

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA**  
**IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**  
**Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska**  
Katedra Geoinformatyki i Informatyki Stosowanej

## **STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

mgr inż. Krzysztof Oleszko

**ODWZOROWANIE OBIEKTÓW W PRZESTRZENI TRÓJWYMIAROWEJ PRZY  
WYKORZYSTANIU METOD ANALIZY I PRZETWARZANIA OBRAZÓW CYFROWYCH  
DO ZASTOSOWAŃ GEOLOGICZNO-GÓRNICZYCH**

Promotor  
dr hab. inż. Mariusz Młynarczuk, prof. AGH

Kraków 2015

## Wstęp

---

Rozwój technologii informatycznych sprawił, że komputery są wykorzystywane niemal w każdej dziedzinie życia, bez względu na to czy są to badania naukowe, aplikacje inżynierskie czy rozrywka. Jedną z takich dziedzin, w których wykorzystuje się najnowsze zdobycze informatyczne jest trójwymiarowe obrazowanie. Jest ono z powodzeniem wykorzystywane w wielu aplikacjach naukowo-technicznych. Może także znaleźć zastosowanie w zagadnieniach związanych z górnictwem oraz geologią. Pomimo faktu, że ostatnie lata przynoszą coraz więcej publikacji oraz badań w tym kierunku, to można stwierdzić, że jest to ciągle temat mało znany i rozwijany w niewystarczającym stopniu. Widoczne jest to mocno w wielu badaniach, gdzie ciągle są stosowane słabo zautomatyzowane, lub wręcz manualne, metody pomiarowe. Metody te nierzadko cechują się niską dokładnością i dużą czasochłonnością pomiarów. Zapewne duży wpływ na taki stan rzeczy ma fakt, że nowe technologie nie są tanie i czasem mogą nastroczać wielu problemów. Niemniej jednak rozwój jest nieunikniony, a wdrażanie coraz to nowych metod pomiarowych jest kwestią niedalekiej przyszłości.

Podążając za tym trendem, podjęto prace mające na celu wypracowanie oraz zastosowanie nowatorskich metod akwizycji, przetwarzania oraz analizy obrazu w zastosowaniach górniczo – geologicznych. Badania prowadzono, przy zastosowaniu metod trójwymiarowych, co przy komputerach dostarczających coraz większych mocy obliczeniowych jest naturalnym kierunkiem rozwoju analizy oraz przetwarzania obrazów cyfrowych.

Wykonując badania mające na celu realizację nakreślonej tematyki weryfikowano następujące tezy:

1. Metody przetwarzania i analizy obrazu są pomocne w trójwymiarowym odwzorowaniu powierzchni ścian skalnych, co może być istotne w procesie rozwoju metod mających na celu pełną automatyzację robót górniczych.
2. Wykorzystywane obecnie metody opisu parametrów geometrycznych ziarn oparte na analizie średnic zastępczych, bywają mało dokładne i niewystarczające. Mogą one zostać zastąpione poprzez nowoczesne metody komputerowej analizy i

przetwarzania obrazu, które pozwalają na pełne odwzorowanie i pomiar parametrów geometrycznych ziarn w przestrzeni trójwymiarowej.

3. Pozytywne rezultaty osiągnięte w trójwymiarowym automatycznym odwzorowaniu materiałów i obiektów skalnych oraz analizie ich parametrów geometrycznych przyczynią się do rozwoju trójwymiarowych metod morfologii matematycznej i analizy obrazu. Rozszerzą również zakres ich stosowania w zagadnieniach związanych z górnictwem i geologią.

## Opis przeprowadzonych badań

---

Opisane w rozprawie prace podzielone zostały na trzy zasadnicze części praktyczne.

Pierwsza z tych części skupia się na tematyce związanej z obrazowaniem oraz wyznaczaniem parametrów geometrycznych ziarn. Do obrazowania zastosowano trzy urządzenia pomiarowe, którymi były: mikrotomograf komputerowy, profilometr optyczny oraz mikroskop konfokalny. Mikrotomograf umożliwił pełne trójwymiarowe odwzorowanie struktury badanych ziarn, natomiast profilometr optyczny oraz mikroskop konfokalny umożliwiły pozyskanie danych opisujących tylko określone części badanych obiektów – urządzenia te umożliwiły pomiar tylko widocznych z góry części ziarn. Aby możliwe było pełne trójwymiarowe odwzorowanie badanych ziarn oraz wyznaczenie ich parametrów geometrycznych podjęto prace mające na celu rekonstrukcję brakującej części każdego z ziarn. Zaproponowany algorytm realizujący to zadanie oparty był na założeniu, że dolna część wymagająca rekonstrukcji jest w pewnej skali podobna do górnej części ziarna. Przy jego tworzeniu bazowano na metodach przetwarzania i analizy obrazów, a szczególnie istotnymi były operacje wykonywane w przestrzeni trójwymiarowej, które w głównej mierze składały się z przekształceń morfologicznych. Na podstawie zaproponowanej metody z sukcesem udało się zrekonstruować brakujące informacje opisujące kształt ziarn, co potwierdzono szeregiem testów sprawdzających poprawność samej rekonstrukcji jak i powtarzalności uzyskiwanych wyników.

Kolejnym krokiem było sprawdzenie założenia mówiącego, że w przypadku niektórych badań nad odwzorowaniem ziarn w przestrzeni trójwymiarowej oraz

wyznaczaniem ich parametrów geometrycznych, stosowany może być zamiennie mikrotomograf komputerowy, profilometr optyczny lub mikroskop konfokalny. Założenie to było istotne ze względu na fakt, że mikrotomograf, mimo iż jest urządzeniem w pełni odwzorowującym trójwymiarową strukturę badanych obiektów to wciąż jest sprzętem słabo dostępnym oraz kosztownym. Profilometry optyczne jak i mikroskopy konfokalne są urządzeniami szerzej dostępnymi i względnie tańszymi.

Badania porównawcze przeprowadzono na zestawach ziarn węgla kamiennego, dla których liczone i porównywano średnie objętości oraz wymiary, przyjmując jednocześnie, że wyniki uzyskane przy użyciu danych z mikrotomografu komputerowego są najbardziej zbliżone do rzeczywistości i traktowane były jako wartości referencyjne. Uzyskane średnie wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Średnie wartości parametrów wyliczone na podstawie danych uzyskanych przy pomocy trzech różnych urządzeń pomiarowych.

	Mikrotomograf komputerowy	Mikroskop konfokalny	Profilometr optyczny
Długość [mm]	1,741	1,805	1,804
Szerokość [mm]	1,107	1,295	1,338
Wysokość [mm]	0,790	0,716	0,711
Objętość [mm <sup>3</sup> ]	0,508	0,509	0,533

Wysokości ziarn we wszystkich przypadkach są najniższe w porównaniu z szerokościami oraz długościami. Wartości długości oraz szerokości również są bardzo zbliżone dla wszystkich urządzeń – długość jest tu największym z wymiarów. W przypadku uzyskanych wartości objętości w najmniejszym stopniu od wartości objętości referencyjnej odbiega wartość wyznaczona przy użyciu danych z mikroskopu konfokalnego i jest ona na poziomie 0,2%. Objętość uzyskana na podstawie danych z profilometru optycznego odbiega bardziej od wartości referencyjnej i jest na poziomie 5%. Niemniej jednak zarówno jeden jak i drugi wynik wydają się być na akceptowalnym poziomie poprawności. Dlatego też, biorąc pod uwagę otrzymane wyniki zarówno wymiarów jak i objętości, oraz ogólny kształt ziarn po ich rekonstrukcji, można wysnuć wniosek, że przy zastosowaniu zaproponowanego algorytmu rekonstrukcji wszystkie trzy urządzenia pomiarowe, mogą być używane zamiennie.

W dalszej części badań, bazując na uzyskanych pozytywnych wynikach, podjęto prace mające na celu sprawdzenie, czy metody trójwymiarowe dają wyniki zbliżone do

metod klasycznych i szeroko stosowanych bazujących na tzw. średnicach zastępczych, które to zakładają, że badane ziarna mają kształt kulisty. Uzyskane wyniki pokazały, że metody klasyczne generują wyniki mocno odbiegające do rzeczywistości, a różnice w skrajnych przypadkach sięgały nawet kilkudziesięciu procent.

W końcowym etapie tej części badań, dla zestawu ziarn węgla, przy wykorzystaniu trójwymiarowych metod przetwarzania i analizy obrazu policzono współczynniki kształtu, które porównano z analogicznymi współczynnikami liczonymi w przestrzeni dwuwymiarowej. Jednym z ciekawszych rezultatów, jakie udało się uzyskać był taki, który wskazywał, że analogiczne współczynniki liczone w przestrzeni dwu i trójwymiarowej, przy identycznej zmienności klas ziarnowych wykazują niekiedy odmienne trendy. Fakt ten po raz kolejny potwierdza, że badania prowadzone na danych dwuwymiarowych, które nie odwzorowują w pełni obiektów trójwymiarowych, często są mało dokładne, a w szczególnych przypadkach uzyskane w ten sposób wyniki mogą odbiegać od rzeczywistości.

W drugiej części badań podjęto prace mające na celu wykorzystanie metod trójwymiarowego przetwarzania i analizy obrazów do cyfrowego odwzorowania ścian skalnych. Odwzorowanie takie przeprowadzane było przy pomocy trzech różnych urządzeń pomiarowych. Jako pierwsze, wykorzystano urządzenie emitujące linie laserowe, które przy zastosowanej metodyce pomiarowej umożliwiło pozyskanie danych opisujących ukształtowanie powierzchni mierzonej ściany skalnej. Drugim z urządzeń był projektor komputerowy emitujący obrazy przedstawiające płaszczyzny bitowe, które, przy podobnej metodyce pomiarowej jak w przypadku linii lasera, umożliwiły pozyskanie danych opisujących zewnętrzną powierzchnię ściany skalnej. Trzecim z zastosowanych urządzeń był rzutnik, który podobnie jak projektor, emitował obrazy płaszczyzn bitowych.

Podczas pomiarów weryfikowano poprawność odwzorowania ukształtowania mierzonej powierzchni. Dodatkowo sprawdzano, czy metody te dają oczekiwane rezultaty, poprzez sprawdzenie objętości materiału skalnego, który był usuwany pomiędzy kolejnymi seriami pomiarów. Badania prowadzone były dwuetapowo, tj. w pierwszym etapie wykorzystywano linie laserowe oraz projektor komputerowy natomiast w drugim rzutnik płaszczyzn bitowych. W tabeli 2 przedstawiono wyniki przeprowadzonych pomiarów.

Tabela 2. Wyliczone wartości objętości wraz z odchyleniami procentowymi.

Pomiar rzeczywisty	Sposób pomiaru	Objętość [dm <sup>3</sup> ]	Odchylenie [%]
Objętość [dm <sup>3</sup> ]			
0,79	Pomiar liniami laserowymi	0,68	13,92
	Pomiar płaszczyznami bitowymi	0,67	15,19
6,54	Pomiar płaszczyznami bitowymi emitowanymi z dwóch stron	5,98	8,56

Uzyskane pozytywne wyniki były podstawą do przeprowadzenia pomiarów czoła chodnika węglowego w warunkach dołowych w kopalni węgla kamiennego, co udało się z sukcesem przeprowadzić. Uzyskany wynik jest o tyle istotny, że automatyzacja procesów wydobywczych, zarówno w kopalniach podziemnych jak i odkrywkowych, wymaga znajomości topografii wyrobiska, a w szczególności ukształtowania powierzchni ściany, gdzie prowadzone jest wydobywanie. Ma to kluczowe znaczenie w sytuacji, gdy dąży się do minimalizacji, a docelowo do wykluczenia udziału człowieka w procesie wydobywczym. Pozytywne rezultaty opisywanych badań dowodzą, że możliwym jest opracowanie automatycznych metod odwzorowujących cyfrowo powierzchnię eksploatowanej ściany.

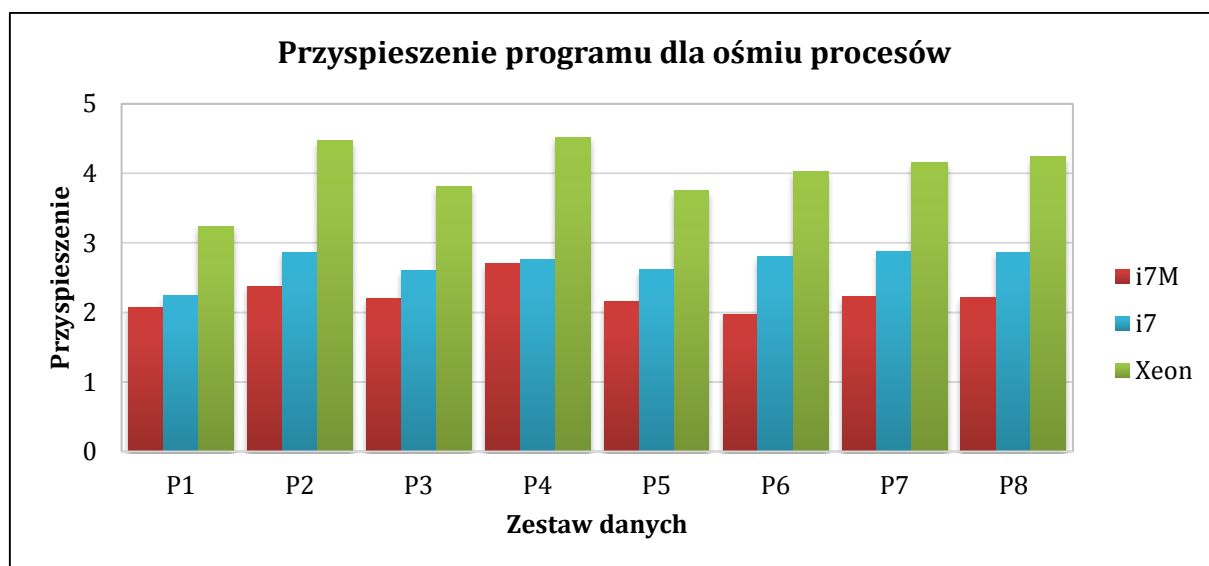
Kolejnym etapem badań przy wykorzystaniu analogicznej metodyki pomiarowej był pomiar materiału skalnego na przenośniku taśmowym. Podczas pomiarów zmierzono, przy wykorzystaniu metod cyfrowego przetwarzania i analizy obrazów, ilość przeniesionego materiału, po czym porównano ją z ilością rzeczywistą. Istotnym etapem tych badań było odwzorowanie pomierzonego materiału w przestrzeni trójwymiarowej, co umożliwiło jego odpowiednie przekształcenia oraz analizę.

Trzecia część badań była niejako skutkiem prowadzenia badań nad dwoma pierwszymi tematami. Ze względu na fakt, że podczas prowadzonych badań przetwarzano w przestrzeni trójwymiarowej duże ilości danych, prowadzone prace były bardzo czasochłonne. Aby czas ten skrócić postanowiono przeprowadzić zmiany w kodzie źródłowym wykorzystywanych algorytmów tak, aby był on bardziej efektywny i w możliwie maksymalny sposób utylizował zasoby obliczeniowe komputera, na którym dane algorytmy były wykonywane. Cel taki osiągnięto poprzez zrównoleglenie kodu szeregowego tak, aby wykorzystywał do obliczeń wszystkie dostępne rdzenie procesora.

Po przeprowadzeniu prac implementacyjnych nad określonym algorytmem przetwarzania obrazów, przeprowadzono szereg testów wydajnościowych dla ośmiu

zestawów danych. Testy wydajnościowe wykonano w trzech różnych środowiskach. We wszystkich zainstalowane było oprogramowanie JRE (Java Runtime Environment) w 64 bitowej wersji. Pierwszym ze środowisk testowych był komputer osobisty PC zawierający procesor Intel Core i7 2.70 GHz 64 bit w wersji mobilnej z 16GB pamięci RAM z zainstalowanym systemem operacyjnym Windows 7 64 bit. Drugim był stacjonarny komputer osobisty PC zawierającym procesor Intel Core i7 3.40 GHz 64 bit z 16GB pamięci RAM z zainstalowanym systemem operacyjnym Windows 7 64 bit. Trzecim było środowisko serwerowe zawierające procesor Intel Xeon 3.30 GHz 64 bit z 16GB pamięci RAM z zainstalowanym systemem operacyjnym CentOS 6.4 64 bit.

Podczas testów zarejestrowano pozytywne przyspieszenie wykonania zrównoleglonego kodu, a wyniki uzyskane dla ośmiu procesów w większości przypadków są wynikami najlepszymi. Na rysunku 1 przedstawiono wartości przyspieszeń uzyskanych dla całego programu, w którego skład wchodziła część zrównoleglona oraz część wykonywana szeregowo.



Rysunek 1. Wartości przyspieszeń programu dla poszczególnych zestawów danych z podziałem na procesory.

## Podsumowanie

Podsumowując przeprowadzone prace badawcze należy stwierdzić, że:

- Stosując nowoczesne techniki obrazowania trójwymiarowego, przy wykorzystaniu metod przetwarzania i analizy obrazu udało się wykonać prace

mające na celu cyfrowe odwzorowanie ziarn oraz wyznaczenie ich parametrów geometrycznych. Istotnym jest, że wyniki wyznaczone zostały w sposób automatyczny i są na lepszym poziomie dokładności niż wyniki uzyskane przy pomocy metod klasycznych. Potwierdzone zostało to szeregiem badań weryfikujących zarówno poprawność zaproponowanej metody rekonstrukcji ziarn oraz powtarzalności otrzymywanych wyników.

- Wykorzystując dane trójwymiarowe w pełni opisujące rzeczywisty kształt badanych obiektów uzyskać można lepsze wyniki niż przy wykorzystaniu metod bazujących na danych dwuwymiarowym. W skrajnych przypadkach może się okazać, że metody takie mogą generować wyniki o zupełnie odwrotnej charakterystyce.
- Z sukcesem udało się opracować niskokosztowe metody trójwymiarowego odwzorowania powierzchni ścian skalnych, również przy wykorzystaniu sprzętu własnej konstrukcji, które wykorzystano w warunkach dołowych czynnej kopalni węgla. Podkreślić należy, że zastosowanie metod przyniosło dobre wyniki odwzorowania mierzonych ścian, a wypracowana metodyka może być dalej rozwijana. Co istotne, powierzchnie odwzorowane cyfrowo mogą być dowolnie przetwarzane przy zastosowaniu algorytmów bazujących na danych trójwymiarowych.
- Mimo że obecnie dostępne na rynku komputery dysponują dużymi mocami obliczeniowymi, to przy programach z zaimplementowanymi algorytmami szeregowymi, moce te nie są w pełni utylizowane. Przeprowadzając prace nad zrównoleganiem kodu udało się podnieść wydajność algorytmów przetwarzania obrazów w przestrzeni trójwymiarowej, a co za tym idzie skrócić czas przetwarzania nawet kilkukrotnie. Ważny okazał się fakt samego zrównoleglenia, ale również istotne jest środowisko w jakim wykonywane są obliczenia.