

# MOŻLIWOŚCI APLIKACYJNE TECHNIKI SKANOWANIA LASEROWEGO 3D W KONTEKŚCIE MODERNIZACJI LINII KOLEJOWYCH

---

Mirosława Bazarnik

dr inż. Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel.: +48 12 628 2677, e-mail: mbazarnik@pk.edu.pl

---

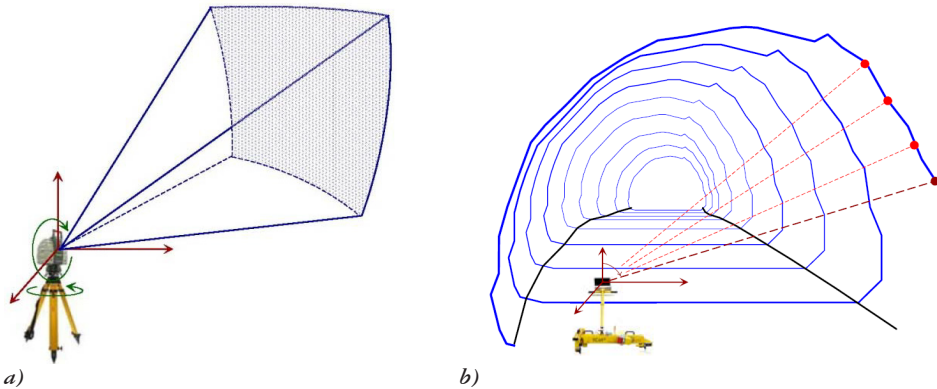
*Streszczenie. Zagadnienia rozpatrywane w artykule mają na celu przedstawienie możliwości wykorzystania skanowania laserowego 3D w kontekście prowadzonych prac modernizacyjnych sieci kolejowej w Polsce. Skanery laserowe, jako instrumenty pomiarowe znajdują m.in szerokie zastosowanie w pomiarach geodezyjnych, kartograficznych oraz architektonicznych. Uzyskane techniką skanowania laserowego 3D informacje przestrzenne mogą być wykorzystane dla potrzeb dokumentacji, planowania oraz wizualizacji, a w dalszej perspektywie do oceny stanu realizacji prac modernizacyjnych, a także monitorowania stanu infrastruktury w okresie eksploatacji.*

**Słowa kluczowe:** skanowanie laserowe 3D, kolej, monitoring

## 1. Wprowadzenie

W odpowiedzi na rosnące zapotrzebowanie społeczeństwa w zakresie tworzenia efektywnych systemów połączeń komunikacji zbiorowej, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. prowadzą intensywne prace modernizacyjne, a także budowę nowych odcinków linii kolejowych, w celu stworzenia spójnej, wydajnej i bezpiecznej sieci połączeń kolejowych. Złożoność procesów współdziałania konstrukcji inżynierskiej z podłożem oraz wzajemne interakcje poszczególnych elementów składowych infrastruktury, stanowią wyzwanie dla projektantów i zarządcy. Specyfika transportu kolejowego, generującego duże obciążenia dynamiczne przekazywane na podłoże, oddziałującego na infrastrukturę kolejową, a także obszary przyległe, zarówno w trakcie eksploatacji, modernizacji, jak i budowy, wymaga zastosowania wydajnych i skutecznych metod rozpoznania i oceny zagrożeń, co przy dużym zasięgu prac, skłania do wprowadzania nowych technologii monitoringu. Narzędziem użytecznym dla potrzeb planowania, projektowania oraz monitorowania sieci kolejowej może być metoda skanowania laserowego 3D - technika obrazowania, która pozwala na określenie kształtu i wzajemnych relacji geometrycznych między obiektami znajdującymi się w zasięgu skanera. Podstawową zaletą skaningu laserowego jest szerokie spektrum możliwości zastosowań: od wizualizacji obiektów [4,6,16], przez inwentaryzację architektoniczną [1,8,12,], po szczegó-

łowe pomiary zmian konstrukcyjnych, objętościowych [15] i deformacyjnych [7, 17,3]. W zależności od potrzeb, naziemny skaningu laserowy może być obsługiwany z tzw.: położenia statycznego (montowany na statywie) lub kinematycznego - z platformy (mocowany na ruchomym pojeździe). W pierwszym przypadku, naziemny skaner laserowy wykorzystywany jest do tworzenia m.in. szczegółowej mapy ukształtowania terenu, obrazowania obszaru wokół miejsca, w którym jest ustawiony skaner - w tym w szczególności elementów infrastruktury. Natomiast w trybie kinematycznym, ułatwia prowadzenie pomiarów geodezyjnych i map inwentaryzacyjnych obiektów liniowych [2].



Rys 1. Schemat pracy naziemnego lasera skaningowego z położenia spoczynkowego (a) i kinematycznego (b) [6]

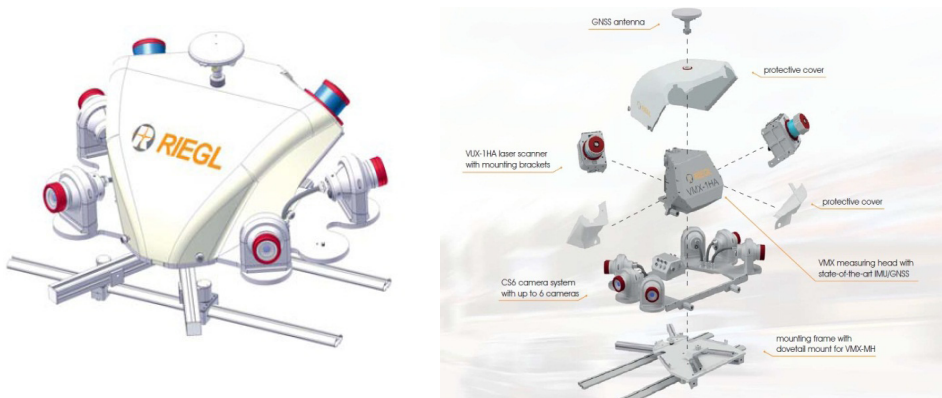
## 2. Krótka charakterystyka techniki skanowania laserowego 3D

Skanery laserowe zaliczane są do grupy aktywnych systemów teledetekcyjnych, działających na zasadzie pomiaru odległości i kierunku celu od urządzenia. Wyposażone są w układ optyczny, który z zadaną częstotliwością, emituje wiązki świetlne o ustalonej długości fali i określonym kierunku. Każde odbicie od przeszkody jest rejestrowane jako położenie punktu w przestrzeni, któremu przypisane są współrzędne X, Y, Z – początkowo w układzie lokalnym skanera, a następnie w docelowym układzie współrzędnych geodezyjnych prostokątnych. Efektem pomiaru jest zbiór punktów, tzw. chmura punktów (z ang. point clouds), posiadających współrzędne geodezyjne oraz parametry intensywności odbicia. [3]. 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. W skanerach fazowych sygnał lasera jest modulowany odpowiednią funkcją sinusoidalną [22]. Zaawansowane technologicznie skanery impulsowe rejestrują dodatkowo dla każdego punktu intensywność odbitego sygnału, czyli wszystkie składowe odbić jednej wiązki, a nie tylko pierwsze i ostatnie echo. W przypadku naziemnych skanerów laser-

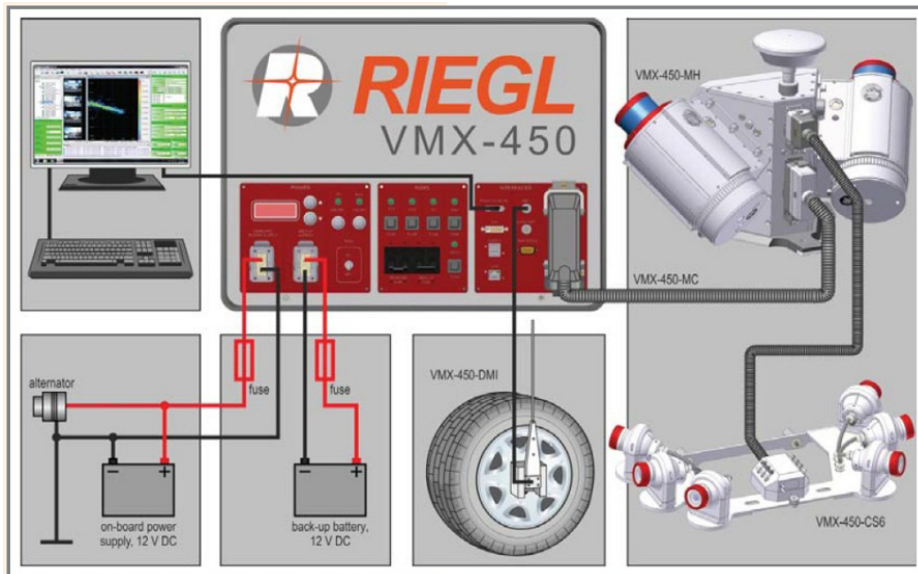
wych kolejne echa są interpretowane przez metodę detekcji, tzw.: pełnej fali (full waveform detection), która polega na cyfrowym próbkowaniu całej krzywej fali powracającej do detektora i niosącej ze sobą informacje o odbiciu od wielu obiektów (co ma miejsce np. podczas wędrówki plamki lasera przez warstwy roślinności). Ta cecha naziemnych urządzeń impulsowych daje możliwości prowadzenia badań w miejscach trudno dostępnych, w których często jednym z elementów składowych jest pokrywa roślinna [2]. Wzrost zapotrzebowania na automatyczne zbieranie danych wzdłuż tras komunikacyjnych spowodował rozwój wersji mobilnej systemu skanowania laserowego 3D MLS (Mobile Laser Scanning). W skład jednostki pomiarowej MLS wchodzi jeden lub więcej skanerów laserowych, system pozycjonowania i orientacji (POS), jeden lub więcej aparatów cyfrowych oraz jednostka sterująca [10]. Całość zazwyczaj montowana jest na pojeździe, który może poruszać się z prędkością ruchu drogowego lub kolejowego (rys. 2). Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przykładowy schemat MLS.



Rys. 2. Przykłady jednostek Mobilnego Skanowania Laserowego montowanych na pojazdach [24]



Rys. 3. Przykład systemu MLS VMX-450 firmy Riegl [23]



Rys. 4. Schematyczny układ systemu MLS firmy Riegl VMX-1HA z 6 kamerami [23]

W systemie mobilnym głównie wykorzystywane są skanery impulsowe. W celu zwiększenia częstotliwości linii skanowania stosowany jest tzw. tryb high speed, co ogranicza zasięg skanera do około 300-400 m, wpływając jednak na zwiększenie gęstości chmury punktów, a zatem dokładność i potencjał interpretacyjny [18]. Obecnie na rynku oferowane są dwa podstawowe rodzaje systemów mobilnego skanowania laserowego. Pierwszy bazujący na skanerach profilujących 2D, umieszczonych pod kątem 90 stopni względem siebie i 45 stopni względem kierunku jazdy, na stałe związanych z platformą, bez możliwości zmian kątów nachylenia. Drugim bardziej elastycznym, składającym się z jednego skanera, umieszczonego centralnie i zwróconego prostopadłe do kierunku jazdy oraz dwóch skanerów statycznych po bokach skanera profilującego [18]. Zaletą drugiego rozwiązania jest możliwość dowolnej konfiguracji i ustawienia zadanego kierunku skanowania oraz wykorzystania skanerów bocznych do pomiarów statycznych – uzupełniających np. w miejscach niewidocznych z poziomu trasy skanowania mobilnego, czy wymagających typowego opracowania statycznego. System mobilnego skanowania laserowego pozwala na zbieranie trójwymiarowej informacji przestrzennej o drogach, torowiskach, wałach powodziowych, kanałach, tunelach i mostach, mierzonych z perspektywy pojazdów użytkujących te obiekty. Uzyskiwane błędy średnie oscylują na poziomie 10 mm dla współrzędnej Z i 30 mm dla współrzędnych XY w bezwzględnych układach odniesienia (np. 1965, 1992, 2000 czy UTM) [18]. Każda platforma pomiarowa, obok skanera, posiada system nawigacyjny, oparty na satelitarnym pozycjonowaniu przez GNSS (Global Navigation Satellite Systems) oraz nawigację inercyjną IMU (Inertial Measurement Unit), wspartą odometrem [13]. Dodatkowe wsparcie dla systemu GPS jest konieczne ze względu na możliwe przerwy sygnału GPS

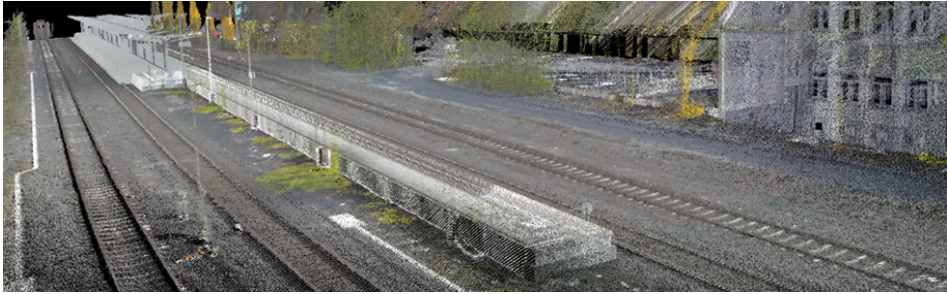
w czasie przejazdu przez rejony z wysoką zabudową, tereny zadrzewione czy tunele. Zastosowanie dodatkowych urządzeń pozwala utrzymać poprawną pozycję systemu. Zaletą platform mobilnych jest możliwość prowadzenia pomiarów bez konieczności wstrzymania ruchu, z minimalną ingerencją w jego płynność. Pomiar wykonywany jest o wiele szybciej, niż w przypadku metod tradycyjnych oraz pozwala na automatyzację wielu procesów obliczeniowych.

### 3. Użyteczność techniki skanowania w procesie planowania, modernizacji i przebudowy sieci kolejowej

W procesie przygotowania inwestycji dla dużych obiektów infrastrukturalnych, takich jak: linie kolejowe, tunele czy wiadukty, kluczowym elementem jest optymalizacja działań inwestycyjnych. Wzmocnienie początkowej fazy planowania i projektowania wpływa na znaczącą redukcję kosztów. Dzięki odpowiednio wczesnej identyfikacji zagrożeń środowiskowych, możliwe jest wprowadzenie racjonalizacji rozwiązań projektowych np. dostosowanie konstrukcji obiektu do warunków geotechnicznych (uwzględnienie stref osuwiskowych, gruntów słabonośnych, itd.) Koszty wprowadzanych zmian na etapie planowania są relatywnie niskie w stosunku do zmian wprowadzanych w trakcie zaawansowanych prac realizacyjnych projektu. Ze względu na charakter liniowo-punktowy drogi kolejowej, obejmujący nawierzchnię kolejową wraz z podtorzem i budowlami techniczno-inżynieryjnymi oraz gruntem, na którym jest usytuowana [20], wskazane jest wykorzystanie metody pomiarowej o szerokim spektrum zbierania danych, która pozwoli na identyfikację różnych rodzajów ryzyka. Technika skanowania laserowego może posłużyć na przykład do szybkiej oceny stanu nasypu kolejowego, realizacji procesów zagospodarowania terenów przyległych oraz do określenia przestrzennych relacji.

Zasada pomiaru skanerem laserowym polega na wyznaczeniu współrzędnych 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. Na podstawie uzyskanych chmur punktów, można wykonać tradycyjny model w postaci nieregularnej siatki trójkątów, których duża gęstość pozwala na generowanie modeli numerycznych przestrzeni infrastruktury kolejowej, o bardzo realistycznym wyglądzie (rys. 5).

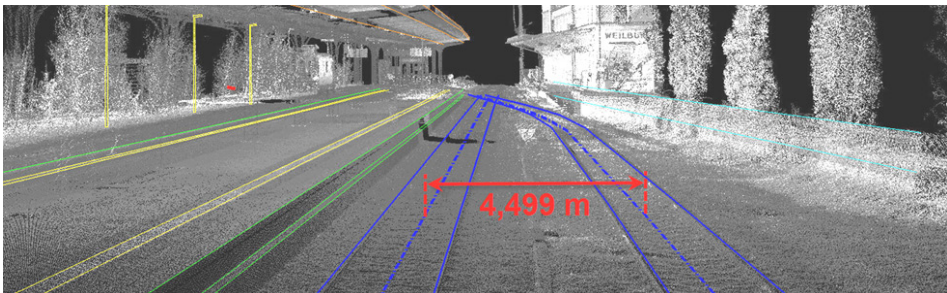




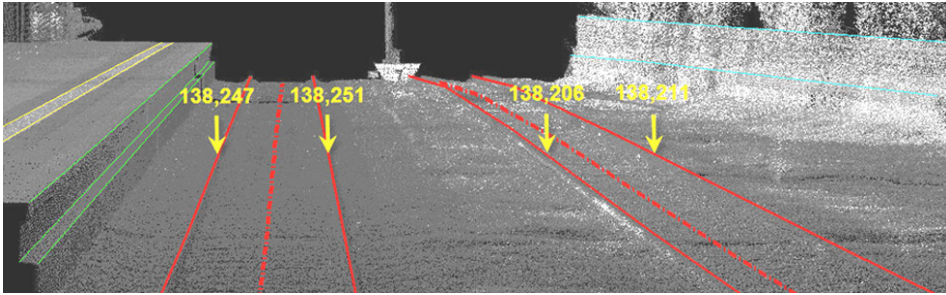
Rys. 5. Przykład uzyskanej metodą skanowania laserowego 3D kolorowej chmury punktów [25]

Zastosowanie specjalistycznych narzędzi graficznych, opartych na zaawansowanych algorytmach obliczeniowych, pozwala na zamianę pozyskanych modeli punktowych w postać geometryczną, która w pełni oddaje charakter i formę inwentaryzowanych obiektów. Zagadnienie to jest szeroko rozpatrywane w literaturze [5,19]. Wypracowano wiele technik przetwarzania modeli punktowych w zależności od rodzaju badanych obiektów np.: budynków [11,21], instalacji przemysłowych [14] czy elementów architektonicznych [9]. Uzyskane modele mogą być następnie przetwarzane i wykorzystywane w systemach GIS i CAD do dalszej integracji danych. Z wygenerowanych powierzchni 3D możliwe jest wyodrębnienie profili 2D lub linii konturowych, co umożliwia użytkownikom zdalną ocenę takich parametrów obiektu jak: długość, objętość, wysokość, odchylenie od pionu czy zakrzywienie [5].

W przypadku środowiska kolejowego, zastosowanie techniki skanowania laserowego umożliwia, m. in. określenie położenia bezwzględnego szyn, przewodów trakcji elektrycznej, określenie elementów skrajni, a nawet wyznaczenie geometrii szyny i toru (np. przechyłka, szerokość). W procesie tworzenia docelowych kształtów geometrycznych, wykorzystuje się automatyczne i półautomatyczne algorytmy, tworzące z chmury pomierzonych punktów określone powierzchnie i bryły (obiekty) np. profil szyny. Na podstawie utworzonych przestrzennych modeli, można prowadzić prace identyfikacyjne, pomiarowe, a także projektowe (rys. 6 i 7).

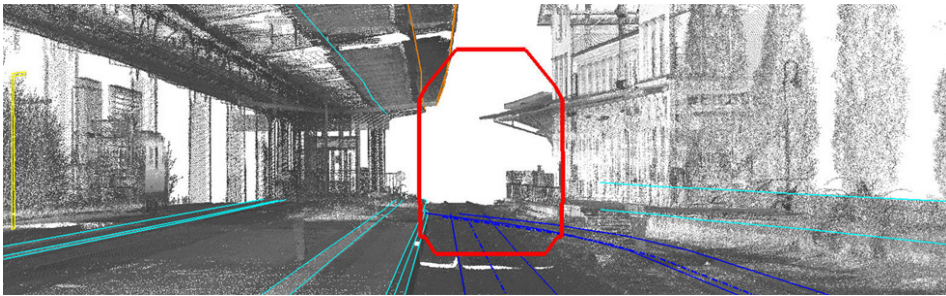


Rys. 6. Przykład pomiaru szerokości rozstawu osi torów kolejowych [24]



Rys. 7. Pomiar różnicy wysokości torów [24]

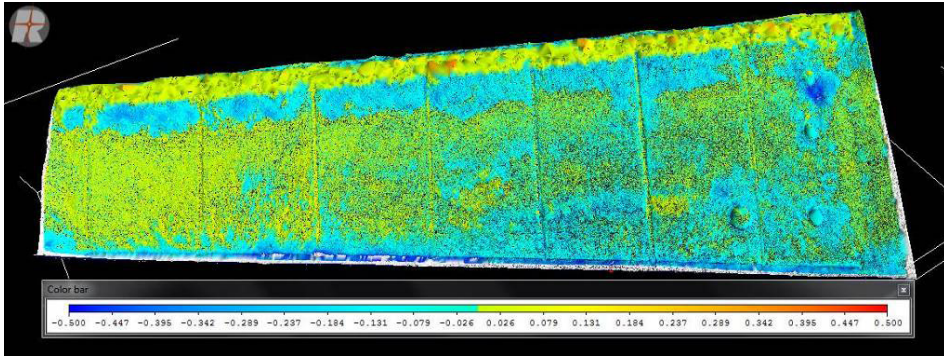
Możliwość szybkiego i efektywnego zbierania danych stanowi ważny element w ocenie bezpieczeństwa, zarówno prac budowlanych jak i eksploatacji. Wczesne rozpoznanie nieprawidłowości wynikającej np. z błędów projektowych lub ze zużycia toru, umożliwia skuteczną prewencję, zmniejszając ryzyko zaistnienia awarii. Szczególnie ważne jest uchwycenie lokalizacji przewężeń w profilu torów - oraz ewentualnych przeszkód w obrębie skrajni kolejowej (ich położenia i kształtu) np. roślinności, zwisających przewodów trakcyjnych, które mogłyby spowodować zakłócenia w ruchu kolejowym (rys. 8).



Rys. 8. Automatyczny pomiar prześwietu i wykrywanie kolizji [24]

Jedną z najistotniejszych zalet skaningu laserowego jest monitorowanie procesów zachodzących w czasie, wynika to z faktu, iż pomierzony i utworzony model przestrzeni, wiernie, dokładnie i z olbrzymią szczegółowością rejestruje stan infrastruktury w określonym momencie, dzięki czemu możliwy jest monitoring przemieszczeń pionowych i poziomych - wybranych, charakterystycznych elementów - w czasie między wykonanymi pomiarami [3]. Odbywa się to, przez nałożenie na siebie dwóch skanów wykonanych w różnych momentach czasowych  $T_i$  dla danego obiektu, np. nasypu kolejowego, zbocza skarpy, lub innego obiektu budowlanego, na podstawie czego tworzony jest model różnicowy. Dla zapewnienia najlepszych rezultatów badań modele wykonane w poszczególnych momentach czasu  $T_i$  powinny mieć jednakową rozdzielczość oraz dokładność. Na podstawie modelu różnicowego możliwe jest zidentyfikowanie np. odkształceń, w szczególności wynikających z osiadania nasypu kolejowego, zjawisk erozyjnych, czy też innych zmian zachodzących w infrastrukturze kolejowej. Przykład modelu różnicowego zbocza

skarpy prezentuje rys. 9. Specyfika konstrukcji nawierzchni kolejowych oraz generowane obciążenia, sprzyjają powstawaniu deformacji i przemieszczeniom konstrukcji budowlanej, co wymaga szczególnej kontroli i zastosowania efektywnych metod pomiarowych.



Rys. 9. Przykładowy model różnicowy zbocza skarpy w miejscowości Sadowie (Pilecka, Bazarnik 2015)

#### 4. Podsumowanie

Procesy modernizacji i budowy sieci kolejowej w Polsce stawiają przed zarządcą oraz wykonawcami ogromne wyzwania, wynikające z różnorodności wykonywanych prac, zasięgu inwestycji, a także ich wpływu na obszary sąsiadujące. W kontekście zapewnienia prawidłowego planowania, projektowania i rozpoznania zagrożeń na każdym etapie inwestycji, zaleca się stosowanie szybkich, dokładnych i wydajnych metod pomiaru, modelowania i monitorowania obiektów oraz zjawisk (np. przemieszczeń) w przestrzeni prowadzonej inwestycji kolejowej. Taki sposób wspomagania procesu inwestycyjnego mogą zapewnić techniki skanowania laserowego, zarówno w ujęciu statycznym jak i mobilnym.

Skanowanie laserowe daje szerokie spektrum możliwości analizy i wykorzystania danych pomiarowych, tj.: pojedyncze (punktowe) pomiary elementów infrastruktury, tworzenie przekrojów, numerycznych modeli terenu, projektowanie, monitoring stanu infrastruktury oraz wykrywanie zagrożeń. Dodatkową zaletą skaningu laserowego jest bardzo szczegółowa, a ponadto dokładna rejestracja stanu infrastruktury w różnych momentach czasu.

Ciągły postęp, zarówno w sferze sprzętowej, jak i oprogramowaniu, pozwala automatyzować procesy kolekcji i obróbki danych ze skaningu laserowego. Dostępne na rynku programy i algorytmy przetwarzania chmury pomierzonych punktów coraz częściej pozwalają na automatyczne wykrywanie obiektów infrastruktury, czy też kształtowanie ich geometrii przy niewielkim wspomaganie ze strony człowieka.

Stosowanie nowoczesnych metod pomiarowych, umożliwiających szybkie zbieranie, dużej ilości danych, wpływa na redukcję kosztów i utrudnień w strefie działań inwestycyjnych.



## Bibliografia

- [1] Abmayr T., Härtl F., Reinköster M., Fröhlich C., 2012, Terrestrial laser scanning – applications in cultural heritage conservation and civil engineering <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-W17/> International society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- [2] Bazarnik M., 2014, Potencjał naziemnego skaningu laserowego 3D w inwentaryzacji i monitoringu tuneli kolejowych, *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne 2 (104)*, 55-67.
- [3] Bazarnik M., 2016, Możliwości aplikacyjne techniki naziemnego skanowania laserowego 3D w rekultywacji terenów górniczych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*. 2016, nr 94 s.149-159.
- [4] Buchroithner M. F., Gaisecker D.&T., Österreich H., 2009, Modeling And Visualization Using Laser Scanner In Documentation Of Cultural Heritage Photogrammetrie • Fernerkundung • Geoinformation 4/2009, S. 329 - 339.
- [5] Elberink S. O., Khoshelham K., Automatic Extraction of Railroad Centerlines from Mobile Laser Scanning Data, *Remote Sens.* 2015, 7, 5565-5583.
- [6] Gikas V., 2012, Three-Dimensional Laser Scanning for Geometry Documentation and Construction Management of Highway, *Sensors* 2012, 12, 11249-11270.
- [7] Gordon S. J., Lichti D.D., 2007, Modeling terrestrial laser scanner data for precise structural deformation measurement. *Journal of Surveying Engineering*, 133:72–80.
- [8] Jones R.R., Kokkalas S., McCaffrey K.J.W., 2009, 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.
- [9] Lai K., Fox D., Object recognition in 3d point clouds using web data and domain adaptation. *Int. J. Robot. Res.* 2010, 29, 1019–1037.
- [10] Lemmens M., Mobile Laser Scanning Point Clouds - Status and Prospects of Automatic 3D Mapping of Road Objects. *GIM-International e-newsletter* 03/08/2017 dostęp: <https://www.gim-international.com/content/article/mobile-laser-scanning-point-clouds>.
- [11] Maas H., Vosselman G., Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 1999, 54, 153–163.
- [12] Markiewicz J., Zawieska D., Kowalczyk M., Zapłata , 2014, 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.
- [13] Mikrut. S. (red.), *Fotogrametria i skaning laserowy w modelowaniu 3D*, Monografia, Rzeszów 2015.
- [14] Rabbani T., Heuvel F.V.D., *Methods for fitting CSG models to point clouds and their comparison*. In Proceedings of the 7th IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging, Kauai, HI, USA, 17–19 August 2004; pp. 279–284.
- [15] Rütger H., Held Ch., Bhurtha R., Schröder R., Wessels S., 2013, *Challenges in Heritage Documentation with Terrestrial Laser Scanning* [http://africageodownloads.info/122\\_ruther.pdf](http://africageodownloads.info/122_ruther.pdf) European Scientific Journal August 2013 edition vol.9, No.24 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.
- [16] Slob S., Hack R., 2004, *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.
- [17] 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.
- [18] Szadkowski A., Mahrburg A, Sochacka Ż., *Mobilne skanowanie laserowe obiektów liniowych prosto z samochodu*. *Geodeta Magazyn Geoinformacyjny* nr 2 (177) LUTY 2010 dostęp: [http://www.riegl.com/fileadmin/user\\_upload/Press/177-prosto\\_z\\_samochodu.pdf](http://www.riegl.com/fileadmin/user_upload/Press/177-prosto_z_samochodu.pdf).
- [19] Tang P., Huber D., Akinci B., Lipman R., Lytle A., *Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques*. *Autom. Constr.* 2010, 19, 829–843.
- [20] Towpik K, *Infrastruktura transportu kolejowego*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009, s. 55.
- [21] Verma V, Kumar R., Hsu S., *3D building detection and modeling from aerial lidar data*. In Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York, NY, USA, 17–22 June 2006; pp. 2213–2220.
- [22] Wężyk P, *Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie*. *Roczniki geomatyki*, 2006 tom IV, zeszyt 4, s. 119-131.

Wykaz stron internetowych:

- [23] RIEGL, 2017: strona internetowa firmy: <http://www.riegl.com>, data pobrania
- [24] IGI-SYSTEM, 2017: strona internetowa firmy: <http://www.igi-systems.com/railmapper.html>