



ANDRZEJ POŻARYCKI¹⁾
PAWEŁ RYDZEWSKI²⁾

DIGITAL MACROSCOPIC IMAGE PROCESSING OF ROADWAYS

CYFROWE PRZETWARZANIE MAKROSKOPOWYCH OBRAZÓW JEZDNI DROGOWYCH

STRESZCZENIE. W artykule zwraca się uwagę na możliwości, które wynikają ze zautomatyzowanych procedur analizy makroskopowych obrazów powierzchni jezdni nawierzchni drogowych. Ograniczając się tylko do operatorów przekształceń w dziedzinie przestrzennej, gdzie obraz reprezentowany jest jako dwuwymiarowa macierz, omówiono wybrane przypadki analizy obrazów w kontekście oceny stanu nawierzchni, której częścią jest ocena wizualna. Autorzy próbują również dowieść, że opisane tu metody morfologii matematycznej stanowią narzędzia możliwe do wykorzystania w procesie weryfikacji kryteriów zmęzeniowych. Uwaga autorów skupia się szczególnie na tych kryteriach, których stan krytyczny zdefiniowany został w postaci granicznej powierzchni dopuszczalnych spękań makroskopowych, możliwych do zaobserwowania na powierzchni jezdni.

SŁOWA KLUCZOWE: identyfikacja spękań jezdni, przetwarzanie obrazów cyfrowych jezdni.

ABSTRACT. Automated macroscopic digital image processing techniques for roadways surfaces analyses are considered in the paper. This research is aimed at the conversion operators in domain of space, where the image is presented as a two dimensional matrix. As far, the chosen cases were presented to assess the pavement distresses as a part of visual survey method. The authors also intend to demonstrate that a verification of fatigue criteria is possible using the described herein mathematical morphology methods. Authors attention particularly concerns these criteria for which the critical state was defined as an admissible area of cracks that can be observed on the surface of road pavement.

KEYWORDS: cracks identification, digital image processing, road pavement, roadways surfaces.

¹⁾ Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej, Zakład Dróg, Ulic i Lotnisk; andrzej.pozarycki@put.poznan.pl (✉)

²⁾ Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej, Zakład Dróg, Ulic i Lotnisk; pawel.rydzewski@put.poznan.pl

1. WPROWADZENIE

Procesy wspomagania podejmowania decyzji w systemach utrzymania nawierzchni dróg, zarówno w fazie oceny stanu nawierzchni, jak i projektowania przebudowy jezdni, wymagają zgromadzenia informacji o stanie technicznym nawierzchni jezdni. Wyniki prowadzonych pomiarów i obserwacji dostarczają dużej ilości obrazów wymagających analiz i interpretacji oraz pozwalających na wyznaczenie odpowiednich wskaźników możliwych do wykorzystania w ocenie stanu jezdni lub jej poszczególnych elementów. Konieczne jest tutaj określenie rodzaju i parametrów geometrycznych badanego elementu, wskazanie podstawowych cech jego struktury oraz identyfikacja ewentualnych uszkodzeń. Analiza dostępnych ludzkiemu oku obrazów jest bardzo czasochłonna i obciążona subiektywizmem obserwatora. Dąży się wobec tego do zastąpienia go w rutynowych pracach związanych z interpretacją obrazów. Tworzone są systemy informatyczne pozwalające na przetwarzanie obrazów i automatyzację procesu podejmowania decyzji. Ponadto tego typu systemy umożliwiają analizowanie dużej ilości przypadków, co czyni ocenę stanu nawierzchni bardziej wiarygodną i pozbawioną wad subiektywizmu, charakterystycznego dla metody oceny wizualnej dokonywanej przez człowieka. Zautomatyzowane procedury analizy makroskopowego obrazu powierzchni warstw ścieralnych są najbardziej naturalną alternatywą wobec metody wizualnej oceny stanu nawierzchni drogowych. Podstawowe zagadnienia cyfrowego przetwarzania obrazów opisane zostały w pracach [1 - 4]. W pracy [5] można znaleźć wiele praktycznych przykładów cyfrowego przetwarzania obrazów.

W kolejnych rozdziałach pracy, autorzy pokazują jak, korzystając z podstawowych przekształceń obrazu i analizy morfologicznej obrazów cyfrowych, można uzyskać efektywne narzędzia do wspomagania podejmowania decyzji w systemach oceny stanu jezdni dróg. Do opracowania zamieszczonych przykładów wykorzystano środowisko obliczeniowe Mathematica w wersji 8.0.1 [6].

2. CECHY OBRAZÓW CYFROWYCH W KONTEKŚCIE IDENTYFIKACJI STANU JEZDNI DROGOWYCH

Najczęściej dostępny w drogownictwie dwuwymiarowy obraz cyfrowy składa się z wielu elementarnych pól nazywanych pikselami. Rozmieszczenie elementów obrazu realizowane jest na bazie siatki kwadratowej. Uzyskujemy

1. INTRODUCTION

The decision support processes used in the road pavement maintenance systems require collecting pavement condition data, both at the stage of evaluation and selection of the appropriate treatment technique. The related measurements and observations provide a lot of images, requiring analysis and interpretations, which can be used to establish appropriate indicators for condition evaluation of the whole carriageway or its respective components. To this end it is necessary to define the type and geometric parameters of the component, its main structural characteristics and identify the existing damage, if any. Visual evaluation of images is most time-consuming and subjective due to human factors. Therefore, other methods are used as far as possible in routine image interpretation activities. Information Technology (IT) systems are created to process images and automate its analysis and interpretation. As an additional benefit, these systems allow analysing a larger number of cases, which makes the pavement condition evaluation more reliable and free of defects resulting from bias involved in visual evaluation. Automated macroscopic evaluation of the wearing course surface image is the most natural alternative to visual evaluation of road pavement condition. The main issues relating to digital processing of image data are described in the following publications: [1 - 4]. The paper [5] provides a number of practical examples of digital image processing.

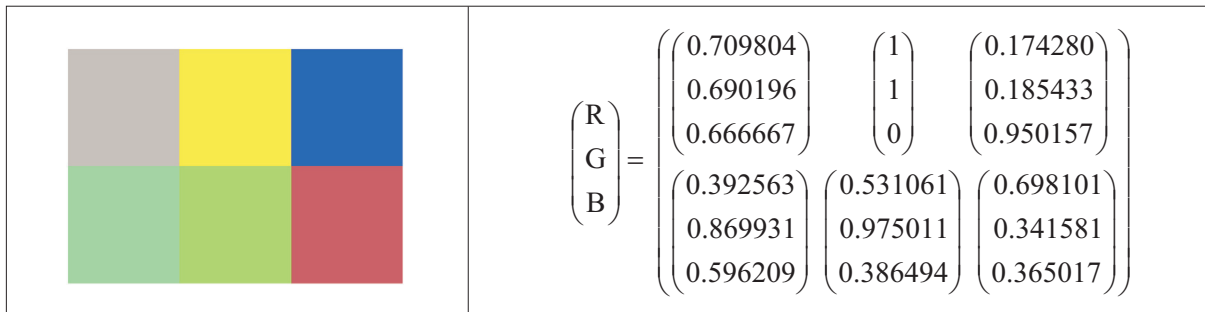
In the following sections the authors present how selected basic transformations and morphological analyses of digital images may be used to obtain efficient decision support tools for pavement condition evaluation. Computation system Mathematica, ver. 8.0.1 was used in these examples [6].

2. CHARACTERISTICS OF DIGITAL IMAGES RELATIVE TO IDENTIFICATION OF ROAD PAVEMENT CONDITION

The two-dimensional digital image used most often in road engineering comprises of multiple unit areas are called pixels. The image items are localised within a square grid. In this way a digitalised image is obtained, which can be converted into a matrix with x number of columns and y number of rows. The number of rows and columns in the matrix depends on the image resolution expressed in dpi (dots per inch) or ppi (pixels per inch). Choosing the appropriate resolution of digital image is of primary importance as it determines the level of recognition of the image details.

cyfrowy obraz możliwy do zapisania w formie macierzy o x wierszach i y kolumnach. Ilość wierszy i kolumn w macierzy związana jest z rozdzielczością obrazu określaną w jednostkach dpi (ang. *dots per inch*) lub ppi (ang. *pixel per inch*). Decyzja o wyborze rozdzielczości obrazu cyfrowego jest bardzo ważna, ponieważ decyduje o stopniu rozpoznawania szczegółów obrazu.

Poszczególne piksele w obszarze obrazu przypisuje się atrybuty w postaci liczb. Wartości tych liczb określają barwę piksela. W zależności od struktury opisującej piksel mówi się o rozdzielczości bitowej lub głębi bitowej. W języku potocznym często wykorzystuje się pojęcie „liczby kolorów”. W specyfikacji modelu kolorów RGB (Red, Green, Blue) piksel opisany jest wektorem 3-elementowym (tzw. kanały R, G, B). Do każdego kanału przypisuje się wartość liczbowa, np. z przedziału od 0 do 1 {kanał czarny – (0, 0, 0) oraz biały – (1, 1, 1)}. Przy 16 bitowej reprezentacji piksela przydziela się na każdy kanał odpowiednio 5 - 6 - 5 bitów. Na Rys. 1 pokazano prosty, dwuwymiarowy obraz dany modelem RGB.



Dla skali odcieni szarości wektor (a) przypisany pikselowi może być jednoelementowy: $(a) \wedge a \in \langle 0,1 \rangle$. W przypadku obrazu binarnego piksel określony jest już tylko przez wartość 0 lub 1 (czarny lub biały). Szersze omówienie klasyfikacji rodzajów obrazów cyfrowych można znaleźć w pracach [1], [2], [5].

3. IDENTYFIKACJA ELEMENTÓW JEZDNI

3.1. WYKRYWANIE KRAWĘDZI ELEMENTÓW OZNAKOWANIA POZIOMEGO

W rozdziale przedstawiono przykłady stosowania metod z wykorzystaniem przekształceń morfologicznych do identyfikacji różnych elementów jezdni. Pokazano przykład

A value is assigned to each pixel within the image area. These values define the pixel colour. The structure describing each pixel is referred to as bit resolution or bit depth. In non-technical language the term “number of colours” is often used to describe this parameter. In specifications based on RGB (Red, Green, Blue) colour model each pixel is represented as a 3-component vector (so-called R, G, B channels). A numerical value is assigned to each channel, for example from the range 0 to 1 {black – (0, 0, 0) and white – (1, 1, 1)}. In the 16-bit/pixel representation 5 - 6 - 5 bits are assigned to the channels respectively. A simple, two-dimensional image based on RGB model is presented in Fig. 1.

In a greyscale model one-component vector (a) may be assigned to each pixel as follows: $(a) \wedge a \in \langle 0,1 \rangle$. In binary images either 0 or 1 (black or white) are assigned to pixels. For more information on classification of digital images see the following publications: [1], [2], [5].

Rys. 1. Przykład obrazu RGB o wymiarach 3×2 (po prawej – macierz wartości RGB)
Fig. 1. The example of RGB image of size 3×2 (on the right - the matrix of RGB values)

3. IDENTIFICATION OF CARRIAGEWAY COMPONENTS

3.1. EDGE DETECTION OF PAVEMENT MARKINGS

This section presents examples of techniques in which morphological transformations are used to identify the various carriageway components. It shows application of edge detection algorithm for identification of pavement

zastosowania algorytmu wykrywania krawędzi do identyfikacji elementów oznakowania poziomego oraz propozycja algorytmu identyfikacji elementów powierzchniowych urządzeń podziemnych. Rozdzielczość analizowanych zdjęć ortogonalnych w obu prostopadłych do siebie kierunkach wynosi 96 dpi. Wymiary pierwotnych zdjęć poddanych analizie wynoszą 1500×1080 pikseli. Głębokość kodowania kolorów wynosi 8 bpch (8 bitów na kanał).

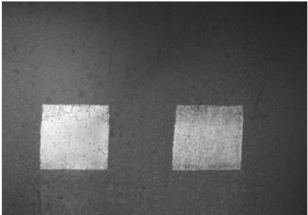

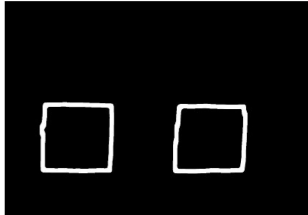
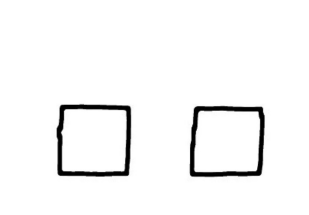
Do wskazania krawędzi elementów oznakowania poziomego można wykorzystać algorytm Canny'ego. Algorytm ten zapisano w kodzie środowiska obliczeniowego Mathematica, między innymi w oparciu o prace [7], [8]. Jego skuteczność w wykrywaniu krawędzi obiektów na obrazie cyfrowym przetestowano na przykładzie linii oznakowania poziomego P11. Graficzną ilustrację etapów przetwarzania tego obrazu przedstawiono na Rys. 2. Uzyskany rezultat pozwala na łatwą wektoryzację obrazu i określenie pola powierzchni zidentyfikowanych elementów. Algorytm może być bardzo przydatny w budowaniu baz danych o elementach oznakowania poziomego dla rozległych sieci drogowych.

markings and proposed algorithm for identification of catch basin grates. The analysed orthogonal images have a resolution of 96 dpi in the two perpendicular directions. The original images have the size of 1500×1080 pixels. The colour depth is 8 bpc (bits per channel).

For edge detection of pavement markings Canny edge detection algorithm may be used. This algorithm has been implemented in the Mathematica computing environment and it has been described in [7], [8]. Its efficiency in detecting edges on digital images has been validated by line marking P11. The image processing steps are illustrated in Fig. 2. The result obtained in this way allows simple vector conversion of image and determination of the surface areas of the identified objects. This algorithm may be very useful in building databases containing information on pavement markings on road networks covering large areas.

Rys. 2. Wykrywanie krawędzi metodą Canny'ego na przykładzie linii P11

Fig. 2. The Canny edge detection method based on example of P11 line

<p>Obraz pierwotny Original image</p> <p>a)</p>	<p>Binaryzacja (próg = 0,6) + operator domknięcia z maską 15×15 Binarisation (threshold = 0.6) + closing operator with kernel 15×15</p> <p>b)</p>	<p>Algorytm Canny'ego + Filtr maksymalny z maską 10×10 Canny algorithm + maximum (dilation) filter with kernel 10×10</p> <p>c)</p>	<p>Operacja negacji Obraz wynikowy Negation operation Output image</p> <p>d)</p>
			

3.2. IDENTYFIKACJA URZĄDZEŃ POWIERZCHNIOWYCH INFRASTRUKTURY PODZIEMNEJ

W przypadku studzienki ściekowej bardzo charakterystyczna jest kratka ściekowa (wlew studzienki). Ponadto typowe rozwiązania konstrukcyjne tego typu urządzeń

3.2. IDENTIFICATION OF ROAD IRONWORK ITEMS


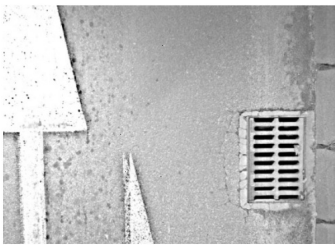
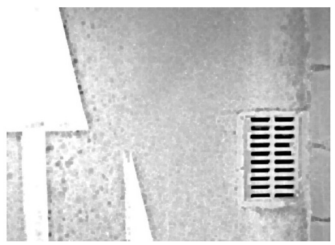


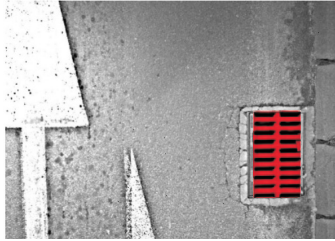
The catch basin grate (gully inlet) is a characteristic part of catch basin. Besides, gratings have similar dimensions due to standardised design, which makes their identification on digital image a relatively simple and universal operation.

zapewniają zbliżone wymiary, przez co procedura wykrywania tych elementów na obrazie cyfrowym jest relatywnie prosta i uniwersalna. Przy założeniu, że obraz wynikowy ma umożliwić obliczanie powierzchni wlewu, jednym z możliwych rozwiązań jest ścieżka w postaci sześciu etapów zilustrowanych na Rys. 3.

One of the ways to obtain output image subsequently used for inlet area calculation is the 6-step process illustrated in Fig. 3.

Rys. 3. Lokalizowanie kratki studzienki ściekowej na obrazie cyfrowym

Fig. 3. Detection of catch basin grate on digital image

<p>Obraz pierwotny Original image</p> <p>a)</p>	<p>Wyostżnienie obrazu + poprawa jasności + korekta gamma Image sharpening + brightness adjustment + gamma correction</p> <p>b)</p>	<p>Operacja domknięcia Closing operation</p> <p>c)</p>
		
<p>Binaryzacja (próg = 0) + filtr minimalny Binarisation (threshold = 0) + minimum (erosion) filter</p> <p>d)</p>	<p>Wykrywanie krawędzi obiektu + operacja otwarcia Object edge detection + opening operation</p> <p>e)</p>	<p>Obraz wynikowy Output image</p> <p>f)</p>
		

3.3. SEGMENTACJA POWIERZCHNI JEZDNI

Dobór samych operatorów i kolejności ich użycia w procesie przetwarzania obrazu zależy ściśle od celu, który zamierza się osiągnąć. Jeżeli na obrazie pierwotnym (Rys. 4a) chce się wskazać obszary nawierzchni wykonanej z różnych mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA), kolejne etapy przetwarzania obrazu mogą składać się z kolejnych czynności zilustrowanych na Rys. 4. W zaproponowanym

3.3. SEGMENTATION OF ROAD SURFACE IMAGES

Selection of image processing operators and sequence of their application in the process is strictly related to the pre-defined goal. If the input image (Fig. 4a) is to be processed to show areas made with different asphalt mixtures, the process may follow the path illustrated in Fig. 4. The proposed step-by-step procedure uses single-pixel operations (steps Nos. 3, 6, 8), neighbourhood operations (steps




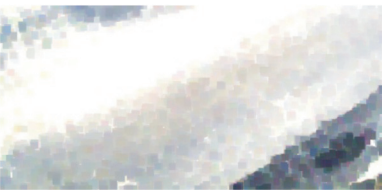

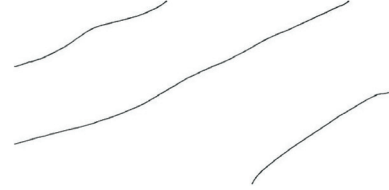


algorytmie wykorzystywane są przekształcenia punktowe (etap 3, 6, 8), przekształcenia kontekstowe (etap 4, 5, 6, 7) i morfologiczne (etap 2). Jak wynika z obrazu pierwotnego, przedstawiony algorytm postępowania prowadzi do zaznaczenia linii granicznych obszarów, w stosunku do których można przypuszczać, że zastosowano inne materiały kamienne w mieszance mineralno-asfaltowej.

Z doświadczeń autorów uzyskanych w trakcie prac wynika, że wykorzystanie dużej ilości przekształceń, zwłaszcza kontekstowych, skutkuje znaczącym wzrostem zapotrzebowania na pamięć RAM komputera klasy PC.

Nos. 4, 5, 6, 7) and morphological operations (step No. 2). As it can be seen on the input image, the procedure leads to marking the boundaries of areas which probably differ in terms of the mineral component used for production of the asphalt mixture.

According to the authors' practical experiences gained in the present research, a large number of operations, neighbourhood ones in particular, leads to a significant increase in the demand for RAM on the PC.

Rys. 4. Automatyczne wyróżnianie obszarów przy użyciu różnych przekształceń obrazu nawierzchni bitumicznej
Fig. 4. Automatic detection of areas using different image transformations on bituminous pavement image

<p>a) Obraz pierwotny Original image</p>	<p>b) Operacja domknięcia Closing operation</p>	<p>c) Korekta jasności Brightness correction</p>
		
<p>d) Wyostrenie obrazu Image sharpening</p>	<p>e) Filtr medianowy Median filter</p>	<p>f) Algorytm Canny'ego + binaryzacja Canny algorithm + binarisation</p>
		
<p>g) Filtr minimalny (maska 4 × 4) na tle filtra medianowego Minimum (erosion) filter (kernel 4 × 4) against the background of median filter</p>	<p>h) Obraz wynikowy na tle obrazu pierwotnego Output image against the background of original image</p>	
		

4. IDENTYFIKACJA NIEJEDNORODNOŚCI NAWIERZCHNI

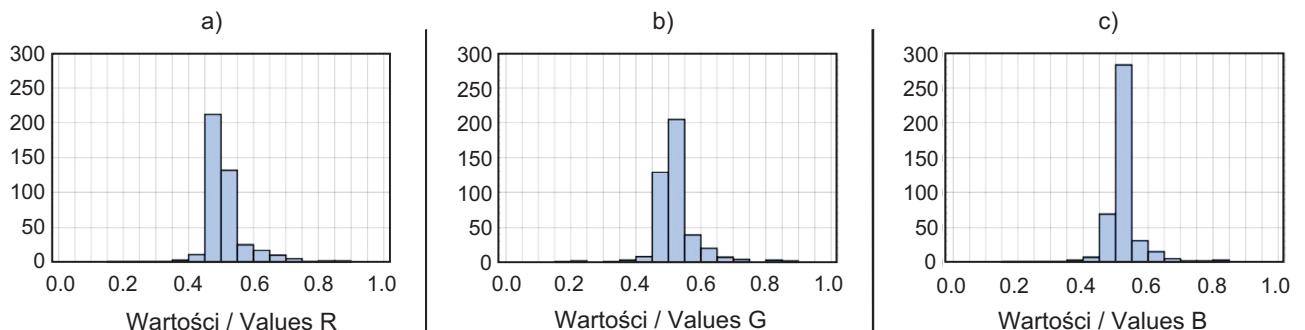
4.1. PROGOWANIE OBRAZU

Rezultaty eksperymentu, w którym wykorzystano najprostszy typ analizy, stosując powszechnie znane operatory obrazu, przedstawiono na przykładzie spękanej nawierzchni bitumicznej. Na Rys. 5 zilustrowano przypadek powierzchni jezdni z „kilkudziesięcioletnią historią”.



Wielowartościowość obrazu (zdjęcia) powoduje, że w ocenie stanu powierzchni można przyjąć przynajmniej dwa kierunki analiz. Pierwszy to identyfikacja spękań nawierzchni, a drugi to określenie granic obszarów wykonanych przypuszczalnie z różnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

W prowadzonej analizie wzięto pod uwagę tonację barw zdjęcia przedstawionego na Rys. 5 (obraz cyfrowy o wymiarach 1272×609 pikseli i rozdzielczości 72 dpi). Histogramy ukazujące liczbę wystąpień poszczególnych wartości przypisanych kanałom RGB przedstawiono na Rys. 6. Biorąc pod uwagę parametry przyjęte do budowy histogramów, obliczono wartość średnią poszczególnych składników wektora (R, G, B) dla kolejnych przedziałów szeregu rozdzielczego. W konsekwencji uzyskano umownie najczęściej występującą barwę na obszarze zdjęcia z Rys. 5.



4. IDENTIFICATION OF PAVEMENT SURFACE NON-UNIFORMITY

4.1. IMAGE THRESHOLDING

The next section presents the results of an experiment carried out with the simplest type of analysis using popular image operators. Cracked bituminous surface was used as the subject of analysis. Fig. 5 presents surface of a carriageway with the history of several dozen years.

Rys. 5. Typowy wielowartościowy obraz spękanej nawierzchni z MMA

Fig. 5. Typical multiple-valued image of cracked pavement made of asphalt mixture

With the multi-valued type of image (photograph) the surface may be analysed for at least two different aspects. The first aspect is identification of surface cracks and the second is marking the boundaries of areas made of different type of asphalt mixtures.

The colour balance of the photo presented in Fig. 5 (digital image of 1272×609 pixels and 72 dpi resolution) was taking into consideration. Histograms showing the number of occurrences of the values assigned to the RGB channels are presented in Fig. 6. Taking into account the parameters used in building the histograms, the average values were calculated for the R, G, B colour vector components for the subsequent intervals of the interval series. In this way we have defined the prevailing colour in the area on the image presented in Fig. 5.

Rys. 6. Histogramy wartości dla wielkości R, G, B z obrazu na Rys. 5

Fig. 6. Histograms of R, G, B values from image in Fig. 5

Efekt opisanych powyżej czynności zilustrowano na Rys. 7.

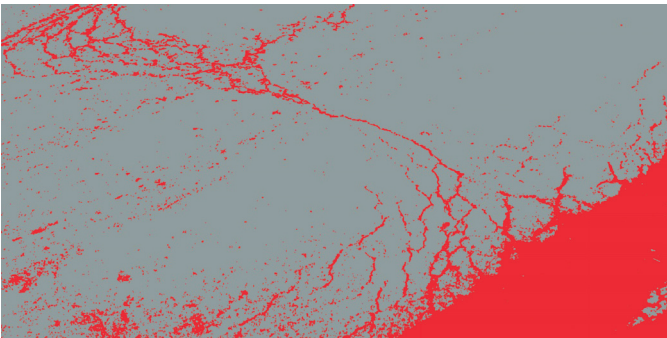
Rys. 7. Najczęściej występująca tonacja na zdjęciu z Rys. 5 („barwa progowa”)
Fig. 7. The most frequent grayscale level in Fig. 5 (“threshold level”)

W kolejnych etapach analizy obrazu warto założyć, że nie można identyfikować najczęściej pojawiającej się barwy ze spękaniem. W takim przypadku składniki wektora, który oznaczy się np. symbolem $\vec{p} = (\bar{R}, \bar{G}, \bar{B})$, stanowią pewien próg. Jeżeliby przyjąć, że każdy piksel na obrazie z Rys. 5, dany wektorem \vec{Z}_{ij} , zostanie określony wartościami wynikającymi z zależności (1), uzyska się obraz, na którym wyróżnione zostaną „nietypowe” elementy analizowanej powierzchni, w tym spękania nawierzchni.

$$\text{Jeżeli } \vec{Z}_{ij} = (R, G, B)_{ij} \geq \alpha \cdot \vec{p} \text{ to } (R, G, B)_{ij} = \vec{p}, \quad (1)$$

jeśli nie to $(R, G, B)_{ij} = (1, 0, 0)$.

Ekspertyzy i próby podejmowane z nierównością (1) wykazały, że dla analizowanego przypadku wartość współczynnika α powinna być liczbą z otoczenia 0,9. Działanie tak zmodyfikowanej procedury zapisanej powyższą zależnością zilustrowano na Rys. 8.

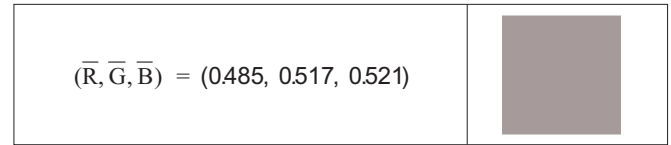


Ze zdjęcia przedstawionego na Rys. 8 wynika, że operator wartości progowej jest właściwy, ale niewystarczający do identyfikacji spękań. W podstawowej formie nie pozwala oczyścić obszarów, na których widać liczne fragmenty skupisk pikseli o tożsamyach atrybutach w porównaniu do pikseli z obszaru spękań na powierzchni warstwy ścieralnej (w tym wypadku łąty widocznej w prawym dolnym narożniku obrazu).

4.2. METODA NAKŁADANIA ELEMENTU STRUKTURUJĄCEGO

Porównanie pierwotnego i wynikowego obrazu powierzchni jezdni na Rys. 5 i Rys. 8 prowadzi do kilku wniosków.

The effect of the above described operations is illustrated in Fig. 7.



In the next step it is advisable to assume that the prevailing colour shouldn't be identified with cracks. Thus the vector components, marked for example $\vec{p} = (\bar{R}, \bar{G}, \bar{B})$, provide a certain threshold. Having assumed that each pixel of the image in Fig. 5 represented by vector \vec{Z}_{ij} is defined by the values calculated with formula (1), we will obtain an image highlighting unusual elements of the analysed surface, including cracks.

$$\text{If } \vec{Z}_{ij} = (R, G, B)_{ij} \geq \alpha \cdot \vec{p} \text{ then } (R, G, B)_{ij} = \vec{p}, \quad (1)$$

otherwise $(R, G, B)_{ij} = (1, 0, 0)$.

Experiments and attempts undertaken with inequality (1) demonstrate that for the analysed case factor α should assume values in the vicinity of 0.9. The operation of the procedure modified in this way and described with the above-mentioned formula has been illustrated in Fig. 8.

Rys. 8. Obraz wynikowy jako efekt progowania obrazu pierwotnego z Rys. 5

Fig. 8. The resulted image as an effect of thresholding the source image shown in Fig. 5

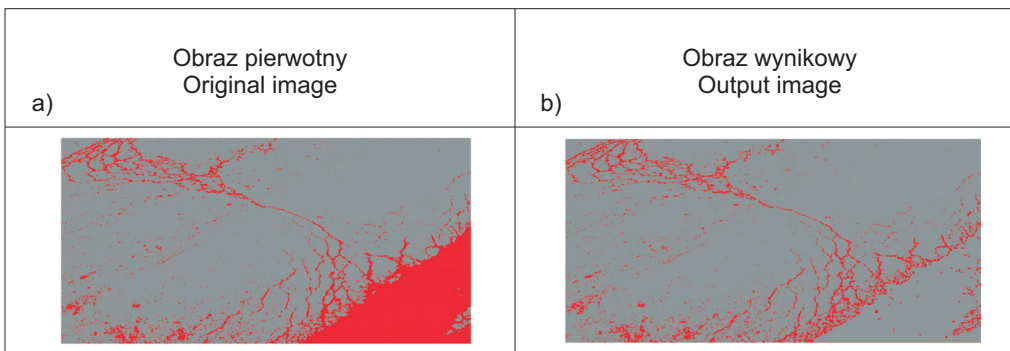
As it can be seen in the photo in Fig. 8, the threshold value operator is correct, yet insufficient for crack identification purpose. In the original form it does not enable cleaning the areas occupied with numerous clusters of pixels with attributes identical to the pixels within the crack areas (in the presented example it is a patch repair in the bottom right hand corner of the image).

4.2. SUPERIMPOSING OF THE STRUCTURING ELEMENT

The comparison of the original and output images of the road surface, as presented in Fig. 5 and Fig. 8, leads to several conclusions. It is important to note that the values defining similar or identical colour saturation in the RGB model for pixels have been assigned to the components of vectors, representing cracks and fragments of asphalt mixture (bottom right-hand corner in particular). Thus, the

Należy zauważyć, że do składników wektorów opisujących spękania i fragmenty obszarów powierzchni warstwy z mieszanki mineralno-asfaltowej (szczególnie prawy dolny narożnik obrazu) przypisane zostały wartości odpowiadające za podobne lub identyczne nasycenie barw w modelu RGB dla poszczególnych pikseli. Zgodnie z powyższym, procedurę usuwania obszarów, które nie należą do obszaru spękań, można sprowadzić do porównywania wartości macierzy obrazu z wartościami elementu strukturującego o wymiarach $n \times n$ pikseli. Jeżeli w danym obszarze różnica macierzy jest macierzą zerową, to grupa sąsiadujących ze sobą pikseli jest opisana wektorami o identycznych składowych. Z charakteru spękań powierzchni jezdni wiadomo, że nie może być to obszar spękanej nawierzchni, więc przypuszczalnie mamy do czynienia np. z łatą. Wynikiem tych rozważań dla elementu strukturującego o wymiarach 5×5 pikseli jest obraz na Rys. 9b.

used to remove the areas beyond the cracks comes down to comparing the values contained in the two image matrices with the values of the structuring element having the size of $n \times n$ pixels. If, in a given area, the difference between the two matrices is a zero matrix then the group of neighbouring pixels is described with vectors made up of identical components. By the very nature of the pavement cracks it is known that this cannot be the crack area and it must be another object, for example a patch. The outcome of this analysis, for 5×5 pixel structuring element, is the image in Fig. 9b.



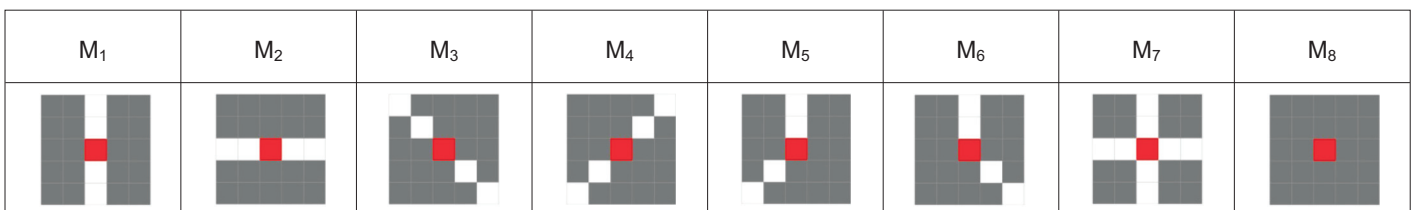
Rys. 9. Wpływ wykorzystania masek o wymiarach 5×5 pikseli na identyfikację spękań
Fig. 9. The influence of use of the masks of size 5×5 pixels on cracks identification

Wybrane warianty elementów strukturujących, które testowano w pracy, zilustrowano na Rys. 10. Punkt oznaczony kolorem czerwonym symbolizuje punkt centralny.

Dla większej czytelności, wyróżnione spękania z obrazu na Rys. 9b zostały przedstawione również na tle obrazu pierwotnego z Rys. 5. Połączenie tych obrazów zilustrowano na Rys. 11.

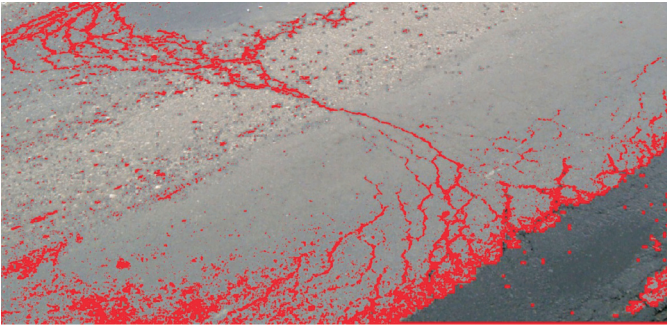
Selected variants of structuring elements, which have been tested in this research, are illustrated in Fig. 10. The point marked in red represents the central point.

For the sake of clarity, the cracks highlighted in image presented in Fig. 9b have been superimposed against the original image presented in Fig. 5. The result of this combination is presented in Fig. 11.



Rys. 10. Elementy strukturujące o wymiarach 5×5 pikseli, wykorzystane do identyfikacji spękań powierzchni jezdni (M₁, M₂,...M₈ – numeracja elementów)

Fig. 10. The structuring elements of size 5×5 pixels, used for roadway surface cracks identification (M₁, M₂,...M₈ – classification of elements)



Rys. 11. Połączenie obrazu pierwotnego z wynikami identyfikacji spękań

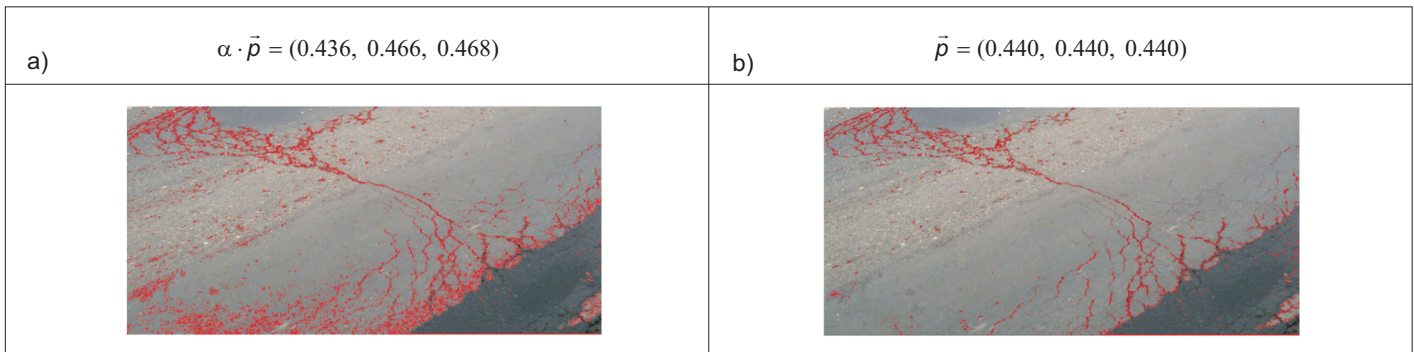
Fig. 11. Combining the source image and cracks identification results

Dotychczas, dla przyjętych założeń wartości progowe były równe $\alpha \cdot \bar{p}$, dla $\alpha = 0,9$. Stopień uchwycenia szczegółów spękania jest silnie uzależniony od tej wielkości. Świadczy o tym zestawienie obrazów na Rys. 12, dla których przyjęto dwie różne wartości progowe. Pierwsza z nich to wartość wykorzystywana wcześniej, natomiast druga została przyjęta przy założeniu, że w modelu RGB wartości przypisane do każdego kanału są równe 0,440.

Up to that point, the threshold values were calculated for the input assumptions with the following equation: $\alpha \cdot \bar{p}$ for $\alpha = 0.9$. The degree of capturing the crack details is strongly related to this value. This can be seen by the comparison of images in Fig. 12, which were obtained with different threshold values. The first of them was used earlier and the second results from assigning the value of 0.440 to each RGB channel.

Rys. 12. Porównanie obrazów w przypadku różnych wartości progowych w modelu RGB

Fig. 12. Comparing images with different threshold values in RGB model



5. Dyskusja wyników badań

Omówiony proces identyfikacji spękań obejmujący operacje progowania i analiz morfologicznych przy użyciu masek różnego kształtu, stanowi efektywne narzędzie identyfikacji spękań powierzchni jezdni nawierzchni drogowych. Upraszczając model kolorów do odcieni szarości, zautomatyzowana procedura identyfikacji może być zrealizowana z wykorzystaniem komputera o standardowo dostępnej konfiguracji sprzętowej. Wieloetapowa segmentacja powierzchni na wielowartościowych obrazach (np. modelach RGB o rozdzielczości powyżej 96 dpi), omówiona w punkcie 3.3, stawia wysokie wymagania, szczególnie wobec zasobów pamięci RAM komputera klasy PC. Zautomatyzowanie procesu przetwarzania takich obrazów wymaga też wysoko zoptymalizowanych algorytmów. Takie wymagania ograniczają zastosowanie

5. Discussion of results

The above described process of pavement cracks identification, including thresholding and morphological processing using kernels of various shapes, constitutes an effective tool for identification of road pavement cracks. Having downgraded the colour images to greyscale, the automated identification procedure may be successfully used in case of a typical PC with standard configuration. The multi-step segmentation of multi-valued images (e.g. RGB models having resolution higher than 96 dpi), as described in chapter 3.3, imposes high demands on processing capability, including in particular the amount of RAM on the PC. Moreover, highly-optimised algorithms are required for automated processing of such images. These requirements limit the application of multi-channel image analyses to off-site applications. Furthermore, the authors of the

analiz obrazów wielokanałowych do prac kameralnych. Autorzy, spośród prezentowanych tu możliwości, zwracają również uwagę na dwa potencjalne aspekty analizy morfologicznej makroskopowego obrazu jezdni. Pierwszy dotyczy oceny stanu nawierzchni. Szczegółowa definicja rodzaju uszkodzeń i ich kwantyfikacja pozwoli na w pełni automatyczny sposób określania wskaźnika stanu powierzchni nawierzchni. Drugi aspekt to weryfikacja kryteriów zmęczeniowych. Warto zauważyć [9], że zgodnie ze wzorem (2), procentowy udział spękanej powierzchni nawierzchni bitumicznej jezdni jest funkcją tzw. szkody zmęczeniowej D .

$$F.C = \left(\frac{6000}{1 + e^{C_1 \cdot C_1 + C_2 \cdot C_2 \cdot \log_{10}(D \cdot 100)}} \right) \cdot \left(\frac{1}{60} \right), \quad (2)$$

gdzie:

$F.C$ – względny obszar spękań na powierzchni warstwy ścieralnej [%],

D – szkoda zmęczeniowa [%].

W Polsce kryteria zmęczeniowe zostały przyjęte metodą adaptacji. Szczegółowe aspekty wyboru kryteriów zostały przedstawione w pracy [10]. W przekonaniu autorów zastosowanie przedstawionej metody pozwoli dodatkowo potwierdzić wybór tych kryteriów. W powiązaniu z wynikami badań nośności nawierzchni ugięciomierzem FWD, rozpoznanie układu warstw nawierzchni, procedurą identyfikacji parametrów nawierzchni i metodą automatycznej oceny makroskopowego obrazu dużej populacji nawierzchni można wnioskować o stopniu utraty trwałości zmęczeniowej.

6. WNIOSKI

Automatyczne przetwarzanie obrazu stanowi ciekawą alternatywę dla metody wizualnej inwentaryzacji uszkodzeń nawierzchni czy oceny wizualnej stanu nawierzchni drogowych. Autorzy zwrócili również uwagę na możliwość wykorzystania zautomatyzowanej procedury przetwarzania obrazów cyfrowych do analiz definicji stanu krytycznego wybranych kryteriów zmęczeniowych. Na podstawie przedstawionych przykładów można sformułować następujące wnioski:

1. Przetwarzanie obrazu cyfrowego jest wieloetapowe i w zależności od założonego celu wiąże się z wykorzystaniem odpowiedniej sekwencji operatorów, powszechnie używanych w dziedzinie przetwarzania obrazów.

proposed techniques point to two potential aspects of morphological analysis of the roadway surface macroscopic image. The first aspect concerns the evaluation of pavement condition. A detailed definition of the distress type and its quantification will enable fully automatic determination of the pavement condition index. The other aspect is verification of fatigue criteria. It is worthwhile noting [9] that according to equation (2) the percentage of cracked asphalt surface is a function of fatigue damage D .

$$F.C = \left(\frac{6000}{1 + e^{C_1 \cdot C_1 + C_2 \cdot C_2 \cdot \log_{10}(D \cdot 100)}} \right) \cdot \left(\frac{1}{60} \right), \quad (2)$$

where:

$F.C$ – relative area of cracking on the wearing course surface [%],

D – fatigue damage [%].

Details on selection of fatigue criteria in Poland were adapted for the local conditions [10]. The authors believe that the proposed method will additionally enable to verify these criteria. By combining FWD testing, recognition of the layered pavement structure, procedure for identification of pavement parameters and automatic macroscopic evaluation of a large population of pavement it is possible to assess the decrease in fatigue life of pavements in consideration.

6. CONCLUSIONS

It has been demonstrated that automatic image processing provides an interesting alternative to the visual surveying of pavement distress and visual evaluation of its condition. As proposed by the authors, automatic digital images processing may be used to analyse the definition of critical condition of certain fatigue criteria. On the basis of presented examples, it can be concluded that:

1. Processing of digital images is a multi-step method which uses sequences of mathematical operators commonly used in processing of image, as appropriate to the purpose.
2. Processing of multi-channel images with resolution higher than 150 dpi on PC computers requires extensive amount of RAM. This makes the technique appropriate for off-site investigations, an example of which is observation of the development of macroscopic crack in fatigue testing of asphalt mixtures.

2. Przetwarzanie obrazów wielokanałowych o rozdzielczości powyżej 150 dpi wymaga znacznych zasobów pamięci RAM komputerów klasy PC. Przetwarzanie w takich sytuacjach znajdzie zastosowanie w pracach kameralnych (np. obserwacji rozwoju rysy makroskopowej w badaniach zmęczeniowych mieszanek mineralno-asfaltowych).
3. Do przedstawionych metod przetwarzania obrazów ilustrujących makroskopowy wymiar obiektów lub zjawisk fizycznych, wystarczająca jest rozdzielczość 72 dpi. Należy tu jednak podkreślić, że płynne procedury przetwarzania obrazów wymagają zoptymalizowanych algorytmów. Standardowe programowanie proceduralne w przypadku złożonych operacji kontekstowych może spowolnić ten proces.
4. Testowana metoda Canny'ego, przeznaczona do wykrywania krawędzi obiektów na obrazie cyfrowym, jest skuteczna w identyfikacji obszarów o zróżnicowanej strukturze. Może to być wykorzystane do zautomatyzowania np. procedury obliczania powierzchni łąt.
3. For the processing methods described in this paper resolution of 72 dpi is sufficient for macroscopic images of objects as well as physical phenomena. However, it must be pointed out that optimised algorithms are prerequisite to obtaining smooth image processing procedures. Slowing down the process may be expected when standard procedural programming is used in complex, neighbourhood operations.
4. The Canny edge detection algorithm is efficient in detecting structurally different areas, as it has been demonstrated in the current research. Calculation of the patch area is an example of procedure which can be automated on this basis.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Malina W., Smiatacz M.*: Cyfrowe przetwarzanie obrazów. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2008
- [2] *Iwanowski M.*: Metody morfologiczne w przetwarzaniu obrazów cyfrowych. Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2009
- [3] *Nieniewski M.*: Morfologia matematyczna w przetwarzaniu obrazów. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1998
- [4] *Tadeusiewicz R., Korohoda P.*: Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków, 1997
- [5] *Korzyńska A., Przytułska M.*: Przetwarzanie obrazów – ćwiczenia. Wydawnictwo Polsko-Japońskiej WSTK, Warszawa, 2005
- [6] Wolfram Research, Oprogramowanie Mathematica. Pliki dokumentacji środowiska obliczeniowego Mathematica, USA, Champaign 2009
- [7] *Green B.*: Canny Edge Detection, 2002 www.sites.google.com/site/setiawanhadi2
- [8] *Rangarajan S.*: Algorithms for edge detection, 2010 www.uweb.ucsb.edu/~shahnam/AfED.doc
- [9] *Romanoschi S.A., Bethu S.*: Implementation of the 2002 AASHTO Design Guide for Pavement Structures in KDOT Part-II: AC Pavements, Final Report No. K-TRAN: KSU-04-4 Part 2, Kansas State University Manhattan, 2009
- [10] *Judycki J.*: Porównanie kryteriów zmęczeniowych do projektowania podatnych i półsztywnych nawierzchni drogowych w aspekcie nowego polskiego katalogu typowych konstrukcji – część I i II. *Drogownictwo*, **LIV**, 1, 1999, 19 - 27 oraz *Drogownictwo*, **LIV**, 2, 1999, 49 - 53