pp.11-15, Jan.1972.
- 14) Atherton, T. J. and Kerbyson, D. J.: Size invariant circle detection, Image and Vision Computing, Vol.17, No.11, pp.795-803, Sep.1999.