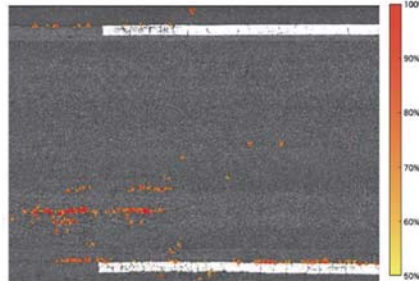


画像認識を用いた道路保全技術の開発

Development of Road Inspection Technology Based on Image Recognition



三宅 寿英	Toshihide Miyake	①
松下 裕明	Hiroaki Matsushita	②
清水 晋作	Shinsaku Shimizu	③
畑 中章秀	Akihide Hatanaka	④
堅 多達也	Tatsuya Katada	⑤
服部 洋	Hiroshi Hattori	⑥
中山 正純	Masayoshi Nakayama	⑦
北嶋 秀昭	Hideaki Kitajima	⑧
和田 貴裕	Takahiro Wada	⑨

あらまし

当社と株式会社ニチゾウテック及び阪神高速技術株式会社は、路面性状測定車「ドクターパト」で撮影した大量の画像に対して人工知能技術の一種であるFCM識別器を適用し、自動的に路面のひび割れを検出する技術を開発した。従来、阪神高速グループでのひび割れ検出作業は人間の目視に頼っていたため、作業効率が良くなく、判断結果に個人差が生じるといった問題があった。今回開発した技術を組み入れたひび割れ検出作業支援ツールを利用することで、ひび割れ検出作業に要する時間を大幅に削減可能であることを確認した。また、補修設計や補修対象路線の優先度を判断する要素の一つであるひび割れ率を完全自動で算出するシステムの開発にも取り組んでいる。

Abstract

Hitachi Zosen Corporation, NICHIZO TECH INC. and Hanshin Expressway Engineering Company Limited developed an automatic pavement crack detection method with image recognition using Fuzzy c-Means classifier. Conventionally, the inspectors have visually detected cracks and calculated the "crack rate". However, the analysis work has been inefficient and judgment results have been unstable, because crack detection work depends heavily on the experience and feeling of the inspectors. Applying the proposed method, it has been confirmed that the time needed to do crack detection work can be reduced drastically. In addition, we are also developing a fully automatic system that calculates the crack rate.

1. 緒言

近年、道路構造物を始めとしたインフラ設備の維持管理の重要性が指摘されており、阪神高速グループにおいては、路面性状測定車「ドクターパト」に搭載されたラインスキャンカメラで撮影した画像から舗装のひび割れやく

ほみなどの損傷を検出し、路面性状の評価を行っている。

しかしながら、ひび割れの検出作業については、ラインスキャンカメラで撮影した画像から作業者が目視で行っているため、以下のような課題があった。

- 大量の画像を処理するのに時間・コストがかかる
- 判断結果に個人差が生じる
- 作業者の集中力が持続せず見落としが発生する

一方で、当社と株式会社ニチゾウテックでは、大阪府立大学と共同でファジィc平均識別器（以下、FCM識別器）を用いた画像認識技術を開発し、駐車場の状況判定（満車・空車）や、ごみ焼却発電施設の燃焼状態判定に応用して来た^{1) 2)}。この画像認識技術を用いて、ひび割れ検出に関する目視作業を自動化できれば、上述の阪神高速グループの課題を解決することが期待される。そこで、当社と株式会社ニチゾウテック及び阪神高速技術株式会社の3社は、阪神高速グループのコミュニケーション型共同研究として、舗装のひび割れ検出への画像認識

① 技術研究所 ものづくり基盤研究センター 博士(理学)
 ② 社会インフラ事業本部 橋梁設計部 博士(工学) 技術士(建設部門)
 ③ 社会インフラ事業本部 橋梁設計部 技術士(建設部門)
 ④ 株式会社ニチゾウテック 技術開発室 博士(工学) 技術士(建設部門)
 ⑤ 株式会社ニチゾウテック 技術開発室
 ⑥ 株式会社ニチゾウテック 技術開発室 博士(情報学)
 ⑦ 株式会社ニチゾウテック 機械・建設事業本部 開発部
 ⑧ 事業企画・技術開発本部 戦略企画部 技術士(建設部門)
 ⑨ 技術研究所 ものづくり基盤研究センター

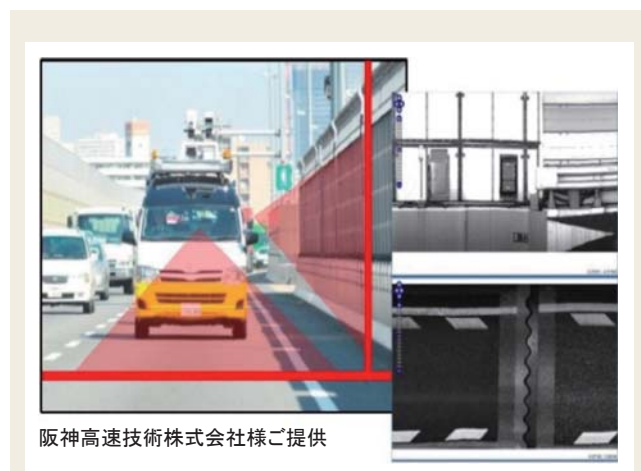
技術の応用に取り組んでいる。具体的には、第1ステップとして、人による目視作業の支援を目的としたひび割れ検出作業支援ツールを開発し、第2ステップとして完全自動でひび割れ率を算出するシステムの開発を行っている。

本報では、まずドクターパトを用いた現状のひび割れ率算出作業とその課題を述べ、続いて、ひび割れ検出作業支援ツールとひび割れ率自動算出システムについて説明する。

2. 現状のひび割れ検出作業

2.1 路面性状測定車「ドクターパト」 ひび割れ

検出作業はドクターパトで撮影された画像に対して行われる。ドクターパトとは、交通規制不要の走行撮影により、路面や側壁の異常、劣化状況を同時に診断することを目的に開発された路面性状測定車である。ドクターパトには路面用と側壁用の2個のラインスキャンカメラが搭載されており、1pixelが1mm角に相当する画質での連続画像撮影が可能となっている(図1)。この他にも、平坦性計測を目的としたレーザー変位計、わだち掘れ計測を目的とした赤外線スリットレーザー及び高速エリアカメラなども搭載されており、統合的な路面性状評価に用いられている。



阪神高速技術株式会社様ご提供

図1 ドクターパトによる画像撮影

2.2 ひび割れ検出作業とその課題 阪神高速

グループにおいては、フレッシュアップ工事の補修設計や補修対象路線の優先度を判断する要素の一つとして「ひび割れ率」を利用している。ひび割れ率は、ドクターパトで撮影した高速道路の路面画像に対し、1車線1径間ごとの代表値として、0.5m×0.5mメッシュ法を用いて算出される。以下に、ひび割れ率の計算式を示す³⁾。

$$\begin{aligned} \text{ひび割れ率}(\%) &= \text{面状ひび割れ率} + \text{線状ひび割れ率} \\ &+ \text{ポットホールおよびはがれ率} \\ &+ \text{パッチング率} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、右辺の各項は次式から求める。

$$\begin{aligned} \text{面状ひび割れ率}(\%) &= (\text{面状ひび割れメッシュ数} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}) \\ &\div \text{調査面積} \times 100 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{線状ひび割れ率}(\%) &= (\text{線状ひび割れメッシュ数} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.6) \\ &\div \text{調査面積} \times 100 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{ポットホールおよびはがれ率}(\%) &= (\text{ポットホールおよびはがれのメッシュ数} \\ &\times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}) \div \text{調査面積} \times 100 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{パッチング率}(\%) &= (\text{パッチングのメッシュ数} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}) \\ &\div \text{調査面積} \times 100 \end{aligned} \quad (5)$$

つまり、ひび割れ率を算出するには、1車線1径間ごとに、大量の画像の中から面状ひび割れ(ひび割れ2本以上)、線状ひび割れ(ひび割れ1本)、ポットホール・はがれ、パッチングの各損傷が発生しているメッシュを検出し、その枚数を積算して各損傷メッシュ数を求めなければならない。

また、ひび割れ率は対象車線の舗装面に対して算出するものであるために、伸縮装置や路肩は除外しなければならない。加えて、ダブルチェックを避ける意味で、画像に写っている隣の車線の舗装面も除外する必要がある。そのため、0%~100%の値をとる「寄与度」と呼ぶ係数を設け、伸縮装置が写ったメッシュは寄与度0%、路肩や隣車線の舗装面が写ったメッシュはその写り込み度合に応じた寄与度を設定し、その寄与度を乗じてから各損傷メッシュ数を積算している。

これらの作業は作業者の目視に委ねられており、大量の画像を処理するのに膨大な時間を要している。このため、ひび割れ率を算出する際の目視作業を支援するシステムを構築すること、更には目視作業を代替する完全自動化システムを構築することが喫緊の課題となっている。

3. ひび割れ検出作業支援ツールの開発

阪神高速グループとの共同研究では、第1ステップとして、作業者の目視作業を支援するツールの開発に取り組んだ。ひび割れ検出作業支援ツールは、画像認識技術を用いてドクターパトの取得画像から自動的にひび割れ箇所を検出した後、検出箇所をひび割れが存在する可能性の高さに応じて色分けして表示するものである。作業者が、この表示を参照しながらひび割れの目視確認作業を行うことで、作業時間の短縮が期待される。

本報では、まずひび割れ検出作業支援ツールで採用したFCM識別器の概要について述べ、続いて、そのひび割れ検出への応用方法及びFCM識別器の学習方法について述べる。

3.1 FCM識別器 ひび割れ検出作業支援ツールでは、画像認識技術としてFCM識別器を使用した。FCM識別器は、クラスタリング手法のひとつであるFuzzy c-Means法を応用したデータ分類技術であり、入

力とその出力が事前に分かっているデータ集合を用いて、その入出力関係を学習し、未知の入力に対しても最適な出力を得ることを目的としている。ここでクラスタリングとは、与えられたデータを外的基準なしに自動的に分類することを意味する。通常のクラスタリング手法では境界線上のデータの扱いに困ることが多いが、FCM識別器ではメンバシップ値の導入により複数のクラスタに所属することを可能としているため、人間の感覚に近い曖昧さを含んだデータ分類が可能となっている。

FCM識別器では、分類したいカテゴリ（例えば、ひび割れあり／なし）をクラスと呼んでいるが、各クラス内も幾つかのクラスタと呼ばれる部分集合に細分化している。FCM識別器の原理を概説すると、ファジクラスタのメンバシップをデータとクラスタ中心とのマハラノビス距離により定義し、それからクラス毎のメンバシップを計算する。クラスタリングアルゴリズムは識別器の前処理に用いられ、識別するクラス毎の大量の画像データをファジクラスタに分け、クラスタのメンバシップ関数の足し合わせを識別関数とする。

3.2 ひび割れ検出方法 FCM識別器を応用したひび割れ自動検出方法について、処理手順に沿って説明する。

(1) 入力画像

阪神高速グループの既存システムでは、ドクターパトによる撮影画像データから、縦4m×横20m、すなわち4,000×20,000pixelの画像ファイル（図2）を抽出し、舗装のひび割れ検出を行っている。開発したひび割れ検出作業支援ツールでも、それと同様の画像を入力として扱うものとした。



図2 入力画像の例

(2) ひび割れ検出処理の概要

ひび割れ検出作業支援ツールでは、入力画像を更に50×50pixelのブロック画像へ細分化し、これをFCM識別器での判定対象とした。このように小さなブロックへ細分化することで、入力画像のどの部分に、どの程度の確度（確からしさ）でひび割れがあるかを示すことが出来る。

ひび割れ検出処理フローを図3に示す。ステップIは、入力画像に対する明るさ・コントラスト調整を行う前処理部分である。ドクターパトでは昼間の走行を想定しているために、ラインスキャンカメラの画像には必然的に日向と日陰の部分が混在している。また、舗装内の含有水分量によっては、車線中央部と両端で撮影画像の明るさにムラが生じている場合もある。そこで、肝心なひび割れ

を消さないよう留意しながら、なるべく全ての画像の明暗むらを無くすような画像処理方法を検討した。

影が写り込んだ画像に明るさ・コントラスト調整を行った結果を図4に示している。検討した手法の効果により、日向と日陰での明暗差が無くなっていることが分かる。

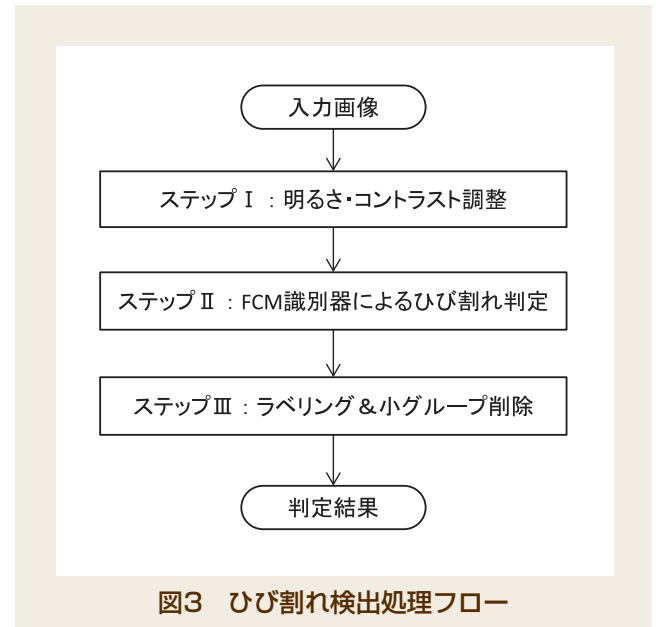


図3 ひび割れ検出処理フロー

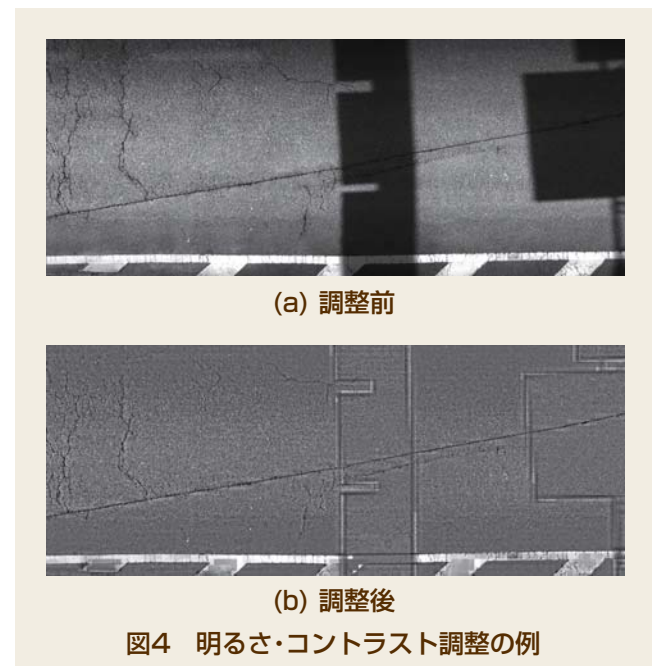


図4 明るさ・コントラスト調整の例

続いてステップIIでは、学習済みのFCM識別器を用いて、50×50pixelのブロック画像毎にひび割れを含む確度を計算する。この際、主成分分析を応用して、処理対象のブロック画像の特徴を損なわないように100次元のベクトルに圧縮し、これをFCM識別器への入力としている。FCM識別器からは、ブロック画像がひび割れを含む確度が出力される。通常、ひび割れを含む確度が50%以上であれば、そのブロックはひび割れありとみなせるが、この閾値を50%よりも高めに設定すれば過剰な検出を抑えることも出来る。なお、FCM識別器の学習方法につ

いては後述する。

続いてステップⅢでは、ステップⅡでひび割れありと判定されたブロックに対して、8方向に所定の個数以上連続するブロックの集まりに同じ番号を割り振る処理、すなわちラベリングによるグループ化を行う。その後、グループのブロック総数が閾値未満であれば、そのグループはひび割れとはみなさない処理(小グループ削除)を行う。以上で述べた通り、ひび割れ検出結果に連続性が無い場合には、ひび割れ箇所ではないと判定することで、ひび割れの過剰な検出を抑えることが出来る。

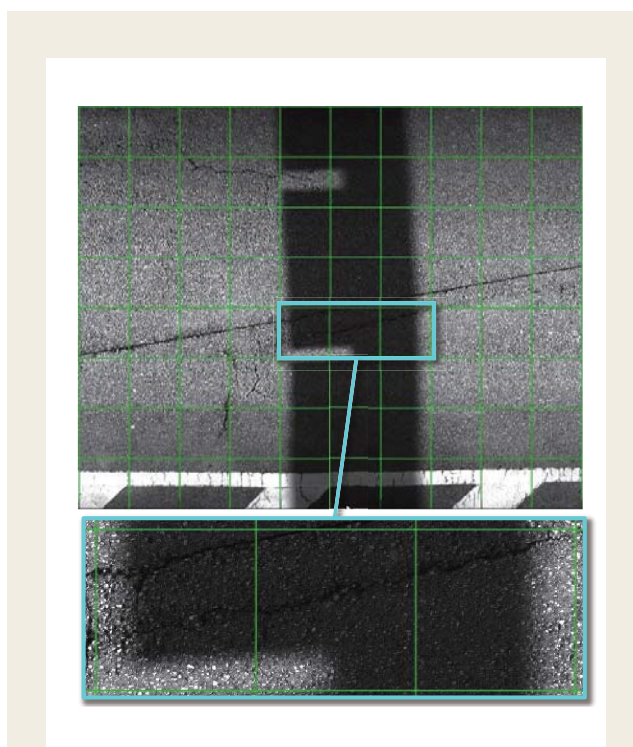
3.3 ひび割れ検出処理の適用例 ここでは、密粒度舗装と排水性舗装に対するひび割れ検出処理の適用結果について述べる。排水性舗装とは、高空隙率の加熱アスファルト混合物を表層あるいは表層・基層に設け雨水を路肩や路側に排水する舗装のことであり、騒音低減にも効果があるとされている。一方、密粒度舗装とは、排水性舗装のような空隙を設けない舗装方法である。従って、排水性舗装の方がより舗装表面が粗いため、目視点検においてもひび割れの検出が困難となっている。

ひび割れ検出処理に用いたFCM識別器の主要パラメータを表1に示す。ここで、50×50pixelのブロックを50%ずつオーバーラップさせながら縦横にスライドさせて判定することで、ひび割れの見落としを防ぐよう工夫した。

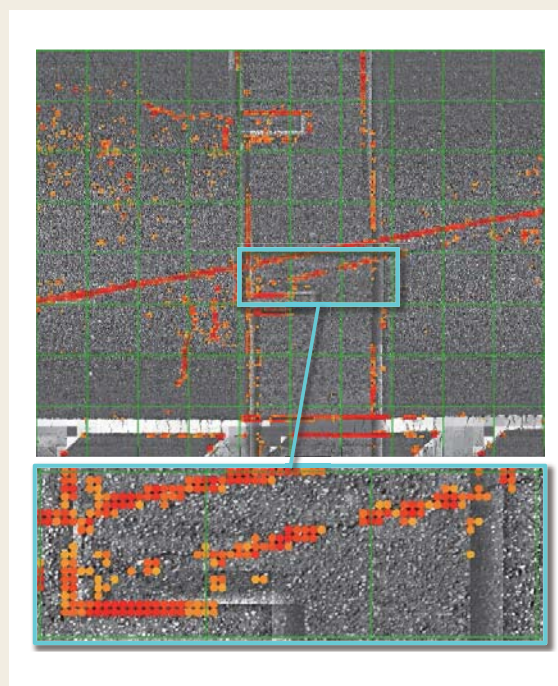
表1 FCM識別器の主要パラメータ

項目	設定値
分類クラス数	2 (ひび割れあり/なし)
クラス数(各クラスの中を幾つのグループに細分化するか)	8 クラス
主成分分析を用いた圧縮次元	100 次元
ブロックサイズ	50 × 50pixel
判定ブロックのオーバーラップ率	縦横ともに 50%

密粒度舗装に対するひび割れ検出結果を図5に示す。ここでは、ひび割れを含む確度が65%以上のブロックを着色して表示している。確度50%を黄色、確度100%を赤色としたグラデーション表示となっている。(a)の処理前の画像に対し、(b)の処理結果では、元々影に覆われた部分のひび割れであっても、適切に検出されていることが分かる。ただし、特に日向と日陰の境目においてひび割れの誤検出が発生している。この問題については、明るさ・コントラスト調整の方法を見直すことで改善を試みている。



(a)処理前

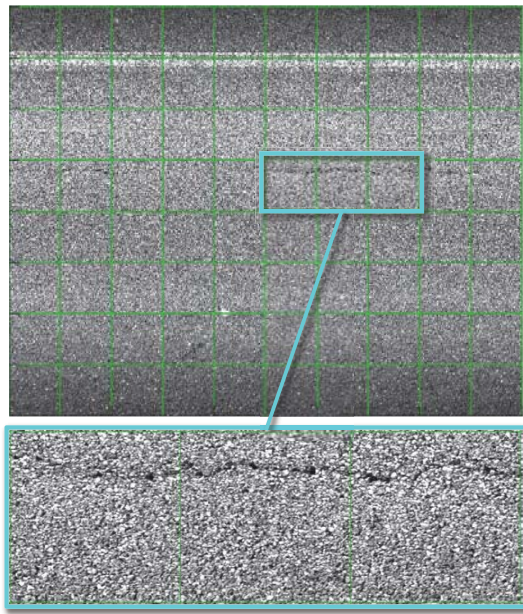


(b)処理後

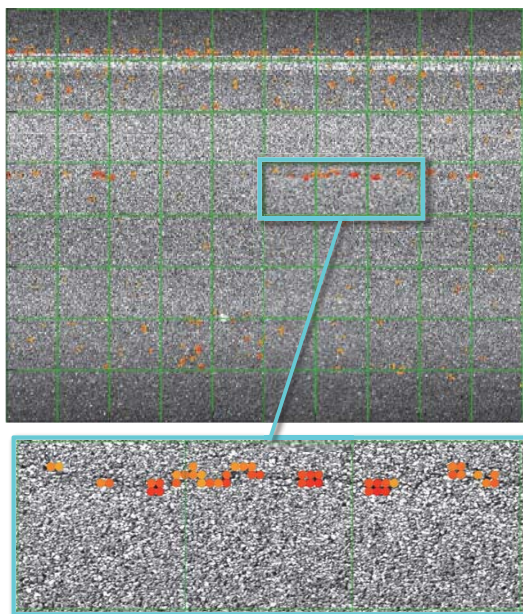
図5 密粒度舗装に対するひび割れ検出結果

次に、排水性舗装に対するひび割れ検出結果を図6に示す。この場合も、ひび割れが適切に検出されており、一般的にひび割れ検出が困難とされる排水性舗装に対しても有効であることが確認できた。

3.4 FCM識別器の学習方法 本節では、FCM識別器の学習に必要な教師データの作成方法と、学習結果の評価方法について述べる。



(a)処理前



(b)処理後

図6 排水性舗装に対するひび割れ検出結果

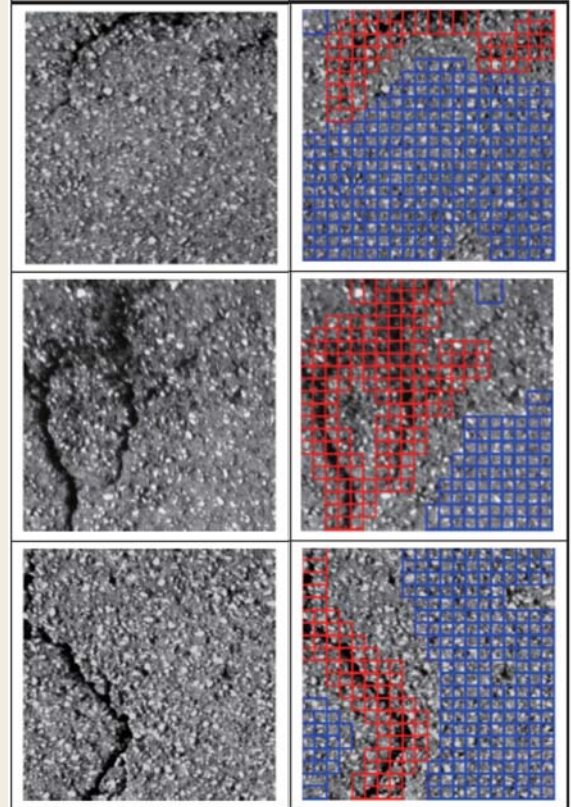
(1) 訓練データの作成

FCM識別器を構築するには、 50×50 pixelの画像群にひび割れあり/なしの正解ラベルが付いた訓練データセットが必要となる。路面画像のどの部分にひび割れがあるかを目視確認した後、ひび割れあり/なしブロックへの切り出しを行った。訓練データの例を図7に示す。図7(b)において、赤色はひび割れあり、青色はひび割れなしとして収集したブロック画像を表している。

また、収集した画像に左右反転及び回転を加えること

で、訓練データの数を増やす工夫も施した。

このようにして、密粒度舗装と排水性舗装を合わせて、ひび割れありブロック画像22,284枚、ひび割れなしブロック画像 23,249枚を収集し、FCM識別器の学習に用いた。



(a) 元画像 (b) 訓練データ収集

図7 訓練データの例

(2) FCM識別器の学習と評価

K-分割交差検証(K-fold cross-validation)を適用して正解率を算出し、FCM識別器の性能評価を行った。K-分割交差検証では、正解ラベル付きのデータをK分割して、そのうち1つを評価データに、残りのK-1個を訓練データとして、学習と精度の評価を行う。この学習と評価をK個のデータのかたまりに渡って順にK回行い、その結果を平均したものを正解率とする。これにより、構築したFCM識別器の未知のデータへの対応能力、すなわち汎化性を評価することができる。

今回、 $K=28$ としてK-分割交差検証を行った結果、密粒度舗装に対して95.8%、排水性舗装に対して92.3%の正解率が得られた。

3.5 実業務での活用 本章で述べたFCM識別器を実装したひび割れ検出作業支援ツール(図8)を製作し、阪神高速グループの点検業務での活用を開始した。従来は1車線1kmあたりの解析に1週間程度を要していたものを、1日程度まで短縮することが出来た。



図8 ひび割れ検出作業支援ツールの画面

4. ひび割れ率自動算出システムの開発

3章では、ひび割れ検出作業支援ツールについて述べたが、完全な自動化までには至っていない。そのため、目視作業を完全に代替するひび割れ率自動算出システムの開発に着手した。連続的に入力されたドクターパトの撮影画像に対して、各種損傷が発生しているメッシュの検出、メッシュごとの寄与度の設定、及び式(1)で示した1車線1径間ごとのひび割れ率の算出までの作業を、完全自動で行うシステムである。ここでは、開発の進め方について説明する。

ひび割れ率自動算出システムの出力画像の例を図9に示す。この例では、伸縮装置を含むメッシュには寄与度0%、一番上と一番下のメッシュはレーンマーク(白線)の写りこみ度合に応じた寄与度が設定されている。また、各損傷が検出された場合には、線状ひび割れ△、面状ひび割れ×、パッチング●のような印を表示している。このような結果が得られれば、式(1)を用いてひび割れ率が計算できることになる。以下に、メッシュ単位でのひび割れ判定、伸縮装置の検出及びレーンマーク検出による寄与度設定の各機能について概要を述べる。

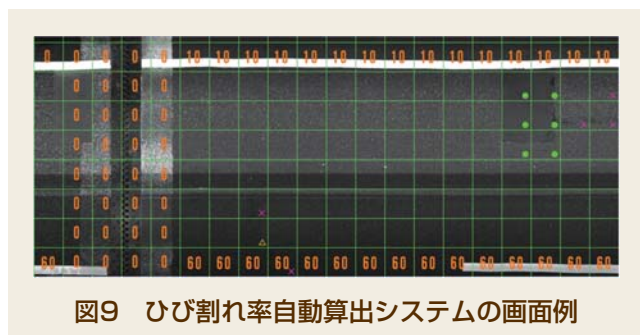


図9 ひび割れ率自動算出システムの画面例

4.1 メッシュ単位でのひび割れ判定 ひび割れ検出作業支援ツールの開発で述べたひび割れ検出結果をメッシュ単位に拡張する方法や、深層学習を応用した方法を用いて、メッシュ画像単位で、健全、線状ひび

割れ、面状ひび割れの3カテゴリに分類する手法を開発中である。

4.2 伸縮装置検出による寄与度設定 本機能では、メッシュ画像単位で伸縮装置部分の写り込みの有無を判定するFCM識別器を構築し、伸縮装置が写り込んでいると判定された場合は寄与度0%と設定する。

4.3 レーンマーク検出による寄与度設定 ひび割れ率は、ドクターパトが走行した車線の舗装面に対して算出する必要があるため、路肩や隣の車線の舗装面もダブルチェックを避けるために除外しなければならない。そこで本機能では、画像に写っているレーンマークを検出し、路肩もしくは隣車線の舗装面が写っているメッシュ画像については、その写り方の度合に応じて寄与度を自動設定する。表2に示す通り、メッシュ画像へのレーンマークの映り込み度合から、寄与度を0%、25%、50%、75%、100%のいずれかに当てはめるようにして訓練データを収集し、FCM識別器を学習させることで、寄与度を自動設定することが可能となる。

表2 レーンマーク寄与度設定の詳細

パターンNo.	0	1	2	3	4	5
画像例						
寄与度						
左側	100	75	50	25	0	0
右側	100	0	0	25	50	75

5. 結 言

本報の内容をまとめると以下の通りである。

- ①路面性状測定車「ドクターパト」による撮影画像に対し、FCM識別器を用いて自動でひび割れ検出を行うひび割れ検出作業支援ツールを製作した。
- ②ひび割れ部分が日陰に覆われていても、適切に検出できることを示した。
- ③K-分割交差検証により、密粒度舗装に対して95.8%、排水性舗装に対して92.3%のひび割れ検出の正解率が得られることを確認した。
- ④本ツールは、阪神高速グループの業務において運用され、ひび割れ検出作業時間を大幅に削減できることが確認できた。

3.2節で述べたひび割れ検出方法では、前処理として主成分分析を用いて特徴ベクトルを抽出し、それをFCM識別器へ入力して各種損傷の分類を行っている。現在は、主成分分析の代わりに、深層学習の一手法である畳み込みニューラルネットワークのフィルタ層を用いて抽出した特徴ベクトルを活用することで、ひび割れ判定やレーンマーク検出の精度向上に取り組んでいる。

また、完全自動のひび割れ率自動算出システムとして、各種損傷が発生しているメッシュの検出、メッシュごとの寄与度の設定及び1車線1径間ごとのひび割れ率の算出までの作業を、完全自動で行う技術を開発中である。

当面の間は広範囲の路面の中でどの辺りに損傷が顕著であるかというスクリーニングとしての使い方など、より作業量が多い用途への適用を考えている。最終的には、補修設計業務のような極めて高い精度が求められる業務への適用を目指し、開発に取り組む所存である。

【謝辞】

本報は、阪神高速グループが取り組んでいるコミュニケーション型共同研究として、当社、株式会社ニチゾウテック、阪神高速技術株式会社で実施した内容をまとめたものです。ここに記し、関係者に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 市橋秀友, 堅多達也, 藤吉誠, 野津亮, 本多克広: ファジィc平均器による駐車場カメラ方式車両検知システム, 日本知能情報ファジィ学会ファジィシステムシンポジウム講演論文集, **2010**, Vol. 22, No. 5, pp. 599-608
- 2) 藤吉誠, 川端馨, 水井一憲, 堅多達也: ごみ焼却プラント運営事業における画像認識技術の活用, Hitz技報, **2014**, Vol. 75, No. 2, pp. 89-97
- 3) 阪神高速道路株式会社: 道路構造物の点検要領, 平成27年7月, pp101-103

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 事業企画・技術開発本部
技術研究所 ものづくり基盤研究センター
三宅寿英
Tel : 06-6551-9312 Fax : 06-6551-9841
e-mail : miyake_t@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Business Planning & Technology Development
Headquarters
Technical Research Institute
Innovative Manufacturing & Technology
Research Center
Toshihide Miyake
Tel : +81-6-6551-9312 Fax : +81-6-6551-9841
e-mail : miyake_t@hitachizosen.co.jp



三宅 寿英



松下 裕明



清水 晋作



畑中 章秀



堅多 達也



服部 洋



中山 正純



北嶋 秀昭



和田 貴裕