

画像の属性や点検スキルが 橋梁の画像診断に与える影響の分析 ～超高解像度カメラを用いた検討～

浦田 渡¹・南 貴大²・藤生 慎³・福岡 知隆⁴・須田 信也⁵・高山 純一⁶

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

E-mail:superw7@stu.kanazawa-u.ac.jp

²学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科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 金沢大学准教授 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:fujii@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 金沢大学研究員 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

⁵非会員 株式会社WorldLink&Company (〒603-8053 京都府京都市北区上賀茂岩ヶ垣内町98-2-2F)

E-mail:s.suda@skylinkjapan.com

⁶フェロー会員 金沢大学教授 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@se.kanazawa-u.ac.jp

国土交通省により高齢化が急速に進んでいる橋梁に対する予防保全的な維持管理が重要視されており、全ての橋梁に対して定期点検が義務付けられている。現在実施されている点検手法である近接目視点検は予算・人員の問題により効率化が見込めないことから、その代替手法となる様々なシステムが研究されているが、本研究では、超高解像度のカメラを用いることで視覚的に現在の点検と遜色ない環境を構築し、人が画像上で損傷の診断を行う「画像目視診断システム」を提案する。今回は、本システムを提案する際に生じた「画像の属性が診断結果に与える影響」と「点検スキルが診断結果に与える影響」の2つの課題に着目し、それぞれの影響について適合率、再現率、F値を用いて評価を行った。

Key Words : super high-resolution camera, bridge inspection, maintenance, diagnostic imaging, image attributes, lightness, contrast, chroma, inspection skills, variance analysis

1. はじめに

現在、国土交通省は様々なインフラ構造物を所管しているが、そのいずれも高齢化に伴う劣化が生じるため、維持管理を目的とした定期点検が義務付けられている。定期点検が義務付けられている構造物の中で橋梁は全国に約73万橋（平成25年道路局集計）という膨大な数を有しており、このうち建設後50年を経過した橋梁の割合は全橋梁の約18%を占め、高齢化構造物として扱われている。これらの高齢化構造物は図-1に示すように10年後には約43%、20年後には約67%と急激に増加していく¹⁾

全体の半数以上が高齢化構造物となると予測されている状況で、安全上問題が発生する可能性のあるすべての

橋梁に修繕や架け替えといった事後保全的な処置が適切に行えるとは財政力上考え難い。そこで国土交通省は橋

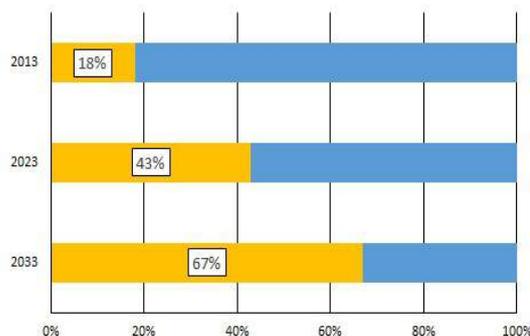


図-1 建設後 50 年を経過した橋梁の割合¹⁾

梁長寿命化修繕計画を定め、早期に損傷を発見し、事故や架け替え、大規模な修繕に至る前に対策を実施する予防保全的な維持管理への転換を図るとともに、橋梁の長寿命化並びに橋梁の修繕及び架け替えにかかる費用の縮減を図っている。

国土交通省は橋梁の点検手法として、点検者が橋梁に近づき目視で点検を行う近接目視点検を定めているが、この点検手法にはいくつかの課題が存在する。一般社団法人次世代センサ協議会が全国47都道府県や政令指定都市に対し、橋梁点検業務の運用状況と課題に関するアンケート調査をおこなった²⁾ところ、アンケート調査における点検業務の課題に関する設問では、「点検委託費が高価で予算確保が困難」、「大型点検車使用による費用の増大」などといった財政力の問題と、「技術者の数が管理する橋梁の数に対して圧倒的に少ない」、「業務内容を熟知している人材が少ない」などといった人員の問題が大半を占め、大きな課題であることが浮き彫りになった。また、「点検診断結果にばらつきが生じている」、「点検者の主観による部分のばらつきがある」などの点検結果判定に関する課題も生じていることが明らかとなった。

これらのような課題があることから、今後、すべての橋梁に対してこれまでと同様の精度を担保した近接目視点検を継続的に行っていくことは非常に困難である。

本研究では、このような背景を踏まえ、現在行われている近接目視点検の代替的な点検手法として、画像目視点検を提案する。画像目視点検は、超高解像度（1億画素）のカメラで撮影した橋梁の画像を橋梁点検者が目視することで、点検対象物の損傷部分を診断する点検システムである。このシステムは、画像さえ撮影することができれば現場での点検をする必要がなく遠隔地での診断が可能であるため、人員を確保するという面での負担が軽減される。また、本研究で使用するカメラはドローンに搭載が可能であることから、橋梁点検車を使用して点検を行っていた場所に関しても画像を撮影して点検することができ、高額な予算を確保するという面での負担も軽減される。

2. 既往研究

これまでに近接目視点検の代替手法に関する研究は数多くなされているため、既往研究をまとめる。

岡田ら³⁾は、受動回転球殻を有するマルチコプタの開発と、その実橋梁における模擬点検を行った。マルチコプタには、橋梁のように複雑かつ狭隘な環境を安全に飛行するために、3軸ジンバルを介して接続された本体と球殻が独立に受動回転できる構造を採用した。また、これまでの実橋梁での第三者評価で、橋梁表面に受動回転

球殻を接触させながら近接飛行することで、国交省点検要領で発見が必要とされる0.1[mm]のひび割れなどの損傷を撮影できることが認められているが、課題として耐風性と飛行時間の制限が挙げられた。

藤原ら⁴⁾は、橋桁の下面や支承部など近接目視が困難な箇所に対して、ポールユニットを用いて視準可能な位置にカメラを据え付け、点検、測定、映像記録採取を行う装置を開発した。この装置を用いた点検方法としては、点検ロボットカメラに搭載しているレーザー距離計によりカメラから対象面までの距離を測定し、そのデータに基づいて対象面における大きさを認識し、操作端末（タブレットPC）画面にクラックスケール等の計測目盛を表示させることでひび割れ幅、ひび割れ長さ、塗装劣化の長さなどを測定する。現場検証の結果、腐食・剥離・鉄筋露出などの損傷評価は可能であるものの、ひび割れの検出に関しては精度が低く課題が残る結果となった。

様々な代替手法に課題がある中、南ら⁵⁾は、超高解像度カメラで撮影された点検部位前景の画像を用いて、人が0.1[mm]のひび割れを検出する画像目視点検環境の構築を行っている。画像目視診断でのひび割れ検出に関する課題としては、画像の属性によって検出しにくい箇所が存在すること、診断者のスキルによって検出結果が異なる可能性があることなどがあげられている。

本研究では「画像の属性」と「点検スキル」に着目し、それらがひび割れの検出精度にどのように影響を与えているかを把握することを目的とする。

3. 写真撮影実験

平成30年9月20日（木）10時30分から16時の5時間30分及び9月21日（金）10時から12時の2時間に、石川県羽咋市にて写真撮影実験を実施した。撮影した橋梁は7橋で、いずれも石川県羽咋市が管理を行っている。今回の実験では事前に羽咋市から提供を受けた橋梁定期点検データを基に、コンクリート橋脚にひび割れを有しており、かつ2径間以上の橋梁を対象として選定した。撮影実験を行った7橋のうち、平成28年に定期点検が完了している橋梁が3橋、平成29年に定期点検が完了している橋梁が2橋、平成30年に点検予定（未点検）の橋梁が2橋であった。撮影対象部材としては、いずれの橋梁もコンクリート橋脚を対象とし、撮影の際は超高解像度カメラを三脚に取り付け、橋梁の下部で橋脚の全景が撮影できる距離から撮影を行った（図-2）。また、撮影枚数は7橋の合計で454枚であった。



図-2 撮影実験風景



図-4 ひび割れ診断結果の一例



図-3 ひび割れ診断実験対象画像

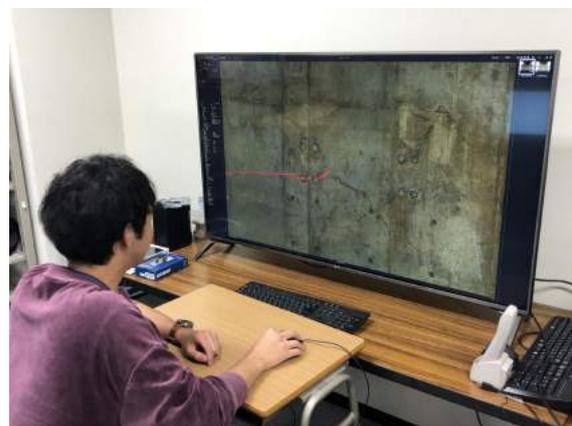


図-5 学生による診断実験

4. ひび割れ診断実験

(1) 実験の概要

本研究では画像目視点検の実現可能性を検証するにあたり、超高解像度カメラで撮影された画像からひび割れの検出を行うひび割れ診断実験を実施した。ひび割れ診断実験を行うにあたり、写真撮影実験を行い、カメラの解像度と撮影距離の関係からひび割れ幅0.2mm以上のひび割れが視認でき、かつ部材に十分にひび割れを有している損傷部の画像を選定したところ、O橋の橋脚部の画像(図-3)が条件を満たし、画像からひび割れの検出を行うひび割れ診断実験に適していたため、実験に用いる画像として使用した。

ひび割れ診断実験は被験者が52インチ4Kモニターのディスプレイ上に表示された対象画像(図-3)から拡大・縮小を繰り返すことでひび割れを目視で見つけ出し、ひび割れの上をなぞるように赤線を引くことでひび割れの検出を行う。(図-4)赤線を引く作業と拡大・縮小はマウスで行い、すべての操作を超高解像度カメラ専用のソフトウェア上で行う。

今回は画像の属性と橋梁点検のスキルがひび割れ診断実験の検出精度に与える影響を分析するため、学生による診断実験と橋梁点検経験者による診断実験を実施した。

学生による実験では画像の属性を変化させた8パターンの画像を用いて、土木系学部に所属する学生24名を対象として実験を行った(図-5)。本実験では実験計画法の直交表 $L_8(2^3)$ に基づき、画像を構成する明度、コントラスト、彩度の3要因を2つの水準で変化させた(水準1を元画像のまま、明度の水準2を「暗い」、コントラストの水準2を「大」、彩度の水準2を「小」と設定)8パターンの画像を使用し、各画像の診断実験を3回ずつ、合計24回行い、全ての実験を異なる被験者で行った。

橋梁点検経験者による実験では建設コンサルタント4社(石川・福井・富山)を訪問し、経験年数にばらつきがある34名の点検者を対象として行った(図-6)。なお、橋梁点検経験者による実験では、経験年数による比較分析を行う(0~5年, 5~10年, 10~15年, 15年以上で分類し、各経験年数がひび割れ検出精度に与える影響を分析)ため、使用した画像は画像の属性等を変化させていない撮影時の元画像を使用した。

本実験の対象橋梁は既に定期点検が行われているため、



図-6 橋梁点検経験者による診断実験



図-7 近接目視点検結果から作成した正解データ

橋梁点検調査の損傷図から近接目視点検によるひび割れ検出結果が得られ、その結果を対象画像（図-3）に反映させることで本実験における正解データを作成した（図-7）。作成した正解データと各被験者の結果を照らし合わせ、各被験者の結果の評価を行う。

(2) 診断結果のメッシュ変換

本実験では被験者はひび割れの検出をマウスで赤線を引き行う。ひび割れの上をなぞる作業はフリーハンドであるため、分析の際に各被験者のひび割れをpixel単位で一致させることが困難である。そこで本実験では検出結果の赤線を含んだ画像をメッシュ変換することで分析を可能とした。本実験におけるメッシュ変換とは被験者がひび割れ診断をした画像を一边が16pixelの正方形（256pixel）のメッシュで縦34×横45に分割し、正方形の中にひび割れ（赤線）を含んでいるメッシュを赤で色付けする処理の事を指す。

また、近接目視点検の結果から作成した正解データと各被験者の結果の比較に関しては、同位置にあるメッシュが共に赤色である場合か共に無色である場合を一致、正解データでは赤色であるが、被験者の結果では無色で

ある場合を見落とし、正解データでは無色であるが、被験者の結果では赤色である場合を誤検出とする。

(3) ひび割れ検出精度評価に用いる指標

本研究では被験者が検出したひび割れをメッシュ変換することで正解データとの比較を行うが、その際に被験者のひび割れ検出結果がどの程度正解データと一致しているか評価をする必要がある。本研究では被験者の検出精度を評価する指標として適合率、再現率、F値を用いる。

適合率とは、被験者のひび割れ検出結果の中に近接目視点検結果から作成した正解データと一致しているひび割れがどれだけ含まれているかを表す指標である。適合率が高ければ、ひび割れの誤検出が少ないことを示しており、ひび割れ検出の精度が高いことが表される。

再現率とは、近接目視点検結果から作成した正解データの中に被験者のひび割れ検出結果と一致しているひび割れがどれだけ含まれているかを表す指標である。再現率が高ければ、ひび割れの見落としが少ないことを示しており、多くのひび割れを検出できていることが表される。

F値は適合率と再現率の調和平均を取った値であり、被験者間の検出精度の優劣を付ける際に用いる。

5. 画像の属性が画像診断に与える影響の分析

分散分析によると、画像の三属性の中で最もひび割れ検出結果の適合率に影響を与えるのは彩度であることが明らかとなり、その他の要因は検出結果に有意な影響を与えなかった（表-1）。図-8は24名の被験者のひび割れ検出結果の中で彩度を変化させると適合率にどの程度差を生じさせるかを示したグラフである。彩度が水準1の場合、ひび割れ検出における平均適合率は約84.2%であり、水準2の場合、ひび割れ検出における平均適合率は約76.1%となり、彩度を水準2にする（画像を白黒に近づける）と適合率が低下することが明らかとなった。

再現率に関しても同様の分析を行う。分散分析によると、画像の三属性の中で最もひび割れ検出結果における再現率に影響を与えるのは、適合率と同様に彩度であることが明らかとなり、その他の要因は検出結果に有意な影響を与えなかった（表-2）。図-9は24名の被験者のひび割れ検出結果の中で彩度を変化させると再現率にどの程度差を生じさせるかを示したグラフである。彩度が水準1の場合、ひび割れ検出における平均再現率は約71.0%であり、水準2の場合、ひび割れ検出における平均再現率は約80.7%となり、彩度を水準2にする（画像を白黒に近づける）と再現率が向上することが明らかとなった。

これらの適合率、再現率の変化を踏まえ、F値による

表-1 適合率に関する分散分析の結果

	偏差平方差	自由度	不偏分散	分散比	P値	判定
全体		23				
明度	11.1	1	11.1	0.6	0.5	
コントラスト	8.0	1	8.0	0.4	0.5	
明度×コントラスト	46.2	1	46.2	2.4	0.1	
彩度	393.0	1	393.0	20.4	0.3×10^{-5}	*
明度×彩度	21.7	1	21.7	1.1	0.3	
コントラスト×彩度	0.2	1	0.2	0.1×10^{-1}	0.9	
誤差	327.8	17	19.3	1.0	0.5	

表-2 再現率に関する分散分析の結果

	偏差平方差	自由度	不偏分散	分散比	P値	判定
全体		23				
明度	0.0	1	0.0	0.0	1.0	
コントラスト	0.0	1	0.0	0.0	1.0	
明度×コントラスト	13.2	1	13.2	0.7	0.4	
彩度	568.7	1	568.7	30.6	0.4×10^{-4}	*
明度×彩度	59.0	1	59.0	3.2	0.1	
コントラスト×彩度	79.1	1	79.1	4.3	0.9	
誤差	313.3	17	18.6	1.0	0.5	

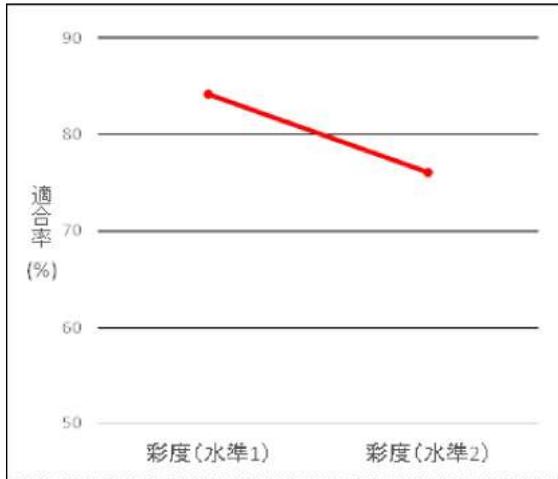


図-8 彩度を変化させた場合の適合率の変化

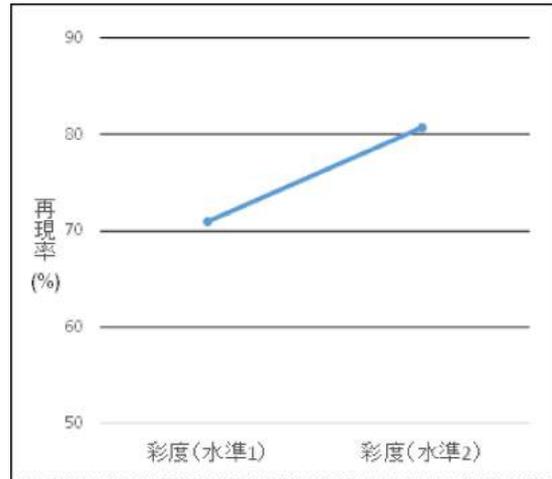


図-9 彩度を変化させた場合の再現率の変化

検出精度の比較を行った (図-10) . 彩度の水準を変化させた場合の平均のF値は約77.0から約78.3に増加している. したがって, 画像を構成する3つの属性のなかで, 検出精度に影響を与えるのは彩度であり, 彩度を変化させることで総合的な検出精度の向上も見込まれることが明らかとなった.

6. 点検スキルが画像診断に与える影響の分析

(1) 橋梁点検経験者による診断実験の分析結果

経験年数が適合率, 再現率, F値に与える影響評価を0~5年, 5~10年, 10~15年, 15年以上で分類した経験年数ごとに分析を行う. 4つに分類した経験年数を2組ずつ合計6つの組み合わせで分散分析を行い, 適合率, 再現率, F値に関して各経験年数が他の経験年数に与える影響を明らかにした. 分散分析の結果を表-3から表-5に示す. 適合率, 再現率, F値すべてがどの経験年数の組み合わせでも有意な影響を与えなかった. 経験年数が0~5年, 5~10年, 10~15年, 15年以上の点検者のそれぞれの適合率, 再現率, F値の平均値のグラフを図-11に示す. グラフからも経験年数による検出結果にはあまり差がないことがわかる.

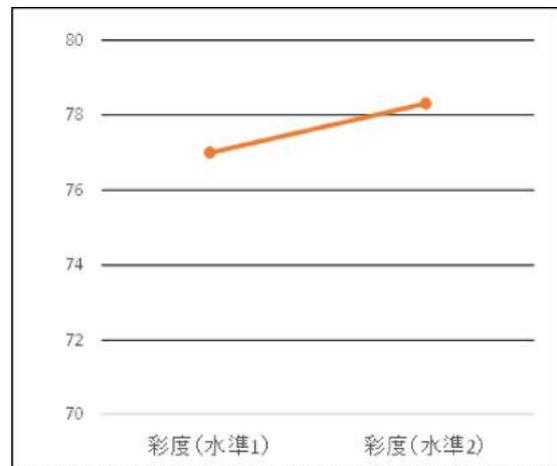


図-10 彩度を変化させた場合のF値の変化

7. まとめと今後の課題

(1) まとめ

画像目視診断システム構築の際の課題である「画像の属性によるひび割れの見え方の違い」と「橋梁点検のスキルがひび割れ検出精度に与える影響」を把握するために超高解像度カメラで撮影した画像を用いたひび割れ診

表-3 適合率に関する分散分析の結果

	年数1	年数2	平均1	平均2	P 値	判定
適合率	0~5	5~10	79.1	75.7	0.4	
	0~5	10~15	79.1	76.8	0.6	
	0~5	15~	79.1	74.7	0.4	
	5~10	10~15	75.7	76.8	0.8	
	5~10	15~	75.7	74.7	0.8	
	10~15	15~	76.8	74.7	0.7	

表-4 再現率に関する分散分析の結果

	年数1	年数2	平均1	平均2	P 値	判定
再現率	0~5	5~10	85.9	86.7	0.8	
	0~5	10~15	85.9	85.7	0.9	
	0~5	15~	85.9	84.5	0.6	
	5~10	10~15	86.7	85.7	0.7	
	5~10	15~	86.7	84.5	0.5	
	10~15	15~	85.7	84.5	0.7	

表-5 F値に関する分散分析の結果

	年数1	年数2	平均1	平均2	P 値	判定
F 値	0~5	5~10	82.1	80.3	0.3	
	0~5	10~15	82.1	80.4	0.4	
	0~5	15~	82.1	78.6	0.7×10^{-1}	
	5~10	10~15	80.3	80.4	1.0	
	5~10	15~	80.3	78.6	0.4	
	10~15	15~	80.4	78.6	0.4	

断実験を実施し、その結果の分析を行った。

画像の属性による影響評価に関する実験結果を分散分析を用いて分析した結果、適合率に関しては、彩度がひび割れ検出結果に影響を与える要因であり、彩度を小さくする、つまり画像を白黒にすると適合率が低下し、ひび割れの誤検出が多くなることが明らかとなった。再現率についても彩度がひび割れ検出結果に影響を与える要因であり、彩度を小さくすると再現率は向上し、ひび割れの見落としが少なくなることが明らかとなった。また、適合率、再現率の結果から彩度を变化させた場合のF値の変化を見ると、彩度を小さくした場合、F値の値が向上することから、彩度を变化させることで総合的な検出精度の向上が見込まれることが明らかとなった。

点検スキルによる影響評価に関する実験結果を分散分析を用いて分析した結果、適合率、再現率、F値に関しては、どの経験年数の組み合わせでも有意な影響を与え

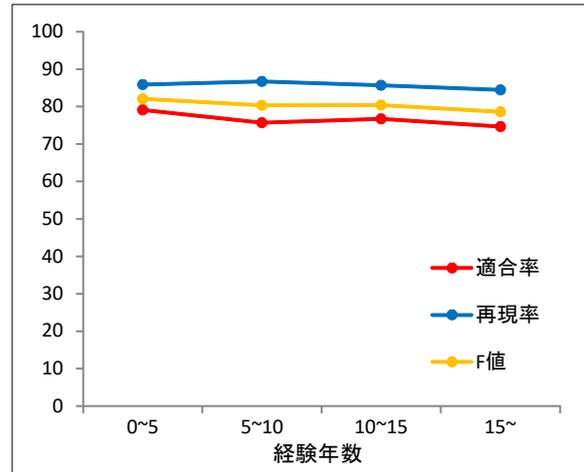


図-11 経験年数ごとの適合率・再現率・F値の変化

なかった。また、経験年数ごとの適合率、再現率、F値の平均値の変化もそれほど大きな差はみられなかったことから、本点検システムは橋梁点検の経験年数に関わらず、幅広い点検スキルの点検者に対応している手法であるといえる。

(2) 今後の課題

本研究ではひび割れの検出を行うシステムの可能性に関して検証を行った。橋梁点検経験者を対象とした実験を行った際、ヒアリング調査を行い、本システムにおける課題の把握を行ったところ、ひび割れ検出だけでなく損傷部の健全度の評価が必要であること、ひび割れ以外の損傷の判断が難しいことが課題として挙げられた。本システムの実用化を目指すにはひび割れ検出だけでは不十分であり、健全度評価も必須条件である。また、ひび割れ以外の損傷（遊離石灰、浮き等）に関しても画像目視により検出可能とするシステムも検討し、今後研究を進めていく。

参考文献

- 1) 国土交通省 インフラメンテナンス情報 社会資本の老朽化の現状と将来, http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html
- 2) 一般社団法人次世代センサ協議会, 点検業務のIoTの利活用をめざして 自治体橋梁における橋梁点検業務実態調査報告書【課題・ニーズ調査編】, http://www.socialinfra.org/p_activity/questionnaire/Bridge_tanken_Digest.pdf
- 3) 岡田佳都, 岡谷貴之: 橋梁点検を代替するための受動回転球殻を有するマルチコプタの開発と実橋梁における点検性評価, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.2, pp.119-122, 2016
- 4) 藤原保久, 梅津健司, 丹野浩二, 千葉嘉隆: 橋梁等

構造物の点検ロボットカメラ, 日本ロボット学会誌,
Vol.34, No.9, pp.581-582, 2016

会技術論文集, Vol.15, pp.54-64, 2018

- 5) 南貴大, 藤生慎, 高山純一, 須田信也, 奥村周也,
渡辺一生: 超高解像度カメラで撮影された画像を用
いた橋梁点検の実施可能性に関する基礎的検討, 社

(2009.7.1 受付)

ANALYSIS OF THE EFFECT OF IMAGE ATTRIBUTES AND INSPECTION
SKILLS ON IMAGE DIAGNOSIS OF BRIDGES
~STUDY USING SUPER HIGH RESOLUTION CAMERA~

Wataru URATA, Takahiro MINAMI, Makoto FUJIU, Tomotaka FUKUOKA,
Shinya SUDA, and Junichi TAKAYAMA

The Ministry of Land, Infrastructure and Transport says it is important to prevent and preserve maintenance for bridges that are rapidly aging. Periodic inspection is required for all bridges, but Proximity visual inspection currently being done is not efficient because money and people do not have enough. Many alternative systems are being developed. In this research, we propose "Image Visual Diagnostic System" which diagnoses damage by looking at images taken by a super high resolution camera. In this issue, we focused on two issues, "the influence of image attributes on diagnostic results" and "the effect of inspection skills on diagnostic results" that occurred in proposing this system, and the influence of each was evaluated using precision, recall, and F value.