

POTENCJAŁ NAZIEMNEGO SKANINGU LASEROWEGO 3D W INWENTARYZACJI I MONITORINGU TUNELI KOLEJOWYCH

Mirosława Bazarnik

dr inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Zakład Współdziałania Budowli z Podłożem, tel. (12) 6283038, e-mail: mbazarnik@pk.edu.pl

Streszczenie. *Systemy naziemnych skanerów laserowych 3D w ostatnich latach zyskały uznanie, jako precyzyjne i wiarygodne narzędzia stosowane w celu zapewnienia jakości geometrycznego odwzorowania obiektów inżynierskich. W artykule przedstawiono możliwości zastosowania naziemnego skaningu laserowego 3D w odniesieniu do inwentaryzacji i monitorowania tuneli kolejowych. Omówiono zalety i wady metody.*

Słowa kluczowe: *naziemny skaner laserowy 3D, tunel, monitoring*

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój technologii w zakresie tworzenia efektywnych systemów pozyskiwania danych o obiektach budowlanych. Jednym z najnowocześniejszych rozwiązań jest system naziemnego skaningu laserowego 3D. Jest to technika obrazowania, która zbiera precyzyjny, trójwymiarowy obraz o wysokiej rozdzielczości. Instrumenty skanujące, pozwalają uzyskać gęste modele punktowe tzw. chmury punktów (z ang. point clouds) pokrywające powierzchnię badanego obiektu. Uzyskana z pomiarów chmura punktów poddawana jest dalszej obróbce w celu określenia geometrii obiektów oraz ich deformacji w czasie. Skanowanie 3D pozwala na szybkie i dokładne przeniesienie do komputera trójwymiarowej geometrii obiektów rzeczywistych. Wynikiem jest kompletny cyfrowy model, który może być edytowany i przetwarzany przez odpowiednie programy komputerowe. Zaletą techniki skanowania laserowego jest możliwość wykonania pomiarów nawet najbardziej złożonych geometrycznie i geomorfologicznie obiektów takich jak: tunele, mosty, budynki, urządzenia przemysłowe, sieci uzbrojenia terenu, skarpy, nasypy czy skrajnie budowli.

Techniki trójwymiarowego skanowania laserowego, obok tradycyjnych metod geodezyjnych, stosowane są między innymi do inwentaryzacji obiektów budowlanych, a w tym również do obiektów infrastruktury komunikacyjnej, zarówno drogowej jak i kolejowej. Instytucje zarządzające ciągami komunikacyjnymi zo-

bligowane są do okresowej kontroli stanu obiektów położonych na ich obszarze. Skaner laserowy jest narzędziem pomiarowym, które w krótkim czasie bez istotnego wpływu na natężenie ruchu zbiera dane z obiektu. Jest to niezwykle ważne dla bezpieczeństwa ruchu. Inwentaryzacje metodą skanowania laserowego można prowadzić w odniesieniu do elementów infrastruktury dróg szynowych takich jak nawierzchnia, urządzenia techniczno–eksploatacyjne (rozjazdy, skrzyżowania, przejazdy itp.), podtorze jak i również do obiektów inżynierskich [17]. W niniejszym artykule omówiono możliwości wykorzystania naziemnego skaningu laserowego w odniesieniu do pomiarów cech geometrycznych i deformacji tuneli, jako obiektów inżynierskich.

2. Skanery laserowe

Skanery laserowe można zaliczyć do grupy aktywnych systemów teledetekcyjnych, działających na zasadzie pomiaru odległości celu od urządzenia. Wyposażone są w specjalny układ optyczny, który zadaną częstotliwością wysyła wiązki świetlne o określonej długości fali i konkretnym kierunku. Każde odbicie od przeszkody jest rejestrowane jako położenie punktu w przestrzeni. Każdemu punktowi przypisane zostają współrzędne X, Y, Z – początkowo w układzie lokalnym skanera, a następnie w docelowym układzie współrzędnych geodezyjnych prostokątnych. Urządzenia wyposażone w sensor optyczny, zazwyczaj w postaci wbudowanego lub zewnętrznego aparatu fotograficznego, rejestrują także składowe RGB każdego punktu. W wyniku pomiaru otrzymujemy zbiór punktów tzw. chmurę punktów (z ang. point clouds), które mają współrzędne geodezyjne oraz parametry intensywności odbicia.

Zastosowana technologia pomiaru odległości determinuje podział urządzeń na: skanery pulsacyjne (TOF - time-of-flight) oraz skanery fali ciągłej (CW - continuous wave ranging) tzw. fazowe. W skanerach pulsacyjnych odległość jest funkcją czasu, w jakim wiązka przebywa drogę do obiektu i z powrotem [36]. W skanerach fazowych sygnał lasera jest modulowany odpowiednią funkcją sinusoidalną. Podsumowując: skanery impulsowe są urządzeniami wolniejszymi (z rejestracją do ok. 200 tys. pkt./s), o mniejszej dokładności, ale większym zasięgu (od ok. 100 metrów do kilku kilometrów), zaś fazowe – są szybsze (rejestracja nawet do 1 mln pkt./s), dokładniejsze, ale o zdecydowanie krótszym zasięgu (od kilku do ok. 100 metrów). Zaawansowane technologicznie skanery impulsowe rejestrują także dla każdego punktu chmury intensywności odbitego sygnału, czyli wszystkie składowe odbić jednej wiązki, a nie tylko pierwsze i ostatnie echo. W przypadku naziemnych skanerów laserowych kolejne echa są interpretowane poprzez metodę detekcji tzw. pełnej fali (full waveform detection), która polega na cyfrowym próbkowaniu całej krzywej fali powracającej do detektora i niosącej ze sobą informacje o odbiciu od wielu obiektów (co ma miejsce np. podczas wędrówki plamki lasera przez warstwy roślinności). Ta cecha naziemnych urządzeń impulsowych daje

zupełnie nowe możliwości prowadzenia badań w miejscach trudno dostępnych, w których często jednym z elementów składowych jest pokrywa roślinna. Oba typy przyrządów na ogół są odpowiednie do prowadzenia prac inwentaryzacyjnych i mogą stanowić znakomite uzupełnienie tradycyjnych metod geodezyjnych.

Zastosowanie specjalistycznych narzędzi graficznych, opartych na zaawansowanych algorytmach obliczeniowych, pozwala na zamianę modeli punktowych w postać geometryczną, która w pełni oddaje charakter i formę inwentaryzowanych budowli. W efekcie pomiaru skanerem laserowym wyznaczane są współrzędne wielu punktów, które definiują geometrię inwentaryzowanej powierzchni w oparciu o mierzone kąty: poziomy i pionowy (względem kierunków referencyjnych) oraz odległości. W ten sposób pozyskiwana jest duża ilość danych, które poddawane są procesom filtracji i orientacji w przestrzeni. Dane mogą być archiwizowane i przetwarzane w późniejszym okresie bez konieczności powtarzania pomiarów. Sposób odbicia promienia lasera od obiektów terenowych zależy od rodzaju powierzchni, a także struktury. Każda powierzchnia ma inną zdolność odbicia impulsu, co jest uzależnione od rodzaju materiału koloru czy chropowatości. Stosując dodatkowo kamerę zintegrowaną ze skanerem (lub odpowiednio wykonane zdjęcia z aparatu fotograficznego) istnieje możliwość rejestracji wartości RGB dla każdego pomierzonego punktu, co umożliwi uzyskanie kolorowego skanu, który w takiej postaci jeszcze wierniej oddaje rzeczywistość. Jak już wspomniano, dokładność otrzymanej z pomiarów chmury punktów zależy między innymi od tego, z jaką intensywnością odbija się i rozprasza wiązka lasera. Moc powracającego sygnału wyznacza stopień ograniczeń skanera laserowego oraz ma znaczący wpływ na efektywność pomiarów. Intensywność odbitego sygnału laserowego przede wszystkim zależy od: odległości obiektu od skanera, kąta padania wiązki oraz od rodzaju powierzchni odbijającej. Pierwszy z tych czynników stanowi naturalną zależność, wynikającą z propagacji fali w powietrzu. Drugi wynika z właściwości wiązki laserowej, której średnica wraz z odległością ulega zwiększeniu. W związku z tym wiązka laserowa przy padaniu na obiekt pod pewnym kątem rozprasza się i nie oddaje prawidłowo odległości do pojedynczego, nieskończonego małego punktu. Trzecim czynnikiem jest rodzaj powierzchni, na jaką pada wiązka laserowa. Wpływ tych czynników był przedmiotem wielu badań [18, 22, 34]. W naziemnym skaningu laserowym proces pozyskiwania docelowych informacji polega głównie na manualnym wyznaczaniu ich na chmurze punktów lub automatycznym określeniu z modelu 3D, wygenerowanym z chmury. Przy generowaniu modelu 3D ustala się szereg parametrów wpływających na stopień informacji punktowej. Uzyskany model 3D pozwala na automatyczne wyznaczanie wektorizowanych, geometrycznych informacji o obiekcie. Obecnie na rynku istnieje bardzo liczna grupa narzędzi umożliwiająca pełną obróbkę i analizę otrzymanych danych. Zagadnieniem bardziej skomplikowanym jest możliwość uzyskiwania, w sposób automatyczny odpowiedniej klasy informacji, bezpośrednio z chmury punktów. Istnieje wiele algorytmów, które w mniej lub bardziej efektywny sposób, potrafią wyodrębnić elementy liniowe z chmury punktów.

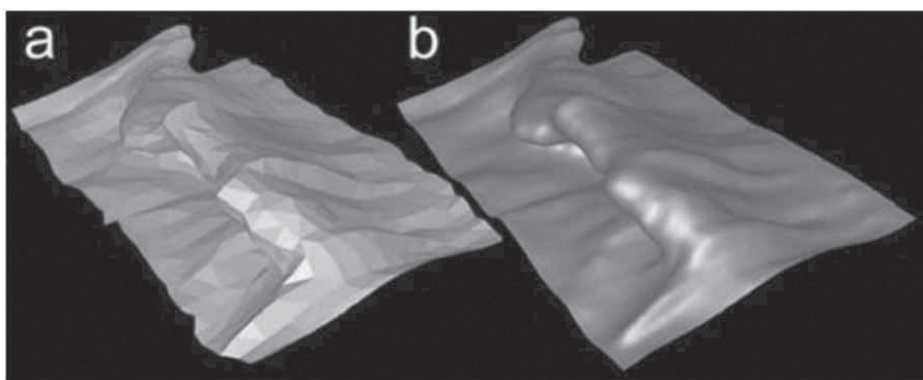
3. Metody rekonstrukcji powierzchni

W celu przeprowadzenia analizy postaci i kształtu skanowanych powierzchni konieczne jest przekonwertowanie nieregularnie rozmieszczonych danych punktowych w informacje o trójwymiarowej powierzchni. Służy do tego specjalne oprogramowanie do wizualizacji z wykorzystaniem zaawansowanych technik i skomplikowanych algorytmów w celu rekonstrukcji powierzchni 3D. W ostatnich latach zostało opracowanych kilkanaście algorytmów do automatycznej filtracji danych laserowych. Filtracja danych laserowych to procedura eliminacji punktów odpowiadających elementom pokrycia terenu z pomierzonej chmury punktów. Pozwala ona na wyznaczenie powierzchni topograficznej. Do najważniejszych algorytmów do automatycznej filtracji danych laserowych [23] należą:

- algorytmy wykorzystujące metody analizy obrazu cyfrowego: filtry morfologiczne, metody gradientowe, segmentacja, modelowanie aktywnych powierzchni,
- algorytmy wykorzystujące metody interpolacji: predykcja liniowa, interpolacja krzywymi sklejanymi.

W ostatnim czasie duży nacisk położony jest na automatyzację procesu filtracji.

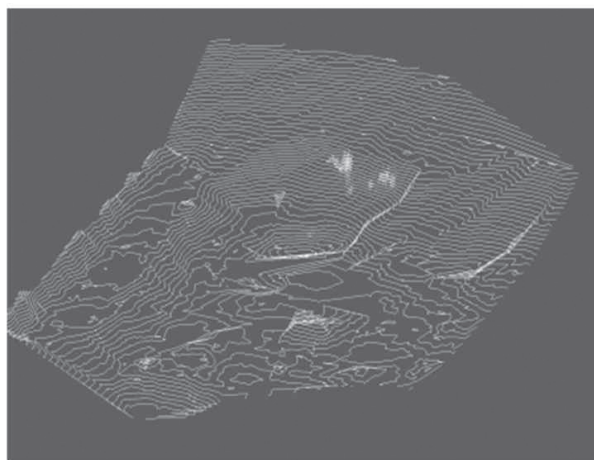
Celem rekonstrukcji powierzchni obiektu (z uzyskanej chmury punktów) jest odtworzenie w dużej skali, w oparciu o bardzo gęste dane, stosunkowo niewielkiej powierzchni 3D. Algorytmy służące do rekonstrukcji powierzchni mogą być w znacznym uproszczeniu podzielone na poligonalne oraz parametryczne. Techniki parametryczne dostarczają bardziej naturalnego wyglądu powierzchni i dokładniej reprezentują te powierzchnię. Przydatne są szczególnie do rekonstrukcji obszarów, dla których brakuje danych. Wymagają jednak znacznie większej mocy obliczeniowej i czasu, w odniesieniu do metod poligonalnych. Przykład obrazowania powierzchni terenu po obróbce cyfrowej metodą poligonalną i metodą parametryczną przedstawiono poniżej (rys. 1).



Rys. 1. Porównanie obrazu 3D kształtu powierzchni terenu po obróbce cyfrowej metodą poligonalną (a) i metodą parametryczną (b) [4]

4. Wizualizacja i analiza

Odtworzona powierzchnia na podstawie chmury punktów, może być następnie prezentowana przy pomocy różnych technik wizualizacji 3D. Głównym celem wizualizacji jest umożliwienie użytkownikowi zobaczenia obiektów z różnych ujęć, przy zadanych kątach i kierunkach. Z rekonstruowanych powierzchni 3D możliwe jest również generowanie profili 2D lub linii konturowych obiektów (rys. 2). Otrzymane modele mogą następnie być przetwarzane i wykorzystywane w systemach GIS i CAD do dalszej integracji danych.



Rys. 2. Kontury żwirowni, wyznaczone na podstawie chmury punktów ze skanowania laserowego [29]

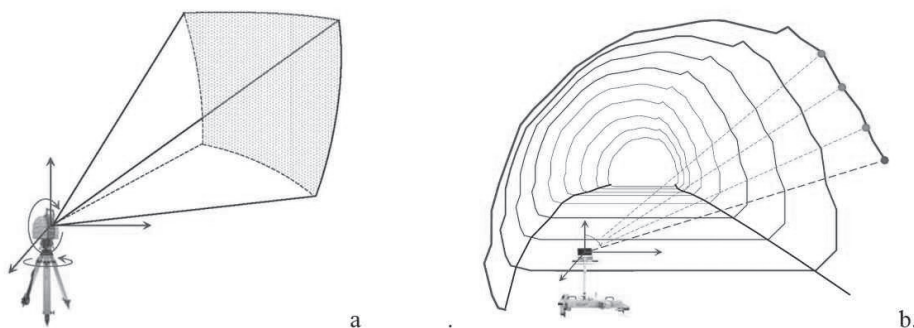
5. Aplikacje i potencjał Naziemnego Skaningu Laserowego dla obiektów tunelowych

Podstawową zaletą skaningu laserowego jest szerokie spektrum możliwości zastosowań: od wizualizacji obiektów [3, 10, 29] przez inwentaryzację architektoniczną [1, 13, 19,] po szczegółowe pomiary zmian konstrukcyjnych, objętościowych [26] i deformacyjnych [12, 25, 30].

Technologia naziemnego skaningu laserowego obok tradycyjnych metod inżynierii geodezyjnej, jest bardzo przydatnym narzędziem do mapowania i kontroli jakości prac w obiektach liniowych takich jak tunele, zapewniając ich geometryczną precyzję. Skaner laserowy wraz z oprogramowaniem stanowią doskonałe narzędzie wizualizacyjne do prezentacji stanu istniejącej infrastruktury. Oferują możliwość wyświetlenia kolorowego cyfrowego modelu tunelu z jednoczesnym wyświetleniem przekroji i wymiarów w różnych miejscach, w tym wyznaczenia statystycznych wartości objętości.

W zależności od potrzeb, naziemny skaningu laserowy może być obsługiwany z tzw. położenia statycznego (montowany na statywie) lub kinematycznego z platformy (zamocowany na ruchomym pojeździe) [2]. W pierwszym przypadku,

naziemny skaner laserowy wykorzystywany jest do tworzenia szczegółowej mapy ukształtowania terenu wokół miejsca, w którym jest ustawiony skaner, natomiast w trybie kinematycznym, ułatwia prowadzenie pomiarów geodezyjnych i map inwentaryzacyjnych korytarza wokół poruszającego się pojazdu.



Rys. 3. Schemat pracy naziemnego lasera skaningowego z położenia spoczynkowego (a) i kinematycznego (b) [2]

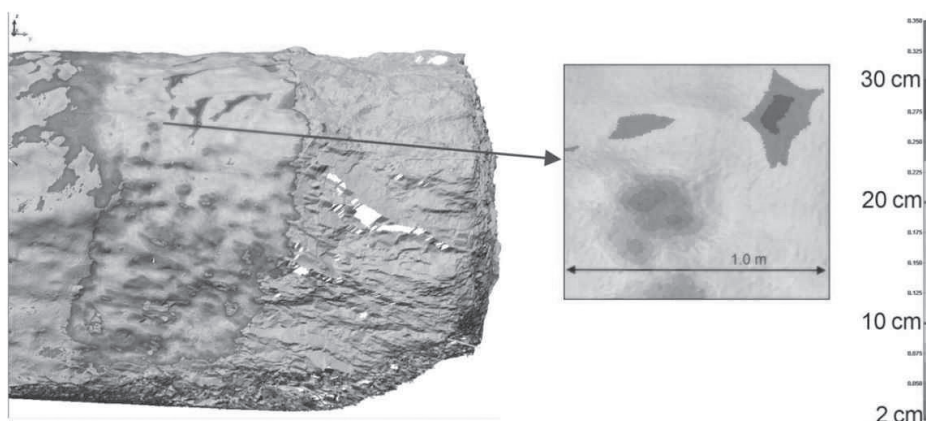
Szeroko rozumiane pomiary geodezyjne odnoszą się do całego tzw. cyklu życia tunelu począwszy od badań gruntu pod budowę tunelu, przez tunelowanie i towarzyszące prace budowlane, po okres eksploatacji całej konstrukcji inżynierskiej. Prace te mogą być sklasyfikowane w czterech kategoriach [2]: (a) zakładania poziomej i pionowej sieci punktów kontrolnych osnowy geodezyjnej, (b) wykonywania prac mających na celu wyrównanie osi wykopu, (c) monitorowania geodezyjnego przemieszczeń gruntu i konwergencji tunelu, (d) szczegółowego odwzorowania korytarza tunelu dla dokumentowania geometrii, cech geologicznych i geotechnicznych gruntu oraz inwentaryzacji poszczególnych elementów.

Na etapie wykopu, do szczególnych zadań należy kontrola profilu wykopu oraz wizualizacja w poszczególnych fazach wykonywanych prac tunelowych. Takie wieloetapowe skanowanie daje możliwość uzyskania modelu cyfrowego czoła przodka tunelu i pozwala zdalnie kierować pracami tunelowymi. Ponadto mapowanie danych w interaktywnym oprogramowaniu cyfrowym oferuje możliwość wyświetlenia kolorowego modelu tunelu z jednoczesnym wyświetleniem przekrojów i wymiarów w różnych miejscach, w tym wyznaczenie statystycznych wartości objętości urobku. Pozwala na tworzenie trójwymiarowych modeli czoła i ścian tunelu odzwierciedlających stan rzeczywisty. W przypadku skanowania surowego wykopu mogą być uwidocznione cechy geologiczne jak np. obecność spękań i nieciągłości w górotworze. Modele powierzchni terenu oraz czoła przodka tunelu mogą zatem stanowić element uzupełniający dokumentację geologiczną/ geotechniczną i służyć jako punkt odniesienia dla kontroli poszczególnych elementów składowych. W tej kategorii operacji pomiarowych, skaner laserowy wykorzystany jest głównie do kontroli profilu oraz obliczeń objętości urobku skalnego. Dzięki pomiarowi powierzchni czoła przodka tunelu można kontrolować przebieg prac (np. pomiar wspólnych kierunków przy drążeniu tunelu).

Mapowanie cech geologicznych takich jak: struktura, tekstura, charakterystyka nieciągłości strukturalnych (ich lokalizacja, orientacja) wymagają wykonania gęstego mapowania. W związku z tym, w pracach tych najczęściej stosuje się statyczne skanery laserowe z systemem fazowym, które pozwalają na pozyskanie dużej ilości danych w bardzo krótkim czasie.

Uchwycone deformacje powierzchni odzwierciedlają ewolucję zachowań górotworu, w którym znajduje się linia wykopu. Tradycyjne geodezyjne i geotechniczne metody analizy deformacji oparte są na pomiarze przemieszczenia zastabilizowanych punktów. Metody te, pozwalają na wykrycie nawet bardzo drobnych (na poziomie milimetra) przemieszczeń. Niemniej jednak pomiar dokonywany jest dla bardzo ograniczonej liczby punktów. W przypadku obiektów inżynierskich istnieje możliwość wykrycia deformacji w oparciu o położenie widocznych punktów odniesienia, które mogą być odtworzone na podstawie zarejestrowanej wcześniej chmury punktów. W tym celu, mogą być wykorzystane, elementy konstrukcyjne, zazwyczaj dobrze widoczne w skanach [10]. Jeżeli pomiary chmury punktów realizowane w różnym czasie zostaną prawidłowo wykonane i zapisane w układzie współrzędnych geodezyjnych, pozwoli to na ocenę odkształcenia we wszystkich trzech kierunkach X,Y,Z. Ponadto, w niektórych przypadkach przez wykonanie cykli pomiarowych chmury punktów jest możliwe zidentyfikowanie przemieszczeń i parametryzacji ruchu w czasie rzeczywistym [26]. Wreszcie, odkształcenia mogą być rozpatrywane w kierunku prostopadłym do powierzchni obiektu, tworząc dla każdego pomiaru wirtualną siatkę oraz profile na powierzchni obiektów. W tym przypadku prowadzone działania powinny zapewnić, porównywalność elementów siatki i profili z pomiarów wykonywanych w różnym czasie [2].

W końcowej fazie budowy, modele 3D otrzymane ze skanowania laserowego mogą stanowić dokładną dokumentację powierzchni tunelu [24, 11, 14]. Mogą posłużyć do inwentaryzacji poszczególnych składowych obiektu, a w dalszym etapie do kontroli korpusu tunelu oraz dokumentacji jego wyposażenia, zapewniając odpowiedni zbiór danych wyjściowych do planowania prac remontowych [28]. Do inwentaryzacji zazwyczaj stosuje się kinematyczne skanery laserowe, podczas gdy kontrola profilu czoła i ścian wykopu jest prowadzona z wykorzystaniem statycznych systemów skanowania laserowego. Możliwość korelowania ze sobą skanów z różnych etapów prowadzonych prac, pozwala na wczesne wykrycie błędów i ewentualnych wad konstrukcyjnych. Z obszarów objętych profilowaniem przy użyciu skanera laserowego 3D możemy uzyskać informację na temat poszczególnych elementów składowych konstrukcji budowlanej takich jak np.: grubość i objętość materiału poszczególnych warstw gruntu, dokładność wykonywania obudowy tunelu z segmentów żelbetowych, dokładność wykonania cementowych elementów uszczelniających, grubość zastosowanego betonu natryskowego (rys. 4.), grubość wewnętrznej okładziny itd. Elementy te mogą zostać szybko i łatwo obliczone.



Rys. 4. Przykład wizualizacji różnic grubości betonu natryskowego [9]

Zaawansowane algorytmy pozwalają na kompleksową ocenę cech powierzchniowych. Dzięki temu mogą zostać uwidocznione wszelkie odchylenia od normy. Wykonując profilowania 2D można sprawdzić geometrię powykonawczą tunelu i wskazać miejsca słabsze z ukrytymi wadami strukturalnymi, które wpływają na trwałość konstrukcji (rys. 5).



Rys. 5. Generowanie przekroju poprzecznego na powierzchni wykopu na podstawie chmury punktów [2]

Główną zaletą technologii naziemnego skaningu laserowego, w odniesieniu do tradycyjnych metod geodezyjnych, jest ogromna ilość danych oraz potencjał wynikający z możliwości modelowania i wizualizacji 3D powierzchni z otrzymanej chmury punktów. Innym atutem metody skanowania laserowego jest uzyskanie informacji na temat intensywności odbicia. Jak wynika z literatury [5, 8, 15, 33] wartość ta niesie istotne informacje dla interpretacji warunków geologicznych/geotechnicznych. Kolejną przewagą naziemnego skaningu laserowego w stosunku do tradycyjnych metod geodezyjnych jest możliwość wykrycia odkształceń strukturalnych na wczesnym etapie [12]. Należy jednak pamiętać o zapewnieniu odpowiedniej jakości i dokładności skanowania powierzchni obiektu. Ponadto przy określaniu lokalizacji miejsc pomiarowych, należy wziąć również pod uwagę efekt cieniowania, w celu uniknięcia niejasności na kolejnych etapach prac. Zwłaszcza w przypadku obiektów wyraźnie wydłużonych, takich jak tunele, kąt padania (kąt pomiędzy wiązką lasera a powierzchnią normalną) szybko zwiększa się wraz ze wzrostem odległości od skanera [2]. Dla stałego zakresu wartości i właściwości

powierzchniowych zwiększenie kąta padania powoduje, że impuls powracający od powierzchni obiektu ulega poszerzeniu, a co za tym idzie zmniejszeniu ulega intensywność, a wzrasta poziom zakłóceń. Co więcej dla stałych wartości kąta padania i powierzchni przedmiotu zwiększenie zasięgu również spowoduje wzrost zakłóceń (echa) punktów skanowania. Stwierdzono, że duże kąty padania (czyli powyżej 60 stopni) i długie zasięgi skanowania (w zależności od specyfikacji skanera) wpływają niekorzystnie na jakość uzyskanej chmury punktów [30].

Skanowanie laserowe 3D, ze względu na obszar zbierania danych, stanowi rozwiązanie alternatywne dla metod tradycyjnych.

Potencjał naziemnego skaningu laserowego dla monitorowania deformacji w tunelowaniu był przedmiotem wielu badań [6,7,16,21,30,10,32]. Wykazano, że pomiary naziemnym skanerem laserowym pomagają w zrozumieniu zachowania masy gruntu, ze względu na możliwość mapowania przemieszczeń w odniesieniu do większej powierzchni, a nie ograniczonej ilości punktów (jak w przypadku klasycznych metod geodezyjnych). Jednakże przydatność i skuteczność skaningu w znacznym stopniu uzależniona jest od gęstości i jakości skanowania, stosowanej techniki przetwarzania danych oraz indywidualnych cech górotworu, które definiują zachodzące zjawiska fizyczne. Nowoczesne systemy skanowania laserowego są wystarczająco zaawansowane technologicznie, aby poradzić sobie z trudnymi warunkami pracy (takimi jak kurz i wilgoć), które znajdujemy w środowisku podziemnym. Wypada jednak podkreślić, że mimo wielu zalet stosowania metody skanowania laserowego w tunelach; należy liczyć się z pewnymi trudnościami, jak np. ograniczeniami wynikającymi z interpretacji chmury punktów. Należy wziąć także pod uwagę ograniczenia związane z trudnościami w pełnym odwzorowaniu powierzchni ze względu na obecność tzw. cieni odnoszących się do względnej geometrii pomiędzy instrumentem a obszarem skanowanej sekcji. Ponadto, obecność w polu widzenia obiektów odbijających światło (np. wody), wpływa na parametry intensywności odbicia.

6. Podsumowanie

Skanowanie 3D pozwala na szybkie i sprawne wykonanie pomiarów, dostarczających szerokiej gamy informacji, które po odpowiednim przetworzeniu są przydatne w kontroli i analizie zachodzących zmian. Mapowanie danych ma miejsce w interaktywnym oprogramowaniu cyfrowym. Oprogramowanie oferuje możliwość wyświetlenia kolorowego cyfrowego modelu tunelu z jednoczesnym wyświetleniem przekroji i wymiarów w różnych miejscach w tym wyznaczenie statystycznych wartości objętości. Niemniej jednak, pomimo wielu zalet, naziemny skaningu laserowy nie powinien być traktowany jako jedyna metoda pomiarowa i powinien być uzupełniony o bardziej dokładne pomiary geodezyjne, utrwalone praktyką inżynierską. Niewątpliwą zaletą jest możliwość archiwizowania i przetwarzania danych w późniejszym okresie, bez konieczności powtarzania pomiarów. Umżli-

wia to na dalszym etapie prawidłową interpretację danych o obiekcie oraz zachodzących zmianach i zjawiskach im towarzyszących. Podsumowując, z wysokorozdzielczych danych 2D i 3D można uzyskać informacje dotyczące:

- a) Kontroli okładziny tunelu:
 - a w szczególności detekcja wszelkiego rodzaju spękań w ujęciu ilościowym,
 - detekcja wilgotności w ujęciu ilościowym,
 - niedokładności wykonania łączeń płyt w ocenie ilościowej,
- b) Oceny strukturalnej:
 - 3D modeli konstrukcji,
 - analizy prześwietu,
- c) Wizualizacji tunelu i dokumentacji inwentaryzacyjnej w celu oceny stanu technicznego.

Literatura

- [1] Abmayr T., Härtl F., Reinköster M., Fröhlich C., Terrestrial laser scanning – applications in cultural heritage conservation and civil engineering 2012, <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-W17/> International society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- [2] Barnhart T.B., Crosby B.T., Comparing Two Methods of Surface Change Detection on an Evolving Thermokarst Using High-Temporal-Frequency Terrestrial Laser Scanning, Selawik River, Alaska Remote Sens. 2013, 5, pp. 2813-2837.
- [3] Buchroithner M.F., Gaisecker D.&T., Österreich H., Modeling And Visualization Using Laser Scanner In Documentation Of Cultural Heritage Photogrammetrie • Fernerkundung • Geoinformation 4/2009, S. 329 – 339.
- [4] Cowan E.J. et., Beatson R.K., Fright W.R., McLennan T.J., Mitchell T.J., Rapid geological modeling. Applied Structural Geology for Mineral Exploration and Mining, International Symposium, Kalgoorlie, September 2002.
- [5] Decker, J.B., Dove J.E., Laser Techniques in Devil's Slide Tunnels. In Proceedings of the 42th US Rock Mechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, 29 June–2 July 2008.
- [6] Erol B., Evaluation of high-precision sensors in structural monitoring. Sensors 2010, 10, 10803–10827.
- [7] Erol B.; Erol S.; Çelik R.N., Monitoring and Analysing Structural Movements with Precise Inclination Sensors. In Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles, 131; Sansò, F., Gil, A.J., Eds.; IAG Symposium: Jaén, Spain, 7–19 March 2005.

- [8] Fekete S., Diederichs M., Lato M., Geotechnical applications of lidar scanning in tunneling, Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, May 2009.
- [9] Fekete S.; Diederichs M., Lato M., Geotechnical and operational applications for 3-dimensional laser scanning in drill and blast tunnels. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2010, 25, 614–628.
- [10] Gikas V., Three-Dimensional Laser Scanning for Geometry Documentation and Construction Management of Highway, *Sensors* 2012, 12, 11249-11270.
- [11] Gikas V.; Stratakos J., A novel geodetic engineering method for the accurate and automated extraction of road/railway alignments based on the bearing diagram and fractal behavior. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2012, 13, 115–126.
- [12] Gordon i Lichti, Gordon S. J. and Lichti D.D., Modeling terrestrial laser scanner data for precise structural deformation measurement. *Journal of Surveying Engineering*, 2007, 133:72–80.
- [13] Jones R.R., Kokkalas S., McCaffrey K.J.W., Quantitative analysis and visualization of nonplanar fault surfaces using terrestrial laser scanning (LIDAR)—The Arkitsa fault, central Greece, as a case study *Geosphere*, December 2009, v. 5, p.465-482.
- [14] Lam S.Y.W., Application of terrestrial laser scanning methodology in geometric tolerances analysis of tunnel structures. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2006, 21, 410.
- [15] Lato M., Diederichs M.S., Hutchinson D.J., Bias correction for view-limited Lidar scanning of rock outcrops for structural characterization. *Rock Mech. Rock Eng.* 2010, 43, 615–628.
- [16] Lemy, F.; Yong, S.; Schulz, T. A Case Study Monitoring Tunnel Wall Displacement Using Laser Scanning Technology. In Proceedings of IAEG, Nottingham, UK, 6–10 September 2006.
- [17] Lenda G., Strach M., Zastosowanie skaningu laserowego do inwentaryzacji tunelu kolejowego, *Przegląd Komunikacyjny*, 2011, 9-10, pp. 78-83.
- [18] Lichti D.D., Harvey, The effects of reflecting surfach material properties on time-of-flight laser scanner measurments. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa 2002.
- [19] Markiewicz J., Zawieska D., Kowalczyk M., Zaplata Utilisation Of Laser Scanning For Inventory Of An Architectural Object Using The Example Of Ruins Of The Krakow Bishops' Castle In Ilza, Poland, 14th Sgem GeoConference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, www.sgem.org, SGEM2014 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-12-4 / ISSN 1314-2704, June 19-25, 2014, Vol. 3, 391-396 pp.
- [20] Markiewicz J.S., Zawieska D., Terrestrial scanning or digital images in inventory of monumental objects? - Case study, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sci-*

- ences, Volume XL-5, 2014 ISPRS Technical Commission V Symposium, 23 – 25 June 2014, Riva del Garda, Italy.
- [21] Owerko T.; Strach M., Examining coherence of accuracy tests of total station surveying and geodetic instruments based on comparison of results of complete test procedures according to ISO 17123. *Rep. Geod.* 2009, 4, 291–299.
- [22] Pesci A., Teza G., Effects of surface irregularities on intensity data from laser scanning an experimental approach: *Annals of Geophysics*, Vol. 51, N. 5/6, October/December 2008.
- [23] Piechocka N., Marmol U., Jachimski J., Stereometryczna weryfikacja DTM uzyskanego ze skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 14, Białobrzegi - Warszawa 2004 <http://home.agh.edu.pl/~zfiit/Badania.htm>.
- [24] Pieraccini M., Noferini L., Mecatti D., Atzeni C., Teza G., Galgaro A., and Zaltron N., Integration of radar interferometry and laser scanning for remote monitoring of an urban site built on a sliding slope. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9).
- [25] Pilecka E., Bazarnik M., Pawlak – Burakowska A., Wyniki monitorowania skuteczności zabezpieczenia osuwiska na przykładzie osuwiska w Sadowiu na linii kolejowej nr 8 Warszawa – Kraków. *Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK Oddz. Kraków nr 2 (910)/2013*, p.237-251.
- [26] Rönnholm P., Pöntinen P., Nuikka M., Suominen A., Hyypä H., Kaartinen H., Absetz I., Hirsi H., and Juha Hyypä J., Experiments on deformation measurements of Helsinki Design Week 2005 info pavillon. *IAPRS XXXVI (5)*, Dresden 25-27 September 2006.
- [27] Rüther H., Held Ch., Bhurtha R., Schröder R., Wessels S., Challenges in Heritage Documentation with Terrestrial Laser Scanning http://africageodownloads.info/122_ruther.pdf *European Scientific Journal* August 2013 edition vol.9, No.24 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857-7431.
- [28] Seo D., Lee J.C., Lee Y.D., Lee Y.H., Mun D.Y., Development of Cross Section Management System in Tunnel Using Terrestrial Laser Scanning Technique. In *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(B5), Beijing, China, 3–11 July 2008.
- [29] Slob S., Hack R., 3D Terrestrial Laser Scanning as a New Field Measurement and Monitoring Technique. *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe Lecture Notes in Earth Sciences Volume 104*, 2004, pp 179-189.
- [30] Soudarissanane S., Lindenbergh R., Gorte B., Reducing the error in terrestrial laser scanning by optimizing the measurement set-up. In *Proceedings of International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, July 3–11, 2008; Vol. XXXVII (Part B5), pp. 615–620.

-
- [31] Van Gosliga R., Lindenbergh R., Pfeifer N., Deformation Analysis of a Bored Tunnel by Means of Terrestrial Laser Scanning. In Proceedings of the ASPRS Archives, Dresden, Germany, 25–27 September 2006. *Sensors* 2012, 12 11270.
 - [32] Vežočanik R., Ambrožič T., Sterle O., Bilban G., Pfeifer N., Stopar B., Use of terrestrial laser scanning technology for long term high precision deformation monitoring. *Sensors* 2009, 9, 9873–9895.
 - [33] Yoon J.S., Sagong M., Lee J.S., Lee K., Feature extraction of a concrete tunnel liner from 3D laser scanning data. *NDT E Int.* 2009, 42, 97–105.
 - [34] Zaimovic-Uzunovic N., Lemes S., Influences of surface parameters on laser 3d scanning. 10th International Symposium on Measurement and Quality Control 2010, September 5-9.
 - [35] file:///E:/skanowanie%20tuneli/23_10/Slob117_pictures.pdf
 - [36] <http://www.igipz.pan.pl/zsigik-projekty-tls-wprowadzenie.html>

