

Naziemne skanowanie laserowe (TLS) jako narzędzie do szacowania nadziemnej biomasy roślinności torfowiskowej

Terrestrial laser scanning (TLS) as a tool for estimating above-ground biomass of peatbog vegetation

Andrzej Affek, Jacek Wolski, Jerzy Solon

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyńskiego PAN
ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa
e-mail: a.affek@twarda.pan.pl, j.wolski@twarda.pan.pl, j.solon@twarda.pan.pl

Abstract: The aim of the research, conducted in the Biebrza National Park (NE Poland) was the development and initial validation of an innovative, non-invasive method for estimating the biomass of peatbog vegetation using terrestrial laser scanning (TLS) technology.

Due to the large diversity of plant species on wetlands and their small-individual volumes, generating surfaces (applicable to crops) or 3D shapes (applicable to trees) does not seem to be an appropriate solution in this case. It was recognized that for the implementation of the objective pursued, the best characteristics of the LiDAR-derived point cloud is the density of the points in a given volume. Validation measurements were taken for volumes, whose projection on the ground is a square 1×1 m. An algorithm of weighting the number of points was proposed that takes into account the distance from the ground-based scanner and other scanning parameters. The results were referred to the actual weight of the dry biomass, acquired by the classical invasive method (cutting, drying, weighing).

Under certain assumptions, the results of this study proved to be very promising – the coefficient of determination R^2 for the linear function reached a maximum value of 0,97. However, more field data is needed for the implementation of the proposed method to the continuous monitoring system of the above-ground biomass of non-forest vegetation.

Słowa kluczowe: biomasa nadziemna, LiDAR, gęstość chmury punktów, Biebrzański Park Narodowy

Key words: above-ground biomass, LiDAR, point cloud density, Biebrza National Park

Wprowadzenie

W ostatnich latach w ramach nauk przyrodniczych podejmuje się wiele prób mających na celu dokumentację zmian klimatycznych oraz poznanie zjawisk i procesów przyczyniających się do ocieplenia klimatu. Jedną z najlepiej udokumentowanych prawidłowości dotyczy zależności między zawartością dwutlenku węgla w atmosferze ziemskiej a temperaturą powierzchni ziemi.

Wzrost udziału dwutlenku węgla w ostatnim stuleciu badacze wiążą między innymi ze zmianami użytkowania ziemi i pokrycia terenu. Węgiel wiązany w biomase roślinnej, w wyniku niszczenia naturalnych zbiorowisk roślinnych, w coraz większych ilościach uwalniany jest do atmosfery (głównie w wyniku spalania). Na problem malejącej sekwestracji węgla zwracają uwagę zarówno badacze zajmujący się ekosystemami leśnymi (Hurt i in. 2004; Feliciano i in. 2014), jak i monokulturami roślin uprawnych (Hosoi, Omasa 2009).

Do oszacowania, jak dużo węgla wiążą poszczególne zbiorowiska roślinne, niezbędna jest jednak wiedza dotycząca ilości biomasy nadziemnej przypadającej na jednostkę powierzchni. Do jej pomiaru stosuje się powszechnie metodę polegającą na wycięciu roślin na ściśle określonych pod względem kształtu i wielkości powierzchniach, a następnie ich zważeniu w stanie świeżym i po wysuszeniu. Metoda ta nie jest jednak wolna od wad, do których zalicza się m.in. inwazyjny charakter (trwałe niszczenie roślin, szczególnie niewskazane na obszarach chronionych), czaso- i pracochłonność poszczególnych etapów (cięcie, suszenie, ważenie) oraz trudności w ekstrapolacji wyników z małych powierzchni testowych na duże obszary. W związku z tym podejmowane są w Polsce i na świecie próby szacowania ilości fitomasy za pomocą metod alternatywnych.

W ciągu kilku ostatnich dziesięcioleci podstawowymi technikami zdalnego pozyskiwania danych obrazowych z pułapu lotniczego i satelitarnego były fotogrametria i „klasyczna” teledetekcja. Metody te cechuje pasywny sposób rejestracji, czego nie mogła zmienić ani rewolucja w zakresie detektorów (wyparcie światłoczułych emulsji przez matryce CCD), ani postępująca automatyzacja analiz interpretacyjnych (fotogrametryczne stacje robocze, stereomatching). Nowe możliwości stworzył dopiero jeden z pierwszych aktywnych systemów rejestracji informacji obrazowej, czyli interferometria radarowa¹ (InSAR – Interferometric Synthetic Aperture Radar) – technologia kojarzona przede wszystkim z misją promu kosmicznego Endeavour (SRTM – Shuttle Radar Topography Mission), której efektem był Numeryczny Model Terenu obejmujący niemal 80% lądów Ziemi. W praktyce jednak ani centymetrowe rozdzielczości współczesnych ortofotomap, ani InSAR, nie umożliwiły pozyskania informacji geoprzestrzennych wystarczających do dokładnego szacowania ilości biomasy zbiorowisk trawiastych.

Alternatywą okazał się być inny aktywny system teledetekcyjny – LiDAR (Light Detection And Ranging). W latach 70. i 80. XX w. wykorzystywano go wyłącznie w urządzeniach montowanych na statkach powietrznych (ALS – Airborne Laser Scanning) i satelitach – głównie do badań oceanów (pomiar koncentracji chlorofilu, batymetria) i ekosystemów leśnych oraz na potrzeby wojska i eksperymentów NASA. Dopiero w 1993 r. pojawił się prototyp współczesnego skanera wykorzystywany komercyjnie (Hyypä i in. 2013), zaś pięć lat później – pierwsze na świecie urządzenie firmy Zoller+Fröhlich

¹ Technologia InSAR jest wciąż rozwijana, o czym świadczy m.in. wystrzelenie w 2007 r. pierwszego na świecie wysokorozdzielczego satelity obrazującego w zakresie mikrofal (TerraSAR-X), trzy lata później bliźniaczego TanDEM-X, zaś w kwietniu 2014 r. rozpoczęcie misji SENTINEL-1, podczas której zbierane będą dane radarowe dla europejskiego programu monitoringu środowiska Copernicus.

do skanowania naziemnego (TLS – Terrestrial Laser Scanning).

Podstawowym zadaniem skanerów laserowych jest pomiar odległości obiektu od urządzenia. W przypadku instrumentów impulsowych (TOF – Time-Of-Flight) owa odległość jest funkcją czasu, jaki wiązka potrzebuje na przebycie całej drogi do obiektu i z powrotem. Specjalny układ optyczny, z zadaną częstotliwością, wysyła wiązki świetlne (najczęściej w zakresie bliskiej podczerwieni) o określonej długości fali i konkretnym kierunku. Każde odbicie od przeszkody rejestrowane jest *de facto* jako położenie punktu w przestrzeni, któremu przypisane zostają współrzędne (docelowo geodezyjne prostokątne płaskie X, Y, Z).

Przewaga urządzeń TLS nad najbardziej nawet zaawansowanymi instrumentami geodezyjnymi polega m.in. na olbrzymiej efektywności pozyskiwania danych (najszybsze urządzenia mogą rejestrować nawet 1 mln pkt/s), niezależności pomiarów od warunków oświetleniowych i dużej automatyzacji prac terenowych, co znacznie ogranicza subiektywizm interpretacyjny badacza. W kontekście potrzeb szacowania ilości biomasy, zwłaszcza w ekosystemach nieleśnych charakteryzujących się dużą ażurowością roślinności i relatywnie niewielkimi wymiarami poszczególnych osobników, przewaga technologii TLS nad ALS przejawia się przede wszystkim w olbrzymiej pojemności informacyjnej liczonej w tysiącach punktów na 1 m² (dla porównania w ramach projektu ISOK rejestruje się 4, 6 lub 12 pkt/m²) oraz znacznie większej dokładności i precyzji pomiarów, co jest spowodowane m.in. wysoką rozdzielczością emitowania impulsów i małą średnicą plamki na obiekcie (ang. footprint). Nie bez znaczenia jest także możliwość natychmiastowej rejestracji stanu obiektu lub zjawiska oraz brak kosztów bezpośrednich związanych z pozyskiwaniem praktycznie nieograniczonej ilości danych i eksploatacją samego urządzenia. Oczywiście technologii TLS i ALS jako takich nie należy stawiać w opozycji, ale traktować raczej jako rozwiązania komplementarne (Fryśkowska, Kędzierski 2010).

Cel badań

W kontekście powyższych rozważań głównym celem badań było opracowanie nowej, nieinwazyjnej metody szacowania ilości biomasy roślinności nierzewiastej, w tym rosnącej w naturalnych zbiorowiskach torfowiskowych, za pomocą naziemnego skanowania laserowego. Po analizie założeń metodycznych oraz wad i zalet innych alternatywnych metod (w tym opisanych szerzej w dyskusji metod modelowania brył wypukłych, wokseli czy powierzchniowych modeli różnicowych) założono, że nie spełnią one swojego zadania ze względu na duże zróżnicowanie gatunkowe roślin na obszarach podmokłych oraz ich niewielkie jednostkowe objętości. Tym samym podjęto pionierską próbę oszacowania biomasy roślinności niezdrewniałej na podstawie gęstości chmur punktów TLS. Celem pobocznym było przetestowanie różnych układów badawczych, w których zmiennymi były parametry skanowania, przestrzenna organizacja pomiarów oraz struktura roślinności.

Stan badań

Jak już wspomniano na wstępie, naziemne skanowanie laserowe jest technologią relatywnie bardzo młodą. W Polsce od samego początku TLS wykorzystuje się w konserwatorskiej inwentaryzacji zabytków (Maciaszek 2008), modelowaniu 3D zabudowy (Borkowski, Jóźków 2012), geodezji inżynierskiej (Kamiński i in. 2008), górnictwie (Poręba 2009), drogownictwie i kolejnictwie oraz archeologii, chociaż w tych ostatnich dziedzinach bardziej efektywne wydaje się być odpowiednio skanowanie mobilne (MLS – Mobile Laser Scanning) i lotnicze. W naukach o Ziemi niewątpliwymi prekursorami w stosowaniu TLS w naszym kraju byli geolodzy i geomorfolodzy (Suchocki 2009; Kramarska i in. 2011), zaś w zakresie badań przyrodniczych jako pierwsi nową technologię zaczęli testować leśnicy, na czele z ówczesnym Laboratorium GIS i Teledetekcji (ob. Laboratorium Geomatyki) Wydziału Leśnego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie (Wężyk i in. 2007). Obecnie już wiadomo, że technologię naziemnego skanowania laserowego można wykorzystywać do określania wielu taksacyjnych cech drzewostanów (np. średniej wysokości i miąższości, grubości poszczególnych pni, pola przekroju i stopnia defoliacji, liczby drzew i ich lokalizacji w przestrzeni, zwarcia koron, podrostu i podszytu), a w dalszej kolejności charakterystyk pochodnych, jak np. biomasy pojedynczych drzew i całych drzewostanów, jej pionowego profilu zmienności czy występowania odnowień naturalnych (Wężyk i in. 2009, 2012).

Na świecie wachlarz stosowanych metod teledetekcyjnych w ramach leśnictwa precyzyjnego jest zresztą bardzo szeroki (Seidel 2011; Vazirabad, Karslioglu 2011), jednak pomiarami TLS obejmuje się najczęściej drzewa reprezentujące starsze fazy rozwojowe drzewostanu, znacznie rzadziej podrost, a już zupełnie sporadycznie i to niemal wyłącznie w kontekście ochrony przeciwpożarowej – runo z krzewinkami, nalotem, drobną leżaniną czy szyszkami (Loudermilk i in. 2007; Rowell, Seielstad 2012). Relatywnie niezbyt liczne są także prace poświęcone zbiorowiskom krzewiastym, przy czym na świecie mają one wymiar ekologiczny (Olsoy i in. 2014), zaś w Polsce sprowadzają się częściej do metodyki modelowania 3D (Tymków, Borkowski 2010).

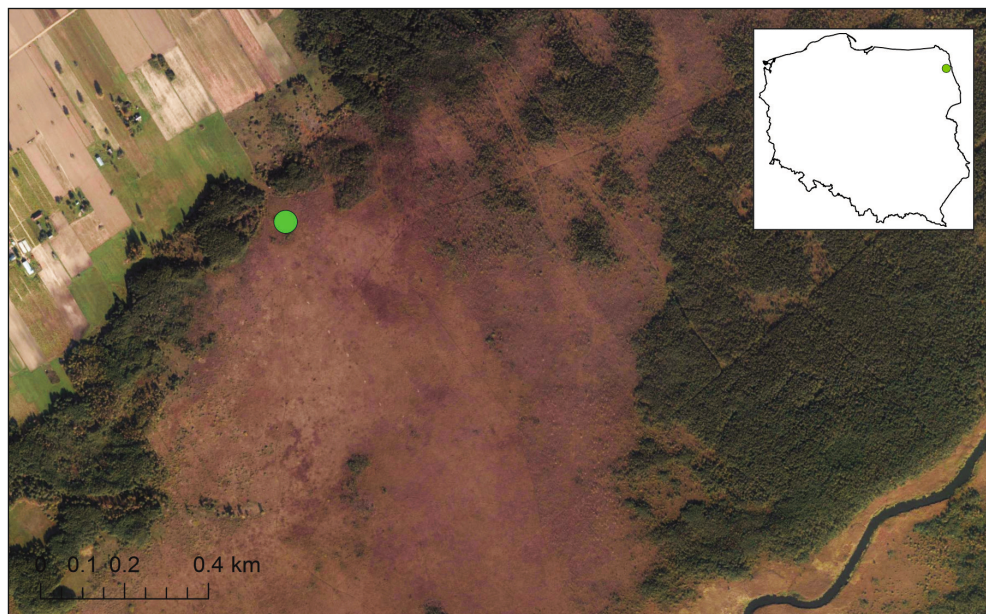
W przypadku nieleśnej roślinności niezdrewniałej większość badań z wykorzystaniem TLS dotyczy monokultur upraw zbożowych, zwłaszcza tych dominujących pod względem produkcji na świecie: kukurydzy (Höfle 2014; Tilly i in. 2014c), ryżu (Tilly i in. 2014b) oraz pszenicy i jęczmienia (Lumme i in. 2008; Hosoi, Omasa 2009; Hoffmeister i in. 2011; Ehler, Heisig 2013; Tilly i in. 2014a).

Roślinność niezdrewniała tworząca ekosystemy półnaturalne, jako obiekt pomiarowy technologii TLS, pozostaje dotychczas niemal całkowicie poza kręgiem zainteresowania badaczy. Na obszarach zalewowych prowadzono wprawdzie badania z wykorzystaniem lotniczego skanowania laserowego, ale wyniki różnych autorów dotyczące wysokości i gęstości roślinności podmokłych łąk były bardzo rozbieżne, zależności dyskusyjne (Straatsma,

Middelkoop 2006), zaś charakter zbiorowisk (m.in. turzycowisk i trzcinowisk) oraz pochłanianie wiązki lasera przez wodę sprawiały dodatkowe trudności na etapach ich klasyfikacji (Wang i in. 2009; Zlinszky i in. 2012). Tym samym niniejsze badania pilotażowe można uznać za nowatorskie nie tylko w skali naszego kraju.

Teren badań

Badania prowadzono na reprezentatywnym dla Działu Północnego torfowisku niskim, położonym w basenie Górnej Biebrzy w granicach Biebrzańskiego Parku Narodowego. Wytypowano obszar badawczy o powierzchni ok. 2500 m² w pobliżu wsi Nowy Lipsk w gminie Lipsk, w powiecie augustowskim, województwie podlaskim (53°44'07"N; 23°19'49"E) (ryc. 1). Obszar badawczy obejmował torfowisko niskie (mechowisko) o zwarciu runi do 70% i pokryciu warstwą mszystą do 80%. W składzie gatunkowym dominowały turzyce (głównie *Carex rostrata*, *C. appropinquata* i *C. flava*) oraz bobrek trójlistkowy (*Menyanthes trifoliata*). Teren charakteryzował się słabo zaznaczoną strukturą kępkową i wysokim poziomem wody gruntowej (stagnowała na powierzchni). Znaczący udział w szacie roślinnej miał nalot drzew (wierzba szara *Salix cinerea* do 25% pokrycia oraz olcha czarna *Alnus glutinosa* i brzoza omszona *Betula pubescens*) (ryc. 2). Stałym elementem, ale o różnej gęstości występowania, była trzcina pospolita (*Phragmites australis*) dorastająca do 2 m wysokości. Odległość od rzeki Biebrzy wynosiła ok. 1,5 km.



Ryc. 1. Lokalizacja terenu badań (ortofotomapa z www.geoportal.gov.pl) (opracowanie: A. Affek).
Fig. 1. Location of the study area (orthophoto from www.geoportal.gov.pl) (elaborated by: A. Affek).

Metodyka badań

Instrumentarium pomiarowe

Najważniejszym elementem stanowiska pomiarowego był impulsowy, naziemny skaner laserowy dalekiego zasięgu firmy Riegl model VZ-4000 (własność IGiPZ PAN). Urządzenie o zasięgu pracy od 5 do 4000 m pozyskuje dane w zakresie częstotliwości 50-300 kHz (37 000 – 222 000 pkt/s); charakteryzuje się bardzo wysoką precyzją (3 mm na odległości 150 m) i plamką o średnicy 18 mm na wyjściu z urządzenia. Wyposażone jest we wbudowany, fabrycznie skalibrowany sensor optyczny o rozdzielczości 5 megapikseli, za pomocą którego wykonuje się zdjęcia służące do przypisywania składowych RGB poszczególnym punktom z chmury, co wykorzystuje się podczas późniejszej filtracji, modelowania i wizualizacji 3D. Unikalną cechą skanerów firmy Riegl, zaimplementowaną ze skanowania lotniczego ALS i niespotykaną w jakichkolwiek innych urządzeniach TLS na świecie, jest możliwość rejestracji dla każdego punktu z chmury wszystkich składowych odbić jednej wiązki. Kolejne echa (nie tylko pierwsze i ostatnie) są interpretowane poprzez metodę detekcji 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 kolejne warstwy roślinności).

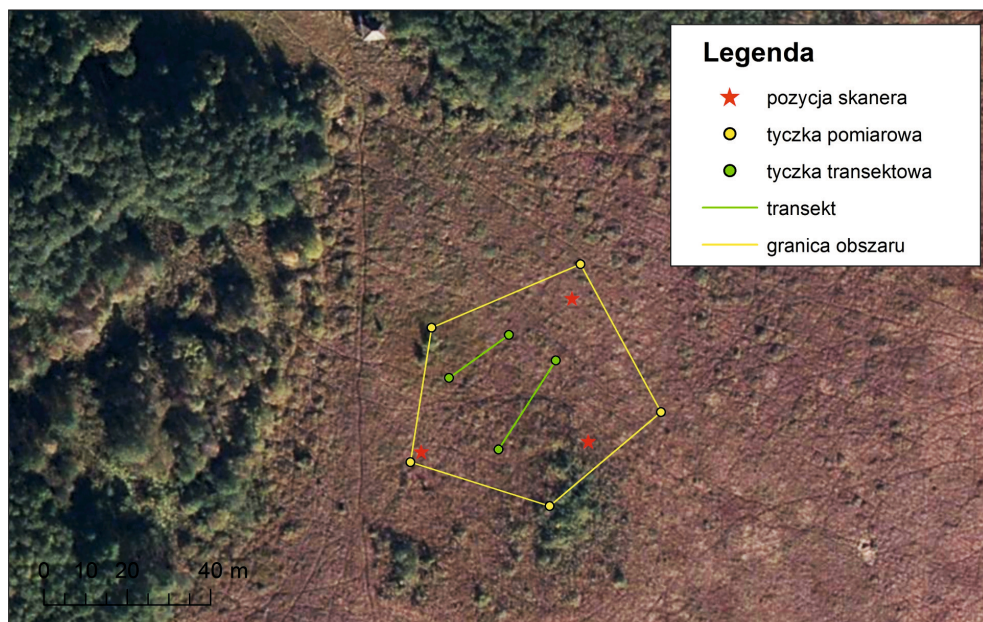
W celu bardzo dokładnego, a jednocześnie precyzyjnego i powtarzalnego pozycjonowania w terenie stanowisk skanowania i poligonów badawczych, wykorzystano zestaw GNSS firmy Trimble: odbiornik R4 i rejestrator TSC3 wraz z oprogramowaniem Trimble Access. Wszystkie pomiary realizowano w czasie rzeczywistym (Real Time Kinematic), korzystając z poprawek powierzchniowych pobieranych ze stacji referencyjnych ASG-EUPOS. Korekty umożliwiały wyznaczenie położenia centrum fazowego anteny satelitarnej odbiornika z dokładnością w granicach 1-3 cm w pomiarach XY i 5 cm w przypadku rzędnej wysokościowej.

Organizacja prac terenowych

Na wytypowanym obszarze wyznaczono dwa transekty: pierwszy przebiegał przez torfowisko z dominacją turzyc z udziałem niskich wierzb, drugi wiódł przez podobny układ, ale z obecnością luźno rozmieszczonych, niewysokich trzcin (ryc. 3). Zewnętrzne granice obszaru oraz końce transektów oznaczono tyczkami pomiarowymi o wys. ok. 3 m z okrągłymi tarczkami refleksyjnymi o średnicy 5 cm. Podczas skanowania tarczki te były automatycznie identyfikowane przez urządzenie (procedura Find Reflectors) i służyły jako punkty kontrolne (ang. Ground Control Point – GCP) w procesie kalibracji



Ryc. 2. Szata roślinna terenu badań z widocznym stanowiskiem pomiarowym (zdjęcie: A. Affek).
Fig. 2. The vegetation of the study area around a measurement station (photo: A. Affek).



Ryc. 3. Organizacja obszaru badawczego (ortofotomapa z www.geoportal.gov.pl) (zdjęcie: A. Affek).
Fig. 3. Arrangement of the study area (orthophoto from www.geoportal.gov.pl) (photo: A. Affek).

skanów (rejestracji w globalnym układzie odniesienia)².

Wzdłuż każdego transektu rozmieszczono po 4 powierzchnie badawcze 1×1 m w odległości co 2 m (łącznie 8 powtórzeń), do wyznaczenia których wykorzystano specjalne ramki aluminiowe (ryc. 4).

Skanowanie wykonywano ze stałej wysokości ok. 3,30 m nad powierzchnią gruntu. Instrument umocowany był na statywie, który z kolei przytwierdzono do skrzyni znajdującej się na ratraku (ryc. 5). Jedynie w ten sposób można było w terenie bagiennym ze stagnującą na powierzchni wodą ustabilizować urządzenie i wynieść je na odpowiednią wysokość³.

Na obszarze badawczym wykonano skanowanie z trzech pozycji. Odległości do powierzchni badawczych 1×1 m wahały się od 15,7 m do 38,4 m. Z każdej pozycji wykonano kilka skanów (wraz ze zdjęciami RGB), pozyskiwanych z częstotliwością wysyłania impulsów równą 300 kHz i rozdzielczością od 0,002 do 0,08 stopnia kąтового. Powielanie skanów z tej samej pozycji miało na celu:

- określenie związku między rozdzielczością emitowania impulsów a gęstością chmury punktów (skany o różnej rozdzielczości),
- określenie powtarzalności pomiaru – stałości obiektu (identyczne skany jeden po drugim). Skanowanie z kilku stanowisk natomiast miało na celu zebranie próbki pomiarów z różnych odległości od powierzchni badawczych ze zróżnicowaną roślinnością znajdującą się na drodze wiązki laserowej.

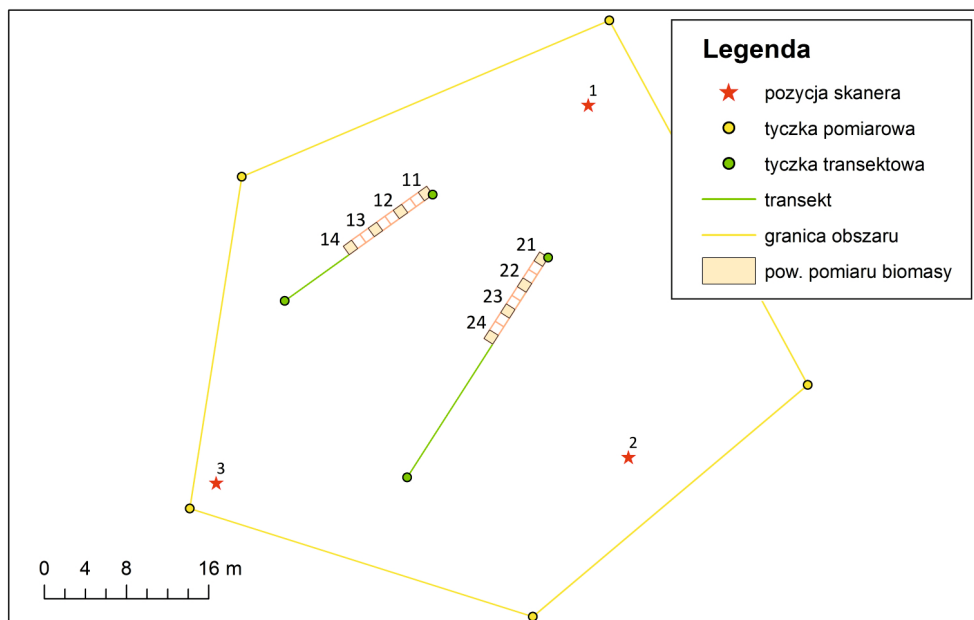
Po wykonaniu pomiarów TLS wycinano roślinność z powierzchni badawczych 1×1 m i dzielono ją na trzy grupy w zależności od wysokości nad powierzchnią odcięcia (0-50 cm, 50-100 cm, powyżej 100 cm). Materiał ważono zarówno w stanie świeżym, jak i po wysuszeniu w temp. 90°C przez 4 godziny (biomasa sucha). W ten sposób uzyskano informację o rzeczywistych ilościach fitomasy w trzech objętościach⁴, przypadających na każdą powierzchnię badawczą.

Z uwagi na konieczność zlokalizowania w chmurach punktów prostopadłościanów o podstawach 1×1 m, z których usunięto biomasę, konieczna była kalibracja skanów w globalnym układzie odniesienia (wzajemne spasowanie skanów w układzie lokalnym byłoby niewystarczające). W tym celu określono za pomocą zestawu GPS RTK precyzyjne współrzędne geodezyjne (BLh) trzech stanowisk pomiarowych (odbiornik GNSS montowany był wspólnie na głowicy skanera) oraz tarczek refleksyjnych na tyczkach transektowych (4) i pomiarowych (5). Współrzędne BL kwadratowych powierzchni badawczych wyliczane były ze współrzędnych tyczek transektowych, natomiast współrzędną h

² Ze względu na brak w zasięgu skanowania nieruchomości i wystarczająco dużych płaszczyzn nie można było zastosować półautomatycznej kalibracji Multi Station Adjustment (MSA), dostępnej w oprogramowaniu Riscan Pro firmy Riegl.

³ Wyniesienie skanera było konieczne ze względu na to, aby emitowane impulsy mogły dotrzeć do powierzchni gruntu w obrębie wytypowanych kwadratowych powierzchni badawczych. Pozostawienie skanera jedynie na statywie (wys. ok. 1,8 m) skutkowałoby całkowitym odbiciem impulsu od roślinności znajdującej się między skanerem a powierzchniami badawczymi.

⁴ Przez objętości, w których dokonywane były pomiary biomasy na powierzchniach badawczych, rozumie się bryły o wymiarach podstaw 1×1 m i rzędnych wysokości odpowiadających wysokościami nad powierzchnią odcięcia roślinności (0-50 cm, 50-100 cm, powyżej 100 cm).



Ryc. 4. Szczegółowa organizacja obszaru badawczego.

Fig. 4. The detailed arrangement of the study area.



Ryc. 5. Stanowisko pomiarowe TLS zamontowane na ratraku przystosowanym do koszenia traw.

Fig. 5. A TLS measuring station mounted on top of the grooming machine.

odcienia roślinności mierzono dodatkowo odbiornikiem GNSS niezależnie dla każdego kwadratu⁵. Wartości h różniły się między poszczególnymi kwadratami od kilku do 20 cm, przede wszystkim ze względu na strukturę kępkową turzycowiska.

Biomasa a gęstość punktów

Do realizacji założonego celu metodycznego za najlepszą charakterystykę chmury punktów uznano liczbę punktów w określonej objętości. Opracowano algorytm ważenia liczby punktów w zależności od odległości od urządzenia skanującego i parametrów skanowania. Empirycznie sprawdzono różne układy badawcze, w których zmiennymi były wspomniane parametry skanowania, a także przestrzenna organizacja pomiarów oraz struktura roślinności. Przetestowano różne postaci funkcji opisujących te zależności. Ostatecznie do opisu zależności między biomasą a liczbą punktów w zadanej objętości (gęstością punktów) zaproponowano funkcję liniową postaci:

$$BS = a(lp \times \theta \times \varphi \times s^2) + b$$

gdzie:

BS – biomasa sucha (w gramach), lp – liczba punktów w danej objętości, Θ (teta), φ (fi) – rozdzielczość pozioma i pionowa wysyłania impulsów (w stopniach dziesiętnych), s – odległość skanera od środka powierzchni badawczej (w metrach), a , b – parametry funkcji liniowej.

Zapis w nawiasie wynika z rozumowania dedukcyjnego, bazującego na znajomości praw fizyki – spadek gęstości impulsów z punkтового źródła światła jest proporcjonalny do kwadratu odległości, zaś gęstość na wyjściu zależy proporcjonalnie od rozdzielczości pionowej i poziomej wysyłania impulsów⁶. Parametry a i b dla funkcji liniowej są wyliczane empirycznie (indukcyjnie) dla danego zbioru obserwacji.

Weryfikacja i szacowanie parametrów modelu następowało poprzez przyrównanie do wagi biomasy suchej. Ze względu na przyjętą metodę przeliczania gęstości punktów na biomasę, jej szacowanie odbywało się niezależnie dla chmur punktów pochodzących z poszczególnych pomiarów, a do dalszych analiz korelacyjnych przyjmowano, uśrednioną z wybranych 9 skanów, ważoną liczbę punktów.

Analizy przestrzenne i statystyczne

Do wstępnego przetwarzania surowych chmur punktów (kalibracja, czyszczenie skanów) wykorzystano oprogramowanie Riscan Pro (ver. 1.7.9) firmy Riegl. Ekstrakcję i zliczenie punktów z poszczególnych objętości badawczych wykonano za pomocą pakietu ArcGIS Advanced (ver. 10.2.2) firmy ESRI z rozszerzeniem 3D Analyst. Końcową bazę danych, zawierającą

⁵ Wysokość powierzchni odcienia nie była tożsama ze zmienną (nawet w obrębie 1 m²) i trudną do uchwycenia na torfowisku wysokością gruntu.

⁶ Pominęto dywergencję wiązki i spadek mocy impulsu wraz z odległością – wpływ tych zmiennych w przybliżeniu znosi się.

ważoną liczbę punktów i wagę biomasy dla każdej z 24 analizowanych objętości (w tym 19 o niezerowej jej ilości) przygotowano w MS Excel. Do analiz statystycznych wykorzystano oprogramowanie SPSS Statistics (ver. 17.0) firmy IBM.

Wyniki

Charakterystyka bazy danych

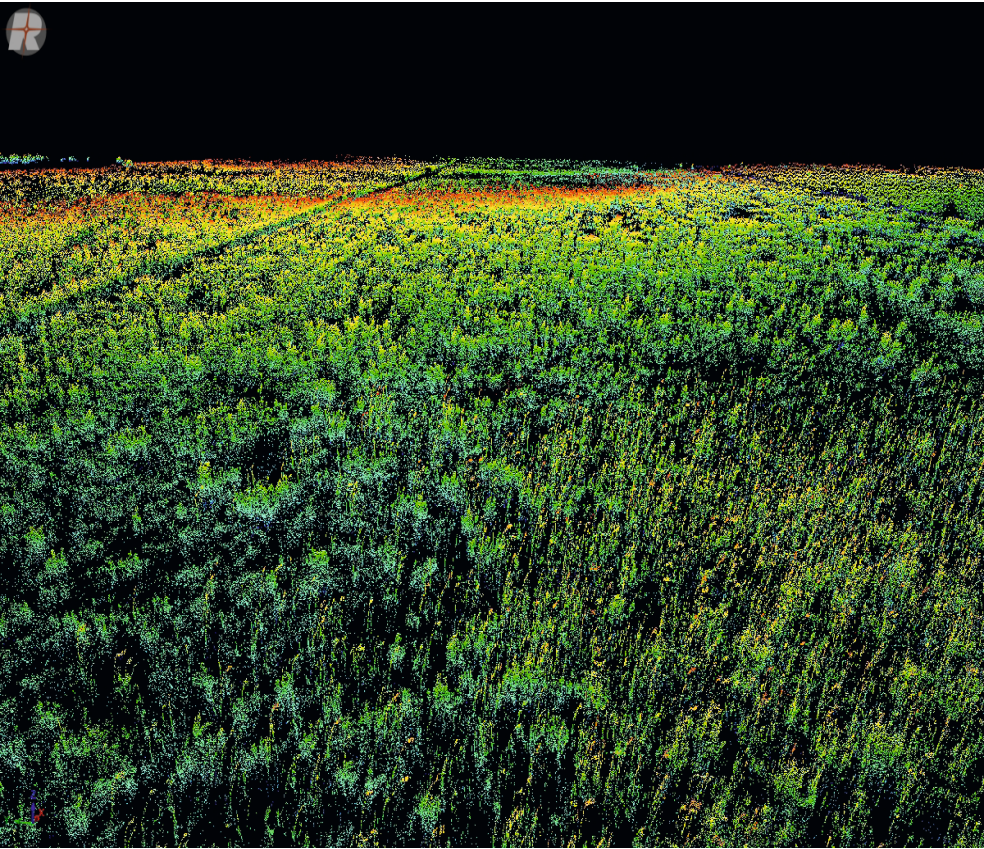
Uzyskana dokładność pomiaru pozycji rejestratorem GPS RTK wynosiła ≤ 4 cm dla rzędnej wysokościowej oraz ≤ 3 cm dla współrzędnych XY. RMSE kalibracji skanów (dopasowania do co najmniej 9 punktów kontrolnych) wahał się od 1 do 4 cm. Pliki z chmurami punktów, w zależności od rozdzielczości pomiaru, zajmowały od kilkuset MB do 30-40 GB (ryc. 6 i 7). W obrębie kolejnych powierzchni badawczych 1×1 m instrument zarejestrował w ramach poszczególnych skanów od kilku do prawie 1 mln punktów (w zależności od odległości, rozdzielczości i rzeczywistej ilości biomasy).

Rozdzielczość emitowania impulsów

Jednym z pobocznych celów badań było sprawdzenie, czy ważona przez rozdzielczość skanowania gęstość punktów jest stałą charakterystyką obiektów (w tym wypadku roślin torfowiskowych), przy zachowaniu niezmiennych, pozostałych parametrów pomiaru. W celu weryfikacji tej hipotezy porównano cztery skany wykonane po sobie z tej samej pozycji (nr 1) (ryc. 8). Wyniki wskazują, że taka charakterystyka obiektów nie jest istotnie zależna od rozdzielczości skanowania (w przedziale $0,06-0,002$ stopnia kąтового). Zbliżone wartości ważone liczby punktów uzyskano zarówno dla skanów najbardziej (do 1 mln punktów w $0,5 \text{ m}^3$), jak i najmniej szczegółowych (kilka punktów w $0,5 \text{ m}^3$). Z kolei porównanie liczby punktów dla skanu 3 i 4 (taka sama rozdzielczość) wskazuje, że źródeł zmienności należy upatrywać w zachowaniu samych obiektów (np. ruchu wywołanym podmuchami wiatru).

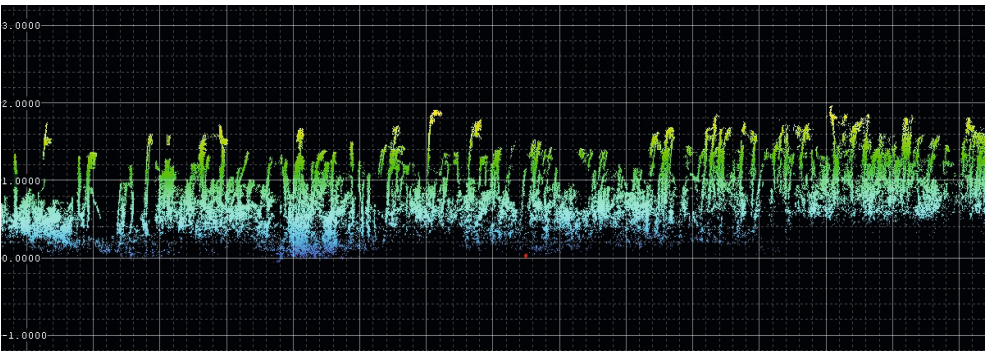
Biomasa a liczba punktów

Szacowanie parametrów funkcji liniowej łączącej liczbę punktów z biomasą przeprowadzono niezależnie dla objętości badawczych powyżej i poniżej 50 cm nad powierzchnią odcięcia roślinności. Postępowanie takie było podyktowane odrębnymi jakościowo wynikami uzyskanymi w tych dwu grupach. Dla przedziałów 50-100 cm i powyżej 100 cm nad powierzchnią odcięcia (łącznie 10 różnych objętości) uzyskano dobroć oszacowania (liniowego, jako najlepszego) biomasy suchej $R^2=0,97$ (ryc. 9).



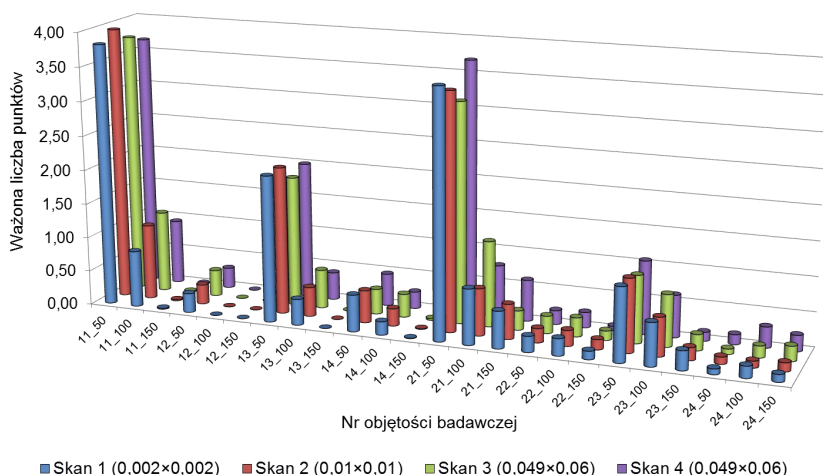
Ryc. 6. Wizualizacja 3D chmury punktów w programie Riscan Pro. Punkty koloryzowano według wysokości od 119 m n.p.m. do 122,7 m n.p.m. (opracowanie: A.Affek).

Fig. 6. 3D visualization of a point cloud in Riscan Pro. Points colored by elevation (from 119 to 122.7 m a.s.l.) (elaborated by A. Affek).



Ryc. 7. Profil o szerokości 1 m przez chmurę punktów TLS, obrazujący zmienność podłoża i strukturę roślinności. Punkty koloryzowano według wysokości (wartości względne w metrach) (opracowanie: A.Affek).

Fig. 7. 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) (elaborated by A. Affek).



Ryc. 8. Porównanie czterech skanów wykonanych z pozycji skanowania nr 1 (w nawiasach rozdzielczość emitowania impulsów w stopniach dziesiętnych). Nie uwzględniono wagi wynikającej z odległości do skanera (opracowanie: A.Affek).

Fig. 8. Comparison of four scans taken from scanning position 1 (in brackets – resolution of emitting pulses in decimal degrees). Does not include weights resulting from the distance to the scanner (elaborated by A. Affek).

Wzór na przeliczenie liczby punktów na biomasę ma postać⁷ (tab. 1):

$$BS = 0,18(lp \times \theta \times \varphi \times s^2) - 10,4$$

Tabela 1. Podsumowanie modelu i estymacja parametrów dla związku biomasy suchej z uśrednioną ważoną liczbą punktów dla objętości powyżej 50 cm nad powierzchnią odcięcia (opracowanie: A.Affek).

Table 1. Summary of the model and parameter estimation for the formula linking dry biomass and the mean weighted number of points for volumes more than 50 cm above the cutoff (elaborated by A. Affek).

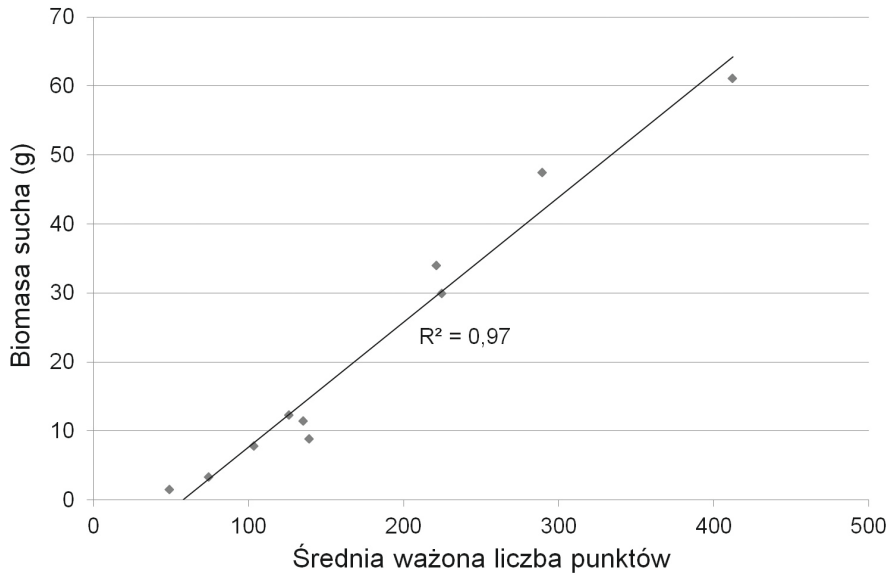
Równanie	Podsumowanie modelu					Estymacja parametrów	
	R ²	F	df1	df2	Istotność	a	b
Dopasowanie liniowe	0,97	258,163	1	8	0,000	0,18	-10,38

Zmienna zależna (y) – biomasa sucha w gramach.

Zmienna niezależna (x) – uśredniona z 9 skanów ważona liczba punktów TLS.

Maksymalny błąd dopasowania wyniósł 5,86 g, a odchylenie standardowe równe było 3,5 g (tab. 2).

⁷ Dla określonych pozostałych parametrów skanowania: długość fali – 1550 nm, częstotliwość skanowania – 300 kHz, średnica wiązki na wyjściu z lasera – 18 mm, dywergencja wiązki – 0,15 mrad, czas trwania impulsu – 3 ns, rejestracja do kilku odbić oparta na analizie pełnej fali.



Ryc. 9. Zależność liczby punktów i biomasy dla objętości badawczych powyżej 50 cm nad powierzchnią odcięcia roślinności (opracowanie: A. Affek).

Fig. 9. The relationship between the number of points and the biomass for volumes more than 50 cm above the cutoff (elaborated by A. Affek).



Ryc. 10. Zależność liczby punktów i biomasy dla objętości badawczych w przedziale 0-50 cm nad powierzchnią odcięcia roślinności (opracowanie: A. Affek).

Fig. 10. The relationship between the number of points and the biomass for volumes between 0 and 50 cm above the cutoff (elaborated by A. Affek).

Tabela 2. Statystyki reszt z dopasowania liniowego (opracowanie: A. Affek)

Table 2. Descriptive statistics for residuals from the linear fit (elaborated by A. Affek).

	Liczba próbek	Minimum	Maksimum	Średnia	Odchylenie standardowe
Reszty	10	-5,77	5,86	-0,21	3,53

Dla objętości zawartych między 0 a 50 cm od powierzchni gruntu (odcinka roślinności) zależność także jest proporcjonalna, ale znacznie mniej ścisła ($R^2=0,53$) (tab. 3, ryc. 10).

Tabela 3. Podsumowanie modelu i estymacja parametrów dla związku biomasy suchej z uśrednioną ważoną liczbą punktów dla objętości od 0 do 50 cm nad powierzchnią odcinka (opracowanie: A. Affek).

Table 3. Summary of the model and parameter estimation for the formula linking dry biomass and the mean weighted number of points for volumes between 0 and 50 cm above the cutoff (elaborated by A. Affek).

Równanie	Podsumowanie modelu					Estymacja parametrów	
	R^2	F	df1	df2	Istotność	a	b
Dopasowanie liniowe	0,53	6,85	1	6	0,04	0,25	85,89

Zmienna zależna (y) – biomasa sucha w gramach.

Zmienna niezależna (x) – uśredniona z 9 skanów ważona liczba punktów.

Dyskusja i wnioski

Wspomniane na początku artykułu alternatywne metody szacowania ilości biomasy na podstawie pomiarów TLS polegają przede wszystkim na modelowaniu brył i powierzchni. Zdecydowanie najlepiej rozpoznana i przetestowana jest metoda pomiarowa stosowana w ekosystemach leśnych, gdzie z powodzeniem wykorzystuje się modelowanie 3D regularnych brył obrotowych i znane z "tradycyjnej" dendrometrii wzory sekcyjne Hubera czy Smaliana. Dotyczy to nawet tak nietypowych drzewostanów, jak namorzyny z mangrowcami czerwonymi (*Rhizophora mangle*), których pnie traktuje się jako paraboloidy, zaś korzenie przybyszowe jako torusy (Feliciano i in. 2014).

Innym podejściem jest modelowanie makrostrukturalne bryły wypukłej (ang. convex hull), polegające na znalezieniu punktów tworzących jej obrys zewnętrzny, czyli wyznaczeniu otoczki wypukłej. W przypadku dużego zróżnicowania struktury wewnętrznej krzewu czy korony drzewa (np. licznych pustych przestrzeni) wyniki mogą mocno odbiegać od rzeczywistości (Olsoy i in. 2014). W celu uzyskania lepszego dopasowania bryły do niewypukłych fragmentów rośliny, chmurę punktów dzieli się najpierw płaszczyznami równoległymi do płaszczyzny XY, a następnie tworzy otoczki wypukłe osobno dla poszczególnych segmentów (ang. multi convex hull).

W modelowaniu mikrostrukturalnym stosuje się metodę walców, które

reprezentują geometrię poszczególnych fragmentów rośliny. O ile jednak założenie, że kształt przekroju gałęzi tworzy okrąg jest do zaakceptowania, to już warunek pionowego kierunku wzrostu krzewów czy gałęzi drzew – zdecydowanie nie. Ponadto estymacja niektórych parametrów geometrycznych rośliny (np. objętości, a tym samym biomasy) byłaby sensowna tylko w przypadku walców o średnicach adekwatnych do rzeczywistego przekroju gałęzi. Lepszym rozwiązaniem jest więc metoda hybrydowa, czyli multi convex hull w podejściu mikrostrukturalnym. W pierwszym kroku modeluje się otoczki wypukłe dla poszczególnych warstw bryły, a następnie w ich obrębie chmurę punktów poddaje segmentacji, w wyniku której punkty są grupowane i tworzą małe bryły reprezentujące poszczególne gałęzie (Tymków, Borkowski 2010).

Dużo popularniejszym rozwiązaniem jest wykorzystanie wokseli (ang. volumetric element, voxel), będących swoistymi odpowiednikami dwuwymiarowych pikseli w przestrzeni 3D. Modelowanie polega na podziale całej przestrzeni na sześciiany, a następnie sprawdzeniu występowania w ich obrębie punktów pochodzących z odbić i usunięciu pustych wokseli. Metoda ta stosowana jest zarówno w przypadku skanowania upraw zbożowych (Lumme i in. 2008; Hosoi, Omasa 2009), runa leśnego, nalotu i drobnej leżaniny (Loudermilk i in. 2007), jak i drzew (Wężyk i in. 2012) oraz krzewów (Olsoy i in. 2014). Porównawcze pomiary biomasy krzewów bylicy trójzębowej (*Artemisia tridentata*), realizowane przez ostatni zespół za pomocą wokseli i modelowania brył wypukłych wykazały, że pierwsza metoda jest znacznie skuteczniejsza w przypadku małych osobników i stosowania detekcji pełnej fali. Newralgiczną decyzją jest wybór wielkości wokseli – autorzy stosowali sześciiany o objętości 1 cm³, ale dla traw czy roślin uprawnych, zwłaszcza we wstępnym fazach rozwoju, powinny to być raczej wartości subcentymetrowe.

Równie popularnym podejściem metodycznym w skanowaniu laserowym monokultur roślin uprawnych jest tworzenie modeli powierzchni zasiewów (ang. Crop Surface Model), a w dalszej kolejności generowanie różnicowych pochodnych, jak np. Crop Volume Model (Hoffmeister i in. 2011). Modele wysokorozdzielcze (1 cm) okazują się być silnie skorelowane z wysokościami roślin pomierzonymi w terenie i ich masą w stanie suchym (Tilly i in. 2014b). Część autorów wykorzystuje także do szacowania ilości biomasy współczynniki gęstości listowia (ang. Leaf Area Density) oraz pokrycia liściowego (ang. Leaf Area Index), które wyrażają stosunek sumarycznej powierzchni liści rośliny odpowiednio do jej objętości i projekcji na powierzchnię gruntu (Hosoi, Omasa 2009).

Jak na tle powyższego przeglądu prezentuje się metoda bazująca na gęstości punktów? Niewątpliwie pozytywnie zweryfikowano założenia prac polowych – dotyczy to zwłaszcza konieczności usytuowania instrumentu głównego na wysokości ponad 3 m, skanowania roślinności w obrębie małych powierzchni testowych zlokalizowanych na transektach oraz segmentacji materiału i jego ważenia w stanie świeżym i suchym. Założenia te znajdują także potwierdzenie w niemal wszystkich pracach traktujących o pomiarach TLS w monokulturach roślin uprawnych, których wyniki cytowano wcześniej.

Do dyskusji pozostaje zastosowanie alternatywnego frakcjonowania szczątków roślinnych (np. na łodygi, liście, kłosa/kwiatostany) oraz potrzeba wykonywania pomiarów w różnych fitofenologicznych fazach rozwoju roślin. Zadowalająca jest dokładność kalibracji poszczególnych skanów, co daje podstawy sądzić, że wyekstrahowane punkty reprezentowały te same obiekty, które ponadto rzeczywiście znajdowały się w analizowanych objętościach badawczych.

Dobrym prognostykiem dla dalszych badań są zbliżone wartości ważonej liczby punktów, pochodzących ze skanów o różnej rozdzielczości. Informacja ta mówi nie tylko o tym, że ważona liczba punktów jest pewną stałą charakterystyką obiektów, nadającą się do wykorzystania w dalszych pracach, ale także może wpłynąć na skrócenie czasu pozyskiwania informacji poprzez wybór mniej szczegółowej rozdzielczości skanowania. Tym samym proponowana metoda zyskuje dodatkową wartość aplikacyjną.

Zastanawiająca w tym kontekście jest stosunkowo duża rozbieżność między uzyskaną ważoną liczbą punktów, pochodzących ze skanów o tej samej rozdzielczości, wykonanych bezpośrednio po sobie. Taka prawidłowość wskazuje na zmienność samych obiektów zachodzącą w krótkim czasie. Wynikała ona najpewniej z przemieszczania się liści i źdźbeł traw spowodowanych podmuchami wiatru. To jeden z najpoważniejszych problemów podczas prac pomiarowych – tym bardziej dziwi fakt, że bardzo nieliczni autorzy zwracają na niego uwagę (np. Seidel 2011; Zhang, Grift 2012; Höfle 2014; Tilly i in. 2014b).

Wysoką pewność szacowania ilości biomasy suchej ($R^2=0,97$) uzyskano dla części roślin znajdujących się co najmniej 50 cm nad powierzchnią odcięcia roślinności. Przeciętna waga biomasy w tych objętościach była niewielka i oscylowała w granicach od kilku do kilkudziesięciu gramów. Roślinność na tej wysokości miała charakter ażurowy i była w całości penetrowana przez impulsy lasera.

Zdecydowanie mniejszą wartość współczynnika determinacji uzyskano przy szacowaniu wagi fragmentów roślin bliżej gruntu (do wysokości 50 cm). Zarówno rzeczywista, jak i wyliczona ilość fitomasy była tam zdecydowanie większa (od 50 do ponad 300 gramów suchej masy na $0,5 \text{ m}^3$). Podejrzewać można, że gorsza dokładność szacowania wynikała z trudności z przenikaniem impulsów przez gęstą roślinność. Ponadto na drodze wiązki, emitowanej z wys. 3,30 m nad powierzchnią gruntu, znajdowały się wyżej położone części innych roślin, które bezpośrednio sąsiadowały z analizowanymi powierzchniami badawczymi. Mimo, że oprogramowanie skanera Riegl VZ-4000 ma możliwość detekcji pełnej fali, której zalety są trudne do przecenienia (por. Pirotti i in. 2013), a plamka lasera dla analizowanych odległości osiągała średnicę zaledwie ok. 2 cm^8 , to i tak przy zwartej roślinności znaczny odsetek wyemitowanych impulsów zostanie całkowicie odbity, zanim dotrze do gruntu. Wówczas pewna ilość rzeczywistej biomasy nie zostanie uwzględniona w szacunku. Wysoka dodatnia wartość parametru b w przypadku modelu dla biomasy w zakresie 0-50 cm

⁸ Średnica, przy której natężenie wiązki spada do $1/e^2$ (13,5%) natężenia maksymalnego, a wówczas 87,5% mocy wiązki jest zawarte w okręgu o tej średnicy.

wysokości (por. ryc. 9 i ryc. 10) potwierdza, że niżej położona biomasa jest rzeczywiście niedoszacowana.

Dodatkowo negatywnie na dobroć oszacowania wpłynęła zmienna struktura roślinności torfowiskowej. Inaczej bowiem rozłożona jest przestrzennie biomasa turzyc, wierzb, a jeszcze inaczej trzin – to problem praktycznie nie występujący w monokulturach roślin uprawnych. Niemniej, nie odnotowano wyraźnych różnic między transektami, które z założenia wyznaczono tak, aby prowadziły przez tereny o odmiennym składzie gatunkowym. Wyniki wskazują więc, że na przestrzenny rozkład biomasy na torfowisku w większym stopniu wpływa rozmieszczenie poszczególnych osobników i ich architektura, aniżeli przynależność gatunkowa. Niewątpliwie rozwiązanie problemu zróżnicowania gatunkowego półnaturalnych zbiorowisk szuwarowych oraz ich niejednorodnego rozmieszczenia będzie stanowiło zasadnicze wyzwanie w precyzyjnym określaniu biomasy metodami nieinwazyjnymi.

Z drugiej strony należy mieć na względzie także niebezpieczeństwo przeszacowania – zjawisko szczególnie istotne w przypadku ekstrapolacji wyników na obszary większe niż powierzchnie testowe (nie dotyczy metody opartej na analizie gęstości punktów). Wyliczona ilość biomasy może być większa od rzeczywistej m.in. z powodu nie uwzględnienia pustych przestrzeni (enklaw bez roślinności), które przy skośnym skanowaniu zostają przesłonięte przez roślinność znajdującą się „na drodze” wiązki lasera. Odpowiednikiem takich sytuacji w monokulturach upraw zbożowych jest pasowa struktura zasiewów ryżu, która zanika – oczywiście tylko pozornie, wraz z odległością (Tilly i in. 2014b). Wszelkie zależności między modelami teoretycznymi a rzeczywistością „na gruncie” zależą więc od rodzaju i struktury zbiorowisk roślinnych, sposobu prowadzenia pomiaru, ale także od charakterystyki konkretnego modelu skanera (Ehlert, Heisig 2013).

W przyszłości technologia naziemnego skanowania laserowego powinna być jedną ze standardowych metod pozyskiwania danych charakteryzujących geobotaniczne powierzchnie badawcze. Należy tu podkreślić, że mogą być one stosowane i interpretowane niezależnie od innych technik badawczych, choć zaleca się łączne wykorzystywanie różnych źródeł danych teledetekcyjnych, w tym przede wszystkim zobrazowań hiperspektralnych (por. Omasa i in. 2007) oraz stosowanie przy tym różnych modeli ekosystemu i krajobrazu (por. Hurtt i in. 2004).

Podziękowania

Badania dofinansowano z funduszy projektu LIFE11/NAT/PL/422 „Ochrona siedlisk mokradłowych doliny Górnej Biebrzy”.

Literatura

Borkowski A., Józków G., 2012. Ocena dokładności modelu 3d zbudowanego na podstawie danych skaningu laserowego – przykład Zamku Piastów Śląskich w Brzegu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 23, s. 37-47.

- Ehlert D., Heisig M., 2013. Sources of angle-dependent errors in terrestrial laser scanner-based crop stand measurement. *Computers and Electronics in Agriculture* 93, s. 10-16.
- Felicjano E.A., Wdowinski S., Potas M.D., 2014. Assessing Mangrove Above-Ground Biomass and Structure using Terrestrial Laser Scanning: A Case Study in the Everglades National Park. *Wetlands* 34, s. 955-968.
- Fryśkowska A., Kędzierski M., 2010. Wybrane aspekty integracji danych naziemnego i lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 21, s. 97-107.
- Höfle B., 2014. Radiometric Correction of Terrestrial LiDAR Point Cloud Data for Individual Maize Plant Detection. *IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters* 11 (1), s. 94-98.
- Hoffmeister D., Curt D., Tilly N., Bendig J., 2011. 3D terrestrial laser scanning for field crop modeling. [w:] V. Lenz-Wiedemann, G. Bareth (red.), *Proceedings on the Workshop of Remote Sensing Methods for Change Detection and Process Modelling*. University of Cologne, Cologne, s. 17-22.
- Hosoi F., Omasa K., 2009. Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable lidar imaging. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (2), s. 151-158.
- Hurt G.C., Dubayah R., Drake J., Moorcroft P.R., Pacala S.W. i in., 2004. Beyond potential vegetation: combining lidar data and a height-structured model for carbon studies. *Ecological Applications* 14 (3), s. 873-883.
- Hyypä J., Jaakkola A., Chen Y. i in., 2013. Unconventional LIDAR mapping from air, terrestrial and mobile. [w:] *Proceedings of the Photogrammetric Week 2013*, Stuttgart, Germany, 9-13 September 2013, s. 205-214.
- Kamiński W., Bojanowski K., Dumalski A., Mroczkowski K., Tryśtuła J., 2008. Ocena możliwości wykorzystania skanera laserowego ScanStation firmy Leica w badaniu deformacji obiektów budowlanych. *Czasopismo Techniczne* 2, s. 139-147.
- Kramarska R., Frydel J., Jegliński W., 2011. Zastosowanie metody naziemnego skaningu laserowego do oceny geodynamiki wybrzeża na przykładzie klifu Jastrzębiej Góry. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 446, s. 102-108.
- Loudermilk E.L., Singhania A., Fernandez J.C., Jiers J.K., O'Brien J.J. i in., 2007. Application of Ground-Based LIDAR for Fine-Scale Forest Fuel Modeling. [w:] B.W. Butler, W. Cook (red.), *The fire environment – innovations, management, and policy; conference proceedings*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, s. 515-523.
- Lumme J., Karjalainen M., Kaartinen H., Kukko A., Hyypä J. i in., 2008. Terrestrial laser scanning of agricultural crops. [w:] J. Chen, J. Jiang, H.-G. Maas (red.), *Proceedings* 37, B5, com. V, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Beijing, s. 563-566.
- Maciaszek J., 2008. Skanowanie laserowe jako nowa technologia inwentaryzacji i wizualizacji zabytkowych komór solnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 24 (3/2), s. 197-212.
- Olsoy P., Glenn N.F., Clark P.E., Derryberry D.R., 2014. Aboveground total and green biomass of dryland shrub derived from terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 88, s. 166-173.
- Omasa K., Hosoi F., Konisi A., 2007. 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *Journal of Experimental Botany* 58 (4), s. 881-898.
- Pirotti F., Guarnieri A., Vettore A., 2013. Vegetation filtering of waveform terrestrial laser scanner data for DTM production. *Applied Geomatics* 5 (4), s. 311-322.
- Poreba M., 2009. Nowoczesne metody pomiarów mas ziemnych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 19, s. 351-361.

- Rowell E., Seielstad C., 2012. Characterizing grass, litter, and shrub fuels in longleaf pine forest pre- and post-fire using terrestrial lidar. *SilviLaser 2012*, 16-19 September 2012 – Vancouver, Canada (www.researchgate.net/publication/259219142)
- Seidel D., 2011. Terrestrial laser scanning. Applications in forest ecological research. *Biodiversity and Ecology ser. B*, 6, Göttingen Centre for Biodiversity and Ecology, Göttingen.
- Straatsma M.W., Middelkoop H., 2006. Airborne laser scanning as a tool for lowland floodplain vegetation monitoring. *Hydrobiologia* 565, s. 87-103.
- Suchocki C., 2009. Zastosowanie skanera naziemnego w monitorowaniu brzegów klifowych. *Rocznik Ochrony Środowiska* 11, s. 715-725.
- Tilly N., Hoffmeister D., Aasen H., Brands J., Bareth G., 2014a. Multi-temporal Crop Surface Models derived from terrestrial laser scanning for accurate plant height measurement and biomass estimation of barley. [w:] J. Bendig, G. Bareth (red.), *Proceedings of the Workshop on UAV-based Remote Sensing Methods for Monitoring Vegetation. Kölner Geographische Arbeiten* 94, s. 83-91.
- Tilly N., Hoffmeister D., Cao Q., Huang S., Lenz-Wiedemann V. i in., 2014b. Multitemporal crop surface models: accurate plant height measurement and biomass estimation with terrestrial laser scanning in paddy rice. *Journal of Applied Remote Sensing* 8 (1), (w druku).
- Tilly N., Hoffmeister D., Schiedung H., Hütt C., Brands J. i in., 2014c. Terrestrial laser scanning for plant height measurement and biomass estimation of maize. *ISPRS Technical Commission VII Symposium, 29 September – 2 October 2014, Istanbul, Turkey, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-7*, s. 181-187.
- Tymków P., Borkowski A., 2010. Rekonstrukcja geometrii 3D krzewu na podstawie naziemnego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 21, s. 405-414.
- Vazirabad Y.F., Karslioglu M.O., 2011. Lidar for Biomass Estimation. [w:] D. Matovic (red.), *Biomass Detection, Production and Usage. InTech*, Rijeka, s. 3-26.
- Wang C., Menenti M., Stoll M.-P., Feola A., Belluco E. i in., 2009. Separation of Ground and Low Vegetation Signatures in LiDAR Measurements of Salt-Marsh Environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47 (7), s. 2014-2023.
- Wężyk P., Koziół K., Glista M. i in., 2007. Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory. First results From the Polish forests. *IAPRS, 36 Part 3 / W52. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, s. 424-429.
- Wężyk P., Sroga R., Szwed P., Szostak M., Tompański P. i in., 2009. Wykorzystanie technologii naziemnego skaningu laserowego w określaniu wybranych cech drzew i drzewostanów. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 19, s. 447-457.
- Wężyk P., Szostak M., Tompański P., 2012. Określenie biomasy sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w Puszczy Niepołomickiej na podstawie przestrzennego rozkładu chmury punktów naziemnego skaningu laserowego. *Roczniki Geomatyki* 10 (5), s. 79-91.
- Zhang L., Grift T.E., 2012. A LIDAR-based crop height measurement system for *Miscanthus giganteus*. *Computers and Electronics in Agriculture* 85, s. 70-76.
- Zlinszky A., Mücke W., Lehner H., Briese Ch., Pfeifer N., 2012. Categorizing Wetland Vegetation by Airborne Laser Scanning on Lake Balaton and Kis-Balaton, Hungary. *Remote Sensing* 4 (6), s. 1617-1650.