

Zastosowanie skaningu laserowego do budowy modelu numerycznego wyrobiska górniczego

JAKUB JANUS

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

W pracach badawczych nad przepływem powietrza w wyrobiskach kopalnianych coraz częściej wykorzystywane są techniki komputerowe w formie symulacji numerycznych. Jedną z pierwszych czynności w trakcie całego procesu symulacji jest zbudowanie modelu geometrycznego, który będzie odzwierciedleniem geometrii, w jakiej badany problem występuje. W przypadku przeprowadzania obliczeń numerycznych dla zagadnień kopalnianych, ze względu na bardzo skomplikowaną budowę wyrobisk kopalnianych, w trakcie budowy modelu geometrycznego konieczne jest stosowanie uproszczeń. Uproszczenia takie niejednokrotnie są konieczne dla uzyskania jasnego obrazu badanego zjawiska oraz do skrócenia czasu obliczeń numerycznych. Jednak wymagana jest wiedza dotycząca wpływu takich uproszczeń na zmianę dokładności uzyskiwanych wyników obliczeń. W artykule przedstawiono sposób pozyskania dokładnych informacji o geometrii wyrobiska górniczego oraz sposób wykorzystanie ich do budowy modeli geometrycznych na podstawie których, przeprowadzane są obliczenia numeryczne.

Słowa kluczowe: numeryczna mechanika płynów, geometria modelu numerycznego, przepływ powietrza, chodnik kopalniany, scanning laserowy

1. Wprowadzenie

Prawidłowe działanie wentylacji kopalnianej jest jednym z warunków koniecznych dla bezpiecznego i efektywnego funkcjonowania kopalń głębinowych. Systemy wentylacyjne mają zapewnić stan atmosfery umożliwiający normalne ich użytkowanie, a także minimalizować skutki ewentualnych awarii i katastrof. Zadanie to ma być realizowane kosztem możliwie najmniejszych nakładów. Jednak ze względu na olbrzymi rozmiar takich systemów wentylacji oraz ich skomplikowaną budowę, składającą się często z setek kilometrów wyrobisk kopalnianych, w tej dziedzinie jest wiele problemów, które nie zostały rozwiązane w zadowalający sposób, lub mogą być lepiej rozwiązane. Konieczne było zatem zastosowanie nowatorskich narzędzi w celach poznawczych zachodzących w tym środowisku zjawisk przepływowych. Duże możliwości do rozwoju tej dziedziny dało wykorzystanie technik komputerowych w postaci symulacji numerycznych stosujących metodą objętości skończonych do rozwiązywania równań mechaniki płynów. O ile rozwój metod symulacji przepływu był związany głównie z myślą o zastosowaniach technicznych, m.in. w aerodynamice, metrologii, hydrologii czy urbanistyce, o tyle coraz częściej metoda ta stosowana jest do obrazowania przepływów w chodnikach kopalnianych. Za jej pomocą można zaobserwować w formie graficznej rozkłady wektorów prędkości, kształtowanie się profilów prędkości czy też rozkłady ciśnień i reakcji dynamicznych w skutek zmian geometrii modelu numerycznego oraz modelu turbulencji.

Liczne porównania symulacji i danych pomiarowych wskazują na to, że dla danej klasy zagadnień należy dobrać optymalną metodykę modelowania (ang. *best practice*). Dla wielu problemów istnieją zestawy zaleceń (ang. *best practice guidelines*) odnośnie całego procesu modelowania – budowy geometrii modelu, budowy siatek obliczeniowych, doboru modeli turbulencji. Jednak do tej pory nie stworzono uniwersalnej metody i trwa proces formułowania odpowiednich zaleceń do przeprowadzania symulacji numerycznych w środowisku kopalnianym, która gwarantują dobre rezultaty w porównaniu do danych pomiarowych.

W procesie przeprowadzania obliczeń numerycznych jednym z najważniejszych etapów jest etap pre - processingu. W pierwszej kolejności należy zaprojektować geometrię obszaru obliczeniowego który będzie odzwierciedlał badaną geometrię. Kolejnym krokiem jest wygenerowanie odpowiedniej siatki numerycznej pokrywającą obszar obliczeniowy, określić rodzaj warunków brzegowych dla obszaru oraz zadać parametry fizyczne przepływu.

Dla zagadnień przepływowych w środowisku kopalnianym pierwszą przeszkodą w stworzeniu odpowiednich wytycznych do przeprowadzania symulacji numerycznych jest stworzenie modelu geometrycznego, który w sposób wiarygodny będzie odwzorowaniem geometrii wyrobiska górniczego. Geometria ta stwarza wiele problemów w procesie tworzenia modeli numerycznych. Dysponując standardowymi technikami pomiaru (taśma miernicza, dalmierz laserowy) bardzo ciężko jest odwzorować takie elementy jak: skrzyżowania wyrobisk, wypiętrzenia spągu, zaciśnięcie wyrobiska, odkształcenia obudowy łukowej, nierównomierne rozmieszczenie obudowy łukowej oraz występowanie w wyrobisku urządzeń górniczych tj. przenośnik taśmowy, kombajn, lutniociąg, zapory pyłowe, przewody hydrauliczne, rurociągi.

W związku z powyższym, dotychczasowe prace badawcze nad przepływem powietrza w środowisku kopalnianym, z wykorzystaniem metod CFD, przeprowadzane są na geometriach modeli wyrobisk górniczych, które nie są odzwierciedleniem obiektu lecz jego dość zgrubną reprezentacją. Wyniki takich prac poddają w wątpliwość uzyskiwane wyniki obliczeń ze względu na „dowolność” budowy modeli geometrycznych oraz brak jakichkolwiek wytycznych co do procesów budowy tych modeli.

Cytując autora publikacji (Althea de Souza, 2005):

*The geometry of the physical system needs to be approximated
by a geometric CAD type model.*

*The more closely the model geometry represents the actual geometry,
the more accurate the results are likely to be*

widzimy że konieczne jest stosowanie uproszczeń w trakcie budowy modeli geometrycznych. Uproszczenia takie niejednokrotnie są konieczne dla uzyskania jasnego obrazu badanego zjawiska oraz do skrócenia czasu obliczeń numerycznych. Jednak wymagana jest wiedza dotycząca wpływu takich uproszczeń na zmianę dokładności uzyskiwanych wyników obliczeń. Jednym z warunków do zdobycia tej wiedzy jest pozyskanie dokładnych informacji o geometrii wyrobiska górniczego. Klasyczne metody pomiaru wymagają bardzo dużego nakładu czasu i pracy wielu osób, niejednokrotnie w warunkach zagrażających ich zdrowiu i życiu. Wskazane jest zatem poszukiwanie nowoczesnych technik pomiarowych, które będą w stanie zaspokoić potrzeby pozyskania dużych ilości informacji dotyczących geometrii obiektu, z dużą dokładnością i w trudnych warunkach, przy jednoczesnym maksymalnym ograniczeniu czasochłonności. Jedną z takich technik pomiarowych jest naziemny skanowanie laserowe, która ze względu na coraz większą dostępność sprzętu oraz jej cenę staje się jedną z podstawowych technologii pomiarowych. Obszary zastosowań skanerów laserowych są bardzo szerokie i wraz z rozpowszechnianiem się tej technologii pomiarowej pojawiają się coraz to nowe dziedziny, w których znajduje ona zastosowanie. W Polsce, z uwagi na początki jej wdrażania, metoda ta jest nadal uważana za mało znaną. Jednak prowadzenie prac naukowych umożliwiających wdrażanie skaningu w zastosowaniach badawczych oraz gospodarczych, wydaje się być niezbędnym dla unowocześnienia metody i technologii przez nią wykorzystywanej. Jedną z dziedzin, w której skanowanie może być niezwykle przydatną techniką pomiarową jest górnictwo. Wprowadzenie technologii skaningu laserowego do kopalń głębinowych pozwoliło na szybkie pozyskiwanie informacji o geometrii mierzonych obiektów do celów inwentaryzacyjnych oraz geodezyjnych, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych dokładności [Baścik, 2013; Lipecski, 2010, 2013]. Jednak informacje te jeszcze nigdy nie były wykorzystywane do celów budowy modeli numerycznych dla zagadnień kopalnianych. Dokładność uzyskiwanych wyników pomiarów pozwala na stwierdzenie, iż informacje potrzebne do odwzorowania obiektów kopalnianych różnego typu, które są skomplikowane pod względem kształtu, i których pomiar za pomocą klasycznych metod byłby bardzo trudny, a wręcz niemożliwy, w wystarczający sposób mogą być pozyskane przy pomocy skaningu laserowego.

2. Pomiary geometrii chodnika w wyrobisku górniczym z wykorzystaniem naziemnego skaningu laserowego

Stały rozwój nowych technologii spowodował upowszechnienie się metod wcześniej zarezerwowanych wyłącznie dla bardzo wąskiej grupy odbiorców. Przykładem takiej technologii są urządzenia inżynierii odwrotnej tj skanery 3D. Możliwość tych urządzeń w połączeniu z zaletami systemów projektowania

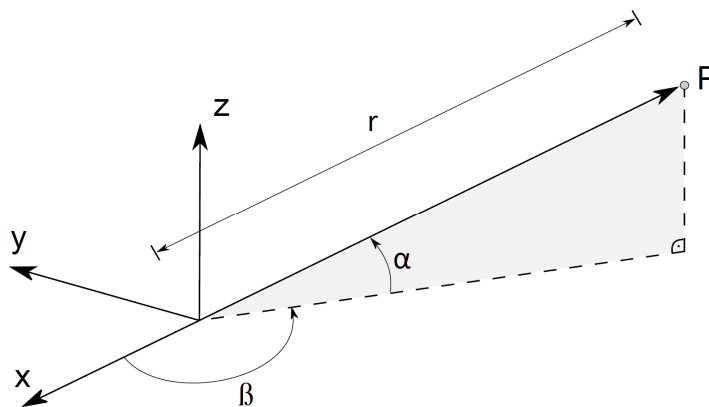
wspomaganych komputerowo (ang. *computer aided design* – CAD) tworzą nowe możliwości dotychczas nieosiągalne innymi technikami.

Naziemny skaningu laserowy (ang. *Terrestrial Laser Scanning* – TLS) jest technologią pozyskiwania informacji o kształcie obiektu, opierającą się na bardzo szybkim wyznaczeniu współrzędnych X,Y,Z ogromnej ilości punktów, nazywanej chmurą punktów. Uzyskana w procesie skanowania chmura punktów, zorientowanych w przestrzeni, pozwala na bardzo dokładne i szybkie wygenerowanie trójwymiarowego modelu skanowanego obiektu. Dzięki rozwojowi oprogramowania proces obróbki tak dużej liczby danych staje się wydajniejszy, a także otrzymujemy coraz lepsze narzędzie służące różnego rodzaju analizom.

System TLS składa się zazwyczaj z nadajnika, tj. modułu generującego światło lasera (dioda), systemu wirującego lustra, którego zadaniem jest równomierne odchylenie kątowne wiązki lasera i jej „rozrzucanie” po powierzchni obiektów. W skład urządzenia wchodzi również teleskop optyczny skupiający powracające odbite promieniowanie, oraz detektor zamieniający energię światła na impuls zapisywany w module rejestracji (karta pamięci) i konsoli. Nadajnik oraz detektor podlegają jednostce kontrolującej, której sterowanie odbywa się poprzez mikroprocesor. Urządzenie to obraca się wokół własnej osi o ustalony kąt, co gwarantuje uzyskanie założonej rozdzielczości.

Zasada działania skanera laserowego opiera się na fazowej metodzie pomiaru odległości bazującej na właściwościach fali emitowanej przez laser. Urządzenie emituje wiązkę laserową o znanej częstotliwości („światło emitowane”), która po kontakcie z obiektem wraca odbita z powrotem do urządzenia („światło wracające”). Faza „światła wracającego” zostaje porównana z fazą znanej częstotliwości, a różnica pomiędzy dwiema wartościami szczytowymi jest „przesunięciem fazowym”.

Jest to biegunowa metoda pomiaru, gdzie położenie punktu określa się za pomocą kąta poziomego i pionowego, a także odległości od mierzonego punktu. Kąty określone są na podstawie położenia luster rozpraszających wiązkę lasera. W celu ustalenia położenia punktu P muszą być znane: długość promienia r , jak również wartości kątów α i β (Rys. 2.1). Skanery z pomiarem przesunięcia fazowego uważa się za jedne z najdokładniejszych urządzeń do skanowania laserowego na rynku, ponieważ umożliwiają bardzo szybkie pozyskanie danych i generują skany o bardzo wysokiej rozdzielczości.



Rys. 2.1. Schemat działania naziemnego skaningu laserowego

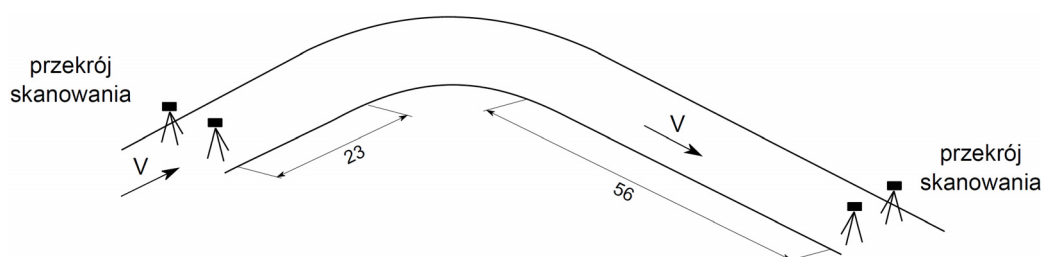
2.1. Aparatura pomiarowa

W pomiarach geometrii chodnika w wyrobisku górniczym wykorzystano jeden ze skanerów 3D dostępnym na rynku, skaner laserowy FARO Focus 3D. Jest to urządzenie bardzo kompaktowe, o wymiarach zaledwie $0,24 \times 0,20 \times 0,10$ m i wadze 5 kg. Charakteryzuje się zasięgiem od 0,6 m do 120 m, oraz promienia lasera padającego pod kątem prostym na powierzchnię o współczynniku odbicia wynoszącym 90%. Skaner ten cechuje się wysoką prędkością pomiaru – w zależności od rozdzielczości skanu od 120 000 pkt./s aż do 976 000 pkt./s. Błąd pomiaru odległości to $\pm 0,002$ m. Pole widzenia dla urządzenia to 360° w płaszczyźnie poziomej oraz 305° w płaszczyźnie pionowej. Moc lasera wynosi 20 mW, długość fali 905 nm, zaś typowa wartość rozbieżności wiązki to 0,16 miliradiana. W trakcie pomiarów wszystkie dane są zapisywane na karcie SD co pozwala na ich łatwe i bezpieczne przesyłanie do komputera.

2.2. Miejsce pomiarowe

Pomiary przy użyciu skanera 3D zostały wykonane w kopalni ZG Sobieski, w chodniku przekopowym Grodzisko, poziom 300. Jako miejsce pomiaru wybrano okolice zakrętu, dające duże możliwości pomiarowe.

Ze względu na skomplikowany kształt wyrobiska górniczego (wypiętrzenia spągu, zaciskanie obudowy, łuki obudowy ŁP, zakręt) konieczne było wybranie odpowiednich miejsc pomiarowych wykonywanych skanerem 3D. W celu jak najlepszego odwzorowania geometrii chodnika zdecydowano się na podwójne stanowisko skanowania w przekroju wyrobiska. Jednym z elementów znajdujących się w przekrojach były rurociągi biegnące przy stropie wyrobiska. Wybór jednego stanowiska skanowania skutkował by występowaniem tzw. martwych pól, będących wynikiem braku widoczności lasera obszaru znajdującego się w cieniu rurociągów. Stanowiska skanowania znajdowały się przy lewym oraz prawym ociosie co pozwoliło na zminimalizowanie niezeskanowanych obszarów. Następnie należało określić przekroje pomiarowe oraz rozmieścić odpowiednią liczbę markerów (*Faro Laser Scanner FOCUS 3D – podręcznik użytkownika*, 2010). Ich zadaniem jest możliwość łączenia ze sobą skanów z kolejnych stanowisk a także zorientowanie w wybranym układzie współrzędnych. W celu uzyskania pełnego modelu przestrzennego wyrobiska, cały odcinek chodnika został podzielony na 11 przekrojów skanowania, co dało 22 stanowiska pomiarowe. Pierwszy przekrój skanowania ustawiony był około 23,0 m przed wlotem do zakrętu, natomiast ostatni przekrój skanowania około 56,0 m za wylotem z zakrętu (Rys. 2.2).



Rys. 2.2. Schemat rozmieszczenia przekrojów skanowania

2.3. Opracowanie danych skaningu laserowego

Proces opracowania zbiorów pozyskanych skanerem laserowym można nazwać przetwarzaniem wstępnym (ang. *pre - processing*). W ramach opracowania danych pomiarowych wymagane jest przygotowanie danych do dalszego przetwarzania. Do najważniejszych procesów na tym etapie należy zaliczyć orientację chmury punktów poprzez połączenie kilku chmur punktów (uzyskanych z poszczególnych stanowisk pomiarowych) w jeden zbiór danych. Następnie wykonuje się filtrację chmury punktów polegającą na czyszczeniu, usuwaniu szumów pomiarowych oraz nieciągłości [Sokoła-Szewiła i Wiatr, 2013]. W przypadku gdy uzyskana chmura punktów stanowi trudność podczas dalszej obróbki z powodu swoich rozmiarów (duża ilość punktów) zalecana jest redukcja punktów w celu ograniczenia użycia zasobów komputerowych oraz przyspieszenia dalszej pracy.

W wyniku skanowania laserowego geometrii chodnika przekopowego Grodzisko, pre - processingu uzyskanej chmury punktów oraz redukcji ilości punktów uzyskano bardzo dokładne, cyfrowe odwzorowanie całej przestrzeni skanowanego fragmentu chodnika, składające się ze 152 mln punktów (Rys. 2.3, 2.4, 2.5).

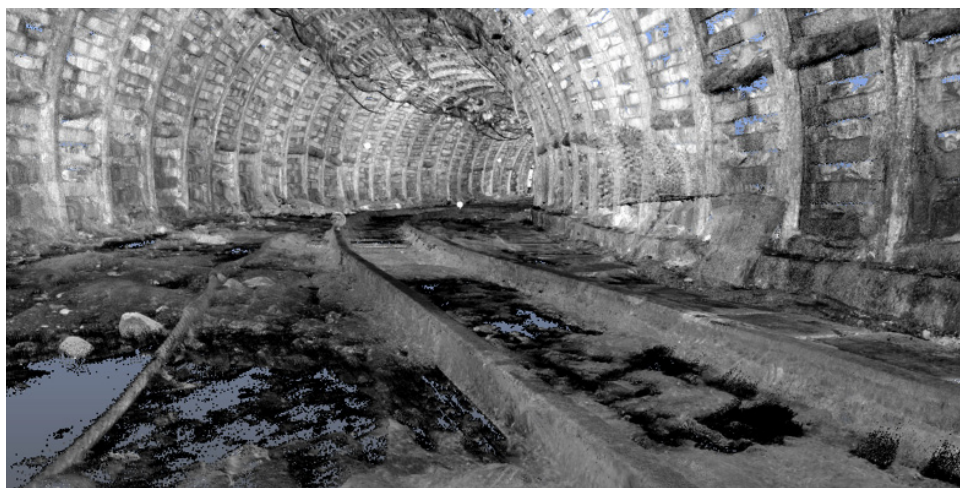
3. Tworzenie geometrii modelu numerycznego na podstawie wyników skaningu laserowego

Sposób tworzenia geometrii modelu numerycznego został zaprezentowany na przykładzie odwzorowania geometrii przewodu hydraulicznego oraz rurociągu, znajdujących się w okolicy stropu wyrobiska górniczego Grodzisko.

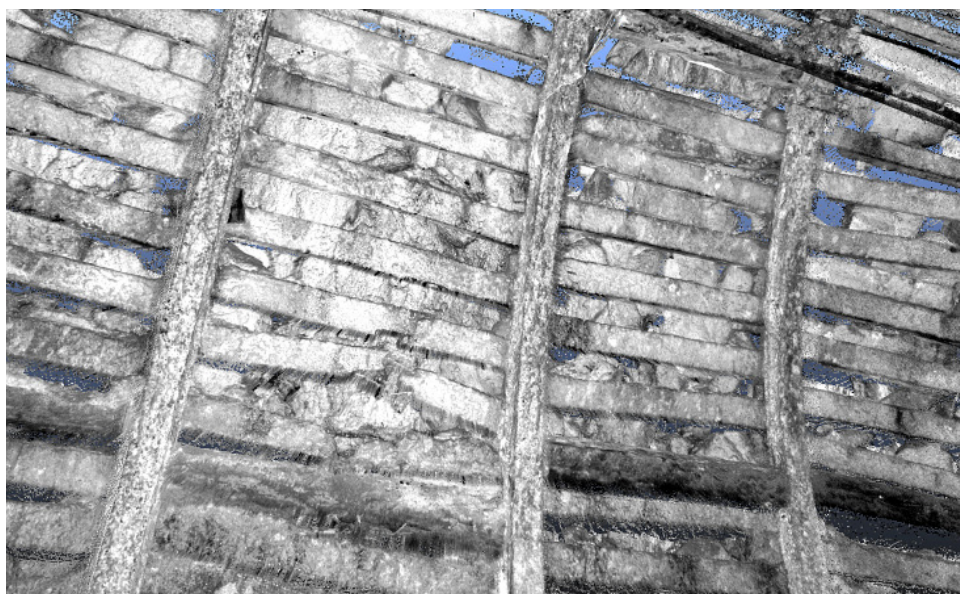
Proces odwzorowania skanowanej geometrii składa się z kilku etapów w trakcie którego konieczne jest wykorzystanie oprogramowania do obróbki chmury punktów a następnie oprogramowania ze środowiska CAD. Pierwszym etapem, mającym na celu ułatwienie projektowania geometrii, jest wydzielenie z chmury



Rys. 2.3. Widok „wewnątrz” prostego odcinka wyrobiska kopalnianego w okolicach zakrętu



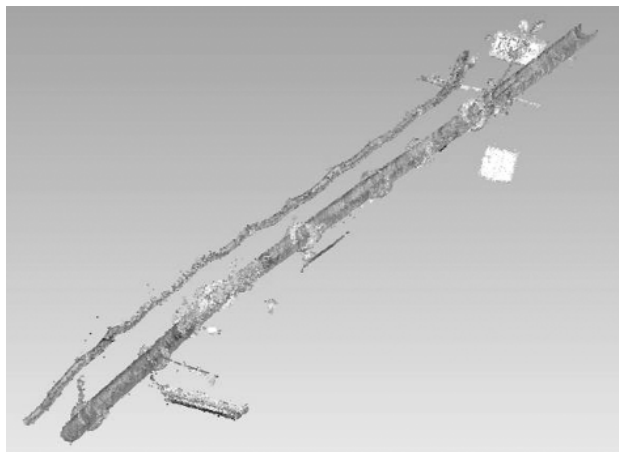
Rys. 2.4. Widok stropu chodnika kopalnianego



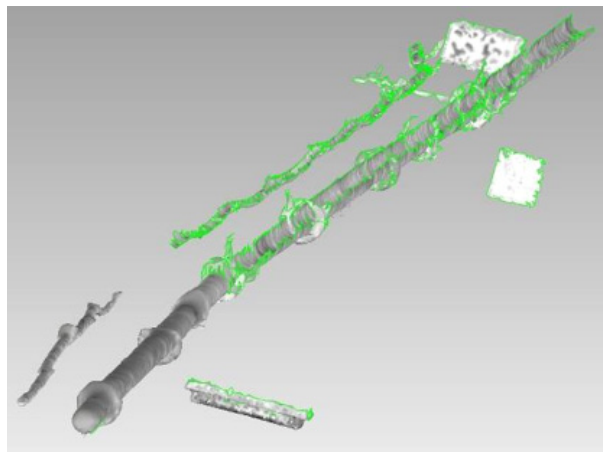
Rys. 2.4. Widok wykładki chodnika kopalnianego

punktów poszczególnych elementów w postaci grupy punktów. Czynność ta przypomina możliwości oprogramowań ze środowiska CAD, które pozwalają podział modelu na poszczególne warstwy. Zdecydowano się na wyodrębnienie 3 warstw: obudowa łukowa, spąg oraz przewody wraz z rurociągami.

W trakcie kolejnego etapu pracy nad geometrią modelu dokonuje się triangulacji chmury punktów. Zabieg ten polega na łączeniu kolejnych punktów w trójkąty. Zazwyczaj programy generujące siatkę trójkątów wykorzystują do tych celów własny algorytm jednakże ze względu na wiele błędów powstałych w czasie triangulacji konieczna jest ręczna korekta wygenerowanego obiektu (rys. 3.1). Tak przygotowany model został eksportowany do pliku ze środowiska CAD, co pozwoliło na przejście do etapu projektowania.



Chmura punktów przedstawiająca przewód hydrauliczny oraz rurociąg



Model 3D po nałożeniu siatki trójkątów

Rys. 3.1. Etapy odwzorowania geometrii na bazie chmury punktów przedstawiających przewód hydrauliczny oraz rurociąg

Proces projektowania polega na wykonaniu kilku przekrojów przez model 3D. Rozwiązanie to ma na celu stworzenie linii przekrojowych przez poszczególne elementy modelu. Ze względu na występowanie martwych pól skanowanych obiektów oraz zniekształcenia modelu w trakcie procesu triangulacji, linie przekrojowe nie są wystarczająco dokładne do zbudowania modelu geometrycznego. W związku z tym, konieczne jest dokładne wyrysowanie linii, bazując na liniach przekrojowych, które będą odzwierciedlały przekrój danego modelu. W przypadku rurociągów, przewodów hydraulicznych będą to linie w postaci okręgu. Następnym krokiem jest wyznaczenie linii prowadzącej przewód oraz rurociąg (łącznie środki wszystkich okręgów) w celu odwzorowania ułożenia elementów w geometrii wyrobiska górniczego.

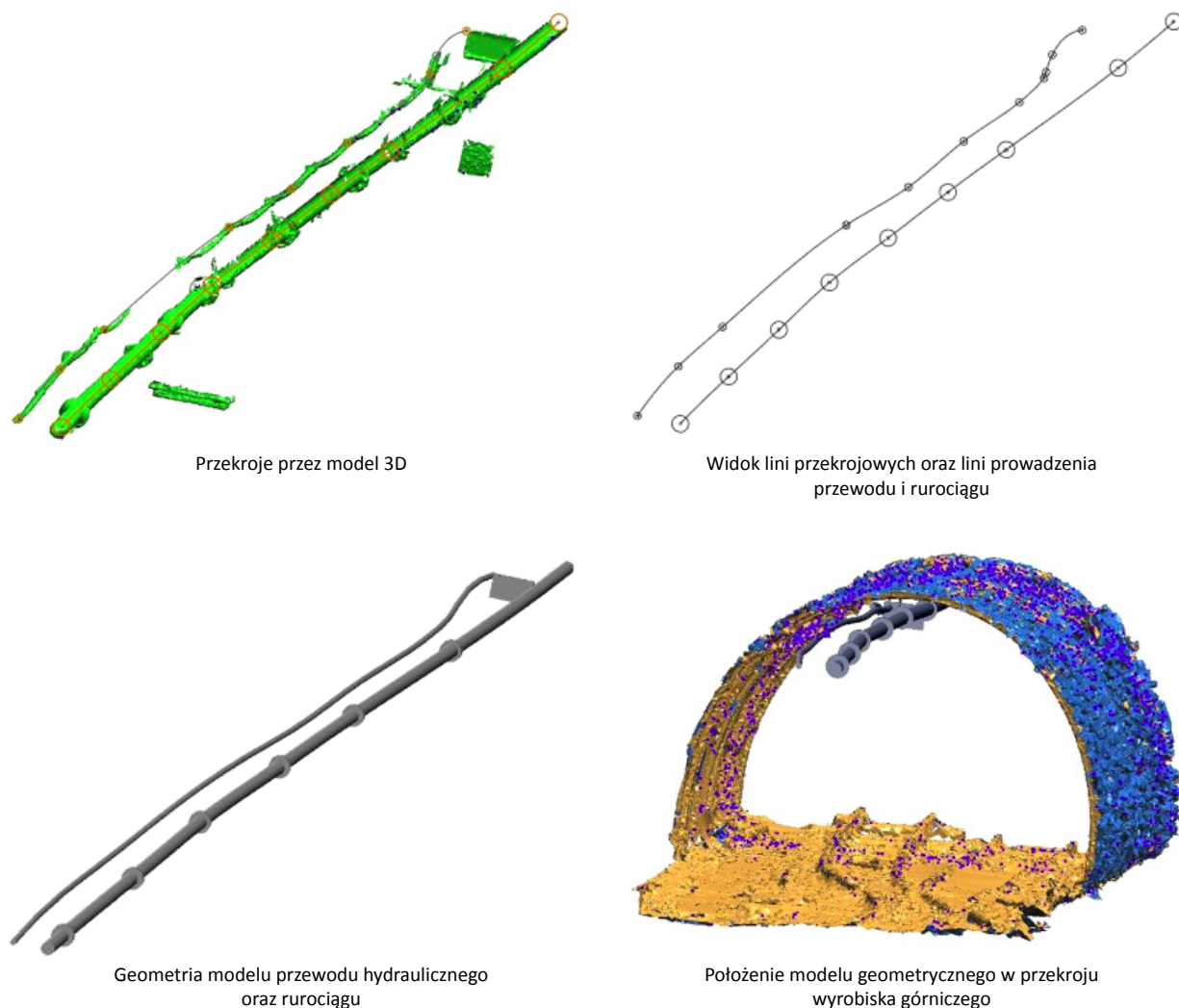
Ostatnim etapem jest stworzenie modelu geometrycznego, wykorzystując funkcję programu CAD, bazującego na powstałych liniach przekrojowych oraz liniach prowadzenia przewodu.

W wyniku powyższych pracy otrzymano model geometryczny rurociągu oraz przewodu hydraulicznego z dokładnym odwzorowaniem geometrii, kształtu, prowadzenie po stropie oraz położenia w przekroju poprzecznym wyrobiska górniczego (Rys. 3.2).

4. Podsumowanie

W przedstawionym artykule zaprezentowany nowatorski sposób wykorzystania wyników skaningu laserowego do budowania geometrii modeli numerycznych. Naziemny skaning laserowy umożliwia szybkie pozyskanie wystarczająco dokładnych informacji potrzebnych do odwzorowania obiektów również tych, które są skomplikowane pod względem kształtu, i których pomiar za pomocą klasycznych metod byłby bardzo trudny, a wręcz niemożliwy. Klasyczne metody pomiaru w celu pozyskania wystarczającej ilości informacji o obiekcie posiadającym złożony kształt, wymagają bardzo dużego nakładu czasu i pracy wielu osób, niejednokrotnie w warunkach zagrażających ich zdrowiu i życiu.

Analiza uzyskanej chmury punktów pozwala stwierdzić przydatność skanowania laserowego do uzyskania modelu przestrzennego wyrobiska górniczego. Uzasadnieniem takiej tezy jest zarówno mało skomplikowany proces pomiarowy jak i możliwość uzyskania wysokich dokładności modelu. Na podstawie uzyskanej chmury punktów oraz procesu odwzorowania geometrii można stwierdzić, iż pozyskanie dokładnych informacji o geometrii wyrobiska górniczego pozwala na dokładne odwzorowanie geometrii w postaci



Rys. 3.2. Etapy odwzorowania geometrii modelu numerycznego w oprogramowaniu ze środowiska CAD

modelu geometrycznego, co z kolei pozwoli przeprowadzić analizy wrażliwości obliczeń numerycznych na uproszczenia w modelach. Badania te mogą być podstawą do stworzenia wytycznych do przeprowadzania symulacji numerycznych dla kopalń głębinowych. Takie analizy są konieczne do ulepszenia metody modelowania numerycznego przepływów powietrza w wyrobiskach kopalnianych, ze szczególnym naciskiem na proces budowy geometrii modelu numerycznego i wprowadzanych uproszczeń. Wzbogacenie tej wiedzy pozwoli na uzyskiwanie dobrej zgodności z wynikami pomiarów w takim czasie, który będzie pozwalał na efektywne wykorzystanie metody CFD do celów obliczeń kopalnianych. Wiedza ta w przyszłości będzie podstawą do stworzenia wytycznych budowania modeli numerycznych do celów obliczeniowych dla środowiska kopalnianego. Stanowi to ważny etap prac zmierzających do lepszego wykorzystania metod numerycznych, co może zmierzać do optymalizacji sieci wentylacyjnych poprzez lepsze poznanie zachodzących tam zjawisk.

Praca została wykonana w roku 2015 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Althea de Souza, 2005: *How to – Understand Computational Fluid Dynamics Jargon*. NAFEMS Ltd.
- Baścik M., 2013: *3D laser scanning in underground mines – practical experience*. School of Underground Mining 2013, The Mineral And Energy Economy Research Institute of Polish Academy of Sciences.
- Lipecki T., 2013: *Kompleksowa ocena stanu geometrycznego obiektów i urządzeń szybowych z zastosowaniem skaningu laserowego*. Rozprawy i Monografie 2013, nr 277.

- Lipecki T., 2010: *Laser scanning measurement of mining equipments geometry and deformation*. Polish Mining Review, No 7-8.
- Sokoła-Szewiła V., Wiatr J., 2013: *Application of laser scanning method for the elaboration of digital spatial representation of the shape of underground mining excavation*. Polish Mining Review, No 8.

The application of laser scanning in the process of construction a mine drift numerical model

Abstract

Numerical simulation methods are increasingly used for researches on the airflow in mine drifts. One of the first steps in the whole process of simulation is building a geometric model that will reflect the geometry of the studied problem. In the case of carried out numerical simulations in the mine environment, due to the very complicated constructions of mine drifts, during creating the numerical model geometry it is necessary to make simplifications. Such simplifications are often necessary if we want to obtain a clear image of the investigated phenomenon and shorten the duration of numerical calculations. Still, we need to know in what way such simplifications will influence the accuracy of the obtained calculation results. The article presents how to obtain accurate information about the mine drift geometry and how to use them to build geometric models based on which the numerical simulations are carried out.

Keywords: numerical fluid mechanics, numerical model geometry, air flow, mine drift, laser scanning