

dr inż. ADAM HEYDUK

Politechnika Śląska, Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa

dr inż. HENRYK KLETA

Politechnika Śląska, Katedra Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Zarządzania Ochroną Powierzchni

Metody wstępnego przetwarzania obrazu w wizyjnym systemie monitoringu stanu technicznego obudowy szybowej

W artykule opisano wybrane metody przetwarzania obrazu wykorzystywane w opracowywanym systemie wizyjnego monitoringu stanu technicznego obudowy szybowej. Przedstawiono ilościowe zależności między rozmiarami obiektu rzeczywistego a wielkością obrazu na przetworniku kamery cyfrowej. Opisano sposób homomorficznej korekcyjnej niejednorodności oświetlenia oraz metody filtracji spękań i zarysowań stosowane do obrazów obudowy szybowej. Wyniki mogą zostać wykorzystane do tworzenia tzw. rzeczywistości rozszerzonej w istotny sposób ułatwiającej człowiekowi analizę sytuacji i podejmowanie decyzji.

1. WPROWADZENIE

Szyby są podstawowymi wyrobiskami udostępniającymi złoże w kopalniach głębinowych i stanowią podstawowe połączenie podziemi zakładu górniczego z powierzchnią, służące przez cały czas jego pracy do:

- transportu ludzi, urobku i materiałów,
- doprowadzenia świeżego powietrza do wyrobisk podziemnych i odprowadzenia powietrza zużytego,
- prowadzenia rurociągów powietrznych, wodnych i podsadzkowych,
- prowadzenia kabli oraz przewodów elektrycznych, sygnalizacyjnych, telefonicznych itp.

Z uwagi na realizację powyższych funkcji, o fundamentalnym znaczeniu dla ruchu zakładu górniczego, podstawowymi wymaganiami dotyczącymi szybów kopalń głębinowych są [6]:

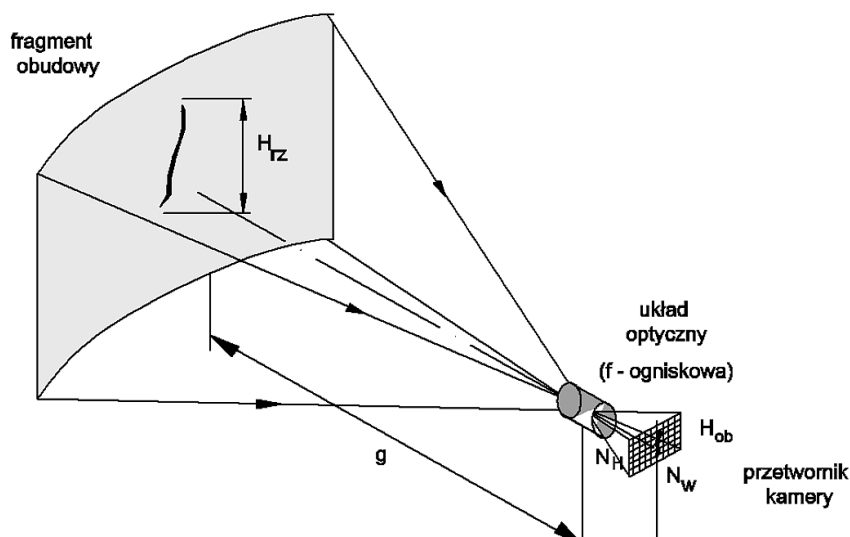
- niezawodność pracy od chwili uruchomienia do czasu likwidacji – czasem nawet przez kilkadziesiąt lub więcej lat,
- absolutne bezpieczeństwo ludzi obsługujących szyb i w nim transportowanych.

Stan obudowy szybowej ulega ciągłym, niekorzystnym zmianom. Podlegają one procesowi starzenia, są eksploatowane przez bardzo długi czas, w trudnych warunkach geologicznych, hydrogeologicznych (czę-

sto w kontakcie z zasoloną wodą), podlegają oddziaływaniu górotworu, zmianom termicznym, wstrząsom dynamicznym wywołanym szybkim ruchem naczyń szybowych. Według [2] zagrożenia dla obudowy szybowej stanowią następujące czynniki:

- warunki geologiczne i hydrogeologiczne – możliwość wdarcia się do szybu wody lub kurzawki (wody z luźnym materiałem), występowanie poziomów wodonośnych z agresywną, zasoloną wodą,
- oddziaływanie górotworu – ciśnienie górotworu niekorzystnie oddziałujące na obudowę – znajomość wartości ciśnienia oraz aktualnego stanu i wytrzymałości obudowy są podstawą określenia tzw. współczynnika bezpieczeństwa, który decyduje o stanie zagrożenia dla szybu,
- zmiany termiczne – znaczne różnice temperatur sezonowych, zwłaszcza w szybach wdechowych,
- drgania szybowe – wywoływane pracą różnych maszyn na nadszybiu lub w bliskiej odległości od szybu (przy szybkim przejeździe naczyń szybowych, zwłaszcza obciążonych, występują krótkotrwałe, lecz duże obciążenia dynamiczne).

Powyżej wymienione czynniki są główną przyczyną tego, że stan obudowy szybowej ulega ciągłym niekorzystnym zmianom, którym – w celu zachowania bezpieczeństwa ruchu – trzeba skutecznie przeciwdziałać. Warunkiem takiego przeciwdziałania jest



Rys. 1. Schemat układu optycznego i oznaczenia parametrów decydujących o wielkości obrazu obiektu rzeczywistego

odpowiednio wczesne wykrycie symptomów narastających uszkodzeń, określenie fragmentów obudowy podlegających największym wyężeniom i podjęcie odpowiednich środków zaradczych. W przypadku, gdy szyb pełni funkcję, np. studni głębinowej w obszarach zlikwidowanych kopalń lub zły stan obudowy szybu uniemożliwia użycie wyciągu rewizyjnego, o stanie obudowy można wnioskować jedynie na podstawie oceny obrazu – filmu uzyskanego z rejestracji za pomocą kamer opuszczonych do szybu. W tym przypadku ocena stanu technicznego i bezpieczeństwa szybu jest oceną subiektywną, zależną praktycznie od percepcji i doświadczenia osoby oceniającej taki materiał. W tych warunkach ocena stanu obudowy szybu może być wykonana za pomocą metody komputerowego przetwarzania i cyfrowej analizy obrazu powierzchni obmurza szybowego, uwzględniającej rozkład i obraz uszkodzeń obudowy wraz z numeryczną identyfikacją stanu wyężenia obudowy szybu. Zastosowanie metod komputerowego przetwarzania i analizy obrazu w celu identyfikacji uszkodzeń obudowy szybu jest celowe, z uwagi na następujące czynniki [4, 5]:

- ograniczone możliwości percepcyjne człowieka przy analizie długich sekwencji obrazów,
- automatyzację porównywania filmów zarejestrowanych w dłuższych odstępach czasu,
- możliwość sformułowania obiektywnych ilościowych kryteriów oceny stanu obmurza na podstawie informacji wizyjnej,
- niezbyt dużą czytelność obrazu związaną z zapyleciem i zawartością pary wodnej w powietrzu.

2. ZALEŻNOŚCI MIĘDZY ROZMIARAMI OBIEKTÓW I ICH OBRAZÓW A PARAMETRAMI UKŁADU OPTYCZNEGO

Ilość informacji obrazowej, zawartej w jednej ramce, zależy od rozdzielczości przetwornika kamery oraz od wymaganego poziomu detekcji szczegółów (np. minimalna szerokość wykrywanego zarysowania). Te czynniki decydują o doborze ogniskowej obiektywu (a zatem i o kącie widzenia kamery – czyli również o liczbie ramek niezbędnych do oceny całej analizowanej powierzchni obmurza szybowego). Podstawowym warunkiem efektywnego zastosowania metod fotogrametrycznych w diagnostyce stanu technicznego jest możliwość odwzorowania rzeczywistych wymiarów obiektów na podstawie wymiarów ich obrazów. Odwzorowanie to uzależnione jest od wielu czynników:

- położenia obserwowanego obiektu,
- parametrów układu optycznego (obiektywu),
- rozmiarów i rozdzielczości przetwornika (matrycy CCD) kamery.

Schematycznie przedstawiono to na rysunku 1.

Opisując uproszczony (przez pominięcie grubości soczewek, jako nieznaczącej w porównaniu z innymi odległościami występującymi na schemacie) układ optyczny przedstawiony na rysunku 1 równaniem Gaussa [1]:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \quad (1)$$

oraz zależności między wielkością obiektu rzeczywistego H_{rz} i wielkością jego obrazu H_{ob} jako $\frac{H_{ob}}{H_{rz}} = \frac{b}{g}$

czyli $b = g \cdot \frac{H_{ob}}{H_{rz}}$ uzyskuje się:

$$\frac{1}{f} = \frac{H_{rz}}{g \cdot H_{ob}} + \frac{1}{g} = \frac{1}{g} \left(\frac{H_{rz}}{H_{ob}} + 1 \right) \quad (2)$$

czyli

$$f = \frac{g}{1 + \frac{H_{rz}}{H_{ob}}} \quad (3)$$

W praktyce jednak niezbędna jest znajomość wartości współczynnika C_p pozwalającego w prosty sposób przeliczyć rozmiary obrazu N_p wyrażone w pikselach na rzeczywisty rozmiar obiektu H_{rz} wyrażony w jednostkach długości:

$$H_{rz} = C_p \cdot N_p \quad (4)$$

współczynnik C_p może być więc zdefiniowany jako:

$$C_p = \frac{H_{rz}}{N_p} \quad (5)$$

Ponieważ zgodnie z (3):

$$H_{rz} = H_{ob} \cdot \left(\frac{g}{f} - 1 \right) \quad (6)$$

to

$$C_p = \frac{H_{ob} \left(\frac{g}{f} - 1 \right)}{N_p} \quad (7)$$

Ponieważ jednak rzeczywisty rozmiar obiektu H_{ob} na matrycy przetwornika CCD nie jest bezpośrednio znany, to znając liczbę pikseli N_p można go wyznaczyć jako:

$$H_{ob} = N_p \frac{H_{CCD}}{N_{CCD}} \quad (8)$$

czyli

$$C_p = \frac{H_{CCD}}{N_{CCD}} \left(\frac{g}{f} - 1 \right) \quad (9)$$

Wartość współczynnika przeliczeniowego C_p zależy więc bezpośrednio jedynie od parametrów konstrukcyjnych przetwornika CCD (wysokości H_{CCD} oraz rozdzielczości N_{CCD} w tym samym kierunku) oraz od ogniskowej obiektywu f i od odległości obiektywu od obserwowanego obiektu g .

Ponieważ producenci kamer podają zwykle jedynie wymiar liniowy przekątnej matrycy przetwornika D_{CCD} oraz rozdzielczość w pionie N_H i w poziomie N_W to wzór można zapisać w nieco dogodniejszej pod tym względem postaci:

$$C_p = \frac{D_{CCD}}{\sqrt{N_H^2 + N_W^2}} \left(\frac{g}{f} - 1 \right) \quad (10)$$

Dla kamery Basler piA 1600-35gc o rozdzielczości $N_H \times N_W$ równej 1608×1208 pikseli i przekątnej DCCD matrycy CCD równej $1'' = 25,4$ mm wyposażonej w obiektyw o ogniskowej $f = 50$ mm rejestrującej obraz z odległości $g = 1000$ mm wartość współczynnika C_p będzie równa:

$$C_p = \frac{25.4}{\sqrt{1608^2 + 1208^2}} \cdot \left(\frac{1000}{50} - 1 \right) = \frac{25.4 \cdot 19}{2011} = 0.24$$

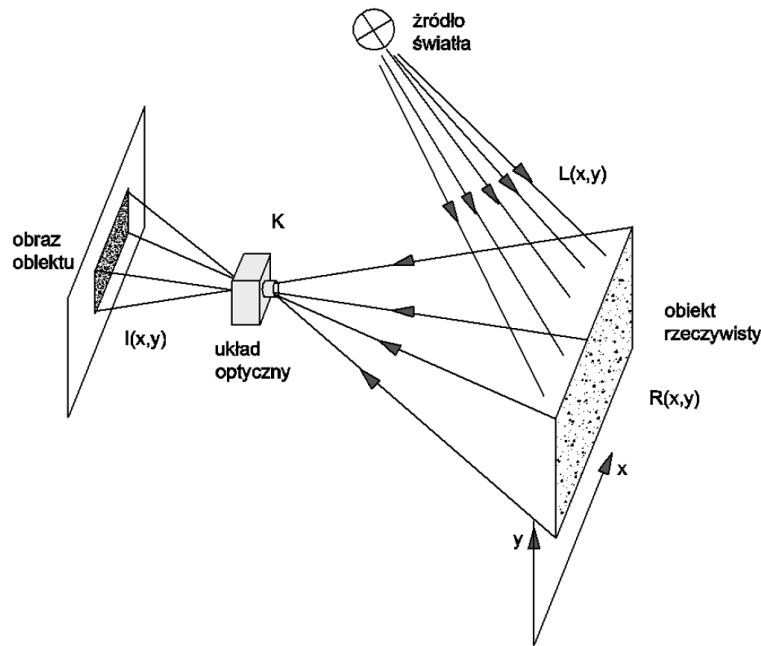
Zatem np. obrazowi rzeczywistego spękania o szerokości $H_{rz} = 2$ mm będzie odpowiadało w tym układzie optycznym ok. 8 pikseli $N_{pix} = \frac{H_{rz}}{C_p} \approx 8$, a pole

widzenia kamery będzie wówczas obejmowało obszar 386×290 mm.

3. HOMOMORFICZNA KOREKCJA NIEJEDNORODNOŚCI OŚWIETLENIA

Akwizycja obrazu (czyli proces jego pozyskania w układzie optycznym i przetworzenia na postać cyfrową dogodną do dalszej analizy) jest jedynie pierwszym (wstępnym) etapem oceny całego złożonego procesu oceny stanu technicznego obudowy szybowej.

Jednym z istotnych czynników utrudniających wzrokową lub komputerową analizę obrazów obudowy szybowej jest nierównomierność oświetlenia oraz występujące odbłaski (np. elementów pokrytych warstwą wody). Pierwszym etapem przetwarzania obrazu, warunkującym prawidłowy przebieg dalszej analizy powinna więc stać się wstępna korekcja jakości tego obrazu. Obraz obserwowanej powierzchni $I(x,y)$ można opisać jako wynik działania trzech czynników schematycznie przedstawionych na rysunku 2:



Rys. 2. Schemat wpływu oświetlenia na proces formowania obrazu na przetworniku kamery

- charakterystyki źródła światła $L(x,y)$ zależnej od jego parametrów oraz odległości położenia kąowego,
- charakterystyki obserwowanego fragmentu powierzchni $R(x,y)$ zależnej od materiału, tekstury, koloru,
- kąta nachylenia w stosunku do padającego światła i osi układu optycznego.

Można to w przybliżeniu opisać zależnością:

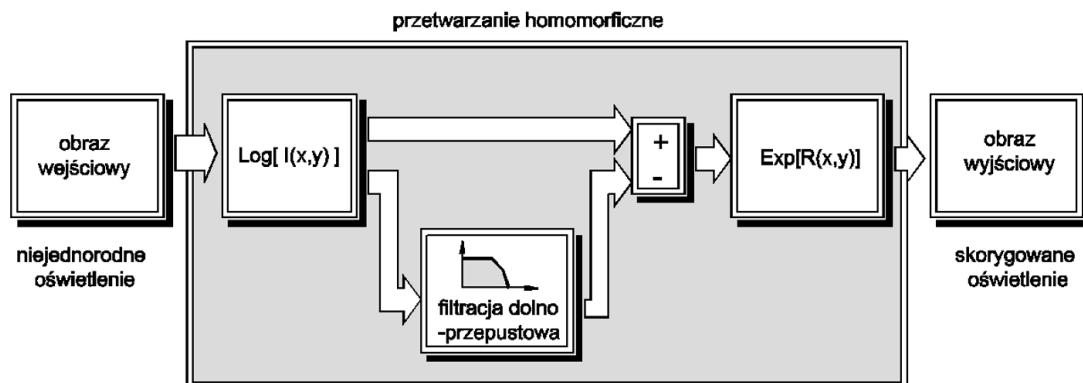
$$I(x, y) = K(x, y) \cdot L(x, y) \cdot R(x, y) \quad (11)$$

Logarytmując punktowo każdy piksel obrazu uzyskuje się zależność:

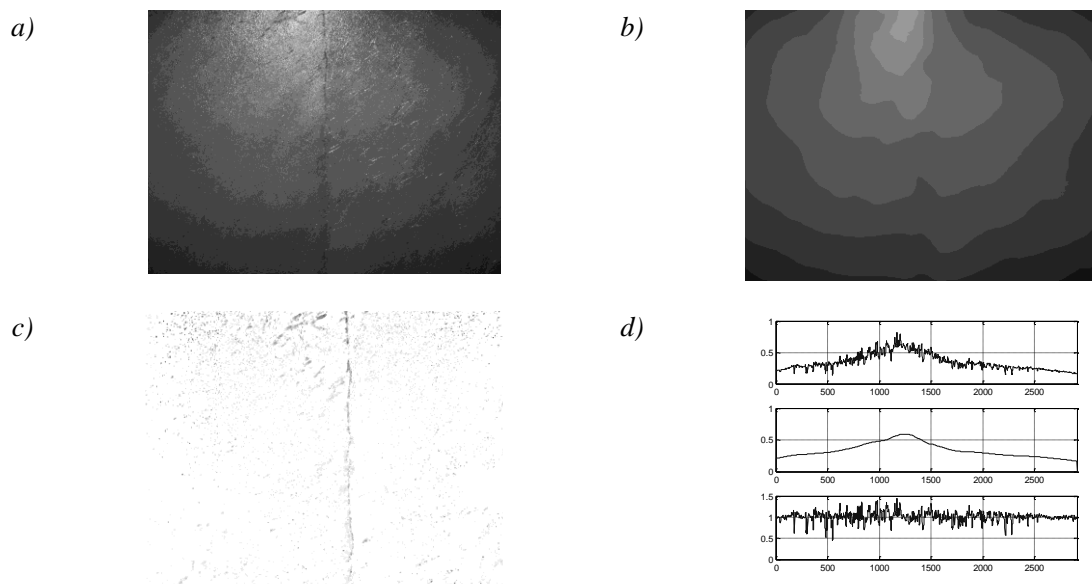
$$\ln[I(x, y)] = \ln[K(x, y)] + \ln[L(x, y)] + \ln[R(x, y)] \quad (12)$$

Logarytmowanie sygnału wejściowego przekształca punktowe mnożenie składowych sygnału na ich

punktowe sumowanie. Zsumowane sygnały mogą być następnie rozdzielone przez filtrację liniową i delogarytmowane w celu uzyskania obrazu skorygowanego. Takie przekształcenie określane jest mianem przekształcenia homomorficznego (czyli zachowującego kształt). Ponieważ wyszukiwane fragmenty $R(x,y)$ charakteryzują się znacznie mniejszymi rozmiarami niż obszary zmienności oświetlenia $L(x,y)$, czy też występujące w układzie optycznym zjawisko winietowania $K(x,y)$, więc wynikiem filtracji dolno-przepustowej będzie właśnie uśredniony obraz opisujący niejednorodność oświetlenia na analizowanym obszarze. Po odjęciu tego obrazu od logarytmu obrazu uśrednionego i zdelogarytmowaniu jasności każdego piksela uzyskuje się obraz różnicowy ze skorygowanym oświetleniem. Schemat algorytmu przedstawiono na rysunku 3, a przykładowe wyniki na rysunku 4.



Rys. 3. Schemat podstawowych operacji przy przetwarzaniu homomorficznym



Rys. 4. Przykład homomorficznej filtracji nierównomierności oświetlenia
 a) obraz wejściowy,
 b) uśredniony obraz odwzorowujący nierównomierność oświetlenia,
 c) wynik filtracji homomorficznej,
 d) przykładowe profile jednej linii obrazu (odpowiednio od góry:
 oryginalny, uśredniony i skorygowany)

4. SEGMENTACJA OBRAZU

Segmentacja obrazu (sceny) polega na podziale obrazu na rozłączne (bo dany punkt w przestrzeni, a zatem i piksel na obrazie może należeć tylko do jednego obiektu) obszary o określonych cechach. W szczególnym, chociaż często występującym (np. w zastosowaniach diagnostycznych) przypadku segmentacja ma na celu wydzielenie z ła tych struktur, które będą podlegały dalszej analizie. Jest to więc, z tego względu, najbardziej krytyczny fragment całego procesu analizy obrazu, warunkujący w dalszych etapach jego poprawne działanie i użyteczność uzyskiwanych wyników pomiarowych. Obiektem stają się w tym najprostszym przypadku części obrazu, przyjmujące wartość logiczną równą jeden, natomiast tłem pozostałe obszary przyjmujące wartość logiczną równą zero. W wyniku segmentacji uzyskuje się wówczas obraz binarny. W przypadku ogólniejszym, gdy w opisie sceny wyróżnia się kilka klas poszukiwanych obiektów można tym klasom przypisać odpowiednie numery (etykiety). Wówczas tłem stają się piksele o wartości zerowej, natomiast wszystkie piksele o wartościach różnych od zera (z jakiegoś skończonego zbioru etykiet) opisują poszczególne klasy poszukiwanych obiektów (symptomów diagnostycznych). Metoda segmentacji powinna być dostosowana do rodzaju obrazu, oczekiwanego efektu (czyli struktur, które chce się wydzielić) oraz możliwości dalszego

przetwarzania obrazu binarnego. Istnieje bardzo wiele metod segmentacji, prowadzących często do mocno zróżnicowanych rezultatów dla takiego samego obrazu wejściowego. Efekty różnych sposobów segmentacji można ze sobą łączyć, wykorzystując maskowanie i operacje logiczne na obrazach binarnych.

5. DETEKcja KRAWĘDZI SPĘKAŃ

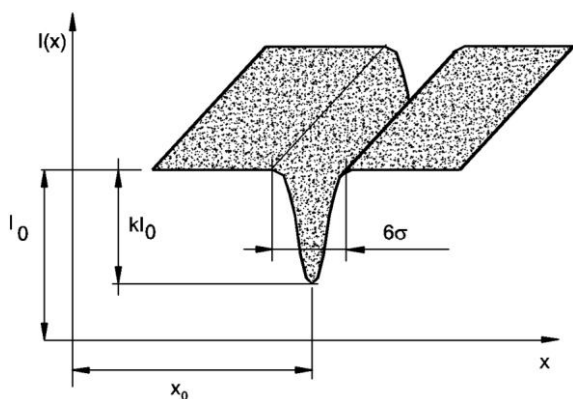
Po wstępnym wyrównaniu niejednorodności oświetlenia można przystąpić do detekcji spękań, zarysowań, wycieków itp. symptomów świadczących o uszkodzeniu konstrukcji. Detekcja ta powinna zostać zakończona procesem binaryzacji (progowania), gdyż na obrazach binarnych (dwuwartościowych) można jednoznacznie określić granice poszczególnych obiektów i dokonać ilościowego opisu ich parametrów geometrycznych. Metoda detekcji uszkodzeń powinna charakteryzować się wysoką selektywnością ze względu na złożoność opisywanej powierzchni, np. powinna reagować na *spękania jednorodnej powierzchni*, a nie powinna reagować na zewnętrzne lub wewnętrzne krawędzie tej powierzchni, związane z jej kształtem i strukturą przestrzenną np. w rejonie wlotów szybowych, czy jakimiś dodatkowymi elementami np. zbrojeniem szybu. Stąd też celowe jest poszukiwanie metod bardziej selektywnych, dopasowanych do charakteru poszukiwanych symptomów. Ponieważ spękania betonu mają ze swej

istoty charakter liniowy (choć z rozgałęzieniami i załamaniem) to możliwy jest ich opis w postaci ciągu połączonych ze sobą odcinków linii (ciemniejszych od otoczenia), charakteryzujących się zróżnicowaną długością i szerokością. Ze względu na fakt, że wnętrze spękania umieszczone jest głębiej od otaczającej go powierzchni, na obrazie pojawi się w postaci linii ciemniejszej od tła występującego po obu stronach zarysowania.

Ze względu na specyficzny kształt spękań i zarysowań i zróżnicowanie ich oświetlenia, trudne jest zastosowanie metody bezpośredniego progowania (binaryzacji). Progowanie takie jest operacją lokalną (bezkontekstową) choć może charakteryzować się lokalnie adaptacyjnie ustawianą wartością progu. Ponieważ profil jasności obszaru spękania ma kształt w przybliżeniu podobny do odwróconej krzywej Gaussa, można tę zależność wykorzystać do syntezy filtru wydzielającego spękania z powierzchni obrazu. Lokalna odpowiedź filtru, czyli wynik splotu odpowiedniego fragmentu obrazu z maską (zbiorem współczynników) filtru będzie osiągała wartość tym wyższą, im bardziej lokalny kształt profilu spękania będzie bardziej zbliżony do kształtu maski filtru. Ogólny opis profilu spękania $I(x)$, gdzie I oznacza jasność (intensywność) poszczególnych pikseli obrazu, x – odległość mierzona w kierunku prostopadłym do osi spękania, a x_0 położenie osi profilu można aproksymować wzorem:

$$I(x - x_0) = I_0 \left(1 - k \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \right) \quad (13)$$

Poszczególne parametry występujące we wzorze (13) przedstawione są schematycznie na rysunku 5.



Rys. 5. Uogólniony profil fragmentu spękania z opisującymi go parametrami liczbowymi

Stąd też maska, czyli zbiór współczynników filtru cyfrowego przeznaczonego do detekcji spękań o określonej szerokości powinna mieć kształt funkcji

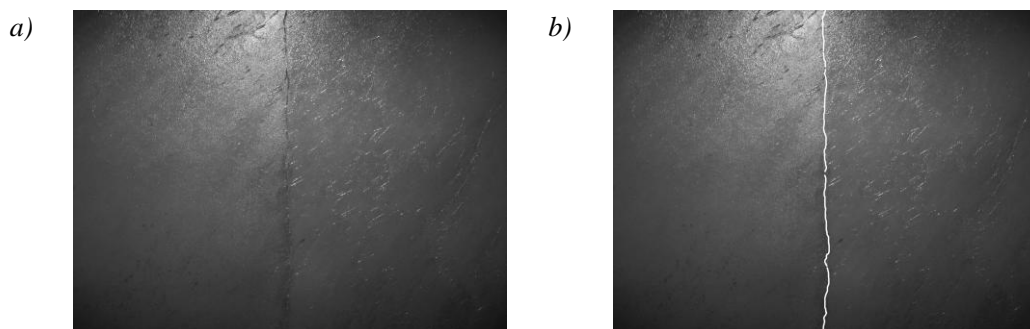
Gaussa (wyskalowanej zgodnie z zależnościami przedstawionymi w p. 2 niniejszej pracy). Najłatwiej (z najmniejszym kosztem obliczeniowym – odrębnie dla każdego wiersza lub kolumny macierzy obrazu) przeprowadzić bezpośrednio filtrację w kierunku poziomym i pionowym – w kierunku prostopadłym do linii spękania, a spękania nachylone pod określonym kątem można wykrywać jako ważoną sumę sygnałów wyjściowych filtra pionowego i poziomego, przy czym współczynniki wagowe określone są funkcjami trygonometrycznymi kąta nachylenia. Ponieważ dokładne rozmiary poszukiwanych uszkodzeń nie są znane (choć znany może być ich przewidywany zakres), to celowe jest prowadzenie poszukiwań, czyli filtracji za pomocą filtrów o różnych rozmiarach z poszukiwanego zakresu i wybór najsilniejszego sygnału wyjściowego (z filtru o rozmiarach najbardziej zbliżonych do rozmiarów uszkodzenia) dla danego piksela obrazu wejściowego. Przykłady detekcji spękań nałożone na obrazy oryginalne przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

6. DALSZY ETAPY ANALIZY OBRAZU

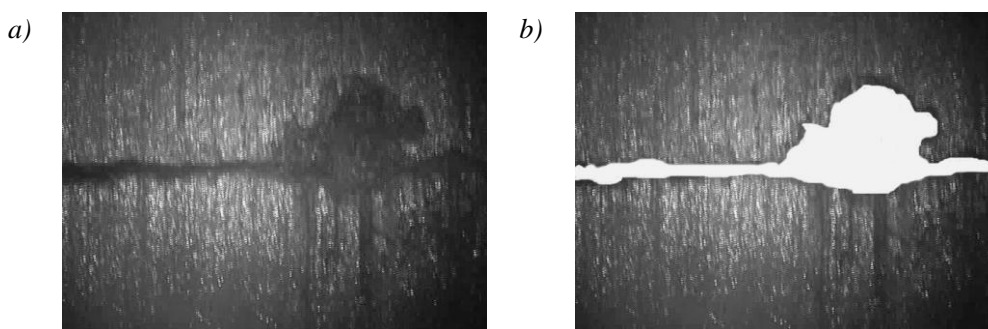
Kolejnym krokiem po wyodrębnieniu obrazów spękań (najczęściej w postaci binarnej, najłatwiejszej do dalszej analizy) jest ich opis numeryczny. W pracy [3] zaproponowano wyznaczenie następujących parametrów:

- długość rysunku – całkowita długość dendryczna (czyli z odgałęzieniami) wszystkich rysunków i spękań widocznych na analizowanym obrazie,
- średnia szerokość rysunku – określana jako stosunek pola powierzchni wszystkich spękań do ich całkowitej długości,
- pole powierzchni wszystkich spękań widocznych na obrazie,
- gęstość rysunku – stosunek całkowitej długości dendrycznej do pola powierzchni analizowanego obrazu,
- udział powierzchniowy – stosunek pola powierzchni wszystkich rys do całkowitego pola powierzchni obrazu,
- orientację układu rysunku – np. zilustrowaną we współrzędnych biegunowych lub opisaną w postaci numerycznej wartości stopnia orientacji i wyboru kierunku dominującego.

Parametry te mogą być wyznaczone zarówno dla całego obrazu, jak i dla jego poszczególnych fragmentów, umożliwiając w ten sposób wyznaczenie fragmentów podlegających największym wyciężeniom, najbardziej narażonych na uszkodzenie lub też decydujących o stateczności całej konstrukcji.



Rys. 6. Przykład detekcji pionowego spękania w obudowie szybowej
 a) obraz oryginalny,
 b) wyodrębniona linia pęknięcia nałożona na obraz oryginalny



Rys. 7. Przykład detekcji uszkodzenia złącza dwóch segmentów obudowy szybowej
 a) obraz oryginalny,
 b) złącze i ubytek nałożone na obraz oryginalny

7. WNIOSKI

Komputerowa analiza obrazu może być istotnym czynnikiem wspomagającym makroskopową analizę obudowy szybowej, zwłaszcza w przypadku ograniczonego lub utrudnionego dostępu do obmurza szybu. Bardzo duża powierzchnia podlegająca ocenie, złożoność zagadnienia, zróżnicowane rodzaje, kierunki i rozmiary uszkodzeń, niejednorodność oświetlenia, wilgoć są istotnymi czynnikami utrudniającymi człowiekowi analizę stanu technicznego. Stąd też tak duże znaczenie ma wykorzystanie metod cyfrowego przetwarzania obrazu, poprawiających jego czytelność i automatycznie wyodrębniających zauważone uszkodzenia. Nałożenie wyodrębnionych symptomów diagnostycznych na obraz rzeczywisty tworzy tzw. rzeczywistość rozszerzoną (o dodatkowe informacje graficzne bądź tekstowo-numeryczne), w istotny sposób ułatwiającą człowiekowi dalszą analizę i ocenę oraz podejmowanie odpowiednich decyzji.

Literatura

1. Cho H.: Optomechatronics. Fusion of Optical and Mechatronic Engineering. CRC Press, Taylor & Francis 2006.

2. Chudzicki A.: Ocena stanu obudów szybowych w kopalniach przemysłu węglowego. Przegląd Górniczy 1987, nr 10.
3. Drobiec L., Jasiński R., Piekarczyk A.: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Tom 1. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali. PWN, Warszawa 2009.
4. Heyduk A., Kleta H.: Wykorzystanie cyfrowej analizy obrazu do wspomagania oceny stanu technicznego i bezpieczeństwa obudowy szybu. Budownictwo Górnicze i Tunelowe 2009, nr 3.
5. Kleta H., Heyduk A.: Analiza obrazu w zastosowaniu do oceny stanu obudowy szybów. Budownictwo Górnicze i Tunelowe 2011, nr 1.
6. Turek M.: Eksploatacja podziemna pokładów węgla kamiennego – współczesne wyzwania. Część 7. Drażnienie, pogłębianie, obudowa i utrzymywanie szybów. Wiadomości Górnicze 2009, nr 10.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Krystian Kalinowski