



Adam Heyduk

Politechnika Śląska
Wydział Górnictwa i Geologii
Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa
adam.heyduk@polsl.pl

PORÓWNANIE DWUWYMIAROWEJ I TRÓJWYMIAROWEJ ANALIZY WIZYJNEJ SKŁADU ZIARNOWEGO SUROWCÓW MINERALNYCH

Streszczenie: Analiza granulometryczna surowców mineralnych dostarcza istotnych informacji, z których korzysta się w kontroli i sterowaniu procesami przerobczymi. Najczęściej stosowaną w przemyśle metodą jest analiza sitowa – wykorzystująca proces przesiewania. Charakteryzuje się ona jednak dużą czasochłonnością i umożliwia pomiar jedynie okresowo wybieranych ze strumienia próbek. Coraz większego znaczenia nabierają więc metody wizyjne polegające na ciągłej analizie obrazu powierzchniowej warstwy strumienia surowca. W artykule opisano wybrane metody akwizycji i analizy obrazu trójwymiarowego i porównano je ze stosowanymi dotychczas metodami opartymi na analizie obrazów dwuwymiarowych. Metody trójwymiarowe charakteryzują się znacznie mniejszą wrażliwością na zakłócenia oraz umożliwiają bardziej precyzyjny opis zarówno pojedynczych ziaren, jak i całego ich zbioru. Dodatkową zaletą metod trójwymiarowych jest również – oprócz dokładniejszego opisu powierzchniowej warstwy strumienia materiału – możliwość oceny objętości całego strumienia. Cel artykułu stanowi porównanie metod analizy dwuwymiarowych i trójwymiarowych obrazów strumienia materiału ziarnistego w aspekcie niepewności pomiarowych i obszarów potencjalnych zastosowań.

Słowa kluczowe: skład ziarnowy, skanowanie laserowe, analiza granulometryczna.

Wprowadzenie

Skład ziarnowy surowców mineralnych jest jednym z podstawowych parametrów decydujących o skuteczności procesów ich wzbogacania. Znajomość tego składu w różnych punktach układu technologicznego umożliwia odpowiedni dobór parametrów pracy poszczególnych maszyn i urządzeń oraz kontrolę po-

prawności ich działania i ocenę efektywności przebiegu procesów przeróbczych [Heyduk, Pielot, 2014]. Najczęściej stosowaną metodą pomiaru ziarnowego – traktowaną jako punkt odniesienia dla innych sposobów – jest analiza sitowa polegająca na przesiewaniu wybranej próbki przez zespół sit i pomiarze masy uzyskiwanych odsiewów [Sztaba, 1993]. Metoda ta posiada jednak dość istotne wady:

- jest kosztowna i czasochłonna,
- w trakcie przesiewania może występować rozkruszanie materiału prowadzące do zafałszowania uzyskiwanych wyników,
- umożliwia pomiar składu ziarnowego jedynie ograniczonej liczby wybranych próbek, stanowiących zwykle niewielką część całego strumienia materiału.

Coraz większego znaczenia nabierają więc metody wizyjne, oparte na analizie obrazu strumienia materiału [Trybalski, 2013; Szponder-Kołodowska, Trybalski, 2014]. Metody te opracowywane były początkowo na potrzeby górnictwa odkrywkowego i surowców skalnych. Obecnie znajdują także zastosowanie w przeróbce rud metali. W przypadku przemysłu węglowego zastosowanie tych metod napotyka na trudności (skutkujące brakiem praktycznie funkcjonujących rozwiązań) związane z czarnym kolorem powierzchni węgla, powodującym pochłanianie dużej ilości padającego światła i utrudniającym poprawną interpretację pozyskiwanych obrazów. Redukcja trójwymiarowego kształtu powierzchni strumienia materiału do postaci obrazu dwuwymiarowego utrudnia przy tym precyzyjne odtworzenie objętości oraz masy poszczególnych ziaren, jak i całego strumienia materiału.

1. Metody akwizycji obrazów dwuwymiarowych i trójwymiarowych

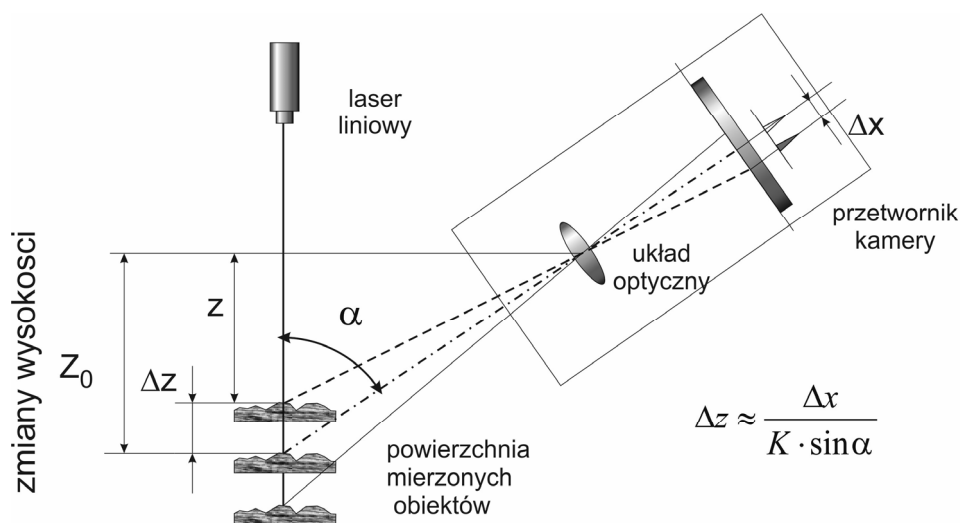
Akwizycja obrazu jest procesem przetwarzania informacji obrazowej o otaczającym świecie na postać cyfrową, dogodną do dalszego przetwarzania w systemie komputerowym [Korohoda, Tadeusiewicz, 1997]. Podstawę procesu akwizycji obrazu stanowi rejestracja energii promieniowania elektromagnetycznego (w zakresie światła widzialnego lub podczerwieni) odbijanej przez obserwowane obiekty. Energia ta jest nośnikiem informacji o geometrii obserwowanego obiektu oraz o własnościach fotometrycznych jego powierzchni. Prawidłowy przebieg procesu akwizycji obrazu to podstawowy warunek poprawnej interpretacji uzyskanych w ten sposób danych, czyli procesu segmentacji obrazu [Heyduk, 2008].

1.1. Metody akwizycji obrazów dwuwymiarowych

Podstawową metodą akwizycji obrazów dwuwymiarowych jest rejestracja – przez matrycę przetwornika kamery lub aparatu fotograficznego – światła odbitego od powierzchni obserwowanego obiektu (czyli w tym przypadku strumienia materiału ziarnistego). Oświetlenie to musi być realizowane przez układy zewnętrzne w sposób uwydatniający kontury poszczególnych ziaren, tj. zapewniający zacienienie przestrzeni międzyziarnowych [Heyduk, 2005].

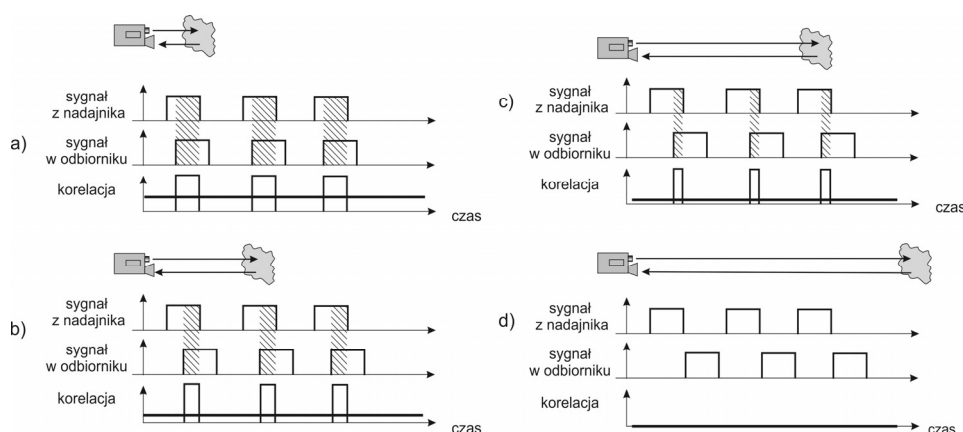
1.2. Metody akwizycji obrazów trójwymiarowych

W przypadku akwizycji obrazu trójwymiarowego (w postaci tzw. chmury punktów lub mapy głębi) konieczne jest bezpośrednie wyznaczenie odległości od określonej płaszczyzny odniesienia do poszczególnych fragmentów powierzchni strumienia materiału ziarnistego. Sama rejestracja natężenia światła odbitego (w kierunku prostopadłym do tej płaszczyzny odniesienia) nie wystarcza do dokonania odpowiednich przeliczeń. Niezbędne jest więc pozyskanie informacji uzupełniających, opartych na dodatkowych zależnościach geometrycznych (metoda triangulacji laserowej – rys. 1) lub też na analizie przebiegów czasowych promieniowania wysyłanego i odbieranego (metoda pomiaru czasu przelotu – rys. 2).



Rys. 1. Ilustracja podstawowych zależności geometrycznych wykorzystywanych w metodzie triangulacji laserowej

Bardziej szczegółowe opisy stosowanych i badanych w laboratorium Katedry Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa Politechniki Śląskiej metod akwizycji obrazów trójwymiarowych z wykorzystaniem technik triangulacyjnych, stereowizyjnych i pomiaru czasu przelotu sygnału przedstawione zostały w: [Heyduk 2016a, 2016b, 2016c].



Rys. 2. Ilustracja zasady pomiaru odległości metoda korelacji impulsowej (a, b, c, d – cztery przypadki różnej odległości między urządzeniem pomiarowym a rejestrowaną powierzchnią)

2. Metody przetwarzania obrazów dwuwymiarowych i trójwymiarowych

Mimo iż metody przetwarzania i analizy obrazów dwuwymiarowych i trójwymiarowych są do siebie zbliżone ze względu na podobną strukturę danych (dwuwymiarowa macierz), to jednak istnieją pewne dość istotne różnice związane z interpretacją wartości poszczególnych pikseli. W przypadku monochromatycznych obrazów dwuwymiarowych wartość każdego piksela odpowiada jego jasności (poziomowi szarości). Jasność ta uzależniona jest od wielu czynników: intensywności i kierunku oświetlenia, kształtu (nachylenia) odwzorowywanej powierzchni, własności tej powierzchni – barwy, tekstury. Praktycznie uniemożliwia to ilościowe odwzorowanie głębi obrazu, stąd też przetwarzanie może mieć jedynie charakter jakościowy, zwykle sprowadzający się wyłącznie do wyznaczenia konturów rzutu analizowanego obiektu (np. ziarna) na ustaloną płaszczyznę. Ocena własności ziarna odbywa się wówczas tylko na podstawie parametrów związanych konturem jego rzutu (np. obwód, pole powierzchni, średnice), a własności punktów wewnątrz konturu nie mają wpływu na tę ocenę. Metody

przetwarzania obrazu sprowadzają się więc do jego binaryzacji – czyli przyporządkowania poszczególnych pikseli do dwóch rozłącznych klas:

- należących do wnętrza obrysu ziarna,
- należących do przestrzeni poza rozpatrywanym ziarnem.

Natomiast w przypadku mapy głębi wszystkie piksele mają bezpośrednią interpretację odległości mierzonej w kierunku prostopadłym do płaszczyzny obrazu. Jednocześnie są mniej wrażliwe na powyższe czynniki zakłócające – efekt taki uzyskuje się przez wykorzystanie zależności fazowych zamiast amplitudowych w metodzie pomiaru czasu przelotu lub też zależności trygonometrycznych w metodzie triangulacyjnej. Mogą więc być wykorzystywane do dokładniejszego modelowania kształtu i rozmiaru zarówno pojedynczych ziaren, jak i całego ich zbioru. Metody przetwarzania map głębi powinny zatem zapewnić zachowanie informacji zawartych w poszczególnych pikselach zawartych we wnętrzu obrysu ziarna.

Należy podkreślić, że w wielu przypadkach stopień szarości fragmentu obrazu zależy od jego odległości – np. głębokie przestrzenie międzyziarnowe są zwykle najciemniejszymi fragmentami obrazu (ze względu na utrudniony dostęp światła i jego pochłanianie), jednak zależność ta ma charakter jedynie jakościowy i może zostać wykorzystana do segmentacji obrazu (czyli wyznaczenia granic poszczególnych ziaren), natomiast nie jest w stanie dostarczyć zależności ilościowych, pozwalających bardziej precyzyjnie określić objętość lub masę ziarna.

Zarówno obraz monochromatyczny, jak i mapę głębi można w ogólny sposób traktować jako powierzchnie w przestrzeni trójwymiarowej (w pierwszym przypadku trzecim wymiarem będzie poziom szarości, a w drugim odległość od płaszczyzny odniesienia) i analizować je metodami geometrii różniczkowej [Heyduk, 2009]. Stąd też wynika podobieństwo narzędzi matematycznych i algorytmów stosowanych w obydwu przypadkach. Należy jednak pamiętać o odmiennej interpretacji trzeciego wymiaru zarówno w przypadku danych wejściowych, jak i otrzymanych wyników.

Jeden z końcowych etapów analizy obrazu (oprócz wizualizacji i rejestracji uzyskiwanych wyników) to wyznaczenie krzywej składu ziarnowego obrazującej (masowy lub objętościowy) udział poszczególnych klas ziarnowych w całości strumienia materiału. W przypadku analizy dwuwymiarowej nie ma możliwości uwzględniania indywidualnej wysokości pojedynczych ziaren, konieczne jest więc przyjęcie uśrednionej wysokości \bar{h}_i i -tej klasy ziarnowej. Po indywidualnym wyznaczeniu powierzchni rzutu wszystkich widocznych ziaren A_{ki} , należą-

cych do poszczególnych klas ziarnowych, względny udział i -tej klasy $F(i)$ w całej masie obejmującej n klas ziarnowych wyznaczyć można jako:

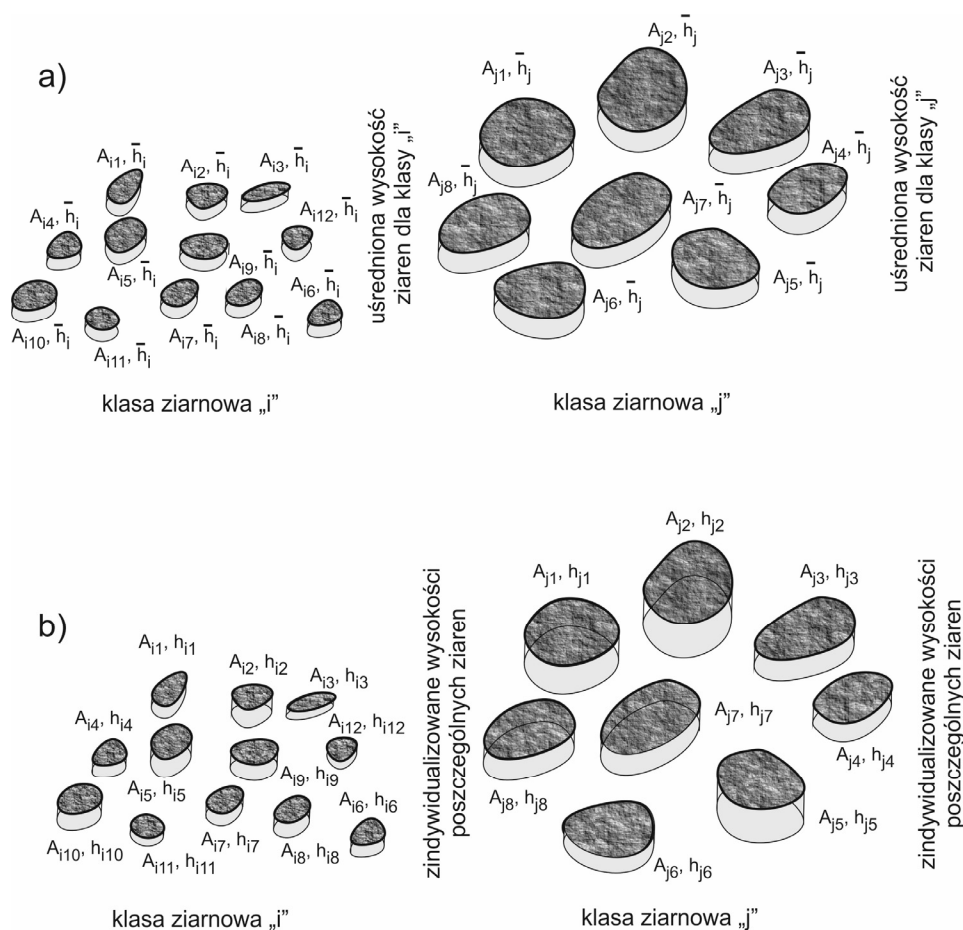
$$F(i) = \frac{\overline{h}_i \sum_{k=1}^{m_i} A_{ki}}{\sum_{k=1}^n \left(\overline{h}_k \sum_{j=1}^{m_k} A_{kj} \right)} \quad (1)$$

Natomiast w przypadku analizy trójwymiarowej względny udział tej klasy wyznaczyć można z uwzględnieniem indywidualnej wysokości h_{ik} każdego k -tego ziarna jako:

$$F(i) = \frac{\sum_{k=1}^{m_i} A_{ik} \cdot h_{ik}}{\sum_{k=1}^n \left(\sum_{j=1}^{m_k} A_{kj} \cdot h_{kj} \right)} \quad (2)$$

W ten sposób uzyskuje się większą dokładność otrzymywanych wyników.

Graficzną interpretację wzoru (1) przedstawiono na rys. 3a), a wzoru (2) na rys. 3b). Liczniki wzorów (1) i (2) opisują sumaryczną objętość wszystkich m_i ziaren zaliczanych do i -tej klasy ziarnowej, natomiast mianowniki sumaryczną objętość ziaren zaliczanych do wszystkich klas ziarnowych łącznie. Bezpośredni pomiar wysokości poszczególnych ziaren lub ich grup w przypadku akwizycji obrazów trójwymiarowych umożliwia także estymację gęstości nasypowej strumienia materiału ziarnistego. Wyniki przeprowadzonych w tym zakresie badań przedstawiono w: [Heyduk, 2016b].



Rys. 3. Graficzna interpretacja wzorów (1) i (2)

- wykorzystanie uśrednionej wysokości zgodnie z wzorem (1)
- wykorzystanie zindywidualizowanej wysokości poszczególnych ziaren zgodnie z wzorem (2)

Podsumowanie

Rozwój współczesnych metod akwizycji obrazów trójwymiarowych umożliwia coraz szersze stosowanie ich w różnych gałęziach przemysłu, w tym w obszarze przeróbki surowców mineralnych. Pozwala to na wyeliminowanie wielu błędów związanych z akwizycją i przetwarzaniem obrazów dwuwymiarowych. Mimo podobieństwa metod cyfrowego przetwarzania obrazów dwuwymiarowych i trójwymiarowych związanych z ich strukturą, interpretacja obrazów

trójwymiarowych dostarcza znacznie większej ilości informacji o kształcie i rozmiarach ziaren, zapewniając przy tym ograniczenie wpływu zakłóceń związanych z ułożeniem ziaren oraz z lokalnymi własnościami fotometrycznymi ich powierzchni (odblaski). Efektem zwiększonej dokładności i szerszego zastosowania wizyjnych metod składu ziarnowego może być optymalizacja warunków pracy maszyn i urządzeń przerobczych, prowadząca do lepszej stabilizacji parametrów jakościowych uzyskiwanych produktów i związanych z tym efektów ekonomicznych, obejmujących zwiększenie wartości produkcji oraz minimalizację kar umownych wynikających z zakłóceń jakości produktów.

Literatura

- Heyduk A. (2005), *Wpływ warunków oświetleniowych na segmentację obrazu w systemie wizyjnej analizy składu ziarnowego*, „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, nr 10, s. 21-29.
- Heyduk A. (2008), *Etapy segmentacji obrazu w wizyjnym układzie analizy składu ziarnowego*, „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, nr 1, s. 12-15.
- Heyduk A. (2009), *Topograficzna analiza dwuwymiarowych obrazów materiału ziarnistego*, „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, nr 2, s. 5-10.
- Heyduk A. (2016a), *Laser Triangulation in 3-dimensional Granulometric Analysis*, “Archives of Mining Sciences”, No. 1, s. 15-27.
- Heyduk A. (2016b), *Bulk Density Estimation Using a 3-dimensional Image Acquisition and Analysis System*, Mineral Engineering Conference MEC2016, Świeradów Zdrój.
- Heyduk A. (2016c), *Metody stereowizyjne w analizie składu ziarnowego*, Górnictwo Zrównoważonego Rozwoju GZR2016, Gliwice.
- Heyduk A., Pielot J. (2014), *Economic Efficiency Assessment of an Application of On-line Feed Particle Size Analysis to the Coal Cleaning Systems in Jigs*, „Inżynieria Mineralna”, nr 2, s. 217-228.
- Korohoda P., Tadeusiewicz R. (1997), *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Wydawnictwo FPT, Kraków.
- Szponder-Kołąkowska D.K., Trybalski K. (2014), *Nowoczesne metody i urządzenia pomiarowe w badaniu właściwości surowców i odpadów mineralnych*, Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków.
- Sztaba K. (1993), *Przesiewanie*, ŚWT, Katowice.
- Trybalski K. (2013), *Kontrola, modelowanie i optymalizacja procesów technologicznych przeróbki rud*, Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków.

COMPARISON OF TWO-DIMENSIONAL AND THREE-DIMENSIONAL GRANULOMETRIC ANALYSIS OF RAW MINERALS

Summary: Mineral particle size analysis provides valuable information used in monitoring and control of mineral processing plants. The most commonly used in the industry method is a sieve analysis – using a screening process. It is, however, very time-consuming and makes possible to measure only samples selected from the raw material stream. Therefore, machine vision methods based on the continuous video stream analysis of the surface layer of the raw material flow are becoming more and more important. The paper describes some selected methods of acquisition and analysis of three-dimensional imaged and compares them with previously used methods based on the analysis of two-dimensional images. Three-dimensional methods are less noise-sensitive and make possible a more precise description of both the individual grains and all their population. An additional advantage of these three-dimensional methods – in addition to the much more detailed description of the surface layer of material flow – is also the possibility to estimate the total volume of the entire raw material stream. The purpose of the article is a comparison of 2-dimensional and 3-dimensional methods of granular material stream analysis in terms of measurement uncertainties and potential application areas.

Keywords: particle size distribution, laser scanning, granulometric analysis.