

# Zastosowanie skaningu laserowego do inwentaryzacji tunelu kolejowego

Grzegorz Lenda, Michał Strach

Artykuł przedstawia możliwości zastosowania skaningu laserowego w pomiarach inwentaryzacyjnych obiektów położonych na obszarach kolejowych. Opisano dwa rodzaje skanowania laserowego: naziemny (stacjonarny) oraz kinematyczny (mobilny). Każdy z systemów ze względu na swoje właściwości może być wykorzystywany do innych celów. Zaletą techniki skanowania laserowego jest możliwość wykonania pomiarów nawet najbardziej złożonych geometrycznie i geomorfologicznie elementów infrastruktury dróg szynowych. Zalicza się do nich zarówno nawierzchnia, urządzenia techniczno – eksploatacyjne (rozjazdy, skrzyżowania, przejazdy itp.), podtorze, jak i obiekty inżynieryjne.

W artykule został opisany pomiar inwentaryzacyjny tunelu kolejowego oraz jego otoczenia z zastosowaniem naziemnego skanera laserowego. Przeanalizowano możliwości wykorzystania tej technologii w monitoringu i wyznaczeniu skrajni budowlanej dla tego typu obiektów. Przeprowadzono także próby określenia wielkości wybranych parametrów geometrycznych toru.

Praca finansowana z badań statutowych AGH nr 11.11.150.005 w 2011r.



dr inż. Grzegorz Lenda  
Akademia Górniczo-Hutnicza imieniem Stanisława Staszica w Krakowie Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Katedra Geodezji Inżynieryjnej i Budownictwa



dr inż. Michał Strach  
Akademia Górniczo-Hutnicza imieniem Stanisława Staszica w Krakowie Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Katedra Geodezji Inżynieryjnej i Budownictwa

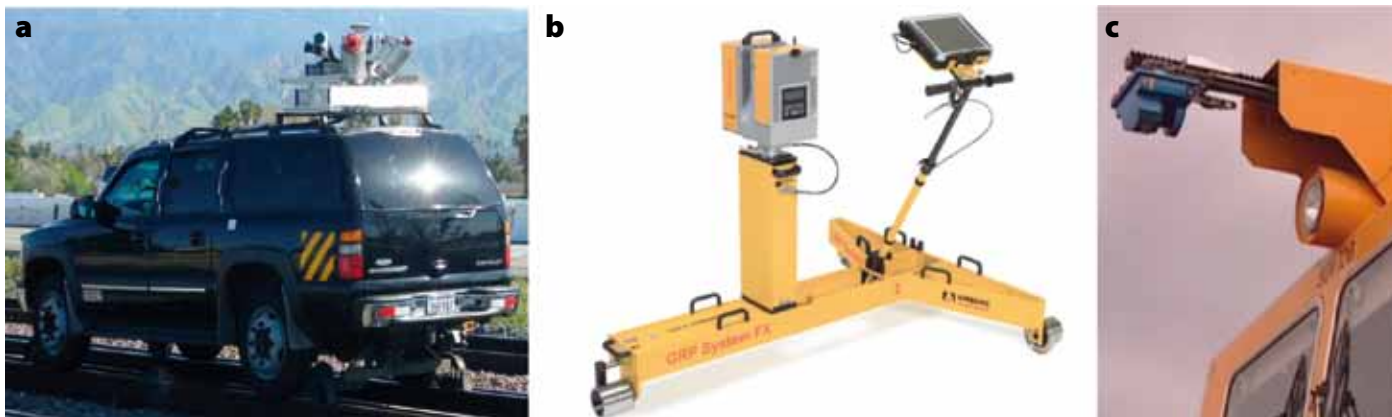
Skanery laserowe to urządzenia, które w coraz szerszym zakresie wykorzystywane są do zbierania ogólnych danych przestrzennych, zarówno o interesujących obiektach, jak i o ich usytuowaniu względem infrastruktury zewnętrznej. Standardem stały się konstrukcje naziemnych skanerów stacjonarnych, wykorzystywanych najczęściej do pomiaru obiektów budowlanych. Zasięg tego typu urządzeń, bazujących na impulsowej metodzie pomiaru długości wynosi obecnie przeciętnie kilkaset metrów i jest wystarczający do pomiaru rozległych budowli [1,2]. Konstrukcje fazowe dysponują mniejszym zasięgiem, jednak posiadają przewagę nad impulsowymi w zakresie prędkości skanowania oraz dokładności. Zasięg skanerów może być w niektórych przypadkach istotnie ograniczony przez strukturę i barwę mierzonej powierzchni, co wymaga gęstszego rozmieszczenia stanowisk obserwacyjnych. Dokładności pomiaru długości oferowane

przez skanery mieszczą się teoretycznie w granicach kilku milimetrów, jednak w praktyce, równie silnie jak zasięg, zależą od szeregu właściwości fizycznych mierzonych celów [3,4,5]. Kompleksowy pomiar obiektów prowadzony jest zazwyczaj z kilku stanowisk, a uzyskane na każdym z nich chmury punktów łączy się w całość za pomocą fotopunktów, pomierzonych zarówno w procesie skanowania, jak i niezależnie z użyciem precyzyjnych tachymetrów [6]. Przykładowe konstrukcje współczesnych skanerów stacjonarnych zamieszczono na rys.1.

Podczas inwentaryzacji obiektów wydłużonych, typu drogi, linie kolejowe itp. istotne przyspieszenie pracy osiąga się w wyniku umieszczenia skanera na platformie ruchomego pojazdu [7, 8, 9]. Najczęściej jest to dach samochodu (rys.2a). W przypadku pomiarów infrastruktury tras szynowych istnieje możliwość zastosowania dowolnych pojazdów kolejowych: lokomotywa, drezy-



1. Wybrane modele naziemnych, stacjonarnych skanerów laserowych: **a** – Leica ScanStation C10, **b** – Riegl VZ-400, **c** – Topcon GLS-1500



2. Wybrane mobilne systemy naziemnego skaningu laserowego: **a** – StreetMapper firmy 3D Laser Mapping Ltd, **b** – Amberg GRP 5000, **c** – skaner profilowy na bazie dreźny EM-SAT firmy Plasser & Theurer

na (rys.2c), wózek pomiarowy (rys.2b). Taka technika pomiarowa nazywana jest mobilnym skanowaniem laserowym (MLS). Jedną z podstawowych zalet technologii skaningu laserowego, wykorzystywanego w transporcie szynowym, jest możliwość uzyskania parametrów skrajni budowli w dowolnie wybranym przekroju linii kolejowej. W kompleksowym pozyskiwaniu danych o drogach szynowych i infrastrukturze kolejowej nie zawsze wystarcza zastosowanie pojedynczego skanera. Korzysta się wówczas z zestawu optycznych i multisensoralnych urządzeń, wśród których główną rolę odgrywają naziemne skanery laserowe. Do dodatkowych urządzeń zalicza się: system pozycjonowania GPS/IMU, odometr i kamery cyfrowe, umożliwiające wykonanie zdjęć podczas przejazdu (rys.2a). Potrzebny jest także system nadzorujący i zarządzający mierzonymi danymi. Mobilne skanery laserowe, będące na wyposażeniu pojazdów szynowych, dysponują niższą od stacjonarnych dokładnością pomiarów. Jednak ich ogromną zaletą jest efektywność pracy. Mogą bowiem realizować pomiary na pojazdach poruszających się z prędkością od kilku do nawet kilkudziesięciu kilometrów na godzinę. Dobór prędkości pojazdu z zestawem pomiarowym zależy od wymagań dokładności wyników pomiarów.

### Opis badanego obiektu

W 2010 roku pracownicy Katedry Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa z Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie przeprowadzili pomiar naziemnym skanerem laserowym fragmentu tunelu kolejowego i jego bezpośredniego sąsiedztwa [10]. Wytępowany obiekt położony jest w powiecie miechowskim, województwie małopolskim w pobliżu stacji kolejowej Tunel. Jest to tunel bazowy i przebiega pod wzniesieniem Biała Góra (416 m n.p.m.), wchodzącym w skład Wyżyny Miechowskiej. Budowla składa się z dwóch tuneli jednonawowych,

jednotorowych, szlakowych o obudowie kamiennej i podkowiastym kształcie przekroju poprzecznego (rys.3). Do badań wybrano tunel August, w którym przebiega tor nr 1. Terenowe prace badawcze zostały przeprowadzone w godzinach nocnych. W trakcie pomiarów tor został zamknięty dla ruchu pociągów. W tym czasie po torze nr 2 prowadzony był wahadłowy ruch pociągów. Z informacji zawartych na profilu podłużnym wynika, że tunel położony jest w kilometrażu od 266+615,50 do 267,3+80,70 i ma długość 765,2 m. Przebiegający w obiekcie tor, w rzucie poziomym złożony jest z następujących elementów: fragment krzywej przejściowej (L=90m), prosta (D=633,30m), krzywa przejściowa (L=90m) i fragment łuku kołowego (R=600m, D=309,90m).

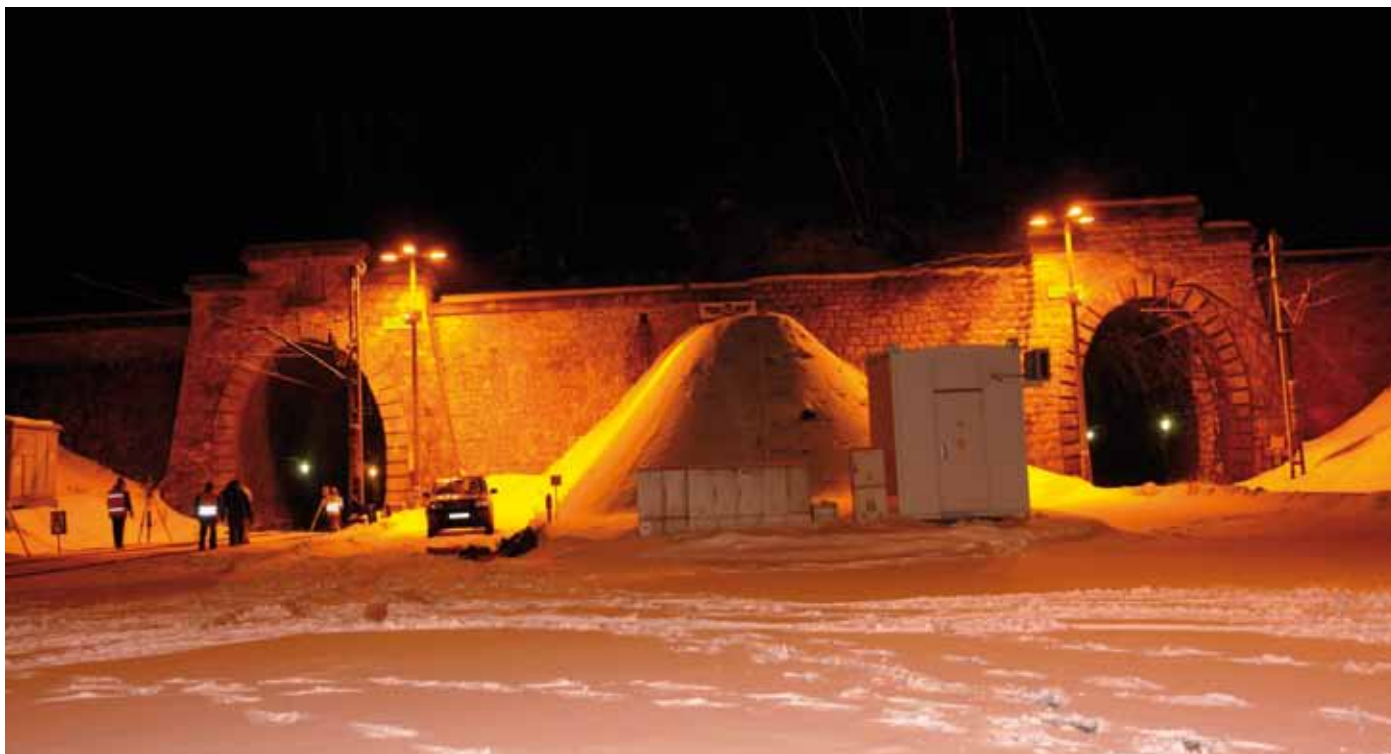
### Charakterystyka sprzętu i technologii pomiarów doświadczalnych

W pracach badawczych wykorzystany został naziemny skaner laserowy 3D. Było to urządzenie Z+F IMAGER 5006 firmy Zoller + Fröhlich GmbH, produkowane od 2006 roku (rys.4). Oprócz typowej funkcjonalności skanera w jego wyposażeniu znajdują się dodatkowo: panel kontrolny, komputer do sterowania pracą urządzenia, twardy dysk oraz wymienne baterie wewnętrzne. Dzięki takiemu rozwiązaniu skaner stał się pierwszym z dostępnych ówczesnie modeli, który umożliwiał samodzielną pracę bez dodatkowego osprzętu. Urządzenie nadal jest jednym z najefektywniej pracujących instrumentów. Jego maksymalna prędkość skanowania dochodzi do 500 tysięcy punktów na sekundę. Skaner Z+F należy do grupy instrumentów fazowych charakteryzujących się niewielkim zasięgiem (79 m), i wysoką dokładnością pomiaru. Jego dokładność liniowa wynosi 1mm na długości 50 m.

Ograniczenia czasowe, związane z wyłączeniem tunelu z ruchu pociągów sprawiły, że pomiar został wykonany jedynie we fragmencie tunelu oraz jego otoczeniu przed

wyściem. Pomiarom został objęty fragment tunelu wraz z torem położonym na prostej i krzywej przejściowej, przechodzącej w lewy łuk kołowy. Dodatkowo, został zmierzony kilkudziesięciometrowy odcinek toru położony w łuku przed tunelem, wraz z elementami infrastruktury technicznej. W trakcie pomiarów zarejestrowano 8 chmur punktów o wysokiej gęstości, obejmujących odcinek toru o długości około 150m. Dobór wszystkich stanowisk skanera musiał być odpowiednio przygotowany. Właściwa lokalizacja urządzenia pomiarowego gwarantowała poprawność późniejszych analiz pomierzonego obiektu. Dodatkowo, wewnątrz tunelu oraz na sąsiadujących z torem elementach infrastruktury kolejowej założono osnowę fotogrametryczną, składającą się z 41 punktów. Większość z nich stanowiły naklejane znaczniki pomiarowe (tarcze) z szachownicą (rys.5). Pozostałe, to precyzyjne tarcze celownicze, ustawiane na statywach (rys.4b) lub mocowane elektromagnesem do szyn (rys.4c). Rolą tarcz było odpowiednie połączenie poszczególnych skanów w jedną chmurę punktów, poprawnie zorientowaną w jednolitym przestrzennym układzie współrzędnych.

Współrzędne przestrzenne wszystkich fotopunktów zostały wyznaczone na podstawie pomiarów tachymetrem bezreflektorowym Leica TCRP 1201 (rys.5). Osnowa została tak zaprojektowana, aby na każdym skanie było widocznych co najmniej 5 tarcz. Osnowę stanowił ciąg poligonowy. Prawdopodobnie założony ciąg powinien zostać dowiązany obustronnie na końcach tunelu. Niestety, ograniczony czas pomiaru, a przede wszystkim znaczna długość tunelu sprawiły, że wykorzystany w badaniach ciąg został nawiązany jednostronnie kątowno i liniowo. Należało się więc spodziewać większych niż zazwyczaj błędów w dopasowaniu sąsiednich chmur punktów.



3. Widok ogólny tunelu kolejowego od strony stacji kolejowej Tunel

## Analiza wyników

Przed przystąpieniem do analiz należało przeprowadzić orientację (połączenia ze sobą) skanów do jednolitego przestrzennego układu współrzędnych. Chmura punktów została zorientowana w lokalnym układzie współrzędnych, zdefiniowanym w trakcie pomiarów tachymetrycznych. Transformacja danych do jakiegokolwiek innego układu nie stanowi problemu. Może to być układ lokalny definiowany przez oś główną danego obiektu bądź inny obowiązujący w danym państwie układ współrzędnych. W procesie orientacji otrzymano odchylenie standardowe położenia tarcz o wartości 3,7 mm. Wartość maksymalnego odchylenia osiągnęła poziom 15,9mm. Takie wyniki uzyskano przy łączeniu ostatnich skanów, położonych najgłębiej w tunelu. Jest to związane ze wspomnianą wcześniej słabą konstrukcją ciągu poligonowego, nawiązanego jednostronnie. Problem niezgodności w orientacji (wpassowaniu) poszczególnych skanów jest istotny w momencie próby globalnej analizy geometrii obiektów, szczególnie tych rozległych. Nie ma on jednak tak istotnego wpływu przy określeniu wymiarów i wzajemnych relacji pomiędzy elementami konstrukcyjnymi w przekrojach poprzecznych wzdłuż obiektów liniowych.

Pliki zawierające miliony pomierzonych punktów są zazwyczaj bardzo duże. Stanowi to utrudnienie w szybkości prowadzonych analiz w programach graficznych CAD. Otrzymany materiał pomiarowy został poddany filtracji punktów oraz selekcjonowaniu obszarów, na jakich prowadzone były

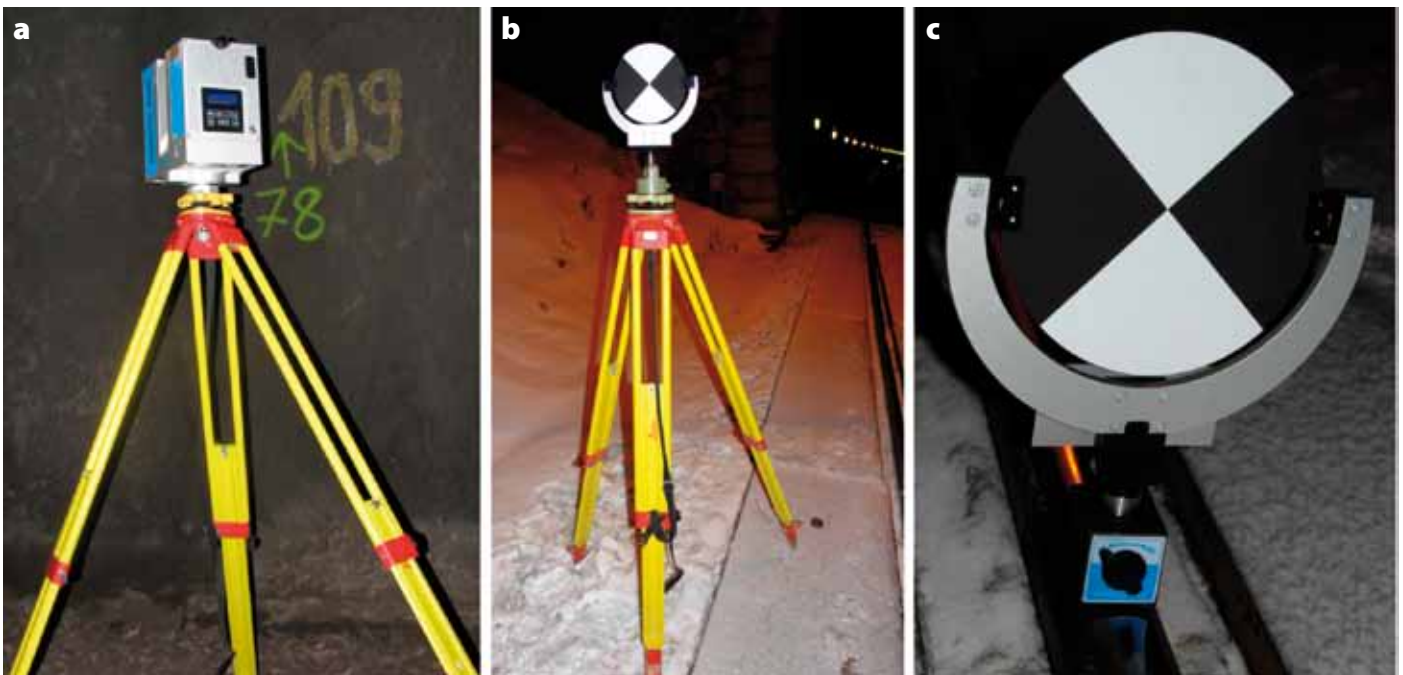
dalsze analizy. Tak przygotowany materiał umożliwił wszechstronne analizy związane z geometrią toru, jego relacjami w stosunku do elementów infrastruktury kolejowej, jak i analizy stanu budowli kolejowych.

W pierwszej kolejności zlokalizowany został przebieg szyn. Na rysunku 6 przedstawiono oba toki szynowe w rzucie poziomym w postaci dwóch równoległych odcinków. Na ich podstawie można było określić położenie osi toru i jej długość. Dla tak zdefiniowanej geometrii wyznaczono przekroje poprzeczne co 5 metrów i jeden dodatkowy w miejscu wyjścia toru z tunelu. W ten sposób na odcinku o długości około 140 metrów powstało 30 przekrojów. W nich można było dokonać analiz związanych z zachowaniem skrajni taboru w tunelu i na szlaku, a także z diagnostyką toru, określeniem jego geometrii i przestrzennego położenia w stosunku do elementów infrastruktury.

Na potrzeby weryfikacji geometrii skrajni, wygenerowane zostały przekroje poprzeczne wzdłuż toru. Analizie poddano zarówno skrajnię na szlaku (rys.7a), jak i w tunelu (rys.7b-c). Kształt tunelu u jego wyjścia w przekroju poprzecznym tworzy charakterystyczną podkowę. Wewnątrz tunelu kształt ten jest już nieco zaburzony. Dodatkowo, na rysunku 7c można zwymiarować i określić głębokość wnęki, jednej z wielu występujących w tunelu. Pomiaru odległości i wzajemnych relacji między poszczególnymi elementami na przekrojach można dokonywać pomiędzy punktami reprezentującymi pomierzony element. Istnieje też możliwość tworzenia wektorów bądź modelowania powierzchni na bazie punktów.

Kolejnym zadaniem była próba określenia wielkości wybranych parametrów geometrii wewnętrznej toru. Były nimi wartości prześwietu i przechyłki. Rysunek 8b przedstawia konstrukcję szablonu przykładanego do wybranych punktów reprezentujących toki szynowe (rys.8a, 8c). Dodatkowo określone zostały współrzędne osi toru dla wszystkich wytypowanych przekrojów. Wyniki pomierzonych wielkości w poszczególnych przekrojach zaprezentowano w Tabeli 1. Rozkład wartości przechyłek wyraźnie wskazuje na zmianę geometrii toru od odcinka prostego poprzez krzywą przejściową aż do łuku kołowego. Na łuku przechyłka jest stała i równa około 115mm.

Ostatnim elementem analiz była próba zdefiniowania geometrii toru w rzucie poziomym. Wyselekcjonowane współrzędne osi toru ze wszystkich przekrojów (Tabela 1), posłużyły do wygenerowania wykresu krzywizn. Na jego podstawie wybrano punkty należące do odcinka prostego oraz łuku kołowego. Zdecydowano się na wpisanie prostej w zbiór punktów osi w pierwszych 6 przekrojach. Wpassowania dokonano metodą najmniejszych kwadratów, uzyskując wynik 5mm, jako największą wartość odsunięcia punktu od prostej regresji. Tą samą metodą wpassowano łuk kołowy w zbiór punktów należących do przekrojów o numerach 23 ÷ 30. Przyjęto jednak ograniczenie w długości promienia tego łuku. Zgodnie z danymi z profilu podłużnego ma on wartość 600m. Przy takich założeniach maksymalne odsunięcie punktu od wpisanego łuku ma wartość 10mm.



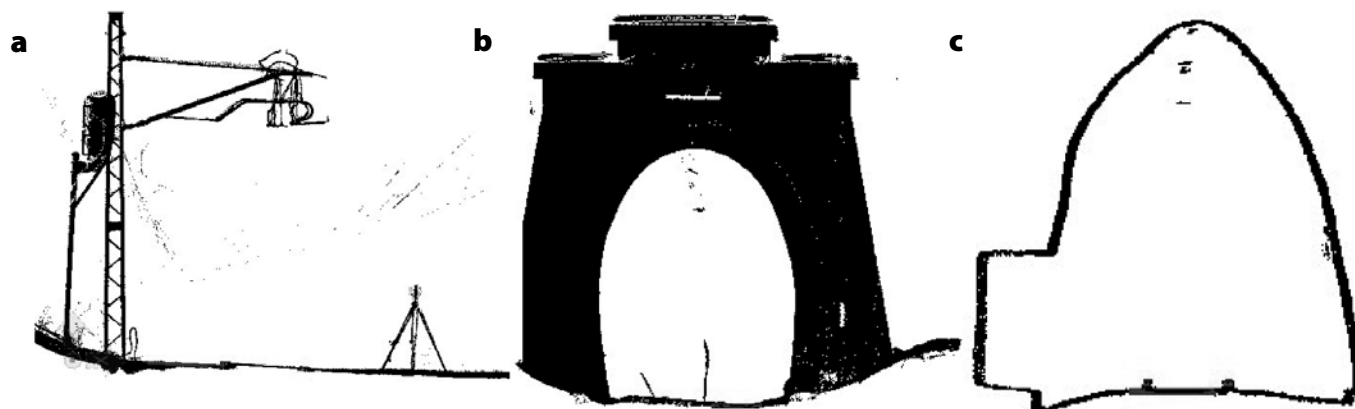
4. Skaner laserowy Z+F IMAGER 5006 wraz z osprzętem w trakcie testów terenowych



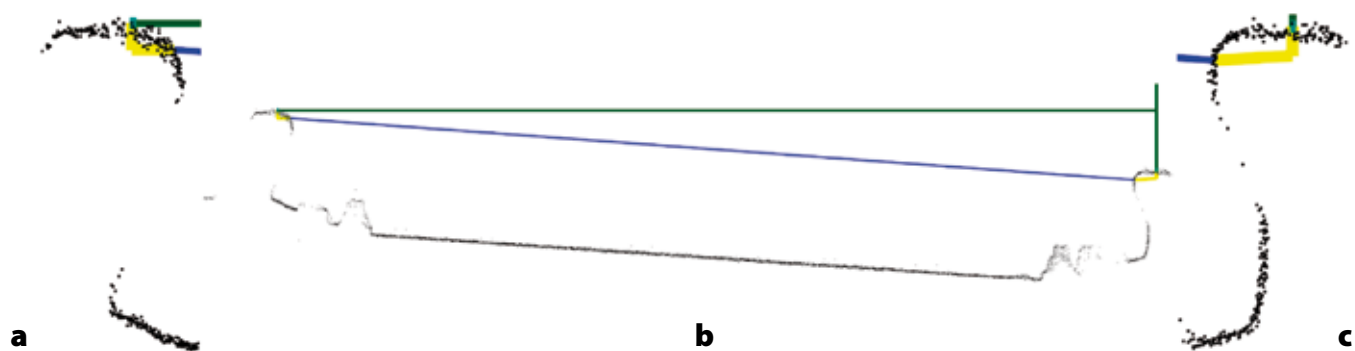
5. Baza pomiarowa zlokalizowana w tunelu kolejowym August



6. Szkic pomierzonego odcinka z zaznaczonymi stanowiskami skanera (kółka) i przekrojami, w których dokonano analiz



7. Wygenerowane z chmury punktów przekroje poprzeczne: **a** – na szlaku, **b** – tunel od strony wyjścia, **c** – wewnątrz tunelu



8. Szkic konstrukcji geometrycznej szablonu umożliwiającego pomiar szerokości i przechyłki toru: **b** - widok ogólny, **a i c** - przybliżenie szczegółów obu szyn

## Wnioski

Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność skaningu laserowego dla celów szybkiej inwentaryzacji infrastruktury związanej z trasami kolejowymi. Dokładność wykonanych pomiarów okazała się w pełni zadowalająca dla weryfikacji parametrów skrajni i położenia toru w stosunku do elementów infrastruktury kolejowej. Pozyskana w terenie chmura punktów może być wykorzystana do przeprowadzenia analiz diagnostycznych geometrii toru. Niezaprzeczalną zaletą bezdotykowej metody pomiarowej jest możliwość inwentaryzacji sieci trakcyjnej bez jej wyłączania. Rejestrowanie przez skaner poziomu energii wiązki odbitej, sprzyja wykrywaniu miejsc zacieków i zawilgoceń, trudno identyfikowalnych w tunelach i innych obiektach zaciemnionych.

Istotny wpływ na dokładność orientacji chmur punktów i późniejsze analizy ma osnowa pomiarowa, dzięki której wyznaczane są współrzędne tarcz. Osnowy zakładane na obszarach kolejowych stanowią sieci wydłużone, tworząc ciągi poligonowe lub łańcuchy trójkątów. Sieci te winny być dwustronnie nawiązane do punktów osnow geodezyjnych wyższego rzędu. Takie podejście zapewnia uzyskanie odpowiedniej

dokładności wyznaczenia położenia punktów sieci po wyrównaniu. W opisywanym przypadku założony ciąg poligonowy został nawiązany jednostronnie. Niewielka długość ciągu oraz zastosowanie precyzyjnego tachymetru elektronicznego pozwoliły na wyznaczenie położenia punktów osnowy i tarcz z błędem nie przekraczającym 10 mm.

Dokładność wyznaczenia położenia punktów osnowy i tarcz jest szczególnie istotna podczas analiz geometrii i wzajemnych relacji pomiędzy obiektami zobrazowanymi na kilku skanach. Analiza skrajni budowlanej i wybranych elementów geometrii wewnętrznej toru dokonywana jest w zakresie pojedynczych skanów. Poszczególne wielkości mogą być wyznaczane w układzie lokalnym, definiowanym np. przez oś toru. W tym szczególnym przypadku dokładność osnowy i orientacji chmur punktów nie ma tak istotnego znaczenia.

Wpływ na jakość wyników ma także sposób planowania i organizacja pomiarów. Wymagana jest więc optymalizacja techniki pomiarowej w zakresie doboru: stanowisk skanera, gęstości oraz sposobie skanowania.

Jednym z problemów związanych z post-processingiem danych pomiarowych, jest olbrzymia liczba zgromadzonych danych, zwłaszcza dla rozpatrywanych obiektów

wydłużonych. W zakresie zainteresowań autorów leży zamiana tego typu materiału na zgeneralizowaną postać funkcyjną, ułatwiającą przechowywanie i przetwarzanie danych. Duża szybkość wykonanych pomiarów może być dodatkowo zwiększona przez zastosowanie skanerów mobilnych, montowanych na wózku pomiarowym. W takim jednak wypadku następuje spadek dokładności prowadzonych obserwacji, co skłania autorów do wykonania w przyszłości stosownych testów. ◀

Tab.1.

Nr pkt	X	Y	H	prześwit [mm]	przechyłka [mm]
1	1015,402	1150,103	96,216	1433	2
2	1014,623	1145,127	96,270	1433	6
3	1013,839	1140,171	96,323	1435	7
4	1013,066	1135,237	96,371	1433	7
5	1012,282	1130,297	96,418	1431	11
6	1011,501	1125,364	96,475	1435	20
7	1010,719	1120,414	96,530	1442	33
8	1009,972	1115,563	96,569	1446	27
9	1009,213	1110,578	96,627	1444	35
10	1008,465	1105,626	96,669	1441	42
11	1007,755	1100,681	96,712	1438	52
12	1007,067	1095,721	96,750	1451	66
13	1006,418	1090,810	96,772	1447	61
14	1005,787	1085,831	96,798	1441	73
15	1005,180	1080,849	96,820	1439	82
16	1004,610	1075,877	96,849	1434	83
17	1004,075	1070,956	96,876	1441	83
18	1003,570	1065,965	96,911	1435	92
19	1003,094	1060,994	96,935	1435	101
20	1002,649	1056,030	96,954	1435	105
21	1002,231	1051,027	96,975	1447	116
22	1002,049	1048,657	96,982	1439	117
23	1001,850	1046,004	96,984	1443	110
24	1001,512	1041,014	96,991	1444	112
25	1001,219	1036,028	97,010	1439	102
26	1000,966	1031,050	97,038	1440	111
27	1000,763	1026,130	97,045	1444	114
28	1000,604	1021,357	97,063	1445	114
29	1000,477	1016,282	97,060	1439	105
30	1000,386	1011,285	97,076	1444	113

## Materiały źródłowe:

- [1] Sarti P., Vittuari L., Abbondanza C.: Laser Scanner and Terrestrial Surveying Applied to Gravitational Deformation Monitoring of Large VLBI Telescopes' Primary Reflector. Journal of Surveying Engineering vol.135, 2009
- [2] Berenyi, A., Lovas, T., Barsi A.: Terrestrial laser scanning – civil engineering applications. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symposium, Newcastle 2010
- [3] Lenda G.: Badanie zasięgu i dokładności dalmierzy bezzwierciadlanych - Examination of range and accuracy of reflectorless distancers. Geodezja 9(1), Kraków 2003
- [4] Boehler W.: Bordas Vicent M., Marbs A., 2005. Investigating laser scanner accuracy, <http://scanning.fh-mainz.de/scannertest/results300305.pdf>.
- [5] Voegtle T., Schwab I., Landes T.: Influence of different materials on the measurements of terrestrial laser scanner. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 37, Part B5, Pekin, Chiny 2008.
- [6] Schulz T. i Ingensand H.: Terrestrial laser scanning – investigations and applications for high precision scanning. Proceeding of the FIG Working Week-The Olympic Spirit in Surveying, Ateny, Grecja 2004
- [7] Szadkowski A., Mahrburg A., Sochacka Ż.: Mobilne skanowanie laserowe obiektów liniowych. Geodeta, 2010
- [8] Rieger P., Studnicka N., Pfennigbauer M.: Advances in mobile laser scanning data acquisition, FIG Congress, Sydney 2010
- [9] Milev I.: Processing of Optical Sensors and Laser Scanners Measures of Railroads Even at High Speed, FIG Congress, Marrakech 2011
- [10] Kampczyk A., Strach M.: Technika – laserowe skanowanie tunelu kolejowego. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, 2010. Dostęp: <http://www.kow.com.pl/pelnatrecs/technika-laserowe-skanowanie-tunelu-kolejowego-744/>