

MOBILNA PLATFORMA GÓRNICZA (MPG) - NOWATORSKIM ROZWIĄZANIEM W POLSKICH KOPALNIACH

MINING SURVEY SYSTEM (MSS) – INNOVATIVE SOLUTION IN POLISH MINES

Artur Adamek

SKALA 3D

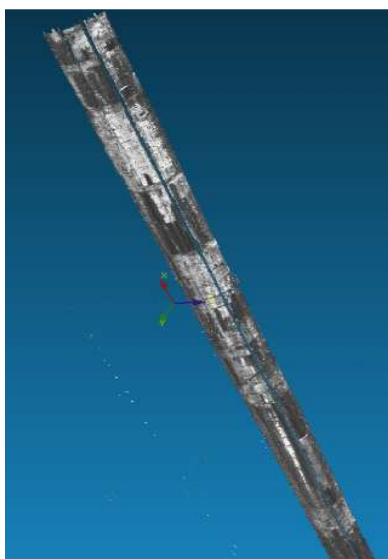
SŁOWA KLUCZOWE: skanowanie laserowe, mobilny skaning, szyb górniczy, górnictwo.

STRESZCZENIE: Technologia mobilnego skanowania laserowego rozwija się dynamicznie w górnictwie. Od kilku lat prowadzone są badania i testy nad zastosowaniem tego typu pomiaru w pracach inwentaryzacyjnych prowadzonych w szybach górniczych. Firma SKALA 3D w ramach projektu POIG Działanie 1.4 w PARP podjęła się stworzenia *Mobilnego systemu automatycznego prowadzenia przestrzennych pomiarów geometrii szybów górniczych z wykorzystaniem technologii skanowania laserowego*. Jego główną zaletą jest wiernie odzwierciedlenie mierzonego obiektu w czasie zaledwie kilku godzin. System opiera się m.in. na danych płynących ze skanerów laserowych oraz precyzyjnej jednostki inercyjnej. Głównym problemem badawczym było wyznaczenie trajektorii przejazdu Mobilnej Platformy Górniczej (MPG) z jak największą dokładnością. Brak możliwości odbioru sygnału z satelitów w rurze szybowej uniemożliwił wykorzystanie rozwiązań znanych z naziemnych pomiarowych systemów mobilnych. Firma SKALA 3D opracowała metodykę wyznaczenia trajektorii systemu w oparciu o dane geometryczne płynące ze skanerów laserowych oraz odczytów akcelerometrów i żyroskopów jednostki inercyjnej. Dla poprawy jakości i dokładności wykonywanych pomiarów MPG wyposażona została również w zestaw wibroizolatorów zapobiegający przenoszeniu się części drgań wstępujących podczas jazdy naczynia wyciągowego na układ pomiarowy. Całość tworzy skalibrowany system, który w krótkim czasie jest w stanie dostarczyć przestrzennych danych pomiarowych z mierzonego szybu. Dokładność pomiaru 2-3 mm w pojedynczym horyzoncie pomiarowym oraz kilka centymetrów wyznaczenia położenia punktu na tysięcznym metrze pod ziemią czynią go precyzyjnym. W trakcie realizacji projektu pojawiły się liczne problemy badawcze, m.in. konieczność zdefiniowania fizycznej referencji, dryf IMU, czy trudne warunki atmosferyczne w szybie. Firma SKALA 3D rozwiązała te problemy, co czyni MPG urządzeniem unikalnym w skali światowej.

1. ISTOTA POMIARU SZYBÓW GÓRNICZYCH

Szyby górnicze, poza swoim podstawowym zadaniem udostępniania złóż, spełniają również funkcję komunikacyjną i wentylacyjną (wdechowe, wydechowe, skipy, transportowe, techniczne, osobowe). Mogą mieć one od kilkudziesięciu do ponad tysiąca metrów głębokości. Przeważnie mają profil kołowy, ale spotyka się też starszego typu

o przekroju kwadratu lub prostokąta. Zależnie od warunków geologicznych i czasu budowy ich konstrukcje mogą być oparte o sekcje betonowe oraz metalowe tubingi. Każdy z tych elementów ma określone kształty i wymiary. Zabudowa szybu wyposażona jest również w tzw. dźwigary i prowadniki (drewniane, metalowe) lub liny prowadnicze, na których zawieszono jest naczynie wyciągowe (klatka, skip, kubeł). Występowanie tych elementów powoduje zmniejszenie światła szybu dostępnego do pomiarów. Również zawieszony (element, który łączy liny nośne z głowicą klatki) ogranicza widoczność podczas skanowania (Lipecki, 2010). Rura szybowa oraz infrastruktura szybu widoczne są na rysunkach 1 i 2.



Rys 1. Widok rury szybowej prezentowanej przez chmurę punktów (Adamek, 2011)

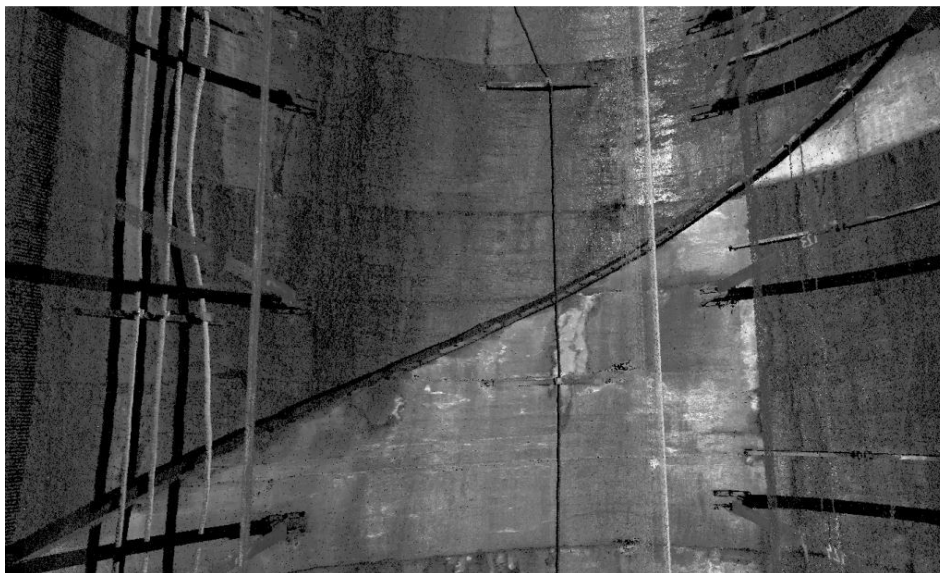


Rys 2. Widok rury szybowej reprezentowanej przez chmurę punktów z pomiaru z użyciem Mobilnej Platformy Górniczej (Adamek *et al.*, 2014)

Z uwagi na funkcje wentylacyjne wyłączenie z eksploatacji szybu na zbyt długi czas może wpływać niekorzystnie na przewietrzanie wyrobisk górniczych i dopływ świeżego powietrza do załogi pracującej pod ziemią. Dodatkowo w szybach wydechowych należy liczyć się z ograniczeniem widoczności przez wydech zużytego powietrza kopalnianego (spaliny, para wodna, pył, itp.). Temperatura powietrza zmienia się w funkcji głębokości, a gradient temperatury ma wartość zmienną, zależną od warunków atmosferycznych panujących na zewnątrz jak i wewnątrz kopalni. Powoduje to, że należy brać pod uwagę zmienną refrakcję pionową, zaburzającą obserwacje optyczne. Przedmiotem pomiaru w szybach są następujące elementy (Lipecki, 2013):

- geometria obudowy i elementów zbrojenia szybu;
- prostoliniowość torów prowadzenia naczyń oraz wartości luzów między prowadnikami, a roboczymi płaszczyznami prowadnic ślizgowych szybów;

- luzy między prowadnicami głównymi, prowadzeniami kątowymi, ich prostoliniowość, odstępy ruchowe oraz geometria.



Rys 3. Widok fragmentu obmurza szybu na obrazie skanu (SKALA 3D, 2011-2014)

2. POMIAR MOBILNY SZYBU A PODEJŚCIE KLASYCZNE

Konieczność inwentaryzacji szypów górniczych związana jest z dwoma aspektami; prawnym i technicznym. Pierwszy z nich wynika z Rozporządzenia Ministra Gospodarki *W sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych*. Rozporządzenie nakłada wymóg prowadzenia okresowych badań poprawności działania urządzeń górniczych oraz monitorowania ich stanu technicznego - inwentaryzacja szybu wykonywana jest minimum raz na pięć lat. Drugi wynika z zagrożeń występujących w pracy kopalni. Inspekcja szybu oraz rzetelny i dokładny pomiar są elementami nieodzownymi i koniecznymi w celu zagwarantowania bezpieczeństwa ludzi pracujących w wyrobiskach górniczych. Szczególną uwagę zwraca się na transport pionowy i zespół urządzeń go obsługujących, takich jak urządzenie wyciągowe, wieża szybowa oraz sam szyb wraz z zabudową (prowadniki, dźwigary i inne jego uzbrojenie). Każdy z wymienionych elementów musi spełniać rygorystyczne kryteria prawidłowego działania.

Klasyczne pomiary inwentaryzacyjne szybu polegają na określeniu pionowości, prostoliniowości oraz pomiarze wybranych elementów uzbrojenia szybu wraz z określeniem tzw. odstępów ruchowych na wybranych poziomach szybu za pomocą domiarów do tych elementów wykonywanych taśmą mierniczą lub ręcznym dalmierzem laserowym (*Disto*) od ciągów stalowych (pionów mechanicznych) rozwieszonych na całej długości szybu. Piony są uprzednio rozwijane, obciążane i stabilizowane wraz

z wyznaczeniem miejsc ich spoczynku, określających wychylenie szybu od fizycznej linii pionu (Pieloch *et al.*, 2011). Pomiary te są czasochłonne i pracochłonne. Niejednokrotnie wymagają budowania pomostów i wyjścia poza obrys klatki szybowej. Umożliwiają pozyskanie jedynie punktowej, czyli częściowej informacji o mierzonym obiekcie. Trudności w realizacji tych prac związane są m.in.: z ograniczeniami technicznymi (utrudnionym dostępem do elementu), jak również ograniczeniami ruchowymi (koniecznością wyłączenia pracy szybu na dłuższy czas z normalnego cyklu produkcyjnego), wpływem czynników zewnętrznych na niezmienność położenia obiektu w czasie badań, stanami awaryjnymi uniemożliwiającymi dokończenie badań, itp. Może to doprowadzić do nie uchwycenia tych stanów. W związku z tym konieczne jest stosowanie dodatkowych metod pomiarowych.

Techniką pomiarową, która nie posiada powyższych ograniczeń oraz dostarcza praktycznie kompletnych danych pomiarowych jest mobilne skanowanie laserowe. Polega ono na wykonaniu skanowania laserowego systemem pomiarowym zamontowanym (najczęściej na głowicy klatki szybowej bądź głowicy naczynia wydobywczego w trakcie jazdy naczynia. Pomiar może być realizowany zarówno w kierunku „w dół”, jak i „w górę”. W zależności od zakresu pracy, podobnie jak przy metodzie klasycznej, rozwieszane są piony mechaniczne bądź wykonywane jest pionowanie laserowe. Celem tych czynności jest stworzenie fizycznej referencji widocznej dla skanerów. Referencją może być nie tylko rozwieszone ciężno, ale również profil przewodników, których kształt został określony za pomocą rejestracji plamki lasera zamontowanych pionowników. Pionowanie laserowe realizowane jest w sposób „ręczny” (fizyczne odczytywanie położenia plamki na wybranych poziomach szybu lub z zastosowaniem system wideodetekcji (system ten jest w posiadaniu AGH oraz GIG – Główny Instytut Górnictwa). Wideodetekcja umożliwia określenie położenia plamki wiązki lasera z dokładnością większą niż ± 0.5 mm. Należy jednak uwzględnić błąd pionowania wynikający z propagacji wiązki laserowej w atmosferze szybu. Dokładność ta zależy od głębokości i liczby przestawień pionownika i średnio szacowana jest na $\pm 5-7$ mm na każde 200 metrów głębokości szybu. natomiast dokładność odpionowania mechanicznego to wartość rzędu 2 cm na głębokości 1 kilometra (Jaśkowski *et al.*, 1998).

Przejazd systemu mobilnego wymaga innych dodatkowych czynności pomiarowych tylko w przypadku konieczności dowiązania chmury punktów do państwowego układu odniesienia lub kopalnianej osnowy pomiarowej. Czynności te są jednak tożsame z wykonywanymi pomiarami przy metodzie klasycznej. Pozostałe prace to przetworzenie zebranych danych w *postprocessingu*. (Adamek, Lipecki, 2015).

Mobilne skanowanie nie tylko automatyzuje czynności pomiarowo - diagnostyczne, ale również ogranicza liczbę osób zaangażowanych w pomiar. Proces pomiarowy jest niezwykle wydajny - skrócony zostaje czas pomiaru z kilku zmian przy metodach klasycznych do jednej zmiany przy użyciu Mobilnej Platformy Górniczej. Skanowanie jest ponadto metodą nieinwazyjną, co gwarantuje zdalny pomiar bez konieczności zatrzymywania pracy różnych urządzeń w kopalni (maszyny wyciągowej, przenośnika taśmowego, itp.). Dzięki temu można ustalić zakres przemieszczeń np. liny wyciągowej w ruchu. Nie było to możliwe do realizacji metodami klasycznymi, a nawet fotogrametrycznymi. MPG daje możliwość oceny stanu geometrii rury szybowej i przede wszystkim przewodników szybowych bez zmuszających pomiarów na poziomie każdego

dźwigara. Ten nowy rodzaj pomiaru może być jednym z elementów określenia tzw. spokojności jazdy naczynia wyciągowego, co wiąże się z bezpieczeństwem użytkownika wyciągu górniczego (Lipecki, 2013).

Należy podkreślić, że technologia pomiaru Mobilną Platformą Górniczą nie sprowadza się do tradycyjnej inwentaryzacji. Nie jest to również technologia typu *in door mapping*, która wykorzystywana jest do tworzenia map wnętrz budynków, a która bazuje na mało precyzyjnych sensorach pomiarowych i algorytmach SLAM (ang. *Simultaneous Localization and Mapping*) do łączenia profili pomiarowych w jednolitą chmurę punktów skanowanego obiektu. MPG została zaprojektowana i dedykowana jest do precyzyjnego mobilnego pomiaru szybów górniczych. Zastosowane urządzenia pomiarowe gwarantują wysokie dokładności, a cykliczny monitoring obiektów narażonych na różnego typu uszkodzenia pozwala na kontrolę bezpieczeństwa miejsca pracy pracowników kopalni.

3. ZAGADNIENIA BADAWCZE PODCZAS BUDOWY MOBILNEJ PLATFORMY GÓRNICZEJ

Jednym z prekursorów zastosowania skanera laserowego w szybach górniczych jest dr hab. inż. Tomasz Lipecki wraz z zespołem (Lipecki, 2013). Prowadzone przez niego badania były znaczącym impulsem do podjęcia tematyki oraz problematyki pomiarów geodezyjnych w szybach górniczych z użyciem technologii skanowania laserowego. Złożoność problemu oraz pomysł firmy SKALA 3D na opracowanie kompleksowego systemu pomiarowego doprowadził do stworzenia bazy badawczo-rozwojowej, której owocem jest system prowadzenia przestrzennych pomiarów geometrii szybów górniczych oparty na technologii skaningu laserowego (MPG). Motorem napędowym do rozpoczęcia badań nad platformą były również następujące argumenty, które potwierdziły potrzebę realizacji takiego systemu (Lipecki *et al.*, 2013):

- pionowe wyrobiska są jednym z podstawowych obiektów górniczych, których niezawodność determinuje działalność całego zakładu górniczego,
- wykonywane dotychczas badania kontrolne - w tym inwentaryzacja miernicza kształtu szybu, jego zabudowy oraz urządzeń w nim usytuowanych - wymaga wyłączenia szybu z eksploatacji przez długi czas - nawet 2-3 dni,
- klasyczne pomiary geodezyjne obarczone są ryzykiem działań wpływających na bezpieczeństwo pracy, z uwagi na konieczność wykonywania obserwacji poza obrysem naczynia wyciągowego,
- zapotrzebowanie płynące bezpośrednio z kopalnianych działów: szybowego oraz mierniczego na kompleksowe obserwacje geometryczne oraz informacje o stanie obiektów (miejsca przecieków w szybach, deformacji podszybia czy geometrii krzeseł szybowych).

Stworzenie mobilnego systemu pomiarowego wymagało rozwiązania następujących problemów i zagadnień (SKALA 3D, 2011-2014):

- analiza warunków panujących w szybach górniczych. Determinowały one decyzje co do założeń konstrukcyjnych platformy, doboru odpowiednich urządzeń pomiarowych, metodyki pracy systemu, itp.

- brak sygnału GNSS. W pionowym wyrobisku górniczym, gdzie nie ma możliwości zastosowania satelitarnych systemów pozycjonowania GNSS klasyczne rozwiązania nie są wykorzystywane,
- integracja urządzeń pomiarowych. Prace dotyczyły zagadnienia integracji na kilku różnych poziomach. Generalnie należało rozwiązać problemy integracji sprzętowej i informatycznej włączając w to zagadnienie synchronizacji danych pozyskiwanych z poszczególnych urządzeń pomiarowych w trakcie przejazdu platformy (wykonywania pomiaru),
- kalibracja platformy, tj. wyznaczenie wzajemnych zależności kątowno - liniowych pomiędzy urządzeniami pomiarowymi, tj. składowymi wektorów pomiędzy poszczególnymi urządzeniami pomiarowymi (mimośród liniowy) oraz wyznaczenie kąta skręcenia i nachylenia poszczególnych urządzeń pomiarowych. MPG została skalibrowana na specjalnie przygotowanym do tego celu polu kalibracyjnym, które widoczne jest na rysunku 4,
- badania nad pozycjonowaniem systemu pomiarowego w osiach XY oraz Z.
- określenie trajektorii przejazdu systemu - najistotniejsze zagadnienie z punktu widzenia pracy systemu pomiarowego,
- opracowanie aplikacji do *postprocessingu* danych pomiarowych. Uzyskane obserwacje (chmury punktów) należy „poprawić” ze względu na szereg czynników „deformujących” pomiary występujących w trakcie jazdy klatki szybowej,
- pomiar w pełni mobilny - dotychczas pomiary skanerem panoramicznym wymagały zatrzymywania się, a następnie łączenia chmur punktów w oparciu o wspólne punkty dostosowania,
- nawiązanie pomiarów do zewnętrznego układu współrzędnych geodezyjnych - orientacja systemu pomiarowego w szybie.



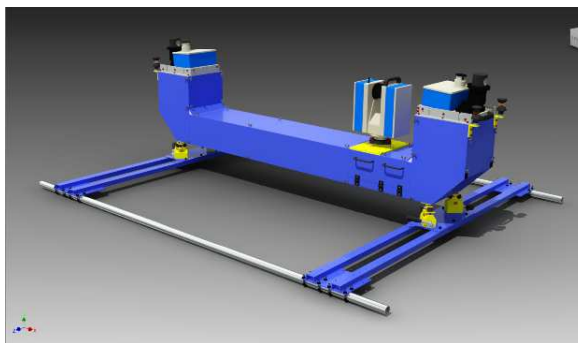
Rys 4. Pole kalibracyjne Mobilnej Platformy Górniczej (MPG) (SKALA 3D, 2011-2014)

4. KONSTRUKCJA MOBILNEJ PLATFORMY GÓRNICZEJ

„Sercem” systemu są fazowe skanery laserowe firmy Zoller+Fröhlich oraz precyzyjna jednostka inercyjna LCI-100 firmy Northrop Grumman, wspomagająca pozycjonowanie mobilnego układu pomiarowego. Dwa skanery profilowe Z+F PROFILER 9012, pracujące

tylko w jednej płaszczyźnie, dedykowane są specjalnie do dynamicznych pomiarów mobilnych. Skaner panoramiczny Z+F IMAGER 5010, którego pole widzenia równe jest 360 stopni, pozwala na skanowanie w pełnym horyzoncie w osi pionowej i przeznaczony jest standardowo do pomiarów statycznych. Stanowi on również uzupełnienie danych pozyskiwanych przez skanery profilowe. Pozostałe komponenty systemu to:

- precyzyjny system synchronizacji urządzeń pomiarowych w czasie rzeczywistym (PTS – ang. *Precision Time Source*);
- zestaw wibroizolatorów zapobiegający przenoszeniu się części drgań wstępujących podczas jazdy naczynia na układ pomiarowy (Rys. 6);
- zestaw urządzeń elektronicznych do sterowania i kontroli platformą;
- system zasilania platformy;
- oprogramowanie do sterowania i kontroli MPG;
- oprogramowanie DSC (ang. *Dynamic Scans Calculation*) do specjalistycznej analizy pomiarów.



Rys 5. Widok konstrukcji Mobilnej Platformy Górniczej (MPG) (www.skala3d.pl)



Rys 6. System stabilizacji i montażu platformy (wibroizolatory i magnesy)

Platforma Górnicza jest w pełni zintegrowanym systemem, który w bardzo krótkim czasie jest w stanie dostarczyć kompletnych, przestrzennych danych pomiarowych, tj. miliony punktów XYZ quasi-ciągłej powierzchni mierzonego obiektu. Co jednak najistotniejsze zapewnia wysokie dokładności rzędu 1-3 mm w poziomym horyzoncie pomiarowym.

Opracowana konstrukcja platformy pomiarowej znacząco różni się od znanych rozwiązań pomiarowych i inspekcyjnych. Autor wraz z zespołem przeanalizował możliwości i ograniczenia występujące w kopalniach węgla kamiennego, jak również w szybach kopalni miedzi. Z uwagi na fakt, że MPG montowana jest na głowicy naczynia wyciągowo-wydobywcze, było ono również przedmiotem analizy ze względu na swoją odmienną budowę. Przy opracowywaniu mobilnego systemu Autor przyjął kilka założeń, które wyznaczyły kierunek i obecny kształt Mobilnej Platformy Górniczej:

1. Realizowany pomiar powinien być kompleksowy, a otrzymany wynik (chmura punktów) kompletny pod względem liczby oraz jakości otrzymanych informacji tj. jak najmniej tzw. „martwych pól” oraz komplet obserwacji niezbędnych do

opracowania dokumentacji zgodnie z obowiązującymi przepisami dotyczącymi inwentaryzacji szybów górniczych. Takie podejście determinowało odpowiednie rozmieszczenie urządzeń pomiarowych na platformie oraz wykorzystanie precyzyjnych instrumentów pomiarowych, tj. fazowych skanerów laserowych oraz precyzyjnej jednostki inercyjnej (IMU).

2. Realizowany pomiar powinien być wykonany w możliwie jak najkrótszym czasie, tj. bez dodatkowych czynności, które towarzyszą klasycznym praktykom pomiarowym.
3. Platforma wykorzystywana będzie przede wszystkim do pomiarów inwentaryzacyjnych w szybach będących w stałej eksploatacji, dostępnych, w których nie występuje bezpośrednie zagrożenie wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego.

Wymienione powyżej założenia precyzyjnie wyznaczyły kierunek rozwoju badań oraz prac rozwojowych w projekcie. Nadały również kształt i charakter budowanej platformie (Rys 5).

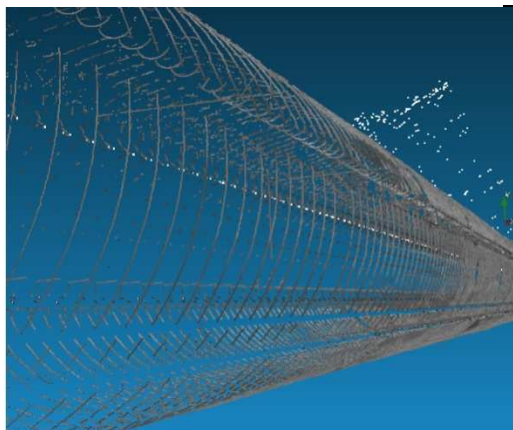
5. NOWATORSKIE ROZWIĄZANIA ZASTOSOWANE W SYSTEMIE MPG

Szereg problemów, jakie należało rozwiązać w trakcie prac badawczych nad konstrukcją systemu, niejako wymusiło opracowanie i zastosowanie nowatorskich rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych oraz opracowanie całkowicie nowych założeń informatycznych i algorytmów obliczeniowych. Poniżej wyjaśniono część tych prac.

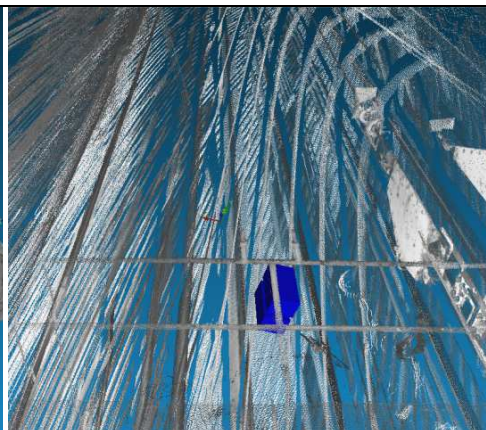
5.1 Rozmieszczenie i rodzaj skanerów na platformie

Przeprowadzone badania i analizy urządzeń wydobywczo-transportowych (klatki, skipy) oraz postawione w projekcie założenia dotyczące funkcjonalności systemu pomiarowego wskazały na konieczność użycia co najmniej dwóch skanerów przeciwnie zorientowanych oraz pochylonych względem siebie pod kątem 4 stopni. Praktyka pomiarów wykazała, że pochylenie skanerów profilowych skutkuje najbardziej wydajnym pomiarem. Kąt ten został wyznaczony na podstawie wzajemnych odległości skanerów do obmurza szybu (od 1 do 7 metrów) i prędkości przejazdu klatki szybowej (od 0.5 do 1 m/s). Taka konfiguracja gwarantuje praktycznie pełne pokrycie danymi mierzonego obiektu (szybu i elementów jego zabudowy). Platforma bazuje na dwóch skanerach fazowych firmy Z+F, tj. Profiler 9012, których właściwości pomiarowe dedykowane są dla tego typu zastosowań. Wysoka częstotliwość obrotu głowicy skanera (200Hz) przy szybkości skanowania to ponad 1 milion punktów na sekundę. Dla standardowej prędkości przejazdu klatki szybowej (prędkości rewizyjnej) 1 m/s i wspomnianych parametrach pomiaru, odległość między kolejnymi profilami wynosi 5 mm (Rys. 7). Dodatkowo przy ustawieniu maksymalnej rozdzielczości otrzymujemy praktycznie ciągłą powierzchnię mierzonego obiektu. Jeżeli wystąpi taka konieczność odległość między profilami można zmniejszyć do 2.5 mm (przy prędkości przejazdu klatki szybowej 0.5 m/s). Taki pomiar ma swoje uzasadnienie w monitorowaniu stanu rury szybowej oraz jej zabudowy pod względem na przykład, występowania przecieków wód powierzchniowych lub ewentualnych deformacji spowodowanych eksploatacją bądź ruchami górotworu.

Innowacyjność zastosowanego rozwiązania jest jednak bardziej złożona i dotyczy głównie zastosowania trzeciego skanera laserowego, tj. skanera panoramicznego. Użyty w konstrukcji platformy skaner pracuje w trybie przestrzennym, ale zakres jego pomiaru wokół osi Z nie kończy się na 360 stopniach, lecz w momencie zakończenia pracy systemu. Skaner skanuje w tzw. trybie bez końca (*endless .ang*), generując pionową linię profilową rozciągniętą spiralnie wokół horyzontu (Rys 8).



Rys 7. Spirala punktów uzyskana z mobilnego skaningu profilowego 2D (Adamek *et al.*, 2014)

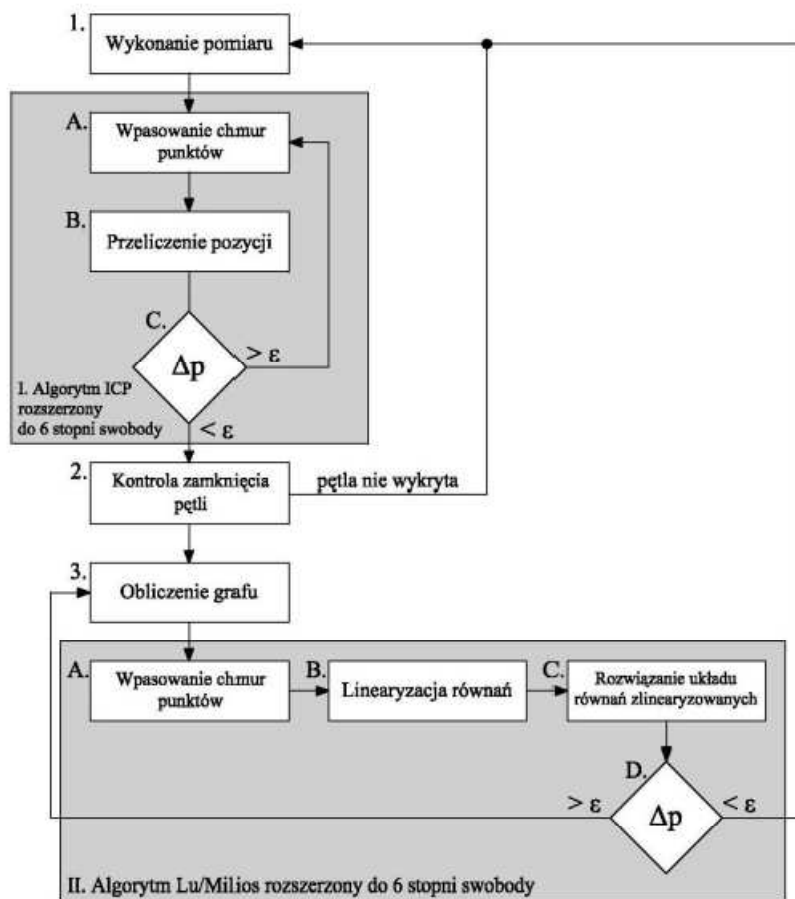


Rys 8. Skan panoramiczny szybu w ruchu „pionowym” (Adamek *et al.*, 2014)

5.2 Zastosowanie metodyki SLAM (ang. *Simultaneous Localization and Mapping*) wspomagającej pozycjonowanie platformy w szybie

Opisana w poprzednim podpunkcie praca skanera panoramicznego ma bezpośredni związek z kolejną innowacją zastosowaną w Mobilnej Platformie Górniczej. Wykonywanie pomiarów w szybach górniczych niesie ze sobą pewne ograniczenia, a jednym z nich jest orientacja i pozycjonowanie urządzenia pomiarowego pod powierzchnią ziemi. W związku z tym zdecydowano się „wspomóc” pozycjonowanie systemu w szybie rozwiązaniem z zakresu robotyki, gdzie w sposób automatyczny wyszukiwane są różnego typu kształty oraz wzory na skanach. Wykorzystywany jest m.in. algorytm 6D SLAM opracowany przez niemieckich uczonych (Nüchter *et al.*, 2004). Algorytm ten jest podejściem, w którym do nawigacji platformy pomiarowej wykorzystuje się w pełni trójwymiarowy obraz rzeczywistości (chmury punktów 3D). W odróżnieniu od operowania systemem w przestrzeni dwuwymiarowej, gdzie położenie urządzenia określa się za pomocą trzech stopni swobody – x , y , φ – współrzędnych płaskich i kąta obrotu wokół osi pionowej. Do działania 6D SLAM konieczna jest praca z sześcioma stopniami swobody – x , y , z , ω , λ , φ – współrzędnymi przestrzennymi i trzema kątami obrotu wokół poszczególnych osi układu współrzędnych. Jest to cechą charakterystyczną algorytmu i ma to swoje odzwierciedlenie w jego nazwie: „6D” (Wulf *et al.*, 2008) (Rys. 9). Podstawowym zadaniem jest

orientowanie kolejnych chmur punktów i dopasowywanie kolejnych pomiarów, tak aby powstały model otoczenia mógł służyć do wyznaczania pozycji platformy.



Rys 9. Schemat działania algorytmu 6D SLAM (Wulf *et al.*, 2008)

5.3 System stabilizacji Mobilnej Platformy Górniczej

Kolejnym rozwiązaniem w skali stosowanych dotychczas urządzeń pomiarowych w szybach górniczych jest system stabilizacji położenia i pracy Mobilnej Platformy Górniczej. W trakcie przejazdu naczynia w rurze szybowej występuje szereg niekontrolowanych drgań i wstrząsów naczynia. Wynikają one zarówno z czynników eksploatacyjnych, jak również z uwarunkowań technologicznych zastosowanych urządzeń wyciągowych (rodzaj maszyny wyciągowej, rodzaj prowadzenia naczynia).

W ramach projektu przeprowadzono specjalistyczne pomiary pracy klatki szybowej (analizę modalną). Dzięki tym badaniom możliwe było zaprojektowanie układu amortyzacji i wibroizolatorów stabilizujących realizowane pomiary i tłumiących drgania pojawiające się w trakcie przejazdu naczynia w rurze szybowej. Całość systemu

amortyzacyjnego zapewnić ma wykonanie pomiarów bardziej stabilnych i obciążonych mniejszą liczbą ewentualnych szumów powstałych w wyniku defektów układu prowadniczego (jezdnego) klatki szybowej.

6. POMIAR MOBILNĄ PLATFORMĄ GÓRNICZĄ W PRAKTYCE

Wykonanie pomiaru z użyciem Mobilnej Platformy Górniczej sprowadza się do ustawienia systemu na głowicy / barierkach klatki szybowej lub naczynia wydobywczego (Rys 10), podłączenia wszystkich niezbędnych komponentów, włączenia zasilania i uruchomienia dedykowanej do sterowania pracą platformy aplikacji. W zależności od rodzaju pomiaru i jego celu, dodatkowo może wystąpić konieczność stabilizacji punktów geodezyjnych i wykonania klasycznych pomiarów. Jest to niezbędne do nawiązania skanów do zadanego układu współrzędnych (osnowy kopalnianej lub układu państwowego). Może również wystąpić konieczność materializacji pionowej osi Z poprzez rozwieszenie pionu mechanicznego w szybie (ciągną stalowego) dla stworzenia pionowej referencji, niezbędnej do wyznaczenia linii pionu w szybie z wykonanego przejazdu platformy. Prowadzone będą jeszcze prace dla całkowitego wyeliminowania konieczności montażu w/w pionów. Ma to na celu usprawnienie procesu pomiarowego poprzez znaczące skrócenie czasu jego trwania, czasu potrzebnego na stabilizację pionów. Poza tym, wszelkie niezbędne dane i obserwacje otrzymujemy z urządzeń zamontowanych na platformie pomiarowej, a opracowany system czasowo-informatyczny integruje (synchronizuje) wszystkie pomiary.



Rys 10. MPG zamontowana i zabezpieczona na barierkach ochronnych głowicy klatki szybowej przed pomiarem w szybie (SKALA 3D)

Pomiary profilowe 2D wykonywane są skanerem przemieszczającym się wzdłuż szybu. Na podstawie pomiaru uzyskuje się spiralę punktów o skoku nawet co 2.5 mm wzdłuż osi szybu. Efektem skanowania jest zestaw przekrojów poprzecznych do kierunku skanowania, dzięki którym można odtworzyć obiekt w przestrzeni. Pozyskana w trakcie przejazdu systemu pomiarowego chmura punktów jest zbiorem wyników danych

laserowych pochodzących z trzech różnych skanerów. Dzięki temu wykonana rejestracja obiektu jest kompletna. Przykład takiej scalonej chmury punktów zaprezentowano na rysunku 11.

Tak gęsta chmura punktów pozwala na prowadzenie dowolnych analiz różnicowych, jak również weryfikację stanu technicznego obiektów zmieniających się w czasie i wydzielenie stref szczególnie narażonych na zmianę kształtu (SKALA 3D, 2011-2014). W wyniku okresowego wykonania skanów danego obiektu istnieje możliwość określenia stopnia jego deformacji, tj. zużycia elementów szybu, podszybia, urządzeń szybowych, maszyn wyciągowych i innych (Lipecki, 2013).



Rys 11. Widok chmury punktów scalonej z trzech skanerów, uzyskanej z pomiaru platformą podczas mobilnego skanowania rury szybowej (Adamek *et al.*, 2014)

7. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań i wykonania szeregu pomiarów weryfikacyjnych Mobilna Platforma Górnicza jest rozwiązaniem pozwalającym realizować pomiary inwentaryzacyjne wyciągu szybowego z wysoką dokładnością. System ten, dzięki zastosowaniu unikatowych rozwiązań technologiczno-informatycznych, może zrewolucjonizować geodezyjne badania w zakresie inwentaryzacji szybów górniczych.

Powyższe zagadnienia badawcze oraz elementy niezbędne do prawidłowej pracy Mobilnej Platformy Górniczej zostały wdrożone w ramach projektu unijnego - Działania 1.4 Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka rozpoczętego w 2011 roku. W efekcie realizowanych badań przemysłowych i prac rozwojowych firma SKALA 3D opracowała mobilny system pomiarowy. Dzięki temu, pomiary w kopalniach są efektywniejsze i szybsze, co bezpośrednio wpływa na ekonomikę ich wykonywania. Uzyskane z pomiarów informacje pozwalają lepiej monitorować i zapewniają większe bezpieczeństwo obiektom i ich użytkownikom.

Przy spełnieniu określonych warunków technicznych, technologia mobilnego skanowania laserowego ma szansę stać się podstawowym narzędziem do inwentaryzacji szybów górniczych, zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa. Ostatnie lata pokazują, iż technika skanowania laserowego jest coraz bardziej doceniana i coraz częściej stosowana właśnie w pomiarach górniczych. Rozwój w tej dziedzinie jest bardzo dynamiczny. Tak jak na powierzchni, tak i pod ziemią zaczynamy skanować wszystko to, co do tej pory mierzone było przy pomocy innych technik pomiarowych. Choć niejednokrotnie skanowanie wciąż jest jeszcze tylko uzupełnieniem pomiarów klasycznych, to w górnictwie powoli zaczyna być najbardziej ekonomiczną i kompleksową formą pozyskania obserwacji i informacji o mierzonym obiekcie (Adamek *et al.*, 2014).

MPG nieustannie poddawana jest udoskonaleniom. Uznanie i akceptacja środowiska górniczego zachęca do rozwoju w kierunku coraz to nowych rozwiązań technologicznych.

LITERATURA

Adamek A., Lipecki T., 2015. Technologia mobilnego skanowania laserowego w badaniu prostoliniowości przewodników szybowych w odniesieniu do metody wideodetekcji plamki laserowej. *Przegląd Geodezyjny* (w druku)

Adamek A., Bałchan J., Krawiec J., Lipecki T., 2014. Innowacyjne rozwiązania pomiarowe do inwentaryzacji szybów górniczych, Szkoła Eksploatacji Podziemnej 2014, Materiały Konferencyjne.

Adamek A., Bałchan J., Bratuś K., Krawiec J., 2011. Zastosowanie technologii skanowania laserowego do monitorowania deformacji podszybia szybu na LW „Bogdanka” S.A., *Geomatyka górnicza - praktyczne zastosowania*, Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Wydanie I, Rozdział XIV, s.181-188, Kraków.

Jaśkowski W., Józwik M., Lipecki T., 1998. Automatyzacja opracowania wyników pomiarów inwentaryzacyjnych szybów kopalnianych prowadzonych przy zastosowaniu pionowania laserowego, *KNT Nowoczesne technologie w badaniach deformacji na terenach eksploatacji górniczej*, Zakopane.

Lipecki T., 2013. Kompleksowa ocena stanu geometrycznego obiektów i urządzeń szybowych z zastosowaniem skaningu laserowego, monografia nr 277, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Kraków.

Lipecki T., Jaśkowski W., Adamek A., Krawiec J., 2013. Tworzenie cyfrowej reprezentacji kształtu wyrobisk górniczych techniką skanowania laserowego, XI Konferencja naukowo-techniczna Aktualne Problemy w Geodezji Inżynierskiej, Warszawa - Serock.

Lipecki T., 2010. Skaningu laserowy w pomiarach geometrii i deformacji obiektów oraz urządzeń górniczych. *Przegląd Górniczy*, tom 66, nr 7-8, s. 25-31.

Nuchter A., Surmann H., Lingemann K., Hertzberg J., Thrun S. 2004. 6D SLAM with an Application in Autonomous Mine Mapping. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, s. 1998-2003.

Pieloch J., Gawałkiewicz R., Jaśkowski W., Jura J., Lipecki T., Skulich M., Szafarczyk A., Szweczyk J., 2011. *Geodezja Górnicza*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2011.

SKALA 3D Artur Adamek, 2011-2014. Materiały badawcze zgromadzone w ramach projektu "Opracowanie mobilnego systemu automatycznego prowadzenia przestrzennych pomiarów geometrii szybów kopalnianych" realizowanym w ramach Działania 1.4 Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka na lata 2007-2013.

Wulf O., Nüchter A., Hertzberg J., Wagner B., 2008. Benchmarking urban six-degree-of-freedom simultaneous localization and mapping. *Journal of Field Robotics*, 25 (3), s. 148–163.

MINING SURVEY SYSTEM (MSS) – INNOVATIVE SOLUTION IN POLISH MINES

KEY WORDS: mobile measurement system, laser scanning, mine shafts.

Summary

Mobile laser scanning technology is developing rapidly also in mining. For several years research and tests are conducted on the use of that type of measurement in the inventory of the mine shafts. The company SKALA 3D in the project 1.4 POIG by PARP undertook to create *Mobile automatic steering system of spatial geometry measurements mine shafts using laser scanning technology*. Its main advantage is a faithful reflection of the object being measured in just a few hours. It is based on the data flowing from laser scanners and precision inertial unit. The main problem of the research was to determine the trajectory of the passing Mobile Platforms Mining (MPG) in the shaft as accurately as possible. Unable to receive signals from satellites in the pipe shaft prevented the use of solutions known for measuring terrestrial mobile systems. The company SKALA 3D has developed a methodology for determine the trajectory of the system, based on geometrical data coming from laser scanners and readings of accelerometers and gyroscopes of inertial unit. To improve the quality and accuracy of measurements MPG is also equipped with a set of anti-vibration parts prevent the transmission of vibrations ascending while cage is moving in the shaft on the measuring system. The whole forms a calibrated system, which in a short time is able to provide spatial measurement data from the measuring shaft. The accuracy of 2-3 mm in a single measurement horizon and a few centimeters determine the position of a point on the thousandth meter below ground make the system very accurate. During the project there have been numerous research problems, including the need to define the physical references, drift of IMU whether harsh weather conditions in the shaft. However, the company SKALA 3D solved these problems and making MPG unique in the world.

Dane autorów:

mgr inż. Artur Adamek
e-mail: skala3d@skala3d.pl

Przesłano 21.10.2015
Zaakceptowano 29.12.2015