

ADAM HEYDUK

Wizyjny monitoring i analiza granulometryczna nadawy

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z wykorzystaniem technik wizyjnych do celów analizy składu ziarnowego. Opisano podstawowe etapy i uwarunkowania akwizycji obrazów materiału ziarnistego, a następnie ich dalszego przetwarzania i analizy. Sformułowano zalety akwizycji i przetwarzania obrazów trójwymiarowych w porównaniu z dwuwymiarowymi. Przedstawiono potencjalne obszary zastosowań związane z nadzorowaniem transportu materiałów, optymalizacją procesów wzbogacania grawitacyjnego oraz pomiarami gęstości nasypowej.

Słowa kluczowe: pomiary składu ziarnowego, analiza obrazu, przeróbka węgla

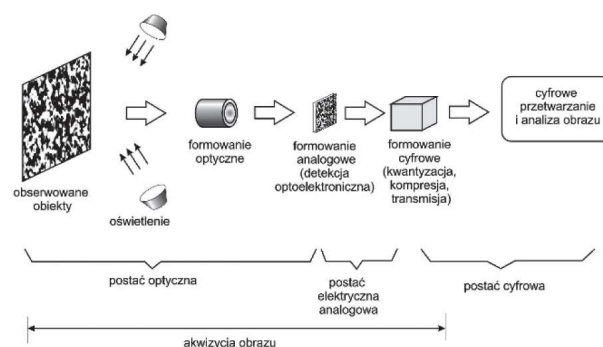
1. WSTĘP

Wzrok jest jednym z najważniejszych zmysłów, dostarczającym większość informacji przetwarzanych przez ludzki umysł. Efektywność wizualnej oceny otaczającego świata skłania do poszukiwania sposobów algorytmizacji przetwarzania informacji obrazowej z wykorzystaniem nowoczesnych środków techniki obliczeniowej. Od wielu lat podejmuje się próby wykorzystania informacji wizyjnej w przeróbce surowców mineralnych. Prace nad zastosowaniem przetwarzania obrazów do celów analizy granulometrycznej prowadzone były pod kątem oceny składu ziarnowego surowców skalnych (np. w kamieniołomach), gdyż była to najbardziej efektywna metoda określania rozmiaru dużych bloków skalnych, niepodlegających analizie sitowej. Pierwsze badania były realizowane na podstawie analizy skanowanych zdjęć uzyskanych metodą fotochemiczną. Efekty robót strzałowych oceniano w oświetleniu naturalnym na podstawie zdjęć statycznych [1–4]. Rozwój metod wizyjnych jest ściśle związany z postępem w dziedzinie technologii optoelektronicznych, obniżającym koszty i podwyższającym parametry dostępnych cyfrowych kamer i aparatów fotograficznych oraz wzrost mocy obliczeniowej systemów komputerowych umożliwiającą przetwarzanie złożonych (tzn. obejmujących bardzo dużą liczbę ziaren, zwłaszcza odwzorowanych w wysokiej rozdzielczości). Oprócz analizy granulometrycznej skał w kamieniołomach i górnictwie odkrywkowym jako potencjalny obszar zastosowań monitoringu wizyjnego wymienić można analizę składu

ziarnowego urobku w skrzyniach wozów kolejowych lub samochodów ciężarowych [4, 5] oraz analizę mikroskopowych obrazów najdrobniejszych ziaren w środowisku wodnym [6] oraz popiołów lotnych [7]. W niniejszej pracy skoncentrowano się na zagadnieniu monitoringu strumienia ziaren przemieszczających się na taśmie przenośnika [8].

2. AKWIZYCJA OBRAZÓW DWUWYMIAROWYCH

Akwizycja obrazu, czyli jego pozyskanie (przez odpowiedni układ optyczny, a następnie optoelektroniczny) i zachowanie w postaci cyfrowej, jest pierwszym elementem wieloetapowego przetwarzania obrazu, warunkującym efektywność jego dalszej analizy [8, 9]. Podstawowe etapy procesu akwizycji obrazu od obiektu rzeczywistego aż do postaci cyfrowej przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Podstawowe etapy akwizycji obrazu

W przypadku analizy ziaren węgla kamiennego zadanie to jest szczególnie skomplikowane, gdyż jest to skała najtrudniejsza do analizy wizyjnej ze względu na czarną barwę i związaną z tym bardzo niską wartość współczynnika odbicia światła. Dodatkowym utrudnieniem jest występujący w przypadku węgla połysk, zmieniający kierunek odbicia światła i utrudniający analizę kształtu i rozmiaru ziarna. Jeszcze trudniejsza staje się sytuacja w przypadku węgla mokrego, np. w wyniku zraszania wodą związanego ze zwalczaniem zapylenia. Można tu jeszcze wspomnieć o czarnym kolorze gumowej taśmy przenośnika – zwłaszcza mokrej – utrudniającym wyodrębnienie analizowanych obiektów (czyli ziaren) od tła. Z uwagi na wyżej wymienione czynniki stosunek sygnału użytecznego – czyli zmian jasności związanych z rozmiarem i kształtem powierzchni ziaren do szumu związanego z odbiciami i niejednorodnym oświetleniem jest w przypadku węgla znacznie mniej korzystny niż w przypadku innych surowców mineralnych. Dlatego też systemy analizy wizyjnej – choć stosowane w górnictwie skalnym i rud metali, nie znalazły dotąd szerszego zastosowania w górnictwie węglowym. Wymaga to bowiem opracowania wyspecjalizowanych algorytmów uwzględniających powyższe uwarunkowania oraz zapewnienia odpowiedniej jakości obrazu wejściowego. Ponieważ obraz (analogowy lub cyfrowy) jest zawsze wynikiem odbicia światła od powierzchni obserwowanych obiektów (ziaren) to szczególną uwagę należy zwrócić na zapewnienie odpowiedniego oświetlenia. Zjawisko odbicia światła od powierzchni ziarna opisane jest prawem Lamberta, a podstawowym elementem pozwalającym wyodrębnić stykające się ze sobą ziarna są zacienione przestrzenie międzyziarnowe. Dlatego najlepsze efekty uzyskuje się przy oświetleniu mieszanym, z dominującym udziałem oświetlenia bocznego, ponieważ nie rozświetla ono nadmiernie przestrzeni międzyziarnowych [10].

W analizie wizyjnej dostępna jest jedynie powierzchniowa warstwa materiału ziarnistego, dlatego powstaje problem oceny reprezentatywności tej warstwy dla całości strumienia. Przeprowadzone z wykorzystaniem metody Monte Carlo badania symulacyjne [8] wykazały, że istotnym warunkiem tej reprezentatywności jest zapewnienie stosunkowo niewielkiej (tzn. porównywalnej z wysokością największych ziaren) grubości warstwy oraz dokonywanie pomiaru na początku taśmy – czyli tam, gdzie wpływ zjawiska segregacji wibracyjnej – powodującej wpadanie mniej-

szych ziaren pomiędzy większe – jest jeszcze pomijalnie mały.

3. AKWIZYCJA OBRAZÓW TRÓJWYMIAROWYCH

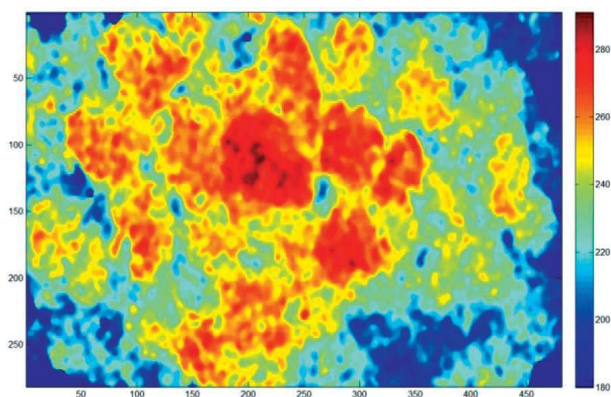
Rzeczywista powierzchnia strumienia materiału ziarnistego jest trójwymiarowa. Stąd też wspólną wadą metod związanych z analizą obrazów dwuwymiarowych (monochromatycznych lub wielobarwnych) jest utrata bezpośredniej informacji związanej z trzecim – tzn. prostopadłym do dwóch wymiarów płaszczyzny obrazu – wymiarem zarówno pojedynczych ziaren, jak i całego ich zbioru. Stąd też znacznie pełniejszą informację można uzyskać, stosując akwizycję, a następnie analizę obrazów trójwymiarowych. Na podstawie przeprowadzonych badań można tu wyróżnić jako szczególnie efektywne (bo wykorzystujące prostoliniowy ruch taśmy przenośnika) metody [8, 11, 12]:

- stereowizję [13, 14],
- triangulację laserową,
- pomiar czasu przelotu sygnału (T-o-F Time of Flight).

Na rysunkach 2 i 3 porównano obraz dwuwymiarowy i odpowiadającą mu mapę wysokości, czyli obraz trójwymiarowy uzyskany metodą pomiaru czasu przelotu. Uzyskiwane w ten sposób obrazy trójwymiarowe charakteryzują się – w porównaniu z obrazami dwuwymiarowymi – mniejszą wrażliwością na nierównomierność oświetlenia oraz odbłaski światła od powierzchni ziaren, a przede wszystkim umożliwiają bezpośredni pomiar wysokości zarówno poszczególnych ziaren, jak i całej powierzchni strumienia materiału.



Rys. 2. Przykładowy fragment powierzchni strumienia węgla



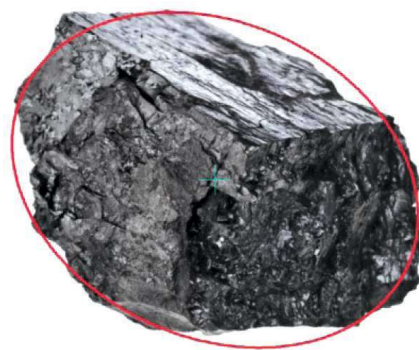
Rys. 3. Mapa wysokości, czyli obraz trójwymiarowy odpowiadający powierzchni z rysunku 2

Umożliwia to dokładniejsze oszacowanie objętości i masy ziaren oraz wyznaczenie – przydatnej w wielu zastosowaniach – gęstości nasypowej strumienia materiału. Należy podkreślić, że metody przetwarzania obrazów trójwymiarowych i dwuwymiarowych są do siebie w wielu aspektach bardzo zbliżone z uwagi na fakt, że najgłębsze (czyli o najmniejszej wysokości) obszary przestrzeni międzyziarnowych, wyznaczające kontury poszczególnych ziaren są jednocześnie obszarami najciemniejszymi, czyli charakteryzują się najniższym poziomem jasności – z uwagi na duże nachylenie ścian ziaren oraz zacienienie związane z utrudnionym dopływem światła.

4. PRZETWARZANIE I ANALIZA OBRAZU

Po dokonaniu akwizycji obrazu (czyli zarejestrowaniu go w postaci cyfrowej) niezbędne jest jego wstępne przetworzenie w celu likwidacji zakłóceń wywołanych nierównomiernością oświetlenia oraz lokalnymi odbłaskami od błyszczących fragmentów powierzchni ziaren. Przeprowadzone analizy [10] wykazały, że w przypadku nierównomierności oświetlenia najlepsze efekty można uzyskać, stosując normalizację oświetlenia na podstawie nierównomierności wzorcowej zarejestrowanej na pustej taśmie. Wygładzanie obrazu – w celu likwidacji odbłasków – musi być dokonywane w sposób adaptacyjny, tak aby nie doprowadzić do „rozmycia” krawędzi ziaren, utrudniających ich precyzyjną lokalizację. Jednym ze sposobów może być metoda nieliniowej dyfuzji, wygładzającej poszczególne obszary obrazu w stopniu zależnym od występującego w nich gradientu jasności lub wysokości [15].

Po określeniu konturu ziarna [8, 9] niezbędne jest wyznaczenie rozmiarów ziarna w sposób odpowiadający jego zachowaniu w trakcie analizy sitowej, przyjmowanej – ze względu na szerokie rozpowszechnienie w przemyśle – jako metoda odniesienia. Ponieważ o zachowaniu ziarna w trakcie procesu przesiewania decydują dwa najmniejsze spośród trzech wymiarów, to metody aproksymacji jednoparametrowej (np. średnica zastępczego koła lub bok kwadratu o powierzchni równoważnej powierzchni wnętrza konturu ziarna) stanowią zbyt duże uproszczenie. Rozwiązaniem tego problemu może być metoda aproksymacji eliptycznej, pozwalająca opisać kształt konturu ziarna za pomocą zastępczej elipsy. O zachowaniu ziarna w procesie przesiewania decyduje wówczas krótsza oś elipsy. Przykład eliptycznej aproksymacji konturu ziarna przedstawiono na rysunku 4.



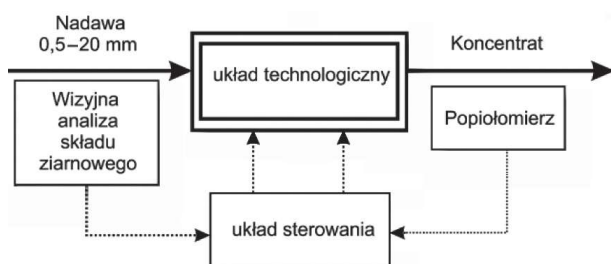
Rys. 4. Przykład eliptycznej aproksymacji konturu ziarna

W przypadku ziaren bardzo drobnych precyzyjna segmentacja – pozwalająca indywidualnie opisać i zaklasyfikować poszczególne ziarna – jest zadaniem trudnym i czasochłonnym. Stąd też w tych przypadkach dogodne jest zastosowanie metody alternatywnej, traktującej cały obszar (lub fragment obszaru) strumienia materiału jako teksturę o określonych parametrach statystycznych. Jako funkcję dobrze opisującą obraz materiału ziarnistego można przyjąć funkcję autokorelacji ze względu na fakt, że jej lokalne maksima w prosty sposób odpowiadają najczęściej spotykanym w danym obrazie rozmiarom ziaren [16]. Funkcję taką dla materiału o zróżnicowanym uziarnieniu można wyrazić jako sumę ważoną kilku funkcji wyznaczonych dla próbek jednorodnych odpowiadających „wzorcowym” klasom ziarnowym. Współczynniki wagowe odpowiadają wówczas udziałom poszczególnych klas ziarnowych w całości strumienia materiału. Szczególnie istotny jest tutaj dobór algorytmu wyznaczania tych współczynników wagowych

w sposób zapewniający możliwie najlepsze (w sensie metody najmniejszych kwadratów) odwzorowanie wyznaczonej empirycznie funkcji autokorelacji obrazu, a jednocześnie gwarantujący sens fizyczny, czyli ograniczenie zakresu zmienności współczynników do wartości nieujemnych. Dobrym rozwiązaniem może tu być zastosowanie metody NNLS (Non-Negative Least Squares) [17].

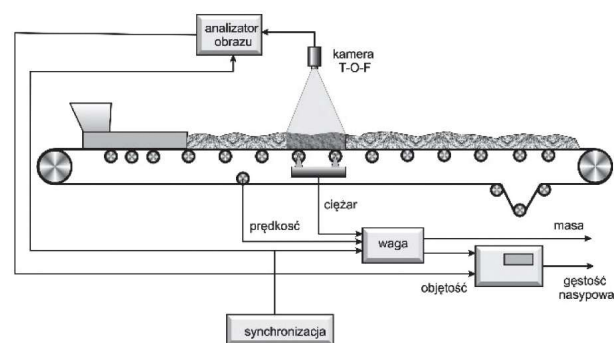
5. MOŻLIWOŚCI PRAKTYCZNEGO WYKORZYSTANIA

Jednym z najprostszyc – a jednocześnie istotnych z praktycznego punktu widzenia – sposobów wykorzystania wizyjnego monitoringu składu ziarnowego może być detekcja zbyt dużych ziaren (bloków skalnych) mogących spowodować zakłócenia w procesie transportowym, przez zablokowanie lub uszkodzenie urządzeń przeładowniczych [18]. Kolejnym obszarem zastosowań monitoringu wizyjnego może być bezpośrednie sterowanie parametrami procesów przerobowych (np. gęstością rozdziału). Szczególne znaczenie może to mieć w przypadku wzbogacania grawitacyjnego w osadzarkach pulsacyjnych, ponieważ są to urządzenia najbardziej wrażliwe na zmiany składu ziarnowego. W przypadku różnych klas ziarnowych zmienia się kształt krzywej rozdziału – ziarna drobniejsze wzbogacane są mniej dokładnie niż ziarna grubsze. Z uwagi na fakt, że czas przejścia nadawy przez łożo osadzarki jest stosunkowo długi, to – prowadzona w czasie rzeczywistym – wizyjna analiza składu ziarnowego nadawy na wejściu osadzarki (rys. 5) pozwala znacznie szybciej skorygować wartość gęstości rozdziału (zwłaszcza w układach z wieloma osadzarkami lub z wzbogacaniem wielokrotnym) niż w przypadku układu wyposażonego jedynie w popiolomierz radiometryczny na wyjściu osadzarki.



Rys. 5. Wykorzystanie ciągłej wizyjnej analizy składu ziarnowego do sterowania pracą układu technologicznego osadzarki [8]

Obliczenia przeprowadzone w [8] wskazują, że przy dużej i częstej zmienności składu ziarnowego może to prowadzić do istotnego wzrostu wartości produkcji (uzyskanego przez szybszą optymalizację gęstości rozdziału w poszczególnych osadzarkach), zapewniającego stosunkowo szybki zwrot poniesionych nakładów inwestycyjnych (rzędu kilkunastu lub kilkudziesięciu dni). W przypadku akwizycji i przetwarzania obrazów trójwymiarowych możliwe jest rozszerzenie funkcjonalności układów monitorujących o ciągły pomiar gęstości nasypowej strumienia materiału (jeśli układ monitoringu wizyjnego sprzężony jest z wagą taśmociągową [19]) oraz o kontrolę równomierności rozłożenia materiału na taśmie przenośnika. Przykład propozycji takiego systemu przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Przykład dynamicznego pomiaru gęstości nasypowej strumienia materiału

6. PODSUMOWANIE

Postęp w dziedzinie technologii optoelektronicznych umożliwia tworzenie układów wizyjnego monitoringu składu ziarnowego oraz objętości strumienia surowców mineralnych. Układy takie mogą znaleźć zastosowanie w optymalizacji procesów wzbogacania grawitacyjnego oraz w układach monitoringu pracy układów transportowych. Poprawna akwizycja obrazów dwuwymiarowych wymaga odpowiedniego oświetlenia. Pełniejszą informację można uzyskać, stosując metody akwizycji i przetwarzania obrazów trójwymiarowych, zawierających bezpośrednią informację o wysokości zarówno poszczególnych ziaren, jak i całej powierzchni strumienia materiału.

Literatura

- [1] Latham J.P., Kemeny J., Maerz N., Noy M.: *A blind comparison between results of four image analysis systems using a photo-library of piles of sieved fragments*, „Fragblast” 2003, 7: 105–132.

- [2] Maerz N.H.: *Image sampling techniques and requirements for automated image analysis of rock fragmentation*, Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal 1996.
- [3] Maerz N.H.: *Online Fragmentation Analysis: Achievements in the Mining Industry*, Centre For Aggregates Research (ICAR) Seventh Annual Symposium Proceedings, Austin 1999.
- [4] Palangio T.W., Palangio T.C., Maerz N.H.: *Advanced automatic optical blast fragmentation sizing and tracking*, European Federation of Explosives Engineers, Brighton 2005.
- [5] Kemeny J., Devgan A., Hagaman R.: *Analysis of Rock Fragmentation using Digital Image Processing*, „Journal of Geotechnical Engineering” 1993, 119: 1144–1160.
- [6] Trybalski K.: *Kontrola, modelowanie i optymalizacja procesów technologicznych przeróbki rud*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2013.
- [7] Szponder-Kotakowska D.K., Trybalski K.: *Nowoczesne metody i urządzenia pomiarowe w badaniu właściwości surowców i odpadów mineralnych*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2014.
- [8] Heyduk A.: *Metody akwizycji i przetwarzania obrazów dwuwymiarowych i trójwymiarowych w wizyjnej analizie granulometrycznej*, Monografia nr 669, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2017.
- [9] Heyduk A.: *Etapy segmentacji obrazu w wizyjnym układzie analizy składu ziarnowego*, „Mechanizacja i Automatyizacja Górnictwa” 2008, 1: 12–15.
- [10] Heyduk A.: *Wpływ warunków oświetleniowych na segmentację obrazu w systemie wizyjnej analizy składu ziarnowego*, „Mechanizacja i Automatyizacja Górnictwa” 2005, 10: 21–29.
- [11] Heyduk A.: *Laser triangulation in 3-dimensional granulometric analysis*, „Archives of Mining Science” 2016, 1: 15–27.
- [12] Heyduk A.: *Metody stereowizyjne w analizie składu ziarnowego*, „Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji” 2017, 2: 103–113.
- [13] Cyganek B.: *Wprowadzenie do pomiaru głębi obrazu za pomocą stereoskopowego układu kamer*, „Przegląd Spawalnictwa” 2013, 3: 38–43.
- [14] Cyganek B., Siebert P.J.: *An introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms*, John Wiley & Sons, Chichester 2009.
- [15] Heyduk A.: *Morfologiczne i dyfuzyjne algorytmy wstępnego przetwarzania obrazu w układzie wizyjnej analizy składu ziarnowego*, „Mechanizacja i Automatyizacja Górnictwa” 2006, 9: 39–46.
- [16] Heyduk A.: *Teksturowe (niesegmentacyjne) metody wizyjnej oceny składu ziarnowego*, „Mechanizacja i Automatyizacja Górnictwa” 2010, 3: 16–24.
- [17] Lawson C.L., Hanson R.J.: *Solving Least Square Problems*, SIAM, Philadelphia 1995.
- [18] Cabello A., Sanchez M., Delgado J.: *A New Approach to Identify Big Rocks with Applications to the Mining Industry*, „Real-Time Imaging” 2002, 8: 1–9.
- [19] Heyduk A.: *Bulk density estimation using a 3-dimensional image acquisition and analysis system*, Mineral Engineering Conference MEC 2016, Świeradów-Zdrój 2016.

dr inż. ADAM HEYDUK
Wydział Górnictwa i Geologii
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice
Adam.Heyduk@polsl.pl