

WALDEMAR KAMIŃSKI, KRZYSZTOF BOJAROWSKI, ANDRZEJ DUMALSKI
KRZYSZTOF MROCZKOWSKI, JERZY TRYSTUŁA*

OCENA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA SKANERA LASEROWEGO SCANSTATION FIRMY LEICA W BADANIU DEFORMACJI OBIEKTÓW BUDOWLANYCH

POSSIBILITIES OF USING LASER SCANNER SCANSTATION FROM LEICA TO RESEARCH DEFORMATION OF BUILDING STRUCTURES

Streszczenie

Autorzy artykułu przeprowadzili badania empiryczne mające na celu ocenę możliwości wykorzystania wyników pomiaru skanerem laserowym ScanStation firmy Leica w badaniu przemieszczeń i odkształceń obiektów budowlanych. Analiza oparta była na eksperymencie badawczym polegającym na wyznaczeniu najmniejszej wartości przesunięć, jaka jest możliwa do zarejestrowania tym instrumentem, wzdłuż osi obranego układu współrzędnych. Przebieg oraz wyniki badań testowych poprzedzono opisem instrumentu oraz charakterystyką wyników pomiaru.

Słowa kluczowe: skaning laserowy, analiza deformacji

Abstract

The authors of this article did empirical researches, which have been showing the possibilities of using results of measurement from laser scanner ScanStation from Leica Geosystems to research deformations of building structures. The analysis was based on a scientific experiment depends on determination the minimum value of displacement, which is possible to register by this instrument, along axis from preferred coordinate system. The follow of the tests researches and its results was preceded the description of instrument and the results of measurement specification.

Keywords: laser scanning, analysis of deformation

* Dr hab. inż. Waldemar Kamiński, prof. UWM, dr inż. Krzysztof Bojarowski, dr inż. Andrzej Dumalski, dr inż. Krzysztof Mroczkowski, mgr inż. Jerzy Trystuła, Instytut Geodezji, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.

1. Wstęp

Naziemny skaningu laserowy należy zaliczyć do nowoczesnych technologii pomiarów geodezyjnych. Zasada jego działania opiera się na wyznaczeniu w ciągu sekundy dużej liczby punktów (od 1000 do 500 000) o współrzędnych X , Y , Z . Uzyskane w wyniku skaningu laserowego duże zbiory danych ze względu na swoje rozmiary nazywane są „chmurą punktów”. Technologia skaningu laserowego zmieniła sposób analizy zjawisk zachodzących w otaczającej nas rzeczywistości. Od pomiarów geodezyjnych wykonywanych do punktów dyskretnych przechodzimy do analiz prowadzonych na trójwymiarowych modelach (3D) utworzonych przez odpowiednie oprogramowanie z chmury punktów.

Instytut Geodezji UWM w Olsztynie w czerwcu 2007 r. zakupił naziemny skaner laserowy ScanStation firmy Leica. Pierwsze pomiary realizowane tym instrumentem i opracowania rezultatów pomiarów miały na celu zapoznanie się z tą technologią i ocenę możliwości jej wykorzystania w pracach geodezyjnych, szczególnie w badaniach deformacji obiektów inżynierskich. Problematykę dotyczącą deformacji obiektów inżynierskich poruszono m.in. w pracach [1–4].

W niniejszym artykule zaprezentowano testy praktyczne wykonane w celu określenia możliwości wykorzystania skaningu laserowego w badaniu przemieszczeń i odkształceń budowli inżynierskich. Uzyskane rezultaty zachęcają do dalszych szczegółowych analiz teoretyczno-empirycznych.

2. Naziemny skaningu laserowy

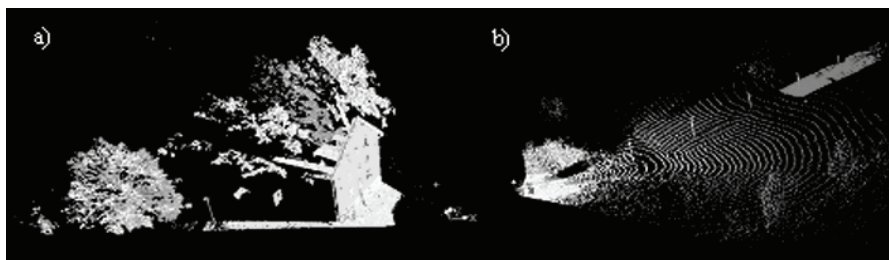
Skanery laserowe można umieszczać zarówno na samolotach – mówimy wówczas o skaningu lotniczym, jak również na powierzchni Ziemi – mówimy wówczas o skaningu naziemnym. Niniejszy artykuł dotyczy jedynie technologii naziemnego skaningu laserowego. Naziemny skaner laserowy wyznacza położenie punktów w dowolnym przestrzennym układzie współrzędnych X , Y , Z , z wybraną przez użytkownika gęstością skanowania obiektu (np.: co 1 mm, 5 mm, 1 cm itp.). Wybierając gęstość punktów pomiarowych, specjalistyczne oprogramowanie ustawia odpowiedni interwał przyrostu wartości kątów poziomych i kątów pionowych, które łącznie z pomierzoną odległością skośną są następnie wykorzystywane do obliczania współrzędnych prostokątnych X , Y , Z , każdego punktu z chmury punktów. Rezultatem pomiaru są zatem współrzędne biegunowe przeliczane następnie na współrzędne prostokątne. Współrzędne punktów można wyznaczyć w układzie lokalnym skanera, jak również w dowolnym układzie współrzędnych zdefiniowanym w instrumencie przez obserwatora.

Skaner laserowy to nowoczesny instrument stosowany w celu pozyskiwania danych przestrzennych do specjalistycznych opracowań wykorzystywanych w różnych dziedzinach życia. Dyskretyzacja zjawisk i obiektów dokonywana zazwyczaj w trakcie tradycyjnych pomiarów geodezyjnych z reguły narzuca sposób przetwarzania danych, opracowania wyników i ich wizualizacji. Sprowadza się to w szczególności do generowania obrazu rzeczywistości z wykorzystaniem zbioru symboli i znaków lub analizy pojedynczych punktów reprezentujących składowe części obiektu. Wybór położenia punktów podlegających pomiarowi dokonywany jest zazwyczaj na podstawie konsultacji ze specjalistami (przy pomiarach specjalistycznych) lub doświadczenia zawodowego geodetów.

Skaning laserowy stosowany w procesie pozyskiwania danych dostarcza specjalistom odmiennych niż klasyczne danych przestrzennych (rys. 1), charakteryzujących się m.in.:

- dużą liczbą danych, spośród których część jest zbędna,
- brakiem pomiarów kontrolnych,
- występowaniem tzw. martwych pól, będących wynikiem braku widoczności lub niedogodnych warunków pomiaru,
- występowaniem wyników pomiaru obarczonych błędami grubymi bez możliwości ich wykrycia w sposób bezpośredni (np. współrzędne innego obiektu otrzymane po przejściu sygnału pomiarowego przez powierzchnie przezroczyste).

Wyniki pomiarów generowane przez urządzenia o działaniu ciągłym nie mogą zatem być przetwarzane przez systemy dotychczas stosowane w geodezji. Wymagają dostosowania ich wielkości i struktury do zaplanowanego w systemie modelu danych. W szczególności liczebność zbiorów pozyskiwanych danych jest tym czynnikiem, który narzuca stosowanie procedur i algorytmów ograniczających ingerencję operatora do minimum.



Rys. 1. Przykłady pojedynczych skaningu: a) elewacja budynku, b) rzeźba terenu
Fig. 1. Example of scanning: a) facade of building, b) relief

3. Skaner laserowy ScanStation firmy Leica

Wykorzystany w badaniach skaner laserowy (rys. 2) ma następujące parametry techniczne (dane z instrukcji obsługi urządzenia): pełne „pole widzenia”, tzn. w poziomie wynosi 360° , a w pionie 270° , dwuosiowy kompensator o zakresie $\pm 5'$ i dokładności $1''$, dokładność pomiaru odległości 4 mm, dokładność wyznaczenia kątów $0'',003$, średnica plamki lasera 4 mm na 50 m. Skaner realizuje także proste obliczenia geodezyjne (ciąg poligonowy, wcięcia, orientacja itp.).



Rys. 2. Skaner ScanStation
Fig. 2. ScanStation scanner

Zasięg skanowania przy średniej zdolności odbijania (współczynnik albedo 18%) wynosi ok. 130 m, a przy dobrej zdolności odbijania (współczynnik albedo 90%) – 300 m. Skaner ScanStation jest znakomitym urządzeniem do bezreflektorowego pomiaru geometrii obiektów trudno dostępnych.

Oprogramowanie skanera umożliwia sterowanie instrumentem w czasie pomiaru za pomocą podłączonego komputera typu laptop oraz opracowanie wyników, w tym modelowanie obiektów. Wyniki pomiarów uzyskane na różnych stanowiskach mogą być łączone, przez co uzyskujemy kompleksową, przestrzenną charakterystykę badanego obiektu.

4. Opracowanie danych

Proces opracowania zbiorów pozyskanych skanerem laserowym można podzielić umownie na trzy etapy:

- przetwarzanie wstępne,
- zasadniczy etap przetwarzania, w tym głównie wybór punktów podlegających jednoczesnemu przetwarzaniu i generowanie obiektów lub wskaźników (geometrycznych, przestrzennych, topologicznych, statystycznych, fizycznych itp.),
- dostosowanie struktury zbiorów do potrzeb budowy baz danych systemów przestrzennych.

Przetwarzanie wstępne wyników obserwacji ma na celu podział zbiorów danych na części dogodne do obróbki zarówno pod względem zasięgu przestrzennego, jak i pojemności. W dużej mierze etap ten realizowany jest już w trakcie pomiaru przez dogodne zaprojektowanie stanowisk pomiarowych oraz ustawienie przez operatora parametrów pracy programu sterującego skanerem, np. zakres i zasięg skaningu oraz zagęszczenie punktów pomiarowych. W postprocesingu dokonuje się już dokładnego tzw. czyszczenia rysunku polegającego na eliminacji punktów pomiarowych, które ze względu na przyjęte kryteria przestrzenne nie spełniają warunków pomiaru.

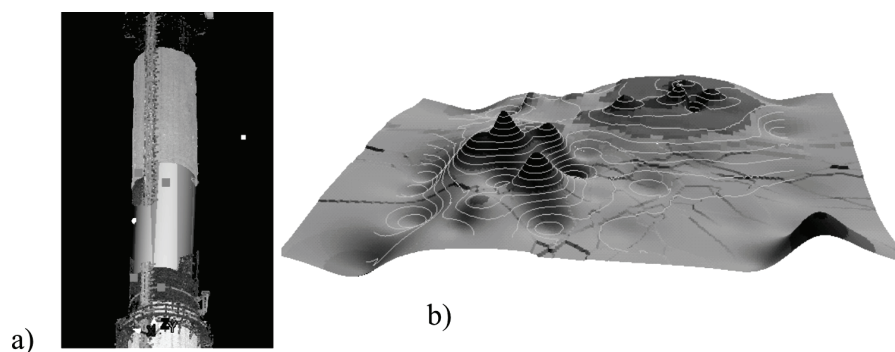
Zasadniczy etap przetwarzania polega na wyborze punktów reprezentujących obiekty lub ich fragmenty ze zbioru połączonych z kilku stanowisk w jednolitym układzie wyników pomiaru. Zasady selekcji punktów wynikają głównie z warunków przestrzennych mierzonego obiektu. W niektórych przypadkach, szczególnie przy tworzeniu systemów informacji o terenie, należy uwzględnić również aspekty prawne i normy techniczne. Wyodrębnione podzbiory podlegają dalszemu przetwarzaniu polegającemu na modelowaniu obiektów w przestrzeni trójwymiarowej.

Ze względu na sposób aproksymacji punktów można wyróżnić dwa rodzaje obiektów:

- obiekty dające się opisać funkcjami analitycznymi, na podstawie których obiekty są tworzone w jednym procesie obliczeniowym (rys. 3a)),
- obiekty nieregularne, w których pojedyncze elementy obiektu generowane są niezależnie, a następnie komponowane w całość (rys. 3b)).

W pierwszym przypadku uzyskuje się parametry geometryczne obiektu w przestrzeni trójwymiarowej na drodze aproksymacji metodą najmniejszych kwadratów oraz wskaźniki dokładnościowe. Natomiast w drugim przypadku wykorzystywane są funkcje, które dotychczas były stosowane zwykle do generowania numerycznego modelu terenu.

W ostatnim etapie przetwarzania chmury punktów utworzone obiekty transformowane są do struktury i formatu przewidzianego przez docelowy system informacji przestrzennej.



Rys. 3. Przykłady wymodelowanych obiektów: a) komin (fragment), b) model terenu
Fig. 3. Examples of modeling objects: a) chimney, b) digital terrain model

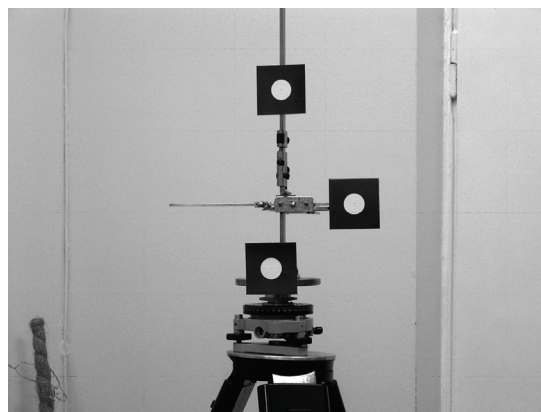
Głównie zwraca się tutaj uwagę na realizowane przez system funkcje i analizy oraz dogodność archiwizacji zbiorów.

Należy dodać, że najczęściej proces przetwarzania wyników pomiaru skanerem laserowym realizowany jest przez specjalistyczne oprogramowanie umożliwiające również sterowanie urządzeniem w trakcie pomiaru. Specjalistyczne oprogramowanie stanowi więc kompleksowe narzędzie realizujące niezbędne funkcje związane z pozyskiwaniem, przetwarzaniem i archiwizowaniem danych.

Warto także wspomnieć, że większość profesjonalnych dostępnych na rynku systemów, szczególnie typu CAD, wprowadza moduły umożliwiające przetwarzanie chmury punktów.

5. Przykład praktycznego zastosowania

W celu zbadania możliwości zastosowania skanera laserowego do wyznaczania wartości przemieszczeń względnych przeprowadzono eksperymenty praktyczne. Dla potrzeb testu skonstruowano specjalne urządzenie (rys. 4), które umożliwia realizację przesunięć specjalnych tarcz celowniczych (oferowanych w zestawie ze skanerem) w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach.



Rys. 4. Urządzenie do pomiaru przesunięć
Fig. 4. Shifts measurement device

Założona wartość przesunięcia może być ustawiona na urządzeniu pomiarowym wyposażonym w noniusz z dokładnością 0,1 mm. Nastawy na urządzeniu pomiarowym potraktowano jako wartości teoretyczne.

Eksperyment badawczy polegał na wyznaczeniu współrzędnych środka tarczy celowniczej w położeniu wyjściowym, symulującym pomiar pierwotny, a następnie współrzędnych po przesunięciu o określoną wielkość – symulującą pomiar aktualny. Wartości teoretyczne były potem porównywane z wynikami uzyskanymi skanerem laserowym.

Pomiary zrealizowano w dwóch wariantach:

- wariant 1, w którym odległość urządzenia celowniczego od instrumentu wyniosła 20 m,
- wariant 2, w którym odległość urządzenia celowniczego od instrumentu wyniosła 80 m.

Jak już wspomniano, do badań wykorzystano kilka magnetycznych tarcz celowniczych. Tarcze te, oferowane standardowo (rekomendowane) przez firmę Leica (rys. 5), charakteryzują się specjalnym kształtem punktu celowniczego oraz barwą.



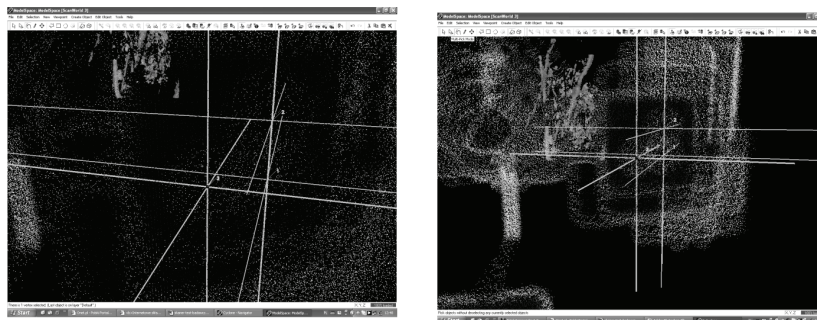
Rys. 5. Tarcza celownicza
Fig. 5. Target

Ten typ sygnału celowniczego jest automatycznie „rozpoznawany” podczas skanowania, dlatego też jest powszechnie stosowany przy łączeniu pojedynczych skanów. Rozpoznanie wspomagane jest przez specjalistyczne oprogramowanie skanera. Procedura rozpoznania polega na tym, że zastosowany algorytm obliczeniowy z chmury punktów tarczy wyznacza jeden szczególny punkt (punkt środka tarczy), dla którego określone są współrzędne przestrzenne (X , Y , Z). Zastosowany algorytm obliczeniowy daje gwarancję powtarzalności wyznaczeń, dzięki czemu wyznaczone współrzędne przestrzenne środka tarczy można uznać za najkorzystniejsze. Tak wybrany punkt środka tarczy posłużył do dalszych szczegółowych analiz.

Na urządzeniu pomiarowym zainstalowano kilka sygnałów pomiarowych. Jeden z nich wykorzystywany był do rejestracji przesunięć symulujących przemieszczenia względne, natomiast pozostałe sygnały (nieprzesuwane) służyły do kontroli stabilności urządzenia.

Pomiary wykonywano na sygnał kontrolny z maksymalną do ustawienia (w oprogramowaniu sterującym pracą skanera) rozdzielczością 1 mm w kierunku poziomym i pionowym. W przyjętym (na urządzeniu) lokalnym układzie współrzędnych przesuwana podczas pomiarów tarcza, jak również sygnały kontrolne otrzymały współrzędne: $X_0 = 150$ mm, $Y_0 = 100$ mm, $Z_0 = 150$ mm. Te współrzędne potraktowano jako dane pierwotne do dalszych analiz. W tym ustawieniu tarcz wykonano także pierwszy pomiar (pierwotny). Następnie przesuwano ruchomą tarczę w stosunku do położenia wyjściowego o interwały: 1, 3, 5, 10, 20 mm, kolejno w trzech kierunkach pokrywających się z osiami OX , OY , OZ . Po każdym przesunięciu wykonano pomiary skanerem laserowym – symulującym pomiar aktualny. Ogólnie wykonano 16 pomiarów. Przedstawione procedury zrealizowano dla obu rozpatrywanych wariantów.

Kontrola stabilności urządzenia polegała na odczytaniu po każdym przesunięciu sygnału ruchomego, wartości współrzędnych sygnałów kontrolnych i porównaniu ich ze współrzędnymi X_0 , Y_0 , Z_0 . Taka kontrola miała zabezpieczyć przed ewentualnym brakiem stabilności urządzenia pomiarowego.



Rys. 6. Obraz środków tarcz celowniczych

Fig. 6. Image of the center of targets

Po wykonaniu prac polowych przystąpiono do prac kameralnych. Wykorzystując oprogramowanie firmowe, pozyskano współrzędne środków ruchomej tarczy i obliczono (ze współrzędnych) wektor przesuniętej tarczy w stosunku do jej pozycji wyjściowej. Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 1. Ponadto obliczono błąd średni m z następującej zależności

$$m = \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{n-1}} \quad (1)$$

gdzie:

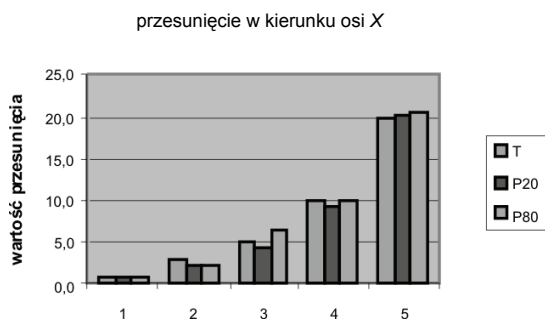
ε – różnica pomiędzy teoretyczną a praktyczną wartością przesunięcia,
 n – liczba wyznaczanych przesunięć.

Tabela 1

Uzyskane w eksperymencie rezultaty pomiarów

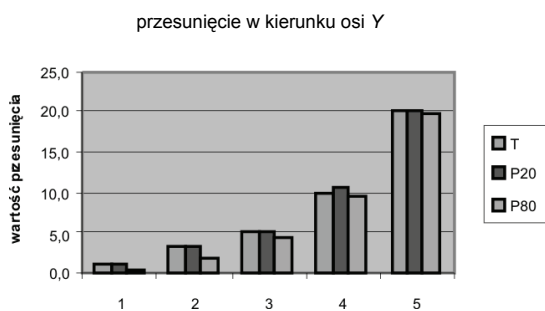
Oś współrzędnych	Lp.	Teoretyczna wartość przesunięcia [mm]	Praktyczna wartość przesunięcia		m	
			20 m [mm]	80 m [mm]	20 m [mm]	80 m [mm]
OX	1	1,0	1,0	0,9	0,4	0,8
	2	3,0	2,5	2,2		
	3	5,0	4,5	6,3		
	4	10,0	9,5	10,3		
	5	20,0	20,2	20,6		
OY	1	1,0	1,0	0,5	0,3	0,8
	2	3,0	3,2	1,8		
	3	5,0	5,4	4,1		
	4	10,0	10,4	9,4		
	5	20,0	19,9	19,7		
OZ	1	1,0	1,0	0,0	0,5	1,9
	2	3,0	3,0	1,0		
	3	5,0	5,0	3,0		
	4	10,0	11,0	8,0		
	5	20,0	20,0	19,0		

Na rysunkach 7–9 przedstawiono interpretację graficzną uzyskanych wyników. (T) – oznacza teoretyczne wartości przesunięć, (P20) – wartości przesunięć uzyskane z pomiaru 20-metrowego odcinka, (P80) – wartości przesunięć odcinka 80-metrowego.



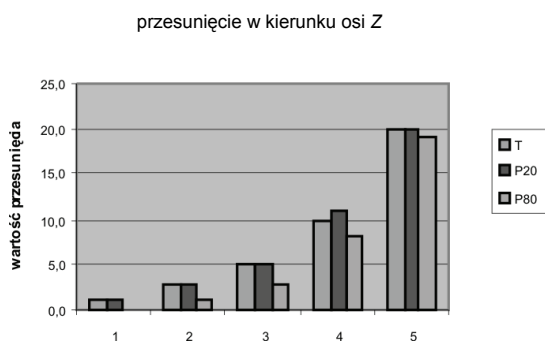
Rys. 7. Wartości przesunięć w kierunku osi OX

Fig. 7. Shifts in OX axis direction



Rys. 8. Wartości przesunięć w kierunku osi OY

Fig. 8. Shifts in OY axis direction



Rys. 9. Wartości przesunięć w kierunku osi OZ

Fig. 9. Shifts in OZ axis direction

6. Wnioski

Analizując wyniki testu, można zauważyć, że różnice pomiędzy wartościami teoretycznymi a praktycznymi przy odległości 20 m nie przekraczają 1 mm, natomiast przy odległości 80 m – 2 mm. Warto zauważyć, że uzyskane wyniki pochodzą z pojedynczego pomiaru. Pojawia się zatem pytanie: czy zwiększenie liczby serii pomiarowych podniosłoby dokładność uzyskanych wyników? Ten problem (powtarzalność pomiarów) będzie m.in. tematem dalszych badań autorów.

Inny problem, którym planują się zająć autorzy niniejszego artykułu dotyczy dokładności ostatecznych wyznaczeń uzyskanych za pomocą łączenia skanów sposobem „chmura do chmury”. Już teraz można jednak stwierdzić, że uzyskane wyniki zachęcają do prowadzenia dalszych szczegółowych badań i analiz zarówno na modelach, jak i w praktycznych zastosowaniach.

Literatura

- [1] Bryś H., Przewłocki S., *Geodezyjne metody pomiarów przemieszczeń budowli*, PWN, Warszawa 1998.
- [2] Czaja J., *Geodezja inżynieryjno-przemysłowa. Zbiór zadań i przykładów*, Wydawnictwo AGH, Kraków 1992.
- [3] Janusz W., *Geodezyjna interpretacja wyników pomiaru przemieszczeń*, Prace IGIK, t. XVI, z. 2(38), Warszawa 1996.
- [4] Lazzarini T. i in., *Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia*, PPWK, Warszawa 1997.