

Algorytm analizy obrazu z kamery otworowej do automatycznego lokalizowania rozwarstwień górotworu i innych nieciągłości

Waldemar Korzeniowski, Mariusz Młynarczuk

1. Wstęp

Obserwowanie otworów stropowych w celu oceny jakości górotworu stało się w wielu kopalniach działaniem standardowym w zakresie monitoringu. Obserwuje się ścianki otworów nie tylko dla celów geomechanicznych, ale również dla określenia granic zalegania warstw geologicznych, zasięgu efektów różnych zabiegów technologicznych (np. iniekcji górotworu) lub też dla pozyskania doraźnych innych właściwości. Wiarygodność pozyskanej informacji wzrasta wraz z liczbą zbadanych otworów i ich długością. Lokalizowanie rozwarstwień stropu na skrzyżowaniach wyrobisk wymaga często skorelowania informacji z kilku otworów dla umożliwienia analizy przestrzennej określonego fragmentu górotworu objętego badaniami. Dotychczas zwykle otwory opisywane są słownie, co ma charakter subiektywny, silnie uzależniony od obserwatora. Prawidłowa analiza obrazu wymaga bardzo dużego doświadczenia od obserwatora i jest bardzo czasochłonna, co zmniejsza potencjalnie możliwą liczbę otworów, które można zbadać w określonym czasie.

Zaproponowana poniżej idea zmierza do opracowania metody wyszukiwania rozwarstwień stropu na podstawie obiektywnej, powtarzalnej analizy, dającej rezultaty w jak najkrótszym czasie, co umożliwi zbadanie większej liczby otworów przy zwiększonej wiarygodności rezultatów. Proces analizy sekwencji wideo będzie zautomatyzowany, co nie tylko zwolni obserwatora z konieczności przeglądania zarejestrowanego materiału, ale również doprowadzi do znacznie mniejszych rozbieżności interpretacyjnych oraz powtarzalności otrzymywanych wyników.

Wychodząc z powyższych założeń, podjęto próbę automatycznej identyfikacji nieciągłości zarejestrowanych na filmach wideo w oparciu o metody analizy obrazu i morfologii matematycznej. Za cel postawiono sobie zarówno identyfikację poszczególnych nieciągłości na zdjęciach, jak również ocenę możliwości ich wystąpienia na danym zdjęciu. Przy czym na obecnym etapie badań większy nacisk położono na drugą metodę.

Celem prowadzonej analizy było opracowanie algorytmu umożliwiającego podjęcie jednej z trzech decyzji dotyczących istnienia szczeliny lub rozwarstwienia na każdym z obrazów sekwencji wideo. Decyzjami tymi były: a) brak szczeliny; b) duże prawdopodobieństwo tego, że na obrazie jest szczelina oraz c) istnienie szczeliny na obrazie. Podjęcie przez algorytm decyzji o nieistnieniu szczeliny wyklucza obraz z dalszej analizy. Decyzja o dużym prawdopodobieństwie istnienia szczeliny wymaga podjęcia ostatecznej decyzji o jej istnieniu przez obserwatora. Trzeci typ decyzji, czyli decyzja o istnieniu szczeliny,

Streszczenie: Monitorowanie górotworu za pomocą kamery otworowej jest stosowane w kopalniach coraz częściej i ma na celu przede wszystkim określenie zasięgu strefy nieciągłości powstałych w warstwach górotworu lub efektów różnych zabiegów technologicznych. Dzisiejsza praktyka pokazuje, że interpretacja wyników obserwacji bardzo silnie zależy od subiektywnej oceny obserwatora, jest często niejednoznaczna, co utrudnia prawidłową analizę wyników. W artykule przedstawiono przykładowe wyniki obserwacji ścianek otworów, wykonanych w kopalni rud miedzi za pomocą kamery działającej w zakresie podczerwieni. Wybrano kilkanaście obrazów o zróżnicowanej jakości i przedstawiono metodykę ustalania charakterystycznych wzorców pozwalających na ustalenie lokalizacji zaobserwowanych rozwarstwień. Ustalono trzy grupy prawdopodobieństwa wystąpienia wcześniej zdefiniowanych schematów i sytuacji. Na tej podstawie zaproponowano algorytm analizy poszczególnych klatek filmu, pozwalający na obiektywne wskazanie najbardziej prawdopodobnych lokalizacji i zasięgu nieciągłości, a w rezultacie na znacznie bardziej obiektywną ocenę górotworu.

Słowa kluczowe: monitoring górotworu, analiza obrazu, rozwarstwienia, nieciągłości

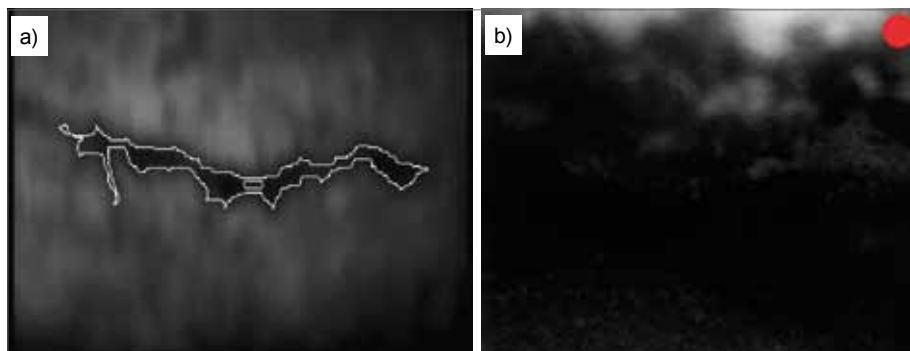
ALGORITHM FOR ANALYSES OF BOREHOLE CAMERA IMAGE FOR AUTOMATIC LOCALIZATION OF STRATA SEPARATION AND OTHER DISCONTINUITIES

Abstract: Rockmass monitoring with borehole camera is used in mines more and more often and the aim of the inspection is determination of range of discontinuities zone existing in strata, or effects of various technological operation. Recent practice shows, that the correct interpretation of the results of observations strongly depends on subjective evaluation of the observer, it is equivocal, which makes that right analysis is more difficult. In this article it is presented sample results of observations of boreholes, made in the underground copper mine, by means of a borehole infrared camera. A dozen of frames with different quality have been selected and the representative patterns were used for positioning the observed strata separations. Three groups of probability of earlier defined patterns and situations have been identified. Based on the experience, the original algorithm was proposed for analysis of individual frame, allowing the most probably defining of position and range of the discontinuities, and eventually much more objective evaluation of the rockmass.

Key words: rock mass monitoring, image analysis, strata separation, discontinuities.

Tabela 1. Rozmiary obrazów oraz ich ilości w poszczególnych sekwencjach wideo

Nazwa sekwencji	Rozmiar obrazu	Liczba klatek
Wziernikowanie_1	720 × 576	15 860
Wziernikowanie_2	720 × 576	9397
Wziernikowanie_3	720 × 576	6728
Wziernikowanie_4	720 × 576	10 595
Borehole_1	320 × 256	650



Rys. 1. a) rezultat działania algorytmu nr 1 – zidentyfikowana szczelina na obrazie; b) rezultat działania algorytmu nr 2 – zdjęcie sklasyfikowane jako duże prawdopodobieństwo wystąpienia szczeliny

może, ale nie musi być zweryfikowana przez obserwatora.

Tak skonstruowany algorytm powoduje, że obserwator nie musi przeglądać całych sekwencji wideo. Może skupić się jedynie na klatkach zidentyfikowanych przez algorytm jako potencjalnie zawierające szczeliny (oraz ewentualnie na kilku klatkach sąsiednich). Dlatego też zaletą opracowanego algorytmu jest minimalizacja czasu niezbędnego do analizy nagrania wideo przez obserwatora.

2. Wariantowe propozycje rozpoznawania i lokalizowania rozwarstwień i szczelin

Materiał do analizy stanowiły filmy wideo, otrzymane w wyniku wziernikowania otworów przy wykorzystaniu kamery introskopowej. W pracach wykorzystano metody analizy obrazu, których szczegółowy opis można odnaleźć w pracach [1, 2, 3 i 4]. Spośród tych metod najbardziej użyteczne okazały się metody

morfologii matematycznej, szczegółowo opisane w pracach [5, 6 i 7].

Analizowano kolejne klatki filmu, zapisane uprzednio jako pliki JPG. Ilości klatek w poszczególnych plikach wideo oraz ich rozmiary zestawiono w tabeli 1.

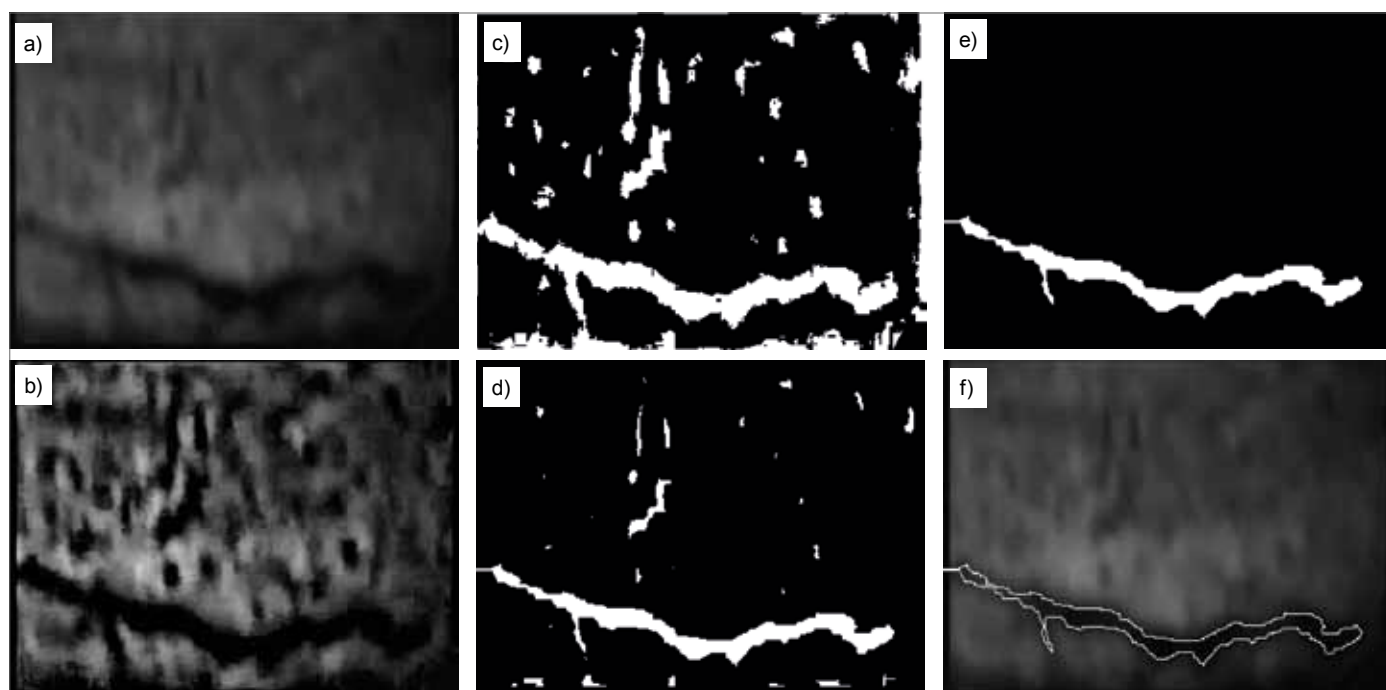
Duże ilości obrazów przypadające na poszczególne sekwencje wykluczały ich manualną analizę i wymagały, aby wypracowana metodyka była w pełni automatyczna. Należy mieć również na uwadze, że nie był możliwy nadzór online obserwatora nad jakością otrzymywanych wyników. Stąd proponowany algorytm musiał być na tyle poprawny, aby nie było możliwości przeoczenia istniejących szczelin. Przyjęto więc, że w przypadkach wątpliwych algorytm powinien raczej sugerować istnienie szczeliny niż jej brak.

Na obecnym etapie prac rozpoznawano możliwości dwóch wariantowych propozycji lokalizowania rozwarstwień i szczelin, a mianowicie:

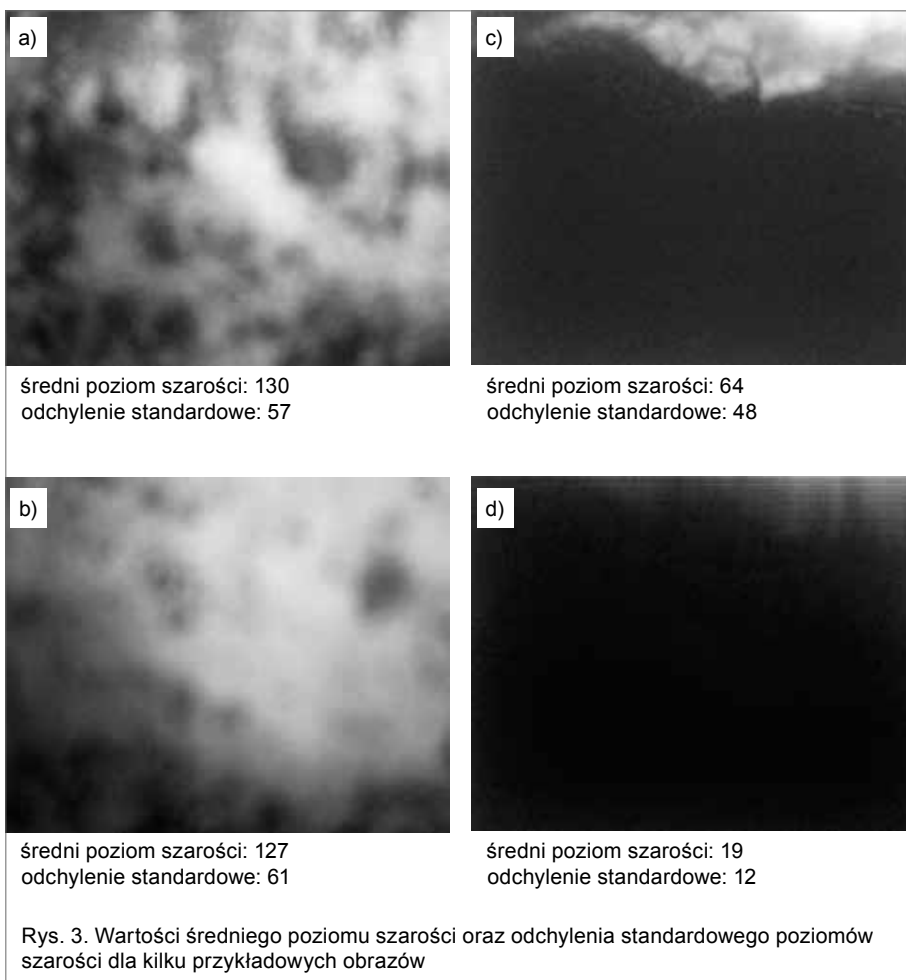
1. bezpośrednią identyfikację poszczególnych spękań na obrazach (rys. 1 a),
2. ocenę prawdopodobieństwa wystąpienia spękania na danym zdjęciu (rys. 1 b).

2.1. Identyfikacja pojedynczych spękań na klatkach filmowych

Zaproponowany algorytm identyfikacji (segmentacji) szczelin na klatkach filmowych działał w następujący sposób:



Rys. 2. Przykłady obrazujące cząstkowe wyniki działania proponowanego algorytmu



reklama

- dla obrazu wejściowego (rys. 2 a) przeprowadzono filtrację filtrem przemennym, wykorzystującym rekonstrukcję (o rozmiarze 1);
- dla otrzymanego wyniku wyznaczono kontrast przez *top-hat* (o rozmiarze 20), po czym stosowano filtrację filtrem przemennym wykorzystującym rekonstrukcję (o rozmiarze 1) oraz jeszcze raz wyznaczono kontrast przez *top-hat*, tym razem o rozmiarze 10. Wynik tych operacji przedstawiono na rysunku 2 b;
- dla otrzymanego obrazu przeprowadzono binaryzację w granicach 0–15 (rys. 2 c), po czym wykonano zamknięcie przy wykorzystaniu, jako elementu strukturalnego, poziomego odcinka o rozmiarze 10 pikseli oraz usunięto fragmenty obiektów przy brzegu obrazu, które były wynikiem błędów zapisu obrazu (wynik: rys. 2 d);
- następnie wykonano otwarcie przez rekonstrukcję przy wykorzystaniu, jako elementu strukturalnego, poziomego odcinka o rozmiarze 40 pikseli, po czym wykonano otwarcie przez rekon-

strukcję przy wykorzystaniu kwadratu o rozmiarze 10 (wynik: rys. 2 e);

- otrzymany obraz jest obrazem binarnym szczeliny zidentyfikowanej na obrazie wejściowym. W celu wizualizacji otrzymanego wyniku rezultat ten został nałożony na obraz wejściowy i zaprezentowany na rysunku 2 f.

Prezentowany algorytm bazował na założeniu, że spękania widoczne na obrazie mają przebieg horyzontalny (lub zbliżony do niego) oraz że są wyraźnie ciemniejsze niż otaczające je tło.

Można przyjąć, że proponowany algorytm poprawnie identyfikuje pojedyncze spękania widoczne na obrazach. Nie działa on niestety poprawnie, gdy w polu widzenia kamery (tzn. na analizowanym zdjęciu) jest tylko wnętrze szczeliny. W związku z tym, że dzieje się tak dość często, zaproponowano również inny sposób analizy sekwencji.

2.2. Ocena prawdopodobieństwa wystąpienia spękania na zdjęciu

Podczas wziernikowania otworu przy wykorzystaniu kamery introskopowej

często zdarza się, że w polu widzenia tej kamery jest wyłącznie wnętrze szczeliny. Na potrzeby niniejszych rozważań przyjęto, że rejestrowany wtedy obraz jest wyraźnie ciemniejszy od obrazów rejestrowanych poza szczeliną. Założono też, że w przypadku rejestracji wnętrza szczeliny obraz (w większości przypadków) będzie jednolicie ciemny, czyli odchylenie standardowe poziomów szarości dla pikseli takiego obrazu będzie niewielkie.

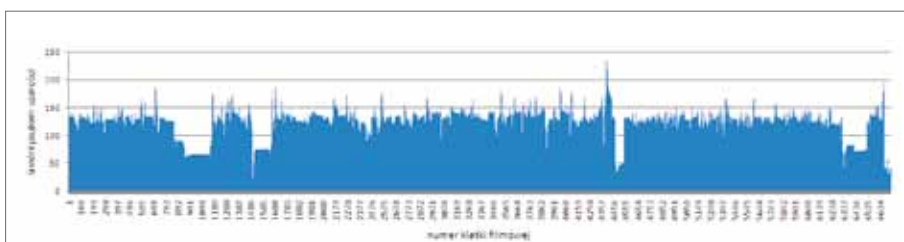
Bazując na tych założeniach, przyjęto następujący tryb analizy:

- obraz wejściowy poddawany był filtracji filtrem przemiennym o rozmiarze 1;
- dla otrzymanego obrazu wyznaczane były: średnia wartość poziomów szarości oraz odchylenie standardowe poziomów szarości.

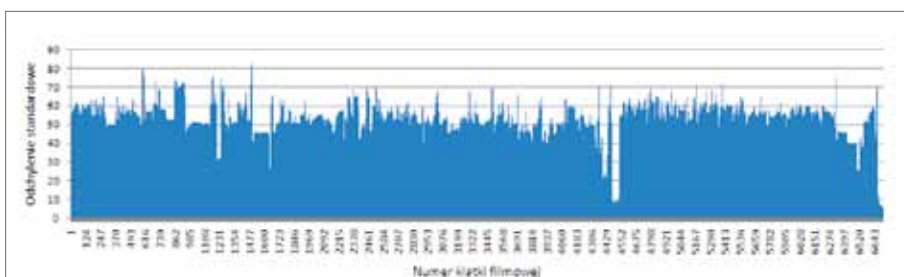
Na rysunku 3 przedstawiono wartości tych parametrów dla kilku przykładowych obrazów. Widać, że dla obrazów wnętrza szczelin, czyli obrazów z rysunków 3 c oraz 3 d, parametry średniego poziomu szarości są wyraźnie niższe niż dla obrazów z rysunków 3 a oraz 3 b. Jeżeli chodzi o odchylenia standardowe, to niskie odchylenie standardowe w połączeniu z niskim średnim poziomem szarości wskazuje na to, że na obrazie jest wyłącznie wnętrze szczeliny. Wyższe odchylenia standardowe połączone z niskim średnimi poziomami szarości świadczą bądź o istnieniu na obrazie granicy szczeliny (np. obraz z rysunku 3 c), bądź o tym, że szczelina nie jest jednorodna (np. obraz z rysunku 1 b).

Na rysunku 4. zaprezentowano wykres przedstawiający wartości średniego poziomu szarości dla poszczególnych obrazów sekwencji „Wziernikowanie 3”. Z obrazu można wywnioskować, że podczas penetracji otworu natrafiono najprawdopodobniej na 4 większe szczeliny. Znajdują się one pomiędzy klatkami: 836–1169, 1473–1656, 4466–4541 oraz 6293–6527. Widać również, że w sekwencji znajdują się także inne klatki o mniejszych średnich poziomach szarości. Są to zapewne mniejsze szczeliny. Wykres z rysunku 5 przedstawia natomiast wartości odchylenia standardowego dla poszczególnych obrazów tej sekwencji. Wyniki te analizowane w powiązaniu z wynikami średnich poziomów szarości mogą mówić o tym, że na zdjęciach zostało zarejestrowane wyłącznie (jednolite w barwie) wnętrze szczeliny (np. klatki 4472–4541).

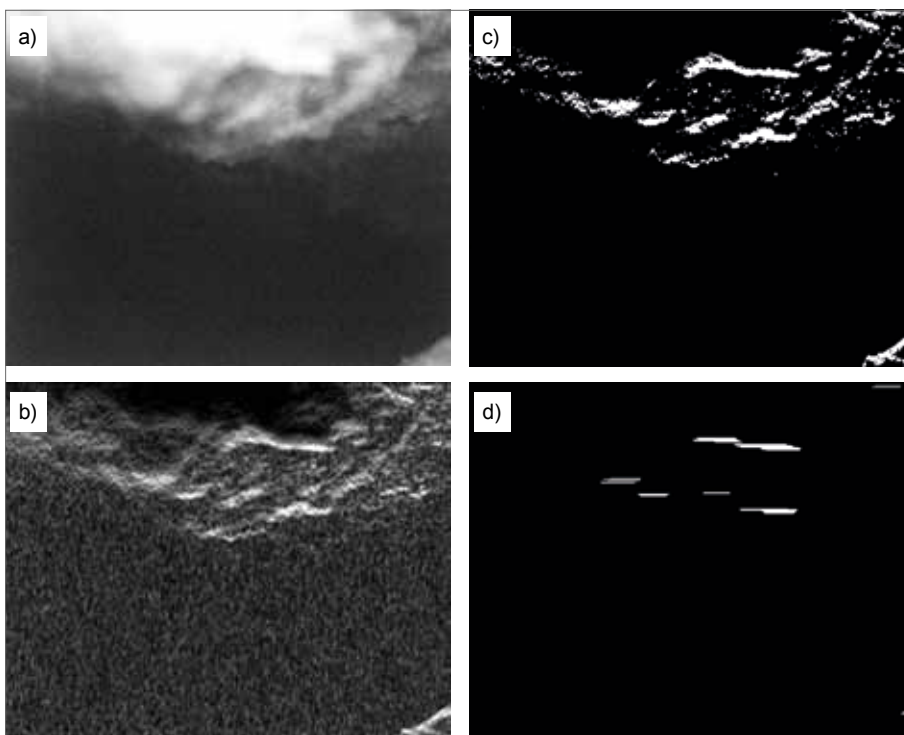
Należy wyraźnie podkreślić, że zaprezentowany do tej pory sposób analizy



Rys. 4. Wartości średniego poziomu szarości dla poszczególnych obrazów sekwencji „Wziernikowanie 3”



Rys. 5. Wartości odchylenia standardowego poziomów szarości dla poszczególnych obrazów sekwencji „Wziernikowanie 3”



Rys. 6. Przykłady obrazujące cząstkowe wyniki działania proponowanego algorytmu

nie wykrywa wszystkich szczelin. Mogą nastąpić trudności w identyfikacji niewielkich szczelin, czyli takich, dla których większość obrazu zajęta jest przez jaśniejsze tło (czyli „nie-szczeliny”). Do detekcji tego typu przypadków zaproponowano dodatkowy algorytm, bazujący na analizie gradientów kierunkowych.

Zasada działania powyższego algorytmu była następująca:

- obraz wejściowy poddawany był filtracji filtrem przemiennym o rozmiarze 1;
- dla otrzymanego obrazu wyznaczano gradient morfologiczny przy wykorzystaniu, jako elementu strukturalnego, odcinka wertykalnego o rozmiarze 3 pikseli (wynik – rys. 6 b);
- obraz gradientu poddano binaryzacji w granicach 20–255 (wynik – rys. 6 c);

- obraz binarny przefiltrowano otwarciem przy wykorzystaniu, jako elementu strukturalnego, odcinka horyzontalnego o rozmiarze 20 pikseli (wynik – rys. 6 d).

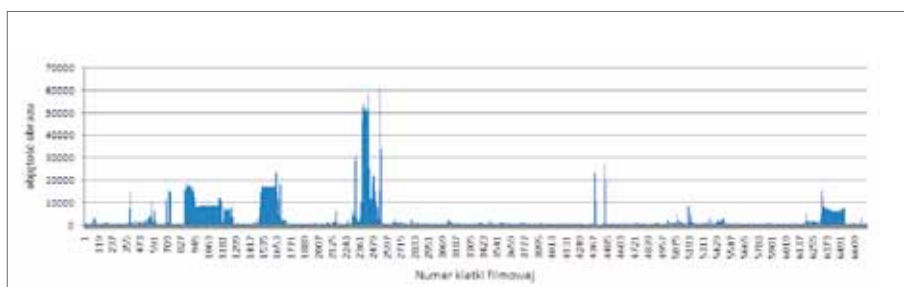
Duże wartości parametru objętości obrazu (czyli sumy wszystkich poziomów szarości na obrazie) dla obrazu gradientu po binaryzacji (rys. 5 c) mówią o istnieniu granicy pomiędzy obszarami o różnych poziomach szarości (czyli najprawdopodobniej pomiędzy szczeliną a jej otoczeniem). Natomiast podwyższony parametr objętości obrazu przefiltrowanego morfologicznym otwarciem (rys. 5 d) wskazuje, że granica ta jest dość długa i horyzontalna. Informacje te jeszcze silniej sugerują, że mamy do czynienia z granicą pomiędzy szczeliną a jej otoczeniem. Przykłady zmian tych parametrów dla obrazów z sekwencji „Wziernikowanie 3” zaprezentowano na rysunkach 7 i 8.

3. Przykładowe wyniki lokalizacji rozwarstwień

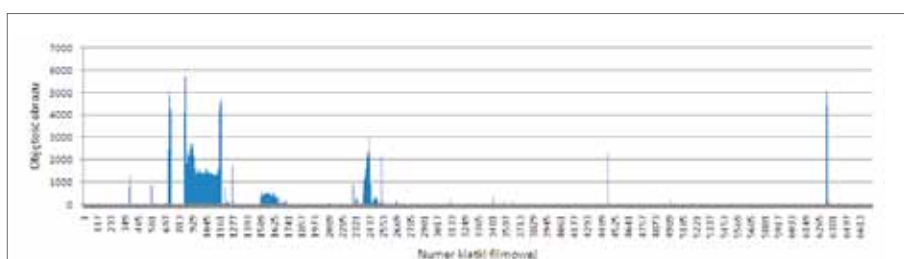
Zaprezentowane w poprzednim rozdziale parametry pozwalają na przyjęcie pewnych założeń dotyczących istnienia szczeliny lub rozwarstwienia na obrazie. Można przyjąć, że w pewnych granicach zmienności poszczególnych parametrów istnienie na obrazie szczeliny jest mniej lub bardziej prawdopodobne. Zestawem takich parametrów opisywany był każdy z kilku lub kilkunastu tysięcy obrazów analizowanych sekwencji. Bazując na nich, dokonywano klasyfikacji każdego z obrazów ze względu na możliwość występowania na nim szczeliny.

Przyjęto, że algorytm kwalifikuje każdy z obrazów sekwencji do jednej z trzech możliwych grup: 1) na obrazie nie ma szczeliny; 2) istnieje duże prawdopodobieństwo, że na obrazie jest szczelina; 3) na obrazie jest szczelina. Decyzję podejmowano, bazując na parametrach średniego poziomu szarości obrazu oraz objętości obrazu gradientu po binaryzacji oraz otwarciu. Zakresy parametrów, dla których podejmowano decyzję, zestawiono w tabeli 2.

Zaprezentowane w tabeli zakresy parametrów zostały przyjęte na potrzeby niniejszego opracowania, bazując na parametrach i jakości analizowanych w niej sekwencjach wideo. Najprawdopodobniej zakresy te będą inne dla innych sekwencji i będą zależne od warunków rejestracji filmów wideo. W dalszych badaniach należy dążyć do ujednolicenia paramet-



Rys. 7. Wartości objętości obrazu dla obrazu gradientu po binaryzacji, dla poszczególnych obrazów sekwencji „Wziernikowanie 3”



Rys. 8. Wartości objętości obrazu dla obrazu gradientu po binaryzacji oraz otwarciu horyzontalnym elementem strukturalnym, dla poszczególnych obrazów sekwencji „Wziernikowanie 3”. Wysokie wartości parametru świadczą o dużym prawdopodobieństwie wystąpienia granicy szczeliny

Tabela 2. Przykłady decyzji podejmowanych w oparciu o wyznaczone parametry

Decyzja	Zakresy wyznaczonych parametrów
Duże prawdopodobieństwo, że na obrazie jest nieciągłość	60 < średni poziom szarości < 90 LUB 1000 > objętość obrazu gradientu po binaryzacji oraz otwarciu > 0
Na obrazie jest szczelina	Średni poziom szarości < 60 LUB objętość obrazu gradientu po binaryzacji oraz otwarciu > 1000
Na obrazie nie ma szczeliny	Jeżeli nie zachodzi żadne z powyższych

trów pracy kamery (szybkość przesuwu, oświetlenie, ostrość), aby zakresy tych parametrów miały charakter jak najbardziej uniwersalny.

W dotychczasowych badaniach decyzję podejmowano, bazując jedynie na dwóch parametrach. Jest to spowodowane wstępnym, rozpoznawczym charakterem prac. W dalszych pracach należy jednak przebadać przydatność innych parametrów opisujących obraz, np. skośność, kurtoza itp. do identyfikacji spekań. Na rysunku 9 zaprezentowano przykładowe obrazy pochodzące z analizowanych sekwencji wraz z decyzją dotyczącą rozpoznania. I tak: zielone kółko wskazuje, że na obrazie nie ma szczeliny. Koło czerwone wskazuje na istnienie szczeliny na

obrazie. Natomiast kółko żółte sugeruje, że istnieje duża szansa, że na obrazie jest szczelina.

Głównym atutem prezentowanego podejścia do analizy jest fakt, że następuje ostra selekcja tych obrazów, na których nie ma szczeliny. Obrazy z istniejącymi szczelinami oraz obrazy sporne (takie, dla których istnieje duża szansa, że na obrazie jest szczelina) stanowią w niniejszych badaniach do około 10% wszystkich pierwotnie zarejestrowanych obrazów (patrz rys. 10).

Proponowany tryb analizy prowadzi do sytuacji, w której obserwator, w celu podjęcia decyzji o szczelinowości otworu, ma do sprawdzenia jedynie część pierwotnego materiału wideo. W dalszych

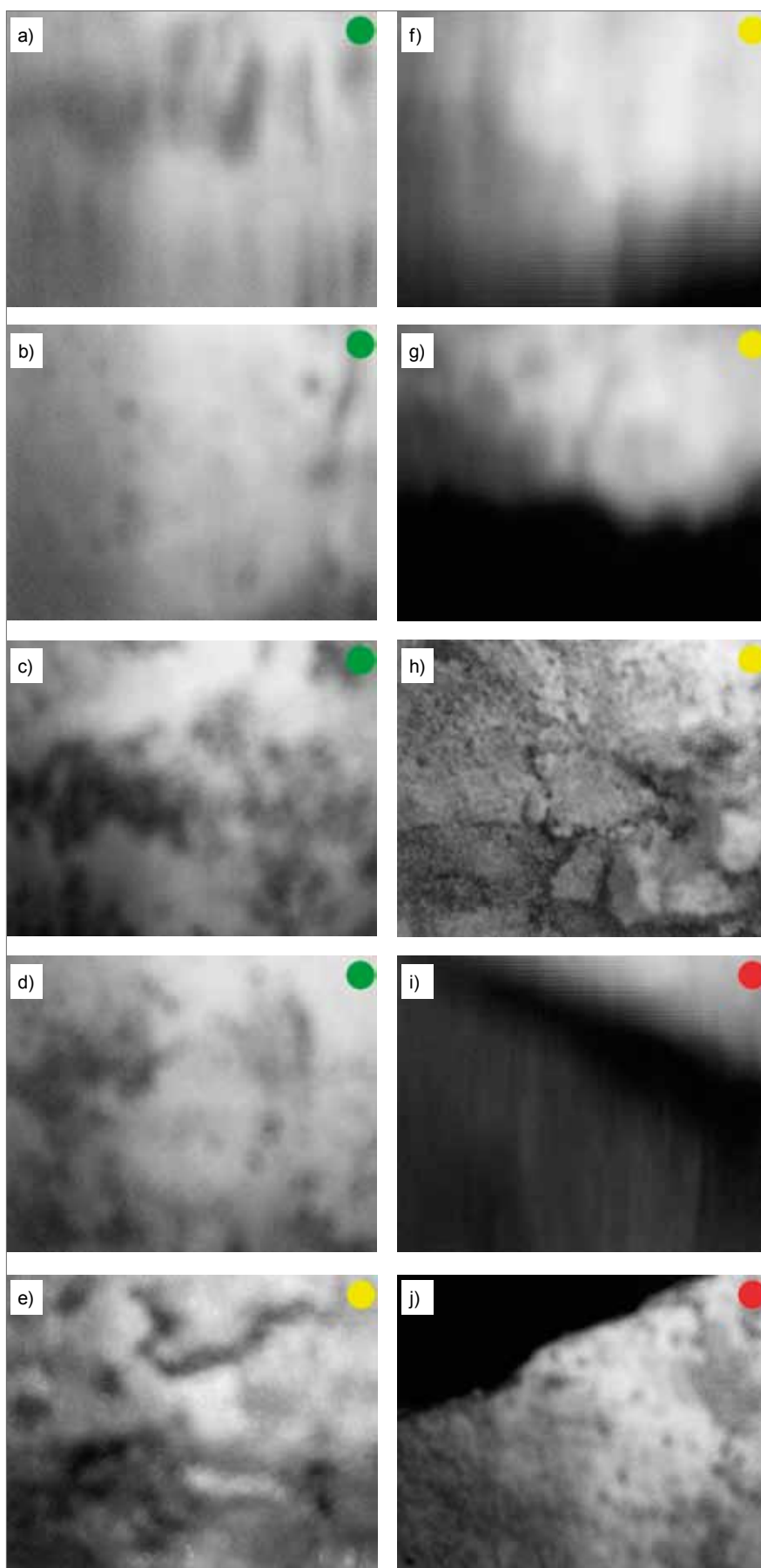
badaniach należy jednak dążyć do tego, aby decyzje algorytmu dotyczące istnienia bądź nieistnienia szczeliny były na tyle wiarygodne, aby nie musiały podlegać weryfikacji przez obserwatora. Zakłada się, że tego typu weryfikacja byłaby niezbędna jedynie dla obrazów spornych. Należy zaznaczyć, że zaproponowany na obecnym etapie prac algorytm analizy sekwencji wideo może być zastosowany na materiale zarejestrowanym.

4. Rekomendacje odnośnie przyszłej metodyki rejestracji obrazu

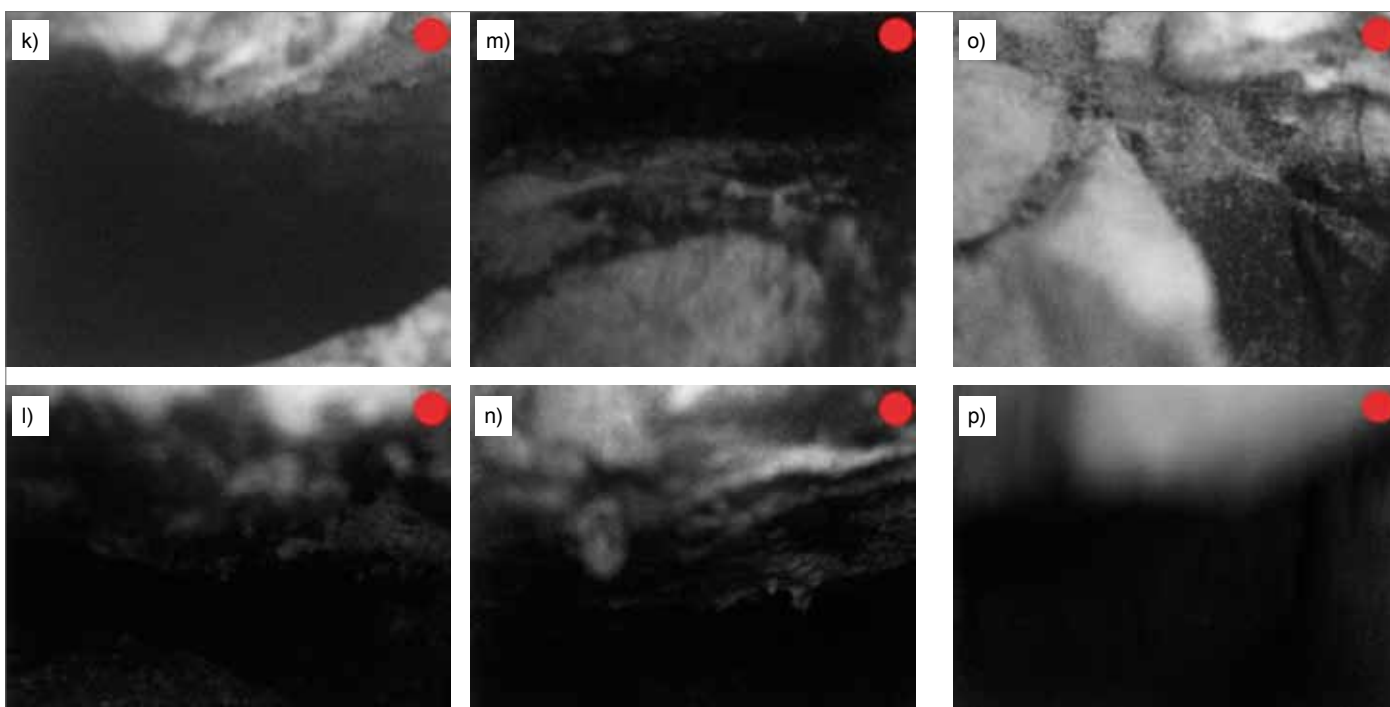
W artykule zaprezentowano dwie metody prowadzące do automatycznej detekcji różnych nieciągłości górotworu zarejestrowanych na sekwencjach wideo podczas wżernikowania otworów wykonanych w komorach kopalni rud miedzi. Zaproponowany algorytm pozwala na zobiektywizowaną interpretację obrazu uzyskanego podczas wżernikowania otworów badawczych za pomocą kamery otworowej. Przeprowadzona analiza pozwala na sformułowanie kilku uwag odnośnie do prawidłowej rejestracji filmów wideo, co zdecydowanie zwiększy poprawność interpretacji, a mianowicie:

- podczas obserwacji należy unikać gwałtownych ruchów kamerą, gdyż obrazy stają się wtedy nieostre i rozmazane;
- sposób wprowadzania kamery do otworu powinien być w miarę płynny, z jednakową prędkością i z rejestracją przebytej przez kamerę drogi. Pozwoli to na przypisanie poszczególnym klatkom filmowym, na których zidentyfikowane zostaną szczeliny, dokładnego położenia w otworze. Aktualnie Katedra Górnictwa Podziemnego AGH jest w posiadaniu nowej kamery otworowej, z możliwością rejestrowania obrazu kolorowego i wyświetlania automatycznie określonej odległości lokalizacji na monitorze urządzenia rejestrującego.

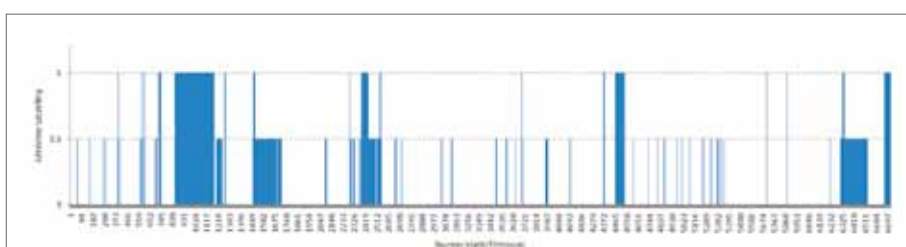
Przedstawione wyniki badań pokazują, że obecna technika umożliwi wprowadzenie nowej jakości do, od dawna już stosowanej, metody monitorowania otworów w górotworze pod kątem możliwości określania położenia różnych nieciągłości (spękania, szczeliny, rozwarstwienia). Wartościowe wyniki otrzymane w formie cyfrowej, niezależne od obserwatora, mają szczególne znaczenie dla profilaktyki obwałów i skuteczności kotwienia stropu wyrobisk podziemnych.



Rys 9. Przykładowe obrazy pochodzące z analizowanych sekwencji wraz z decyzją dotyczącą rozpoznania: zielone kółko wskazuje, że na obrazie nie ma szczeliny; kółko czerwone wskazuje na istnienie szczeliny na obrazie; kółko żółte sugeruje, że istnieje duża szansa, że na obrazie jest szczelina



Rys. 9. (cd) Przykładowe obrazy pochodzące z analizowanych sekwencji wraz z decyzją dotyczącą rozpoznania: zielone kółko wskazuje, że na obrazie nie ma szczeliny; kółko czerwone wskazuje na istnienie szczeliny na obrazie; kółko żółte sugeruje, że istnieje duża szansa, że na obrazie jest szczelina



Rys. 10. Decyzje dotyczące istnienia szczeliny dla poszczególnych obrazów sekwencji „Wziernikowanie 3”. Wartość 0 – na obrazie nie ma szczeliny; wartość 0,5 – duża szansa, że na obrazie jest szczelina; wartość 1,0 – na obrazie jest szczelina,

5. Literatura

- [1] GONZALEZ R.C., WINTZ P.: *Digital Image Processing*. Addison Wesley 1987.
- [2] Russ J.C.: *The Image Processing Handbook*, CRC Press 1992.
- [3] TADEUSIEWICZ R., KOROHODA P.: *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków 1997.
- [4] WOJNAR L., MAJOREK M.: *Komputerowa analiza obrazu*. Fotobit Design 1994.

[5] SERRA J.: *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, London 1982.

[6] SERRA J.: *Image Analysis and Mathematical Morphology*, vol 2. Academic Press, London 1988.

[7] NIENIEWSKI M.: *Morfologia matematyczna w przetwarzaniu obrazów*. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1998.

Praca zrealizowana w ramach badań statutowych
AGH nr 11.11.100.370

Waldemar Korzeniowski – Katedra
Górnictwa Podziemnego, AGH Kraków;
Mariusz Młynarczuk – Instytut Mechaniki
Górotworu, PAN Kraków

artykuł recenzowany

reklama