

Wojciech RUTKOWSKI ORCID 0000-0002-8555-3549
AGH University of Science and Technology (Akademia Górniczo-Hutnicza)

MOŻLIWE ZASTOSOWANIE SKANERA LOW-COST I POMIARÓW FOTOGRAMETRYCZNYCH DO KONTROLI PRAC W GŁĘBIONYM SZYBIE

Possible application of low-cost laser scanners and photogrammetric measurements for inspections in shaft sinking process

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwość zastosowania niskobudżetowego skanera LiDAR zaimplementowanego w smartfonie iPhone 13 Pro do kontroli prac w głębionym szybie górniczym. Celem badań było określenie przydatności oraz dokładności wygenerowanych modeli 3D. Badania przeprowadzono na obiekcie powierzchniowym będącym makietą szybu. Na podstawie walidacji zebranych danych, z użyciem profesjonalnego skanera, stwierdzono możliwość zastosowania smartfona iPhone 13 Pro do zadań niewymagających wysokiej dokładności. Na podstawie kontroli otrzymanych danych pomiarowych stwierdzono, że testowany LiDAR zapewnia pomiary odległości do 5 m z klasą dokładności 2,5, co przy jednoczesnej rejestracji z kamery/aparatu fotograficznego smartfona zapewnia szybkie pozyskanie trójwymiarowego odwzorowania badanego obiektu z przypisaną kolorystyką i teksturą materiału konstrukcyjnego.

Słowa kluczowe: pomiar, analiza danych, górnictwo, głębienie szybu, LiDAR, smartfon

Abstract: Article aims to present possibility of application low-cost LiDAR scanner of iPhone 13Pro for workings inspections in mining shaft sinking process. Main goal of research was to verify accuracy and usefulness of generated 3D models. Measurements were conducted inside model of mining shaft on the surface. Based on validation, conducted with use of professional TLS, iPhone 13 Pro LiDAR scanner usefulness was proved for inspections that don't need high accuracy. Tested iPhone 13 Pro LiDAR scanner measures up to 5m with accuracy class 2,5. With simultaneous camera recording provides quick triaxial reflection of object with color and texture of material.

Keywords: measurement, signal analysis, mining, shaft sinking, LiDAR, smartphone

1. Wprowadzenie

Każdy typ skaningu laserowego, taki jak naziemne lub mobilne skanowanie laserowe, zyskuje z biegiem lat na popularności w zakresie pomiarów dystansu i tworzenia modeli 3D. Naziemne skanowanie laserowe znalazło zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu takich jak geodezja [1], inwentaryzacje w lasach [2], budownictwie [12] i wiele innych, podczas gdy mobilne skanery laserowe są używane m.in. w chirurgii [1], górnictwie podziemnym [10]. Profesjonalne skanery laserowe są niezaprzeczalnie użyteczne i możliwe do zastosowania niemalże wszędzie, jednakże koszt ich zastosowania niekiedy przewyższa korzyści płynące z ich użycia.

Nowe produkty firmy Apple, iPhone 12 Pro, 13 Pro oraz 14 Pro, a także iPad Pro są wyposażone w jednakowe skanery LiDAR, których dokładność pomiaru jest znacząco niższa w porównaniu z profesjonalnym naziemnym skanerem laserowym, jednak wg Leutzerburga dla iPhone'a 12 Pro została określona jako ± 10 cm dla dużych obiektów [5]. Taka dokładność jest wystarczająca do szybkich i wstępnych inspekcji dużych obiektów, co zainspirowało autora do wykonania wstępnych badań na wybranym obiekcie powierzchniowym w zakładzie górniczym, w celu oceny możliwości szybkiej weryfikacji i dokumentacji jakości procesu głębiania szybu górniczego. Potencjał takiego rozwiązania podkreśla fakt, że wiele prac naukowych skupiło się na zastosowaniu skanera zainstalowanego w iPhone'ie do różnych celów, takich jak mapowanie lasów [11], transport szynowy [9] czy zużycie dróg leśnych [7].

Skanowanie laserowe już znalazło zastosowanie w głębianiu szybów górniczych, podczas ich inspekcji oraz w badaniu geometrii szybów, z zastosowaniem dedykowanej platformy badawczej wykorzystującej techniki naziemnego skanowania laserowego [4]. Pomiaru takie muszą być wykonywane co 5 lat zgodnie z polskim prawem [13]. Co za tym idzie, każda możliwość przeprowadzania takich pomiarów szybciej oraz z większą precyzją jest wysoce pożądana.

Ten artykuł ma na celu przedstawienie możliwości zastosowania skanera LiDAR z iPhone 13 Pro do poprawy jakości i dokładności pomiarów oraz inspekcji w głęzionym szybie górniczym. Opisanie badania, w tym bieżąca analiza danych pomiarowych i wnioskowanie, były prowadzone na powierzchni.

2. Podstawy teoretyczne

Technologia LiDAR (Light Detection and Ranging) wykorzystuje siatkę punktów laserowych, które po odbiciu od mierzonej powierzchni wracają do sensora. Mierzony jest czas powrotu odbitej wiązki lasera, na podstawie którego wyznaczana jest odległość danego punktu obiektu badań od czujnika zgodnie ze wzorem:

$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

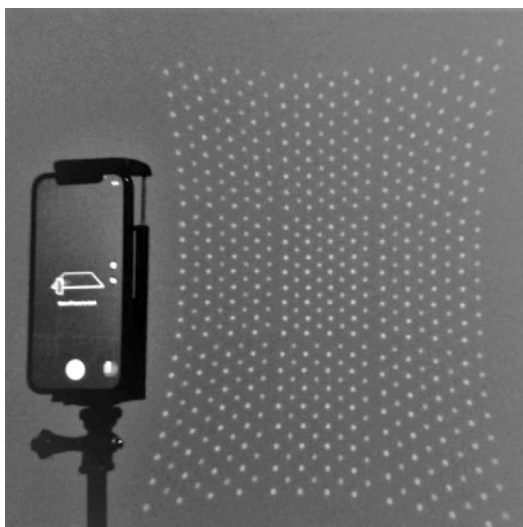
gdzie:

d – dystans pomiędzy sensorem a mierzonym obiektem,

c – prędkość światła,

t – czas niezbędny do przebycia podwojonej odległości pomiędzy czujnikiem a obiektem.

Zastosowany smartfon iPhone 13 Pro dysponuje dokładnie takim samym sensorem LiDAR jak poprzedni model, czyli iPhone 12 Pro. Wiązka lasera jest emitowana przez VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser), w postaci sekcji 8×8 punktów w siatce 3×3, co zapewnia łącznie 572 punkty pomiarowe, siatka pomiarowa została przedstawiona na rys. 1. Maksymalna odległość pomiarowa wynosi 5 m [5].



Rys. 1. Apple iPhone 12 Pro z sensorem LiDAR emitujący siatkę punktów [5]

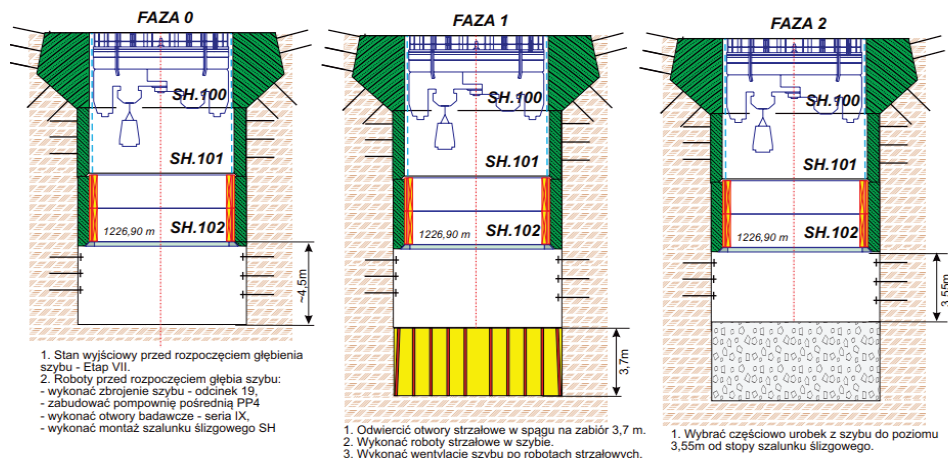
Od premiery smartfona iPhone 12 Pro pojawiło się wiele publikacji [5, 9, 11], w których była zweryfikowana dokładność i rozdzielczość czujnika LiDAR zamontowanego w smartfonach. To umożliwiło autorowi przystąpienie do eksperymentu biernego w warunkach terenowych, podczas którego porównano chmury punktów wygenerowane z iPhone'a 13 Pro i FARO FOCUS 30.

3. Obiekt i cel badań

3.1. Technologia głębinienia szybu poniżej głębokości 1226.90 m

W celu lepszego przedstawienia potencjału skanera LiDAR zamontowanego w iPhone 13 Pro zostanie przedstawiony cykl pracy głównego wykonawcy,

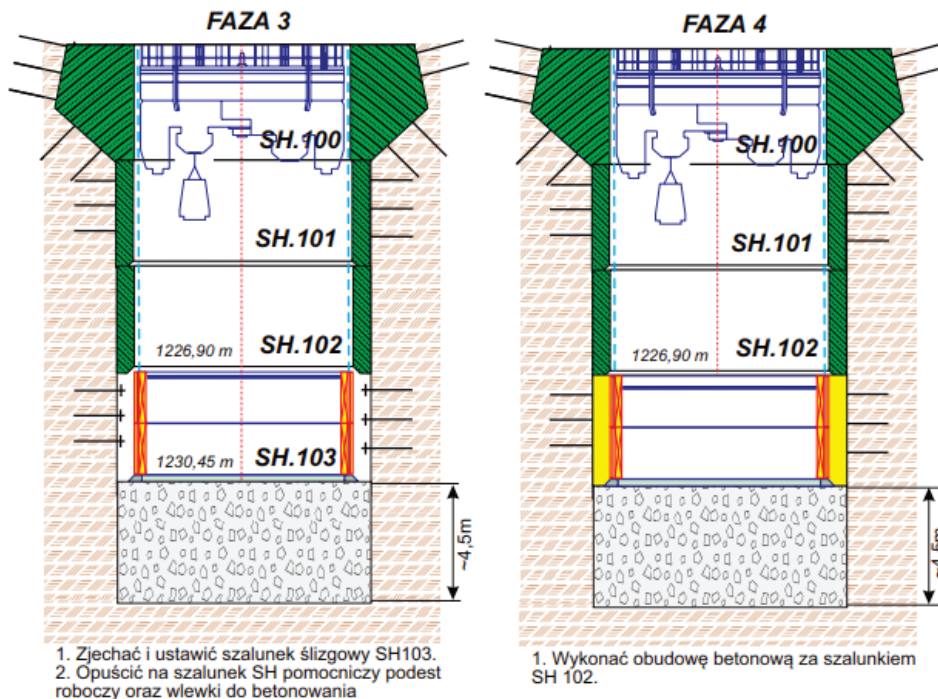
Przedsiębiorstwa Budowy Kopalń PeBeKa Lubin S.A., przy głębeniu szybu GG-1. Technologia obejmuje głębenie robotami strzałowymi i wykonywanie obudowy ostatecznej betonowej. Fazy od 0 do 2 technologii prac zostały przedstawione na rys. 2.



Rys. 2. Fazy 0 do 2 technologii głębenia szybu GG-1 w obudowie betonowej

Faza 0 jest punktem końcowym poprzedniego cyklu, dystans od spągu do poprzedniej obudowy betonowej powinien wynosić ok. 4,55 m. W fazie 1 przedstawiono wiercenie otworów strzałowych w spągu. Po odwierceniu, każdy otwór jest udrażniany, a zbędny sprzęt usuwany z przodka. Następnie otwory są ładowane materiałem wybuchowym skalnym i uzbrajane w zapalniki, które są łączone w grupy. Gdy wszyscy pracownicy bezpiecznie opuszczą szyb, materiał wybuchowy jest odpalany centralnie z powierzchni. Następnie szyb jest wentylowany przez minimum godzinę, co daje możliwość przeprowadzenia zautomatyzowanych inspekcji obudowy w przyszłości. Gdy wentylacja jest zakończona, a przodek został skontrolowany pod względem obecności niewypałów, dział górniczy przechodzi do fazy drugiej, w której urobek jest wybierany do poziomu 3,55 m od ostatniej obudowy betonowej. W fazie 3 szalunek hydrauliczny zostaje zerwany, ustawiany na spągu i stabilizowany. Kolejnym etapem jest wykonanie obudowy betonowej za szalunkiem hydraulicznym. Fazy 3 i 4 przedstawiono na rys. 2. Po zakończeniu betonowania reszta urobku zostaje wybrana do poziomu 4,55 od ostatniego odcinka obudowy, co stanowi początek następnego cyklu. Oczywiście cały cykl jest znacznie bardziej skomplikowany i zawiera wiele dodatkowych elementów jak choćby ruchy pomostem roboczy, równanie urobku, rewizje dobowe etc. Jednakże na potrzeby omówienia możliwego zastosowania szybkiego skaningu laserowego omówiony powyżej zakres jest wystarczający. Warto podkreślić, że w całym cyklu pracy jest wystarczająco dużo czasu, aby przeprowadzić skan laserowy lub pomiary fotogrametryczne w celu stworzenia modelu przestrzennego danego zakresu ociosu skalnego. Takie modele mogą

mieć zastosowanie m.in. we wstępnej kontroli siatki kotwienia, dziennych raportach, usprawnieniu przekazywania zmian pomiędzy sztygarami.



Rys. 3. Fazy 3 i 4 technologii głębienia szybu GG-1 w obudowie betonowej

3.2. Cel badań

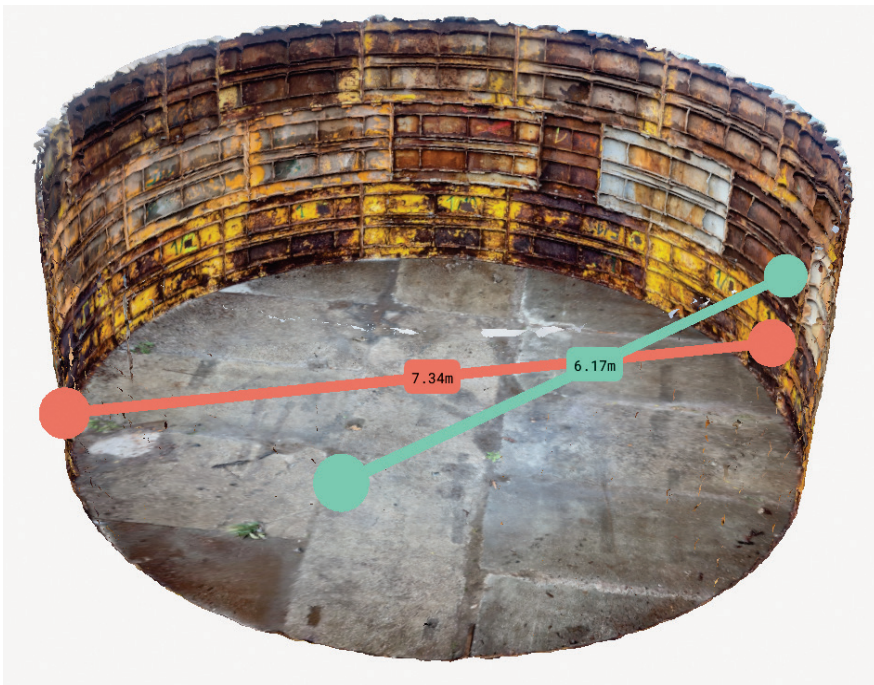
Przeprowadzone badania miały na celu określenie przydatności iPhone'a 13 Pro do prowadzenia szybkich pomiarów laserowych w cyklu głębienia szybu górniczego. Na tle technologii prowadzenia prac w głębionym szybie zostanie również omówione wykorzystanie modeli przestrzennych do poprawy jakości prowadzonych kontroli prac.

4. Wyniki badań

W celu zbadania możliwości zastosowania skanera LiDAR zainstalowanego w iPhone 13 Pro do kontroli procesu głębienia szybu przeprowadzono pomiary terenowe oraz kontrolę dokładności pomiarów.

4.1. Pomiary terenowe

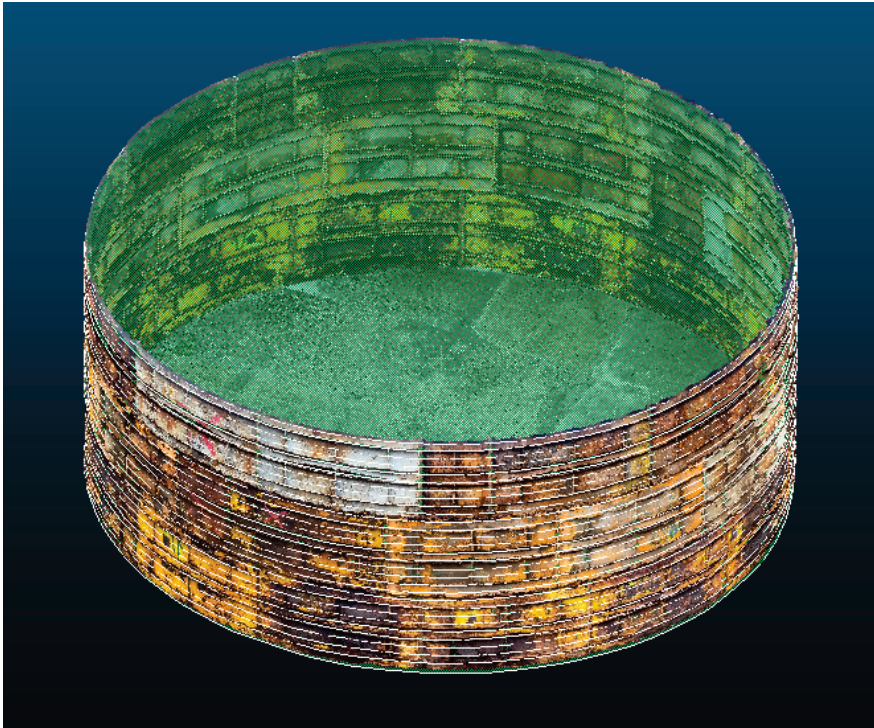
Jak zostało wspomniane wcześniej, nowe produkty firmy Apple, takie jak iPhone'y i iPady, są wyposażone w skanery LiDAR. Chociaż dokładność takiego czujnika jest znacznie niższa w porównaniu z profesjonalnym naziemnym skanerem laserowym, to do szybkich i wstępnych inspekcji taka dokładność powinna być wystarczająca. Poniżej, na rys. 4 został przedstawiony skan 3D szalunku przekładanego wykonanego z użyciem iPhone'a 13 Pro oraz oprogramowania 'PolyCam'. Warto zauważyć, że rysunek taki został uchwycony z internetowej aplikacji, do której dostęp może mieć każda osoba kierownictwa i dozoru ruchu. Szczególnie interesująca jest możliwość zmierzenia dystansu pomiędzy zaznaczonymi punktami.



Rys. 4. Widok izometryczny skanu szalunku przekładanego, wykonanego z użyciem iPhone'a 13 Pro

Poza prostym pomiarem odległości, model przestrzenny umożliwia pomiar objętości zeskanowanego obiektu. Może to zostać osiągnięte z użyciem darmowego oprogramowania „CLOUDCOMPARE”. Model przestrzenny w postaci chmury punktów jest dzielony przez wpasowane, równoległe płaszczyzny na pasy o zadanej grubości, np. 1 mm. Tak gęsty podział zapewnia dobre dopasowanie wyznaczonej wartości do rzeczywistości. Następnie, dla każdego pasa obliczana jest powierzchnia i dalej objętość. Opisywana procedura jest szybka i na tyle prosta, że każdy sztygar jest w stanie wykonywać takie pomiary. Na rys. 5 został przedstawiony proces obliczania objętości metodą opisaną powyżej. Dodatkowo,

metoda ta może zostać zautomatyzowana w znacznym stopniu dzięki zastosowaniu języka programowania „Python”. Zważając na to, jak intuicyjne jest prowadzenie pomiarów oraz jak wiele zastosowań znalazło takie rozwiązanie w innych branżach, ta metoda z powodzeniem mogłaby zostać wdrożona w procesie głębieńia szybu górniczego.

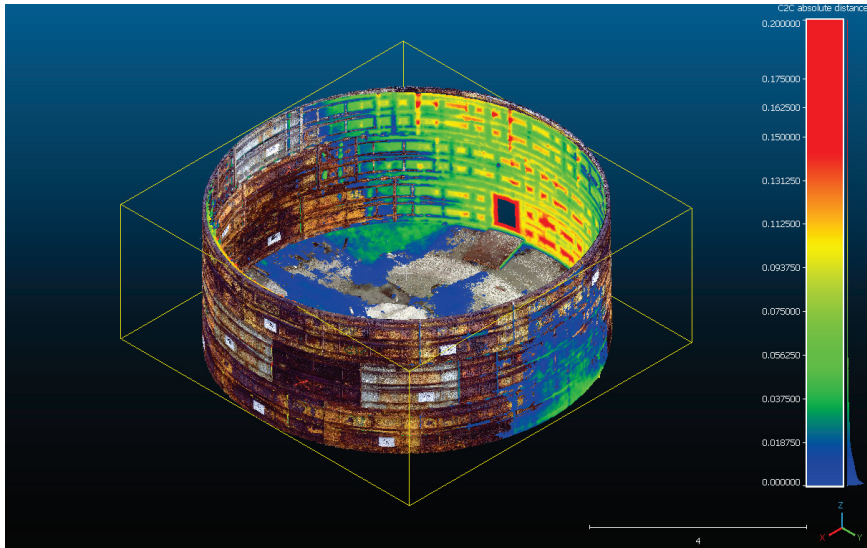


Rys. 5. Skan 3D szalunku przekładanego podzielony na poziome pasy o grubości 10 cm (taka wartość została dobrana w celu lepszej wizualizacji)

Użycie techniki szacowania objętości koszulki betonowej przedstawionej powyżej może mieć korzystny wpływ na dokładność pomiarów wymaganej objętości betonu. Aktualnie objętość betonu jest liczona na podstawie 24 pomiarów odległości ociosu od mechanicznego pionu, na każdym z ośmiu kierunków są wykonywane trzy pomiary na całej wysokości. Dokładność takiej metody zależy w bardzo dużej mierze od tego, kto te pomiary przeprowadza. Pomiary wykonywane aktualnie stosowaną metodą trwają ok. 15 min, co jest czasem porównywalnym z czasem niezbędnym na zeskanowanie szalunku przekładanego. Biorąc pod uwagę, że faktyczny ocios skalny będzie bardziej skomplikowany, skan laserowy z użyciem iPhone'a 13 Pro powinien zająć nie więcej niż 20 min. Pomimo że czas skanu będzie dłuższy niż klasyczny pomiar, to dokładność oraz niezależność opisywanej metody będzie nieporównywalna.

4.2. Kontrola dokładności pomiarów

W celu kontroli danych zebranych przy użyciu iPhone'a 13 Pro, szalunek przekładany zeskanowany został profesjonalnym skanerem FARO FOCUS 30. Jak przedstawiono na rys. 6, większość punktów znajduje się w zakresie od 0 do 10 cm odległości pomiędzy chmurami punktów. Takie wyniki znajdują potwierdzenie w publikacji Leautzenberga [5].



Rys. 6. Dystanse pomiędzy chmurami punktów obliczone z użyciem funkcji „C2C distance” w aplikacji „CLOUDCOMPARE”

Również porównano objętości chmur punktów obliczone taką samą metodą z użyciem oprogramowania „CLOUDCOMPARE”. Różnice zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1

Różnice w objętości pomiędzy skanami wykonanymi skanerem FARO i iPhone'em 13 Pro

	iPhone	FARO	Różnica	Różnica względna
Objętość [m ³]	124,9289	127,7408	2,811945	2,20%

5. Omówienie wyników badań

Pomimo relatywnie niskiej dokładności skanera zainstalowanego w iPhone 13 Pro w porównaniu z profesjonalnym skanerem FARO, dokładność iPhone'a może się okazać

wystarczająca do poglądowych skanów oraz szacunkowych obliczeń. Z drugą klasą dokładności w porównaniu z profesjonalnym skanerem, iPhone może zostać pomyślnie wykorzystany do szacowania objętości betonu wymaganej do wykonania obudowy betonowej. Ważnym aspektem jest również czas pomiaru i opracowania danych, który jest porównywalny do aktualnie stosowanych metod.

6. Wnioski

Głębianie szybu jest wysoce złożonym procesem, w którym dokładność i wydajność przeliczana jest bezpośrednio na czas i pieniądze. W każdym punkcie cyklu, w którym jest miejsce na poprawę bez konieczności całkowitego zmieniania technologii pracy, próby optymalizacji zawsze powinny być podejmowane.

Modele przestrzenne są szeroko stosowane w innych gałęziach przemysłu i wdrożenie ich do cyklu głębiania szybu górniczego może przynieść wiele korzyści. Z odpowiednio wypracowaną rutyną pomiarową oraz wyszkoloną załogą skanowanie 3D z użyciem niskobudżetowych urządzeń może znaleźć zastosowanie w: przekazywaniu zmian, wstępnej inspekcji siatki kotwienia, szacowania niezbędnej objętości betonu, profilowaniu geologicznym, dziennym monitorowaniu postępu robót.

Przeprowadzone badania pokazały, że do szybkiego skanowania może zostać zastosowany iPhone 13 Pro i chociaż zeskanowanie ociosu skalnego będzie stanowiło znacznie większe wyzwanie niż skanowanie szalunku przekładanego, to dzięki intuicyjnemu oprogramowaniu przeprowadzenie takich pomiarów będzie możliwe dla każdej, wcześniej przeszkolonej, osoby dozoru.

Co więcej, dzięki niskiej cenie i dużej wytrzymałości, w porównaniu z naziemnymi skanerami laserowymi, zgodnie z normą PN-EN 60529:2003 skaner FARO FOCUS 30 uzyskał klasę ochrony IP64, FARO FREESTYLE 2 – IP52, LEICA BLK360 – IP54, podczas gdy iPhone 13 Pro charakteryzują się odpornością zgodną z IP68. Urządzenia iPhone czy iPad mogą znaleźć zastosowanie w warunkach kopalnianych, szczególnie biorąc pod uwagę agresywną atmosferę, wysokie zapylenie i temperaturę. Ponadto, nierówności występujące na drogach kopalnianych mogą dodatkowo przyczynić się do zniszczenia sprzętu pomiarowego.

7. Literatura

1. Berg B.-I., Kober C., and Schwenzer-Zimmerer K.: ‘Laser Scanning in Maxillofacial Surgery’, in *Lasers in Oral and Maxillofacial Surgery*, Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 195–207. DOI: 10.1007/978-3-030-29604-9_15.

2. Kumar Singh S., Pratap Banerjee B., and Raval S.: 'A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining', *Int J Min Sci Technol*, Dec. 2022, DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.022.
3. Liang X. *et al.*: 'Terrestrial laser scanning in forest inventories', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 115, pp. 63–77, May 2016, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006.
4. Lipecki T. and Thi Thu Huong K.: 'The Development of Terrestrial Laser Scanning Technology And Its Applications in Mine Shafts in Poland', *Inżynieria Mineralna*, vol. 1, no. 2, Oct. 2020, DOI: 10.29227/IM-2020-02-36.
5. Luetzenburg G., Kroon A., and Bjørk A. A.: 'Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences', *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, p. 22221, Nov. 2021, DOI: 10.1038/s41598-021-01763-9.
6. Matwij W., Gruszczński W., Puniach E., and Ćwiąkała P.: 'Determination of underground mining-induced displacement field using multi-temporal TLS point cloud registration', *Measurement*, vol. 180, p. 109482, Aug. 2021, DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109482.
7. Mikita T., Krausková D., Hrůza P., Cibulka M., and Patočka Z.: 'Forest Road Wearing Course Damage Assessment Possibilities with Different Types of Laser Scanning Methods including New iPhone LiDAR Scanning Apps', *Forests*, vol. 13, no. 11, p. 1763, Oct. 2022, DOI: 10.3390/f13111763.
8. Monsalve J. J., Baggett J., Bishop R., and Ripepi N.: 'Application of laser scanning for rock mass characterization and discrete fracture network generation in an underground limestone mine', *Int J Min Sci Technol*, vol. 29, no. 1, pp. 131–137, Jan. 2019, DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.009.
9. Ren Y., Dai Z., Lu P., Ai C., Huang Y., and Tolliver D.: 'Rail gage-based risk detection Using iPhone 12 pro', *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*, p. 095440972211164, Aug. 2022, DOI: 10.1177/09544097221116431.
10. Singh S. K., Raval S., and Banerjee B.: 'A robust approach to identify roof bolts in 3D point cloud data captured from a mobile laser scanner', *Int J Min Sci Technol*, vol. 31, no. 2, pp. 303–312, Mar. 2021, DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.01.001.
11. Tatsumi S., Yamaguchi K., and Furuya N.: 'ForestScanner : A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR -equipped iPhone and iPad', *Methods Ecol Evol*, Jun. 2022, DOI: 10.1111/2041-210X.13900.
12. Zaczek-Peplinska J., Pasik M., Adamek A., Adamek A., Kołakowska M., and Łapiński S.: 'Monitoring technical conditions of engineering structures using the terrestrial laser scanning technology', *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, vol. 95, no. 1, pp. 1-10, Jan. 2014, DOI: 10.2478/rgg-2013-0008.
13. Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych.