

コンクリート構造物におけるデジタル画像処理技術

中村 秀明*

近年、産業分野にかぎらずあらゆる分野で画像処理技術が進展している。コンクリートの分野においても画像処理技術が構造物の点検等に活用されている。本解説では、画像処理技術についてその概要を簡単に説明するとともに、その簡単な利用方法、さらには、コンクリート分野への活用事例、画像取得技術の現状、画像処理技術の今後の進展について分かりやすく解説する。

キーワード：デジタル画像、画像処理、画像解析、画像診断、ひび割れ、変状

1. はじめに

近年、産業分野にかぎらずあらゆる分野で画像処理技術が進展している。とくに医療の分野では、X線画像やCT画像、MRI画像などを用いた画像診断が病気の発見や治療を行うのに用いられており、最近では、情報処理技術の進展により、得られた検査画像（デジタル画像）から、病変部の位置を見つけ出すコンピュータ支援検出や、検出された病変部の良悪性の識別を医師に提示するコンピュータ支援診断などが行われている。いずれも最終的な診断は医師が行うが、医師の読影を支援し、診断をより確実なものにしている。さらには、読影できる医師が少ない地域においては、医療の地域格差を解消するために、ネットワークを活用した遠隔画像診断も行われている。撮影された検査画像を読影できる経験豊富な専門医は少ないのが現状で、距離や時間の壁を越え、高度な読影が行える遠隔画像診断は今後ますます大きな役割を果たすものと思われる。

一方、コンクリート構造物については、高度経済成長期に構築されたコンクリート構造物の劣化や損傷が増えている。メンテナンスにかかわる技術者は、構造物の診断に際しては、医師と同様のプロセスが必要で、現場の環境条件や点検結果を参考にしながら、場合によってはコンピュータの支援を得ながら、診断し、補修や補強などの対策方法を検討する必要がある。この際、点検時の損傷や劣化状況を撮影したデジタル画像は、メンテナンス技術者の判断を助ける情報の一つとなっている。



* Hideaki NAKAMURA

山口大学大学院
理工学研究科 教授

本解説では、近年コンクリート分野へも利用が進んでいる画像処理技術について、その概要を簡単に述べるとともに、コンクリート分野への画像処理技術の活用、画像取得技術の現状、画像処理技術の今後について述べる。

2. 画像処理技術の概要とその利用

2.1 画像処理技術進展の背景

画像処理技術が進展した背景には、デジタルカメラの普及と近年のめざましいコンピュータ関連技術の発達がある。

画像処理に不可欠であるデジタルカメラの歴史は以外と古く、1988年前後に3.5インチのフロッピーディスクに画像を格納する「電子スチルビデオカメラ」という名称で、各メーカーが開発、販売を行っていた。当時の画素数は28万画素で、その当時は高価であったのと、画素数が少なく、現在のようにパソコンが普及していなかったため、あまり販売は伸びなかった。その後、1995年にカシオがQV-10を発売し、当時はWindows 95がブームになっていたことから、デジタルカメラも徐々に普及してきた。しかしその当時は、解像度が悪かったため、ひび割れを撮影し、その画像からひび割れを抽出したり、ひび割れ幅を測定できるなどは、誰も思わなかった。その後、時代とともに画素数は格段に増え、現在では、1000万画素を越えるデジタルカメラが一般的に普及している。

一方、画像処理するコンピュータの処理能力も格段に進展した。画像処理では、膨大なデータを処理する必要があるため、メモリを多く必要とし、さらには膨大な量の計算を行うため、CPUの処理能力が要求される。コンピュータのCPUに関してはムーアの法則がある。この法則は、インテルの創始者の一人であるゴードン・ムーア博士によって集積回路上のトランジスタ数について語られた経験則であるが、一般には、「CPUの性能は18カ月で2倍になる」という意味で使われており、この法則は今も成り立っている。この法則によるとCPUの性能は、1年半で2倍になり、15年で約1000倍になる。また、ネットワークの通信速度も確実に速くなっており、4年間で約10倍ずつ速度を向上させており、ISDNの1000倍程度の通信速度をも

つ光ケーブルの敷設工事が、全国的に着々とすすめられている。

2.2 デジタルカメラとデジタル画像

ここでは、画像処理に不可欠である、デジタルカメラとデジタル画像について簡単に述べる。デジタルカメラに使われる撮像素子の現在の主流は CCD と CMOS である。携帯電話の内蔵カメラは、従来は CMOS が主流であったが、最近では CCD を採用するものが増えている。逆にデジタル一眼レフでは CMOS が増えている。撮像素子で取り込んだ光は、デジタルカメラ内の処理装置により記録媒体にデジタル画像データとして記録される。

デジタルカメラの基本的な性能は、光の入口である光学レンズと撮像素子によるところが大きい。デジタル画像は、拡大すると画素（ピクセル）と呼ばれる小さな四角から構成されており、この画素が縦横にたくさん集まって詳細な画像が構成されている。図 - 1 に示すように、デジタル画像では、対応する画素ごとに輝度や色などの数値が保持されている。一般には画素数が多いほど、詳細な画像となる。画素数は、撮影された画像の画質を決定する一要因ではあるが、画素数が多いからといって必ずしも画質が良くなるわけではない。撮像素子には大きさがあり、大きいものほど、たくさんの光（情報）を受け取ることができるので、同じ画素数でも撮像素子が大きいほど撮影画像の画質は良くなる。小さな撮像素子に無理矢理たくさんの画素を詰め込めば、1画素あたりの受光量は減り、どうしても無理が出てしまいノイズも多くなる。したがって、撮影画像の画質は、1画素あたりの撮像素子面積（撮像素子面積 ÷ 画素数）が重要となる。つまり、画質は、「空間分解能」だけでなく、「濃度分解能」との両立が重要となるので、デジタルカメラを選定する際には画素数だけで選ばないように注意が必要である。また、デジタルカメラの画質はレンズによっても大きな差が出る。撮像素子に十分な光を届けるためには、大きくて明るいレンズ（F 値の小さいもの）の方が良い。一眼レフタイプのデジタルカメラの画質が良いのは以上の理由からである。

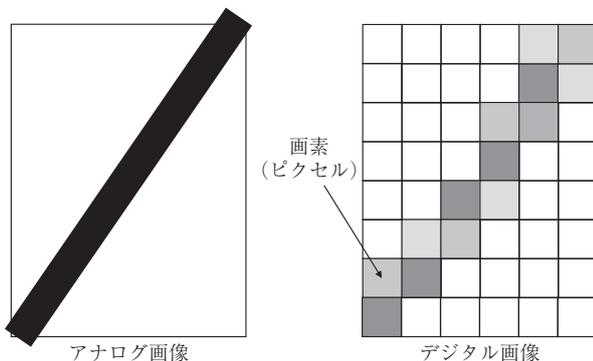


図 - 1 デジタル画像

2.3 画像処理技術

画像処理では、デジタル画像を処理して、自分の思うままに加工したり、画像の中からさまざまな情報を定量的に抽出することができる。コンクリート分野では、一般に後

者がよく用いられている。画像の中からひび割れや変状などの必要な情報を抽出するために、必要のない画像を排除することが画像処理の一般的な手法である。たとえばコンクリートのひび割れを抽出したい場合には、図 - 2 に示すような処理手順で、処理前の元画像から、ひび割れ以外の部分を排除し、ひび割れのみを抽出する。代表的な画像処理は二値化処理であり、これは画素の輝度値が指定した値（しきい値）以上の場合は白に、値未満の場合は黒にする処理である。これにより処理後の画像は、白と黒だけの情報になる。ただし、二値化処理を行うと点々とした画素が残ることがあるため、この場合には、前処理を行ったり、二値化処理を行った後に、ひび割れ部分の画素が消えないように配慮しながら、ノイズ除去を行う必要がある。

画像処理の勘所は、数あるフィルタや処理、変換をうまく組み合わせ、しきい値をうまく決めながら、必要のない画像を排除することである。

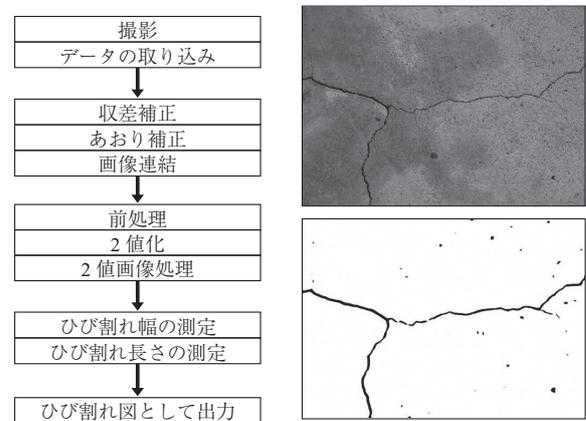


図 - 2 ひび割れ抽出の処理手順

2.4 画像処理技術の利用

業務などに利用し、高速に多量のデータを処理する場合には、専用の機器やソフトウェアが必要であるが、Photoshop をはじめ、一般的な画像処理ソフトでもひび割れ抽出など、ある程度の画像処理は行える。最近ではフリーで使える高機能な画像処理ソフトも提供されている。

図 - 3 は、フリーの画像処理ソフト gimp 2.8¹⁾ でひび割れを抽出した例である。また、図 - 4 は、Photoshop で7枚の画像を合成した後にフリーの画像処理ソフト imageJ²⁾ でひび割れを抽出した例である。imageJ は英語版であるが、医学研究用の画像処理を行うことを目的として作られており、科学研究における画像解析に広く利用されている。いずれも試行錯誤でひび割れ抽出を手動で行う必要が

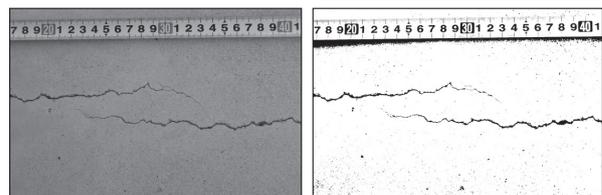


図 - 3 フリーソフト gimp を使ったひび割れ抽出例

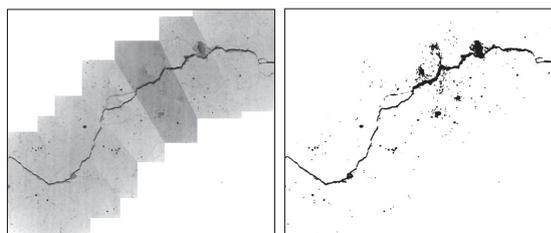


図 - 4 フリーソフト ImageJ を使ったひび割れ抽出例

あるが、慣れてくると比較的簡単に行うことができる。一般的な画像処理ソフトは比較的操作が容易であるが、必要とする処理がなかったり、処理の自動化やカスタマイズが行えない。このようなときには、自分でソフトウェアを作成する必要があるが、この場合、オープンソースの画像処理ライブラリ³⁾を活用すると便利である。この画像処理ライブラリを使えば、一から自分でプログラムを書かなくても、画像処理に必要なアルゴリズムがあらかじめライブラリ化されているため、開発者は、多少のプログラミングの知識があれば、これらのライブラリを組み合わせることによって、画像処理用のソフトウェアを開発することができる。さらに便利に使うためには、有償ではあるが、MATLAB⁴⁾という数値解析ソフトウェアを使う方法もある。MATLABは、行列計算、ベクトル演算、グラフ化や3次元表示などの豊富なライブラリをもったソフトウェアで、Toolbox（画像処理用は、Image Processing Toolbox）と呼ばれる拡張パッケージを導入すれば、画像処理用のアプリケーションが比較的簡単に作成できる。

3. コンクリート構造物への画像処理技術の活用

コンクリート構造物への画像処理技術の活用事例としては、ひび割れ抽出、変状抽出、配筋検査などがある。ここでは、それぞれの事例について簡単に述べる。

3.1 ひび割れ抽出

ひび割れは、コンクリートの代表的な変状であり、デジタル画像から、ひび割れを自動で抽出したり、ひび割れ幅を計測する技術が多く存在する。その先駆けとなったものは1998年に、(株)ニコンシステムから販売されていた「コンクリート構造物診断支援ソフトGS-1」である⁵⁾。ひび割れや変状を完全自動で抽出するものではなかったが、ひび割れ抽出を支援し、オペレーターが判断しながらひび割れの抽出が行えた。また、はく離や浮き、漏水などを対象に、赤外線画像にも対応した、GS-Thermoも販売されていた。表面の変状を把握する可視画像と、内部の変状を把握する赤外線画像とを重ね合わせたり、並列表示することにより複合的な診断を可能としていた。残念ながら両ソフトは、2008年に販売を終了している。

デジタル画像からのひび割れ抽出や定量処理に関しては、いろいろところで研究が進められているが一般的な手順は以下のとおりである。

(1) 画像撮影

カメラと撮影面までの距離、検出したいひび割れ幅など

の条件からデジタルカメラとレンズの組み合わせより撮影画像の空間分解能を決定する。空間分解能は撮影画像の画素に対する被写体の大きさを表す。たとえば、1×1mの撮影面を2000×2000画素（400万画素）で撮影した場合の空間分解能は0.5mmである。ディスプレイ上では、その1/10程度までのひび割れは認識可能である。

(2) 撮影画像の補正処理

撮影された画像は、必要に応じて、レンズ特有の歪みなどを補正するレンズ補正処理（色収差や湾曲収差など）や幾何補正（おあり補正や樽型補正など）を行う必要がある。また、分割して撮影された画像をつなぐ画像連結も必要となる。

(3) ひび割れ検出処理

ひび割れ検出処理は、ひび割れ抽出の要となる処理で、基本的にはひび割れ以外の必要のない画像を排除し、ひび割れのみを抽出する処理である。輝度による二値化処理では、撮影条件によってはうまく行かない場合があり、ウェーブレット変換を用いた方法など、工夫された処理方法がいくつか提案されている^{たとえば6, 7)}。最終的には、ひび割れのみを抽出した二値化画像が得られる。

(4) ひび割れ定量処理

ひび割れのみを抽出した二値化画像を用いて、ひび割れ幅やひび割れ長さの算出、ひび割れ密度の計算などを行う。

3.2 変状抽出

画像処理からコンクリートの変状を抽出するのは、ひび割れ抽出に比べ難しい。その理由は、ひび割れと比べ、変状はいろいろなものがあるため、変状部分のみを認識することが困難であることがあげられる。画像処理による変状の抽出事例は、トンネル構造物で多く見られる。鶴飼ら⁸⁾は、鉄道トンネルを対象に、ひび割れのみならず、閉合ひび割れや漏水、エフロレンスなどの変状を検出できる画像処理技術を開発している。また、塩崎ら⁹⁾は2つの照明を用い、その陰影からひび割れや段差などの変状を抽出する画像処理手法を開発している。

通常のデジタルカメラで撮影された画像に対する画像処理は、表面の情報しか得られないため、浮きやはく離を検出するのは一般に困難である。通常、浮きやはく離は、コンクリート表面を検査ハンマーなどで叩く打音検査で検知される場合が多い。

浮きやはく離、内部欠陥を対象とした画像処理としては、サーモグラフィ（赤外線カメラ）を用いた方法がある。サーモグラフィとは対象物から出ている赤外線を検出し、見かけの温度に変換して、温度分布として画像表示する装置である。コンクリートに浮きやはく離、内部空洞などの欠陥部がある場合には、その熱的性質が健全部と異なるため、熱的刺激（日射や外気温の変動、人為的な加熱や冷却など）を与えると温度分布（熱画像）の差として現れることから欠陥部が特定される¹⁰⁾。画像処理するまでもなく、色分けされた熱画像として見ることで見ることができ、欠陥部がすぐに分かる。

今井ら¹¹⁾は、鉄筋に熱的刺激を与えた場合、鉄筋に腐食が生じていると錆の発生により錆発生部が断熱効果を有

することに着目し、熱画像を処理することによって、鉄筋の腐食評価を行っている。

3.3 その他の活用事例

コンクリート分野への画像処理技術のその他の活用事例としては、デジタルカメラで撮影した画像から配筋状態を自動で計測、判定するシステムがある。2005年11月の耐震強度構造計算書偽装事件以後、施工者は、配筋検査の確実化が求められており、全箇所全数検査に対応し、配筋状態を正確に把握するため、配筋検査を支援するシステムが各社で開発されている。

4. 画像取得（撮影）技術の現状

画像処理技術がコンクリートのいろいろな分野で活用されているが、その要になるのは、質の良い画像の取得（撮影）である。ここでは、画像取得技術の現状についてトンネルの事例と、最近注目を集めている無人飛行体による空撮について説明する。

4.1 トンネル覆工における画像取得

画像取得が特に進んでいるのは、トンネル覆工である。トンネル内は、日射や影の影響を受けにくく、撮影距離も比較的一定であるため、質の良い連続的な画像の取得が可能である。複数台のデジタルカメラやハイビジョンカメラを搭載した撮影用車両で、トンネル内を走行しながら覆工コンクリートの表面画像が取得されている。取得された画像から、ひび割れの幅や密度などを定量化するとともに、ひび割れ展開図や変状図を作成することが可能で、いろいろな機関で実用化が行われている。これらの技術は、国土交通省のNETIS（新技術提供システム）にも何件か登録されており、ひび割れのみならず浮きやはく離、漏水などの検出も行われている⁸⁾。

4.2 無人飛行体によるコンクリート表面の空撮

近年、夏の風物詩である花火を無人飛行体（ラジコンヘリ等）で空撮した動画が人気を集めている¹²⁾。また、本年8月に発生した広島市安佐南区・安佐北区での土砂災害においても、無人飛行体で撮影した被災地の空撮画像が被災状況の把握に役だっている¹³⁾。

維持管理のための点検では、直接目視での点検が困難な場合が多々ある。このような場合に活躍するのが無人飛行

体で、比較的以前から研究開発が行われている¹⁴⁾。

最近の無人飛行体は、非常に高性能でジャイロセンサーおよびGPSを用いて正確に定点ホバリングが可能な自立航行機能を有しているため、遠隔から操作することにより、人が立ち入ること難しい危険区域内での撮影が可能となる。従来からダムなどの調査では、無人ラジコンヘリが用いられていたが、最近ではマルチローターで安定した飛行が可能で機材が登場したことにより、普及が進んでいる。

国土交通省が平成25年7、8月に技術公募を行った「コンクリートのひび割れについて遠方から検出が可能な技術」においても採択された32件中の3件は、無人飛行体を用いるもので、「無人ヘリロボットによるコンクリート構造物のひび割れ検出技術」、「小型無人飛行装置によるコンクリート面の撮影技術」、「無線飛行体によるひび割れ検出システム（無線遠隔操縦飛行体を使用した構造物ひび割れ検出システム）」の3つについて現在実証実験が行われている。

実際に無人飛行体で撮影されたコンクリート表面の画像を図-5に示す。この画像は、山口県と広島県の県境を流れる小瀬川に架かる一般国道2号栄橋（現在架替え中）を下側から写したものである。撮影は、図-6に示す無人飛行体（マルチローターラジコンヘリ）で行っており、橋梁下面を下から撮影できるように上向きにカメラが設置されている。撮影時にカメラの向きなどを安定させるジャイロ装置や手ぶれ防止機能などにより鮮明な撮影が可能である。図-7にラジコンヘリの操作状況を、図-8に撮影された画像を合成して作成した橋梁下表面を示す。

5. 画像処理関連技術の今後の進展

コンピュータ関連技術の進展とともに、画像処理技術は、今後さらに発展するものを思われる。また、画像処理の要となる画像取得技術も進展している。ここでは、コンクリート分野における画像処理関連技術の今後の進展について述べる。

5.1 連続撮影された動画をを用いた画像処理

トンネルの分野では、すでに開発が進んでいるが静止画像ではなく、動画をを用いた画像処理が今後進むものと思われる。トンネル構造物は、カメラからトンネル表面まで



図 - 5 無人飛行体で撮影されたコンクリート表面



図 - 6 無人飛行体（マルチローターラジコンヘリ）

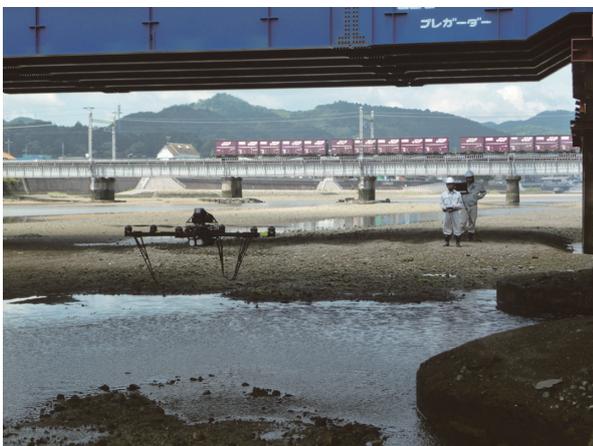


図 - 7 マルチローターラジコンヘリの操作



図 - 8 撮影された画像の合成

の距離が一定であり、トンネル内の明るさも変動が少ないことから、従来から動画像を用いた画像処理が行われている。静止画像では、変状を抽出するのにほぼ十分な解像度のデジタルカメラが存在するが、動画像では十分な解像度のビデオカメラは、これまであまり存在しなかった。しか

しながら最近では、4Kに対応したビデオカメラが各社から出ており、解像度も上がっていることに加え、コンピュータの性能も良くなり、メモリも増えていることから、動画像を用いた画像処理が今後さらに進むものと思われる。

5.2 遠隔画像診断

「はじめに」のところでも述べたが、医療の分野では、遠隔画像診断が行われている。構造物点検現場でも今後は遠隔画像診断が行える可能性がある。図 - 9 に示すよう

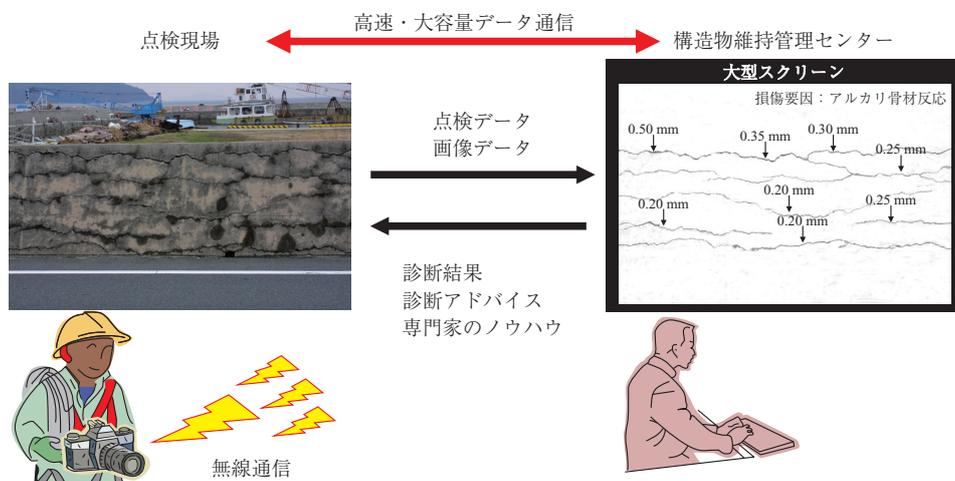


図 - 9 遠隔画像診断

に点検者は、経験が豊富でなくても、点検画像を遠隔地にある構造物管理センターに送信することによって、構造物管理センターに待機しているベテランの技術者から診断結果や点検に関するアドバイスを受け取ることができる。また、送信された画像を瞬時に画像処理し、その結果を現場にフィードバックすることも可能である。

5.3 類似画像検索

類似画像検索とは、対象とする画像に似た画像をデータベースから検索してくる技術である。この技術を用いることで、蓄積された大量の画像データの中から、必要な画像を抜き出してくることができる。構造物に生じているさまざまな損傷事例を画像データベース化することによって、現場で撮影した点検画像を類似検索し、損傷要因を推定したり、どのような対策を行ったかなどを参照することが可能となる。

謝 辞

本原稿の作成にあたっては、山口大学大学院理工学研究科の江本久雄助教より、無人飛行体で撮影された画像の提供を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) The GNU Image Manipulation Program, <http://www.gimp.org/>, 2014.9 閲覧
- 2) RSB Home Page, <http://imagej.nih.gov/ij/>, 2014.9 閲覧
- 3) Open CV.jp, <http://opencv.jp/>, 2014.9 閲覧
- 4) MATLAB - 数値計算言語 - MathWorks 日本, <http://www.mathworks.co.jp/products/matlab/>, 2014.9 閲覧

- 5) 小出 博：特殊用途カメラの毛田「画像診断支援システム」開発とその活用, 映像情報, pp.37-40, 1990.10
- 6) 小山 哲, 丸屋 剛, 堀口健一, 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, Vol.68, No.3, pp.178-194, 2012
- 7) 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
- 8) 鶴飼正人, 長峰 望, 御崎哲一, 坂本保彦：トンネル変状抽出のための高精度画像処理手法の開発, サイバネティクス, Vol.17, No.2, pp.58-62, 2012
- 9) 塩崎正人, 石森章之, 菊地典明, 佐田達典：画像計測による照明の陰影を利用した変状抽出手法の研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.36, No.1, pp.2152-2157, 2014.7
- 10) 佐藤大輔, 坂上隆英, 込山貴仁, 久保司郎：パッシブブロックイン赤外線サーモグラフィによる欠陥判別法に関する基礎検討, コンクリート年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1823-1828, 2006.7
- 11) 今井嵩弓, 大下英吉, 林 詳悟, 福岡養祐：拡張型熱画像処理システムによる鉄筋腐食評価手法の高度化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.36, No.1, pp.2020-2025, 2014.7.
- 12) 2014 吉野川フェスティバル花火空撮プロジェクト, <http://www.youtube.com/watch?v=mSQUTCnMQRy>, 2014.10 閲覧
- 13) 無人ヘリが被災地空撮 国や県に画像を提供, <http://www.youtube.com/watch?v=rjUijp5u0IM>, 2014.10 閲覧
- 14) 酒井通孝, 関 雅樹, 佐藤幸一：小型自律飛行機による構造物の検査手法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.3, pp.1651-1656, 2007, 7
- 15) 国土交通省：老朽化対策に資する点検・診断技術の公募の技術選定結果について～コンクリートのひび割れについて遠方から検出が可能な技術～, http://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000236.html, 2014.10 閲覧

【2014年9月22日受付】



刊行物案内

第 42 回 PC 技術講習会テキスト

インフラのマネジメント, 将来像と今やるべきこと

平成 26 年 6 月

定 価 6,000 円 / 送料 300 円
会員特価 5,000 円 / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会