



Michalina WILIŃSKA

BADANIE PRZEMIESZCZEŃ TYMCZASOWEJ PRZEPRAWY MOSTOWEJ TYPU BLG-67 Z WYKORZYSTANIEM TECHNIKI NAZIEMNEGO SKANINGU LASEROWEGO

Streszczenie

Wielomilionowe chmury punktów są coraz częściej wykorzystywane do badań obiektów w celu monitorowania ich przemieszczeń. Przedmiotem badań poruszonych w niniejszym artykule jest tymczasowa przeprawa mostowa typu BLG-67, która podlegała cyklicznym próbom obciążeniowym masą 30 ton. Została ona pomierzona w dwóch położeniach (p_0 i p_1) z wykorzystaniem impulsowego naziemnego skanera laserowego Leica ScanStation 2. Fragmenty pozyskanych chmur punktów zostały zamodelowane, a następnie poprzez pomiar odległości pomiędzy odpowiadającymi sobie płaszczyznami wyznaczono przemieszczenia poszczególnych elementów konstrukcji. Celem niniejszego opracowania jest udowodnienie, iż dane z naziemnego skaningu laserowego mogą być wykorzystane do wyznaczenia przemieszczeń obiektów tego typu z milimetrową dokładnością.

WSTĘP

Naziemny skaning laserowy jest jedną z nowoczesnych technik pomiarów geodezyjnych, która znajduje zastosowanie w coraz to nowszych dziedzinach nauki i techniki. Począwszy od lat 90-tych XX wieku, kiedy to na rynek wprowadzono pierwszy naziemny skaner laserowy, zaobserwować można intensywny wzrost jego zastosowań. Możliwości, które wyróżniają metodę naziemnego skaningu laserowego spośród wielu innych to m.in. bardzo szybkie, precyzyjne i nieinwazyjne pozyskiwanie informacji przestrzennych o obiektach bez konieczności ingerencji w ich strukturę. Zasada działania skanerów laserowych polega na wyznaczeniu w krótkim czasie współrzędnych X, Y, Z oraz informacji o intensywności odbicia sygnału tysięcy a nawet milionów punktów. Wynikiem pomiaru jest trójwymiarowa chmura punktów będąca realistyczną wizualizacją skanowanego obiektu.

Dane z naziemnego skaningu laserowego dotyczą różnego rodzaju zadań, jak np. pomiary obiektów inżynierijno-drogowych [6], inwentaryzacja obiektów architektonicznych i zabytkowych [1][7], badania przemieszczeń [8], wyznaczenie deformacji obiektów budowlanych [4], monitorowanie osuwisk ziemnych [3] i inne. Kolejne grupy prac dotyczą analiz dokładności wyników pomiarów i danych pozyskanych z naziemnych skanerów laserowych [10], a także możliwości integracji danych z NSL z innymi systemami [2].

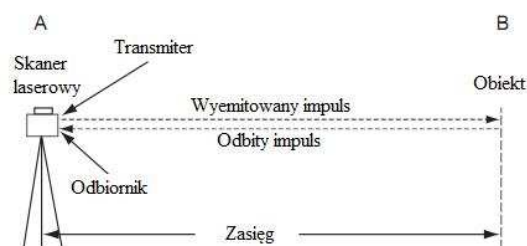
Tematyka niniejszego artykułu odnosi się do badania przemieszczeń tymczasowej zapory mostowej poddanej próbom obciążeniowym. W związku z czym można postawić tezę,

iż dane z naziemnego skaningu laserowego mogą być wykorzystane do wyznaczenia przemieszczeń konstrukcji typu przęsła mostowe z dokładnością milimetrową.

1. NAZIEMNY SKANER LASEROWY - ZASADA DZIAŁANIA

Podstawową zasadą, na której opiera się działanie skanera laserowego, jest pomiar odległości oraz kątów, umożliwiający wyznaczenie współrzędnych punktów w przestrzeni. Zasada pracy naziemnych skanerów laserowych jest zależna od sposobu pomiaru odległości przez instrument, a przez to również od sposobu wyznaczania współrzędnych punktów w przestrzeni. Wykorzystanym w pracach pomiarowych urządzeniem był skaner impulsowy *Leica ScanStation 2*. Zasada działania tych urządzeń opiera się na elektronicznym pomiarze czasu przebiegu impulsu elektromagnetycznego od urządzenia do obiektu i z powrotem. Stąd technika ta nazywana jest również metodą „czasu przelotu” (ang. „*Time Of Flight*” – *TOF*). Zasięg ich działania mieści się w zakresie od kilku (ok. 3 m) do kilkuset metrów (ok. 300 m), jednak osiągnięte dokładności pomiaru są niższe w stosunku do skanerów fazowych. Pomimo tego ograniczenia ich dokładność nie ustępuje klasycznym pomiarom geodezyjnym i dochodzi do milimetrowych dokładności.

Podstawowym elementem strukturalnym skanera jest dalmierz impulsowy, który w określonym interwale czasu wysyła wiązkę światła, która odbija się od obiektu. Następnie mierzony jest czas przebiegu drogi przez impuls do obiektu i z powrotem (rys. 1).



Rys. 1. Zasada działania impulsowego naziemnego skanera laserowego

Źródło: [5]

Odległość od skanera do mierzonego obiektu obliczana jest z zależności (1) [11].

$$R = \frac{v \cdot t}{2} \quad (1)$$

gdzie: R - odległość obiektu od instrumentu,

v - prędkość fali elektromagnetycznej równa 299 792 458 m/s,

t - interwał czasu pomierzony pomiędzy wysłaniem a powrotem wiązki lasera.

W czasie pomiaru wybranego obiektu skaner rejestruje kąty odchylenia wiązki elektromagnetycznej i odległość do obiektu, dzięki czemu otrzymuje się parametry niezbędne do rozwiązania przestrzennego wcięcia biegunowego i obliczenia współrzędnych 3D zarejestrowanych punktów. Proces ten jest w większości przypadków całkowicie zautomatyzowany i wykonywany natychmiast przez oprogramowanie skanera. Bezpośrednim wynikiem skanowania laserowego jest chmura punktów, czyli zbiór punktów pomierzonych w przestrzeni 3D, będących reprezentacją rzeczywistej geometrii obiektów. Obliczone współrzędne punktów są średnią z odbić sygnału lasera i pomierzonych kątów odchylenia wiązki. Chmura punktów jest zapisywana w skali rzeczywistej, w układzie lokalnym skanera

lub w dowolnie zdefiniowanym układzie matematycznym. Można ją transformować do wybranego układu wykorzystując minimum trzy punkty o znanych współrzędnych przestrzennych, które można pozyskać przy wykorzystaniu innych technik pomiarowych, m. in. z pomiaru tachimetrycznego czy GPS.

Leica ScanStation 2 (rys. 2) jest naziemnym skanerem impulsowym wyposażonym w laser wysyłający wiązkę widzialną koloru zielonego ($\lambda = 583 \text{ nm}$). Według producenta skaner charakteryzuje się dokładnością pomiaru położenia punktu oraz odległości odpowiednio na poziomie $\pm 6 \text{ mm}$ oraz $\pm 4 \text{ mm}$ dla pomiarów wykonywanych z odległości z zakresu od 0 do 50 m od obiektu. Jednak ze względu na fizyczną naturę wiązki lasera możliwe jest osiągnięcie dokładności wyższych. Dokładność pomiaru kierunku poziomego, jak i pionowego wynosi 60 mikroradianów na poziomie ufności 1 sigma, natomiast zasięg skanera dochodzi do 300 metrów [13].



Rys. 2. Naziemny skaner laserowy *Leica ScanStation 2*

Źródło: Opracowanie własne

2. PRACE POMIAROWE

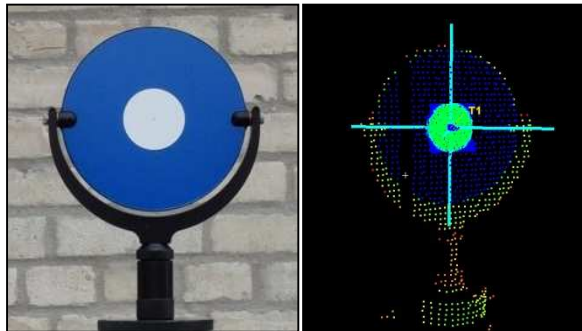
Przedmiotem badań poruszonych w niniejszym artykule jest tymczasowa przeprawa mostowa typu BLG-67 udostępniona przez Wydział Mechaniczny WAT (rys. 3). Podlegała ona cyklicznym próbom obciążeniowym masą 30 ton za pomocą podnośników hydraulicznych. Została pomierzona w dwóch położeniach – najwyższym (p_0) i najniższym (p_1), z tego samego stanowiska pomiarowego. W wyniku pomiarów otrzymano dwie chmury punktów P_0 i P_1 , w obu przypadkach gęstość siatki punktów wynosiła 1 mm dla odległości skanowania równej 5 m.



Rys. 3. Tymczasowa przeprawa mostowa typu BLG-67

Źródło: Opracowanie własne

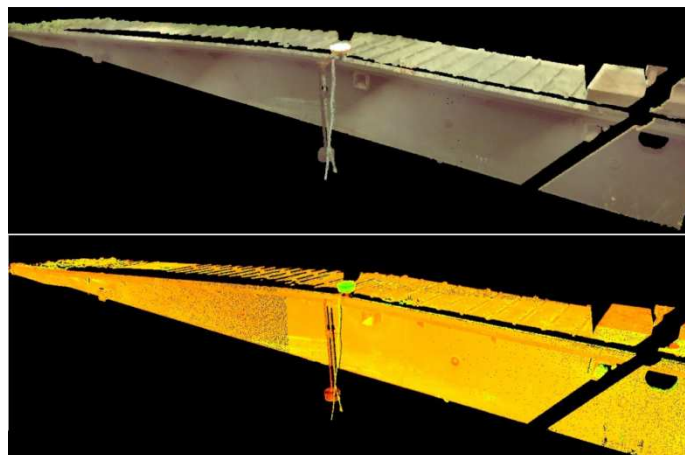
Oprócz pomiaru samego przęsła przeprawy mostowej pozyskane zostały również chmury punktów przedstawiające specjalne znaki sygnalizowane (rys. 4), które wykorzystane zostaną do późniejszej transformacji skanów. Cztery tarcze celownicze HDS pomierzono z gęstością siatki chmury punktów poniżej 1 mm zarówno przy położeniach przęsła p_0 oraz p_1 .



Rys. 4. Znak sygnalizowany HDS oraz przedstawiająca go chmura punktów

Źródło: Opracowanie własne

Fragmety wynikowej chmury punktów pozyskanej przy położeniu przęsła p_0 w barwach naturalnych oraz w barwach w funkcji intensywności odbicia sygnału zostały przedstawione na rysunku 5. Wizualizacja chmury punktów w barwach pozyskanych z wykonanych przez skaner zdjęć cyfrowych jest niezwykle korzystna w kwestii identyfikacji poszczególnych elementów obiektu, co w kolejnych etapach przekładać się może na dokładność wyznaczanych przemieszczeń. Natomiast wyświetlenie chmury punktów w kolorach zależnych od intensywności odbicia sygnału od obiektu jest pomocne w interpretacji materiału, z jakiego wykonany jest dany obiekt.



Rys. 5. Fragment pozyskanej chmury punktów w barwach naturalnych oraz w kolorach w funkcji intensywności odbicia sygnału

Źródło: Opracowanie własne

3. ORIENTACJA CHMUR PUNKTÓW

Mimo, iż chmury punktów przedstawiające przęsło przeprawy mostowej w obu przypadkach pozyskane były z tego samego stanowiska, są one zorientowane w dwóch różnych układach lokalnych. Aby można było dokonać na ich podstawie pomiaru przemieszczeń, należy przetransformować je do jednego wspólnego układu współrzędnych. W celu zminimalizowania liczby przetworzeń skanów (co negatywnie wpłynęłoby na

dokładność położenia pojedynczego punktu), chmura punktów P_1 , przedstawiająca obiekt w położeniu p_1 , została przetransformowana do układu współrzędnych skanu P_0 . Proces ten został wykonany w oprogramowaniu dedykowanym do obróbki danych pozyskanych przez skaner *Leica ScanStation 2 - Leica HDS Cyclone*. Orientację chmur punktów przeprowadzono na podstawie skanów czterech specjalnych tarcz celowniczych HDS poprzez zastosowanie algorytmu ICP (ang. *Iterative Closest Point*). Jest to algorytm iteracyjny, który w pierwszej kolejności koreluje punkty między dwoma skanami względem zadanego kryterium, następnie szacuje parametry macierzy transformacji i według niej transformuje jedną z chmur. Jeżeli błąd dopasowania obu zbiorów punktów ma wartość powyżej zadanego kryterium, algorytm wykonywany jest kolejny raz [9]. Wyniki transformacji zostały przedstawione w tabeli 1. Orientacja układu współrzędnych została przedstawiona na rysunku 6.



Rys. 6. Zorientowanie układu współrzędnych względem badanego obiektu

Źródło: Opracowanie własne

Tab. 1. Wyniki transformacji chmur punktów

ID znaku sygnalizowanego	Wektor błędu			$\sqrt{dX^2 + dY^2 + dZ^2}$ [mm]
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	
T1	0.1	0.3	0.0	0.3
T2	0.2	0.2	0.1	0.3
T3	-0.3	-0.1	-0.1	0.3
T4	-0.1	-0.5	0.1	0.5
Błąd średni	$m_x = \pm\sqrt{\frac{\sum dX^2}{4}}$	$m_y = \pm\sqrt{\frac{\sum dY^2}{4}}$	$m_z = \pm\sqrt{\frac{\sum dZ^2}{4}}$	$m_{XYZ} = \pm\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}$
	± 0.2	± 0.3	± 0.1	± 0.4

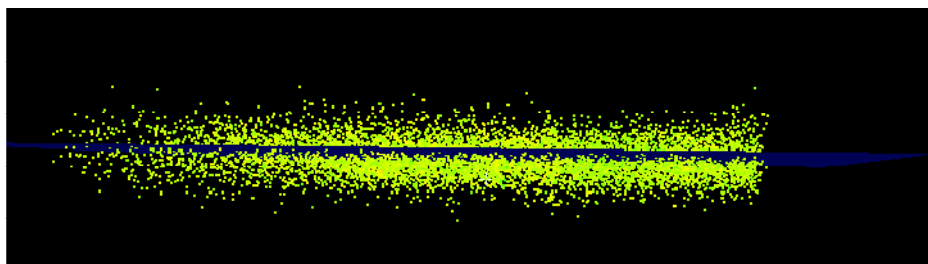
Źródło: Opracowanie własne

Analizując powyższą tabelę można stwierdzić, że wartości odchyłek oraz błędów nie przekraczają 1 mm, co świadczy o tym, iż transformacja wykonana została prawidłowo oraz z wysoką dokładnością. Jedynie w przypadku tarczy celowniczej T4 można dostrzec błąd o wartości niewiele wyższej, niż w pozostałych przypadkach. Sytuacja ta może być skutkiem niewielkiej zmiany położenia znaku sygnalizowanego, zamocowanego na statywie ustawionym na grząskim podłożu, której przyczyną mógł być silny wiatr w trakcie prac pomiarowych. Ostatecznie transformacja chmur punktów została zakończona z błędem średnim ± 0.4 mm.

4. WYZNACZENIE PRZEMIESZCZEŃ FRAGMENTÓW OBIEKTU

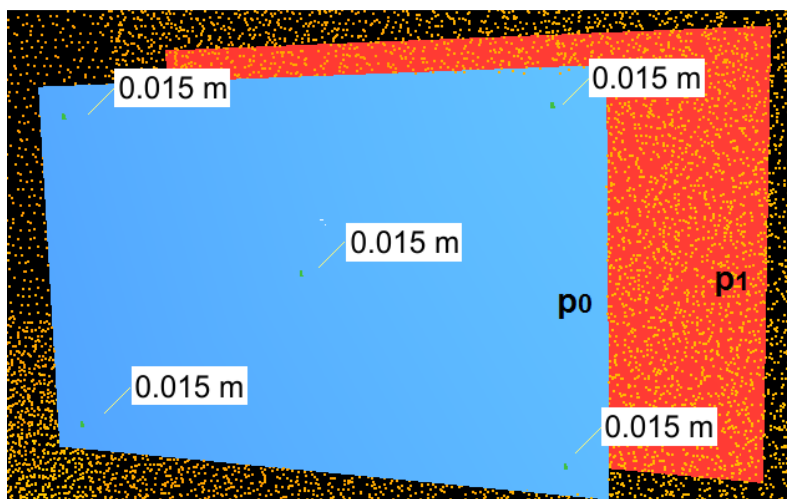
Kolejnym etapem prac badawczych było wyznaczenie przemieszczenia fragmentów tymczasowej przeprawy mostowej typu BLG-67. Ze względu na fakt, iż chmura punktów charakteryzuje się pewną określoną grubością, wyznaczenie przemieszczeń na podstawie porównania współrzędnych pojedynczych punktów byłoby niejednoznaczne oraz niezwykle problematyczne (problem identyfikacji tożsamy punktów) (rys. 7).

Dlatego też w celu wyznaczenia przemieszczeń przęsła mostowego poprzez aproksymację chmur punktów płaszczyznami, zamodelowano wybrane fragmenty skanów P_1 i P_2 . Następnie pomierzono odległości od modeli wygenerowanych w chmurze punktów P_0 do modeli wygenerowanych w chmurze punktów P_1 (rys. 8). W kierunkach X, Y, Z pomierzono pięciokrotnie po pięć odcinków (rys. 9). Wyniki przedstawiono w tabeli 2.



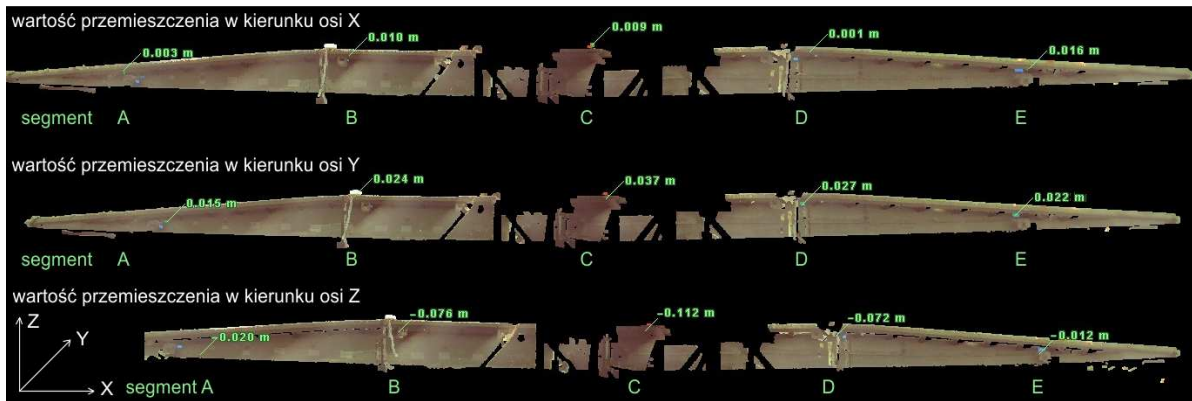
Rys. 7. Chmura punktów wraz z płaszczyzną aproksymującą

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 8. Płaszczyzny zamodelowane dla segmentu A (pomiar w kierunku osi Y)

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 9. Pomierzone wartości przemieszczeń

Źródło: Opracowanie własne

Po analizie wyników badań można stwierdzić, iż w poszczególnych częściach obiektu przemieszczenia charakteryzują się różnymi wartościami. Pomimo faktu, iż siła nacisku działała pionowo w dół, zmiany zaszły we wszystkich kierunkach. Największe wartości przemieszczeń można zaobserwować wzdłuż osi Z, co związane jest z kierunkiem działania siły odkształcającej. Błąd średni pomierzonych przemieszczeń oscyluje wokół wartości ± 0.5 mm, co potwierdza wysoką dokładność wyników pomiarów. Przedstawione wyniki badań są wartościami mierzonymi punktowo, dlatego też w razie potrzeby wykonania bardziej szczegółowej charakterystyki przemieszczeń, należałoby zamodelować cały obiekt.

W czasie pomiarów naziemnym skanerem laserowym, zespół Centrum Geomatyki Stosowanej wykonał pomiary przemieszczeń obiektu z wykorzystaniem niwelatora precyzyjnego, które mogą być potraktowane jako dane porównawcze i kontrolne [12].

Tab. 2. Pomierzone wartości przemieszczeń

Wartość przemieszczenia [mm]					
W kierunku osi X	A	B	C	D	E
Pomiar 1	3	10	9	1	16
Pomiar 2	2	11	9	1	16
Pomiar 3	3	9	10	2	16
Pomiar 4	3	10	8	1	15
Pomiar 5	2	10	9	1	17
Średnia [mm]	2.6	10.0	9.0	1.2	16.0
Błąd średni m_0 [mm]	± 0.5	± 0.7	± 0.7	± 0.4	± 0.7
W kierunku osi Y	A	B	C	D	E
Pomiar 1	15	24	37	27	22
Pomiar 2	15	24	38	27	22
Pomiar 3	15	24	37	26	23
Pomiar 4	15	23	37	27	22
Pomiar 5	15	23	38	26	22
Średnia [mm]	15.0	23.6	37.4	26.6	22.2
Błąd średni m_0 [mm]	± 0.0	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4
W kierunku osi Z	A	B	C	D	E
Pomiar 1	-20	-76	-112	-72	-12
Pomiar 2	-21	-76	-112	-72	-11
Pomiar 3	-20	-75	-113	-72	-11
Pomiar 4	-19	-75	-111	-72	-12
Pomiar 5	-20	-76	-112	-73	-12
Średnia [mm]	-20.0	-75.6	-112.0	-72.2	-11.6
Błąd średni m_0 [mm]	± 0.7	± 0.5	± 0.7	± 0.4	± 0.5

Źródło: Opracowanie własne

PODSUMOWANIE

Podsumowując przeprowadzone badania można stwierdzić, iż założenia przedstawione w tezie zostały potwierdzone – dane z naziemnego skaningu laserowego mogą być wykorzystywane do badania przemieszczeń konstrukcji, jakimi są tymczasowe przeprawy mostowe. Wyznaczone przemieszczenia charakteryzują się dokładnością poniżej jednego milimetra. Zaletą impulsowego skanera laserowego jest stosunkowo duży zasięg pomiaru – dochodzący do około 300 metrów oraz milimetrowa dokładność wyników, wadą natomiast – stosunkowo długi czas pomiaru (w przypadku tymczasowej przeprawy mostowej typu BLG-67 czas skanowania z gęstością siatki punktów równą 1 mm wynosił około pół godziny), co wyklucza obserwacje obiektów szybkozmiennych. Doskonałą alternatywą bądź uzupełnieniem, mogą być fazowe skanery laserowe, aczkolwiek zasięg skanowania ograniczony jest do kilkunastu metrów. W przypadku badań przemieszczeń niezwykle istotna jest kontrola otrzymanych wyników, która możliwa jest jedynie w przypadku stosowania zintegrowanych systemów kontrolno-monitorujących.

RESEARCHING DISPLACEMENTS OF A TYPE BLG-67 TEMPORARY BRIDGE CROSSING USING TERRESTRIAL LASER SCANNING TECHNIQUES

Abstract

Multimillion point clouds are increasingly being used to study objects in order to monitor their movements. The subject of the research addressed in this article is a type BLG-67 temporary bridge crossing, which was subjected to repeated load tests with a weight of 30 tons. The temporary bridge crossing had been measured at two positions (p_0 and p_1) using a Leica ScanStation 2 pulsed terrestrial laser scanner. Fragments of obtained point clouds were modeled, and then by measuring the distance between the corresponding planes, displacements of individual structural elements were determined. The purpose of this study is to prove, that the data from terrestrial laser scanning can be used to determine the displacements of the objects of this type with an accuracy of up to a single millimeter.

BIBLIOGRAFIA

1. Abmayr T., Härtl F., Reinköster M., Fröhlich C.: *Terrestrial Laser Scanning – Applications in Cultural Heritage Conservation and Civil Engineering*, Proceedings of the ISPRS working group V/4, Venice, Italy, Vol. XXXVI-5/W17, 2005
2. Fryškowska A., Kędzierski M.: *Wybrane aspekty integracji danych naziemnego i lotniczego skaningu laserowego*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 21, str. 97-107, 2010.
3. Jaszczak P.: *Terrestrial Laser Scanning for landslides deformation monitoring*, Thesis Project, Castelldefels, Spain, 2006.
4. Kamiński W., Bojarowski K., Dumalski A., Mroczkowski K., Trystuła J.: *Ocena możliwości wykorzystania skanera laserowego ScanStation firmy Leica w badaniu deformacji obiektów budowlanych*, Wydawnictwo PK, 2008.
5. Kašpar M., Pospišil J., Štroner M., Kfemen T., Tejkal M.: *Laser scanning in civil engineering and land surveying*, Vega s.r.o., Hradce Králové, Czechy, 2004.
6. Kędzierski M., Fryškowska A., Wilińska M.: *Naziemny skaningu laserowy obiektów inżynierijno-drogowych*, Biuletyn WAT, vol. LIX, nr 2, str. 285-308, 2010.

7. Kędziński M., Walczykowski P., Fryškowska A.: *Aspekty pozyskiwania danych z Naziemnego Skaningu Laserowego*, Biuletyn WAT, vol. LIX, nr 2, str. 211-221, 2010.
8. Lovas T., Barsi A., Detrekoi A., Dunai L., Csak Z., Polgar A., Berenyi A., Kibedy Z., Szocs K.: *Terrestrial laser scanning in deformation measurements of structures*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXVII, pp. 527-531, 2008.
9. Rusinkiewicz S., Levoy M.: *Efficient variant of the ICP algorithm*. Proceedings of 3-D Digital Imaging and Modelling, pp. 145-152, 2001.
10. Schultz T., Ingensand H.: *Influencing Variables, Precision and Accuracy of Terrestrial Laser Scanners*, Ingeo, Bratislava, 2004.
11. Shan J., Toth C.K., *Topographic Laser Ranging and Scanning. Principles and Processing*, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, UK 2008.
12. Szofucha M., Bartnicki A., Bogusz J., Nykiel G., Szymański P., Wrona M.: *Zintegrowany system kontrolno-monitorujący dla obiektów inżynierskich – koncepcja i wyniki testów*, Transcomp – XV International Conference Computer Systems Aided Science, Industry and Transport, Zakopane, 2012.
13. http://hds.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/ScanStation/brochures-datasheet/Leica_Scan_Station%202_datasheet_pl.pdf

PODZIĘKOWANIA

Autorka pragnie podziękować p. dr. Adamowi Bartnickiemu za umożliwienie wykonania testów na tymczasowej przeprawie mostowej. Niniejsza publikacja jest częścią projektu badawczego MNiSW, grant nr 1649/B/T00/2010/40.

Autorka:

mgr inż. Michalina WILIŃSKA – Wojskowa Akademia Techniczna