Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-06-26

赤外線サーモグラフィ装置を用いたアスファルト舗装上からのRC床版内部欠陥検出システムの開発

内田，勇治
松井，俊吾
塩澤，大輝
阪上，隆英

(Citation)
非破壊検査,68(3):132-136

(Issue Date)
2019-03-01

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(Rights)
© 2019 （一社）日本非破壊検査協会

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90007986

Journal of JSNDI Vol.68, No.3, pp.132-136 (2019)

論文

赤外線サーモグラフィ装置を用いたアスファルト舗装上からの RC 床版内部欠陥検出システムの開発

内田　勇治*，松井　俊吾**，塩澤　大輝***，阪上　隆英***

Development of a Non-destructive Inspection System for Internal Flaws in RC Slabs beneath Asphalt Pavements by Infrared Thermography

Yuji UCHIDA*, Shungo MATSUI**, Daiki SHIOZAWA*** and Takahide SAKAGAMI***

Abstract

In recent years, numerous damages in the RC slabs of road bridges due to increasing traffic volume, over-weight vehicles and salt damage caused by anti-freezing agent have been reported. Therefore, development of an effective non-destructive inspection method for detecting such damages in concrete slabs beneath asphalt pavement is essential. Among various methods, the infrared thermography method enables non-contact and traveling investigations to be conducted for wide area of road bridges in a short time. Using this advantage, we developed a detection system for damages in RC slabs beneath asphalt pavement utilizing infrared thermography. The developed system can prevent degradation of thermography data based on extended exposure time by overlapped capturing of ten images from high-speed moving vehicles and can automatically generate a highly comprehensive panoramic image. Visible images of the road surface can also be acquired at the same time, making it possible to more accurately determine obstacles in the RC slabs beneath asphalt pavement.

Key Words　Infrared thermography, RC slabs, Asphalt pavement, Image compositing, Homography transformation

1．緒言

近年，道路橋におけるコンクリート床版は，交通量の増加や車両の大型化に起因する早期劣化，凍結防止剤散布による塩害等の影響による変状が多く報告されている。これらの変状は，ポットホール等の損傷を誘発し，道路橋の使用性能に影響を与える。そのため，損傷発生前に変状を発見し，予防保全的に維持管理されることが必要である。

これらの変状を検出する手法としては，打音法，超音波法，電磁誘導法，赤外線サーモグラフィ法などが適用されている[1),2)]。赤外線サーモグラフィ法は，他検出法に比べ表面からの検出可能距離が短く，舗装面下コンクリート数十mm 程度の深さの変状しか検出できないという短所があるが，検査対象橋の上を走行する検査車両から非接触で広範囲な領域を短時間で調査でき，鉄筋が混在する橋梁でも変状を判別しやすいという利点を有している[3)−5)]。

そこで，本研究では，赤外線サーモグラフィ特性を利用し，アスファルト舗装直下のコンクリート床版の変状を検出するシステムの開発を行った。

2．赤外線サーモグラフィによる道路橋 RC 床版損傷検出の問題点

赤外線サーモグラフィによる道路橋床版の損傷検出の原理は，昼間太陽光で温められたアスファルト舗装および橋梁 RC 床版が日没後に放熱する際，RC 床版内部に生じた空隙，ひび割れなどにより熱伝導が阻害されるためアスファルト表面の温度分布に局所的変化が生じることによる[6)]。

これらの温度変化領域の寸法は，数十mm 以上と比較的大きい。車線幅員方向約 3.5m を 640 画素程度で撮像しても，解像度は約 5.5mm／画素となり，これらの温度変化領域の検出は可能である。しかしながら，橋軸方向にはその長さが長大であるために，赤外線サーモグラフィカメラによる移動撮像が必要となる。このようにして撮像された赤外線画像を観察する場合，走行方向に広範囲な変状がどのように分布しているのかを局所的な画像から判断することは難しい。そのため，走行方向について赤外線画像を合成して，一覧表示できることが望まれる。しかし，画像枚数が膨大なことや，走行速度によって画像の重複量が異なるため，手作業による合成を行うことは現実的ではない。また高速道路の場合，時速 100km 程度の高速走行撮影を行うことから，撮像時の露光時間（インテグレーションタイム）が制限されるため，赤外線画像の質が低下することも問題となる。さらに，赤外線画像だけでは，床版内部の変状による温度変化なのか，表面の状態（凹凸や汚れ）による温度変化なのかを判断しかねる場合がある。そのため，可視画像を同時撮影することが必要である。しかし，長大な道路を個別に撮像した赤外線サーモグラフィおよび可視画像を対応させて閲覧することは不可能ではないが，実運用としてはかなりの困難を伴う。

3．赤外線サーモグラフィカメラによる路面撮影・画像合成システムの構築

上記のような赤外線サーモグラフィ装置による舗装面上からの RC 床版内部欠陥検出の実運用上の問題点を解決するため，路面を撮像した赤外線サーモグラフィの各フレームを自動的に画像合成するシステムを開発した。また，同時に路面

原稿受付：平成 30 年 8 月 10 日　　掲載決定：平成 30 年 11 月 20 日

*　（株）エルゴビジョン（大阪市淀川区東三国 5-5-28）
Ergovision Co., Ltd.
**　西日本高速道路エンジニアリング関西（株）
（大阪府茨木市西駅前町 5-26）
West Nippon Expressway Engineering Kansai Co., Ltd.
***　神戸大学大学院　（神戸市灘区六甲台町 1-1）
Graduate School of Engineering, Kobe University

© 2019 The Japanese Society for Non-Destructive Inspection

を可視ラインセンサカメラによって撮像し，赤外線サーモグラフィと可視画像の位置を自動対応させて撮影し，これらを同時に閲覧できるシステムも併せて開発した。

3.1　システム概要

路面赤外線サーモグラフィと路面可視画像を同期して取得するために，**Fig.1** に示すような路面撮影システムを開発した。車両下部に非接触速度計を設置し，車両の走行速度を計測することで 10mm ごとに同期パルス信号を生成させる。このパルス信号から分周・逓倍回路を用いて，赤外線サーモグラフィカメラ用に 1 パルス／500mm を，可視ラインセンサカメラ用に 1 パルス／1mm を供給する。これらをシャッタトリガとし，赤外線サーモグラフィカメラおよび可視ラインセンサカメラを駆動する。各カメラは，シャッタトリガの 1 パルスが入力されると，1 画像および 1 ラインを撮像するように設定されている。

よって可視ラインセンサカメラは，車両が 1mm 進むごとに 1 ラインを撮像し，赤外線サーモグラフィカメラは 500mm 進むごとに 1 フレームを撮像する。2 つのカメラに入力されるシャッタトリガは同一の信号から逓倍されているため，撮影後どの位置の路面赤外線サーモグラフィ画像であっても，路面可視画像と対応させることが可能となる。赤外線サーモグラフィカメラとしては，FLIR 社 SC5600 を用いた。**Table 1** に SC5600 の基本仕様を示す。

本路面撮影システムは，高速道路走行での適用を想定しており，撮影時の走行速度は時速 80km ～ 100km 程度を考えている。最大走行速度を時速 100km と設定すると，500mm ごとの撮像に必要な赤外線サーモグラフィカメラに入力されるシャッタトリガの周波数は，約 55.5Hz となる。

赤外線サーモグラフィカメラは，撮影領域が車体の熱の影響を受けないようにするため，路面に対し 45° 傾いた状態で取り付けた。また，車線幅 3m 以上を撮像するために，レンズ画角を考慮しカメラの高さを 2.93m とした。

上記の路面撮影システムを用い路面の赤外線サーモグラフィを撮影後，以下に述べる画像のアオリ補正および画像合成を行う。

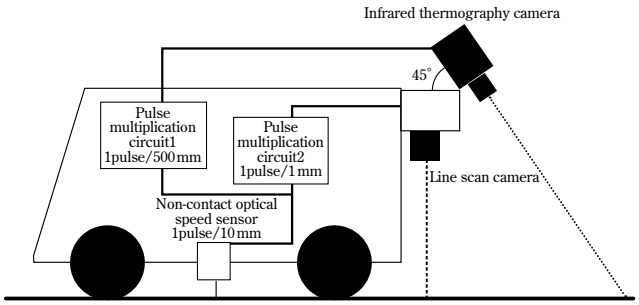


Fig.1　Schematic illustration of developed imaging system

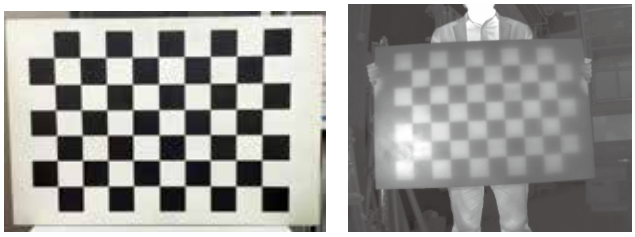
Table 1　Specifications of employed infrared camera

Sensor type	InSb
Noise equivalent temperature difference	＜ 0.02℃
Pixel resolution	640 × 512
Maximum frame rate (Maximum frame rate in subwindow mode)	100Hz (3425Hz)
Trigger input	Optional
Digital video interface	GigE or Camlink

3.2　路面赤外線サーモグラフィカメラレンズ歪み補正

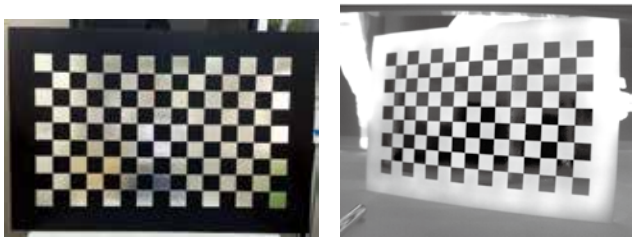
路面赤外線サーモグラフィのアオリ補正および画像合成を正確に行うためには，レンズ歪み補正を行う必要がある。後続する画像の幾何変換処理はレンズ歪みを想定しておらず，歪みが残ったまま処理を適用しても正しく処理できない。本システムにおいては，Zhang [7] のアルゴリズムを用いて，歪み補正パラメータを求めた。可視光カメラレンズにおいては，**Fig.2** (a) に示すようなチェッカーボード模様の平板の姿勢を変えた状態で撮像された数枚の画像を入力し，レンズ歪み補正パラメータを含むカメラ内部パラメータを較正する。較正アルゴリズムは，正確な大きさのチェッカーボード模様の画像上の位置を自動認識し，較正用データとしている。

しかし，赤外線サーモグラフィでは，Fig.2 (b) のようにコントラストが低下し，チェッカーボード模様の自動認識の精度が悪い。本開発においては，**Fig.3** (a) に示すような赤外線サーモグラフィ専用の較正用チェッカーボード模様平板を製作した。



(a) Visible image　　(b) Infrared image

Fig.2　Calibration board for visible and infrared images



(a) Visible image　　(b) Infrared image

Fig.3　Calibration board employed for infrared thermography

Fig.3 (a) に示した平板は，表面全域を放射率の大きな黒体塗料で塗装している。その上に，多数の矩形アルミホイルを貼付してチェッカーボード模様を構成し放射率の差を大きくしている。Fig.3 (b) に示す画像は製作した平板赤外線サーモグラフィで撮影したものであるが，Fig.2 (b) に示した画像と比べると画像のコントラストが大きく向上していることが分かる。以上のような較正用平板を用い，得られた画像からレンズ歪みパラメータ k_1，k_2 が得られる。歪み補正前の画像上で注目する座標 (x, y) は以下の式により，歪み補正された位置 $(\check{x}, \check{y})$ に修正される。

$$\begin{aligned} \check{x} &= x + x\left[k_1\left(x^2+y^2\right)+k_2\left(x^2+y^2\right)^2\right] \\ \check{y} &= y + y\left[k_1\left(x^2+y^2\right)+k_2\left(x^2+y^2\right)^2\right] \end{aligned} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

各画素位置の歪み補正後の位置をあらかじめ計算して，x，y 座標の移動マップ画像をあらかじめ生成しておく。撮影された画像はすべて合成処理の前に歪み補正を行っておくことで，

正確な合成画像が得られるようになる。

3.3　路面赤外線サーモグラフィの自動画像合成

赤外線サーモグラフィカメラは路面に対し 45°傾いており，画像合成のためにアオリ補正を行う必要がある。簡易な台形補正では合成精度が悪いため，**Fig.4** に示すような路面に敷設した補正用チャートを用いて較正を行う。補正用チャートは，アクリル板上に正確な間隔で黒いドットを印刷した白色紙を張り付けたものであり，赤外線画像においてドット位置の識別が可能である。車体に取り付けられた赤外線サーモグラフィカメラで撮像したチャート画像からホモグラフィ変換行列と呼ばれる画像変換行列を求める。

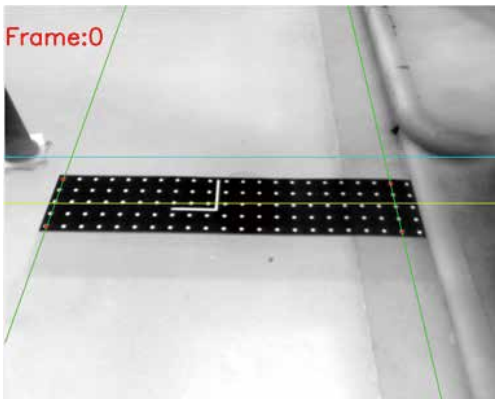


Fig.4　Calibration pattern set on road surface

ホモグラフィ変換行列は入力画像を，それが撮影されたものとは異なる位置・姿勢から撮影された画像に正確に変換する。ただし，被写体が平面であることが条件となる[8)]。

チャート上のドット中心の画像上の斉次座標を（x，y，1），同一のドット中心の路面上の斉次座標を（$\acute{x}$，$\acute{y}$，1）とすると，これら 2 つの間には，3 × 3 のホモグラフィ変換行列 $\boldsymbol{H}$ を用いて次式のような平面射影変換が成り立つ。

$$\boldsymbol{H}\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s\acute{x} \\ s\acute{y} \\ s \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots (2)$$

式（2）の s は不定なスケールファクタである。この式は，3 つの連立方程式が得られるが，これらから不定な s を消去し，ホモグラフィ変換行列のスケーリングを固定するために，3 行 3 列の要素を 1 とする。以上を整理すると以下のような連立方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -x\acute{x} & -y\acute{x} \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -x\acute{y} & -y\acute{y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \acute{x} \\ \acute{y} \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots (3)$$

式（3）において，h_{11} ～ h_{32} はホモグラフィ変換行列の要素を示す。8 つの未知数に対し，2 つの方程式が得られるため，（x，y，1）と（$\acute{x}$，$\acute{y}$，1）が 4 組以上得られれば式（3）が解け，ホモグラフィ行列が得られる。45°の傾きを持つカメラで撮影された赤外線サーモグラフィの各画素の座標を式（2）に示したホモグラフィ変換することにより，路面と正対したカメラで撮影された画像上の座標と同じ扱いが可能となる。**Fig.5** は，Fig.4 に対しホモグラフィ変換を用いてアオリ補正した結果である。

ホモグラフィ変換された赤外線サーモグラフィは単にアオリ補正されているだけではなく，路面に対し正確にスケーリングもされている。本システムでは 1 画素が 5.4 mm になるようにスケーリングされている。よって撮影された各フレームのアオリ補正画像は，500 mm/5.4 mm ＝ 92.6 画素だけ進行方向に並行移動させて画像合成することで，1 枚の路面赤外線サーモグラフィになる。

Fig.1 に示した路面撮影システムを使い，実際の路面を時速 80 km で走行して撮影したデータを合成した。この場合のアスファルト舗装下には変状はなく，アスファルト舗装部分の赤外線サーモグラフィ合成画像は滑らかなグラデーションとなることが予想される。

Fig.6 はフォトレタッチソフトを用い，手動で赤外線サーモグラフィの各フレーム画像に対し台形補正を行い，その後手動画像合成を行ったものである。一方 **Fig.7**（a）に示す画像は，本手法により自動画像合成を行った結果である。なお，Fig.6 および Fig.7 において，左方が撮影車両の進行方向である。Fig.6 では画像の接続部に不整合が確認でき，手動であるため作業時間も大きい。これに対し Fig.7（a）に示した合成画像で

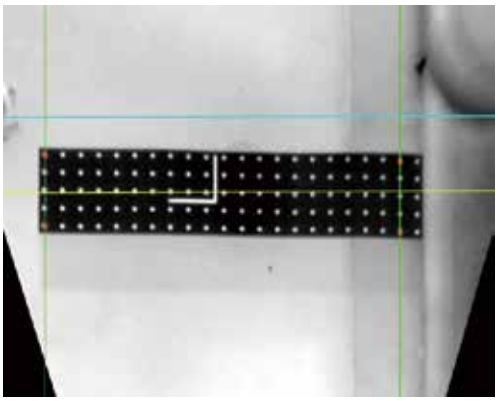


Fig.5　Result of homography transformation

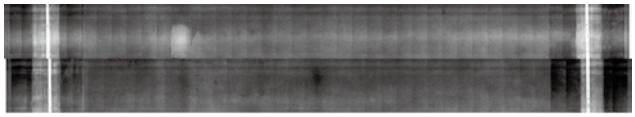
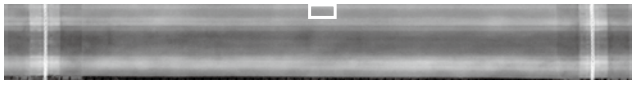


Fig.6　Road surface image (manually composed)



（a）Infrared image

（b）Visible image

Fig.7　Road surface image (automatically composed)

は，接続部の不整合は小さく，自動であるために人手はかからない。また Fig.7 (b) は，同期撮影されたラインセンサカメラにより得られた同一区間の路面可視画像である。撮影・合成後に目視で赤外線サーモグラフィと対応を取る必要がなく，2 つの画像を比較することで高度な判定が可能となる。

4. 路面サーモグラフィ画像シフトスタッキングによる合成画像の画質向上

本路面撮影・画像合成システムを用いることで，効率的な撮影，画像合成が可能となったが，画質において問題があることが判明した。本自動画像合成手法ではアオリ補正が行われたとき，合成境界部で実質的な解像度の不整合が発生する。一例として，Fig.7 (a) の一部（白矩形部 1500 mm × 500 mm）を拡大し，コントラスト強調したものを **Fig.8** に示す。

Fig.8 の矢印で示した位置において，500 mm ごとの合成境界部の解像度の違いによる縦線が確認できる。この縦線は，視認性を阻害するだけでなく，その出現サイズがひび割れ，浮き，空孔などの検出対象のスケールに近いために将来的な自動認識処理などを考慮すると好ましくない。

また，高速走行による撮像の露光時間の減少による画質劣化も問題である。本路面撮影システムでは，露光時間内の車両の進行量は 3.3 節で述べた 1 画素に相当する 5.4 mm 以下でなければならない。この条件を満たす露光時間は，時速 100 km の撮影走行において約 200 μs と非常に短くなり，露光不足から赤外線画像の画質を劣化させてしまう。

4.1 シフトスタッキング手法

上記の問題を解決するため，フレーム時間間隔での進行量を小さくし，シフトして配列した赤外線サーモグラフィの重複部を加算平均することで，合成境界部の解像度の不整合および露光時間不足による画質劣化を抑制する手法を用いた。手法の概念図を **Fig.9** に示す。

フレーム間の車両の進行量を 3 章のシステムに比べ 1/5 の 100 mm とし，アオリ補正後の赤外線サーモグラフィの画像視野の縦寸法（進行方向）が 1000 mm となるようにした。この状態では，赤外線サーモグラフィの視野を 100 mm ずつ車両進行方向にシフトさせながら同一地点を 10 回撮像することになる。合成画像の各画素値は，この 10 枚の赤外線サーモグラフィの値を加算平均したものとする。同一地点の 10 枚の画像上該当箇所では，実質解像度が少しずつ異なる。これは，ホモグラフィ変換が行われるときに，該当箇所の画像上の位置が異なることが原因である。しかし，最終的に合成された画像のどの箇所も，等しく 10 枚の解像度が異なる画像上該当箇所の輝度を積算平均しており，条件が同一であることから画像が滑らかに合成される。

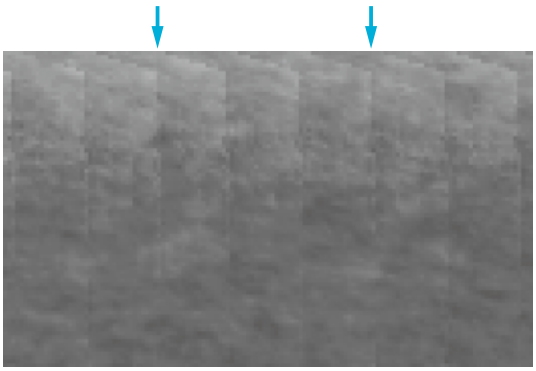


Fig.8 Inconsistencies in composed image (detail)

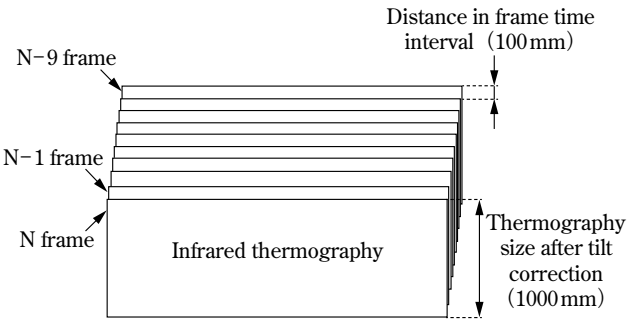


Fig.9 Shift stacking method

さらに，同一地点データを 10 回積算しているため，相対的に暗画面ノイズなどの影響が小さくなり，露光時間の減少による画質の劣化を抑制することが期待できる。

4.2 効果確認試験

4.1 節で説明したシフトスタッキング手法の効果を確認した。まず，露光時間不足により画質が劣化している赤外線サーモグラフィの画質が改善されることを確認した。Fig.9 に示した方法をそのまま検証するためには，大きなサンプルを準備しなければならないが，今回は **Fig.10** のような，小規模の中央内部に空隙のあるコンクリートサンプルを作製し，カメラを静止した状態で撮影を行い，サーモグラフィの加算平均により画質が改善することを確認した。シートヒータおよび熱電対とこれを用いた温度制御可能な電源を用意し，加熱温度を 45℃とした。シートヒータの上にコンクリートサンプルを設置し加熱する。熱電対による計測温度が 45℃に達してから 30 分後に加熱を止め，放熱状態として赤外線サーモグラフィカメラで上方 45° 方向から撮影した。

露光時間をそれぞれ 2000 μs，200 μs に設定して撮像を行った。撮像された赤外線サーモグラフィと，中央部水平プロファイルを **Fig.11** に示す。露光時間 2000 μs のプロファイルでは，中央空隙部の温度が低下していることが明確に確認できるが，露光時間 200 μs のプロファイルではノイズにより確認が難しくなっていることが分かる。

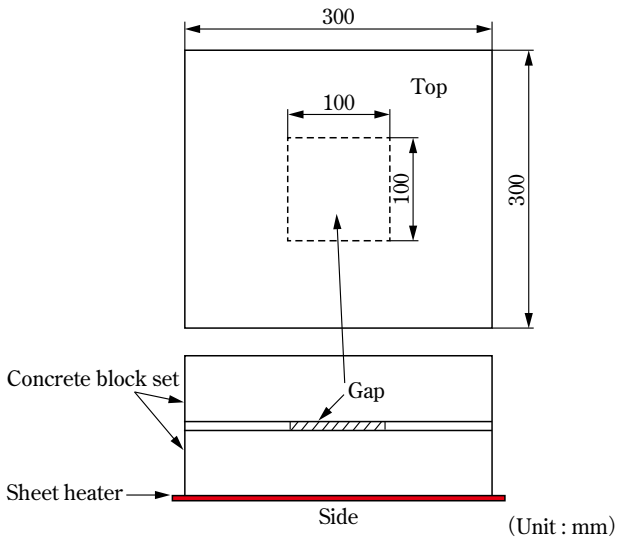


Fig.10 Concrete block set on sheet heater

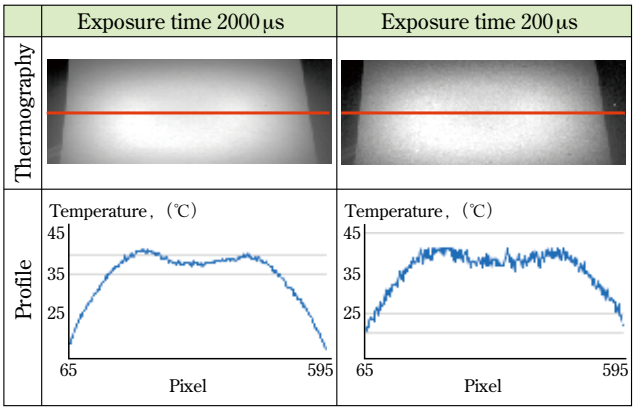


Fig.11 Horizontal line profiles of infrared light intensity on concrete block

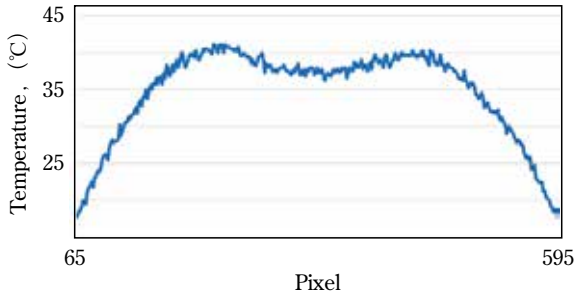


Fig.12 Horizontal line profiles of infrared light intensity indicating the result of the stacking procedure

露光時間 200 μs のデータを前後 10 フレームに関し，積算平均したものが **Fig.12** に示すプロファイルとなる。

Fig.12 に示したラインプロファイルは，Fig.11 に示した露光時間 2000 μs のプロファイルに近づき，中央部の温度低下が明確に確認できるようになっている。数値的には Fig.11 右のプロファイルにおいて局所分散の平均値は 0.86℃に対し，Fig.12 では 0.47℃と半減している。

次に本手法を，Fig.7 (a) に示したデータに適用した結果を示す。

Fig.8 に示したデータと同一地点を拡大した **Fig.13** (b) では解像度の違いによる縦縞が解消されていることが確認できる。

5. 結言

赤外線サーモグラフィカメラで路面を高速走行撮影し，自動画像合成するシステムを開発した。本システムでは，赤外線サーモグラフィに対応する路面可視画像も撮影でき，舗装下のコンクリート床版の変状を判定する場合に路面の状況も加味でき，より信頼性の高い判定が可能となった。

赤外線サーモグラフィの自動画像合成機能に関しては，シフトスタッキング手法により接続領域の分解能の違いによる不整合，高速走行撮影による露光時間減少による画質の低下を防ぐことができた。この結果，視認性がよく，自動解析にも適した画像が得られるようになっている。

以上の開発により，道路橋梁床版損傷点検の精度および効率が向上することが期待される。

また，本システムで得られる赤外線サーモグラフィから床版の変状の位置，面積などを得るためには，別途変状部の抽出処理が必要となる。現時点では人間が合成赤外線サーモグラフィを目視で判定し，フォトレタッチソフトで手動による二値化などを行って損傷を抽出している。しかし効率が悪く，大量の橋梁を処理することが難しい。また，個人差による判定精度のばらつきも問題である。

(a) Entire composed image

(b) Detailed image

Fig.13 Result of shift the stacking method (road surface image)

将来は，これら人間による判定を画像処理による自動判定とする必要がある。例えば，アダプティブな二値化処理などが考えられるが，路面にはジョイント，標示工，水溜りなど様々な外乱が存在するため正しく処理されない可能性が高い。そのため，これら多様な外乱でも人間に近い判定が行われるアルゴリズムが求められる。この問題に関しては，最近は構造物の損傷画像の認識などにも適用され始めている機械学習（深層学習）を利用することなどが考えられる。また，本システムは可視画像も同時取得できるため，2 種類の画像を学習させることで，より信頼度の高い自動判定を得ることが期待できる。

参 考 文 献

1）坪谷　剛，市口恒雄：インフラ長寿命化における道路橋の新たな点検技術の開発，科学技術動向，143, pp.36-43, (2014)

2）鎌田敏郎，阪上隆英，玉越隆史：各種道路橋床版における疲労損傷の非破壊検査システムの開発，土木技術資料，53(3), pp.26-29, (2011)

3）M. Janku and J. Stryk：Application of infrared camera to bituminous concrete pavements: measuring vehicle, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 236, (2017)

4）早野公敏，前川亮太，鈴木哲雄，橋爪秀夫：連続式赤外線撮影による空港アスファルト舗装の層間剥離探査の試み，地盤工学ジャーナル，3(1), pp.13-23, (2008)

5）坪川将丈，水上純一：熱赤外線画像による空港舗装の層間剥離検出法に関する研究，土木学会舗装工学論文集，12, pp.17-24, (2007)

6）金光寿一，柳内睦人，三星智典：舗装熱を利用したサーモグラフィー法による RC 床版内部の欠陥検出に関する研究，土木学会論文集，(727/V-59), pp.95-108, (2003)

7）Z. Zhang：A Flexible New Techique for Camera Calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11), pp.1330-1334, (2000)

8）R. Szeliski，玉木　徹：コンピュータービジョン：アルゴリズムと応用，共立出版，p.32, (2011)