

# Wstępna analiza możliwości zastosowania cyfrowej niemetrycznej fotogrametrii naziemnej z wykorzystaniem metody SfM (Structure-from-Motion) w robotach strzałowych

## Preliminary study of the digital non-metric terrestrial photogrammetry carried out by the use of the SfM method (Structure-from-Motion) applicability in blasting works



*Mgr inż. Michał Dworzak\**



*Mgr inż. Andrzej Biessikowski\**



*Dr inż. Józef Pyra\**



*Dr inż. Anna Sołtys\**



*Dr inż. Jan Winzer\**

**Treść:** W artykule przedstawiono rezultaty wstępnych badań, mających na celu ocenę możliwości zastosowania fotogrametrycznej metody *Structure-from-Motion* w celu tworzenia przestrzennych modeli ścian eksploatacyjnych w górnictwie odkrywkowym i ich inżynierskiego wykorzystania w procesie projektowania robót strzałowych. W wyniku przeprowadzonych analiz, na podstawie dokumentacji fotograficznej sporządzonej w Kopalni Dolomitu „Dubie”, wykonano model przestrzenny, a następnie zweryfikowano poziom dokładności jego reprezentacji poprzez porównanie z chmurą punktów uzyskaną w trakcie skanowania 3D skarpy skalnej.

**Abstract:** This paper presents the preliminary studies in subject of the assessment of the possibility of the implementation of The Structure-from-Motion photogrammetric method in the purpose to create three-dimensional exploitation slope models in opencast mines as well as the engineering use of this method in blasting design process. The photographic documentation which was used in the analysis was taken in The Dolomite Open Strip Mine “Dubie”. As the result of the analysis the spatial model was performed. The model’s verification by the comparison of the design model and the obtained point-cloud throughout the 3D laser scanning of the rock slope was included.

### **Słowa kluczowe:**

*skaning laserowy, naziemna fotogrametria niemetryczna, metoda SfM, roboty strzałowe*

### **Key words:**

*laser scanning, terrestrial non-metric photogrammetry, SfM method, blasting works*

\* ) AGH w Krakowie

## 1. Wprowadzenie

Stosowane coraz częściej na świecie oraz w Polsce nowoczesne rozwiązania w dziedzinie wykonywania robót strzałowych w górnictwie odkrywkowym, takie jak aplikacje komputerowe wspomagające projektowanie robót strzałowych lub systemy monitoringu geodezyjnego z wykorzystaniem skanerów cyfrowych i urządzeń do pomiaru dewiacji otworów strzałowych, w sposób bezpośredni zwiększają stopień bezpieczeństwa prowadzonych prac, pozwalając przy tym na obniżenie kosztów eksploatacji. Rozwiązania te umożliwiają uzyskanie efektów poprzez gromadzenie i obróbkę, a następnie uwzględnianie w procesie projektowania robót strzałowych coraz większej ilości danych, w szczególności związanych z geometrią serii strzałowej.

Projektowanie bezpiecznych oraz efektywnych robót strzałowych związane jest z doбором odpowiednich środków strzałowych do realizacji procesu urabiania (materiały wybuchowe i systemy inicjowania MW), parametrów technicznych (m.in. zastosowane opóźnienia międzystrzałowe, średnice i budowa ładunków MW) i geometrycznych robót strzałowych [1, 10]. Jednym z głównych parametrów wpływających na możliwość oddziaływania robót strzałowych na otoczenie (m.in. poprzez efekt nadmiernego rozrzutu odłamków skalnych podczas detonacji), rachunek ekonomiczny prowadzonych prac (w wyniku możliwości kontrolowania uzysku brył nadwymiarowych w urobku), jak również wpływających na sposób załadowania otworu strzałowego MW jest zabiór, czyli najmniejsza odległość między środkiem geometrycznym ładunku materiału wybuchowego (MW), a najbliższą płaszczyzną odsłonięcia [6, 10]. W przypadku robót strzałowych realizowanych w górnictwie odkrywkowym zabiór stanowi parametr o wartości zmiennej na długości otworu strzałowego, co tym samym powoduje, iż opis serii strzałowej (jak i otworu strzałowego) dyskretną wartością zabioru niesie za sobą znaczący błąd oszacowania. Należy również nadmienić, iż obszar działania materiału wybuchowego na skałę nie ogranicza się wyłącznie do płaszczyzny przekroju w osi otworu strzałowego, a obejmuje pewną jej objętość wyrażoną stożkiem działania MW [6, 9, 14]. Tym samym, w trakcie projektowania robót strzałowych, niezbędne staje się uwzględnienie zabioru jako parametru zmiennego w funkcji wysokości urabianej ściany, jak i promienia stożka działania MW. Brak uwzględnienia tej zmienności w skrajnych przypadkach może powodować niekorzystne efekty prac strzałowych, które przejawiać się będą potencjalnie szkodliwymi oddziaływaniami środowisko-

wymi, jak i stratami w aspekcie ekonomicznym (m.in. wzrost kosztów wynikający z wtórnego kruszenia brył nadwymiarowych, strzelań progów przyspągowych oraz mechanicznego ramowania ścian).

## 2. Inżynierskie metody szacowania zabioru w warunkach zakładu górniczego

W warunkach zakładu górniczego dokładne oszacowanie wielkości zabioru dla serii robót strzałowych jest dość trudne i często ogranicza się do wizualnej oceny opartej na obserwacji pokroju ściany w odniesieniu do położenia wlotu otworu. Zabiegi te w konsekwencji pozwalają w sposób przybliżony na przygotowanie ładunków MW o konstrukcjach, które uwzględnią warunki geometryczne danej zabierki. Znaczącym ograniczeniem tego sposobu oceny jest występowanie znaczącego błędu oszacowania, jak również brak uwzględnienia występowania dewiacji otworu strzałowego i jej wpływu na wielkość rzeczywistego zabioru.

Rozwiązania umożliwiające precyzyjną ocenę wielkości zabioru korzystają z zaawansowanej aparatury geodezyjnej (rys.1), która pozwala na kontrolę jakości wykonanego obwiertu (urządzenia do pomiaru geometrii otworów strzałowych) wraz z profilowaniem laserowym skarpy urabianego piętra (skanery laserowe). Korzystając ze zgromadzonych w ten sposób danych i licencjonowanego oprogramowania komputerowego, możliwy jest szczegółowy obmiar geometrii serii strzałowej, a co za tym idzie bardziej efektywne załadowanie otworów strzałowych uwzględniające warunki geologiczne danego przodka roboczego.

Metody oparte na specjalistycznej aparaturze charakteryzują się wysoką precyzją pomiarów i możliwościami wszechstronnej interpretacji wyników, niemniej wymagają one dużych nakładów inwestycyjnych na zakup urządzeń, oprogramowania i szkolenia pracowników. Nowe rozwiązania w szeroko pojętej praktyce inżynierskiej, mimo znaczących korzyści które za sobą niosą, ze względu na początkowe koszty mogą być trudne we wdrożeniu w szerokim zakresie, w szczególności w przypadku niewielkich zakładów górniczych. Tym samym zasadne wydaje się być poszukiwanie rozwiązań pośrednich, które pozwoliłyby na uzyskanie zbliżonych wyników pomiarów przy niewielkich kosztach inwestycyjnych, co stanowi cel badań, których wstępne wyniki przedstawiono w niniejszym artykule.

a)



b)



Rys. 1. Przykładowe aktualnie stosowane rozwiązania geodezyjne do oceny wielkości zabioru w górnictwie odkrywkowym; a – Renishaw Boretrak, b – Renishaw Quarryman Pro [12]

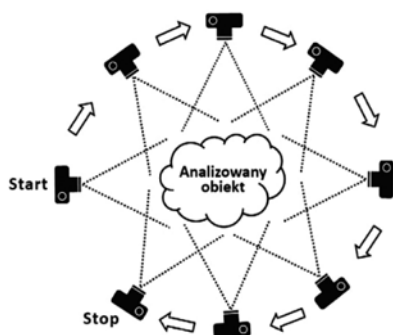
Fig. 1. Examples of currently used surveying solutions to assess burden size in surface mining; a – Renishaw Boretrak, b – Renishaw Quarryman Pro [12]

### 3. Cyfrowa niometryczna fotogrametria naziemna metodą SfM

Model powierzchni terenu (DTM – *digital terrestrial model*) na podstawie chmury punktów otrzymanej w wyniku skanowania 3D stanowi jedną z najczęściej stosowanych aktualnie metod teledetekcyjnych cyfrowej reprezentacji geometrii przodków roboczych w kopalniach odkrywkowych. Uzyskany model powierzchni ściany, wraz z informacją o geometrii otworów strzałowych, umożliwia projektowanie bezpiecznych i efektywnych robót strzałowych eksploatacyjnych, które uwzględniają warunki geologiczne w miejscu prowadzonych prac, a pomiary te wraz z obróbką i interpretacją coraz częściej realizowane zostają przez inżynierów strzałowych, wychodząc tym samym poza zakres zainteresowań geodetów górniczych.

Naziemny skaning laserowy pozwala na otrzymanie odwzorowania powierzchni ściany eksploatacyjnej jako chmury punktów o współrzędnych  $Z$ ,  $X$  oraz  $Y$ , z wykorzystaniem wysyłanej przez urządzenie wiązki światła lasera (nadajnik) i pomiaru czasu odbioru wiązki odbitej przez detektor skanera, odległości punktu pomiarowego lub kątów, w zależności od rodzaju zastosowanego urządzenia [15, 19]. Pomimo szerokiego zakresu stosowania, skanery 3D nie stanowią jedynego rozwiązania technicznego pozwalającego na uzyskanie modeli przestrzennych powierzchni skarp skalnych. W przypadku opracowań kartograficznych, bardzo często wykorzystywane są metody fotogrametryczne (fotogrametria lotnicza dalekiego zasięgu), które pozwalają na wygenerowanie trójwymiarowej powierzchni rzeźby terenu na podstawie fotografii danego obszaru pomiarowego. Prócz opracowań geodezyjnych, prowadzony był również szereg prac mających na celu m.in. ocenę spękań i nieciągłości złożeń na przykładzie kopalni granitu z wykorzystaniem skanowania 3D [11], ocenę wielkości bloków skalnych [16], czy też stateczności wyrobisk podziemnych i tuneli w masywie blokowym [4].

Szczególnym rodzajem metody fotogrametrycznego odwzorowania powierzchni terenu jest metoda *Structure-from-Motion (SfM)*, która pozwala na rekonstrukcję trójwymiarowego obiektu na podstawie zestawu zdjęć wykonanych w różnych odległościach oraz pod różnymi kątami widzenia (rys.2). Zasada wykonania pomiarów jest zbliżona do metody stereofotogrametrycznej, niemniej nie opiera się wyłącznie na zestawie dwóch obserwacji [2], a wymaga wykonania większej liczby fotografii.



Rys. 2. Zasada wykonania pomiaru w metodzie Structure-from-Motion [18]

Fig. 2. Method of making measurements in Structure-from-Motion method [18]

Metoda *Structure-from-Motion* związana jest z przeprowadzeniem zespołu matematycznych operacji, na podstawie danych (zestawu zdjęć fotograficznych) zgromadzonych podczas badań terenowych, które można podzielić na [18]:

- wybór punktów charakterystycznych (*keypoints*) na fotografiach, które służą do powiązania ze sobą zestawu zdjęć i przypisanie punktom deskryptorów (realizowany m.in. na podstawie metody SIFT – *Scale Invariant Feature Transform* [7] lub metody VLFeat [17]);
- oszacowanie ułożenia aparatu w przestrzeni dla kolejnych zdjęć i sporządzenie trójwymiarowej chmury punktów niewielkiej gęstości („sprase” *point cloud*) z wykorzystaniem algorytmu *Bundler (bundle adjustment system)* [13];
- otrzymanie zagęszczonej trójwymiarowej chmury punktów w wyniku *klastrowania* z wykorzystaniem algorytmów CMVS – *Clustering View for Multi-view stereo* oraz PMVS2 – *Path-based Multi-view Stereo* [5].

Otrzymana zagęszczona chmura punktów wymaga szczegółowego dopracowania (*Post-Processing*) związanego m.in. z ręczną lokalizacją punktów charakterystycznych w chmurze, czyszczeniem szumów, transformacją i skalowaniem chmury punktów, utworzeniem punktów georeferencyjnych oraz tworzeniem siatki triangulacyjnej (*mesh*) i renderowaniem.

### 4. Badania terenowe i założenia metodyki badawczej

W celu dokonania wstępnej oceny możliwości wykorzystania metody *SfM* do sporządzania trójwymiarowych modeli ścian eksploatacyjnych w celu zwiększenia pewności realizowanych robót strzałowych, wykonano pomiary terenowe polegające na zgromadzeniu materiału fotograficznego do sporządzenia modelu 3D oraz chmury punktów ze skaningu laserowego, która stanowić będzie materiał porównawczy. Badania terenowe zrealizowano w *Kopalni Dolomitu Dubie* (Kopalnie Odkrywkowe Surowców Drogowych w Rudawie S.A. – Grupa Lafarge), zlokalizowanej 25 km na północny-zachód od Krakowa w województwie małopolskim, gmina Zabierzów. Pomiary obejmowały fragment ściany eksploatacyjnej wyrobiska odkrywkowego, znajdującej się na poziomie III w północnej części wyrobiska (rys. 3).



Rys. 3. Widok skanowanej ściany eksploatacyjnej (od strony wschodniej) (opracowanie własne)

Fig. 3. View of scanned exploitation face (from the east site) (own elaboration)

Celem prowadzonych badań był dobór oraz wstępna weryfikacja taniej i szybkiej metody opracowania modelu przestrzennego skalnej ściany eksploatacyjnej w celu zwiększenia pewności realizacji i bezpieczeństwa wykonywanych robót strzałowych. Podstawowymi założeniami w trakcie doboru proponowanej metodyki badawczej były:

- prostota wykonania pomiaru i opracowania wyników, bez konieczności znajomości zaawansowanych metod z zakresu geodezji, fotogrametrii i teledetekcji (pomiaru docelowo wykonywane przez służbę strażalową),
- możliwość realizacji obliczeń i przekształceń *Post-Processing-u* w oparciu o darmowe oprogramowanie na licencji *open source*,
- brak konieczności stosowania specjalistycznej aparatury pomiarowej.

W tym celu zdecydowano się na wykonanie dokumentacji fotograficznej korzystając z kompaktowego aparatu fotograficznego (lustrzanka cyfrowa – Canon EOS 40D z obiektywem Canon EF 24-70 mm f/2.8 L UMS) i skorzystania z metody *Structure-from-Motion (SfM)* do wygenerowania modelu przestrzennego fragmentu wyrobiska odkrywkowego. Celowo, do badań wybrano niemetryczny aparat fotograficzny bez kalibracji (m.in. określenia środków rzutu, błędu dystorsji obiektywu, czy też badania stabilności i powtarzalności orientacji wewnętrznej aparatu), w celu maksymalnego uproszczenia metodyki badawczej, która w założeniu powinna być przyjazna w warunkach odkrywkowego zakładu górniczego i jak najmniej kosztochłonna. Na podstawie wyników wstępnych badań porównawczych pomiędzy odwzorowaniem modeli ze zdjęć metrycznych i niemetrycznych [8] można zakładać, że zastosowanie nieskalibrowanego aparatu fotograficznego w analizach powinno umożliwić uzyskanie takiej dokładności odwzorowania modeli, aby była ona wystarczająca do zastosowań inżynierskich w warunkach ruchu odkrywkowego zakładu górniczego.

Szczegółowy model przestrzenny badanej ściany eksploatacyjnej zrealizowano w oparciu o zebrany w zakładzie górniczym materiał fotograficzny złożony z 161 zdjęć cyfrowych wykonanych w różnych punktach oraz pod różnymi kątami widzenia. W celu wygenerowania szczegółowej chmury punktów skorzystano z 96 wyselekcjonowanych uprzednio zdjęć, które były najbardziej odpowiednie pod względem różnorodności, zagęszczenia oraz warunków oświetleniowych. Obliczenia, w celu sporządzenia modelu przestrzennego, zrealizowano na podstawie metodyki *Structure-from-Motion (SfM)*, której poszczególne algorytmy zaimplementowano w aplikacji *PPT Python Photogrammetry ToolBox*.

Brak kalibracji aparatu fotograficznego, jak również występowania szczegółowych punktów georeferencyjnych w terenie powodują, iż otrzymana chmura punktów nie bę-

dzie odpowiadać skalą obiektowi w naturze. Tym samym, w celu nadania odpowiedniej skali modelowi w etapie *Post-Processing-u*, niezbędna jest znajomość odległości rzeczywistej przynajmniej dwóch punktów charakterystycznych, które następnie można odnaleźć w modelu 3D. W tym celu przed wykonaniem zdjęć sporządzono trzy zestawy punktów referencyjnych na badanej ścianie eksploatacyjnej, dla których odległości były znane i wynosiły odpowiednio 1,5 metra, 1 metr i 2 metry.

Opracowanie docelowej chmury punktów (*post-processing*) wykonano z wykorzystaniem oprogramowania *MeshLab*, dostępnego na darmowej licencji typu *open-source*.

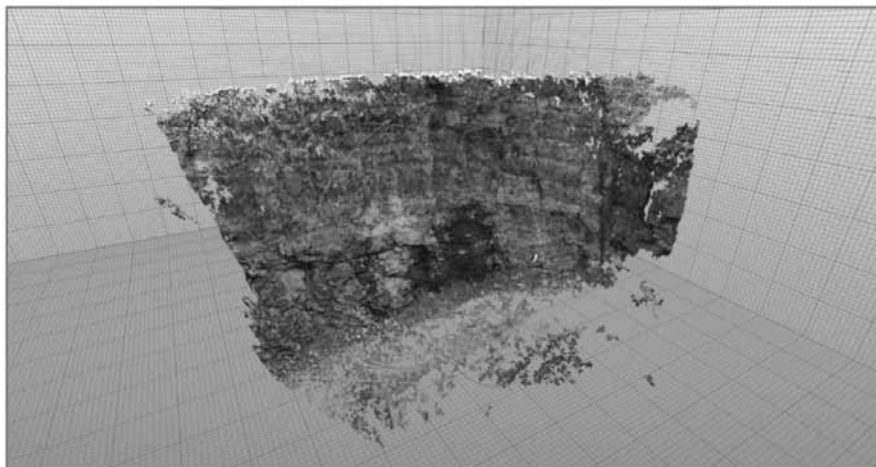
Ocenę dokładności reprezentacji wygenerowanego modelu powierzchni ściany eksploatacyjnej wykonano na podstawie porównania z chmurą punktów otrzymaną na podstawie pomiaru skanerem firmy Renishaw, dla rozdzielczości pomiaru wynoszącej 0,25 m.

Ważnym zagadnieniem związanym z weryfikacją proponowanego rozwiązania jest dokładność reprezentacji modelu w stosunku do rzeczywistych wymiarów badanego obiektu. Należy zaznaczyć, iż w przypadku prowadzonych prób, od zastosowanej metodyki nie jest oczekiwana dokładność pomiarów w granicach błędu pomiaru geodezyjnego, tj. kilku milimetrów, gdyż proponowana metodyka badawcza ma spełniać funkcję inżynierską, która może być obciążona pewnym błędem, akceptowalnym ze względu na bezpośredni cel stosowanego pomiaru.

#### 4. Wynik modelowania 3D z wykorzystaniem metody SfM

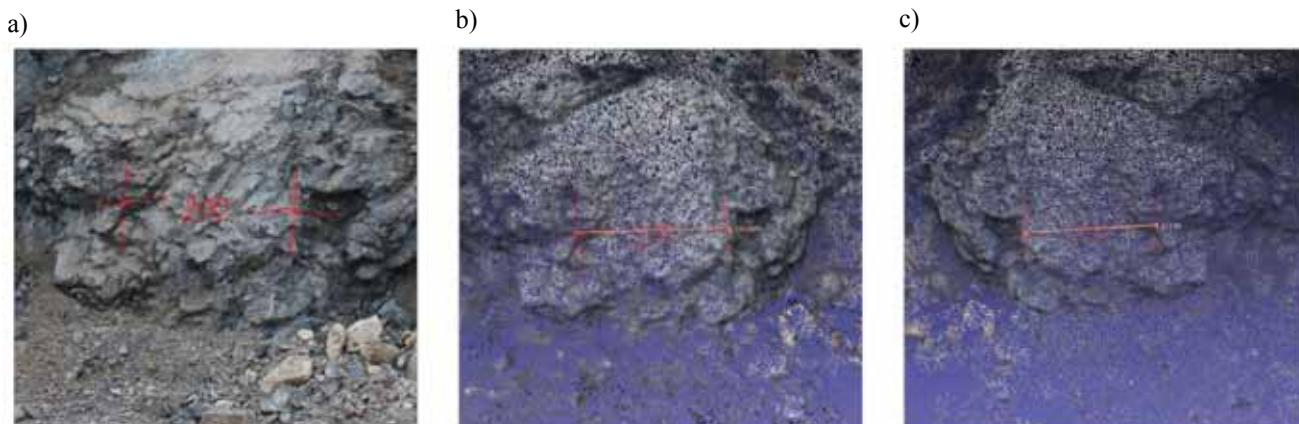
Korzystając z zestawu wyselekcjonowanych fotografii ściany eksploatacyjnej wykonanych niemetrycznym aparatem cyfrowym, przeprowadzono obliczenia z wykorzystaniem uprzednio opisanych algorytmów zaimplementowanych w oprogramowaniu *PPT*, w wyniku czego otrzymano zagęszczoną chmurę punktów reprezentującą badany obiekt w przestrzeni trójwymiarowej (rys. 4). Każdy z punktów chmury opisany jest jego współrzędnymi *Z*, *X* i *Y* oraz kolorem wyrażonym w przestrzeni RGB.

Otrzymana chmura punktów, ze względu na jej nierzeczywistą skalę wynikającą z zastosowania kamery niemetrycznej, została przeskalowana na podstawie trzech odległości punktów referencyjnych w rzeczywistości oraz reprezentowanym



Rys. 4. Chmura punktów powstała w wyniku zastosowania metody SfM (opracowanie własne)

Fig. 4. Point cloud created as a result of the use of SfM method (own elaboration)



Rys. 5. Punkt referencyjny nr 3; a – widok rzeczywisty; b – widok w chmurze punktów przed skalowaniem; c – widok w chmurze punktów po skalowaniu (opracowanie własne)

Fig. 5. Reference point no. 3; a – the real view; b – view of point cloud before scaling; c – view of point cloud after scaling (own elaboration)

Tablica 1. Odległości punktów referencyjnych przed i po skalowaniu chmury punktów SfM  
Table 1. Reference points distances before and after SfM point cloud scaling

	Zestaw referencyjny 1	Zestaw referencyjny 2	Zestaw referencyjny 3
Odległość rzeczywista [m]:	1,5	1,0	2,0
Odległość punktów referencyjnych w modelu SfM przed skalowaniem [m]:	0,041	0,026	0,053
Współczynnik skalowania $S_s$ :	36,921	38,063	37,960
Uśredniony współczynnik skalowania $S_s$ :	37,647		
Odległość punktów referencyjnych w modelu SfM po skalowaniu [m]:	1,523	1,003	1,997
Różnica pomiędzy odległością rzeczywistą, a odległością punktów referencyjnych modelu SfM po skalowaniu [m]:	0,023	0,003	0,003

(opracowanie własne – own elaboration)

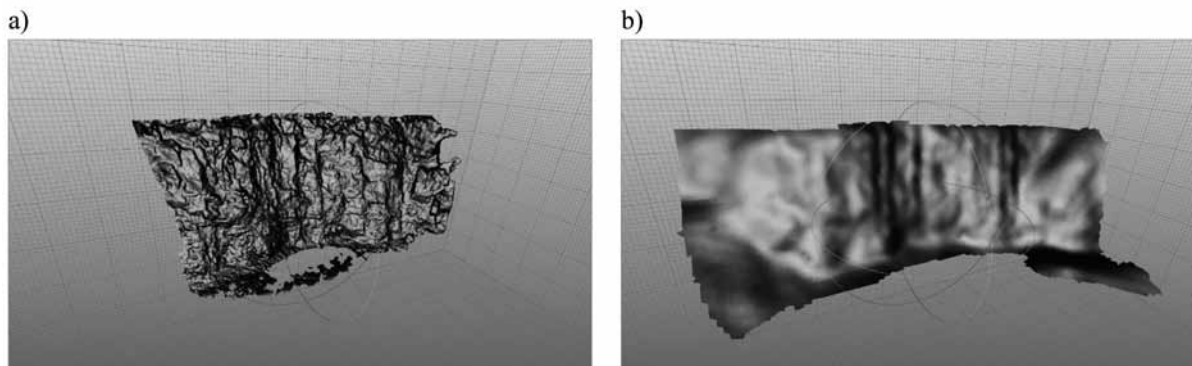
chmurą punktów modelu (rys. 5). Na podstawie zgromadzonych danych otrzymano średni współczynnik skalowania wynoszący około 37,647, który pozwolił na przeskalowanie modelu ze średnim błędem dla punktów referencyjnych wynoszącym 0,00971 m (por. wyniki z tabl. 1),

4. Weryfikacja zaproponowanej metody badawczej

W celu weryfikacji stopnia precyzji reprezentacji modelu przestrzennego ściany eksploatacyjnej sporządzonego z wykorzystaniem metody *Structure-from-Motion*, dokonano jego geometrycznego porównania z chmurą punktów otrzymaną

na podstawie uprzednio wykonanego skanowania, stanowiącą dane porównawcze prowadzonych badań (pomiar zrealizowany aparaturą *Quarryman Pro* firmy *Renishaw*, będącą w posiadaniu służby strzałowej *Kopalni Dolomitu Dubie*; rozdzielczość pomiaru 0,25 m). Triangulacyjne modele badanej powierzchni ściany eksploatacyjnej wygenerowane metodą Poissona dla dwóch sposobów pomiaru przedstawiono na rys. 6.

Korzystając z danych przestrzennych otrzymanych z zastosowaniem metody *SfM* oraz skanowania laserowego sporządzono mapy wysokości powierzchni terenu metodą *Krigingu* (rys. 7 i rys. 8), które stanowiły podstawę do szczegółowego porównania powierzchni na podstawie przekrojów



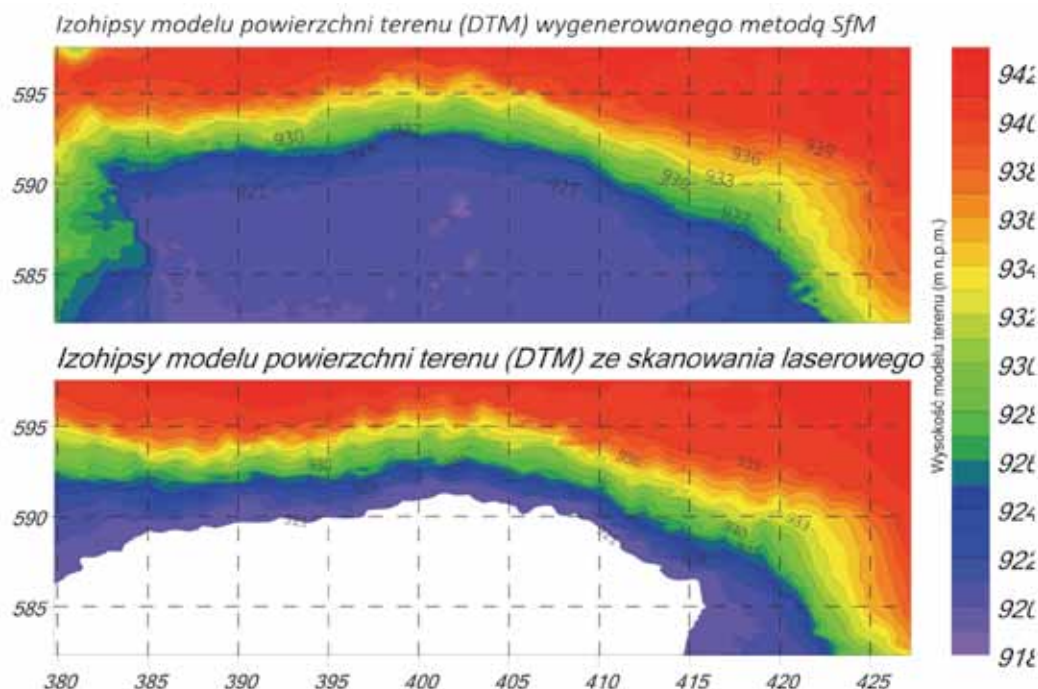
Rys. 6. Model powierzchni ściany eksploatacyjnej wygenerowany metodą Poissona a – dane z modelu SfM, b – dane ze skanowania laserowego (opracowanie własne)

Fig. 6. Exploitation face model generated by Poisson method a – data from SfM model, b – data from laser scanning (own elaboration)

charakterystycznych. Należy nadmienić, że dane wsadowe dla map hipsometrycznych oraz przekroji nie były uprzednio modyfikowane w etapie *post-processing-u* (m.in. brak oczyszczania szumów i *remesh-owania*), a wzajemne usytuowanie porównywanych modeli, ze względu na brak punktów georeferencyjnych, zostało wykonane ręcznie.

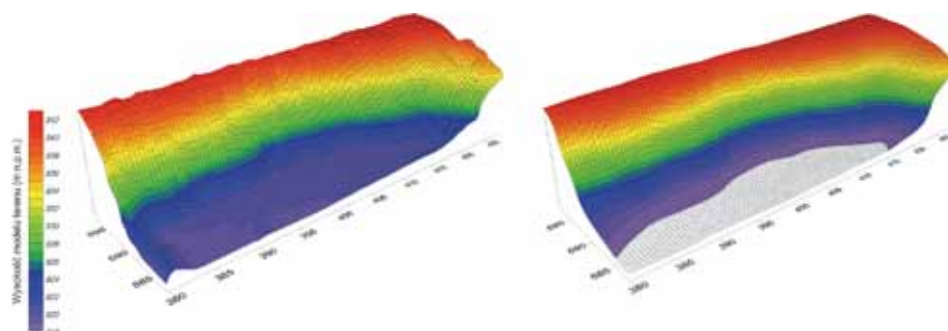
W celu dokonania porównania modelu sporządzonego na podstawie danych uzyskanych w wyniku zastosowania

metody *Structure-from-Motion* i modelu referencyjnego (ze skanowania laserowego) wykonano 10 przekrojów porównawczych południkowo w zakresie od 380 do 425 m (co 5 metrów). Rysunek 9 przedstawia przykładowe wybrane porównania przekrojów modeli, zaś tablica 2 zawiera informację o średnich wartościach modułów różnicy wysokości modeli *DTM* w przekrojach  $|\Delta H|$ , wykonane na podstawie 100 punktów charakterystycznych w każdym przekroju.



Rys. 7. Mapa wysokości modelu powierzchni terenu dla danych pochodzących z metody fotogrametrycznej SfM i skaningu laserowego dla chmur punktów bez ingerencji w zakresie danych wsadowych (opracowanie własne)

Fig. 7. Digital terrestrial surface model elevation map – data from photogrammetric method SfM and laser scanning without any interference (own elaboration)



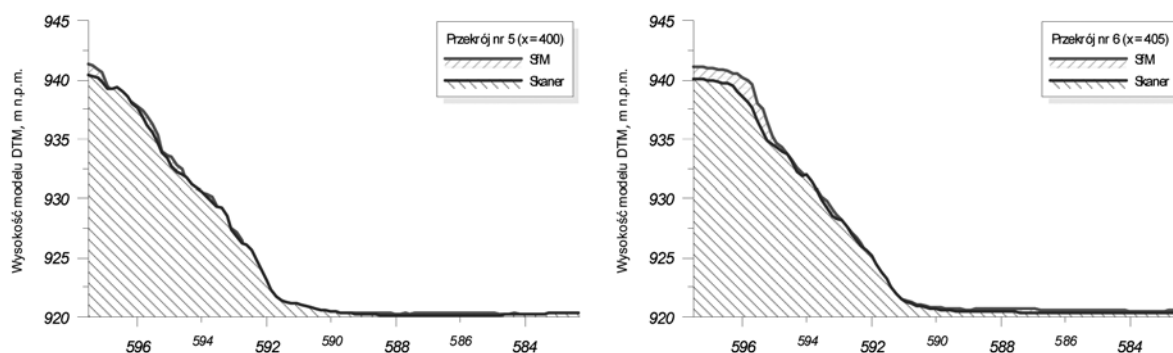
Rys. 8. Modele powierzchni terenu (DTM) (opracowanie własne)

Fig. 8. Digital terrestrial models (DTM) (own elaboration)

Tablica 2. Średnie wartości modułów różnicy wysokości modeli DTM w przekrojach  $|\Delta H|$   
Table 2. Average values of height difference modules in sections of DTM models  $|\Delta H|$

Numer przekroju	Południk dla przekroju X, m	Średnia wartość modułu różnicy wysokości $ \Delta H $ , m	Numer przekroju	Południk dla przekroju X, m	Średnia wartość modułu różnicy wysokości $ \Delta H $ , m
1	380	6,0031	6	405	0,403904
2	385	1,115549	7	410	0,793808
3	390	0,364991	8	415	0,597921
4	395	0,482316	9	420	0,750664
5	400	0,320464	10	425	1,221945

(opracowanie własne – own elaboration)



Rys. 9. Przykładowe porównania przekroji powierzchni DTM (opracowanie własne)

Fig. 9. Example of DTM surfaces cross-sections comparison (own elaboration)

## 5. Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań mających na celu ocenę możliwości zastosowania techniki *Structure-from-Motion* (SfM) w celu tworzenia cyfrowych modeli przestrzennych ścian eksploatacyjnych w górnictwie odkrywkowym i ich dalszego wykorzystania w trakcie projektowania robót strzałowych. Na podstawie otrzymanych wyników, które zostały porównane z założonym modelem referencyjnym (dane ze skanowania laserowego 3D aparaturą geodezyjną) można stwierdzić, iż niemetryczna fotogrametria bliskiego zasięgu z wykorzystaniem metody *Structure-from-Motion* pozwala na uzyskanie przestrzennych modeli cyfrowych skarp skalnych o dokładności nawet przewyższającej oczekiwany poziom dopasowania do zastosowań związanych z projektowaniem robót strzałowych (minimalna uzyskana średnia różnica wysokości dla przekroju wynosząca ok. 0,32 m – por. tabl. 2). Udowodniono, że zastosowanie niemetrycznego aparatu fotograficznego i skalowanie modelu w etapie *Post-Processing-u* daje rezultaty o zadowalającym poziomie dokładności (średni błąd odległości punktów równy ok. 1 cm).

Występujące znaczące różnice w modelach dla skrajnych przekrojów porównawczych (por. tabl. 2 – przekroje 1, 2 i 10) mogą być wynikiem mało precyzyjnego wzajemnego dopasowania modeli w przestrzeni trójwymiarowej, co wynikało z braku wyznaczenia punktów referencyjnych wg osnowy geodezyjnej przed wykonaniem badań terenowych.

Przedstawione wyniki pomiarów pozwalają na stwierdzenie, iż metoda SfM może stanowić interesującą alternatywę dla aktualnie stosowanych rozwiązań wykorzystujących często kosztowną aparaturę pomiarową. Należy nadmienić, iż otrzymane podczas wstępnych analiz wyniki charakteryzują się pewnym błędem reprezentacji modelu przestrzennego w odniesieniu do referencyjnej chmury punktów, niemniej bazując na doświadczeniach służby strzałowej kopalni „Dubie” można stwierdzić, iż uzyskana metodą SfM dokładność w praktyce ruchowej odkrywkowego zakładu górnictwa jest wystarczającą do projektowania geometrii robót strzałowych. Dodatkowym atutem zaprezentowanej w artykule metody jest możliwość uzyskania chmury punktów, w której każdy z punktów opisany jest atrybutem koloru (wartości dla reprezentacji barw RGB). W przypadku występowania w złożu przerostów i skały pływnej (np. wkładek glinowych), nie ma konieczności ręcznego zaznaczenia obwiedni takiego przerostu punkt po punkcie za pomocą skanera laserowego w sposób, w jaki aktualnie radzi sobie z tym problemem służba strzałowa.

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki pozwalają na stwierdzenie, że zastosowanie metod fotogrametrycznych korzystających z techniki SfM może stanowić alternatywną,

obiecującą i konkurencyjną pod względem kosztów metodę pomiaru geometrii powierzchni urabianej skarpy. Uzyskiwane za jej pośrednictwem informacje mogą przyczynić się do zwiększenia pewności i bezpieczeństwa prowadzonych robót strzałowych w odkrywkowych zakładach górniczych, a także bezpośrednio wpłynąć na ekonomię prowadzonych robót. Tym samym autorzy widzą konieczność prowadzenia dalszych badań w zakresie inżynierskiego zastosowania metod fotogrametrycznych, które w konsekwencji prowadziłyby do opracowania spójnej i prostej metodyki wykonania pomiaru oraz opracowania danych przestrzennych, dających w konsekwencji możliwość łatwego sporządzenia modeli przestrzennych urabianego ośrodka skalnego wraz z szybką analizą otrzymanych danych.

*Autorzy artykułu chcieli złożyć serdeczne podziękowania Kierownikowi Ruchu Zakładu Górniczego Kopalni Dolomitu Dubie (Kopalnie Odkrywkowe Surowców Drogowych w Rudawie S.A. – Grupa Lafarge) oraz służbie strzałowej, a w szczególności Kierownikowi Służby Wiertniczo-Strzałowej – Panu inż. Andrzejowi Brzozowskiemu za pomoc i wkład w realizację badań kopalnianych, których wyniki wykorzystano w niniejszym artykule.*

Publikacja zrealizowana w ramach pracy statutowej nr nr 11.11.100.597

## Literatura

1. Grześkowiak A.: Możliwości ograniczenia niekorzystnych oddziaływań robót strzałowych w odkrywkowych zakładach górniczych. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej – Studia i Materiały, nr 132, Wrocław 2011, s. 99÷110.
2. Bernasik J., Mikrut S.: Fotogrametria inżynierska. Materiały dydaktyczne. Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków 2003.
3. Deliormanli A. H., Maerz N. H., Otoo J.: Using terrestrial 3D laser scanning and optical methods to determine orientations of discontinuities at a granite quarry. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 66, 2014, s. 41÷48.
4. Fekete S., Diederichs M.: Integration of three-dimensional laser scanning with discontinuum modelling for stability analysis of tunnels in blocky rockmasses. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 57, 2013, s. 11÷23.
5. Furukawa Y., Ponce J.: Accurate, Dense and Robust Multi-View Stereopsis. IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 32, nr 8, 2010, s. 1362÷1376.
6. Korzeniowski J.I., Onderka Zb.: Roboty strzelnicze w górnictwie odkrywkowym. Wydawnictwa i Szkolenia Górnicze Burnat &

- Korzeniowski, Wrocław 2006.
7. *Love D. G.*: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, vol. 60 (2), 2004, p. 91÷110.
  8. *Marcinkowski Z., Salik K.*: Analiza porównawcza NMT sporządzonych ze zdjęć metrycznych i niemetrycznych na przykładzie fragmentu klifu w Jarosławcu. *Geodesia et Descriptio Terrarum, Acta Scientiarum Polonorum*, 1 (1-2), 2002, s. 23÷31.
  9. *Onderka Zb.*: Technika strzelnicza w górnictwie odkrywkowym. Wydawnictwa AGH, Kraków 1992 (skrypt AGH nr 1241).
  10. *Prędko S.*: Techniczno-ekonomiczna analiza efektywności stosowania elektronicznych systemów inicjowania materiałów wybuchowych w warunkach polskich kopalń surowców skalnych. Praca doktorska – niepublikowana. Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2010.
  11. *Pukanska K., Bartos K., Sabova J.*: Comparison of Survey Results of the Surface Quarry Spisske Tomasovce by the Use of Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning. *Inżynieria mineralna*, vol. 15, no. 1 (33), Kraków 2014, s. 47÷54.
  12. Renishaw – Case study – Lafarge blast optimization initiative. Dokument elektroniczny - <http://www.renishaw.com/en/cabled-boretrak--26407>. Dostęp: 2-06-2015.
  13. *Snavely N., Seitz S. M., Szeliski R.*: Photo Tourism: Exploring image collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics – Proceedings of SIGGRAPH*, 2006.
  14. *Sulima-Samujłło J.*: Inżynieria strzelnicza cz. 2. Wydawnictwa AGH, Kraków 1979 (skrypt AGH nr 673).
  15. *Tompalski P.*: Naziemny skaning laserowy w inwentaryzacji zieleni miejskiej na przykładzie plant w Krakowie. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 20, 2009, s. 421÷431.
  16. *Vanhaekendover H.*: In-situ block size estimation using 3D terrestrial data. Praca magisterska – niepublikowana. Delft University of Technology, Section for Resource Engineering, Delft 2013.
  17. *Vedaldi A., Fulkerson B.*: VLFeat: An Open and Portable Library of Computer Vision Algorithms. Dokument elektroniczny – <http://www.vlfeat.org>. Dostęp: 2-06-2015.
  18. *Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M.*: ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, vol. 179, 2012, s. 300÷314.
  19. *Wężyk P.*: Naziemny skaning laserowy. W: *Geomatyka w Lasach Państwowych – Część I. Podstawy*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa 2010, s. 343÷354.
-