

Profilometria optyczna

MAREK GAWOR

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono zastosowanie komputerowej analizy obrazu do wyznaczania przekroju poprzecznego wyrobiska kopalnianego. Obrys wyrobiska oświetlano za pomocą układu laserowych diod świecących. W celu utworzenia „linii światła”, wyznaczającej obrys wyrobiska, dołączono do diod laserowych soczewki walcowe. Następnie aparatem cyfrowym wykonywano zdjęcie. Zdjęcie poddawano komputerowej analizie, która umożliwiała wyznaczenie ilości pikseli zawartych w przekroju wyrobiska. Po wyznaczeniu skali zdjęcia (ilość pikseli przypadających na metr kwadratowy) wyliczano powierzchnię przekroju wyrobiska.

Słowa kluczowe: wentylacja kopalń, fotografia cyfrowa, analiza obrazu, pomiar strumienia przepływu

1. Wstęp

Znajomość powierzchni przekroju wyrobiska jest bardzo istotna w celu wyznaczenia objętościowego natężenia strumienia przepływu powietrza lub gazów (np. metan, dwutlenek węgla) w wyrobiskach kopalnianych, tunelach i kanałach przepływowych. Objętościowe natężenie strumienia przepływu jest iloczynem średniej prędkości przepływu gazu i powierzchni, przez którą ten gaz przepływa [1]. Współczesne metody pomiarów średniej prędkości przepływu gazu są wykonywane z dostatecznie dobrą dokładnością. Jednak dokładne wyznaczenie powierzchni przekroju jest obarczone dużą niepewnością pomiaru.

W ostatnich latach nastąpił szybki rozwój metod pomiarowych związanych z komputerową analizą obrazu [2]. Jedną z istotnych zalet takiej analizy jest to, że za jej pomocą można dokonać pomiarów wielu parametrów figur geometrycznych. Parametrami takimi mogą być: długość lub obwód krzywej, powierzchnia figury. Dodatkowo można wyznaczyć takie parametry geometryczne figur jak: średnice Fereta, momenty bezwładności, współczynnik kształtu itp.

Postanowiono więc wykorzystać metody komputerowej analizy obrazu w celu wyznaczenia przekroju poprzecznego wyrobiska. Zasada pomiaru polega na wykonaniu zdjęcia w określonym miejscu wyrobiska [3]. Kolorowe zdjęcie wykonywane jest przy pomocy cyfrowego aparatu fotograficznego. Odpowiednio skonstruowany układ laserowych diod świecących oświetlał ściany wyrobiska w taki sposób, że tworzyły się na nich linie światła stanowiące obrys.

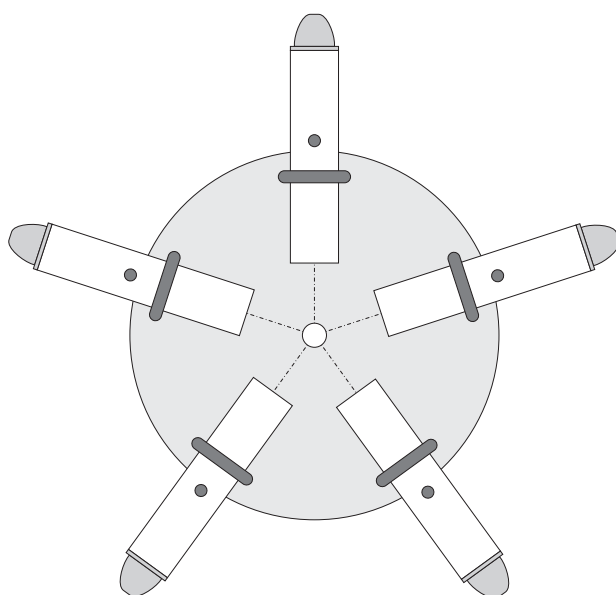
Następnie wykonane zdjęcie wczytywano do komputera. Analizę wykonanego zdjęcia przeprowadzano za pomocą specjalnie w tym celu napisanych algorytmów. Miały one na celu wyróżnienie sfotografowanych linii oświetlających obrys wyrobiska. Znając obrys wyrobiska można wyznaczyć jego powierzchnię. Tak wyznaczona powierzchnia dana jest poprzez ilość pikseli zawartych w obrysie. Następnie należy wyznaczyć współczynnik skali, który zależy od ilości pikseli przypadających na metr kwadratowy. Mnożąc powierzchnię wyznaczoną w pikselach przez współczynnik skali otrzymujemy rzeczywistą powierzchnię mierzonego wyrobiska. Opracowane algorytmy zostały zastosowane w programie, który w wygodny dla użytkownika sposób realizował zadanie wyznaczenia mierzonej powierzchni.

2. Układ oświetlający

W celu oświetlenia obrysu mierzonego przekroju poprzecznego wyrobiska, konieczne było opracowanie i wykonanie odpowiedniego układu oświetlającego. Układ taki powinien oświetlać wszystkie ściany w miarę jednorodną linią światła. Oświetlenie takie można zrealizować za pomocą „noża świetlnego” [4]. Nóż wykonano poprzez zastosowanie układu punktowych źródeł światła i soczewek walcowych.

Jako punktowe źródło światła najwygodniej zastosować laserowe diody świecące. Diody takie są ogólnie dostępne, jednak ich cena zależy od mocy emitowanego światła. Oczywiście, że im większy będzie mierzony przekrój poprzeczny, tym emitowana moc światła (przez diody) powinna być większa. Pełne oświetlenie przekroju poprzecznego wyrobiska wymaga zastosowania kilku diod laserowych.

Zastosowany w badaniach układ oświetlający składał się z pięciu diod laserowych. Moc świetlna każdej diody wynosiła ok. 1 mW. Do każdej diody dołączono soczewkę walcową o średnicy 4 mm. Diody wraz z zamontowanymi soczewkami walcowymi, rozmieszczono na kole o promieniu 4,5 cm (Rys. 1).



Rys. 1. Układ oświetlający przekrój poprzeczny wyrobiska

3. Algorytmy do wyznaczania powierzchni na podstawie wykonanych zdjęć

Zdjęcia wykonywano aparatem cyfrowym o rozdzielczości obrazu 960x1280 pikseli. Wykonywano zdjęcia kolorowe – rozdzielczość koloru – 24 bity. W reprezentacji kolorów (RGB – czerwony, zielony, niebieski) na każdy kolor przyda osiem bitów odcieni koloru.

Przykładowe zdjęcie przedstawiono na Rys. 2 (zdjęcie korytarza). Widoczny jest na nim obrys ścian, podłogi i sufitu, pochodzący od światła diod laserowych. Niestety, ze względów wydawniczych, prezentowane w artykule zdjęcie jest czarno-białe. W rzeczywistości obrys jest w kolorze czerwonym. Za obrysem widoczne są białe linie pochodzące od obramowania drzwi. Z lewej strony u góry widoczna jest biegnąca wzdłuż korytarza rura. W środku fotografii, w głębi widać światło pochodzące od oświetlenia klatki schodowej. Tak więc, oprócz czerwonego obrysu, na wykonanym zdjęciu znajduje się stosunkowo dużo białego koloru.

3.1. Wyodrębnienie czerwonego obrysu

Pierwszy etap działania algorytmów polegał na wydzieleniu koloru czerwonego stanowiącego obrys wyrobiska. Wydaje się, że zadanie to jest proste. Wystarczy usunąć kolory zielony i niebieski. Powinien zostać tylko kolor czerwony.

Pod pojęciem usuwania koloru (wygaszania) należy rozumieć podstawienie zera w reprezentacji bitowej (nasycenie koloru) określonej składowej koloru np. $G = 0$. Jednak należy zauważyć, że kolor biały zawiera



Rys. 2. Zdjęcie obrysu korytarza

też składową $R = 255$. W reprezentacji RGB nasycenie każdego koloru w bieli jest pełne ($R = 255$, $G = 255$, $B = 255$). Tak więc po usunięciu składowych koloru zielonego i niebieskiego z koloru białego otrzymany zostanie kolor czerwony, a nie o to chodzi w tym zadaniu.

Opracowano więc algorytm polegający na usuwaniu składowych kolorów tylko wtedy, gdy reprezentacja kolorowa tych pikseli spełnia określony warunek. Wygaszono piksele, w których nasycenie składowych kolorów zielonego (G) lub niebieskiego (B) było większe od zadanych progów oraz czerwonego (R) mniejsze od zadanego progu:

$$\text{jeżeli } G > p_G \text{ lub } B > p_B \text{ lub } R < p_R \text{ to } R = 0, G = 0, B = 0$$

gdzie:

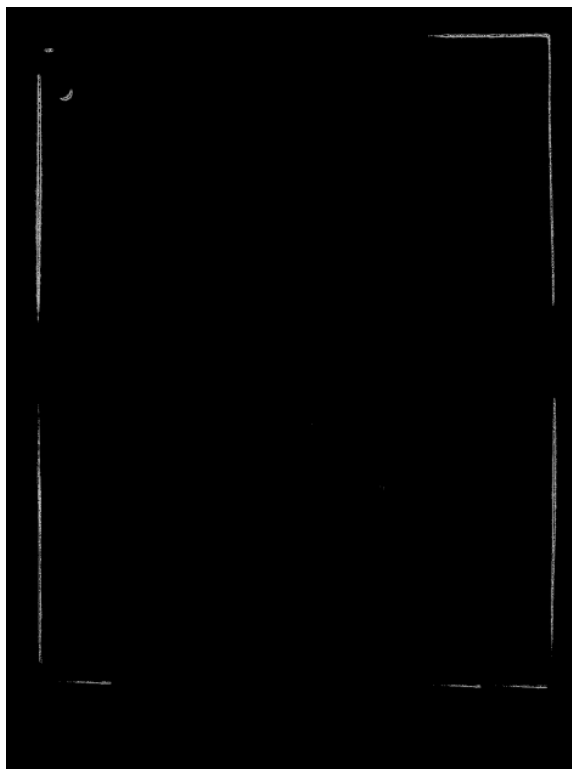
- p_G – wartość progu dla koloru zielonego,
- p_B – wartość progu dla koloru niebieskiego,
- p_R – wartość progu dla koloru czerwonego.

W efekcie takiego działania zostają wygaszone składowe kolorów zielonego i niebieskiego. Jednocześnie, co jest bardzo istotne, zostanie wygaszony kolor biały.

W zależności od jakości wykonywanego zdjęcia wartości progów p_R p_G p_B mogą być różne. Dla prezentowanego zdjęcia wartości te były następujące: $p_R = 100$, $p_G = 50$, $p_b = 50$. Na tym etapie analizy zdjęcia operacja wymaga podejmowania decyzji przez analizującego obraz. Dla ułatwienia tej analizy w programie umieszczono „suwaki”, które w wygodny sposób umożliwiają zmianę wartości progów. Wynik działania operacji, po każdorazowej zmianie wartości suwaków”, pokazywany jest na ekranie monitora. Po wykonaniu powyżej opisanych działań otrzymywany jest fragment obrysu przedstawiony na Rys. 3.

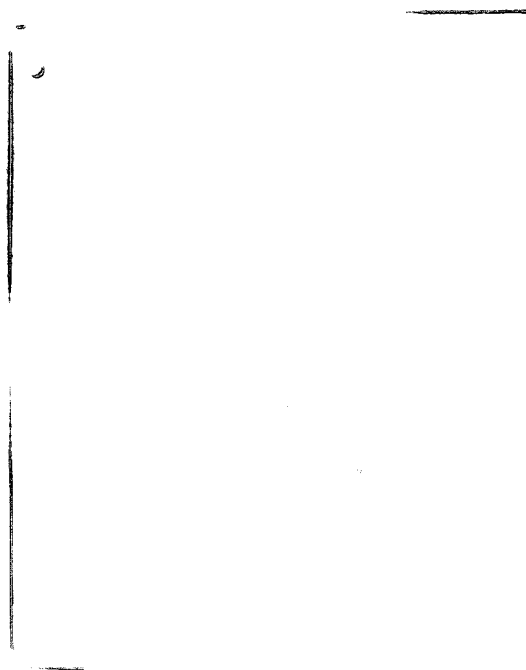
3.2. Binaryzacja obrazu

Dalsza analiza obrazu będzie przeprowadzana na obrazach binarnych. W celu binaryzacji obrazu konieczna jest zmiana rozdzielczości kolorów z 24 bitów na 8 bitów. Tak otrzymany obraz reprezentowany jest w odcieniach szarości (0–255 bitów). Następnie należy dokonać binaryzacji polegającej na przypisaniu



Rys. 3. Wydzielenie koloru czerwonego (widoczne jaśniejsze linie są koloru czerwonego)

odcieniom szarości wartości 0 lub 1. Realizowane jest to w ten sposób, że wartościom poniżej ustawionego progu przypasowana jest wartość 0 (czarny), a powyżej wartość 1 (biały). W przypadku analizowanego zdjęcia wartość progu binaryzacji wynosiła 10. W wyniku przeprowadzonych operacji otrzymano linie zaznaczające obrys wyrobiska (Rys. 4). Ze względu na lepsze przedstawienie niektóre zdjęcia będą przedstawiane w negatywie. Duża ilość czarnego koloru na wydruku utrudnia analizę zdjęć.



Rys. 4. Obraz po binaryzacji (negatyw)

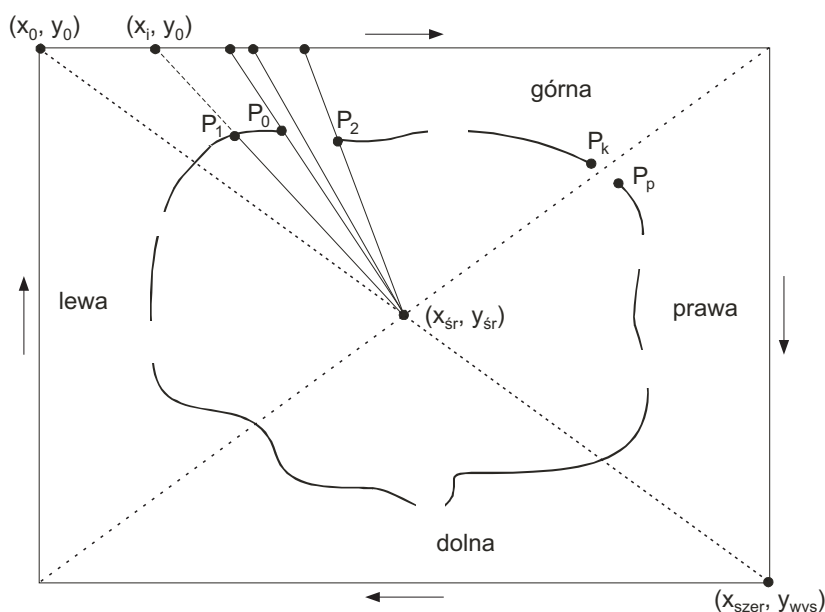
3.3. Usuwanie izolowanych punktów nie należących do konturu

Tak otrzymany obraz zawierał jednak pewną ilość punktów nie należących do obrysu. Punkty takie należy usunąć, gdyż ich obecność utrudnia dalszą analizę obrysu. W tym celu napisana została procedura, która wyszukujące izolowane figury, tzn. grupy połączonych pikseli. Procedura ta skanuje obraz linia po linii, wyszukuje piksele o wartości 1 i zapamiętuje ich położenie. Znalazionym pikselom przypisywany jest kolejny numer identyfikujący każdą figurę. Przy analizie następnej linii po wyszukaniu piksela sprawdzane jest czy styka się on ze wcześniej znalezionymi figurami. Jeżeli tak, to piksel zostaje przypisany do tej figury. Jeżeli nie to traktowany jest jako następna figura. Procedura taka nazywana jest *labeling*. Na prezentowanym zdjęciu (Rys. 4) znaleziono 57 figur z których największa zawierała 2663 piksele, a najmniejsza 1 piksel.

Niektóre ze znalezionych figur należą do szukanego obrysu. Założono, że figury zawierające więcej niż 10 pikseli należą do obrysu. W związku z tym wyszukano figury, które zawierają mniej niż 10 pikseli. Figur takich znaleziono 46, z których największa zawierała 8 pikseli, a najmniejsza 1 piksel. Znając położenia wyszukanych figur, jest to położenie lewego górnego piksela, można było usunąć te figury.

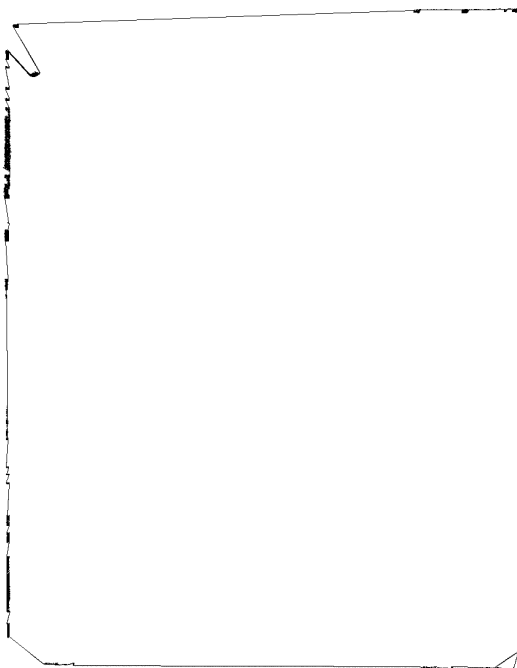
3.4. Domykanie konturu

Otrzymane linie nie stanowią kompletnego obrysu, gdyż występują pomiędzy nimi przerwy. Napisa- no więc procedurę łączącą linie w całkowity obrys. W pierwszym etapie działania procedury znajdowany jest środek geometryczny figury – średnia z minimalnej i maksymalnej wartości pionowych i poziomych współrzędnych figury ($x_{śr}$, $y_{śr}$) (Rys. 5). Następnie obraz dzielony jest na cztery części: *górna*, *dolna*, *lewa* i *prawa*. Analiza odbywa się w każdej części oddzielnie.



Rys. 5. Sposób domykania konturu

W artykule przedstawiona zostanie analiza przeprowadzona w górnej części obrazu. Budowane są linie proste przechodzące przez środek geometryczny figury ($x_{śr}$, $y_{śr}$) i kolejne punkty położone na górnym brzegu analizowanego obrazu (x_i , y_0). Znając równanie prostej, przechodzącej przez te punkty, można stwierdzić, czy prosta przecina się z punktem leżącym na konturze np. punkt P_1 na rysunku. Jeżeli prosta nie przecina żadnego punktu to zapamiętywany jest ostatnio znaleziony punkt P_0 . Po znalezieniu następnego punktu przecięcia (P_2) następuje połączenie punktów P_0 i P_2 linią prostą. Ponieważ analiza odbywa się w oddzielnych ćwiartkach (kierunek budowania prostych wychodzących ze środka figury pokazują strzałki) ważne jest zapamiętanie ostatniego punktu w ćwiartce (P_k) i pierwszego punktu w następnej (P_p). Punkty te są później łączone. Wynik działania procedury przedstawiono na Rys. 6.



Rys. 6. Zamknięty kontur

3.5. Wypełnianie konturu

Po uzyskaniu zamkniętego konturu można zastosować procedurę wypełniającą kontur. W tym celu wykorzystano funkcje morfologicznej analizy obrazu binarnego. Pierwszym etapem było skonstruowanie prostokąta o rozmiarach wykonanego zdjęcia (analizowany kontur jest zawarty w tak skonstruowanym prostokącie). Kolejnym etapem było wykonanie dylatacji geodezyjnej obrazu prostokąta w maskę otrzymaną poprzez odwrócenie obrazu konturu. Dylatacja geodezyjna jest operacją morfologiczną polegającą na „poszerzeniu” analizowanej figury pod warunkiem, że „wynik” nie wychodzi poza obszar maski. Powyżej opisane operacje wykonywane są do momentu, gdy nie zachodzą już żadne zmiany (wynik następnej operacji jest identyczny z wynikiem poprzedniej). Rezultatem tych procedur jest powierzchnia przedstawiona na Rys. 7.

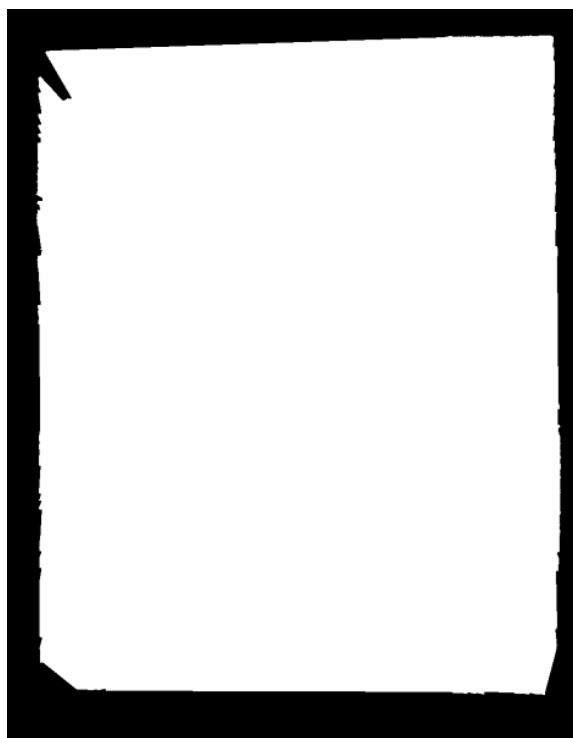
Na fotografii widać obecność rury przebiegającej w lewym górnym rogu korytarza. Ze względu na brak odpowiedniego oświetlenia w lewym i prawym dolnym rogu występują „ścięcia” obrazu (w miejscach tych są cokoły ceramiczne odbijające światło).

4. Wyniki obliczeń przekroju poprzecznego

Mając wyznaczoną powierzchnię przekroju poprzecznego, wyrażoną w pikselach, można wyliczyć rzeczywistą powierzchnię w metrach kwadratowych. W celu wyznaczenia tej powierzchni konieczna jest znajomość wymiarów rzeczywistych analizowanego zdjęcia. Przyjęto, że wymiarem odniesienia jest odległość środka położenia diod świecących od podłogi. Odległość ta wynosiła 0.905 m. Następnie odległość tę wyznaczono na zdjęciu mierząc ilość pikseli pomiędzy środkiem diod i podłogą. Wartość ta może być otrzymana dość dokładnie, gdyż program umożliwia precyzyjne ustawienie kursora, odczyt jego współrzędnych i intensywności kolorów. Znaleziona odległości wynosiła 409 pikseli. Wyliczony na podstawie podanych wartości współczynnik skali wynosił $4.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{piksel}$.

Wyliczona, na podstawie zdjęcia, ilość pikseli fotografowanego przekroju poprzecznego wynosiła 923 510 pikseli. Po przemnożeniu ilości pikseli przez współczynnik skali otrzymano powierzchnię 4.52 m^2 .

Tak wyliczoną powierzchnię porównano z powierzchnią wynikającą z pomiarów geometrycznych – szerokość i wysokość korytarza. Szerokość korytarza wynosiła 1.90 m, a wysokość 2.36 m. Wyliczona powierzchnia wynosi 4.49 m^2 . Tak więc względna różnica pomiędzy tymi pomiarami wynosi 0.7%.



Rys. 7. Analizowana powierzchnia

Dokonano również pomiaru powierzchni korytarza za pomocą profilometru laserowego [5]. Jest to metoda polegająca na skanowaniu przekroju poprzecznego przez dalmierz laserowy. Wyznaczona tą metodą powierzchnia wynosiła 4.49 m^2 i była równa powierzchni wyznaczonej poprzez pomiar długości i szerokości.

5. Uwagi końcowe

Jak można zauważyć wykonane zdjęcia nie są najlepszej jakości. Spowodowane jest to zbyt małą ilością światła padającego na ściany mierzonego przekroju. W celu polepszenia jakości zdjęć należałoby zastosować diody o większej mocy. Innym rozwiązaniem może być użycie większej ilości diod laserowych. To drugie rozwiązanie jest korzystniejsze, gdyż może zapewnić oświetlenie całego obrysu (tzn. bez przerw). Szczególnie istotne jest oświetlenie naroży analizowanego konturu. Jak widać na Rys. 7 niedokładne oświetlenie naroży (szczególnie dolnego lewego) powoduje błędne odwzorowanie konturu.

Na niepewność pomiaru powierzchni ma istotny wpływ dokładność wyznaczenia pola na podstawie ilości pikseli zawartych w obrysie. Przyjęto, że dla analizowanego zdjęcia, ilość pikseli w obrysie wyznaczona jest z dokładnością 20 000. Niepewność pomiaru powierzchni zależna od wyznaczenia pikseli na obrazie wynosi 0.10 m^2 .

Kolejnym parametrem wpływającym na dokładność wyznaczenia powierzchni jest współczynnik skali. Wyznaczenie tego współczynnika zależy od dokładności pomiaru wysokości środka tarczy, na której zamontowane były diody, oraz wyznaczenia tej wysokości w pikselach na wykonanym zdjęciu. Przyjęto, że pomiaru wysokości dokonano z dokładnością odpowiednio 2 mm i 2 piksele. Niepewność pomiaru powierzchni zależna od powyższych parametrów wynosi 0.06 m^2 . Sumaryczna niepewność pomiaru wynosi więc 0.16 m^2 . Względna niepewność pomiaru przy tak przyjętych założeniach wynosi 1.42%.

Należy zauważyć, że uzyskana dokładność pomiaru powierzchni porównywana z pomiarami geometrycznymi, jak również z pomiarami dalmierza laserowego jest dwukrotnie lepsza.

Literatura

- [1] Trutwin W.: *Zastosowanie profilometrii do określania pola przekroju poprzecznego wyrobisk kopalnianych*, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, t. 6, nr 3-4, (2004), s. 249-256.
- [2] Wojnar L., Majorek M.: *Komputerowa analiza obrazu*. FotoBit Design. Kraków (1994).
- [3] Kruczkowski J.: *Przyrządy pomiarowe i programy komputerowe do wyznaczania wybranych parametrów fizycznych atmosfery kopalni głębinowej*, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, t. 5, nr 1, (2003), s. 51-62.
- [4] Mirek P., Sekret R., Nowak W.: *Technika laserowego noża świetlnego w badaniach przepływów wielofazowych*, V Warsztaty „Modelowanie przepływów wielofazowych w układach termochemicznych. Zaawansowane techniki pomiarowe”. Stawiska (2005).
- [5] Młynarczuk M.: *Oprogramowanie sterujące Laboratoryjnym Profilometrem Laserowym*, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, t. 6, nr 3-4, (2004), s. 263-266.

The optical profilometry

Abstract

In the paper the author describes the application of the computer image analysis for the determination of cross-sections of mining works. The circumference of the works has been illuminated by means of laser diodes. In order to obtain the 'illumination lines' which emphasize the circumference the laser diodes were completed with cylindrical lens. The images were obtained applying the digital camera. Afterwards they were handled by means of the computer program to determine the number of pixels contained in the cross-sections of mining works. After the determination of the scale of each image (the number of pixels per square meter) the cross-section area has easily been computed.

Keywords: mines ventilation, digital imaging, image analysis, flow measurement

Recenzent: doc. dr hab. inż. *Paweł Ligęza*, Instytut Mechaniki górnictwa PAN