

**NAZIEMNY SKANING LASEROWY DROGOWYCH
OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH**

**TERRESTRIAL LASER SCANNING OF ROAD
INFRASTRUCTURE OBJECTS**

Michał Kędzierski, Piotr Walczykowski, Anna Fryškowska

Zakład Teledetekcji i Fotogrametrii, Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

SŁOWA KLUCZOWE: naziemny skaniny laserowy, fotogrametria bliskiego zasięgu, inżynieria drogowa, model 3D, rejestracja

STRESZCZENIE: Naziemny skaniny laserowy jest nieocenionym narzędziem inwentaryzacji obiektów architektonicznych, inżynieryjnych, instalacji przemysłowych i mas ziemnych. W przypadku, kiedy obiekt jest rozległy, znacznie oddalony od stanowiska pomiarowego, lub dostęp do niego jest utrudniony, skaniny laserowy może być jedyną możliwością wykonania tak dokładnych pomiarów. Za pomocą skanera możemy zbadać geometrię, wymiary i stan obiektów obiektu w relatywnie krótkim czasie. Prace badawcze przeprowadzone zostały na przykładzie dwóch warszawskich mostów: Siekierkowskiego i Świętokrzyskiego. Podstawowym problemem zachowania żądanej dokładności opracowań tego typu konstrukcji pojawia się już na etapie rejestracji poszczególnych skanów. Ruch uliczny, drgania czy brak odpowiedniej widoczności wykluczają zastosowanie tarcz celowniczych i zmuszają do stosowania odpowiedniej metody pomiaru i rejestracji danych. Ostatecznie, w przeprowadzonych badaniach błąd dopasowania skanów poszczególnych obiektów nie przekroczył dla obu mostów odpowiednio wartości 3 mm i 12 mm. Dodatkowo podjęto próbę wykorzystania informacji o intensywności powracającego sygnału, która może być źródłem informacji o stopniu zużycia lub uszkodzenia niektórych elementów konstrukcyjnych. Ocenie poddano próbki różnych materiałów, z których wykonane są obiekty mostowe i drogowe (stal, skorodowana blacha, beton, cegła itp.).

W artykule przedstawione zostały metody skaniny laserowego wykorzystane do badania konstrukcji mostu, rejestracji danych, tworzenia trójwymiarowych modeli i przekrojów tego typu obiektów.

1. PROBLEMATYKA WYKONANYCH BADAŃ

W przypadku, kiedy obiekt inżynieryjny lub architektoniczny jest rozległy, znacznie oddalony od stanowiska pomiarowego, lub dostęp do niego jest utrudniony, skaniny laserowy może być jedyną możliwością wykonania dokładnych pomiarów. Dzięki wysokiej precyzji i dużej prędkości pozyskiwania danych, można zbadać geometrię oraz wymiary obiektu w relatywnie krótkim czasie. Innym, równie istotnym aspektem pomiarów inżynieryjnych jest stan obiektów. Często zniszczona i częściowo uszkodzona infrastruktura drogowa stanowi duże zagrożenie dla użytkowników. Dlatego, badania jej stanu użytkowania stają się konieczne.

Ze względu na kształty i wielkości obiektów mostowych podstawą pomiarów metodą naziemnego skaningu laserowego (*Terrestrial Laser Scanning*) jest odpowiednie rozmieszczenie stanowisk oraz wcześniejsze zaplanowanie metody rejestracji pojedynczych skanów. Znaczne odległości, duży ruch uliczny, często powodujący drgania obiektu, brak możliwości doboru odpowiedniej konfiguracji stanowisk oraz zapewnienia widoczności tarcz celowniczych z obu stanowisk uniemożliwiają zastosowanie punktów sygnalizowanych, a tym samym zmuszają do wykorzystania metody rejestracji na szczegóły sytuacyjne, co obniża dokładność opracowania.

Częstym problemem podczas pomiarów obiektów mostowych związany bezpośrednio z możliwością rozplanowania stanowisk instrumentu jest również kąt pod jakim skanowane są newralgiczne części mostu takie jak pylony, czy liny naciągowe. Oprócz aspektu ich kształtu, utrudniającego pomiar pojawia się także problem materiału z jakiego są wykonane poszczególne elementy konstrukcji, jego zdolności odbijania wiązki lasera, a tym samym efektywny zasięg skaningu.

Prace badawcze dotyczące powyżej sformułowanych problemów zostały wykonane na przykładzie dwóch mostów na Wiśle: Świętokrzyskiego i Siekierkowskiego.

2. BADANIE ZASIĘGU I KĄTA SKANOWANIA

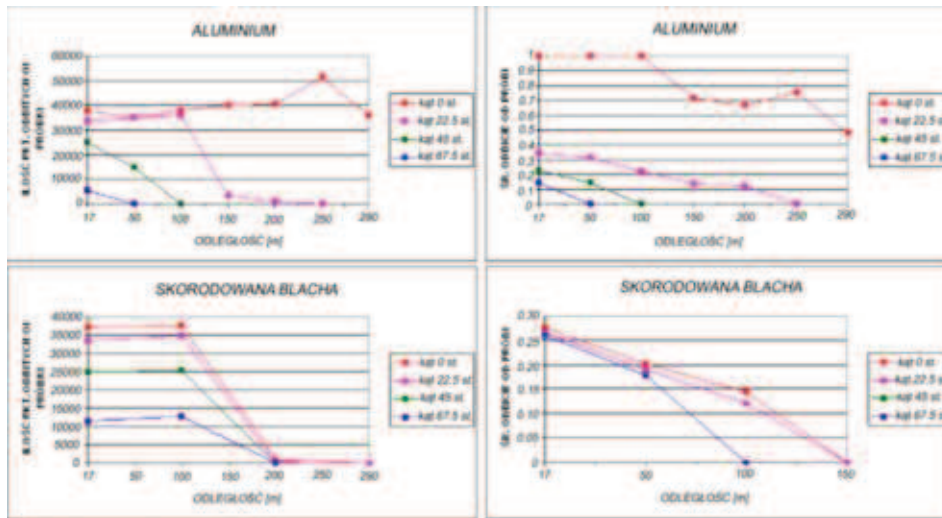
Stan materiału z jakiego wykonany jest obiekt ma wpływ nie tylko na wytrzymałość konstrukcji, ale z punktu widzenia pomiarów skaningowych również na odbijanie, jak i na rozpraszanie wiązki laserowej. Bardzo często wiąże się to z ograniczeniem zasięgu skanera i efektywnością prac. W związku z tym, przeprowadzone zostały badania mające na celu określenie użytkowego zasięgu skanowania, czyli maksymalnej odległości na jakiej otrzymamy rzetelną informację o powracającym sygnale. W tym celu w badaniach uwzględniono typ powierzchni odbijającej oraz kąt pod jakim pada promień laserowy. Do testów wykorzystano próbki materiałów, z jakich często wykonywane są obiekty infrastruktury drogowej i mostowej.

W artykule przedstawiono wyniki skanowania laserowego powierzchni wybranych materiałów, takich jak: blacha aluminiowa, skorodowana blacha stalowa (ciemna, chropowata powierzchnia), drewno i PVC. Badania przeprowadzone zostały na różnych odległościach (17, 50, 100, 150, 200, 250, 290 metrów) między próbkami a skanerem oraz przy różnych kątach poziomych (zmiana kąta co $22,5^\circ$ w zakresie od 0° do $67,5^\circ$) ustawienia próbek względem padającej wiązki lasera. Wyniki pomiarów pozwoliły obliczyć dokładną liczbę punktów zarejestrowanych przez skaner a także określić wartość intensywności obicia wiązki na danej powierzchni. Zestawienie parametrów ilustruje tabela 1.

Tabela 1. Zestawienie intensywności odbicia wiązki lasera od przykładowych materiałów w zależności od odległości i kąta obrotu skanera

Odległość (m)	Kąt (stopnie)	Aluminium	Skorodowana blacha	Drewno	PVC
		Intensywność odbicia	Intensywność odbicia	Intensywność odbicia	Intensywność odbicia
17	0	1	0.2766	0.5598	0.8185
	22.5	0.3418	0.2658	0.5558	0.6274
	45	0.2278	0.2605	0.5054	0.5542
	67.5	0.1457	0.2604	0.4065	0.3887
50	0	1	0.2015	0.3685	0.5813
	22.5	0.3112	0.1897	0.3689	0.4131
	45	0.1440	0.1786	0.3411	0.3705
	67.5	0	0.1793	0.2895	0.2845
100	0	0.9985	0.1459	0.2608	0.3774
	22.5	0.2196	0.1210	0.2609	0.2797
	45	0	0	0.2473	0.2616
	67.5	0	0	0.2059	0.1998
150	0	0.7117	0	0.2159	0.2923
	22.5	0.1352	0	0.2133	0.2363
	45	0	0	0.1940	0.2116
	67.5	0	0	0.1301	0.1259
200	0	0.6705	0	0.1691	0.2632
	22.5	0.1255	0	0.1702	0.1974
	45	0	0	0.1369	0.1634
	67.5	0	0	0	0
250	0	0.7525	0	0.1294	0.2430
	22.5	0	0	0.1261	0.1530
	45	0	0	0.1103	0.1222
	67.5	0	0	0	0
290	0	0.4811	0	0.1195	0.2253
	22.5	0	0	0.1125	0.1281
	45	0	0	0	0.1127
	67.5	0	0	0	0

Najlepszą charakterystyką pod względem zdolności odbijania wiązki wykazały dwa materiały: drewno i PVC. Nawet przy największych odległościach i przy dużych kątach zwrotu, intensywność odbicia oraz liczba zarejestrowanych punktów świadczą, że materiały te są możliwe do pomierzenia. Zmienność liczby zarejestrowanych punktów dokładnie ilustruje rysunek 1. Dla porównania, użyte materiały: aluminium i skorodowana stal wykazują odmienne cechy. Powierzchnie ciemne i chropowate (skorodowana blacha) powodują prawie dwukrotne zmniejszenie zasięgu, tym znaczniejsze, im większe są nierówności materiału i im ostrzejsze kąty padania wiązki. Na wykresie widać, że zasięg widoczności próbki blachy kończy się praktycznie na odległości 100-150 m i w miarę zwiększania kąta skręcenia materiału spada aż do 50 metrów.



Rys. 1. Wykresy przedstawiające ilość punktów odbitych oraz średnie intensywności odbicia od próbek aluminium i skorodowanej blachy stalowej

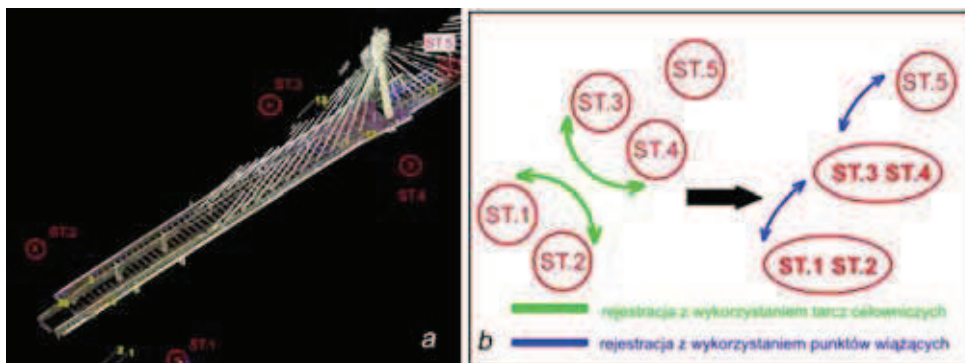
Natomiast dla powierzchni jasnych i dobrze odbijających promienie zasięg jest bardzo duży, ale tylko w przypadku pomiaru prostopadłego. Aluminium posiada także duże zdolności rozpraszające, co zauważalne jest już w przypadku celowych o długości 150 m oraz kątach obrotu względem skanera od 45°.

3. BADANIE WARUNKÓW SKANOWANIA OBIEKTÓW TESTOWYCH

Fundamentalną kwestią opracowań obiektów tak rozległych jak mosty jest lokalizacja stanowisk pomiarowych, wcześniejszy dobór metody pomiaru oraz typu późniejszego łączenia i orientacji skanów, czyli tak zwanej rejestracji skanów. Dane pozyskane zostały za pomocą impulsowego skanera laserowego Leica ScanStation2 z rozdzielczością skanowania 5 mm. Skaning przeprowadzony został dla dwóch mostów zbudowanych na Wiśle w Warszawie: mostu Świętokrzyskiego oraz Siekierskiego.

3.1. Most Świętokrzyski

Most Świętokrzyski posiada konstrukcję wantungową, wspartą na 90 metrowym pylonie, na którym zaczepiono 48 lin podtrzymujących jego płytę. Pylon stoi na prawym brzegu Wisły, zaś po lewej stronie wsparty jest na dwóch podporach osadzonych w dnie rzeki. Pomiar mostu Świętokrzyskiego wykonano z pięciu stanowisk. Ich rozmieszczenie oraz schemat łączenia kolejnych skanów przedstawia rysunek 2a i 2b.



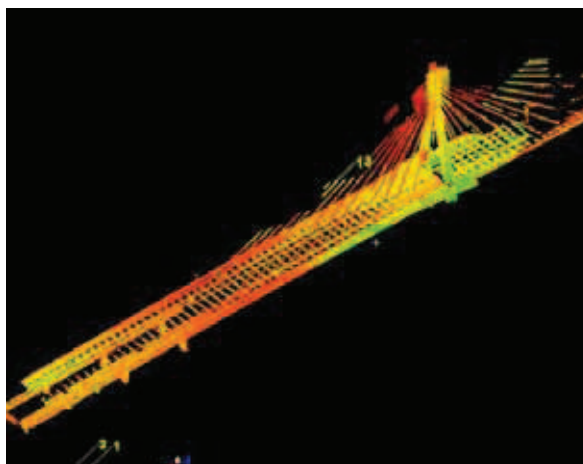
Rys. 2a. Rozmieszczenie stanowisk skanera (ST.). Rys. 2b. Metody rejestracji poszczególnych skanów.

Całkowita rejestracja obiektu przeprowadzona została metodą mieszaną, w dwóch etapach. Pierwszy etap obejmował część wschodnią (ST.1 i ST.2) i drugi – część zachodnią (ST.3, ST.4 i ST.5). Skany ze stanowisk ST.1 i ST.2 oraz odpowiednio ST.3 i ST.4 zostały zarejestrowane parami metodą wykorzystującą automatyczne rozpoznanie i identyfikację odpowiadających sobie tarcz celowniczych (*target registration*), natomiast stanowisko ST.5 połączono ze stanowiskami ST.3 i ST.4 – na podstawie manualnie wybieranych punktów wiążących (metodą *cloud registration*). Tym samym sposobem, ze względu na dużą rozpiętość mostu, dopasowano do siebie połączone skany obu stron rzeki. Lewa strona mostu została pomierzona z wykorzystaniem pięciu tarcz celowniczych, natomiast prawa na podstawie czterech. Wyniki poszczególnych etapów przedstawione są w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki poszczególnych etapów rejestracji skanów mostu Świętokrzyskiego

	CAŁKOWITY BŁĄD ŚREDNI [M]	METODA REJESTRACJI
ST. 1 – ST. 2	0.003	<i>Target registration</i>
ST. 3 – ST. 4	0.002	<i>Target registration</i>
ST. 3 – ST. 4 – ST. 5	0.010	<i>Target + Cloud registration</i>
LEWA –PRAWA STRONA	0.002	<i>Cloud registration</i>

Największe błędy wzajemnej orientacji i dopasowania skanów pojawiały się w metodzie *Cloud Registration*, a także w przypadku niektórych tarcz celowniczych ze względu na niekorzystne nachylenie ich powierzchni i usytuowanie w czasie pomiaru (0.004 m). Duże błędy rejestracji (rzędu 0.010 m) w metodzie *Cloud Registration*, a tym samym w metodzie mieszanej wynikają z faktu, iż wskazane (teoretycznie tożsame) punkty wiążące, w rzeczywistości były dwoma różnymi punktami w dwóch różnych chmurach punktów. Środki tarcz celowniczych wyszukane automatycznie, zawsze reprezentowane są jednoznacznie przez ten sam punkt. Dlatego punkty wiążące wybierane ze szczegółów sytuacyjnych powinny być możliwie jednoznaczne i dobrze widoczne ze stanowisk, które będą orientowane względem siebie. Pewne szczegóły mogą być przewidziane do pełnienia roli punktów wiążących jeszcze w czasie pomiarów. Można wówczas „doskanować” wybrane elementy obiektu z dużo wyższą dokładnością tak, aby posłużyły one później za elementy orientujące różne skany.

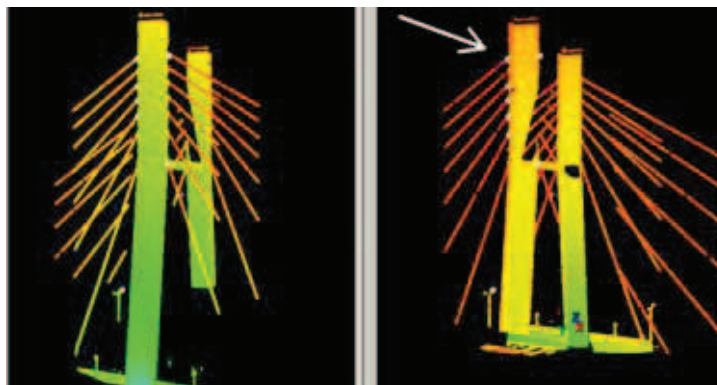


Rys. 3. Wyniki całkowitej rejestracji pięciu skanów mostu Świętokrzyskiego

Całkowita rejestracja pięciu skanów mostu Świętokrzyskiego (rys. 3) przeprowadzona została ze średnim błędem wpasowania 0.002 m.

3.2. Most Siekierkowski

Most Siekierkowski jest najdłuższym mostem podwieszanym w Polsce. Konstrukcja opiera się na dwóch pylonach w kształcie litery H, o wysokości 90 metrów, a do pylonów przymocowane są 54 liny nośne. Dwa skany mostu zostały zarejestrowane metodą *Cloud Registration* na podstawie ośmiu punktów dopasowania, zlokalizowanych na przyłączach lin nośnych oraz latarni przy pasie drogowym.

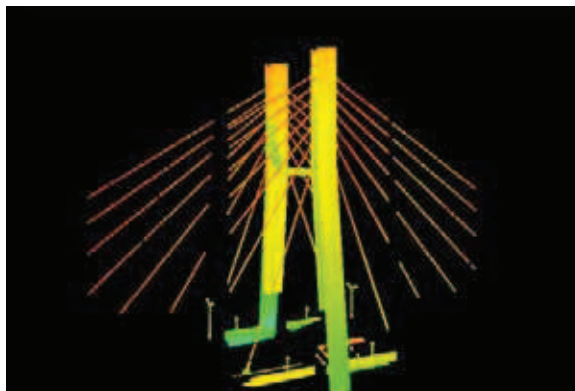


Rys. 4. Wybór punktów wiążących na przyłączach lin mostu Siekierkowskiego

Proces wzajemnego wpasowania skanów został przeprowadzony dla ponad 38 000 punktów, z błędem średnim równym 0.012 m. Dla porównania przeprowadzono ponowną rejestrację, bazującą tylko na czterech punktach wiążących, umiejscowionych wyłącznie na szczycie jednego z pylonów. Dała ona wynik obarczony błędem równym

0.086 m. Niedopasowanie wykorzystanych skanów można było rozpoznać na podstawie oceny wizualnej.

W tym przypadku nie zastosowano tarcz celowniczych, między innymi z powodu drgań wywołanych dużym ruchem ulicznym i utrudnioną wizurą. Rejestracja została wykonana tylko w oparciu o chmury punktów (*cloud registration*), bazując na wspólnych elementach, cechach geometrycznych oraz poszczególnych punktach, mających to samo położenie na różnych skanach mierzonego obiektu.



Rys. 5. Wyniki całkowitej rejestracji skanów dla mostu Siekierkowskiego

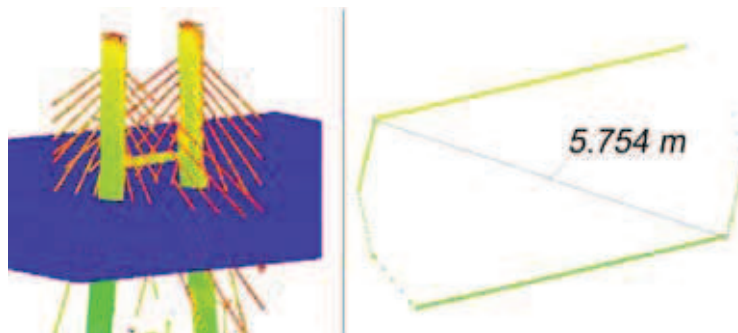
Na podstawie przeprowadzonych badań obu mostów, można stwierdzić, że na efektywność dopasowania wpływają następujące czynniki:

1. Geometria punktów wiążących, czyli ich rozmieszczenie na obszarze całego skanu oraz obiektu. Nawet jeśli poszczególne chmury punktów dają pełne pokrycie, a punkty wiążące nie będą rozmieszczone równomiernie na całym skanie (tylko umiejscowione na przykład w jednej jego części), proces rejestracji da nieprawidłowe efekty, obarczone dużym błędem. Bardzo ważne jest również, aby punkty wiążące nie leżały w jednej płaszczyźnie. Błędna geometria punktów wspólnych uniemożliwi późniejszy proces obróbki, jak na przykład modelowanie obiektu czy nakładanie tekstury.
2. Liczba pokrywających się punktów oraz tarcz celowniczych, determinuje dokładność rejestracji. Wystarczającą ilością są trzy punkty wspólne (szczegóły lub tarcze), ale wraz ze wzrostem ich liczby rośnie dokładność dopasowania do siebie poszczególne chmury punktów.
3. Odpowiedni dobór punktów wiążących oraz usytuowanie tarcz celowniczych.

4. PRZEKROJE POPRZECZNE I MODELE 3D

Rysunki przekrojów poprzecznych i podłużnych drogowych obiektów inżynierskich można także zrealizować na podstawie chmur punktów pozyskanych techniką naziemnego skaningu laserowego. Ze względu na to, że skanowany obiekt jest w rozmiarach naturalnych wykonuje się dowolnej grubości przekroje każdej części

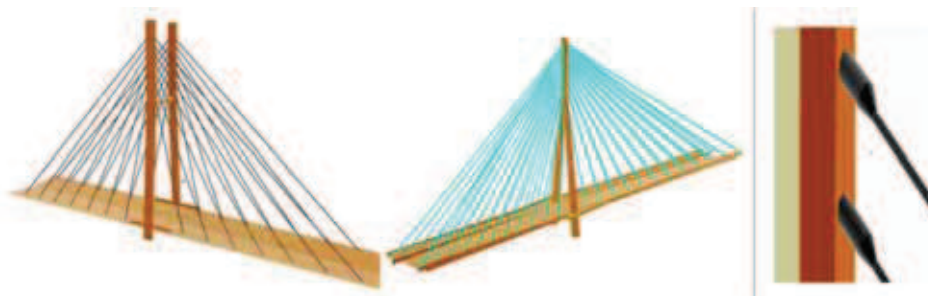
konstrukcji za pomocą wcześniej dowolnie zdefiniowanej płaszczyzny oraz zwymiarowania otrzymanego przekroju. Jest to jedna z najbardziej przydatnych funkcji w wielu dziedzinach – od inwentaryzacji obiektów drogowych i przemysłowych, aż po rekonstrukcje architektoniczne i archeologiczne.



Rys. 6. Przekrój poprzeczny fragmentu konstrukcji mostu Siekierkowskiego

Przekroje te umożliwiają obliczenia lub pomiar wybranych elementów mostu, a także stworzenie rzutu czy zwymiarowanie badanej powierzchni drogowej lub mostowej.

Innym ważnym aspektem pomiarów laserowych jest tworzenie trójwymiarowych modeli obiektów mostowych łącznie z najdrobniejszymi elementami ich konstrukcji. Modele przedstawione na rysunku 7 stworzone zostały w programie Cyclon 5.8. Na podstawie poszczególnych grup punktów tworzy się figury geometryczne (powierzchnie płaskie i bryły) wchodzące w skład poszczególnych elementów konstrukcyjnych.



Rys. 7. Modele 3D obu mostów: Siekierkowskiego i Świętokrzyskiego oraz fragment modelowanego przyłącza lin

Takie stworzenie modeli 3D pozwala na automatyzację procesu wektoryzacji. Oprogramowanie umożliwia wymianę danych pomiędzy modułami programu Cyclone, a programami AutoCAD oraz Microstation (SE, /J iV8) za pomocą formatu COE (*Cyclone Object Exchange*). Przekaz danych może odbywać się w obu kierunkach. Zamodelowane struktury w programie Cyclone eksportuje się do środowiska Microstation, w postaci gotowych figur geometrycznych, co eliminuje proces ponownej wektoryzacji.

5. PODSUMOWANIE

Naziemny skaning laserowy jest bez wątpienia najnowocześniejszym, bardzo szybkim i precyzyjnym narzędziem pomiarowym współczesnej geodezji i fotogrametrii. Potwierdzają to przypadki, kiedy obiekty znajdują się w znacznej odległości od stanowiska pomiarowego lub warunki otoczenia mogą stwarzać pewne zagrożenie. Warunkuje to bowiem nie tylko szybkość przeprowadzanych prac, ale często jakość, dokładność lub możliwość ich wykonania.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że na efektywność dopasowania wpływają nie tylko geometria i rozmieszczenie stanowisk pomiarowych, ale także metody rejestracji. Najmniej dokładna metoda *Cloud Registration* często daje niewystarczające pod względem dokładności wyniki, ale nie wymaga tym samym posiadania tarcz celowniczych. Wyniki wykonanych badań mogą posłużyć do dalszych prac badawczych również innych konstrukcji: inżynierskich, architektonicznych czy przemysłowych.

6. LITERATURA

Brenner C., Dold C., 2007. Automatic relative orientation of terrestrial laser scans using planar structures and angle constraints, ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, Finland.

Kędzierski M., Walczykowski P., Fryškowska A., 2008. Skanowanie zabytków, Skanery laserowe. *GEODETA*, Warszawa.

TERRESTRIAL LASER SCANNING OF ROAD INFRASTRUCTURE OBJECTS

KEY WORDS: terrestrial laser scanning, close range photogrammetry, road engineering, 3D model, registration

Summary

Terrestrial laser scanning is a very useful tool in inventoring architectural, engineering, and industrial objects and buildings. Sometimes, when an object is bright and difficult to access, the only possibility of measuring it is through scanning. The high precision and high speed of scanning make it possible to acquire information about the object's geometry and dimensions in a short time. The condition of the object is another aspect, an important one as well. The destroyed or damaged road infrastructure is dangerous, therefore it is necessary to check its condition.

Experiments were made by scanning two bridges in Warsaw, the Świętokrzyski and the Siekierkowski. Point clouds were acquired from several stations. A major problem appeared during scan registration. Street traffic, vibrations and/or bad visibility disabled the targets used and made it necessary to apply other measurements methods. Finally, the recording error in the experiments did not exceed 0.003 and 0.012 m for the Świętokrzyski and the Siekierkowski bridge, respectively.

Additionally, an attempts was made at using information on signal intensity. This information can be useful when it is desired to assess the condition of some construction elements. Samples of different construction materials: aluminum, corroded steel, brick, wood, PVC, and others were tested in a test field created. Not only was the usable scanning rate determined, but the possible scanning angle was identified as well. The paper discusses the results obtained and describes the samples tested. In the measurements, appropriate location of stations as well as geometric and material conditions allowed to use the scanning range of 150 m.

The paper presents also the methods for laser scanning of bridge constructions, scan registrations as well as generation of 3D models and cross-sections.

dr inż. Michał Kędzierski
e-mail: mkedzierski@wat.edu.pl
tel./fax: +4822 6837718

dr inż. Piotr Walczykowski
e-mail: pwalczykowski@wat.edu.pl
tel./fax: +4822 6839021

mgr inż. Anna Fryškowska
e-mail: afryskowska@wat.edu.pl
tel./fax: +4822 6837148