

AI自動検出による遊離石灰の表示サイズの提案 ～橋梁診断員からみた許容範囲の分析～

吉倉 麻衣¹・南 貴大²・福岡 知隆³・藤生 慎⁴・高山 純一⁵

¹学生会員 金沢大学大学院 環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: m.yoshikura@stu.kanazawa-u.ac.jp

²学生会員 金沢大学大学院 環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: taketaka0503@stu.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 金沢大学博士研究員 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: tfukuoka@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 金沢大学准教授 融合研究域融合科学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: fujii@se.kanazawa-u.ac.jp (Corresponding Author)

⁵フェロー 金沢大学名誉教授 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: takayama@staff.kanazawa-u.ac.jp.

近年、橋梁の近接目視点検の代替手法として、AIなどの新技術を活用した点検手法が注目されている。橋梁の損傷をAIを用いた画像認識で自動検出し、点検技術者の損傷判定を支援することで、点検作業の省力化が期待できる。ただし、近接目視点検と同等の判定を行うためには、損傷判定に必要な検出結果表示の精度が必要である。本研究では、橋梁点検の点検項目の1つである遊離石灰を画像認識で自動検出し、技術者の損傷判定に必要な表示結果の精度を検証した。遊離石灰の自動検出結果について、橋梁診断員の診断情報として適切な表示方法を提案する。

Key Words : bridge inspection, AI, free lime, automatic detection, image recognition

1. はじめに

日本には約72万橋の橋梁が架設されているが、その多くが高度経済成長期に建設されており、老朽化が進んでいる。2030年には建設後50年以上を経過する橋梁が、全体の約55%にまで上る¹⁾。長寿命化およびコスト削減を目的に橋梁の適切な維持管理のため、国土交通省は2014年から道路管理者に5年に1度の近接目視点検を義務付けた。しかし、財源不足、人員不足の自治体では、継続的に近接目視点検を行うことは困難な状況にある。そのため、近接目視点検の代替手法として、AIの深層学習などを活用した点検手法が着目されている。

著者らは、深層学習による画像認識を用いた橋梁損傷の自動検出システムの構築を行っている。この自動検出システムと橋梁診断員の専門的な判断を相互に取り入れた新しい橋梁点検の実現を目指している。損傷領域やひび割れ幅、長さの測定といった診断に必要な情報の前処理を画像認識で行い加速させることで、診断員の業務を

支援する。しかし、画像認識の精度向上のためには、学習データの作成に時間がかかることが課題となっている。特にひび割れ損傷においては、ひび割れの間隔と幅、長さが損傷程度の評価に影響するため、出力結果にピクセル単位の細かさが求められ、数多くの研究がなされている²⁾。一方、漏水・遊離石灰では損傷状況として、基準となる数値は設けられていない(表-1)。ひび割れ損傷

表-1 漏水・遊離石灰の損傷程度の評価区分⁶⁾

| 区分 | 一般的状況 |
|----|---|
| a | 損傷なし |
| b | - |
| c | ひびわれから漏水が生じている。錆汁や遊離石灰はほとんど見られない |
| d | ひびわれから遊離石灰が生じている。錆汁はほとんど見られない。 |
| e | ひびわれから著しい漏水や遊離石灰(例えば、つらら状)が生じている、又は漏水に著しい泥や錆汁の混入が認められる。 |

と同等の出力結果の細かさは必要なく、それより粗くても損傷度を判定できると考えられる。しかし、遊離石灰漏水・鉄筋露出などの損傷項目における画像認識の出力表示で、ピクセル単位やメッシュ単位といった細かさについては十分に検討されていない。

2. 既往研究と本研究の目的

遊離石灰を含むコンクリート損傷検出に関する既往研究をまとめる。

田畑ら⁷⁾は、損傷画像にラベリングした学習データを用いて深層学習を行い、テスト画像データの分類を行った。入力データは事前に損傷箇所を切り出すことで、分析の精度向上に成功している。

横山ら⁸⁾は、画像上でスライドウィンドウを等間隔でラスタスキャンさせ、スライドウィンドウを損傷分類に投入して画像上に表示させる手法を検証した。

Karaaslanら⁹⁾は、損傷箇所を矩形にて指示し、矩形内の損傷をセグメンテーションにて検出する方法で精度を上げた。さらに点検技術者が損傷の予測閾値を変化させ、検出結果の表示を変える仕組みを導入している。

青島ら¹⁰⁾は、深層学習を用いて、ひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰の検出精度の向上を行った。物体検出による損傷箇所の矩形内のみをセグメンテーションすることで、画像全体をセグメンテーションするよりも精度が上がった。限られた条件での検討であったため、さらなる教師データにて学習させ、多様なテストデータで精度を高める必要があると課題を残している。

穴井ら¹¹⁾は、損傷自動検出における7種類の深層学習の検出精度の比較に、矩形による検出手法を用いた。しかし、形状情報を得るためには、変状の矩形検出では不十分との認識を示している。

以上のように、遊離石灰に関して、画像認識や矩形による物体検出、セマンティックセグメンテーションによる検出結果表示がなされている。矩形検出は、セマンティックセグメンテーションより学習データの作成は簡易にできるが、穴井らの指摘のとおり、形状情報としては不十分である。逆にセマンティックセグメンテーションは形状情報は得られるが、学習データの作成や精度向上には時間がかかるという課題がある。

著者らの損傷の自動検出と橋梁診断員の専門的な判定を組み合わせたシステム¹²⁾では、画像認識の精度とともに、診断員が適切な診断ができる検出結果表示が重要である。検出結果表示は、自動検出システムを実務で利用する点検技術者の使いやすさを考慮して設計する必要がある。しかし診断員が適切な診断をするための検出結果表示に必要な細かさ・粗さはこれまでに

検証されていない。検出結果表示に多少の粗さが許容されるのであれば、セマンティックセグメンテーションのようにピクセル単位の表示ではなく、メッシュ単位の表示も可能となり、学習データの作成稼働・費用の削減につながる。

そこで本研究では、検出結果表示に対する技術者の許容範囲を明らかにし、検出領域内の遊離石灰占有率をもとに診断員が損傷診断に必要な表示サイズを提案する。

3. 遊離石灰の自動検出モデルの構築

(1) データセットの作成

遊離石灰を検出する学習データは、K県の橋梁点検台帳に記録されている画像を用いた。遊離石灰は、漏水やひび割れを伴って現れることもあるが、本研究では、点検台帳にて「遊離石灰」のみの損傷と診断された画像を112枚選定した。選定した画像の遊離石灰部分をアノテーションし、全112枚のうち92枚を学習データ、20枚をテストデータとした。92枚の学習データはさらに画像を水平反転、拡大縮小、回転、移動といった画像編集を行い、920枚にまで学習データ数を拡張した。

(2) 検出モデルの構築

アノテーションした遊離石灰の画像に対し、出力結果をピクセル単位で判定するモデルを用いて、検出結果をピクセル単位とメッシュ単位で表示の出し分けを行った。

遊離石灰を自動検出する画像認識技術は、セマンティックセグメンテーションを用いた。セマンティックセグメンテーションは、画像を任意の領域に分割し、一つ一つの領域にラベル付けして意味を持たせた学習データから、各領域の特徴を学習した領域を自動で推定する技術である。畳み込み学習をベースとした領域の特徴抽出を行い、ピクセル単位で領域の推定を行う。推定する領域を「遊離石灰の領域」と「遊離石灰以外の領域」として、事前に学習したモデルを用いることにより、橋梁画像の遊離石灰箇所を自動で推定する。なお、「遊離石灰の領域」は「遊離石灰らしさ」が1%以上ある場合に検出するよう設定した。テストデータの検出結果を図-1に示す。



図-1 AIモデルによる遊離石灰の検出結果の例

表-2 アンケートの実施概要

| | |
|------|---|
| 回答期間 | 2020年11月3日～10日 |
| 対象者 | 橋梁点検技術者 |
| 回答数 | 25サンプル 【内訳：橋梁点検経験年数】 ・ 1年以上5年未満：6サンプル ・ 5年以上10年未満：11サンプル ・ 10年以上15年未満：3サンプル ・ 15年以上20年未満：5サンプル |

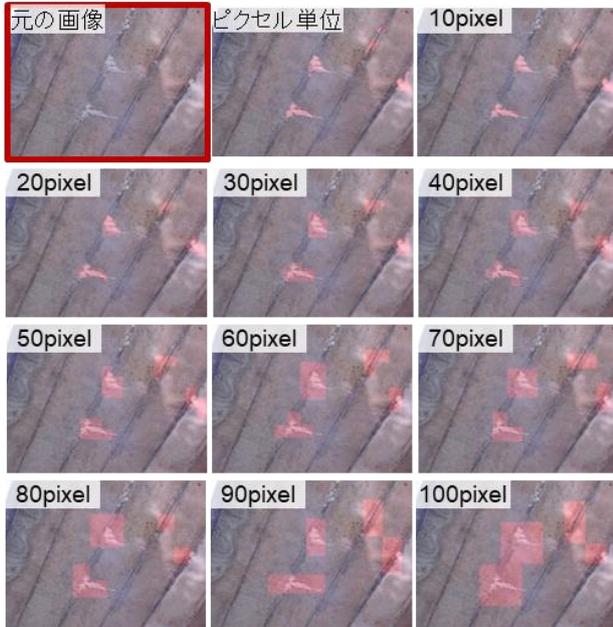
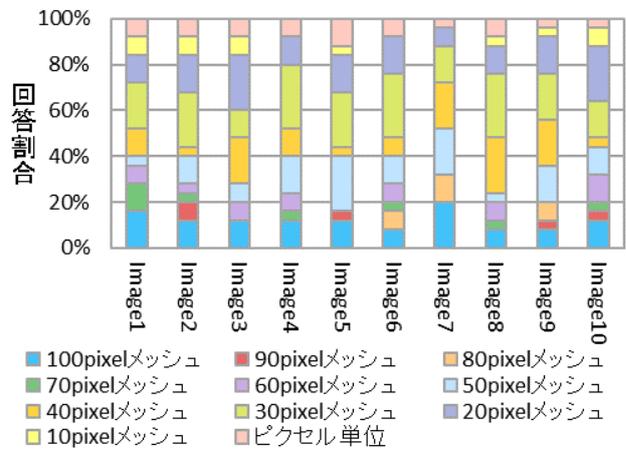
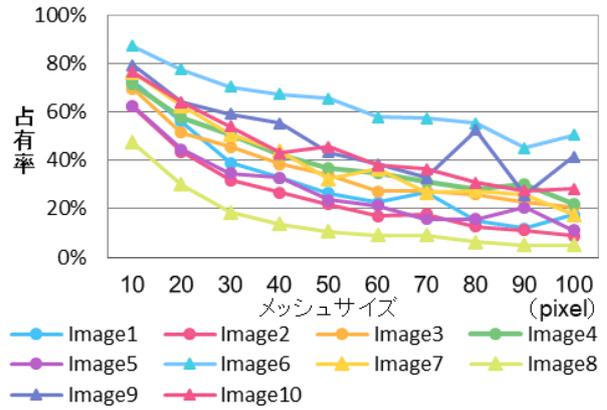


図-2 アンケート設問に用いた検出結果表示の一例



4. 自動検出結果の適切な表示サイズの検証

遊離石灰の検出結果を様々なメッシュサイズで表示させた画像を作成し、点検技術者の対策区分・健全性の判定における検出結果表示の粗さの許容閾値を点検技術者を対象に調査を実施し、明らかにした。

(1) 調査方法

第3章で構築した遊離石灰の自動検出モデルを用い、検出結果表示をピクセル単位とメッシュ単位で作成した。その画像を橋梁点検技術者に見せ、画像による対策区分・健全性の判定を実施する際、どのメッシュサイズの粗さまで許容できるかアンケート調査を行った(表-2)。自動検出結果をメッシュ単位で表示する画像は、10pixelメッシュから100pixelメッシュまで10pixelごとにサイズを変え、遊離石灰の領域を色付けたメッシュで表示した(図-2)。アンケートでは、10枚の別々の遊離石灰画像を用い、画像サイズは約920×715pixelで統一した。それぞれの画像の検出メッシュサイズに対する遊離石灰の占有率を式(1)で算出し、その結果を図-3に示す。

$$\text{遊離石灰占有率} = \frac{\text{メッシュ内 遊離石灰領域のピクセル数}}{\text{検出メッシュ領域の総ピクセル数}} \quad \text{式(1)}$$

同じ検出メッシュサイズでも画像により占有率にばらつきが見られるが、メッシュサイズが大きくなるほど、占有率が下がる傾向が見られた。

(2) アンケート結果

10枚の画像に対する検出メッシュサイズの許容閾値の回答結果を図4に示す。画像によって許容閾値にばらつきがみられるが、検出メッシュ内の遊離石灰占有率の差や、撮影距離など撮影条件が一定ではないことが要因として考えられる。

さらに橋梁点検経験年数ごとに許容閾値をまとめた結果を図5に示す。各経験年数の平均許容閾値を度数分布で算出したところ、1年以上5年未満が29pixel、5年以上10年未満が37pixel、10年以上15年未満が44pixel、15年以上20年未満が51pixelとなり、経験年数が長い技術者ほど、粗い検出メッシュサイズでも許容する傾向が見られた。その一方、経験年数が長くなるほど標準偏差も大きくな

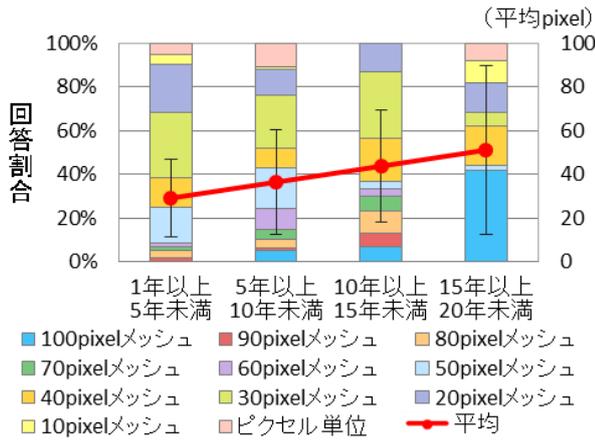


図-5 点検経験年数ごとの回答割合と平均

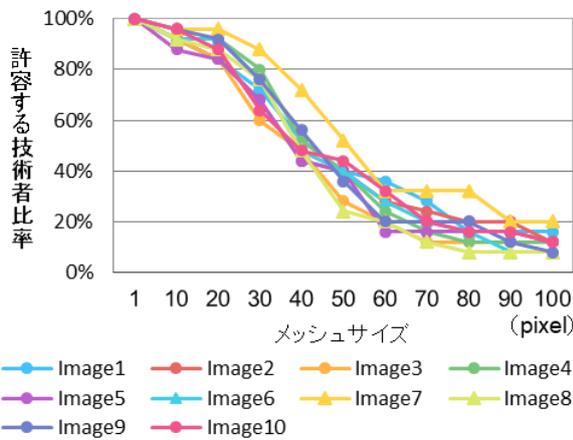


図-6 検出サイズ毎の許容する点検技術者の割合

る傾向が見られた。

検出メッシュサイズ毎に許容する技術者の割合を算出したところ、20pixelメッシュまでは約8割の技術者が許容範囲内としているが、30pixelメッシュ以上になると、許容する技術者の割合が大幅に減少した(図-6)。

5. 従来の遊離石灰の記録手法と許容範囲

近接目視点検の点検調査には、遊離石灰の発生個所の画像が記録されており、その中には遊離石灰をチョーキングで囲った画像がある。遊離石灰のチョーキングは点検技術者の判断で実施するため、枚数は少ないが、チョーキング領域内の遊離石灰の占有率を調べることで、実点検における許容範囲を把握できるのではないかと考えた。その占有率に対し、第4章で実施した技術者へのアンケート結果で得られた検出メッシュサイズの許容閾値に照らし合わせ、損傷程度の診断に適正な表示サイズを提案する。

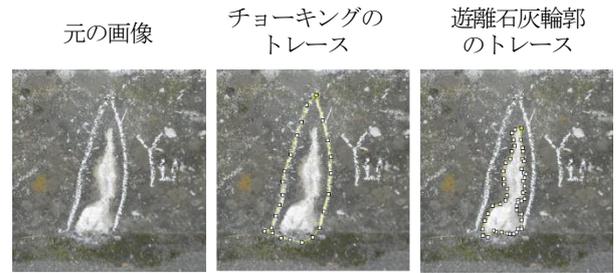


図-7 ピクセル数のカウントの一例

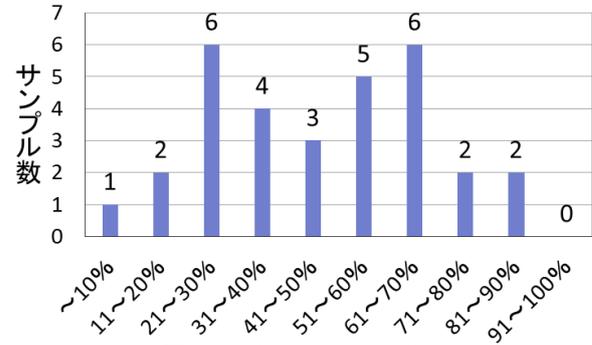


図-8 遊離石灰占有率の分布

表-3 遊離石灰占有率の統計値

| 平均 | 中央値 | 標準偏差 |
|-----|-----|-------|
| 47% | 49% | 0.215 |

(1) 近接目視点検における遊離石灰占有率

第3章と同様にK県の橋梁点検調査から、遊離石灰の損傷があると判定された画像のうち、チョーキングされた画像を31枚選定した。占有率を算出するため、画像のチョーキング領域内と遊離石灰領域のピクセル数をカウントした。カウント方法は、測定する範囲を多角形で囲み、その領域内のピクセル数をカウントできるソフトウェア「Image J」を利用した。実際に範囲を選定した画像の例を図-7に示す。

チョーキング内の総ピクセル数、遊離石灰領域のピクセル数から、チョーキング内の遊離石灰占有率を式(2)で算出した。

$$\text{チョーキング内遊離石灰占有率} = \frac{\text{遊離石灰領域のピクセル数}}{\text{チョーキング内の総ピクセル数}} \text{式(2)}$$

31枚のチョーキング内遊離石灰占有率の結果を図-8に示す。平均占有率は約50%であるが(表-3)、21~30%と61~70%で二峰性の分布を示した。

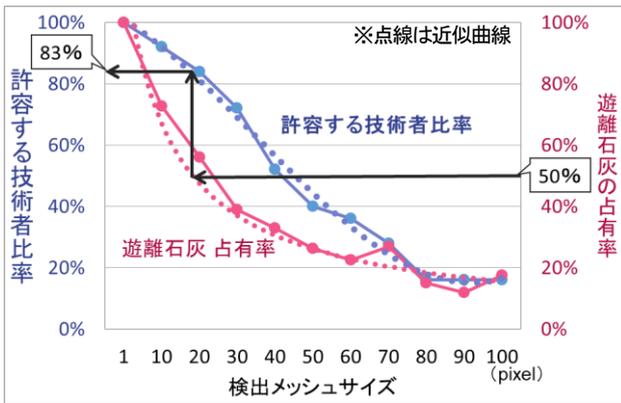


図-9 占有率に対する許容技術者比率の算定イメージ (Image1の占有率50%の場合)

(2) 診断員の許容範囲と占有率の調査

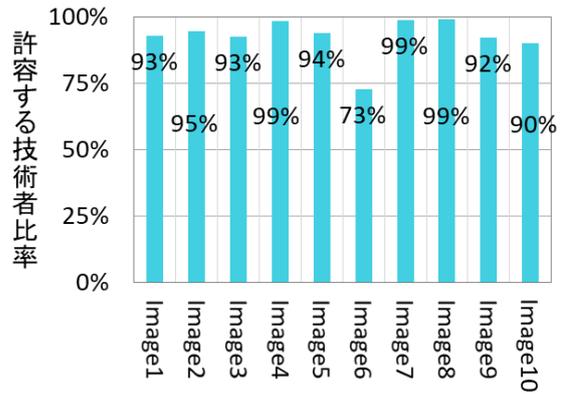
遊離石灰の占有率の中で、図-8で示した第1ピークの30%、第2ピークの70%、表-3で示した平均・中央値の50%に対する技術者の許容度を調査した。第4章の図-3, 6を用いて、遊離石灰占有率の結果に対し、占有率30%、50%、70%にあたる検出メッシュサイズから許容する点検技術者比率を求めた(図-9)。算出時の計算には遊離石灰の占有率は累乗近似を用い、許容する技術者比率は多項近似値を用いた。図-9で示すように、Image 1の占有率50%を許容する技術者比率は83%となる。第4章で用いた10枚の画像に対し、占有率30%、50%、70%の許容技術者比率を図-10に示す。なお、占有率30%のImage6, 9は、本研究で作成したメッシュサイズでは表示できなかったため、測定不能とした。

図-10の各占有率毎の平均値、中央値、標準偏差を表4に示す。許容する技術者比率は、占有率70%で9割、50%で8割、30%で4割となった。この結果から、遊離石灰の占有率70%で、9割の技術者が対策区分・健全性の判定に許容なサイズであると評価できる。また、占有率が50%では8割の技術者が許容でき、占有率30%では4割が許容できることが明らかとなった。

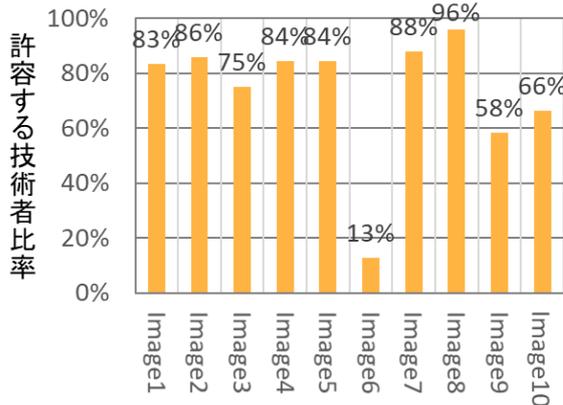
遊離石灰の自動検出における表示サイズは、検出領域の占有率70%で技術者の診断支援に十分な水準と言える。また、占有率30%であっても、実橋梁点検のチョーキング画像に多く見られる度合いであるため、実務的に信頼性に欠けるとは一概には言えない。このことから遊離石灰の検出結果表示サイズは、占有率が30%~70%の範囲内が望ましい。無論、占有率が70%以上でも問題ないが、技術者の診断には大きな影響は与えないと考えられる。

6. まとめと今後の課題

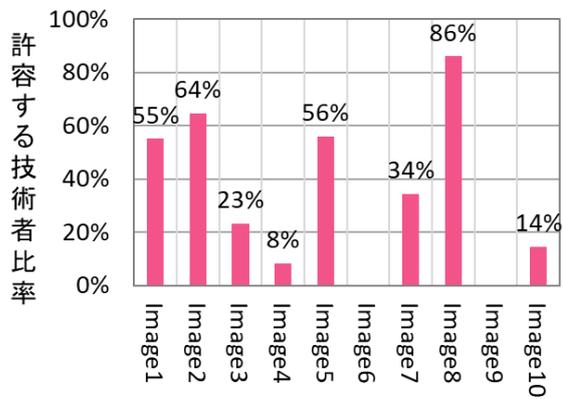
本研究では、画像認識による損傷の予測と橋梁診断員の専門的な判定を組み合わせたシステム¹²⁾において、診



i) 占有率 70%の許容技術者比率



ii) 占有率 50%の許容技術者比率



iii) 占有率 30%の許容技術者比率

図-10 占有率毎の許容する技術者比率

表-4 遊離石灰占有率の統計値

| | 遊離石灰の占有率 | | |
|------|----------|-------|-------|
| | 70% | 50% | 30% |
| 平均値 | 92.6% | 73.4% | 42.7% |
| 中央値 | 93.6% | 83.8% | 44.7% |
| 標準偏差 | 0.072 | 0.227 | 0.253 |

断員が適切な診断ができる検出結果表示サイズの検証を行った。遊離石灰の領域のみを検出するセマンティックセグメンテーションは、理想ではあるが画像認識モデルの精度向上には学習データの作成に時間がかかるという課題がある。一方、診断員が適切な診断ができる検出結果の表示として許容される粗さはこれまで検証はされていなかった。検出結果の表示に多少の粗さが許容されるのであればメッシュ単位の表示も可能となり、画像認識の精度の目安ができる。

本研究で遊離石灰の検出結果表示サイズに対して、点検技術者へのアンケート結果と橋梁点検調書のチョーキング結果を通じて明らかとなった知見をいかにまとめる。

- 1) 検出結果表示メッシュサイズの許容閾値を問うアンケートでは、画像毎にばらつきはあったものの、点検経験が長い技術者ほど、許容閾値が緩やかになる傾向が見られた。
- 2) 実橋梁点検の点検調書に記録されている遊離石灰のチョーキング画像では、チョーキング内の遊離石灰の占有率は21~30%と61~70%で二峰性の分布を示した。
- 3) 検出領域内の遊離石灰占有率が70%以上であれば、診断員9割が許容する十分な水準であることが分かった。また、遊離石灰の占有率50%の場合は、診断員の8割が許容する水準であった。
- 4) 実際の橋梁点検調書におけるチョーキング画像からすると、少なくとも占有率30%以上を目安とすることを提案する。

今後の課題は、著者らが構築した診断支援システムにおいて遊離石灰占有率70%を達成する適切なメッシュサイズを画像毎に判断する仕組みを検討することである。入力画像に対して初期状態のメッシュ処理を行う際に、何の情報もない状態だと適正なメッシュ表示をさせるための調整に時間がかかると推察される。例えば、画像の画素数に対する一定のメッシュサイズの基準で検出し、その状態から適切なメッシュサイズに調整するといった手法を検討していきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局，交通メンテナンス年報，https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/pdf/r01/r01_09maint.pdf，2021年2月14日閲覧。
- 2) 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.73，2号，p. I_297-I_307，2017。
- 3) 藤田悠介，田口岳志，浜本義彦：コンクリート構造物の外観検査のための画像合成および半自動ひび割れ評価，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.74，No.1，pp18-32，2018。
- 4) 南 貴 大，福 岡 知 隆，藤 生 慎，寒 河 江 雅 彦：AverageShiftedMesh を用いたひびわれ箇所自動検出の分解能・精度向上に関する分析，AI・データサイエンス論文集，1巻，J1号，p.473-480，2020。
- 5) 浦田渡，南貴大，石村直人，藤生慎，福岡知隆，高山純一：橋梁点検の点検スキルが橋梁の画像診断におけるひび割れ検出結果と検出時間に与える影響の分析～超高解像度カメラを用いた検討～，土木角界論文集 D3（土木計画学），Vol.75，No.6，I_591-I_598，2020。
- 6) 国土交通省：橋梁定期点検要領，https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_6.pdf，2021年2月15日閲覧。
- 7) 田畑 佑，党 紀，春田大二郎，Ashish SHRESTHA，松永昭吾，全邦釘：UAV 撮影と深層学習を用いた橋梁損傷の自動検知に関する検証，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.74，2号，p. I_62-I_74，2018。
- 8) 横山傑，松本高志：DeepLearning によるコンクリートの変状自動検出器の開発と Web システムの実装，土木学会論文集 A2（応用力学），73巻，2号，p.I_781-I_789，2017。
- 9) Enes Karaaslan, Ulas Bagci, Necati Catbas : Artificial Intelligence Assisted Infrastructure Assessment using Mixed Reality Systems, Volume:2673 issue: 12, p.413-424, 2019.
- 10) 青島亘佐，山本拓海，中野聡，中村秀明：深層学習によるセグメンテーション手法を用いたコンクリート表面の変状領域の検出，AI・データサイエンス論文集，1巻，J1号，p.481-490，2020。
- 11) 穴井智史，矢吹信喜，福田知弘：画像上のコンクリート表面の変状検出に関する複数の深層学習モデルの精度比較，土木学会論文集 F3（土木情報学），77巻，1号，p.1-13，2021。
- 12) 吉倉麻衣，南貴大，福岡知隆，藤生慎，高山純一：5G と橋梁の損傷点検支援システムを活用した点検現場と遠隔地のコミュニケーションに関する考察，AI・データサイエンス論文集，1巻，J1号，p.545-553，2020。

(2021.XX.XX 受付)

PROPOSAL OF DISPLAY SIZE FOR AUTOMATIC DETECTION OF FREE LIME - ANALYSIS OF ALLOWABLE RANGE OF BRIDGE INSPECTORS -

Mai YOSHIKURA, Takahiro MINAMI, Tomotaka FUKUOKA, Makoto FUJIU
and Junichi TAKAYAMA

Inspection methods using new technologies such as AI have recently attracted attention as an alternative method of close visual inspection of bridges. New technologies which automatically detect damage from the image recognition of the bridge support the damage diagnosis of bridge inspectors and save inspection work. However, it is necessary to have the detection display accuracy which can make the decision equivalent to close visual inspection. In this study, free lime which is one of inspection items of the bridge inspection was automatically detected by the image recognition, and we verified the accuracy of the display result necessary for the damage decision of the engineer. In addition, we propose an appropriate display method for automatic detection of free lime as diagnostic information for bridge diagnosticians.