

コンクリート構造物のひび割れ幅計測法の開発

石 関 嘉 一

Measurement of Concrete Crack Width via Laser Irradiation

Yoshikazu Ishizeki

Abstract

The working limit of the infrastructure has increased and technology to maintain the working limit of concrete structures is considered. It is dangerous to observe concrete cracks on bridges at high locations. Therefore, it is necessary to measure such cracks with high precision from a distance. To this end, the developed crack-visualization system is equipped with a digital camera and laser-irradiation equipment. The laser-irradiation system takes pictures from approximately 6 m below the crack position, from the ground level under the bridge, is able to measure the crack width by using image-layer processing. As a result, this system of crack-width visualization can confirm the width of the crack with a minimum precision of 0.1 mm.

概 要

橋梁などの社会インフラの供用年数の増加に伴い、老朽化したコンクリート構造物の維持管理技術が課題となっている。橋梁のような構造物が対象の場合、人が直接ひび割れ点検を行うには、高所作業が多く非効率かつ危険度が高いため、遠方から非接触で高精度にひび割れを可視化する手法が必要となる。そこで、デジタルカメラとレーザー照射装置を搭載したひび割れ可視化システムを開発した。ひび割れが発生している橋梁床版を約6m離れた下方の位置からレーザー光を照射しながら撮影し、画像処理によりひび割れ幅計測を行う検証を行った。その結果、実構造物の橋梁の床版に対して、提案システムを適用し、耐久性に影響を及ぼさない0.2mm未満の幅(最小0.1mmの幅)のひび割れを可視化できることを確認した。

1. はじめに

我が国は、インフラの高齢化が進む中で、厳しい財政状況や熟練技術者の減少という状況にさらされているため、予防保全によるインフラの長寿命化が求められている。そこで、インフラのライフサイクルコストの最小化を実現するためには、新技術を活用し可視化を伴うシステム化されたインフラマネジメントが必須である。特に世界最先端の ICRT(Information and Communication Technology)+IRT(Information and Robot Technology)を活用した技術は、従来のインフラ維持管理市場に新たなビジネスチャンスを生むものである。インフラマネジメントの実現のために、予防保全による維持管理水準の向上を低コストで実現しなければならない¹⁾。予防保全による維持管理水準の向上において、コンクリート構造物のひび割れ発生状況を可視化し把握することはもっとも重要な評価と考えられる。そのためひび割れは、その発生位置や幅によって、構造物の健全性を語る指標になる²⁾³⁾。

橋梁などの長大な構造物を対象とする場合、床版の下面や橋脚などのひび割れ点検を実施するには、足場の設置や重機などの利用、橋梁の通行制限等によるコストの増大、人的作業になるため高所からの転落等の危険性が伴う。そのため、コンクリート構造物に近接することなく、遠方からひび割れを検出・計測できる可視化技術が必要となる。

遠方から望遠レンズ等を用いてカメラ撮影する画像処理技術⁴⁾は、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一つとして重要視されている⁵⁾。撮影したひび割れ幅は画像を構成するドットの最小単位である pixel で 1pixel~数 pixel 程度であり、求められる計測精度は耐久性に影響を及ぼす 0.2 mmのひび割れ幅を可視化することである。構造物に近づくことが可能な場合は、クラックスケールやマーカーを貼り、画像上でひび割れとクラックスケール等を比較する手法など⁶⁾があるが、近づくことが不可能な場合には適用することができない。

遠方から撮影し、正確なひび割れ幅を可視化するためには、対象物の大きさ、もしくは対象とカメラの距離が既知である必要がある。一般には、レーザー計測で壁面とカメラまでの距離を1点だけ求めて画像解像度を算出する方法が採られるが、コンクリート壁と正対しているときのみ理論が成り立つ。しかし、現場では平行で撮影することが困難な場合が多く、カメラの移動が難しい場合は、カメラの角度を変えて撮影されるため、カメラと壁面との幾何関係を固定することは困難である。一方、近年は距離計測と画像撮影が一体となった形式が主流となってきたが、ひび割れ点検に必要である0.2mm/pixelのひび割れ幅を、遠方から計測することは困難である⁷⁾。

そこで、今回はSIPで採択された手法で複数のレーザー光を対象となる壁に投影し、投影されたレーザー光も含めて

画像撮影を行う手法を適用した。カメラ装置とレーザ光の照射する位置を既知とすることで、画像一枚で画像解像度を算出することができ、かつ画像中に含まれるひび割れ幅を計測し、可視化することが可能となった。

2. 計測手法

2.1 レーザ光照射

計測手順をFig. 1に示し、ひび割れ幅の計測手順について述べる。

測定対象のコンクリート平面に、レーザ光を照射する。レーザ光は線形発光可能なものを利用し、3つの光の線から成る幾何図形(正三角形)をコンクリート平面に照射する。

2.2 画像取得

コンクリート表面の高精度な画像を取得するために、高解像度デジタルカメラを用いる。撮像平面内に、レーザ光による正三角形が写りこむように撮影を行う。ただし、レンズの焦点距離は既知であるとする。

2.3 画像解像度算出

画像上から正三角形を抽出し、正三角形の頂点座標を計算し、正三角形の幾何補正を行う。幾何補正のパラメータより、画像解像度を算出する。

2.4 ひび割れ幅計測

ひび割れ幅を計測するには、画像中からひび割れのみを検出する画像処理を行う⁸⁾⁹⁾。検出したひび割れのみを対象に、2.3で算出した解像度情報から、各ひび割れ幅を算出し、解析結果とする。

2.5 開発したシステム

開発したシステムに使用する機器をTable 1に示す。計測器は画素数5,000万程度のデジタル一眼レフカメラ、70-200mm望遠レンズおよび直線が投影できるレーザポインタを3本用いた。また、これらの計測機材は機材を固定できる専用の架台を用いて、一体の計測機材とした。さらに画像確認用PCからカメラをリモートコントロールする仕様とし、三脚を回転するとカメラとレーザポインタは同時に作動するシステムである。撮影画像には、ひび割れと照写線が同時に記録される。さらに、カメラの設置撮影・撮影画像の確認などを効率的に行える。なお、レーザ距離計は、システム評価およびキャリブレーション時に使用する。開発システムの外観をPhoto 1に示す。

3. 実地実験

3.1 実験場所

計測場所は、上下2車線の1日4万台程度の交通量がある

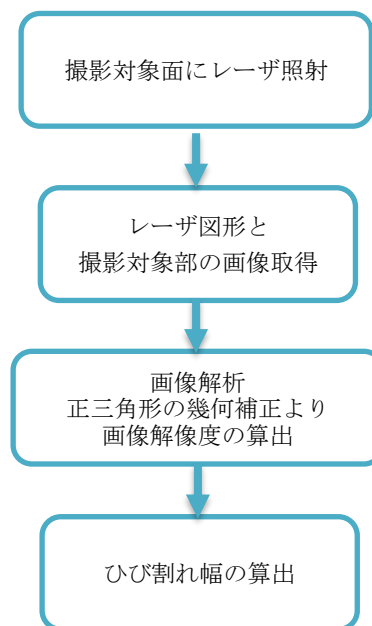


Fig. 1 計測の手順
Measurement Procedure

Table 1 システムの仕様
Specification of System

デジタルカメラ	一眼レフカメラ 5,060万画素(8,688×5,792)
レンズ	望遠レンズ EF70-200mm
三脚	カーボン製 耐荷重10kg
画像確認用PC	ノート型パソコン
レーザポインタ	緑色、線形発光
レーザ距離計	ISO 16331-1適合品 測定範囲0.05～80m



Photo 1 開発システムの外観
Outline of System

国道橋梁の床版下面を対象とした。対象橋梁はPhoto 2に示す国道246号中津川橋下り線(神奈川県厚木市)の左岸の床版下面である。交通量が著しく多いため、橋梁上から機材を設置して計測することができず、地上より橋梁を計測する必要があった。また、河川に架橋しているため、足場等の仮設施設の設置は困難であった。地上のカ



Photo 2 計測対象の橋梁
Measured Bridge



Photo 3 床版下面のコンクリート
Deck Slab Underside Concrete

メラから計測対象の橋梁床版下面までの距離は約6mである。計測した床版下面をPhoto 3に示す。

3.2 撮影のシステム設定

開発システムでは、地上から床版を撮影する方法である。計測状況をPhoto 4に示す。撮影の際には、橋梁点検の効率化を図るため、Fig. 2に示す要領で計測位置の移動する回数を減らす代わりに三脚上部を傾けて撮影した。計測可能な対象との角度は、計測対象面に正三角形が撮



Photo 4 計測状況
Measurement Situation



Fig. 2 計測方法
Measurement Method



Fig. 3 撮影面の分割 (同一系統色の分割面と数字が対応)
Division Area of Photographing (Division Part of The Same Color and Numbers Correspond)

影できればよい。そのため、今回は ± 20 度程度とした。

一般的に、計測しやすい写真を得るためには、ISO感度は可能な限り低くおさえた方がよいが、今回は、三脚上部を傾けて撮影したため、一枚の写真内に距離差が生じることから、被写体深度を考慮し明るさを示すF値は7.1以上とした。

撮影区間は、主桁と対傾構で囲まれる1区間、約 3 m \times 5m(約15m²)とし、12区画(概ね1.4m \times 0.9m/1画像)に分けた。最終的には、それぞれの撮影画像を画像処理した後、ひび割れ抽出画像を合成し、ひび割れMAPを作成した。撮影面の分割をFig. 3に示す。

3.3 レーザ光照射システムによる計測

レーザ光照射システムの外観をPhoto 5に示す。デジタル一眼カメラとレーザポインタは一体化されており、レーザポインタの間隔はそれぞれ240mmとした。本手法的特徴として、Photo 6に示すように、レーザ光で照射した正三角形像を撮影対象物に投影し、ひび割れとレーザポインタによる正三角形を画像に撮像する。複数点を距離計測し、幾何関係を算出する別の計測手法¹⁰もあるが、提案手法は1枚の画像ですべての情報(ひび割れ、幾何関係(解像度))が得られる利点がある。

床版とカメラとの距離と、撮影角度の情報を照射した正三角形の画像上の頂点座標から計算し、幾何補正等を行う。その際に、事前準備として、キャリブレーション作業を行う。レーザポインタで描画する正三角形の初期値が次に示す2条件を満たすことが必要である。

レーザ光照射システムの初期条件

- ①正三角形であること
- ②正三角形が撮影システムからの距離の違いによらず一定(平行投影)であること

キャリブレーションを行う際には、Fig. 4に示すように、撮影システムと平行に2枚の校正用アクリル板を設置した。平行を実現するために、撮影システムにキャリブレーション用の距離計を設置し、計測を行う。Photo 7に示すように、校正用アクリル板には、正三角形の基準マークが描かれている。撮影システムのレーザポインタを調節し、レーザ光が2つの基準マークを透過するように調節し、2つの異なる距離においても平行に正三角形が投影できるように調整する。Photo 8に現場でのキャリブレーションの様子を示す。

ここで、幾何補正や解像度算出は、画像上で既知の3点が分かれば可能であるが、現地での補正を容易にするために、正三角形を投影し、その3頂点を用いている。

3.4 レーザ光照射システムによる解像度算出

画像中のレーザ光は緑色であるため、撮影したデジタル画像の2値処理を行い行った。Fig. 5に示すように、デジタル画像からレーザ光の直線を検出し、直線および交



Photo 5 レーザ光照射システム
Laser Irradiation System

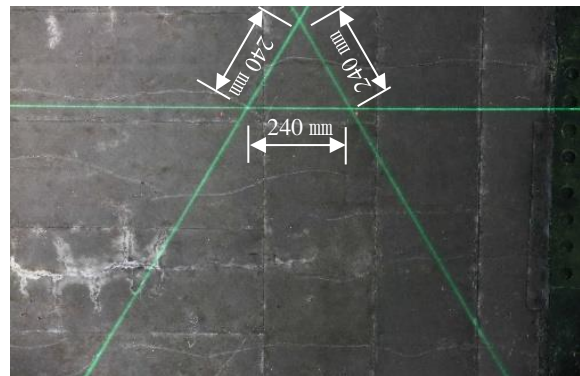


Photo 6 レーザ光で照射した正三角形
Equilateral Triangle of Laser Irradiation

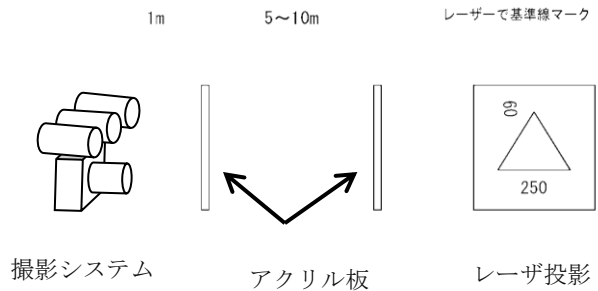


Fig. 4 キャリブレーション方法
Method of The Laser Calibration

点検出には緑色で投影されたレーザ光線分を画像処理する必要があるため、提案システムでは、カラー画像を利用している。画像処理により検出された直線の交点を算出し、正三角形の頂点を求める。

次に、求められた頂点座標から、幾何変換処理および画像の解像度算出処理を行う。床版とカメラが正確に正対している場合には、正三角形が投影されており、1辺の長さ 240mm と既知であるため、解像度は容易に算出でき、Photo 6 の場合は、0.15mm/pixel となった。



Photo 7 校正用アクリル板
Acrylic Plate for Calibration



Photo 8 現場でのキャリブレーション
On-site Calibration

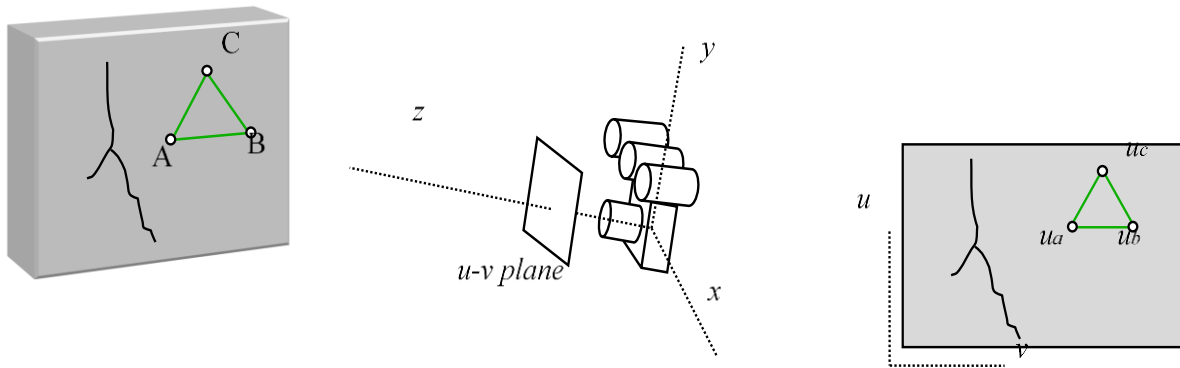


Fig. 6 カメラ座標と画像座標
Camera Coordinates and Image Coordinates

なお、平行投影できなかつた場合でも、解像度算出可能であるが、作業手間が増えるので、平行投影することが望ましい。

平行投影でない場合の具体的な手順は、Fig. 6 に示すように、まずカメラ座標系 x - y - z と画像座標系 u - v を考える。カメラ座標系の z 方向と並行にレーザー光線は出力されているため、正三角形の各頂点 A , B , C の x 成分 A_x , B_x , C_x と y 成分 A_y , B_y , C_y は既知の値である。未知のパラメータ A_z , B_z , C_z を画像上での各 A , B , C の座標値 u_a , u_b , u_c を用いて算出する。

$$A_z = \frac{f \cdot A_x}{u_a}, B_z = \frac{f \cdot B_x}{u_b}, C_z = \frac{f \cdot C_x}{u_c} \quad (1)$$

ここで、 f は焦点距離である。式(1)より、正三角形の頂点座標の 3 成分を算出することができる。これにより、カメラと対象までの距離も決定でき、1 枚の画像の解像度を算出することが可能である。

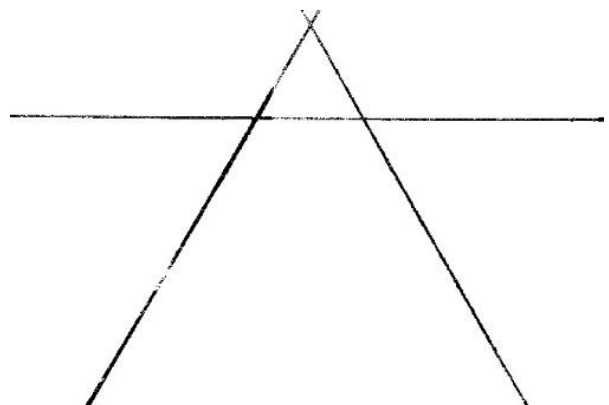


Fig. 5 2値化によるレーザー光の抽出
Detection of The Laser Beam by Binarization



Photo 9 ひび割れ検出面1
Example of Concrete Surface 1

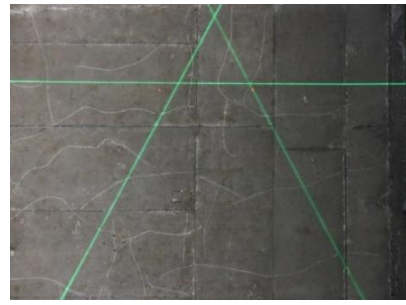


Photo 10 ひび割れ検出面2
Example of Concrete Surface 2

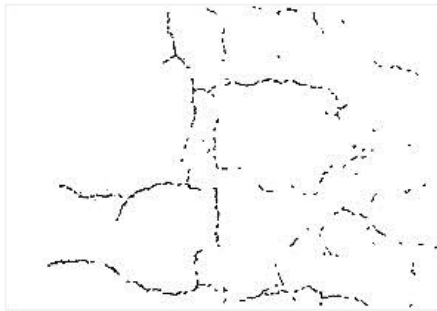


Fig. 7 ひび割れ検出結果1
Result of Crack Detection 1

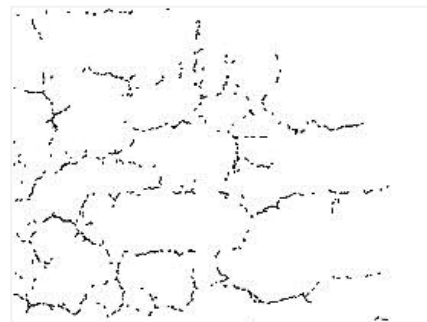


Fig. 8 ひび割れ検出結果2
Result of Crack Detection 2

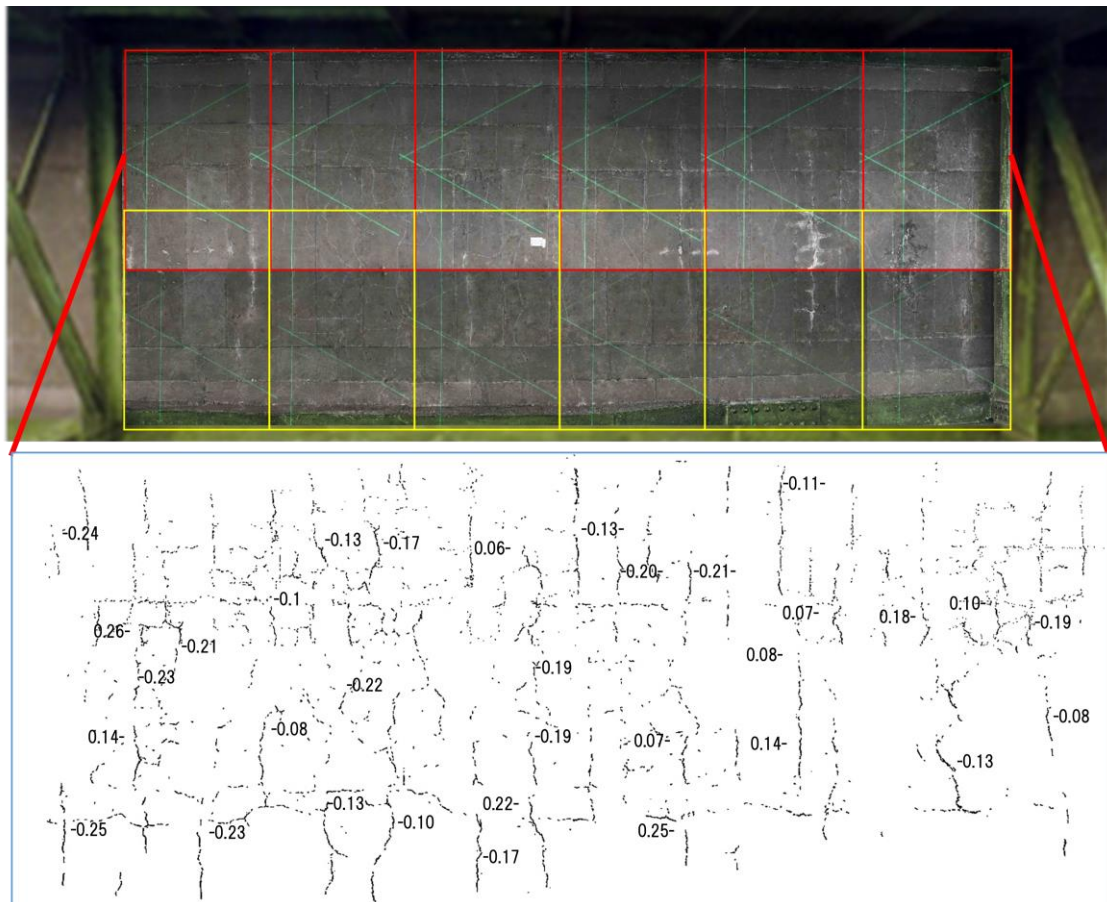
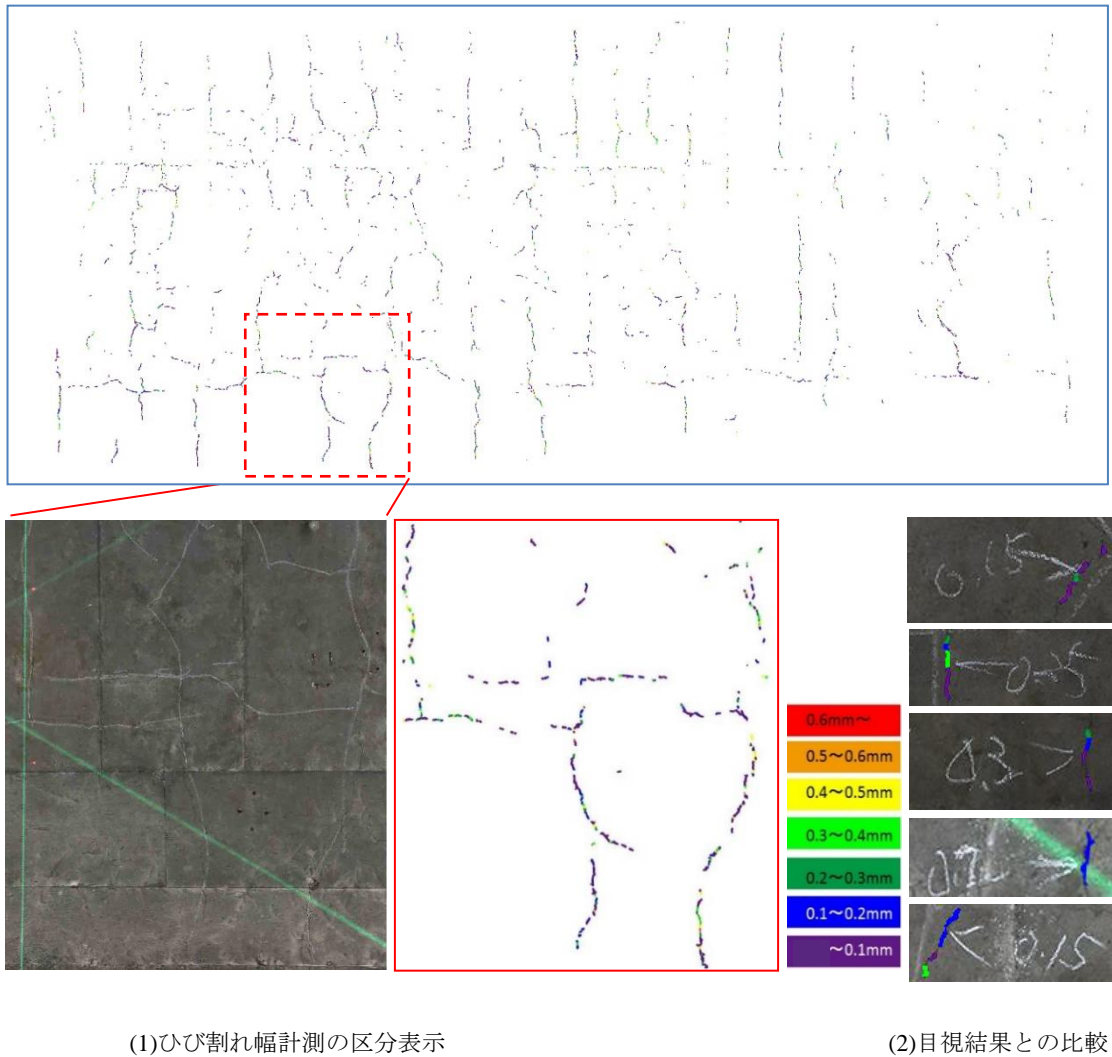


Fig. 9 ひび割れの可視化(ひび割れ検出とひび割れ計測の結果：図中の数値はひび割れ幅を示す)
Crack Visualization (Result of The Crack Detection and The Crack Visualization: The Numbers Indicate The Crack Width)



(1)ひび割れ幅計測の区分表示

(2)目視結果との比較

Fig. 10 ひび割れ幅計測結果
Measuring Result of Crack Width

さらに、この3頂点座標を用いて、対象平面の平面方程式を導出する。例えば、点Aを通る平面式は、法線ベクトルを $\mathbf{n}(l, m, n)$ とすると次のようになる。

$$l(x - A_x) + m(y - A_y) + n(z - A_z) = 0 \quad (2)$$

平面方程式が導けたので、画像座標系の u - v の各点と式(2)の交点を算出することで、画像上の各画素の3次元座標を取得する。これらの3次元座標値から、画像中の各画素の解像度(mm/pixel)を算出することができる。

3.5 ひび割れの可視化

まず、ひび割れを可視化するためには、取得した濃淡画像の中からひび割れのみを検出する必要がある。そこで、ひび割れ検出に有効である、パーコレーションモデルに基づくひび割れ検出手法を適用する⁸⁾⁹⁾。パーコレーション処理とは、固体に液体が染み込む現象であるパーコレーション過程を画像処理としてモデル化し、ひび

割れのような非直線的な細線検出を行う処理である。ここで、Photo 9 と Photo 10 のレーザ光のあるコンクリート表面画像の例に対して、ひび割れ検出結果をそれぞれ Fig. 7 と Fig. 8 に示す。

レーザ光の緑線とひび割れを誤認せずに検出できており、レーザ光照射が、ひび割れ検出精度へ影響がないことが確認できた。

検出されたひび割れ画素と 3.4 節で導出したひび割れ画素の解像度からひび割れ幅を計測する。Fig. 9 に、Fig. 3 で分割したように撮影し、統合した撮影画像およびひび割れ可視化結果を示す。ほとんどのひび割れは幅が 0.2mm 未満のひび割れである。Fig. 10 より、本手法によって、0.2mm 未満の幅(最小 0.1mm の幅)のひび割れを検出することができた。さらに、一部の区画におけるひび割れについて、ひび割れ幅を画像解析により自動的に 0.1mm 幅単位で分類した処理画像の「(1)ひび割れ幅計測の区分表示」と「(2)目視結果との比較」を Fig. 10 中に示す。目視観察によるひび割れ調査では、ある区間のひび

割れの平均的なひび割れ幅を代表値として示すことが多く行われているが、Fig. 10(1)より本方法では、任意の位置におけるひび割れ幅を示すことが可能である。また、Fig. 10(2)に示すように、目視結果と同程度の精度であることも確認できた。

4. まとめ

本開発は戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一つとして実施した。デジタルカメラとレーザポインタを搭載した計測システムにより、ひび割れが発生している橋梁床版を約 6m 離れた下方の位置から撮影し、画像処理によって、ひび割れ幅の可視化が可能となった。なお、実施実験の結果、次のことを明らかにした。

- 1) 実地実験の結果より、床版に発生しているひび割れに対して、0.2mm 未満の幅(最小 0.1mm の幅)のひび割れを検出することができ、ひび割れ MAP を作成できた。
- 2) 画像解析により、ひび割れ幅を 0.1mm の幅で分類した図を得ることができ、コンクリート表面における任意の位置のひび割れ幅を示すことができた。
- 3) 提案手法は、レーザ光照射によって、対象構造物に近接することなく、また、クラックゲージをコンクリート表面に貼り付ける作業をすることなく、1枚の画像から、画像解像度とひび割れ幅を計測することが可能であることを確認した。
- 4) 本システムを適用することで床版劣化の評価を実施することが可能であることを確認できた。
今後は本システムを用いた、コンクリート劣化診断システムの構築を実施する予定である。

謝辞

本技術の研究に当たり、筑波大学 システム情報系 山口友之先生より、多大なご指導を賜りましたことを深く感謝致します。

参考文献

- 1) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)HP : <http://www.jst.go.jp/sip/k07.html>, 2014.9.1
- 2) 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ-メカニズムと対策技術の現状-, 日本建築学会, 2003
- 3) 日本コンクリート工学協会, コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2013-, 日本コンクリート工学協会, 2013
- 4) 小山哲, 丸屋剛, 堀口賢一, 澤 健男: ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), 68(3), pp178-194, 2012
- 5) T. Yamaguchi, S. Hashimoto : Practical Image Measurement of Crack Width for Real Concrete Structure, Electronics and Communications in Japan, Vol.92, No. 10, pp.1-12, 2009, Sep. 2009
- 6) 佐野浩, 大澤廣, 後藤和夫, 堀内宏信: マーカーとデジタルカメラを利用したひび割れ計測システムの開発, 土と基礎, Vol.52, No.6, pp.22-24, 2004
- 7) <http://velodynelidar.com/>, 2017.12
- 8) T. Yamaguchi, S. Hashimoto : Fast Crack Detection Method for Large-size Concrete Surface Images using Percolation-based Image Processing, Machine Vision and Applications, Vol.21, No.5, pp.797-809, Aug. 2010
- 9) 竹田宣典, 石関嘉一, 山田守: 画像処理によるコンクリート構造物のひび割れ計測, 大林組技術研究所報, No.79, 2015
- 10) 吉田次男, 河野幸彦, 石井政博, 小出博: デジタルカメラによるダム表面状態調査, ダム工学, No.18, Vol.2, pp.118-125, 2008
- 11) 道路橋床版の維持管理マニュアル, 土木学会, pp81, 2016