

KRZYSZTOF STEREŃCZAK

Technologia lotniczego skanowania laserowego jako źródło danych w półautomatycznej inwentaryzacji lasu

Airborne Laser Scanner technology as a source of data for semi-automatic forest inventory

ABSTRACT

Stereńczak K. 2010. Technologia lotniczego skanowania laserowego jako źródło danych w półautomatycznej inwentaryzacji lasu. Sylwan 154 (2): 88-99.

Airborne Laser Scanner (ALS) becomes a new tool acquiring very accurate data about forest environment. Basing on this data new methods of forest parameter extraction become available. Quality of the results of automatic methods and level of correlation to the field measurements allows presuming that in the future LIDAR can become an important tool in semi-automatic method of forest inventory.

KEY WORDS

semi-automatic forest inventory, LIDAR, photogrammetry, forest management

ADDRESSES

Krzysztof Stereńczak – e-mail: krzysztof.sterenczak@wl.sggw.pl

Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa; SGGW; ul. Nowoursynowska 159, bud. 34; 02-776 Warszawa

Wstęp

Prace, które doprowadziły do powstania skanera laserowego, zapoczątkowane zostały przez Alberta Einsteina już na początku XX wieku. Ten wielki uczyony zdefiniował podstawy teoretyczne korpuskularno-falowej teorii światła, która doprowadziła do powstania w 1960 roku pierwszego lasera. Prace nad rozwojem tej technologii zaowocowały w 1993 roku powstaniem pierwszego systemu LIDAR-owego [Baltsavias i in. 1999]. Słowo LIDAR pochodzi od angielskiej nazwy Light Detection And Ranging. Skaner laserowy jest połączeniem lasera ze skanerem, wysyłającym z określoną częstotliwością wiązki światłone w kierunku ziemi, pokrywając (skanując) określony pas terenu. W wypadku skanowania z powietrza urządzenie to może być podczipione na platformie helikoptera lub samolotu. Skaner wysyła wiązki światłone w zakresie bliskiej podczerwieni NIR (ang. Near InfraRed) lub światła zielonego G (ang. Green) o określonej długości fali i konkretnym kierunku. Są one wysyłane przez specjalny układ optyczny w dokładnie odmierzonych odstępach czasu. Wiązka światła w trakcie swej drogi napotyka na przeszkody, co generuje szumy rejestrowane przez odbiornik. Każde odbicie oznaczane jest jako punkt w przestrzeni. Pierwsze urządzenia miały możliwość rejestrowania tylko jednego echa, obecnie możliwe jest już zarejestrowanie wszystkich składowych odbić jednej wiązki (skanery „full waveform”). Dane uzyskane w wyniku nalotu LIDAR-a mają charakter przestrzenny i zapisywane są w globalnym układzie współrzędnych WGS 84 [Guangping 1998].

Technologia lotniczego skanowania laserowego

Głównymi komponentami laserowego skanera lotniczego są:

- system GPS (ang. Global Positioning System),
- system INS (ang. Inertial Navigation System),
- laser optyczny.

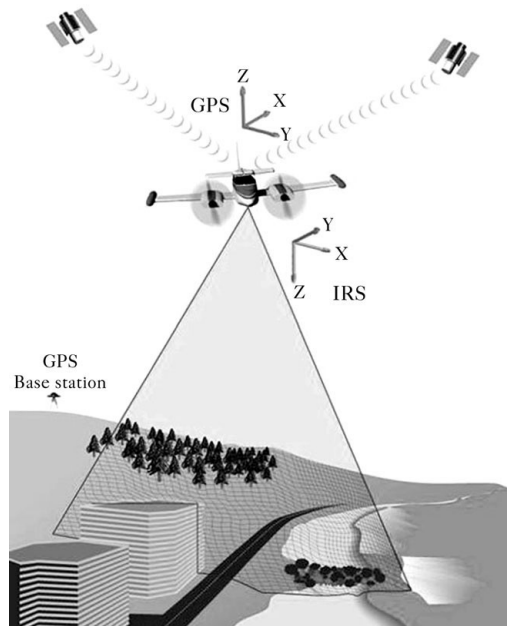
W celu uzyskania współrzędnych punktów będących efektem skanowania laserowego, wykonywane są następujące pomiary [Ahokas i in. 2005; Katzenbeisser 2003, 2004; Pfeifer i in. 2004]:

- określenie położenia i orientacji urządzenia w przestrzeni,
- pomiar czasu od wyemitowania wiązki laserowej do zarejestrowania szumu,
- obliczenie kąta, pod jakim wiązka ta została wysłana.

Rycina 1 prezentuje sposób realizowania pomiarów w trakcie nalogu fotogrametrycznego.

Chcąc prześledzić drogę, która prowadzi do uzyskania współrzędnych punktu na ziemi, możemy wyznaczyć kilka źródeł błędów, które mogą pojawić się w trakcie pozyskiwania i przetwarzania danych LIDAR-owych [Ahokas i in. 2005]:

- Globalny System Pozycjonowania,
- Bezwładnościowy System Nawigacyjny,
- urządzenie laserowe,
- charakterystyka danych,
- sposoby obróbki i przetwarzania danych,
- charakterystyka obiektów.



Ryc. 1.

System LIDAR-owy w trakcie wykonywania nalogu fotogrametrycznego
LIDAR system during photogrammetric flight

Ze względu na swoją specyfikę Globalny System Pozycjonowania (GPS) może być źródłem, czasami dużych, błędów wynikających z:

- błędu zegara satelity spowodowanego różnicą pomiędzy idealnym czasem GPS a wskazaniami zegara satelity,
- błędu efemeryd spowodowanego różnicą między rzeczywistą pozycją satelity a pozycją wyliczoną z danych orbitalnych (przyczyną jest grawitacja Słońca i Księżycy, a także wiatr słoneczny),
- selektywnej (ograniczonej) dostępności do sygnału (PPS; Precyzyjny System Pozycjonowania – ang. Precise Positioning System, który jest dostępny tylko dla wybranych użytkowników cywilnych i wojska. W normalnych warunkach cywilni użytkownicy korzystają z SPS (Standardowego Systemu Nawigacji – ang. Standard Positioning System)),
- opóźnień jonosferycznego (błąd powstaje w trakcie przechodzenia fali przez jonosferę; za dnia przyjmuje wartości większe (20-30 m), nocą mniejsze (3-6 m)),
- opóźnień troposferycznego (błąd powstaje w trakcie przejścia fali radiowej przez dolne warstwy atmosfery; zależy od temperatury, ciśnienia i wilgotności i osiąga wartości do 3 m),
- szumów własnych odbiornika – błędy pomiaru, jakie wystąpią na etapie obliczania pozycji już w samym odbiorniku GPS. Spowodowane mogą być np. telefonem komórkowym lub przenośnym komputerem.

Aby ograniczyć błędy z tytułu pomiarów GPS ustalono następujące warunki pomiarów, które muszą być spełnione. Przede wszystkim przeprowadzane są pomiary różnicowe (DGPS) o kodowo-fazowym charakterze i częstotliwości 1 Hz, gdzie stacja bazowa nie może znajdować się dalej niż 25 km od miejsca pomiarów, a współczynnik PDOP jest mniejszy od 2,5. Przy spełnieniu tych warunków i zastosowaniu odpowiedniej klasy odbiorników precyzja uzyskanych pomiarów może sięgnąć około 10-15 cm [Katzenbeisser 2003, 2004].

Bezwładnościowy System Nawigacyjny określa aktualne nachylenia katowe platformy, na której zamontowana jest optyczna głowica skanująca. W jego skład wchodzi system Bezwładnościowego Układu Pomiarowego (IMU; ang. Inertial Measuring Unit), złożony z żyroskopu i akcelerometru [Wężyk 2006]. Pomiar położenia odbywa się 200 razy na sekundę. W tym czasie samolot lecący z prędkością około 210 km/godz. pokonuje drogę niespełna 30 cm. Są więc w trakcie pomiarów momenty, w których rejestracja może być wykonana bez ustalonego położenia nadajnika, gdy emisja fali odbędzie się w przerwie pomiędzy pomiarami systemem inercyjnym. System INS spełnia ponadto inne istotne zadanie – w momencie przerw w pracy GPS przejmuje jego funkcje. Ważne jest właściwe skalibrowanie urządzenia przed przystąpieniem do pomiarów, przez co prawdopodobieństwo wystąpienia dużych błędów będzie znikome.

Urządzenie laserowe składa się z nadajnika, lustra, odbiornika sygnałów odbitych i licznika sygnałów. Nieskalibrowany nadajnik laserowy może być przyczyną błędów systematycznych. Chodzi tu o jego części mechaniczne, jak np. lustro, które są głównym powodem błędów. Jest to jednak sytuacja raczej szczególna z racji tego, iż urządzenie przed każdym lotem jest sprawdzane i strojone.

Na charakterystykę danych składają się: gęstość pozyskanych punktów, wysokość lotu, kąt skanowania, numer odbicia, wielkość plamki. Wszystkie te czynniki wpływają na późniejszą dokładność obróbki danych. Ważne jest dobranie odpowiednich parametrów do założonego celu prac. Kolejnym źródłem błędów może być człowiek i jego ewentualne pomyłki przy obróbce

i przetwarzaniu danych. Ponadto każdy etap obróbki obarczony jest błędami, które mogą wynikać z: interpolacji brakujących danych, filtracji, segmentacji i wygładzania, współczynników progowych, generalizacji i innych. Wszystkie operacje wykonywane są w oparciu o pewne algorytmy. Każdy z nich inaczej analizuje przestrzeń, przez co wyniki ich zastosowania mogą różnić się od siebie. Doświadczenia pokazały, że należy starać się dobrać do potrzeb odpowiednie algorytmy oraz metody, a także grupować dane w porcje tak, by podnosić efektywność wyników i obniżyć czas analizy [Hyypä i in. 2004, 2006; Pfeifer i in. 2004; Sithole, Vosselman 2003].

Szczególnie trudnymi do analiz terenami są obszary górskie. Duże deniwelacje terenu i występowanie roślinności utrudnia filtrację [Hyypä i in. 2005]. Bardziej efektywna i prostsza jest praca na obszarach płaskich. Inne trudności znajdujemy w drzewostanie, gdzie zwarta warstwa koron może w znacznym stopniu utrudnić dokonanie pomiarów. Zmniejszenie błędów powodowanych przez charakterystykę skanowanych obiektów można przeprowadzić na przykład przez dobranie odpowiedniej pory nalotu czy przez zwiększenie ilości punktów wysyłanych na badaną powierzchnię. W warunkach leśnych można zmniejszyć kąt skanowania, przez co uzyskamy większą jego przenikalność przez promienie laserowe. Obiektu skanowanego nie można zmienić, należy więc zastanowić się nad odpowiednim dobraniem i ustawieniami systemu LIDAR-owego wykorzystanego do jego pomiaru.

Wspomniane powyżej przyczyny błędów nie wyczerpują zagadnienia. Dają one jednak pewne wyobrażenie o złożoności i zaawansowaniu technologii. Pokazują również, że opisywane narzędzie nie jest bezbłędne. Wydaje się jednak, że dokładność w granicach 15 cm jest zupełnie wystarczająca do inwentaryzacji leśnej.

Poniżej przedstawiono najważniejsze zalety technologii lotniczego skaningu laserowego w porównaniu do tradycyjnych metod fotogrametrycznych:

- Proces pozyskiwania i przetwarzania danych jest prawie całkowicie zautomatyzowany. Rola ludzi ogranicza się wyłącznie do kontroli i określania parametrów nalotu.
- LIDAR jest odporny na warunki świetlne – może pracować nocą i na obrazie nie występują cienie.
- Jest to jedyne narzędzie, które pozyskuje informację z tak wielką ilością próbek. Wykorzystanie tradycyjnych metod geodezyjnych do pomiaru kilku punktów na 1 m² okazuje się zupełnie niewykonalne z powodu wysokich kosztów i pracochłonności. Nawet okap drzewostanu nie jest wystarczającą przeszkodą dla wiązki laserowej, gdyż przenika go średnio 24% z łącznej liczby wyemitowanych promieni [Hopkinson i in. 2004].

Do wad systemu należy zaliczyć:

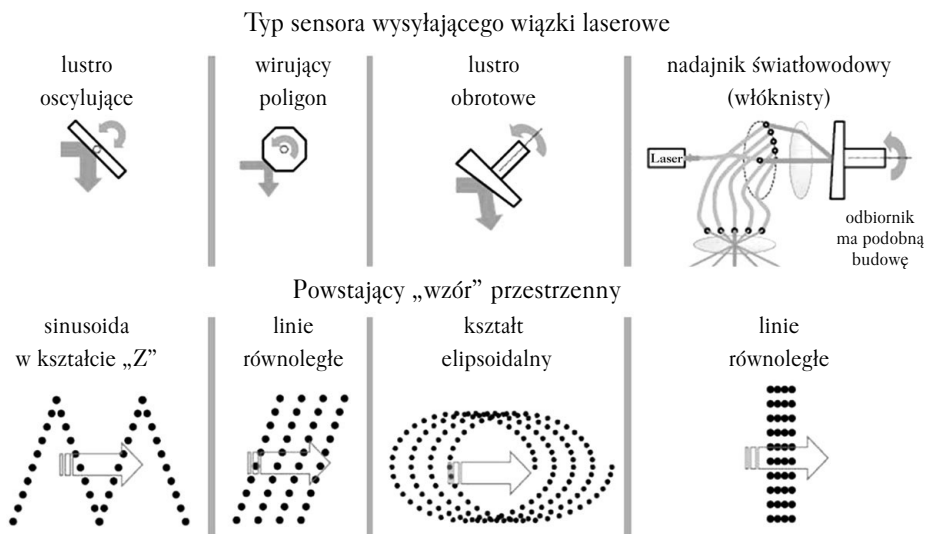
- Nieodporność na czynniki pogodowe – niskie chmury, deszcz czy mgła uniemożliwiają pomiar powodując rozbiecie lub pochłanianie promieni laserowych.
- Wąską strefę pomiarów. Przelot samolotu odbywa się na stosunkowo małej wysokości. Dodatkowo skaningu wykonywany jest przy niewielkim kącie skanowania, przez co informacja pozyskana z jednego przelotu ma kilkaset metrów.
- Wysoką cenę pozyskania danych. Wydaje się jednak, że w wyniku dużego zapotrzebowania i wielu nowo powstających firm skaningowych, sytuacja ta będzie się zmieniać i cena danych spadnie.

Regułą stało się integrowanie skanera z innymi sensorami optycznymi. Chodzi tu przede wszystkim o kamery cyfrowe i hiperspektralne. Dzięki tej fuzji możliwe jest jednoczesne i kompletne

pozyskanie informacji na temat badanego obiektu. Ułatwia to i uzupełnia późniejsze analizy oraz obniża koszty pozyskiwania danych LIDAR-owych. Większość obecnie dostępnych na rynku skanerów to systemy generujące impulsy, których rodzaje przedstawiono na rycinie 2. Przedstawione typy skanerów różnią się między sobą wielkością i kształtem luster oraz sposobem pomiaru przestrzeni, co przejawia się we „wzorze”, w jaki układają się punkty pomiarowe. Większość działających operacyjnie skanerów posiada elementy mechaniczne (lustra), które obracając się rozsyłają wiązki laserowe na określonym obszarze. Wyjątkiem na rynku jest skaner firmy TopoSys – Falcon II (ryc. 2; ostatni w górnym rzędzie). Zbudowany jest on z systemu światłowodów zgrupowanych w dwóch jednostkach ustawionych względem siebie pod odpowiednim kątem. Jedna z nich emituje impulsy, a druga rejestruje sygnały powracające. Obie części połączone są światłowodem, który wykorzystywany jest do pozyskiwania danych referencyjnych. System ten nie wymaga dodatkowej kalibracji po tej wykonanej w fabryce. Możliwa jest też zmiana kąta skanowania. System zapewnia gęste i regularne pokrycie terenu, które nie jest uzależnione od wysokości czy kąta skanowania.

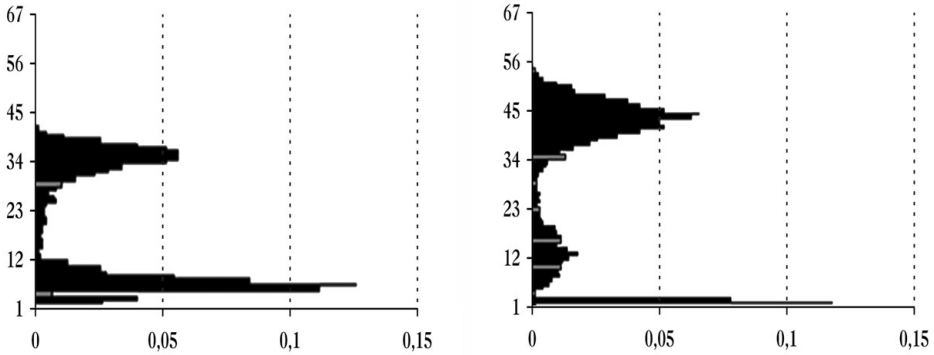
Zagadnienia techniczne lotniczego skaningu laserowego

Penetrację drzewostanu przez sygnał z lotniczego skanera laserowego w porównaniu do naziemnego skaningu laserowego zobrazowano na rycinie 3. LIDAR skanujący przestrzeń z poziomu lotniczego nie jest w stanie dostarczyć pełnej informacji o koronie. W zależności od jej wielkości i gatunku drzewa brak danych może dochodzić nawet do 4 m od pnia [Chasmer i in. 2004], co powoduje wyłączenie tych części koron z określania np. parametru LAI. Należy brać pod uwagę, iż nie wszystkie wysłane impulsy świetlne wracają do nadajnika. Straty te mogą sięgnąć nawet kilkudziesięciu procent wartości początkowej, szczególnie na obszarach o dużym udziale wód otwartych [Hopkinson i in. 2004]. Spowodowane są pochłanianiem pulsów lub zmianą kąta ich odbicia przez obiekty na ziemi. Ponadto w okresie letnim nie więcej niż 10-35% wyemitowanych impulsów osiąga gruntu pod okapem drzewostanu [Watt i in. 2004]. Obydwa te



Ryc. 2.

Podstawowe typy skanerów oraz przestrzenne „wzory” powstałe w wyniku ich działania
Basic types of scanners and spatial patterns resulting from their application



Ryc. 3.

Średnia dystrybucja procentowa odbić ostatniego echa w 0,5 m warstwach wysokościowych dla drzewostanów sosnowych (z lewej) i mieszanych (z prawej) [Będkowski, Stereńczak 2008b]

Mean frequency of last echo reflections in 0.5 m height-layers for Scots pine (left) and mixed (right) stands [Będkowski, Stereńczak 2008b]

zagadnienia są istotne w momencie planowania nalotu, by odpowiednio ustalić gęstość próbkowania i uwzględnić ewentualne ubytki.

Kolejnym parametrem LIDAR-a, na który należy zwrócić uwagę, jest wielkości plamki (ang. footprint), czyli średnica wiązki laserowej na ziemi. Ma ona istotny wpływ na proces pozyskiwania danych oraz na efekt opracowań kameralnych. Wraz z jej zwiększaniem łatwiejsze staje się wychwycenie np. wierzchołka drzewa. Im jest ona mniejsza, tym łatwiej przenika warstwę koron, co ma pozytywny wpływ na jakość informacji dotyczącej podokapowej części drzewostanu, a pozycja punktu bardziej odpowiada położeniu obiektu, który charakteryzuje.

Innym ważnym zagadnieniem jest odległość potrzebna do zarejestrowania szumu (odbicia). Różne systemy potrzebują innej odległości pomiędzy kolejnymi celami, by można było je wyróżnić. System Falcon II rozpoznaje dwa cele, gdy znajdują się one w odległości co najmniej 1,5 m [Loffler 2003]. Inne systemy rozpoznają różne cele już przy dystansie 0,6 m.

Bardzo często zdarza się, iż dane referencyjne nie pokrywają się w swym położeniu geograficznym z danymi z LIDAR-a. Wynika to głównie ze sposobu, w jakim mierzona jest lokalizacja pojedynczych drzew w pomiarach terenowych. Często stosowaną praktyką w badaniach jest sztuczne dociąganie danych terenowych do pozyskanych z nalotu fotogrametrycznego danych LIDAR-owych w założonym promieniu i określonej wysokości. Zakłada się wtedy, że odchyłka pozioma większa niż 2 m i pionowa większa niż 5 m między korespondującymi danymi (pozyskanymi np. z pomiarów terenowych i LIDAR-a) powoduje odrzucenie takich drzew w późniejszych porównaniach [Yu i in. 2004].

Ostatnią ważną charakterystyką jest możliwość rejestracji różnej liczby sygnałów odbitych. Pierwsze systemy (np. TopoSys I) mogły kolekcjonować tylko jedno odbicie w jednym nalocie – pierwsze lub ostatnie [Hyypä i in. 2006], następnie możliwe było jednoczesne kolekcjonowanie 2 odbić: pierwszego i ostatniego (m.in. w systemach ALTM 1210 i ALTM1225, Falcon II czy TopoSys II). Od 2004 stało się możliwe rejestrowanie większej ilości odbić pośrednich. W systemie ALTM 3100 możliwe już jest pozyskanie do 4 odbić (np. TopScan). Obecnie pojawiły się na rynku skanery mające możliwość rejestracji wszystkich odbić jednej wiązki: Litemapper 5600 [Hug 2004; Reitberger i in. 2006a], Riegl LMS-Q560 [Reitberger i in. 2006a; Rieger i in. 2006] TopEye MK II [Reitberger i in. 2006b] i Harier 56 [Reitberger i in. 2006a].

Z końcowym efektem przetwarzania danych LIDAR-owych związane są następujące produkty:

- numeryczny model terenu (NMT; ang. Digital Terrain Model (DTM), Digital Elevation Model (DEM) lub Ground Elevation Model (GEM)) – wektorowy lub rastrowy model Ziemi;
- numeryczny model powierzchni terenu (NMPT; ang. Digital Surface Model (DSM)) lub szczegółowo w odniesieniu do drzewostanu – numeryczny model warstwy koron (NMWK) [Będkowski 2005]. Jest to wektorowy lub rastrowy model Ziemi wraz ze wszystkimi obiektami znajdującymi się na jej powierzchni. W odniesieniu do lasu należy rozumieć to pojęcie jako dyskretną (punktową) reprezentację pewnej powierzchni, która wraz z algorytmem interpolacyjnym opisuje kształt koron w określonym obszarze [Będkowski 2005];
- znormalizowany numeryczny model powierzchni terenu lub numeryczny model różnicowy (ang. normalized Digital Surface Model (nDSM)), który w odniesieniu do powierzchni leśnej powstaje przez „odjęcie” odpowiadających sobie pikseli z NMT i NMPT [Mozgawa 2006]. W literaturze spotka się też następujące określenia odnoszące się do numerycznego modelu różnicowego:
 - wysokościowy model koron (WMK; ang. Canopy Height Model (CHM)),
 - znormalizowany model koron (zMK; ang. normalized Canopy Model (nCM)),
 - numeryczny model koron (NMK; ang. Digital Canopy Model (DCM)),
 - model powierzchni koron (MPK; ang. Crown Surface Model (CSM)).

Dotychczasowe doświadczenia w zastosowaniu skaningu laserowego w leśnictwie

Badania nad wykorzystaniem danych LIDAR-owych do określania parametrów drzewostanu rozpoczęte zostały już w latach siedemdziesiątych, czyli zaledwie kilkanaście lat po skonstruowaniu pierwszego lasera. Pionierskie w tej dziedzinie prace prowadziła grupa naukowców pod kierownictwem Sołoduchina [1977, 1979a, b]. Zespół ten upozorował laboratoryjnie skanowanie znad okapu drzew wykorzystując laser. Po ścięciu drzewa umieszczono je na ruchomym wózku i przesuwając w poprzek osi wysyłania impulsów laserowych uzyskiwano profile drzew. Na tej podstawie określano wysokości drzew i porównywano je do wyników opracowywanych zdjęć lotniczych. Kolejne lata przyniosły następne publikacje. Pochodziły one głównie z Ameryki Północnej, a następnie ze Skandynawii [Hyypä i in. 2004, Naeset, Bjerknæs 2001; Naeset i in. 2004]. Dotyczyły one pozyskania informacji na temat wysokości drzewostanu, zadrzewienia, gatunku drzew i szacowania biomasy.

Zasadniczo pomiar środowiska leśnego rozwinął się w dwóch kierunkach. Pierwszy skupił się na poszukiwaniu charakterystyk poszczególnych wydzieleń (grup drzew), wykorzystywanych w wielkopowierzchniowej inwentaryzacji drzewostanu. Realizowany był w oparciu o dane LIDAR-owe, których gęstość wynosi około 1 puls/m². Drugi kierunek badań skupił się na określeniu i pomiarze pojedynczych drzew, a w oparciu o ich cechy poznawanie charakterystyk całych drzewostanów. W tym wypadku gęstość często przekracza 5, a czasami osiąga nawet wartość 50 pulsów/m² [Naeset 2004a, b].

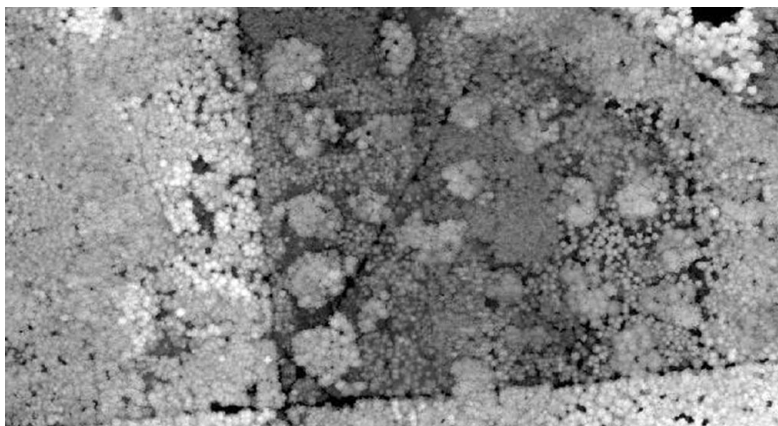
Doświadczenia zagraniczne pokazują bardzo dużą użyteczność danych LIDAR-owych, szczególnie w pozyskiwaniu informacji o drzewostanach iglastych półkuli północnej. Takie parametry jak wysokość drzew, przyrost drzewostanów, biomasa, zasobność czy zasięg luk są z bardzo dobrą skutecznością określane automatycznie w oparciu o dane z lotniczego skanowa-

nia laserowego. Liczba drzew, przebieg dróg leśnych, występowanie drugiego piętra w drzewostanie mogą być skutecznie określone, ale nie we wszystkich drzewostanach. Jednakże dość szczególna budowa iglastych drzewostanów w Kanadzie, Skandynawii czy Rosji powoduje, że wyniki uzyskiwane przez badaczy z tamtych regionów nie dadzą się w łatwy sposób przenieść w warunki Polski. Z racji specyfiki naszych drzewostanów źródłem poszukiwań i zdobywania doświadczeń dla nauki i praktyki są prace prowadzone w Niemczech czy Austrii. W krajach tych technologia lotniczego skanowania laserowego jest obecna już od około 20 lat. Tłumaczy to dużo bogatsze doświadczenie i wiedzę na ten temat. Podsumowując dokonania naszych zachodnich sąsiadów można obiektywnie stwierdzić, że wiele parametrów drzewostanu określanych jest z wykorzystaniem danych z lotniczego skanowania laserowego z bardzo wysoką dokładnością i wiarygodnością [Breidenbach i in. 2007; Diedershagen i in. 2004; Ducic i in. 2006; Gorte i in. 2005; Heurich, Weinacker 2004; Heurich i in. 2004a; Magnussen, Wulder 2004; Koch i in. 2006; Wagner i in. 2004; Wang i in. 2007; Weinacker i in. 2004].

Badania nad możliwościami wykorzystania danych LIDAR-a w inwentaryzacji lasów europejskich prowadzone są już między innymi w Niemczech [Koch i in. 2006; Rossmann i in. 2007], Szwajcarii [Ginzler i in. 2007], a przede wszystkim w krajach skandynawskich [Hyypä i in. 2006; Maltamo i in. 2007; Naesset 2004a; Naesset i in. 2004; Olsson 2004]. Także w Polsce ukazały się pierwsze wyniki. Generalnie wyróżniono dwie podstawowe metody inwentaryzacji drzewostanu. Jedna bazuje na określaniu parametrów pojedynczych drzew (ang. single tree detection), druga zaś opiera się na modelowaniu parametrów uzyskanych z powierzchni próbnych (ang. area based modeling) [Maltamo i in. 2007]. Obie metody rozwijane są praktycznie na całym świecie. W tym momencie można stwierdzić, iż dają one bardzo podobne wyniki estymacji miąższości drzewostanu, przy czym z ich pomocą można uzyskać dla niektórych cech drzewostanu dokładniejsze wyniki w porównaniu do tradycyjnie stosowanych metod taksacji naziemnej.

Istnieje wiele pozytywnych aspektów wykorzystania skanowania laserowego w inwentaryzacji zapasu. Po pierwsze inwentaryzacja naziemna ograniczona jest w swym zakresie i obejmuje średnio około 30% tradycyjnie inwentaryzowanych powierzchni. Wykonując skanowanie laserowe otrzymujemy informacje o całym nadleśnictwie (ryc. 4). Możemy określić wybrane cechy drzew i drzewostanów w sposób automatyczny i porównywalny. Pozyskany przy okazji lotniczego skanowania laserowego numeryczny model terenu jest potem źródłem wielu dodatkowych analiz i często stanowi nieocenione źródło informacji. Dodatkowo produktem nalotu skanerem laserowym jest bardzo dokładna, prawdziwa (ang. true) ortofotomapa, o której przydatności już bardzo wielu leśników miało okazję przekonać się osobiście. Oczywiście prezentowane narzędzie ma też swoje słabe strony. Technologia lotniczego skanowania laserowego jest kosztowną metodą pozyskania informacji, a jej dokładność często przewyższa dotychczasowe potrzeby leśników. Pamiętajmy jednak, że pierwszy odbiornik GPS kosztował 150 000 dolarów. Ponadto występują różne trudności na poziomie pozyskania, przetwarzania i dostarczania danych, ale te techniczne problemy wkrótce będą dopracowane. Wydaje się, że potencjał, jaki posiadają w sobie dane pozyskiwane laserowo z poziomu lotniczego, spowoduje, że będą one w przyszłości istotnym elementem prac urzędzeniowych.

Polskie doświadczenia z wykorzystania danych pozyskanych z lotniczego skanowania laserowego są jeszcze stosunkowo młode. Pierwszą pracą naukową na temat tej technologii była publikacja Będkowskiego [2004]. Od 2005 roku rozpoczęły się w Polsce projekty mające na celu sprawdzenie potencjalnych zastosowań lotniczego skanowania laserowego w badaniach środowiska leśnego. Uzyskiwane różnymi metodami wyniki [Bedkowski, Stereńczak 2008a, b;



Ryc. 4.

Wysokościowy model koron prezentujący fragment drzewostanu w postaci cyfrowej. Jasne piksele odpowiadają roślinności wysokiej, ciemne – niskiej

Canopy Height Model presenting fragment of the stand in a digital form. Light pixels correspond to high vegetation, dark ones – lower

Będkowski i in. 2008; Wężyk i in. 2008; Stereńczak i in. 2008; Zawila-Niedźwiecki i in. 2008], generalnie prowadzą do podobnych wniosków, można więc je uznać za obiektywne. Pokrywają się one także z doświadczeniami zagranicznymi.

Podsumowanie

Można stwierdzić, że w przyszłości dane ze skanowania lotniczego będą stanowić bardzo ważne źródło informacji dla inwentaryzacji lasów i różnych obszarów chronionych. Wykorzystanie niektórych automatycznych metod określania parametrów drzewostanu i włączenie ich do półautomatycznej inwentaryzacji zapasu wydają się bardzo prawdopodobne. Od wielu czynników zależy, kiedy to się stanie. Pierwsze doświadczenia polskie, uzyskane w kilku projektach przeprowadzonych w ostatnich latach, wskazują na bardzo wysoką użyteczność danych LIDAR-owych oraz możliwość ich integracji z innymi technologiami geomatycznymi. Idealną sytuacją byłoby przeprowadzenie równoległej inwentaryzacji lasu metodą tradycyjną i wariantami metody półautomatycznej w celu określenia możliwości ich zintegrowania i optymalizacji. Stworzenie zespołu, który miałby się takiego zadania podjąć, w obecnych warunkach nie byłoby problemem z racji tego, że wszystkie zainteresowane środowiska miały już doświadczenia w pracy z danymi LIDAR-owymi. Najważniejsze jest przecież to, by zdobyta wiedza i doświadczenie jak najszybciej mogły zostać zweryfikowane, dopracowane i wdrożone do praktycznej działalności na rzecz polskich lasów.

Literatura

- Ahokas E., Yu X., Oksanen J., Hyypä J., Kaartinen H., Hyypä H. 2005. Optimization of the scanning angle for countrywide laser scanning. ISPRS Workshop "Laser scanning 2005". Enschede, Holandia.
- Baltsavias E., Wehr A., Lohr U. 1999. Theme Issue on Airborne Laser Scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54: 61-63.
- Będkowski K. 2004. Skanowanie laserowe i jego zastosowanie w leśnictwie. Roczniki Geomatyki II 4: 33-40.
- Będkowski K. 2005. Fotogrametryczna metoda oceny stanu i zmian wysokościowej struktury warstwy koron w drzewostanach. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Będkowski K., Stereńczak K. 2008a. Porównanie zasięgów koron drzew wyznaczonych na podstawie danych skanowania laserowego i pomiarów fotogrametrycznych. Czasopismo Techniczne: 16-25.

- Będkowski K., Stereńczak K. 2008b. Przestrzenny rozkład punktów odbić impulsów skanera laserowego a wybrane cechy drzewostanu. *Roczniki Geomatyki VI 8*: 55-60.
- Będkowski K., Brach M., Stereńczak K. 2008. Numeryczny model terenu obszaru zalesionego utworzony na podstawie skanowania laserowego i jego dokładność. *Roczniki Geomatyki VI 8*: 49-53.
- Breidenbach J., McGaughey R. J., Andersen H-E., Kandler G., Reutebuch S. E. 2007. A mixed-effects models to estimate stand volume by means of small footprint airborne LIDAR data for an American and a German study site. *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*. Espoo, Finlandia.
- Chasmer L., Hopkinson C., Treitz P. 2004. Assessing the three-dimensional frequency distribution of airborne and ground-based LIDAR data for red pine and mixed deciduous forest plots detection. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Diedershaagen O., Koch B., Weinacker H. 2004. Automatic segmentation and characterization of forest stand parameters using airborne LIDAR data, multispectral and FOGIS data. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Ducic V., Hollaus M., Ullrich A., Wolfgang W., Melzer W. 2006. 3D vegetation mapping and classification using full-waveform laser scanning. *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, Wiedeń, Austria.
- Ginzler C., Boehl J., Boesch R., Waser L. T. 2007. Accuracy of forest parameters derived from medium footprint LIDAR under operational constraints. *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*. Espoo, Finlandia.
- Gorte B., Pfeifer N., Elberink S. O. 2005. Height texture of low vegetation in airborne laser scanner data and its potential for DTM correction. *ISPRS Workshop "Laser scanning 2005"*. Enschede, Holandia.
- Guangping H. E. 1998. Airborne laser survey system: technology and applications. *Journal of Geospatial Engineering* 2: 51-55.
- Heurich M., Weinacker H. 2004. Automated tree detection and measurement in temperate forest of central Europe using laserscanning data. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Heurich M., Schadeck S., Weinecker H., Krzystek P. 2004. Forest parameter derivation DTM/DSM generated from LIDAR and digital modular camera (DMC). *XX ISPRS Congress*. Istanbul, Turcja.
- Hopkinson C., Lim K., Chasmer L. E., Treitz P., Creed I. F., Gynan C. 2004. Wetland grass to plantation forest – estimating vegetation height from the standard deviation of LIDAR frequency distributions. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Hug C., Ullrich A., Grimm A. 2004. LITEMAPPER-5600 – a waveform-digitizing LIDAR terrain and vegetation mapping system. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Hyypä J., Hyypä H., Litkey P., Yu X., Haggren H., Ronnholm P., Pysalo U., Pitkanen J., Maltamo M. 2004. Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Hyypä J., Yu X., Hyypä H., Maltamo M. 2006. Methods of airborne laser scanning for forest information extraction. *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, Wiedeń, Austria.
- Hyypä H., Yu X., Hyypä J., Kaartinen H., Kaasalainen S., Honkovaara E., Ronnholm P. 2005. Factors affecting quality of DTM generation in forested areas. *ISPRS Workshop "Laser scanning 2005"*. Enschede, Holandia.
- Katzenbeisser R. 2003. About the calibration of LIDAR sensors. *WG III/3 Workshop "3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data"*. Drezno, Niemcy.
- Katzenbeisser R. 2004. Calibration and data validation of LIDAR fiber scanner. *ASPRS Annual Conference*. Denver, USA.
- Koch B., Heyder U., Straub Ch., Weinecker H. 2006. 3D data for forest and environment planning. *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, Wiedeń, Austria.
- Loffler G. 2003. Aspects of Raster DEM data derived from laser measurements. *WG III/3 Workshop "3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data"*. Drezno, Niemcy.
- Magnussen S., Wulder M. A. 2004. Clustering of point patterns derived from LIDAR canopy height data. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Maltamo M., Packalén P., Peuhkurinen J., Suvanto A., Pesonen A., Hyypä J. 2007. Experiences and possibilities of ALS based forest inventory in Finland.
- Mozgawa J. 2006. Potrzeby inwentaryzacyjne LP a możliwości ich realizacji wybranymi technikami geomatycznymi. Ekspertyza wykonana w KUL, GIEL SGGW w ramach projektu „Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskiwanych różnymi technikami geomatycznymi”. Warszawa.
- Naesset E. 2004a. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 164-179.
- Naesset E. 2004b. Estimation of above- and below-ground biomass in boreal forest. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Naesset E., Bjercknes K. 2001. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 78: 328-340.

- Naesset E., Gobakken T., Holmgren J., Hyypä H., Hyypä J., Maltamo M., Nilson M., Olsson H., Persson A., Soderman U. 2004. Laser scanning of forest resources : the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 6-22.
- Olsson H. 2004. Summary of the Scandlaser 2003 workshop and recent development in Sweden. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Pfeifer N., Gorte B., Elberink S. O. 2004. Influences of vegetation on laser altimeters – analysis and correction approaches. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Reitberger J., Krzystek P., Heurich M. 2006a. Full-waveform analysis of small footprint airborne laser scanner data in the Bavarian forest national park for tree species classification. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, Wiedeń, Austria.
- Reitberger J., Krzystek P., Stilla U. 2006b. Analysis of full waveform LIDAR data for tree species classification. ISPRS Commission III Symposium. Bonn, Niemcy.
- Rieger P., Ullrich A., Reichert R. 2006. Laser scanners echo digitization for full waveform analysis. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, Wiedeń, Austria.
- Rossmann J., Schluse M., Bücken A., Krahwinkler P. 2007. Using airborne laser scanner data in forestry management: a novel approach to single tree delineation. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. Espoo, Finlandia.
- Sithole G., Vosselman G. 2003. Comparison of filtering algorithms. WG III/3 Workshop "3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data". Drezno, Niemcy.
- Sołoduchin W. I., Kulasow A. G., Utenkow B. I., Żukow A. J., Mażugin I. N., Emalanow W. P., Kopolow I. A. 1977. Sjonka profila krony dieriewa s pomoszczju lazernego dalnomiera. *Lesnoje Choziajstwo* 2: 71-73.
- Sołoduchin W. I., Mażugin I. N., Żukow A. J., Narkiewicz W. I., Popow J. W., Kulasow A. G., Marasin L. E., Sokołow S. A. 1979a. Laziernaja aerosionka profilej lesa. *Lesnoje Choziajstwo* 10: 43-45.
- Sołoduchin W. I., Żukow A. J., Mażugin I. N., Bokow T. K., Poleżaj W. M. 1979b. Wozmożnosti lazernoj aerosiemki profilej lesa. *Lesnoje Choziajstwo* 10: 53-58.
- Stereńczak K., Będkowski K., Weinacker H. 2008. Accuracy of crown segmentation and estimation of selected trees and forest stand parameters in order to resolution of used DSM and nDSM models generated from dense small footprint LIDAR data. *Proceedings of Youth Forum*, vol. XXXVIII 6: 27-33. Pekin, Chiny.
- Wagner W., Eberhofer C., Hollaus M., Summer G. 2004. Robust filtering of airborne laser scanner data for vegetation analysis. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Wang Y., Weinacker H., Koch B. 2007. Development of a procedure for vertical structure analysis and 3D-singlr tree extraction within forests based on LIDAR point cloud. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. Espoo, Finlandia.
- Watt P. J., Donoghue D. N. M., McManus K. B., Dunford R. W. 2004. Predicting forest height from IKONOS, LANDSAT and LIDAR data. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Weinacker H., Koch B., Heyder U., Weinacker R. 2004. Development of filtering, segmentation and modeling modules for LIDAR and multispectral data as a fundament of an automatic forest inventory system. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Wężyk P. 2006. Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego LIDAR w leśnictwie. III Krajowa Konferencja „System Informacji Przestrzennej w Lasach Państwowych”, Rogów (tekst opublikowany na CD).
- Wężyk P., Tompalski P., Szostak M., Glista M., Pierzechalski M. 2008. Describing the selected canopy layer parameters of the Scots pine stands using ALS data. 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. *SilviLaser* 2008. Edinburgh, UK. 636-645.
- Yu X., Hyypä J., Hyypä H., Maltamo M. 2004. Effects of flight altitude on tree height estimation using airborne laser scanning. "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Zawiła-Niedźwiecki T., Stereńczak K., Bałazy R., Węcel A., Strzelinski P., Zasada M. 2008. The use of terrestrial and airborne lidar technology in forest inventory. *Ambiencja* 4: 57-68.

SUMMARY

Airborne Laser Scanner technology as a source of data for semi-automatic forest inventory

Airborne Laser Scanner (ALS) becomes a new tool acquiring very accurate data about forest environment. It is able to collect hundreds of thousand of measure points per square kilometer

as well as aerial images in the same time. Basing on this data new methods of forest parameter extraction become available.

LIDAR technology is very complicated and needs long time of development and investigations. After first system development in 1993, many others were set up. Nowadays we have large companies working in this field and permanently a lot of improvements are being carried out. There are a lot of new fields of interests in this technology, so we can presume that it will become more and more advanced in very short future.

Experience from different LIDAR projects in forestry carried out around the world to improve the quality of results from automatic methods and their level of correlation to field measurements are very fruitful. The other promising aspect is that data becomes cheaper each year, which make them more attractive to apply.

Polish experiences with the use of LIDAR technology are relatively small. Everything started in 2004 with research investigation and projects plans. In 2005 first LIDAR project was established at the Forestry Faculty in Warsaw. In last four years more than tree projects were finished and a lot of experience was obtained. Polish results in many cases overlap these acquired abroad, which is good argument of objectiveness in using LIDAR systems. It allows presuming that in the future LIDAR can become an important tool in semi-automatic method of forest inventory.