

RAFAŁ PILECKI*

ZASTOSOWANIA NAZIEMNEGO SKANERA LASEROWEGO

THE USE OF GROUND-BASED LASER SCANNER

Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania naziemnego skanera laserowego do badania deformacji powierzchni terenu. Omówiono zasadę działania i obszary zastosowań tej technologii. Podano przykłady zastosowania naziemnego skanera laserowego do wykrywania deformacji podłoża. Wyniki pomiarów oraz modele różnicowe z dwóch pomiarów można przedstawiać w obrazie 3D co pozwala na wnikliwą analizę wyników. Rozwój technologii skaningu laserowego daje nadzieję na lepszą analizę deformacji podłoża.

Słowa kluczowe: deformacja terenu, skaner laserowy

Abstract

The paper summarises methods of applying ground based laser scanners to study deformations of ground surface. Principle of operation and area of application for this technology were characterised. Examples how results of measure and differential models can be shown in 3D maps. The ongoing development of scanning technology allows to have hope for an even better results from ground deformations analysis in the future.

Keywords: ground deformations, laser scanner

* Mgr inż. Rafał Pilecki, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej.

1. Wstęp

Bezpieczeństwo budownictwa jest ściśle związane ze stabilnym podłożem, na którym posadowione są obiekty. Jest to ważny problem dla obiektów istniejących i planowanych inwestycji. W artykule przedstawiono możliwości zastosowania naziemnego skanera laserowego do badania deformacji powierzchni terenu. Skanowanie laserowe wykonuje się także z samolotów systemem o nazwie LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Przy porównaniu obu technik najbardziej przekonującą zaletą teledetekcji naziemnej jest dokładność pomiarów. System LIDAR mierzy z dokładnością ok. 15 cm współrzędną wysokościową. W przypadku naziemnego skanera laserowego jest to precyzja ok. 5 mm. Producenci podają dokładne informacje o ich systemach. Na przykład RIEGL opisuje system LMS Z 360 o częstotliwości 8000 Hz, zasięgu 800 metrów i dokładności 5 mm. Natomiast ILRIS-3D, produkt Firmy OPTECH, posiada częstotliwość 2000 Hz, zasięg 800 metrów, dokładność 3 mm do odległości 100 metrów i 1–3 cm powyżej. Kolejnym przykładem jest system GS 200 stworzony przez MENSİ, który posiada częstotliwość 5000 Hz, zasięg 700 metrów oraz dokładność 3 mm na 100 metrów [7].

Naziemny skaner laserowy jest oparty na najnowocześniejszej technologii teledetekcji. Pomiar skanerem laserowym polega na wyemitowaniu wiązki światła koherentnego, która odbija się od obiektu i powraca do urządzenia. Wówczas pozyskana zostaje informacja o czasie przebiegu wiązki tam i z powrotem oraz o kątach poziomym i pionowym do obiektu względem skanera. W kolejnym etapie obliczone zostają współrzędne przestrzenne każdego punktu. Dokładność tej metody wynika z błędu położenia punktu i jest rzędu kilku milimetrów. Zasada działania impulsowego naziemnego skanera laserowego opiera się na rejestracji w ciągu sekundy dużej liczby punktów (od 1000 do 500 000), które nazywamy „chmurą” punktów. Chmura punktów stanowi rodzaj dokumentacji przestrzennej, do której możemy w każdej chwili wrócić, aby wykonać dodatkowe pomiary, analizy lub odtworzyć stan z dnia wykonania skanu. Z pomiarów przestrzennych przeprowadzonych w terenie za pomocą oprogramowania można otrzymać model terenu 3D. Deformacje terenu można śledzić na podstawie modelu różnicowego konstruowanego w oparciu o dwa lub więcej przestrzennych modeli. W procesie przetwarzania danych pomierzone punkty mogą być także użyte do opracowania przekrojów, rzutów, rysunków wektorowych. Proces skanowania laserowego polega na automatycznym pomiarze, charakteryzującym się bardzo wysoką częstotliwością próbkowania – pomiaru przestrzennego (3D) – rzędu dziesiątek, a nawet setek tysięcy punktów na sekundę w czasie rzeczywistym. W wyniku pomiaru otrzymujemy quasi-ciągłe odwzorowanie otaczającej przestrzeni reprezentowanej przez punkty, z których każdy ma określone współrzędne x , y , z . W przypadku zastosowania dodatkowo kamery lub aparatu cyfrowego można rejestrować składowe RGB mierzonych obiektów, nanosząc je w procesie obróbki na zeskanowane punkty i tworząc dodatkowe barwne tekstury, wiernie odwzorowujące rzeczywiste kolory obiektu.

2. Obszary zastosowań skanowania laserowego

Obszary zastosowań skanerów laserowych są bardzo szerokie i wraz z rozpowszechnianiem się tej technologii pomiarowej pojawiają się coraz to nowe dziedziny, w których znajduje ona zastosowanie. Szerokie spektrum możliwości zastosowania jest jedną z podsta-

wowych zalet skanera laserowego – i tak w zależności od typu (zasięgu, dokładności) skanera – może być wykorzystywany począwszy od inżynierii materiałowej, aż do zastosowań w tworzeniu modeli 3D powierzchni ziemi. Przykładowe obszary zastosowania skanowania laserowego 3D to inwentaryzacja architektoniczna, w tym inwentaryzacja obiektów zabytkowych, wizualizacje 3D miast i budynków, wirtualne wycieczki. Dużą popularnością wśród użytkowników Internetu cieszą się wirtualne wycieczki po interesujących obiektach. Można w ten sposób, nie wychodząc z domu, zapoznać się np. z przyszłą uczelnią, poznać interesujące zabytki itp. Poniżej przedstawiono, przykład inwentaryzacji Łazienek Królewskich w Warszawie (rys. 1).



Rys. 1. Inwentaryzacja Łazienek Królewskich w Warszawie [8]

Fig. 1. Inventory of Royal Łazienki in Warsaw

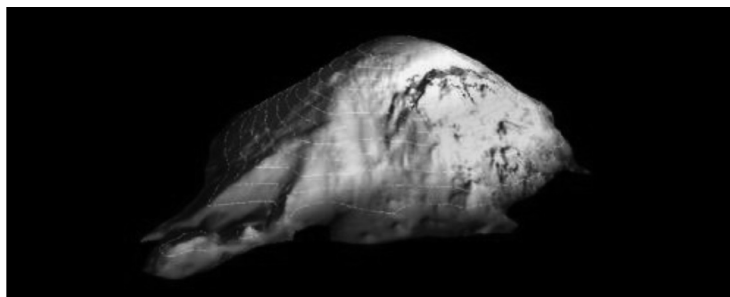
Drugim ogromnym obszarem zastosowań skanera laserowego jest inwentaryzacja przemysłowa, m.in. inwentaryzacja przewodów napowietrznych, monitoring mostów, monitoring tuneli. Jednym z zastosowań naziemnego skanera laserowego jest monitorowanie stanu mostów [6]. Autor podał kilka przykładów, w tym możliwość rejestrowania uszkodzeń elementów mostu wywołanych m.in. przez erozję. Interesującym zastosowaniem skanera jest rejestracja stanu mostu po fali uderzeniowej wywołanej przez kontrolowany wybuch w bliskiej odległości od badanego mostu. Skanowanie laserowe zastosowano także do kontroli odkształceń elementów mostu obciążonego ciężkimi pojazdami. Dzięki milimetrowej rozdzielczości skanera można było zaobserwować miejsca odkształceń.



Rys. 2. Odkształcenia elementów mostu obciążonego ciężkimi pojazdami [6]

Fig. 2. Deformation of bridge elements loaded with heavy vehicles [6]

Pomiary skanerem laserowym znalazły zastosowanie w górnictwie odkrywkowym do określania objętości czerpanych zasobów oraz do określania objętości materiałów sypkich (kruszywa, węgiel, rudy). Pomiary wykonuje się też w celach inwentaryzacyjnych, np. inwentaryzacja hałd węgla (rys. 3). Tym sposobem można obliczyć objętość hałdy, nałożyć izohipsy na obiekt. Średnia wielkość błędu względnego obliczonej objętości nie przekracza 1% [10]. W górnictwie podziemnym wykorzystuje się także skaner laserowy do różnego rodzaju inwentaryzacji i pomiarów. Decydującą zaletą skanera laserowego w tym przypadku jest możliwość pomiarów bez oświetlenia.



Rys. 3. Wynik pomiaru skanerem laserowym hałdy węgla wraz z nałożonymi izohipsami [10]

Fig. 3. Result of laser scanner measurement of coal spoil tip with isopleths [10]

Skaner laserowy wykonuje pomiary bez ingerowania w badane środowisko i wykorzystuje się tę cechę w rekonstrukcji wypadków, katastrof budowlanych, dokumentacji miejsc wypadków (kryminalistyka) itp.

Interesującym przykładem pomiarów z zastosowaniem skanera laserowego jest wykrywanie zmian w czasie przez ponowny pomiar tych samych powierzchni. Szczególnie w przypadku deformacji w czasie powierzchni terenu, skaner laserowy jest nie do zastąpienia. Kilka przykładów monitorowania deformacji terenu przedstawiono poniżej (rodz. 3).

Skanowanie laserowe 3D to metoda pomiaru polegająca na przenoszeniu rzeczywistego kształtu trójwymiarowego obiektu do postaci cyfrowej. Skanowanie laserowe 3D obiektu przeważnie wykonuje się z kilku stanowisk w zależności od geometrii obiektu. Dzięki temu jest możliwość cyfrowego odtworzenia obiektu, stworzenia jego trójwymiarowego modelu bez tak zwanych cieni i martwych pól. Dokładność skanowania wynosi, w zależności od firmy produkującej skaner, od 2 do 50 mm. Z chmury punktów za pomocą odpowiedniego oprogramowania jest możliwość stworzenia wirtualnego, trójwymiarowego modelu skanowanego obiektu. Otrzymane z procesu skanowania punkty można dalej opracowywać, w zakresie:

- orientacji chmury punktów z wszystkich skanów do jednego układu współrzędnych;
- budowy trójwymiarowego modelu CAD;
- tworzenia rysunków 2D – rzutów, przekrojów, profili;
- tworzenia bazy danych łączącej grafikę 3D z elementami opisowymi;
- porównania stanu rzeczywistego z dokumentacją projektową.

3. Przykłady wykorzystania skaningu laserowego do wykrywania deformacji

Przykładów wykorzystania skaningu laserowego do wykrywania deformacji jest w literaturze światowej bardzo dużo. Poniżej przedstawiono kilka przykładów, które obrazują przydatność pomiarów skanerem laserowym w monitorowaniu zagrożenia deformacjami.

W artykule A. Abellán [2] przedstawiono wyniki badań z monitorowania podłoża skalnego w obszarze zabudowań. Badaniami objęto prawie pionowy, pięćdziesięciometrowy klif, na szczycie którego znajduje się wieś Castellfollit de la Roca (rys. 4). Obrywy skał powodują zagrożenie dla istniejących zamieszkałych domów. Przeprowadzone 9-krotne pomiary w ciągu 22 miesięcy pozwoliły ustalić dwa rodzaje występujących obrywów: pojedynczej kolumny bazaltowej ($1,5 \text{ m}^3$) i grupy kolumn (od $1,5$ do 150 m^3). Porównanie poszczególnych etapów procesu pozwoliło na ustalenie stanu możliwego zaistnienia obrywu (rys. 5). Przeprowadzone pomiary masywu skalnego skanerem laserowym pozwoliły na lepsze poznanie występującego zjawiska.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów deformacji podłoża budynków skanerem laserowym w 2007 i 2008 roku. Kolor niektórych punktów wykazał przyrosty deformacji (skala co 10 cm), co pozwoliło na wskazanie miejsca obrywu. Miejsce drugiego obrywu jest w tym samym obszarze co pierwszego.

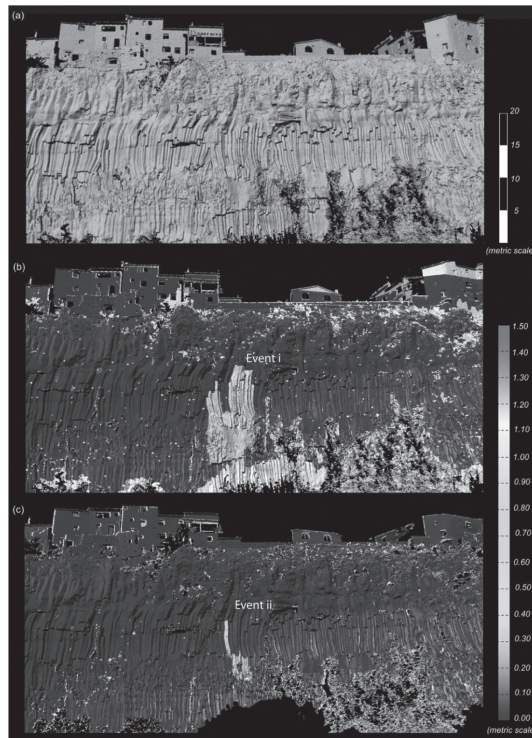
Na rysunku 6 przedstawiono poszczególne etapy odrywania się kolumn bazaltowych w podłożu klifowym.

Naziemny skaner laserowy znalazł zastosowanie w geologii, np. do śledzenia przemieszczania się lodowców. Włoskie doświadczenia w tym zakresie opisali Danilo Godone i Franco Godone [3]. Pomiary przeprowadzono na lodowcu Belvedere we Włoszech (rys. 7). Wyniki badań z pomiarów osuwiska utworzonego z moreny czołowej od 8.01.2006 do 13.09.2006 wskazują na przemieszczanie się mas średnio o ponad 2 m (rys. 8), ze średnią prędkością 0,05 m/dzień. Zmierzono także całkowite przemieszczenie pionowe osuwiska (rys. 9). Przemieszczanie się lodu i mas skalnych spowodowane jest siłą ciężkości i nasila się w miarę ocieplania klimatu. Zjawisko to jest groźne szczególnie po obfitych opadach i może zagrażać pobliskim miejscowościom, np. Macugnaga. Zjawiska takie zdarzyły się: 3 sierpnia 1970, 2 sierpnia 1978 i w lipcu 1979, ostatnie z nich poważnie uszkodziło wyciąg krzesełkowy na lodowcu Belvedere, prawie osiągając Pecetto – osadę w pobliżu Macugnaga. Ważne jest zatem obserwowanie przemieszczeń mas lodu na lodowcach oraz obserwacja osuwisk w rejonach moren czołowych, aby nie dać się zaskoczyć przez gwałtowniejsze zjawiska. W tym zakresie wykorzystanie pomiarów naziemnym skanerem laserowym wydaje się zasadne.



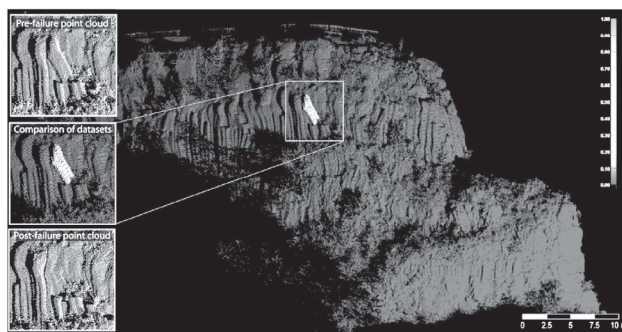
Rys. 4. Bazaltowy klif na którym znajduje się Castellfollit de la Roca [2]

Fig. 4. Basalt cliff of the Castellfollit de la Roca [2]



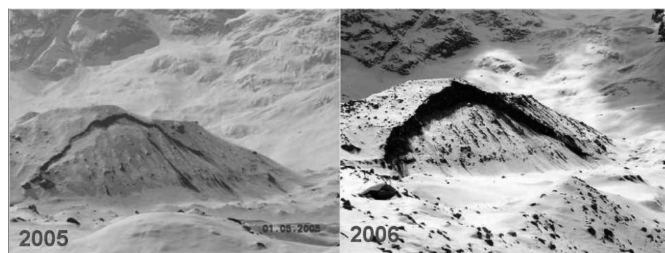
Rys. 5. (a) Powierzchnia masywu skalnego, gdzie miały miejsce obrywy I i II; (b) porównanie stanów z marca i kwietnia 2007; (c) porównanie stanów z października 2007 r. ze styczniem 2008

Fig. 5. (a) Surface of the rock, where rock falls I and II happened; (b) comparison of situation from March and April 2007; (c) comparison of situation from October 2007 and January 2008



Rys. 6. Porównanie kolejnych zestawów danych pomiarowych. Każdy punkt chmury punktów jest w kolorze zgodnie ze zmianami deformacji zarejestrowanymi w okresie porównania (wrzesień i grudzień 2006). Obryw jednej kolumny bazaltowej jest widoczny

Fig. 6. Comparison of next measurement data sets. Each point of point cloud is coloured according to recorded change of deformation in period between September and December 2006. Fall of one of basalt columns fall is visible



Rys. 7. Etapy powstawania osuwiska na morenie czołowej lodowca Belvedere [9]

Fig. 7. Stages of landslide creation on terminal moraine of Belveder glacier [9]



Rys. 8. Wyniki przemieszczenia osuwiska utworzonego z moreny czołowej lodowca Belvedere otrzymane z dwóch pomiarów skanerem laserowym [3]

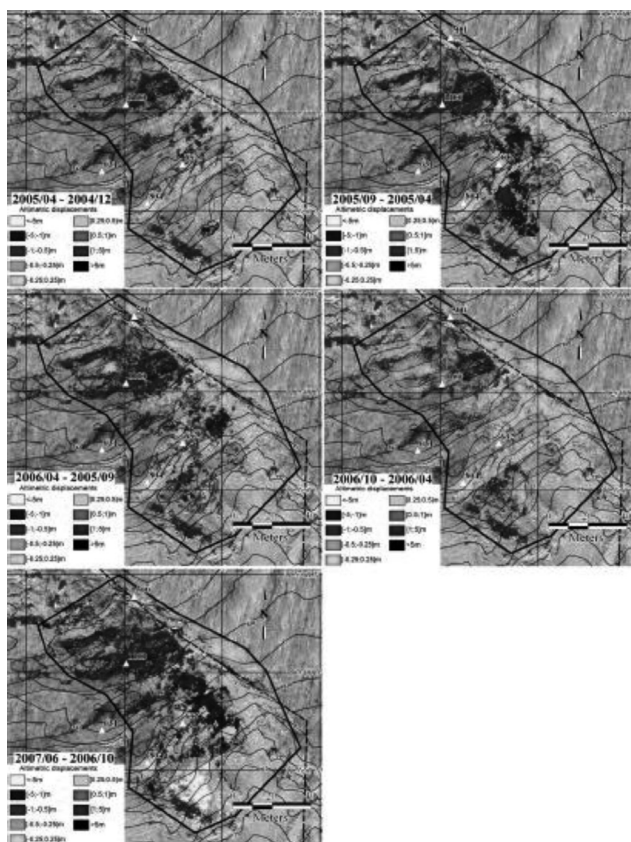
Fig. 8. Results of the displacement of landslide made from Belveder glacier terminal moraine. Received from two laser measurements [3]



Rys. 9. Pomiar całkowitego przemieszczenie osuwiska utworzonego z moreny czołowej lodowca Belvedere [3]

Fig. 9. Measure of the total displacement of the landslide made from Belveder glacier terminal moraine [3]

Pomiary naziemnym skanerem laserowym stosuje się do monitorowania osuwisk zarówno typowych skarp i zboczy, jak i zagrożonych kombinacją ruchów masowych, np. zsuwu i obrywów skalnych. Zaletą skanowania laserowego jest możliwość skanowania w miejscach niedostępnych. W artykule [5] pokazano możliwości zastosowania skaningu laserowego do monitoringu aktywnego osuwiska Séchilienne we francuskich Alpach. Osuwisko to stanowi zagrożenie dla ludzi i dla drogi RD1091. Monitoring objął lata 2004–2007, a wyniki pokazano na rysunku 10.

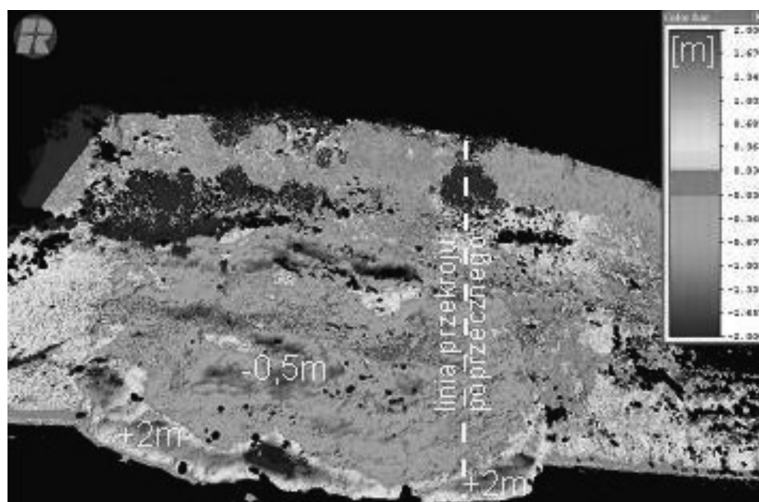


Rys. 10. Dynamika zsuwu osuwiska Séchilienne [5]

Fig. 10. Dynamics of Séchilienne landslide displacements [5]

Skanowanie osuwisk naziemnym laserem rozwija się w wielu państwach, w tym także we Włoszech, Holandii, USA oraz w Japonii, która ma bardzo dużo aktywnych osuwisk, w tym po trzęsieniach Ziemi [1].

W 2010 roku Państwowy Instytut Geologiczny – Instytut Badawczy wykonywał z bardzo dobrym rezultatem próby zastosowania tej technologii na osuwisku na klifie w Jastrzębiej Górze. Badania przeprowadzone skanerem laserowym wykazały maksymalne przesunięcia rzędu 0,5 m; maksymalne przesunięcie czoła osuwiska wyniosło 8 m, a jego wysokość osiągnęła maksymalnie 2 m (rys. 11).



Rys. 11. Dynamika osuwiska w Jastrzębiej Górze (30.04–30.06.2010 r.) [11]

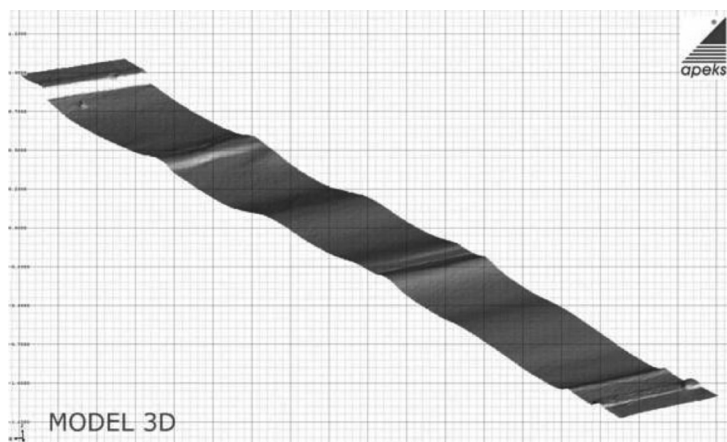
Fig. 11. Dynamics of landslide in Jastrzebia Góra (30.04–30.06.2010) [11]

Naziemny skaning laserowy znalazł zastosowanie także w inżynierii drogowej. Firma Apeks wykonała skanowanie laserowe odcinka ulicy Słowackiego w Gdańsku (rys. 12). Pomiar zrealizowano bez blokowania ruchu samochodowego. Na podstawie danych pomiarowych utworzono precyzyjny model 3D jezdni asfaltowej (rys. 13). W oparciu o szczegółowy model przeprowadzono analizę deformacji (rys. 14). Z analizy tej wynika, że największe deformacje ulicy są w jej górnej części. Takie analizy mogą być pomocne w podejmowaniu decyzji remontowych na drogach.



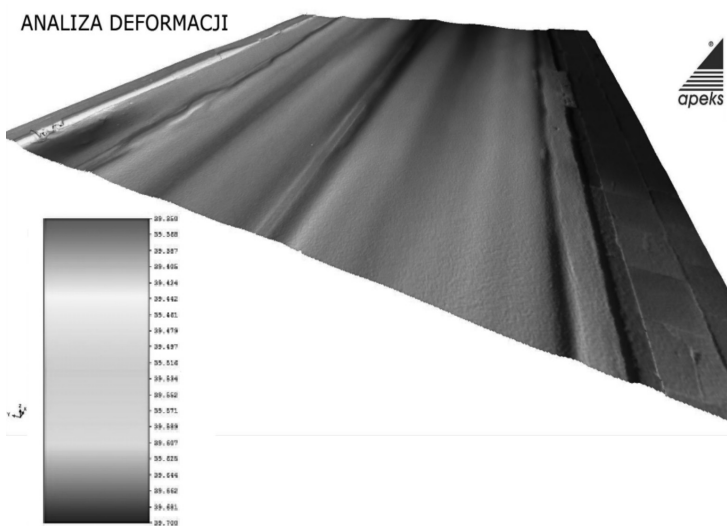
Rys. 12. Laserowy obraz odcinka ul. Słowackiego w Gdańsku [10]

Fig. 12. Laser image of Słowackiego street in Gdańsk [10]



Rys. 13. Model 3D odcinka ul. Słowackiego w Gdańsku [10]

Fig. 13. 3D model of Słowackiego street in Gdańsk [10]



Rys. 14. Analiza deformacji odcinka ul. Słowackiego w Gdańsku [10]

Fig. 14. Analysis of Słowackiego street in Gdańsk deformations [10]

4. Podsumowanie

Technika skaningu laserowego jest w ostatnich latach dynamicznie rozwijającą się technologią. Pozwala ona w szybki i dokładny sposób zarejestrować przestrzennie obiekty. Można za jej pomocą monitorować procesy w przestrzeni i czasie z milimetrową dokładnością. Aktualnie nie ma alternatywy na tak precyzyjne pomiary powierzchni. W artykule przedstawiono obszary zastosowania naziemnego skanera laserowego oraz wybrane przykłady

badań deformacji powierzchni terenu. Nowoczesne oprogramowanie pozwala z pomiarów skanerem laserowym tworzyć modele przestrzenne a następnie uzyskać przekroje i warstwy. Stwarza to nowe możliwości badań i poznawania dynamiki deformacji w czasie. Technika skaningu laserowego może w powiązaniu z innymi technikami pomiaru deformacji powierzchni terenu przyczynić się do poznawania i zapobiegania procesom, które te deformacje powodują.

Literatura

- [1] Asano H., *Measurement of Landslide Movement with 3D Laser Scanner*, Erosion and Sediment Control Research Group Public Works Research Institute, <http://linux01.crystalgraphics.com/view/>.
- [2] Abellán A., Vilaplana J.M., Calvet J., García-Sellés D., Asensio E., *Rockfall monitoring by Terrestrial Laser Scanning – case study of the basaltic rock face at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain)*, Natural Hazards and Earth System Sciences An Open Access Journal of the European Geosciences Union, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 2011, 829-841.
- [3] Godone D., Godone F., *The Support of Geomatics in Glacier Monitoring: The Contribution of Terrestrial Laser Scanner in Laser Scanner Technology Edited by J. Apolinar Munoz Rodriguez*, 258.
- [4] Grabowski D., Bagińska A., *Uwaga zagrożenie osuwiskiem*, Folder PIG-IB, Warszawa 2010.
- [5] Kasperski J., Delacourt C., Allemand P., Potherat P., Jaud M., Varrel E., *Application of a Terrestrial Laser Scanner (TLS) to the Study of the Séchilienne Landslide (Isère, France)* Remote Sens. 2010, 2(12), 2010, 2785-2802.
- [6] Shen-En-Chen, *Laser Scanning Technology for Bridge Monitoring in Laser Scanner Technology Edited by J. Apolinar Munoz Rodriguez*, 2012, 258.
- [7] Staiger R., *Terrestrial Laser Scanning Technology, Systems and Applications*, 2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco 2003.
- [8] <http://www.3deling.pl>
- [9] <http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr>
- [10] <http://www.apeks.com.pl>
- [11] <http://www.pgi.gov.pl/attachments/article/2812/monitoring.pdf>