

Zastosowanie nowoczesnych metod analizy obrazu do ilościowego opisu spękań widocznych na odsłonięciach skalnych

MARIUSZ MŁYNARCZUK, KATARZYNA GODYŃ, JAROSŁAW AKSAMIT

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

Celem prac było wykorzystanie metod morfologii matematycznej do detekcji i opisu szczelin widocznych na odsłonięciach masywów skalnych. Do analizy wykorzystywano fotografie i filmy wideo odsłoneń skalnych wykonane w okolicach Krakowa i Gór Świętokrzyskich. Najprostszym sposobem analizy, który jednocześnie dawał najciekawsze wyniki, było postępowanie oparte na analizie gradientów morfologicznych w celu oszacowania ukierunkowania nieciągłości. Najwięcej informacji o szczelinowości analizowanych ścian otrzymano przeprowadzając segmentację poszczególnych szczelin. Przedstawiono zalety i ograniczenia takiej segmentacji oraz zaprezentowano przykładowe parametry możliwe do wyznaczenia w sposób automatyczny.

Słowa kluczowe: szczelinowość górotworu, ukierunkowanie spękań, analiza obrazu, morfologia matematyczna

1. Wstęp

Ze względu na swoją wagę, problem szczelinowości górotworu jest często poruszany w pracach badaczy zajmujących się badaniami właściwości fizykomechanicznych górotworu (por. Hobler, 1977; Kłeczek 1985; Ryncarz, 1993). Same zaś badania śladów spękań są regularnie wykonywane np. przez geotechników i geologów (Pinińska, 2007). Powszechnie używane parametry opisujące szczelinowość oparte są często na jakościowym opisie spękań górotworu lub bazują na podstawowych pomiarach ilościowych, które co prawda są proste w realizacji, ale niosą ze sobą ograniczoną ilość informacji i nie zawsze podążają za postępem technik badawczych. Do takich pomiarów zaliczyć można np. opisane przez Hoblera (1977) metody planimetryczne i fotoplanimetryczne, lub metodę siatki pomiarowej (Pinińska, 2001). Niewątpliwą wadą wspomnianych technik pomiarowych jest konieczność prowadzenia manualnych zliczeń, oraz możliwość subiektywnej oceny szczelinowości.

Automatyczna analiza struktur skalnych jest przedsięwzięciem stosunkowo trudnym i zapewne z tego powodu niewiele prac zostało opublikowanych z tej tematyki. Jeszcze mniejsza bibliografia dotyczy problemu automatyzacji stereologicznych pomiarów spękań występujących w skałach. Do takich prac można zaliczyć publikację Lemy i Hadjigeorgiu (2005), w której analizowano sfotografowane na odsłonięciu masywu skalnego ślady spękań. Analizując bibliografię poruszającą problematykę automatycznej analizy śladów spękań w skałach, należy także zwrócić uwagę na pojawiające się w ostatnich latach prace dotyczące analizy nieciągłości obserwowanych pod mikroskopami optycznymi i skaningowymi. Można tu wymienić prace (Kushuda i in., 1995) oraz (Chung i in., 1985) przy czym w tej ostatniej analiza automatyczna wspomaganą była „ręczną” korektą obrazu wynikowego. Podobnie postępowano w badaniach opisanych przez Młynarczuka i in., (2003) oraz Nowakowskiego i in. (2003). Próby automatyzacji pomiarów spękań opisano natomiast w pracach Liu i in. (2004), Młynarczuka i in. (2003) oraz Obary i Młynarczuka (2004).

2. Wybrane parametry szczelinowości masywu skalnego

Kidybiński (1982) przedstawił trzy wskaźniki opisujące szczelinowość masywu skalnego:

- *szczelinowość liniową*, wyrażającą liczbę spękań na jednostkę długości linii pomiarowej:

$$S_1 = \frac{N}{L} \quad (1/m) \quad (1)$$

gdzie:

- N – liczba spękań (szczelin),
- L – długość bazy pomiarowej (m).

- *szczelinowość powierzchniową*, wyrażającą sumaryczną powierzchnię szczelin na jednostkę powierzchni skały:

$$S_2 = \frac{\sum_1^n l_n}{F} \quad (m/m^2) \quad (2)$$

gdzie:

- n – liczba śladów szczelin,
- l_n – długość śladu n -tej szczeliny w obrębie badanej skały (m),
- F – pole powierzchni badanej skały (m^2).

- *szczelinowość przestrzenną*, wyrażającą sumaryczną powierzchnię szczelin na jednostkę objętości skały:

$$S_3 = \frac{\sum_1^N S_N}{V} \quad (m^2/m^3) \quad (3)$$

gdzie:

- N – liczba szczelin,
- S_N – powierzchnia N -tej szczeliny (m^2),
- V – rozpatrywana objętość masywu skalnego (m^3).

Do wyznaczenia szczelinowości liniowej wystarczy policzyć szczeliny przecinające pojedynczą linię obserwacyjną na ścianie skalnej. Szczelinowość powierzchniowa wymaga pomiaru sumarycznej długości śladów wszystkich systemów szczelin, na określonej powierzchni skały. Ocena szczelinowości przestrzennej wymaga natomiast pomiaru długości śladów szczelin na co najmniej dwóch wzajemnie do siebie prostopadłych płaszczyznach odkrycia skały, co niekiedy bywa trudne do wykonania.

Szczelinowość górotworu można opisać również *współczynnikiem szczelinowości* zdefiniowanym przez Kleczkowskiego i Rózkowskiego (1997) jako:

$$d = \frac{b_s \sum l}{F} * 100\% \quad (4)$$

gdzie:

- b_s – średnie rozwarście szczelin,
- $\sum l$ – sumaryczna długość szczelin,
- F – badana powierzchnia odsłonięcia skalnego.

International Society for Rock Mechanics (ISRM) proponuje natomiast używać dla scharakteryzowania cech szczelin na odsłonięciu skalnym 10 parametrów. Są nimi (Brown, 1981 za: Feng, 2001): orientacja spękań, odstępów pomiędzy spękaniami, długość śladu spękań, chropowatość, wielkość rozwarścia (szczeliny) pęknięcia, ilość systemów szczelin, wielkość bloków skalnych, wypełnienie szczeliny, siły oddziaływania ścian skalnych, wycieki płynów ze szczelin. Pierwsze siedem parametrów może być wyznaczone poprzez zastosowanie metod automatycznej analizy obrazu.

Z kolei Pinińska w serii swoich katalogów (np. 1994) używa do scharakteryzowania szczelinowości: kąta upadu każdego z systemów spękań, odległości między szczelinami, rozwarcia szczelin ciągłości spękań, wielkości szczelin i charakteru powierzchni szczelin, rodzaju materiału wypełniającego szczeliny.

Z listy powyższych parametrów trzy pierwsze mogą być wyznaczone przy wykorzystaniu metod analizy obrazu. Wydaje się, że można się pokusić również o oszacowanie na drodze automatycznej wielkości szczelin oraz charakteru powierzchni szczelin.

3. Automatyczna detekcja szczelin na odsłonięciach skalnych

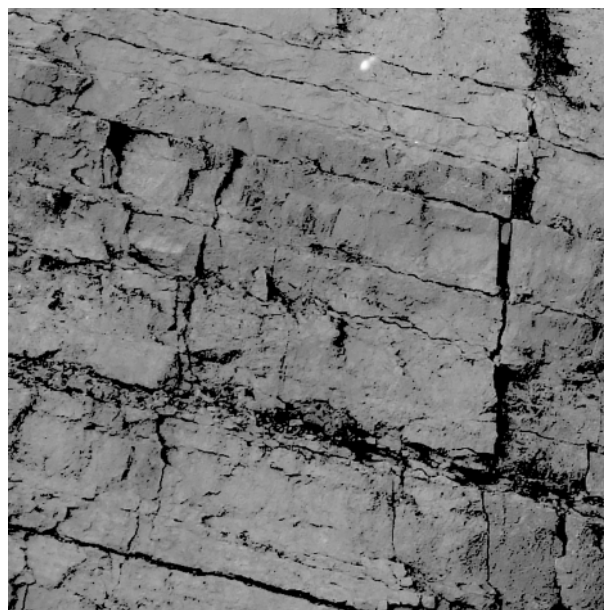
W celu opisu szczelinowości analizowanej ściany w oparciu podane wcześniej współczynniki niezbędna jest poprawna identyfikacja badanych szczelin. Niestety, struktura szczelin występujących na ścianach skalnych jest skomplikowana z punktu widzenia pomiarów automatycznych. Do najważniejszych problemów, na jakie napotkano podczas automatycznej segmentacji zaliczyć należy przede wszystkim: różną rozwartość szczelin, niejednorodną barwę ścian skalnych nawet w ramach tego samego kamieniołomu, pojawiające się na ścianach cienie, występowanie rumoszu skalnego, oraz (w przypadku nieczynnych kamieniołomów) pojawiającą się na ścianach roślinność.

Jako podstawę do analizy wybraliśmy fragment spękanej ściany skalnej przedstawiony na rysunku 1. Jest to obraz kolorowy zarejestrowany w kamieniołomie wapienia z Dębniku. Uzyskano z niego obraz szary poprzez wyznaczenie składowej luminancji. Następnie wykorzystano przekształcenie zwane kontrastem przez Top-Hat (Serra, 1999). Wynik działania tego algorytmu zaprezentowano na rysunku 2. Obraz z tego rysunku został następnie poddany automatycznej binaryzacji. Wynik tej binaryzacji przedstawiono na rysunku 3. Binarizacja ta (jak również inne, które testowano) nie odzwierciedla poprawnie interesującej nas sieci spękań szczególnie dla tego, że ślady spękań nie zawsze są ciągłe. Dodatkowo na obrazie binarnym uwypuklają się niepożądane zanieczyszczenia. Pełna automatyzacja pomiarów w tym momencie zawodzi. Należało więc dokonać manualnej korekcji tego obrazu polegającej na połączeniu nieciągłych („porwanych”) śladów spękań.

Następnie, poprzez wyeliminowanie niewielkich obiektów, zalewanie otworów, szkieletyzację oraz ścienianie dochodzimy do obrazu śladów spękań po zminimalizowaniu ich rozwartości do wartości jednostkowej. Może on być np. wykorzystywany do wyznaczania parametru szczelinowości liniowej. Jednakże poprawne odwzorowanie analizowanej struktury wymaga, aby uwzględnić również rozwartość szczelin. Do tego celu wykorzystujemy składową K schematu koloru CMYK wyznaczona dla obrazu z rys. 1. W rezultacie trzymujemy obraz szczelin zaprezentowany na rysunku 4.



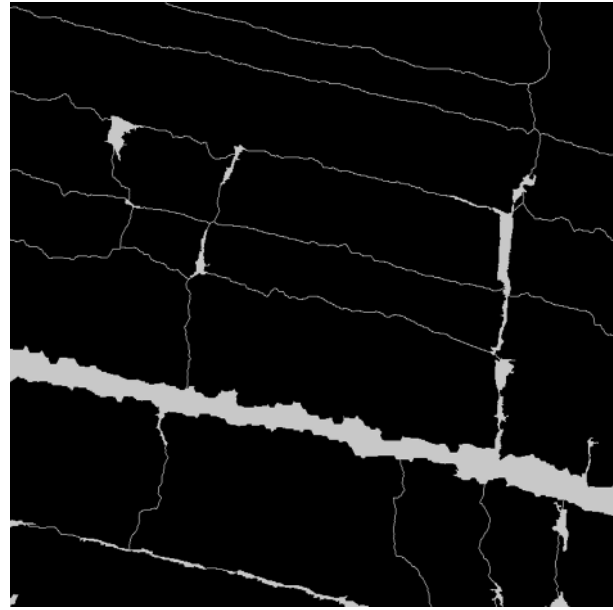
Rys. 1. Fragment ściany skalnej zarejestrowanej w kamieniołomie wapienia w Dębniku



Rys. 2. Wynik zastosowania przekształcenia kontrastu przez Top-Hat do obrazu z rys. 1



Rys. 3. Obraz będący wynikiem binaryzacji obrazu z rys. 2 przy wykorzystaniu metody k-means



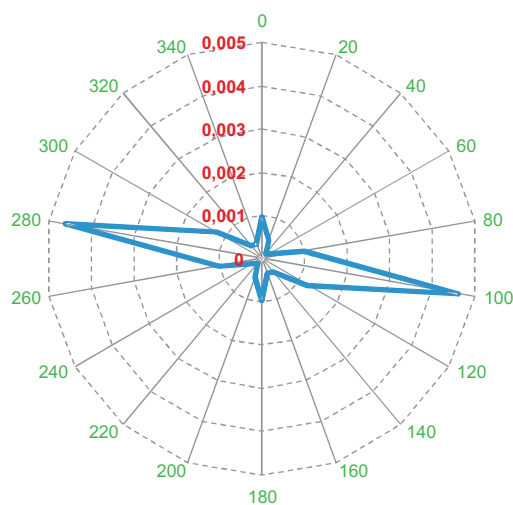
Rys. 4. Obraz śladów spękań po uwzględnieniu rozwartości analizowanych szczelin

Zaprezentowany tok postępowania, mimo że prowadzi do otrzymania posegmentowanego obrazu szczelin jest dość skomplikowany, a co najistotniejsze wymaga manualnej ingerencji obserwatora na jednym z etapów przekształceń obrazu. Otrzymanie posegmentowanego obrazu stanowią jednak punkt wyjścia do przeprowadzenia automatycznych pomiarów

Tab. 1. Wartości współczynników opisujących szczelinowość otrzymane dla analizowanej ściany w kamieniołomie w Dębniku

| Parametr | Wartość |
|------------------------------|--------------------------|
| szczelinowość liniowa | 4,52 [1/m] |
| szczelinowość powierzchniowa | 16,2 [m/m ²] |
| współczynnik szczelinowości | 6,4 [%] |

Wyznaczono także **orientację spękań**, którą w postaci róży spękań zaprezentowano na rysunku 5.



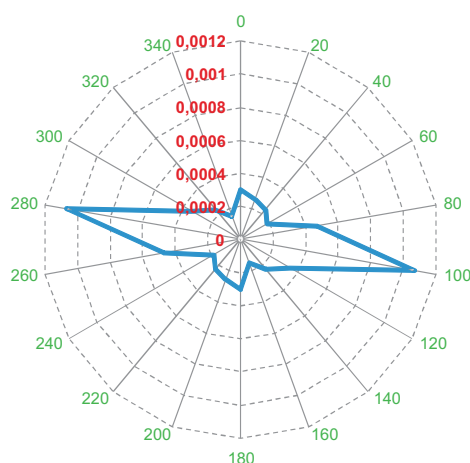
Rys. 5. Wykres róży kierunków dla zidentyfikowanych na rys. 4 szczelin

4. Metoda oszacowania ukierunkowania nieciągłości

W oparciu o wyniki wcześniejszych prac prowadzonych w IMG PAN (np. Młynarczuk i in., 2003; Młynarczuk i in., 2005) podjęto próbę zaproponowania algorytmu opisu ukierunkowania nieciągłości widocznych na makroskopowych zdjęciach odsłoneń skalnych. Stosunkowo najprostszym sposobem analizy, który jednocześnie dawał zadowalające wyniki, było postępowanie oparte na oszacowaniu ukierunkowania nieciągłości. Dla badanego obrazu wyznaczono gradient morfologiczny co prowadziło do tego, że w dalszej analizie mierzono jedynie ukierunkowanie nieciągłości ignorując ich szerokość. Następnie wykonano binaryzację obrazu. Na otrzymanym w obrazie binarnym przeprowadzono serię 180 erozji elementami strukturalnymi w postaci odcinków o długości d ukierunkowanych w przedziale $[-10^\circ..169^\circ]$. W rezultacie uzyskano 180 obrazów wynikowych – każdy dla inaczej ukierunkowanego elementu strukturalnego. Do oceny ilościowej uzyskanych wyników użyty został parametr *objętości obrazu*. Jest on zdefiniowany jako suma wszystkich poziomów szarości na analizowanym obrazie. Dla wyznaczenia różny kierunków pogrupowano otrzymane rezultaty w 9 przedziałów. Każdy z nich zawierał po 20 wyników dla kolejnych kierunków elementu strukturalnego (przedział pierwszy od $[-10^\circ, 9^\circ)$, drugi od $[10^\circ, 29^\circ)$, itp.). Dla przedziałów tych wyznaczono średnią wartości objętości obrazów. Przykładowe wyniki zaprezentowano na obrazach z rysunków 6-9.



a)

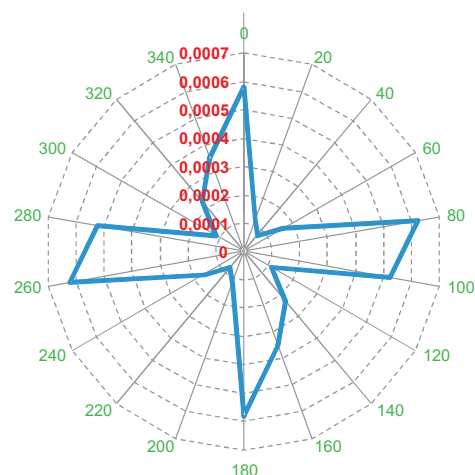


b)

Rys. 6. Obraz ściany w kamieniołomie marmuru w Dębnie (a) oraz wykres róży kierunków (dla 9 przedziałów) dla zidentyfikowanych na tej ścianie nieciągłości (b) ; (wymiar X zdjęcia = ok. 8 m)

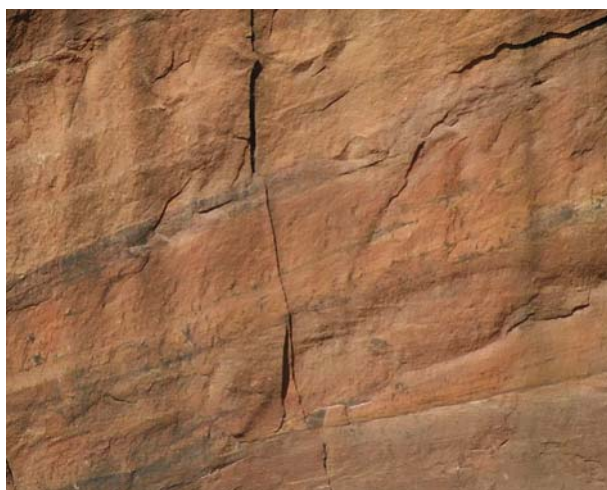


a)

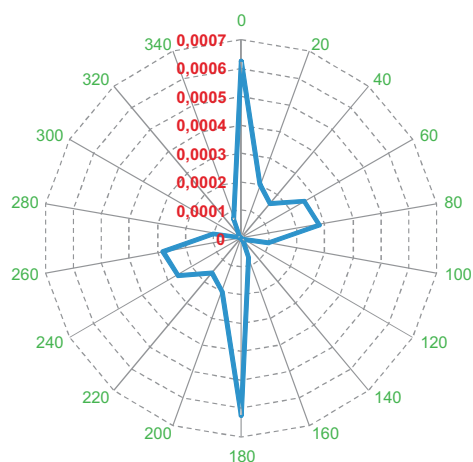


b)

Rys. 7. Obraz ściany w kamieniołomie w Zakrzówku (a) oraz wykres róży kierunków (dla 9 przedziałów) dla zidentyfikowanych na tej ścianie nieciągłości (b) ; (wymiar X zdjęcia = ok. 1 m)



a)

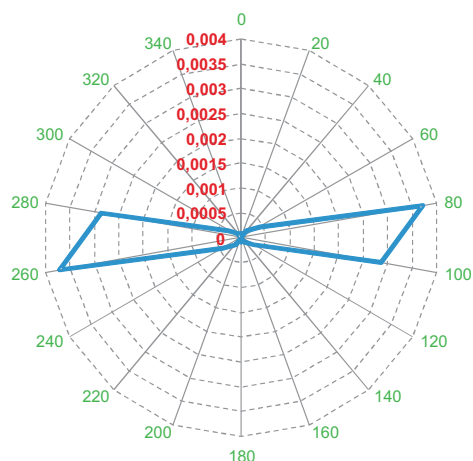


b)

Rys. 8. Obraz ściany w kamieniołomie w Tumlinie (a) oraz wykres róży kierunków (dla 9 przedziałów) dla zidentyfikowanych na tej ścianie nieciągłości (b) ; (wymiar X zdjęcia = ok. 5 m)



a)



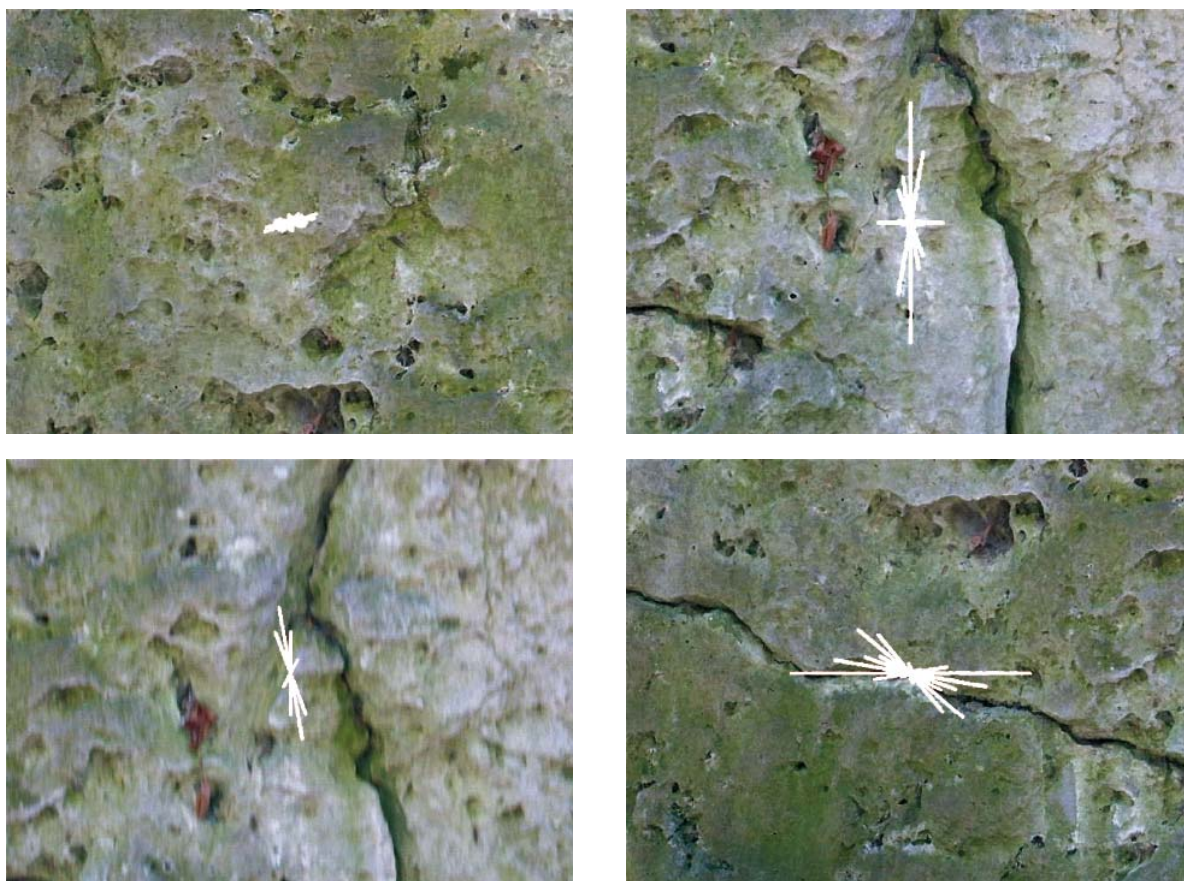
b)

Rys. 9. Obraz ściany w kamieniołomie w Cisowej (a) oraz wykres róży kierunków (dla 9 przedziałów) dla zidentyfikowanych na tej ścianie nieciągłości (b) ; (wymiar X zdjęcia = ok. 3 m)

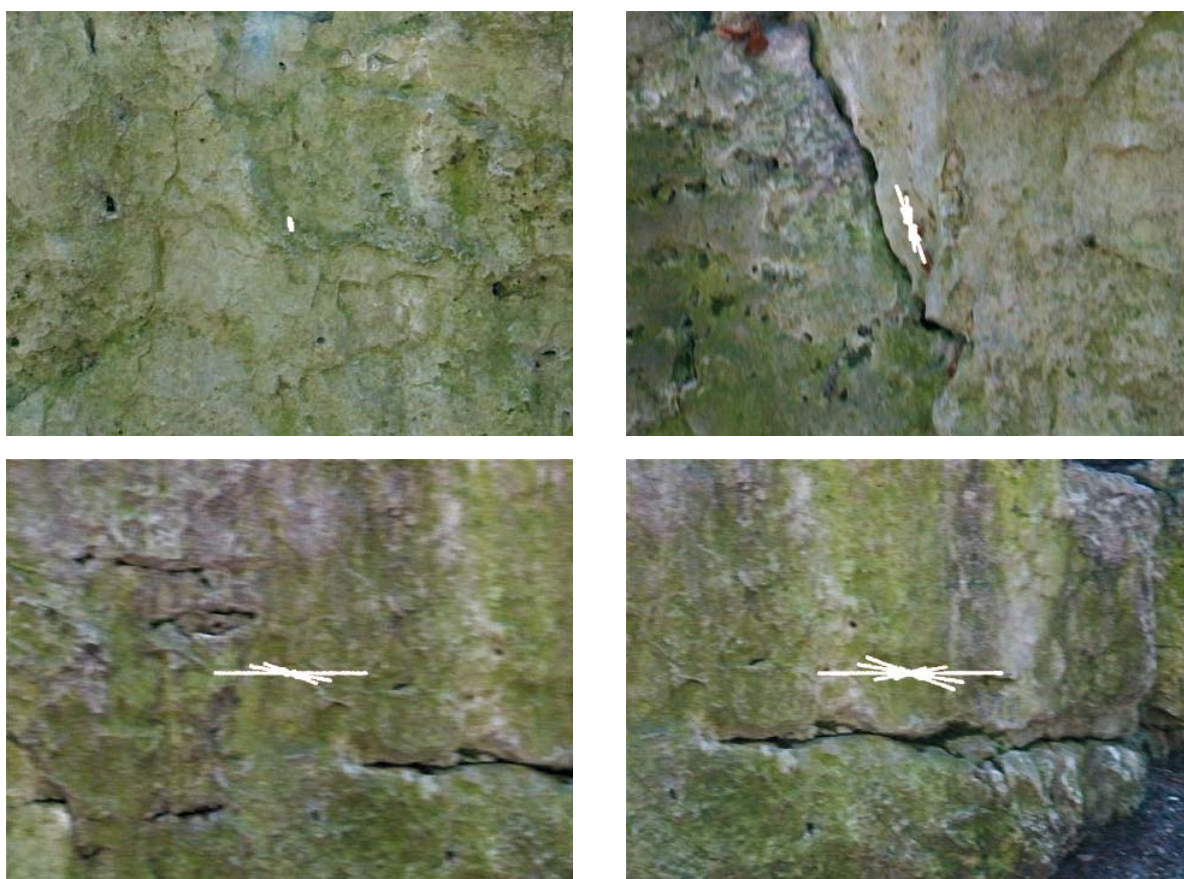
Proponowana metodyka postępowania powoduje, że gdy na obrazie gradientu (po binaryzacji) przeprowadzimy erozję elementem strukturalnym w postaci odcinka o długości d ukierunkowanym w kierunku α , to parametrem opisywanym przez objętość obrazu (odniesionym do powierzchni całego obrazu) jest prawdopodobieństwo, że odcinek o długości d i kierunku α pokrywa się na całej swojej długości z fragmentem obwodu jakiegokolwiek nieciągłości zidentyfikowanej na obrazie ściany skalnej.

5. Analiza sekwencji wideo przy wykorzystaniu metody oszacowania ukierunkowania nieciągłości

Bazując na zaprezentowanym algorytmie podjęto próbę analizy ukierunkowania spękań widocznych na sekwencji wideo. Analiza filmów polegała na wyodrębnieniu z nich poszczególnych klatek i analizie każdej z nich z osobna. W przypadku analizy stosowano przedstawiony wcześniej algorytm. Ze względu jednak na fakt, że wymagał on wyznaczania ukierunkowania (erozji kierunkowej) dla 180 kierunków, niemożliwe było prowadzenie analizy w trybie on-line. Dlatego zdecydowano się na minimalizację analizowanych kierunków do 9. Przykładowe wyniki analiz zestawiono na rysunkach 10 i 11. Czas analizy pojedynczego zdjęcia zamyka się w około jednej sekundzie. Istnieje więc duża szansa, że optymalizacja zaproponowanego algorytmu pozwoli na prowadzenie opisanej analizy ukierunkowania spękań w trybie on-line.



Rys. 10. Przykłady detekcji ukierunkowania struktury dla wybranych klatek sekwencji wideo



Rys. 11. Przykłady detekcji ukierunkowania struktury dla wybranych klatek sekwencji wideo

6. Podsumowanie

W pracy zaproponowano metodę szacowania ukierunkowania nieciągłości na ścianach skalnych. Starano się aby metoda ta była stosunkowo prosta w realizacji i nie wymagała wykonywania wielu przekształceń analizy obrazu. Wynikało to z faktu, że planuje się aby metoda ta była podstawą do wykonania zestawu mogącego analizować ukierunkowanie struktury skalnej on-line, na podstawie filmu z kamery CCD. Metodę przetestowano na zdjęciach i filmach video z różnych kamieniołomów. Dawała ona pozytywne rezultaty. Podjęto także próbę automatycznej segmentacji szczelin na ścianach skalnych. Zakończyła się ona częściowym sukcesem, gdyż podczas pracy wymagała manualnej korekty rozłączonych w wyniku binaryzacji śladów szczelin.

7. Literatura

- Bolewski A., Parzchoniak W., 1982. *Petrografia*, Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- Chung C.F., Fabbi A.G., Kasvand T., Otsu N., 1985. *Grain contiguity an interference on permeability of granites*, Applied Mineralogy.
- Hobler M., 1977. *Badania fizykomechanicznych właściwości skał*, PWN, Warszawa.
- Kidybiński A., 1982. *Podstawy geotechniki kopalnianej*, Wydawnictwo "Śląsk", Katowice.
- Kleczek Z., 1994. *Geomechanika górnicza*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
- Kleczkowski S., Rózkowski A. (red.), 1997. *Słownik hydrogeologiczny*, Wyd. TRIO, Warszawa.
- Kushuda H., Nishiyama T., Saito T., 1995. *Observation and evaluation of microcrack propagation in granite fractured by uniaxial compression test using fluorescent resins*, Journal of Society of Materials Science., 44(502), pp. 851-855.
- Lemy F., Hadjigeorgiou J., 2003. *Discontinuity trace map construction using photographs of rock exposures*, Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40, 903-917.
- Liu H.Y., Roquete M., Kou S.Q., Lindqvist P.A., 2004. *Characterization of rock heterogeneity and numerical verification*, Engineering Geology, 72, 89-119.
- Młynarczuk M., 2004. *Możliwości wykorzystania analizy obrazu i morfologii matematycznej do analizy stereologicznej struktur skalnych*, Archives of Mining Sciences, vol. 49.
- Młynarczuk M., 2005. *Application of Image Analysis and Mathematical Morphology in Petrography*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 81, nr 3/2005, s. 20-25.
- Młynarczuk M., Ratajczak T., Aksamit J., 2005. *Badania in-situ szczelinowatości i chropowatości ścian skalnych przy wykorzystaniu analizy obrazu i profilometrii laserowej*, Prace IMG PAN, vol. 7, no. 3, pp. 215-230, wyd. IMG PAN Kraków.
- Młynarczuk M., Ratajczak T., Aksamit J., 2003. *Zastosowanie metod stereologii i analizy obrazu do ilościowego opisu spękań wymuszonych w skałach*, Prace IMG PAN, Kraków
- Nowakowski A., Młynarczuk M., Ratajczak T., Gustkiewicz J., 2003. *Wpływ warunków termicznych na zmianę niektórych właściwości fizycznych i strukturalnych wybranych skał*, Prace IMG PAN, Seria: Rozprawy, Monografie, nr 5.
- Obara B., Młynarczuk M., 2004. *Wykorzystanie metod analizy obrazu do zautomatyzowania opisu geometrii szczelin śródkryształicznych występujących w dolomicie z Rędzin*, (w:) Geotechnika i Budownictwo specjalne, Materiały XXVII Zimowej Szkoły Mechaniki Górniczej.
- Pinińska J., 2007. *Szczelinowatość masywów skalnych po 30 latach w świetle normy PN-EN ISO14689-1 – badania geotechniczne, rozpoznanie i klasyfikacja skał*, Geologos, 11.
- Pinińska J., 2001. *Systemy geologiczno-inżynierskiej oceny skał i masywów skalnych*, Przegląd geologiczny, vol. 49, nr 9.
- Pinińska J., 1994. *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Część I: Skały osadowe regionu Świętokrzyskiego*, Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Ryncarz T., 1993. *Zarys Fizyki Górniczej*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
- Serra J., 1999. *Course on mathematical morphology – materiały prezentacji PPT – Ecole des Mines de Paris*.

Application of state-of-the-art. image analysis methods to automation of qualitative measurements in geotechnics- description of crack geometry revealed on rock structures

Abstract

Mathematical morphology methods are applied here to the detection and description of cracks and fissures revealed on exposed rock surfaces. The analysis is based on photographs and videos of exposed rocks in the vicinity of Kraków and the Świętokrzyskie Mountains (Poland). The simplest technique, yet yielding most interesting results, involves the analysis of morphological gradients to forecast the directions of discontinuities. The vast body of data about rock fissures is obtained when the investigated rock walls are divided into segments. Advantages and drawbacks involved in such segmentation are briefly outlined. Selected parameters are presented that might be determined automatically.

Keywords: rock fissures, direction of cracks, image analysis, mathematical morphology