



Mirosława BAZARNIK*

Możliwości aplikacyjne techniki naziemnego skanowania laserowego 3D w rekultywacji terenów górniczych

Streszczenie: W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój nowych technologii w zakresie tworzenia efektywnych systemów pozyskiwania danych o obiektach inżynierskich. Do rewolucyjnych rozwiązań należy system naziemnego skaningu laserowego 3D – technika obrazowania, która pozwala na precyzyjne określenie kształtu i wzajemnych relacji geometrycznych między obiektami znajdującymi się w zasięgu skanera. Skanery laserowe zaliczane są do grupy aktywnych systemów teledetekcyjnych, działających na zasadzie pomiaru odległości oraz kątów pomiędzy celem a urządzeniem, umożliwiając tym samym wyznaczenie współrzędnych punktów w przestrzeni. Instrumenty skanujące pozwalają uzyskać gęste modele punktowe tzw. chmury punktów (z ang. *point clouds*) pokrywające powierzchnię badanego obiektu. Uzyskana z pomiarów chmura punktów poddawana jest obróbce w celu określenia geometrii obiektów, ich przemieszczenia czy deformacji. Tworzone są trójwymiarowe modele cyfrowe, które mogą być edytowane i przetwarzane przez odpowiednie oprogramowanie. Skanery laserowe jako instrumenty pomiarowe znajdują zastosowanie m.in. do wysoce precyzyjnych pomiarów kartograficznych oraz architektonicznych. Z powodzeniem mogą być stosowane w rekultywacji terenów górniczych. Uzyskane techniką skanowania laserowego 3D informacje przestrzenne mogą być wykorzystane dla potrzeb dokumentacji, planowania oraz wizualizacji, a w dalszej perspektywie do oceny stanu realizacji prac dotyczących zagospodarowania terenu. Zaletami techniki skanowania laserowego w kontekście rekultywacji są: możliwość wykonania pomiarów nawet najbardziej złożonych geometrycznie i geomorfologicznie obiektów oraz precyzyja pomiarów i możliwość pracy w trudnych warunkach środowiskowych.

Słowa kluczowe: rekultywacja terenów górniczych, skanowanie laserowe 3D

Application possibilities terrestrial laser scanning 3D in the reclamation of mining areas

Abstract: In recent years, the rapid development of new technologies in the creation of effective systems of collecting data for engineering objects has been observed. The terrestrial laser scanning 3D system - imaging technique that allows for the precise determination of the shape and geometric relationships between objects within a range of the scanner is a revolutionary solution. Laser scanners are among the group of active remote sensing

* Dr inż., Politechnika Krakowska, Kraków; e-mail: mbazarnik@pk.edu.pl

systems. That operate on the principle distances and angles measuring between the target and the device, thus enabling the determination of the coordinate points in space. The scanning instruments allow you to get the dense points models, the so-called point clouds, covering the object surface. The resulting from point clouds measurements are processed to determine the object's geometry, movement or deformation. Three-dimensional digital models that can be edited and processed by the appropriate software are created. Laser scanners as measuring instruments are used for example for high-precision cartographic and architectural measurements. This can also be used in mining reclamation with great success. The 3D technique spatial information resulting obtained by laser scanning can be used for documentation, planning and visualization, and to assess the status of the land reclamation work in the longer term. The advantage of the laser scanning technology in the context of land reclamation is a possibility to make measurements of even the most geometrically and geomorphologically complex objects and precision measurements as well as the ability to work under harsh environmental conditions.

Keywords: reclamation of mining, Terrestrial Laser Scanning 3D

Wprowadzenie

Intensywna eksploatacja surowców mineralnych prowadzi do naruszenia struktury i równowagi środowiska naturalnego. Radykalnym przemianom ulegają: krajobraz, morfologia, oraz warunki przyrodnicze. Najbardziej zauważalne zmiany wiążą się z przekształcaniem terenów pod wyrobiska odkrywkowe i zwałowiska zewnętrzne odpadów a także z odwodnieniem górotworu. Efektem eksploatacji surowców naturalnych są zmiany ukształtowania terenu oraz warunków wodno-gruntowych, co bezpośrednio przekłada się na środowisko przyrodnicze (np. zniszczenie szaty roślinnej wskutek osuszenia gleby) oraz infrastrukturę (uszkodzenia obiektów budowlanych spowodowane deformacjami podłoża) (Pietrzyk-Sokulska 2003; Siuta 1998; Siuta i Żukowski 2008). Wielorakość form erozyjnych, deformacji rzeźby powierzchni terenu, degradacji gleby oraz środowiska gruntowo-wodnego, czynią zagadnienie rekultywacji bardzo skomplikowanym, wymagającym opracowania odpowiedniej strategii, w celu zoptymalizowania procesów prowadzących do rekonstrukcji terenu.

O ochronie i rekultywacji gruntów zniekształconych przez górnictwo – zarówno podziemne, jak i odkrywkowe stanowią podstawy prawne, techniczne i organizacyjne. Rekultywacja (odnowa kultury środowiska) polega na przywróceniu ekologicznej i gospodarczej użyteczności powierzchni ziemi, zdegradowanej przez bytową i gospodarczą działalność człowieka oraz przez żywoły naturalne na terenach zantropogenizowanych (PGK 2010).

Likwidowanie szkód, w tym przywrócenie pierwotnej funkcjonalności terenów zdegradowanych w wyniku prowadzonej działalności górniczej, jest ustawowym obowiązkiem przedsiębiorcy górniczego.

Proces ten jest skomplikowany i długotrwały. Wymaga podejścia komplementarnego w oparciu o nowoczesne metody i narzędzia pomiarowe oraz wizualizacyjne. Do takich metod niewątpliwie zaliczyć można technikę naziemnego skanowania laserowego 3D (ang. TLS – *Terrestrial Laser Scanning*).

Technika ta jest kolejnym, po systemie Nawigacji Satelitarnej GPS (ang. *Global Positioning System*), rewolucyjnym rozwiązaniem technologicznym w dziedzinie geodezji i kartografii. Charakteryzuje się ona wysoką wydajnością i precyzją oraz pozwala na zobrazowanie zarówno kształtu powierzchni, jak i kinematyki procesów. Dostarcza danych, które mogą być wykorzystane przez geologów, geomorfologów i geotechników do inter-

pretacji zachodzących zjawisk (Bazarnik 2015). Metoda oferuje zalety typowych technik bezkontaktowych, a ponadto pozwala na zebranie w krótkim czasie gęstej chmury punktów z powierzchni będącej przedmiotem badania, w celu uzyskania obrazu trójwymiarowego. Nie wymaga konieczności wdrożenia dodatkowych elementów jak np. odbłyśniki, i pozwala natychmiast i łatwo wykonać pomiary między punktami (Bitelli i in. 2004). Dane uzyskane z chmury punktów muszą być połączone ze sobą w celu odtworzenia ciągłości powierzchni badanego obszaru. Następnie przy pomocy odpowiedniego oprogramowania tworzone są modele powierzchni terenu oraz mapy powierzchni wraz z cechami teksturalnymi (Barbarella i Fiani 2012).

1. Charakterystyka techniki naziemnego skanowania laserowego 3D

Skanery laserowe zaliczane są do grupy aktywnych systemów teledetekcyjnych, działających na zasadzie pomiaru odległości celu od urządzenia. Wyposażone są w układ optyczny, który z zadaną częstotliwością, emituje wiązki świetlne o ustalonej długości fali i określonym kierunku. Każde odbicie od przeszkody jest rejestrowane jako położenie punktu w przestrzeni, któremu przypisane są współrzędne X, Y, Z – początkowo w układzie lokalnym skanera, a następnie w docelowym układzie współrzędnych geodezyjnych prostokątnych płaskich. Efektem pomiaru jest zbiór punktów tzw. chmura punktów, posiadających współrzędne geodezyjne oraz parametry intensywności odbicia (Bazarnik 2014).

Zastosowana technologia pomiaru odległości determinuje podział urządzeń na: skanery pulsacyjne (TOF – *time-of-flight*) oraz skanery fali ciągłej (CW – *continuous wave ranging*) tzw. fazowe. W skanerach pulsacyjnych odległość jest funkcją czasu, w jakim wiązka przebywa drogę do obiektu i z powrotem. W skanerach fazowych sygnał lasera jest modulowany odpowiednią funkcją sinusoidalną (Wężyk 2010). Skanery impulsowe są urządzeniami wolniejszymi (z rejestracją do ok. 200 tys. pkt/s), o mniejszej dokładności, ale większym zasięgu (od ok. 100 metrów do kilku kilometrów), natomiast fazowe – są szybsze (rejestracja nawet do 1 mln pkt/s), dokładniejsze, jednak o zdecydowanie krótszym zasięgu (od kilku do ok. 100 metrów). Zaawansowane technologicznie skanery impulsowe rejestrują także dla każdego punktu intensywność odbitego sygnału, czyli wszystkie składowe odbicie jednej wiązki, a nie tylko pierwsze i ostatnie echo. W przypadku naziemnych skanerów laserowych kolejne echa są interpretowane poprzez metodę detekcji tzw. pełnej fali (ang. *full waveform detection*), która polega na cyfrowym próbkowaniu całej krzywej fali powracającej do detektora i niosącej ze sobą informacje o odbiciu od wielu obiektów (co ma miejsce np. podczas wędrówki plamki lasera przez warstwy roślinności). Ta cecha naziemnych urządzeń impulsowych daje możliwości prowadzenia badań w miejscach trudno dostępnych, w których często jednym z elementów składowych jest pokrywa roślinna. Oba typy przyrządów na ogół są odpowiednie do prowadzenia prac inwentaryzacyjnych i mogą stanowić znakomite uzupełnienie tradycyjnych metod geodezyjnych (Bazarnik 2014).

Zastosowanie specjalistycznych narzędzi graficznych, opartych na zaawansowanych algorytmach obliczeniowych, pozwala na zamianę modeli punktowych w postać geometryczną, która w pełni oddaje charakter i formę inwentaryzowanych obiektów. Zasada pomiaru skanerem laserowym polega na wyznaczeniu współrzędnych punktów, które definiują geometrię inwentaryzowanej powierzchni na podstawie mierzonych kątów: poziomego i pio-

nowego (względem kierunków referencyjnych) oraz odległości. W ten sposób pozyskiwana jest duża ilość danych, które poddawane są procesom filtracji i orientacji w przestrzeni. Dane mogą być archiwizowane i przetwarzane w późniejszym okresie bez konieczności powtarzania pomiarów. Sposób odbicia promienia lasera od obiektów terenowych zależy od rodzaju powierzchni, a także struktury wewnętrznej obiektu. Każda powierzchnia ma inną zdolność odbicia impulsu, co jest uzależnione od rodzaju materiału, jego koloru czy chropowatości (Krooks 2013; Pesci i Teza 2008). Stosując dodatkowo kamerę zintegrowaną ze skanerem (lub odpowiednio wykonane zdjęcia z aparatu fotograficznego), istnieje możliwość rejestracji wartości RGB dla każdego pomierzonego punktu, co umożliwia uzyskanie kolorowego skanu, który w takiej postaci jeszcze wierniej oddaje rzeczywistość. Jak już wspomniano, dokładność otrzymanej z pomiarów chmury punktów zależy od tego, z jaką intensywnością odbija się i rozprasza wiązka lasera. Moc powracającego sygnału wyznacza stopień ograniczeń skanera laserowego oraz ma wpływ na efektywność pomiarów. Intensywność odbitego sygnału laserowego zależy przede wszystkim od odległości obiektu od skanera, kąta padania wiązki oraz rodzaju powierzchni odbijającej. Pierwszy z tych czynników stanowi naturalną zależność, wynikającą z propagacji fali w powietrzu. Drugi wynika z właściwości wiązki laserowej, której średnica wraz z odległością ulega zwiększeniu. W związku z tym wiązka laserowa przy padaniu na obiekt pod pewnym kątem rozprasza się i nie oddaje prawidłowo odległości do pojedynczego, nieskończonego punktu. Trzecim czynnikiem jest rodzaj powierzchni, na jaką pada wiązka laserowa. Wpływ tych czynników był przedmiotem wielu badań (Krooks 2013; Pesci i Teza 2008; Piechocka i in. 2004). W naziemnym skaningu laserowym proces pozyskiwania docelowych informacji polega głównie na ich manualnym wyznaczeniu w obrębie chmury punktów lub automatycznym określeniu z modelu 3D, wygenerowanego z chmury. Przy generowaniu modelu 3D ustala się wiele parametrów wpływających na stopień informacji punktowej. Uzyskany model 3D pozwala na automatyczne wyznaczenie wektoryzowanych, geometrycznych informacji o obiekcie. Na rynku obecna jest liczna grupa narzędzi umożliwiająca pełną obróbkę i analizę otrzymanych danych. Większość profesjonalnych dostępnych systemów, szczególnie CAD, wprowadza moduły umożliwiające przetwarzanie chmury punktów (Kamiński i in. 2008). Zagadnieniem bardziej skomplikowanym jest możliwość uzyskiwania, w sposób automatyczny odpowiedniej klasy informacji, bezpośrednio z chmury punktów. Istnieje wiele algorytmów, które w mniej lub bardziej efektywny sposób potrafią wyodrębnić elementy liniowe z chmury punktów (Piechocka i in. 2004).

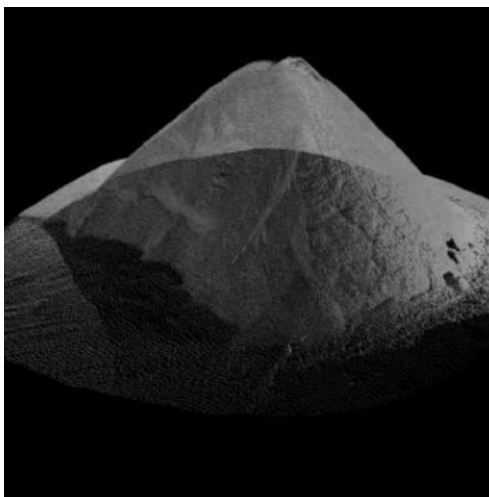
2. Możliwości zastosowania techniki skanowania laserowego 3D w rekultywacji terenów górniczych

Kluczowym zagadnieniem w procesie rekultywacji terenów górniczych jest optymalizacja działań inwestycyjnych. Technika skanowania laserowego umożliwia szybkie zbieranie danych, na podstawie których tworzone są trójwymiarowe modele terenu, odzwierciedlające rzeczywisty stan interesującego nas obiektu. Uzyskane informacje przestrzenne mogą być wykorzystane dla potrzeb dokumentacji, planowania oraz wizualizacji, a w dalszej perspektywie do oceny stanu realizacji prac dotyczących zagospodarowania terenu.

2.1. Planowanie, dokumentacja i wizualizacja

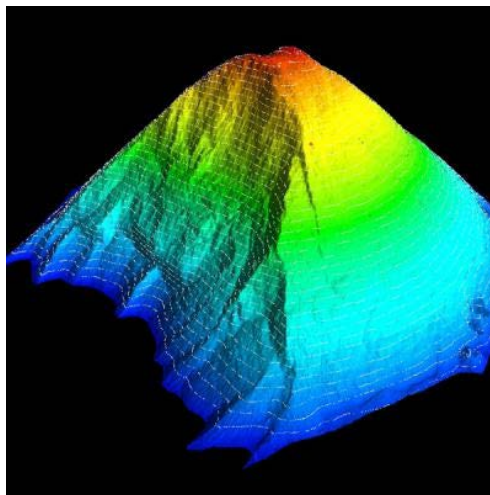
Na etapie planowania inwestycji niezbędne jest przeprowadzenie prac inwentaryzacyjnych mających na celu uzyskanie szczegółowych danych dotyczących obecnego stanu zagospodarowania obszaru, który ma zostać objęty pracami rekultywacyjnymi. Wybór właściwej technologii pomiaru dla charakterystyki danego obiektu, w tym jego rozmiarów, mikrorzeźby oraz zachodzących zjawisk ma istotne znaczenie. W przypadku kopalń odkrywkowych, czy też zwałowisk materiałów poeksploatacyjnych nie sprawdzają się tradycyjne metody geodezyjne (Gu i Xie 2013). Zazwyczaj są to obszary trudno dostępne o skomplikowanej rzeźbie terenu (półki na skarpach, osuwiska, strome zbocza kopalni odkrywkowych, tereny podmokłe, grząskie). Technika skanowania laserowego 3D umożliwia prowadzenie rejestracji stanu obiektu lub zjawiska przy całkowitej niezależności od dostępności danych zewnętrznych, których zakres przestrzenny i czasowy często limituje wykonywanie obserwacji. Jednocześnie zachowuje wysoką efektywność pomiarów wynikającą z częstotliwości wysyłania wiązki światła (w zależności od modelu wynosi od 1 kHz (rejestracja 1000 pkt/s) do 1 MHz (ok. 1 mln pkt/s)). Dzięki zastosowaniu aktywnego źródła emisji wiązki laserowej TLS charakteryzuje się niezależnością pomiarów od warunków oświetleniowych oraz od przejrzystości powietrza. Dzięki temu wzrasta efektywność pozyskiwania danych.

Na podstawie uzyskanych chmur punktów można wykonać tradycyjny model w postaci nieregularnej siatki trójkątów, których duża gęstość pozwala na generowanie modeli numerycznych o bardzo realistycznym wyglądzie (rys. 1a i 1b). Z wygenerowanych powierzchni 3D możliwe jest wyodrębnienie profili 2D lub linii konturowych obiektów. Otrzymane modele mogą być następnie przetwarzane i wykorzystywane w systemach GIS i CAD do dalszej integracji danych. Z uzyskanych trójwymiarowych modeli wykonywana jest dokumentacja (w zależności od potrzeb użytkownika) odzwierciedlająca rzeczywisty stan interesującego nas obiektu oraz dająca graficzny obraz planowanych inwestycji. Cyfrowa forma



Rys. 1a. Model punktowy (chmura punktów) hałdy węgla (<http://www.apeks.com.pl>)

Fig. 1a. Point Clouds model of coal piles obtained using 3D laser scanning (<http://www.apeks.com.pl>)



Rys. 1b. Model 3D hałdy węgla wygenerowany na podstawie chmury punktów (<http://www.apeks.com.pl>)

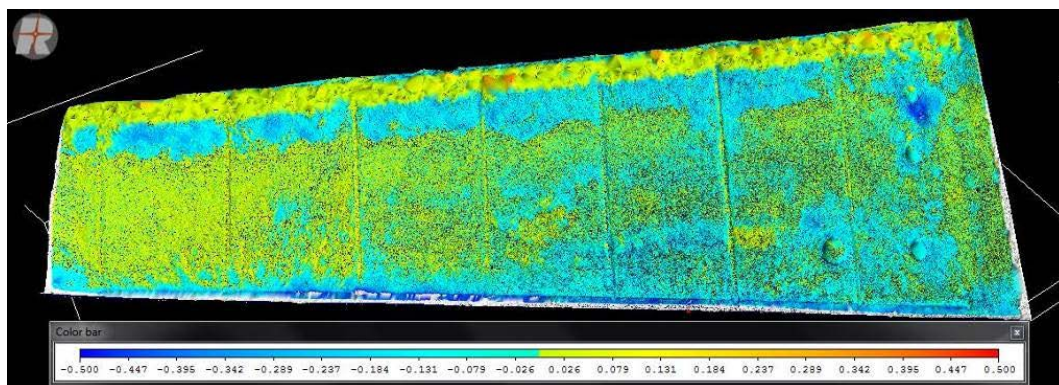
Fig. 1b. 3D Digital model of coal piles obtained using 3D laser scanning (<http://www.apeks.com.pl>)

danych daje możliwość konstruowania modeli środowiska, projektowania dróg, systemów odwadniających itp. Głównym celem wizualizacji jest ułatwienie użytkownikowi, a w tym również instytucjom państwowym, obserwacji obiektów z różnych miejsc, przy zadanych kątach i kierunkach.

2.2. Monitorowanie zmian powierzchni terenu

Założeniem monitoringu jest prowadzenie regularnych obserwacji obiektu w celu rejestrowania zjawisk zachodzących w jego strukturze oraz gromadzenie danych o obiekcie, które stanowią podstawę dla dalszych analiz, prognozowania, ostrzegania i przeciwdziałania skutkom niepożądanych zjawisk (Pilecka i Bazarnik 2015). W monitoringu, czyli analizie czasowej ewolucji obszaru rekultywowanego, naziemne skanowanie laserowe 3D wydaje się być odpowiednią techniką (Gu i Xie 2013). Podstawową formą degradacji terenu spowodowaną eksploatacją górniczą jest osiadanie (Głowacki i Milczarek 2013; Król i in. 2015), które może prowadzić do zmian odległości pomiędzy powierzchnią terenu i zwierciadłem wód gruntowych (zawodnienia wodnogruntowe). Konsekwencją zaburzenia układu stosunków wodnych w glebach jest modyfikacja budowy gruntu, jego cech morfologicznych oraz właściwości fizyczno-mechanicznych. Technika skanowania pozwala na precyzyjne odwzorowanie ukształtowania terenu a co za tym idzie uchwycenie nawet niewielkich zmian w mikrorzeźbie terenu, procesów erozji i depozycji. Możliwość szybkiego zbierania danych, w czasie rzeczywistym, jest szczególnie ważna przy monitorowaniu ruchów powierzchniowych spowodowanych przez osiadanie. Uzyskane wyniki dostarczają danych na temat parametrów osiadania przydatnych do analizy i prognozy ewolucji zachodzących procesów. Koncepcja wykorzystania naziemnego skanowania laserowego do badania procesów erozyjnych opiera się na wykonaniu skanowania obszaru zagrożonego procesami erozji w kolej-

nych momentach czasowych T_i , zwłaszcza w okresach nasilenia zjawiska erozji liniowej, np. po ulewnych deszczach, czy w czasie wiosennych roztopów (Grance i in. 2014; Mrozek i in. 2013, Niemiec 2009; Travelletti i Malet 2012). W wyniku nałożenia na siebie dwóch skanów w lokalnym układzie współrzędnych geodezyjnych tworzony jest model różnicowy. Przykład takiego modelu prezentuje rysunek 2. Dla zapewnienia najlepszych rezultatów



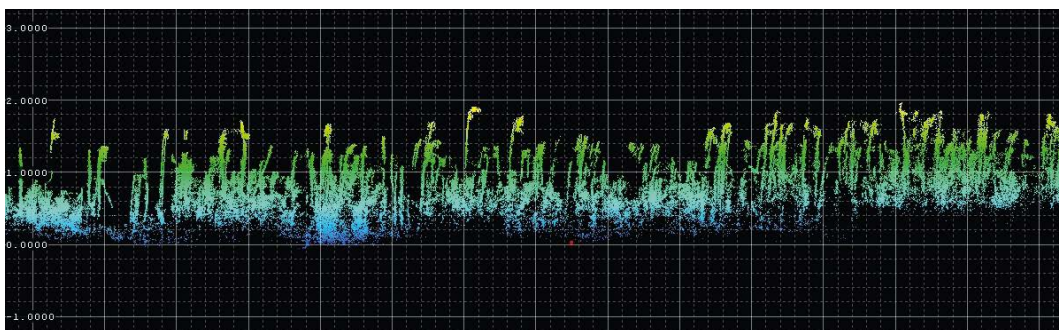
Rys. 2. Przykładowy model różnicowy terenu zagrożonego osuwiskiem w miejscowości Sadowie (Pilecka i Bazarnik 2015)

Fig. 2. The example of differential digital elevation model of the Sadowie region threatened by landslide (Pilecka and Bazarnik 2015)

badania modele wykonane w poszczególnych momentach czasu T_i powinny mieć jednakową rozdzielczość oraz dokładność. Na podstawie modelu różnicowego możliwa jest obserwacja zmian ukształtowania powierzchni terenu wywołanych np. zjawiskami erozyjnymi. Możliwe jest prawie natychmiastowe sformułowanie prognozy rozwoju zjawiska i określenie stopnia zagrożenia. Otrzymane dane w formie cyfrowej mogą być wykorzystane np. do symulowania procesów dynamicznych. Dzięki właściwości przenikania impulsu laserowego przez pokrywę roślinną uzyskujemy informacje o rzeczywistym ukształtowaniu terenu. Jest to bardzo cenna dla geomorfologów cecha, zwłaszcza na terenach, gdzie pokrywa roślinna maskuje drobne zmiany rzeźby terenu. Wykorzystanie technologii naziemnego skanowania do analizy zjawisk erozyjnych pozwala odejść od tradycyjnych pomiarów punktowych metodami geodezyjnymi. Uzyskujemy możliwość oceny zjawisk erozyjnych (zarówno pod kątem natężenia procesów, jak i zdarzeń inicjujących erozję) a także zasięgu obszarowego występujących procesów. Korzystanie z TLS wiąże się z koniecznością opracowania metodyki badań, doboru skanera, powiązania z układem odniesienia ogólnym lub własnym obiektu, a także ustalenia rozdzielczości przestrzennej wykonywanej inwentaryzacji. Konsekwencje przyjętej metodyki i parametrów technicznych skanowania rzutują nie tylko na czas i sposób prowadzenia pomiarów, lecz również na wiarygodność i dokładność analiz.

2.3. Monitorowanie szaty roślinnej

Technika skanowania laserowego 3D stanowi również narzędzie potencjalnie użyteczne w odwzorowaniu szaty roślinnej. Impuls laserowy posiada zdolność przenikania przez pokrywę roślinną, co pozwala na pozyskiwanie modelu numerycznego również dla obszarów zadrzewionych (Affek i in. 2014). Dane laserowe pozwalają na określenie podstawowych parametrów roślinności takich jak wysokość drzew, średnica korony, gęstość zalesienia, oszacowania biomasy, określenia granic lasu. Można zatem prześledzić rozwój roślinności na tych częściach obszaru rekultywowanego, na których zaprojektowano tereny zielone. Poniżej zaprezentowano przykładowy profil na podstawie danych TLS obrazujący zmienność podłoża oraz struktury roślinności (rys. 3).



Rys. 3. Przykładowy profil o szerokości 1 m przez chmurę punktów TLS, obrazujący zmienność podłoża i strukturę roślinności. Punkty koloryzowane według wysokości (Affek i in. 2014)

Fig. 3. Profile with a depth of 1 m, showing the variability of the ground level and vegetation structure. Points colored by elevation (relative value in meters) (Affek et al. 2014)

2.4. Pomiar objętości mas ziemnych

Jednym z etapów realizacji inwestycji w ramach procesu rekultywacji są roboty ziemne oraz pomiary objętości mas ziemnych. Konieczność obliczenia objętości mas ziemnych zachodzi na przykład podczas: inwentaryzacji objętości składowanych materiałów sypkich czy wyznaczeniu przewidywanych kosztów robót ziemnych. Do obliczeń objętości mas ziemnych niezbędny jest zapis istniejącego stanu powierzchni terenu oraz dane na temat stanu docelowego, jaki przewiduje czy zakłada projekt w ramach danej inwestycji (Sobieraj i in. 2014). Dane terenowe, na podstawie których opracowuje się graficzną reprezentację rzeźby terenu, pozyskiwane mogą być między innymi z wykorzystaniem Naziemnego Skaningu Laserowego. Roboty ziemne są rozliczane wg ilości jednostek objętości gruntu w m^3 , dlatego bardzo ważne jest obliczenie objętości mas ziemnych z odpowiednio dużą dokładnością. Zarówno przed, jak i po wykonaniu robót ziemnych niezbędny jest pomiar ukształtowania powierzchni topograficznej. W Polsce dokładność, z jaką należy określać objętości mas ziemnych hałd, składowisk i zwałowisk, reguluje Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 grudnia 2011 r. w sprawie dokumentacji mierniczo-geologicznej (Rozporządzenie

MŚ 2011), gdzie błąd względny pomiaru objętości zwałowisk nadkładu oraz składowisk urobku nie może przekraczać dla objętości:

- do 20 tys. m³ – 4% objętości,
- ponad 20 do 50 tys. m³ – 3% objętości,
- ponad 50 do 200 tys. m³ – 2% objętości,
- ponad 200 tys. m³ – 1% objętości.

2.5. Kontrola jakości wykonanych prac

Jednym z ważniejszych zagadnień rekultywacji jest kontrola jakości wykonywanych prac oraz weryfikacja realizacji projektu. Technika naziemnego skanowania laserowego może posłużyć do oceny stanu obiektu, realizacji procesów zagospodarowania terenu i przestrzennych relacji oraz sposobu propagacji zmian zachodzących w obrębie badanego obszaru (Gu i Xie 2013; Niemiec 2009; Sobieraj i in 2014; Pilecka i Bazarnik 2015). Zaawansowane algorytmy pozwalają na kompleksową ocenę cech powierzchniowych. Dzięki temu mogą zostać uwidocznione wszelkie odchylenia od normy. Wykonując profilowania 2D można sprawdzić geometrię powykonawczą i wskazać miejsca słabsze z ukrytymi wadami strukturalnymi, które wpływają na trwałość obiektu. Przy użyciu naziemnego skanera laserowego 3D możemy uzyskać informację na temat poszczególnych elementów składowych konstrukcji nasypowych takich jak np.: grubość i objętość materiału poszczególnych warstw gruntu, dokładność wykonywania elementów obudowy czy elementów uszczelniających (Bazarnik 2014; Gordon i Lichti 2007; Slob i Hack 2004).

Podsumowanie

Technika naziemnego skanowania laserowego 3D pozwala na szybkie i sprawne wykonanie pomiarów dostarczających szerokiej gamy informacji, które po odpowiednim przetworzeniu są przydatne w kontroli i analizie zachodzących procesów. W odniesieniu do zagadnienia rekultywacji TLS może być użyteczny na etapie projektu, planu zagospodarowania terenu, monitoringu obiektu (osiadania i erozji gleby), kontroli wyników prac rekultywacyjnych oraz analizie rozwoju szaty roślinnej. Zaletą TLS jest możliwość określenia z bardzo dużą dokładnością zmienności natężenia zachodzących zjawisk. Połączenie skanera z precyzyjnym systemem GPS sprawia, iż uzyskane dane przestrzenne posiadają dokładne współrzędne, dzięki czemu możliwy jest monitoring przemieszczeń pionowych i poziomych wybranych, charakterystycznych elementów (mogą to być np. pnie drzew, głązy), wyznaczenie obszarów o największym stopniu przekształcenia (zdegradowania) oraz określenie wielkości i tempa zachodzących przemieszczeń wybranych punktów w obrębie rekultywowanego obszaru. Technika Naziemnego Skanowania Laserowego 3D może stanowić znakomite uzupełnienie tradycyjnych metod geodezyjnych.

Literatura

- Affek i in. 2014 – Affek, A., Wolski, J. i Solon, J. 2014. Naziemne skanowanie laserowe (TLS) jako narzędzie do szacowania nadziemnej biomasy roślinności torfowiskowej. *Problemy Ekologii Krajobrazu (PEK)* 38, s. 41–60.
- Barbarella, M. i Fiani, M. 2012. Landslide monitoring using terrestrial laser scanner: georeferencing and canopy filtering issues in a case study, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 39(B5), s. 157–162.
- Bazarnik, M. 2014. Potencjał naziemnego skaningu laserowego 3D w inwentaryzacji i monitoringu tuneli kolejowych, *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne* 2 (104), s. 55–67.
- Bazarnik, M. 2015. Terrestrial Laser Scanning 3D as a useful method for monitoring of urban areas endangered by landslides. *Geology, Geophysics & Environment* 41 (1) s. 63–64.
- Bitelli i in. 2004 – Bitelli, G., Dubbini, M. i Zanutta, A. 2004. Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science* 38(7B), s. 246–251.
- Głowacki, T. i Milczarek, W. 2013. Powierzchniowe deformacje wtórne dawnych terenów górniczych. *Mining Science* 20, s. 39–55.
- Gordon, S.J. i Lichti, D.D. 2007. Modeling terrestrial laser scanner data for precise structural deformation measurement. *Journal of Surveying Engineering* 133, s. 72–80.
- Grance i in. 2014 – Grance, J., Malet, J.P., Dewez, T. i Travelletti, J. 2014. Target Detection and Tracking of moving objects for characterizing landslide displacements from time-lapse terrestrial optical images. *Engineering Geology* 172, s. 26–40.
- Gu, F. i Xie, H. 2013. Status and development trend of 3D laser scanning technology in the mining field. DOI: 10.2991/rsete.2013.99.
- Kamiński i in. 2008 – Kamiński, W., Bojanowski, K., Dumański, A., Mroczkowski, K. i Trystuła, J. 200. Ocena możliwości wykorzystania skanera laserowego Scanstation firmy Leica w badaniu deformacji obiektów budowlanych, *Czasopismo Techniczne Środowisko* 2, s. 139–147.
- Klatka i in. 2011 – Klatka, S., Boroń, K. i Ryczek, M. 2011. Wpływ degradacji hydrologicznej gleb na terenach poeksploatacyjnych górnictwa węgla kamiennego na treść map glebowo-rolniczych, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 49, s. 559–565.
- Krooks i in. 2013 – Krooks, A., Kaasalainen, S., Hakala, T. i Nevalainen, O. 2013. Correction of Intensity Incidence Angle Effect in Terrestrial Laser Scanning, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W2, 2013 ISPRS Workshop Laser Scanning 2013, 11–13 November 2013, Antalya, Turkey s. 145–150.
- Król i in. 2015 – Król, Ż., Mikrut, S., Gabryszuk, J., Postek, P. i Mazur, A. 2015. Ocena obniżenia terenu oraz zmian użytkowania gruntów w strefach szkód górniczych Lubelskiego Zagłębia Węglowego. *Inżynieria Ekologiczna Ecological Engineering* 44, s. 26–33.
- Mrozek i in. 2013 – Mrozek, T., Wójcik, A., Zimnal, Z. i Grabowski, D. 2013. Landslide Inventory at 1:10,000 Scale in Poland: Benefits and Dilemmas of a National Project [W:] Margottini, C., Canuti, P. i Sassa, K. red. *Landslide Science and Practice* 1, s. 51–55.
- Niemiec i in. 2009 – Niemiec, M., Jóźków, G. i Borkowski, A. 2009. Monitorowanie zmian ukształtowania powierzchni terenu spowodowanych erozją wodną z wykorzystaniem naziemnego skanowania laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 20, s. 333–342.
- Pesci, A. i Teza, G. 2008. Effects of surface irregularities on intensity data from laser scanning an experimental approach. *Annals of Geophysics* 51, 5/6, s. 839–848.
- PGK 2010, Ustawa z dnia 8 października 2010 r Prawo Geodezyjne i Kartograficzne (Dz.U. 2010. 193.1287).
- Piechocka i in. 2004 – Piechocka, N., Marmol, U. i Jachimski, J. 2004. Stereometryczna weryfikacja DTM uzyskanego ze skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 14, s. 301–312.
- Pietrzyk-Sokulska, E. 2003. *Eksploatacja surowców skalnych problem nieużytków pogórnicznych*. Wydawnictwo WUG – Wyższego Urzędu Górniczego, 5, s. 33–34.
- Pilecka, E. i Bazarnik, M. 2015. Application of terrestrial laser scanner for monitoring the railway infrastructure threatened by landslides [W:] Stypuła, K. red. 2015 *Monografia – Recent Advances in Civil Engineering: Structural Mechanics* s. 171–190.

- Rozporządzenie MŚ 2011. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22grudnia 2011 r. w sprawie dokumentacji mierniczo-geologicznej (Dz.U. 2011 r. 291.1713)
- Siuta, J. 1998. Struktura przestrzenna wieloczynnikowej degradacji środowiska w Polsce. *Archives of Environmental Protection* 24, 1, 7416 s.
- Siuta, J. i Żukowski, B. 2008. *Degradacja i rekultywacja powierzchni ziemi w Polsce*. Warszawa: Wydawnictwo IOŚ – Instytutu Ochrony Środowiska.
- Slob, S. i Hack, R. 2004. 3D Terrestrial Laser Scanning as a New Field Measurement and Monitoring Technique. *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe Lecture Notes in Earth Sciences* 104, s. 179–189.
- Sobieraj i in. 2014 – Sobieraj, A., Nowak, A. i Szulwic, J. 2014. Porównanie wyników pomiarów mas ziemnych wykonanych metodą skaningu laserowego i GNSS w kontekście inwestycji komunikacyjnych *Logistyka* 6, s. 7956–7962.
- Travelletti, J. i Malet, J.P. 2012. Characterization of the 3D geometry of flow-like landslides: A methodology based on the integration of heterogeneous multi-source data. *Engineering Geology* 128, s. 30–48.
- Wężyk, P. 2010. Naziemny skaningu laserowy. Teledetekcja i fotogrametria obszarów leśnych. *Geomatyka w Lasach Państwowych – cz. I podstawy*. Warszawa: Wydawnictwo Centrum Informacyjne Lasów Państwowych s. 343–357.
- [Online] Dostępne w: <http://www.apeks.com.pl/pl/skanowanie-3d/inwentaryzacja-monitoring-pomiary-ilosciowe/inwentaryzacja-hald-wegla.html> [Dostęp: 10.02.2016].
- [Online] Dostępne w: <https://www.igipz.pan.pl/zsigik-projekty-tls-wprowadzenie.html> [Dostęp: 10.02.2016].

