

SKANOWANIE LASEROWE JAKO ŹRÓDŁO INFORMACJI PRZESTRZENNYCH DOTYCZĄCYCH LASÓW¹

LASER SCANNING AS A SOURCE OF SPATIAL DATA FOR FORESTRY

Krzysztof Będkowski¹, Sławomir Mikrut²

¹ Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa,
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

² Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej,
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: skanowanie laserowe, leśnictwo, inwentaryzacja lasów

STRESZCZENIE: Skanowanie laserowe jest niezwykle dynamicznie rozwijającą się techniką pomiaru terenu i obiektów terenowych. Zapewnia dużą dokładność sytuacyjną i wysokościową uzyskiwanych danych przestrzennych, w mniejszym stopniu jest uzależniona od warunków atmosferycznych niż inne techniki fotogrametrii i teledetekcji. Dzięki znacznemu zautomatyzowaniu procesów pozyskania danych i ich przetwarzania, pozwala na wykonywanie opracowań o znacznej szczegółowości dla dużych obszarów. Leśnictwo od dawna poszukuje skutecznych i efektywnych metod inwentaryzacji stanu drzewostanów. Tradycyjnie stosowane metody naziemne są zastępowane przez rozwijające się techniki geomatyczne: fotogrametrię, teledetekcję, GPS i in. Dane pochodzące ze skanowania laserowego mogą być zastosowane w leśnictwie do budowy numerycznych modeli terenu (NMT) i numerycznych modeli pokrycia terenu (NMPT - modeli warstwy koron), które z kolei są źródłem danych do sporządzania opisów taksacyjnych lasów, dotyczących składu gatunkowego, struktury wysokościowej drzewostanów, rozkładu wielkości drzew, zapasu drewna, składu sortymentowego i wielu innych. Artykuł ma charakter przeglądu literatury.

1. WSTĘP

Możliwości, jakie stwarzają techniki fotogrametrii w leśnictwie, dostrzeżono już dawno. Pierwsze zdjęcia fotograficzne dla celów urządzania lasu, aparatem wyniesionym przez balon, wykonano w Niemczech już w 1887 r. (Hildebrandt, 1987). Najwcześniejsze "leśne" zastosowania fotogrametrii są zawiązane z pracami kartograficznymi. Stosunkowo wcześniej zajęto się też problemem określania zapasu drzewostanów (miąższości drewna). Prace z tego zakresu wykonywali w latach 20-tych ubiegłego stulecia leśnicy niemieccy – Zieger i Jacobs (Wodera, 1948) oraz Hugershoff (1933).

¹ Praca została sfinansowana ze środków na naukę w latach 2005-2007, jako projekt badawczy 2 P06L 02 229 „Zastosowanie lotniczego i naziemnego skanowania laserowego w analizie struktury przestrzennej i funkcjonowania lasów w krajobrazie”.

Poważną przeszkodą, utrudniającą szerokie stosowanie fotogrametrii w pomiarach przestrzeni leśnej, była zawsze wielkość zbiorów danych, których opracowanie wymagało dużego nakładu pracy. Współcześnie powstało lub zostało rozwiniętych kilka nowych technik, które w powiązaniu z funkcjonalnością systemów informacji przestrzennej, wprowadzają nową jakość do sposobów pozyskiwania i przetwarzania informacji o lesie: (1) radar, (2) interferometria, (3) skanowanie laserowe, (4) korelacja obrazów. Rozwój tych technik i metod jest silnie uzależniony od postępów informatyki. Szczególnie bardzo obiecującymi są skanowanie laserowe oraz korelacja obrazów.

2. SKANOWANIE LASEROWE W LEŚNICTWIE

Skanowanie laserowe na potrzeby leśnictwa wykonywane jest z pułapu lotniczego i satelitarne, stosowane są także pomiary naziemne. W niniejszej pracy koncentrujemy się wyłącznie na zagadnieniach dotyczących wykorzystania na potrzeby leśnictwa informacji uzyskiwanych poprzez skanowanie z pułapu lotniczego.

Pierwsze badania, dotyczące lotniczego skanowania laserowego w leśnictwie i analizach krajobrazu, wykonano w połowie lat 90-tych ubiegłego wieku. Głównym obszarem zainteresowania było wówczas zbieranie danych do budowy numerycznego modelu terenu (NMT) pod okapem drzewostanu (Kraus *et al.*, 1997; Kraus, Pfeifer, 1998), określania wysokości pojedynczych drzew i drzewostanów oraz zapasu drzewostanów (Hyypä, Inkinen, 1999). Niektórzy autorzy, początki skanowania laserowego umieszczają jeszcze wcześniej, bo ma przełomie lat 70-tych i 80-tych. Wymienia się m. in. prace dotyczące określania wielkości biomasy, realizowane w ówczesnym ZSRR przez Solodukhina (Danilin, Medvedev, 2004). Wraz z rozwojem tej techniki, pojawiły się próby klasyfikowania treści obrazów skanerowych - identyfikowania zarejestrowanych obiektów, w tym pojedynczych drzew, określania przynależności gatunkowej, a także automatyzacji procesu interpolacji numerycznych modeli warstwy koron (NMWK). Współcześnie coraz częściej łączone są dane ze skanowania z obrazami cyfrowymi, lub zamienionymi na postać cyfrową lotniczymi zdjęciami spektrostrefowymi (CIR), wielospektralnymi (MS) oraz obrazami satelitarnymi (Buddenbaum i Seeling, 2006; Lucas *et al.*, 2006; Wack, 2006).

2.1. Filtrowanie danych skanerowych

Przy analizie danych dotyczących terenów leśnych, należy brać pod uwagę zjawisko częściowego odbijania się impulsów laserowych od fragmentów drzew (koron, konarów, pni), niżej położonych krzewów oraz roślin dna lasu. Powierzchnia, interpolowana na podstawie pierwszych powracających impulsów (*first pulse*) przebiega miejscami po koronach drzew, na pewnej wysokości nad terenem (roślinność zielna, niskie krzewy), lub na poziomie terenu. Uzyskiwane wyniki zależą od gęstości pokrywy roślinnej oraz jej zmienności w okresie wegetacyjnym. Możliwość zarejestrowania kształtu pojedynczych drzew i krzewów zależy od gęstości punktów pomiarowych. Jak wykazano, najlepsze dane skanowania laserowego zbierane dla budowy NMT uzyskuje się w okresie zimowym, natomiast do budowy NMWK – latem.

Podstawowym problemem związanym ze skanowaniem obszarów pokrytych roślinnością jest opracowanie sposobu odróżniania impulsów odbitych od roślin, od impulsów odbijanych przez powierzchnię terenu. Zagadnienie to ma znaczenie praktyczne - pierwotnie związane było z zadaniem budowy NMT obszarów pokrytych roślinnością. Opracowywane algorytmy filtracji mają na celu uzyskanie danych dotyczących wyłącznie punktów lub powierzchni związanych z terenem. Pozostałe punkty są traktowane jako zakłócenia. Sygnały pochodzące z odbić od dna lasu mogą być wykorzystane do modelowania bardzo dokładnego NMT, na którego podstawie będzie możliwe badanie np. śladów dawnego rolniczego zagospodarowania terenu (Sittler, 2004). Wskazuje się na konieczność dostosowywania filtrów do rodzaju pokrywy roślinnej (Pfeifer, 2003; Wagner *et al.*, 2004). W leśnictwie „zakłócenia” przenoszą ważne informacje o pionowej strukturze drzewostanów. Filtracja może być realizowana za pomocą różnych algorytmów, o różnym stopniu złożoności. Stosowane metody omówił np. obszernie Pfeifer (2003). Szczególną uwagę zwrócił na trzy algorytmy: progresywnego zagęszczania modelu TIN, filtracji morfologicznej oraz szybkiej interpolacji. Rozwój w tym zakresie jest duży - algorytmy szybkiej filtracji hierarchicznej są implementowane w komercyjnym oprogramowaniu, jak np. w znanym pakiecie SCOP++ - produkcie firmy Inpho GmbH (Niemcy) oraz Politechniki Wiedeńskiej (Wagner *et al.* 2004). Opisy metod filtracji podają także Kraus (2004), Weinacker *et al.* (2004a).

2.2. Skanowanie laserowe w zastosowaniu do określania wielkości biomasy

Skanowanie laserowe jest dobrym środkiem do określania wielkości biomasy roślin. Najpierw wykorzystywano do tego celu metodę profili laserowych (promień skanujący bez możliwości odchylenia), następnie współczesne skanery, z wiązką wychylaną prostopadle do kierunku lotu. Analizy oparte są na wynikach rejestracji czasu upływającego od momentu wysłania sygnału do powrotu sygnałów odbitych lub ocenie formy, mocy i innych cech całego powracającego sygnału (Næsset, 2004; Ducic *et al.*, 2006; Reitberger *et al.*, 2006).

Pierwsze badania wykazały, że takie wielkości biofizyczne, jak objętość (miąższość) pni drzew oraz pierśnicowe pole przekroju drzewostanów², są określane znacznie dokładniej dla gatunków iglastych, niż liściastych. Zainteresowanie wzbudza także wielkość biomasy znajdującej się pod powierzchnią gruntu. Te wielkości można skutecznie określać za pomocą modeli, które uwzględniają szereg wielkości dostępnych do pomiaru na powierzchni – pierśnicę (średnicę pni na wys. 1.30 m) lub pierśnicę i wysokość. Stwierdzono także, że opracowane modele szacowania ogólnej wielkości biomasy dawały dobre rezultaty, niezależnie od typu drzewostanu – tj. składu gatunkowego, wieku itp. Wyniki określania wielkości biomasy pni drzew były jednak gorsze. Næsset (2004) wyciąga z tego wniosek, że za pomocą zastosowanej metody pozyskiwania i opracowywania wyników skanowania, nie można rozpoznawać typów drzewostanów, co mogłoby mieć duże znaczenie dla leśnictwa. Z innych badań wynika, że dobre modele określania wielkości biomasy można zbudować na podstawie danych skanowania laserowego także dla drzewostanów klonu cukrowego (Lim, Treetz, 2004), modrzewia

² Powierzchnia przekroju wszystkich drzew, określona na wysokości 1.30 m.

syberyjskiego, świerka, sosny – z domieszką brzozy (Danilin, Medvedev, 2004). Zrealizowano także badania (Maltamo *et al.*, 2004), które wykazały, że tą drogą można uzyskać także informacje o niższych piętrach drzewostanu.

Inny nurt badań dotyczy określania wielkości wskaźnika powierzchni liści - *leaf area index*, LAI (Barilotti *et al.*, 2006 i in.). Jak wykazano doświadczalnie (Hagiwara *et al.*, 2004) można oczekiwać, że w drzewostanach o niskiej wartości LAI, wskaźnik ten może być określany skutecznie za pomocą porównania sygnałów odbitych od dna lasu z pozostałymi echemi. Niestety, w drzewostanach o dużej wielkości wskaźnika LAI należy liczyć się z trudnościami w uzyskaniu odbicia od dna lasu, gdyż impulsy laserowe mogą tam nie docierać.

2.3. Określanie cech taksacyjnych drzewostanów

Leśnicy zainteresowani są przede wszystkim sposobami określania wielkości charakteryzujących drzewostany, które są istotne z punktu widzenia opisu ich rozwoju (dla planowania czynności hodowlanych) oraz wielkości zapasu (ilości drewna). Do najważniejszych cech, opisujących drzewostany należą: skład gatunkowy, wysokość (pojedynczych drzew i średnia wysokość drzewostanu), pierśnica (pojedynczych drzew i średnia pierśnica drzewostanu), pierśnicowe pole przekroju drzewostanu, forma mieszaniny, zwarcie, liczba drzew, oraz wielkości pochodne – np. zapas drzewostanu.

W ramach międzynarodowego projektu HIGH-SCAN przeprowadzono badania przydatności skanowania laserowego, do pozyskiwania informacji na takim poziomie szczegółowości, który pozwalał rejestrować korony pojedynczych drzew (Ziegler, Schardt, Konrad 2000; Hyypä *et al.*, 2001), a na ich podstawie - wielkości charakteryzujących drzewostany: zapasu, składu gatunkowego, średniej wysokości drzew, zwarcia drzewostanu, pierśnicowego pola przekroju, struktury klas wieku, typu gleby, powierzchni koron drzew, granic drzewostanów. Stwierdzono, że odsetek poprawnie wyróżnionych koron - świerków, modrzewi oraz 7 innych gatunków drzew iglastych - wynosi 40÷50%. Pozostałych drzew nie rozpoznano, gdyż ich korony zlewały się z innymi lub zostały pominięte. Stwierdzono także, że powierzchnia rzutów koron drzew (świerk), wyznaczona w procesie segmentacji, jest zawyżana w stosunku do powierzchni rzeczywistej. Poszczególne charakterystyki drzewostanu były obarczone błędami wynoszącymi: 2.30 m (błąd średni średniej wysokości drzewostanu), 1.90 m²ha⁻¹ (błąd średni pierśnicowego pola przekroju), 16.50 m³ha⁻¹ (błąd średni zapasu). Suma miąższości pojedynczych drzew, w porównaniu z miąższością określoną na podstawie pomiarów terenowych, była natomiast niższa od rzeczywistej o ok. 3.30%. Badania dotyczyły wyłącznie gatunków iglastych. Przy analizach wyników dotyczących drzewostanów liściastych lub mieszanych należy się spodziewać znacznie większych trudności przy segmentacji koron, rozpoznawaniu poszczególnych gatunków oraz mniejszej dokładności wyznaczania charakterystyk drzewostanów.

Hyypä H. oraz Hyypä J. (1999) porównywali wyniki inwentaryzacji drzewostanów (54% świerk, 29% sosna, 17% brzoza), uzyskane za pomocą skanowania laserowego (skaner TopoSys-1), z danymi innych technik teledetekcyjnych (obrazy Landsat, SPOT Pan oraz XS, spektrometr lotniczy AISA) i inwentaryzacji naziemnej. Do analizy wzięto 41

drzewostanów o przeciętnej powierzchni 1.21 ha. Uwagę skoncentrowano na określaniu zapasu drzewostanów oraz przeciętnej wysokości. Przy wykorzystaniu danych skanowania laserowego błąd standardowy średniej wysokości drzewostanu wyniósł 12.90%, natomiast miąższości – 13.51%. Za pomocą innych technik uzyskano gorsze rezultaty, największe błędy stwierdzono w przypadku korzystania ze zdjęć SPOT Pan (błąd standardowy wyniósł odpowiednio 33.70% oraz 49.64%). Wykazano, że jedynie skanowanie mogło dostarczyć danych na poziomie dokładności odpowiadającym inwentaryzacji naziemnej. Po uwzględnieniu (odrzuconiu) błędów standardowych terenowych danych porównawczych, błędy standardowe określenia miąższości wyniosły $23.60 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ (13.50%), natomiast wysokości – 2.20 m (12.90%).

Te same drzewostany, lecz na poziomie pojedynczych drzew, analizowali Hyypä oraz Inkinen (1999). Założono siatkę ($100 \times 100 \text{ m}$) powierzchni próbnych. Wyznaczono pierśnicę, wysokość oraz położenie drzew, a dla części drzew także stosunek pola rzutu korony do miąższości pnia. Zbudowane trójwymiarowe modele drzewostanów umożliwiają wykonywanie pomiarów poszczególnych drzew. Wykazano, że wysokość indywidualnych drzew może być określona z dokładnością do $\pm 1 \text{ m}$. Inne wielkości, dotyczące drzewostanów, jak przeciętna wysokość, pierśnicowe pole przekroju oraz zapas, wyznaczono z błędami średnimi wynoszącymi odpowiednio 2.30 m (13.60%), $1.90 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ (9.60%) oraz $16.50 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ (9.50%). Uzyskane wyniki były lepsze od wyników konwencjonalnych metod naziemnych. Po raz pierwszy wykazano, że dane skanowania można wykorzystać do inwentaryzacji pojedynczych drzew w lasach borealnych i wyznaczenia na tej podstawie cech taksacyjnych całych drzewostanów.

Trójwymiarowy model drzewostanu sosnowo-świerkowo-brzozowego, rosnącego na powierzchni $120 \times 120 \text{ m}$, zbudował Pyysalo (1999). Wykorzystano wyniki pomiarów laserowych o bardzo dużej gęstości punktów – średnio 20 szt. m^2 . Analizowano impulsy odbite od warstwy koron oraz od terenu. Wyznaczono zasięg trzech powierzchni – numerycznego modelu terenu (NMT) oraz dwóch powierzchni zamykających od dołu i od góry warstwę koron. Przeprowadzono segmentację najwyższej warstwy, w celu określenia zasięgu poszczególnych koron – użyto do tego celu znanego w systemach informacji przestrzennej algorytmu, służącego do analizy zlewni (*watershed algorithm*). Na podstawie danych dotyczących indywidualnych drzew określono: wysokość pojedynczych drzew, wysokość warstwy koron, objętość przestrzeni koron oraz powierzchnię pionowych rzutów koron (na różnych poziomach wysokości). Dokładność uzyskanych wyników, które porównano z danymi terenowymi, była wysoka – błąd średni wysokości drzewa wyniósł 1.50 m, natomiast błąd średni wysokości dolnej granicy warstwy koron – 2.50 m. W uzyskanym modelu występowały nieliczne błędy, wynikające np. ze wzajemnego przesłaniania się koron, niewłaściwej segmentacji koron przez zastosowany algorytm. Także, z uwagi na zastosowany algorytm, nie było możliwości wyróżnienia drzew rosnących pod innymi drzewami – w danym oczku siatki modelu mogły występować tylko trzy rzędne – terenu oraz dolnej i górnej krawędzi warstwy koron. Autor uważa, że zastosowana metoda powinna dawać dużo lepsze rezultaty w obszarach o mniejszym zwarciu.

Holmgren i Jonsson (2004) wykorzystali różnorodne wielkości opisujące warstwę koron, wyprowadzone na podstawie danych skanowania laserowego, do opracowania równań regresji, w których zmiennymi zależnymi były średnia wysokość drzewostanu,

średnia pierśnica, pierśnicowe pole przekroju, miąższość grubizny – oddzielnie dla sosny, świerka i drzew liściastych. Błąd RMSE na poziomie drzewostanu wyniósł 0.80m (5.00%) – dla średniej wysokości drzewostanu, 1.90 cm (8.90%) - dla przeciętnej pierśnicy, 3.00 m²ha⁻¹ (12.50%) dla pierśnicowego pola przekroju oraz 28.00 m³h⁻¹ (14.10%) dla miąższości grubizny.

Na terenie Bawarskiego Parku Narodowego testowano przydatność algorytmu, który stosowano pierwotnie w lasach szwedzkich (Heurich *et al.*, 2004a). Algorytm określa pozycję, wysokość oraz średnicę koron indywidualnych drzew. Badania prowadzono w drzewostanach regla górnego (świerk, częściowo jarząb), lasów mieszanych (świerk, jodła, buk, klon) oraz w strefie innych wybranych drzewostanów świerkowych (świerk z domieszką jarzębiny i brzozy). Algorytm rozpoznał w poszczególnych strefach odpowiednio 67.90%, 5.90% i 2.50% drzew (44.20% dla trzech stref razem). Miąższość drzewostanów określono na poziomie 85.20% miąższości zarejestrowanej metodami naziemnymi. Stwierdzono istnienie silnych związków pomiędzy wysokością drzew określoną naziemnie i ze skanowania – błąd RMSE wyniósł 1.40 m dla wszystkich drzew, 1.37 m dla drzew iglastych oraz 1.41 m dla drzew liściastych. Średnicę koron określono z błędem RMSE równym 0.93 m, przy czym dokładniejsze były wyniki dla drzew iglastych (RMSE = 0.53 m), niż dla liściastych (RMSE = 0.94 m).

Niewiele można znaleźć doniesień na temat określania za pomocą danych ze skanowania przyrostu drzew i drzewostanów. Przyczyny leżą raczej w fakcie, że w tej stosunkowo młodej technice pomiarowej nie założono jeszcze odpowiednich doświadczeń. Gobakken i Næsset (2004) wskazują na (pierwsze im znane) wyniki badań opublikowanych w 2004 r. przez Yu i in. Z własnych badań wskazują, że zauważalne są różnice wyników skanowania drzewostanów wykonywanego w odstępie 2-lat.

Podsumowując można stwierdzić, że społeczność naukowa jest zainteresowana głównie określaniem wysokości drzew i drzewostanów, ponieważ jest to jedna z najważniejszych charakterystyk, związanych korelacyjnie z innymi wielkościami opisującymi drzewostany. Pomiar wysokościowe na obszarach leśnych, wykonywane za pomocą skanowania, obarczone są błędami o charakterze podobnym do błędów wyników uzyskiwanych za pomocą klasycznych pomiarów fotogrametrycznych – rzędne terenu są zawyżane, natomiast rzędne wierzchołków drzew są zaniżane. Wyniki takie uzyskiwano również ze skanowania naziemnego (Chasmer *et al.*, 2004). Bardzo duże znaczenie praktyczne ma możliwość wykorzystania skanowania do bezpośredniego określania zapasu drzewostanów. To zastosowanie będzie miało w przyszłości niewątpliwie duży wpływ na kształtowanie się metod inwentaryzacji lasów - także w Polsce.

2.4. Wpływ parametrów technicznych skanowania na uzyskiwane wyniki

Oceniano wpływ takich parametrów technicznych procesu skanowania, na uzyskiwane wyniki, jak wysokość lotu, średnica wiązki (plamki) lasera, gęstość próbkowania, kąt padania wiązki laserowej na badane obiekty. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem wysokości lotu spadała dokładność określenia wysokości drzew i ich liczby. Większe znaczenie dla dokładności określenia wysokości drzew miała gęstość próbkowania, niż wielkość plamki. Wyniki uzyskiwane dla poszczególnych gatunków

drzew zmieniały się w miarę zwiększania wysokości w różnym stopniu, np. wyniki dla brzozy były bardziej „stabilne” od wyników dla gatunków iglastych – świerka i sosny (Yu *et al.*, 2004; Hirata, 2004).

Z badań skandynawskich (Olsson, 2004) wynika, że liczba impulsów na jednostkę powierzchni nie wpływała znacznie na wyniki, zarówno przy inwentaryzacji wykonywanej w oparciu o sieć powierzchni próbnych, jak i z pomiarem całych drzewostanów. Redukcja liczby punktów z 4.30 szt.m⁻² do 0.10 szt.m⁻² zwiększyła błąd miąższości grubizny drzewostanu z 19% do 21%. Hirata (2004) badał znaczenie wielkości plamki lasera (mierzonej na poziomie terenu) oraz gęstości próbkowania, na dokładność rozróżniania pojedynczych drzew. Stwierdził, że wielkości te decydują w istotny sposób o uzyskiwanych wynikach i powinny być ustalane każdorazowo, w zależności od konkretnych warunków przyrodniczych i terenowych. Omówił mechanizm powstawania błędów laserowego określania wysokości drzew na obszarach górskich.

Zagadnienie wpływu roślinności na wyniki pomiarów laserowych omawiają obszernie Pfeifer *et al.*, 2004. W pracy tej podano także sugestie dotyczące poprawiania uzyskiwanych wyników. Stwierdzono, że rzędne terenu są zawyżane od 5 cm (przy pokrywie trawiastej) do 17 cm (stare drzewostany). Poprawę jakości wyników można uzyskać na podstawie analizy kształtu chmury punktów odbijanych przez obiekty, który jest odbiciem struktury przestrzennej obiektów. Autorzy nie mogli jednak autorytatywnie potwierdzić tych spostrzeżeń.

Zwiększanie się systematycznego błędu wysokości drzewostanu wraz ze wzrostem wysokości lotu potwierdzono w badaniach na terenie Szwajcarskiego Parku Narodowego (Morsdorf *et al.*, 2006). Zauważono także, że przy określaniu wskaźnika LAI, większe znaczenie ma kąt, pod jakim jest wysyłana wiązka wychodząca ze skanera, od lokalnego kąta padania wiązki na obiekt.

2.5. Delimitacja drzewostanów i pojedynczych drzew

Drzewostan jest podstawową jednostką przestrzenną, która jest w leśnictwie przedmiotem oddzielnego traktowania hodowlanego. Granice drzewostanów są wyznaczane w trakcie pracochłonnych prac terenowych, rzadziej używa się do tego celu zdjęć lotniczych. Delimitacja zasięgu poszczególnych koron drzew ma w leśnictwie bardzo duże znaczenie. Wielkość korony pozostaje w związku z innymi cechami drzewa, np. wiekiem, wysokością, wielkością masy drzewna itp. Struktura wielkości i rozmieszczenie drzew w lesie stanowią przesłanki do określania cech drzewostanów, w tym jego zapasu (miąższości drewna).

Algorytmów służących do automatycznego wykrywania pojedynczych drzew i zasięgu ich koron poszukiwano już od dawna. Stosowano w tym celu numeryczne analizy tekstury obrazów. Zagadnienie to można znaleźć w wielu pracach (Koch *et al.*, 2006; Persson *et al.*, 2006; St-Onge *et al.*, 2006; Thies *et al.*, 2006; Straub *et al.*, 2006 i in.) Friedlaender (2002) dokonał adaptacji oryginalnej metody, którą stosowano pierwotnie do automatycznego rozpoznawania naczyń na obrazach przekrojów pni drzew. Uzyskane rezultaty nie były jednak zadowalające. Opracowane później algorytmy automatycznej delimitacji koron (Weinacker *et al.*, 2004a), pozwoliły na osiągnięcie lub nawet

przewyższenie dokładności uzyskiwanej z bezpośrednich pomiarów fotogrametrycznych. Tiede i Hoffmann (2006) zastosowali algorytmy tzw. analizy obiektowej. Trzy metody delimitacji koron badali Pitkänen *et al.* (2004): zastosowane algorytmy adaptacyjne uwzględniały przy detekcji i określaniu zasięgu koron parametry dostępne z pomiaru laserowego – wysokość drzewa oraz wysokość okapu drzewostanu (tj. warstwy koron). Również Heurich i Weinacker (2004) uwzględniali wysokość drzew jako wstępną informację niezbędną do rozdzielenia drzewostanu na dwie strefy – drzew wysokich i niskich. Następnie w każdej strefie zastosowano gaussowski algorytm uśredniania, lecz o różnej mocy. „Mocniej” uśredniano strefę drzew wysokich. Następnie złączono utworzone warstwy i zastosowano algorytm wyszukiujący lokalne maksima. Dodatkowe dane dotyczące spodziewanego rozkładu drzew w drzewostanach oraz rozkładu tekstury obrazów samych koron użyto do delimitacji zasięgów koron drzew. Inne automatyczne algorytmy interpolacyjne – oznaczone jako ISAE oraz RSG - testowali Schardt *et al.* (2004). Stwierdzili, że można je wykorzystać do oceny wysokości drzewostanów, natomiast błędy określenia wysokości pojedynczych drzew są zbyt wysokie. Zauważono także, że model terenu dostarczany przez krajowe instytucje geodezyjne (Austria) ma zbyt małą dokładność dla prowadzonych badań. Z tego powodu należy budować własne modele terenu.

3. ZAKOŃCZENIE

Technika lotniczego skanowania laserowego ma duży potencjał, jako metoda zbierania informacji o drzewostanach i warstwie koron w szczególności. Fińskie doświadczenia nie mogą być jednakże bezpośrednio przenoszone do warunków środkowoeuropejskich. Odmienny jest charakter naszych lasów pod względem składu gatunkowego, a szczególnie zwarcia. Duży jest także jeszcze koszt wykonania tą techniką inwentaryzacji oraz opracowania uzyskanych wyników. Badania wykonane za pomocą techniki skanowania laserowego udowodniły jednakże ostatecznie, że informacje uzyskiwane poprzez analizę warstwy koron, mogą być z powodzeniem wykorzystywane do pozyskiwania danych o cechach taksacyjnych drzewostanów i inwentaryzacji zapasu drewna. Dalszemu rozwojowi tej techniki sprzyjać będą wysoki stopień automatyzacji pozyskiwania danych oraz ich numeryczna postać.

4. LITERATURA

Barilotti A., Turco S., Alberti G., 2006. LAI determination in Forestry Ecosystem by LIDAR Data Analysis. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s. 248-252.

Buddenbaum H., Seeling S., 2006. Estimating Structural Forest Attributes Using High Resolution, Airborne Hyperspectral and LIDAR Imagery. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s. 253-257.

Chasmer L., Hopkinson C., Treitz P., 2003. Assessing the Three-Dimensional Frequency Distribution of Airborne and Ground-Based LIDAR Data for Red Pine and Mixed Deciduous Forest Plots. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 66-70.

Danilin I.M., Medvedev E.M., 2004. Forest Inventory and Biomass Assessment by the Use of Airborne Laser Scanning Method (Example from Siberia). *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 139-144.

Ducic V., Hollaus M., Ullrich A., Wagner W., Melzer T., 2006. 3D Vegetation Mapping and Classification using Full-Waveform Laser Scanning. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s. 211-217.

Friedlaender H., 2002. Die Anwendung von flugzeuggetragenen Laserscannerdaten zur Ansprache dreidimensionaler Strukturelemente von Waldbeständen. Eine Pilotstudie an ausgewählten Beständen des Hochschwarzwaldes und der Oberrheinebene. Dissertation, Universität Freiburg im Breisgau.

Gobakken T., Næsset E., 2004. Effects of Forest Growth on Laser Derived Canopy Metrics. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 224-225.

Hagiwara A., Imanishi J., Hashimoto H., Morimoto Y., 2004. Estimating Leaf Area Index in Mixed Forest Using Airborne Laser Scanner. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 298-300.

Heurich M., Persson A., Holmgren J., Kennel E., 2004a. Detecting and Measuring Individual Trees with Laser Scanning in Mixed Mountain Forest of Central Europe Using an Algorithm Developed for Swedish Boreal Forests Conditions. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 307-312.

Heurich M., Weinacker H., 2004. Automated Tree Detection And Measurement in Temperate Forests of Central Europe Using Laserscanning Data. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 198-203.

Hildebrandt G., 1987. 100 Jahre forstliche Luftbildaufnahme – zwei Dokumente aus den Anfängen der forstlichen Luftbildinterpretation. *Bildmessung und Luftbildwesen* 55, s. 221-224.

Hirata Y., 2004. The Effects of Footprint Size and Sampling Density in Airborne Laser Scanning to Extract Individual Trees in Mountainous Terrain. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 102-107.

Holmgren J., Jonsson T., 2004. Large Scale Airborne Laser Scanning of Forest Resources in Sweden. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 157-160.

Hugershoff R., 1933. Die photogrammetrische Vorratsermittlung. *Tharandter Forstl. Jahrbuch* 84, s. 159-166.

Hyypä H., Hyypä J., 1999. Comparing the accuracy of laser scanner with other optical remote sensing data sources for stand attribute retrieval. *The Photogrammetric Journal of Finland*, vol. 16, No. 2, s. 5-15.

- Hyypä J., Inkinen M. (1999): Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland*, vol. 16, No. 2, s. 27-42.
- Hyypä J., Schardt M., Haggrén H., Koch B., Lohr U., Scherrer H.U., Paananen R., Luukkonen H., Ziegler M., Hyypä H., Pyysalo U., Friedländer H., Uuttera J., Wagner S., Inkinen M., Wimmer A., Kukko A., Ahokas E., Karjalainen M., 2001. HIGH-SCAN: The first european-wide attempt to derive single-tree information from laserscanner data. *The Photogrammetric Journal of Finland* vol. 17, No. 2, s. 58-68.
- Koch B., Heyder U., Straub Ch, Weinacker H., 2006. 3D Data for Forest and Environmental Planning. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s. 1-14.
- Kraus K., Hynst E., Belada P., Reiter T., 1997. Topographische Daten in bewaldeten Gebieten - Ein Pilotprojekt mit Laser-Scanner-Daten. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation* 3, s. 174-181.
- Kraus K., Pfeifer N., 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 53(4), s. 193-203.
- Kraus K., 2004. Photogrammetrie. Bd. 1. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Walter de Gruyter., Berlin.
- Lim K.S., Treitz P.M., 2004. Estimation of Aboveground Forest Biomass Using Airborne Scanning Discrete Return LIDAR in Douglas-Fir. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 149-152.
- Lucas R., Lee A., Bunting P., Williams M., 2006. Forest Reconstruction from LIDAR and CASI Data: A Case Study from Australia. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s. 184-188.
- Maltamo M., Packalén P., Yu X., Eerikäinen K., Hyypä J., Pitkänen J., 2004. Identifying and Quantifying Heterogenous Boreal Forest Structures Using Laser Scanner Data. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 153-156.
- Morsdorf F., Frey O., Meier E., Itten K.I, Allgöwer B., 2006. Assessment on the Influence of Flying Height and Scan Angle on Biophysical Vegetation Products Derived from Airborne Laser Scanning. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s. 145-150.
- Næsset E., 2004. Estimation of Above- and Below-Ground Biomass in Boreal Forest Ecosystems. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 145-148.
- Olsson H., 2004. Summary of The SCANDLASER 2003 Workshops and Recent Developments in Sweden. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 133-138.
- Persson A., Holmgren J., Söderman U., 2006. Identification of Tree Species of Individual Trees by Cobining Very High Resolution Laser Data with Multi-Spectral Images. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s. 91-96.
- Pfeifer N., 2003. Oberflächenmodelle aus Laserdaten. *Vermessung & Geoinformation* 91(4), s. 243-252.
- Pitkänen J., Maltamo M., Hyypä J., Yu X., 2004. Adaptive Methods for Individual Tree Detection on Airborne Laser Based Canopy Height Model. *Proc. of the ISPRS working*

group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment", Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 187-191.

Pyysalo U., 1999. A method to create a three-dimensional forest model from laser scanner data. *The Photogrammetric Journal of Finland*, vol. 17, No. 1, s. 34-42.

Reitberger J., Krzystek P., Heurich M., 2006. Full-Waveform Analysis of Small Footprint Airborne Laser Scanning Data in The Bavarian Forest National Park for Tree Species Classification. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s.218-227.

Schardt M., Hruby W., Hirschmugl M., Wack R., Franke M., 2004. Comparison of Aerial Photographs and Laser Scanning Data as Methods for Obtaining 3D Forest Stand Parameters. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 272-276.

Sittler B., 2004. Revealing Historical Landscapes by Using Airborne Laser Scanning. A 3D Modell of Ridge and Furrow in Forests near Rastatt (Germany). *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 258-261.

St-Onge B., Hu Y., Véga C., 2006. Reconstruction of Forest Canopy Height Using Stereo-IKONOS Panchromatic Images and a Lidar DTM. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s. 97-102.

Straub Ch., Weinacker H., Diederhagen O., Koch B., 2006. Standwise Delineation Based on 3-D Information from LIDAR. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s. 243-247.

Thies M., Weinacker H., Weinacker R., Pfeifer N., 2006. Predicting Forest Growth Processes by Using Laserscanner Derived Stand Models and Simulating Sun Ecliptic. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s. 135-140.

Tiede D., Hoffmann Ch., 2006. Process Oriented Object-Based Algorithms for Single Tree Detection Using Laser Scanning. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s. 151-156.

Wack R., 2006. Combined Use of Satellite Imagery and Laserscanner Data for the Assessment of Forest Stand Parameters. *Int. Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*, Vienna, Austria, s. 375-379.

Wagner W., Eberhöfer C., Hollaus M., Summer G., 2004. Robust Filtering of Airborne Laser Scanner Data for Vegetation Analysis. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 56-61.

Weinacker H., Koch B., Heyder U., Weinacker R., 2004a. Development of Filtering, Segmentation and Modelling Modules for LIDAR and Multispectral Data as a Fundament of an Automatic Forest Inventory System. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 50-55.

Wodera H., 1948. Die Holzmassenermittlung nach Luftbildern. *Allgemeine Forst- und Holzwirtschaftliche Zeitung* 59, s. 109-112, 123-126.

Ziegler M., Schardt M., Konrad H., 2000. Einsatzmöglichkeiten von Laserscannerdaten für die Forstinventur – Laserscanning for forest inventory. Žihlavnik Š., Scheer L. (ed.) Application of Remote Sensing in Forestry, Zvolen.

Yu X., Hyypä J., Hyypä H., Maltamo M., 2004. Effects of Flight Altitude on Tree Height Estimation Using Airborne Laser Scanning. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI*, part 8/W2, s. 96-101.

LASER SCANNING AS A SOURCE OF SPATIAL DATA FOR FORESTRY

KEY WORDS: laser scanning, forestry, stock-taking of forest

Summary

Laser scanning is a technique of measurement of terrain and terrain objects that develops in an extremely dynamic way. It ensures high situational and altitude exactness of the received spatial data, and to a lower degree is dependent on atmospheric conditions, as compared to other photogrammetry and remote sensing techniques. Owing to substantial automating of processes of data acquisition and processing, it allows to execute studies with considerable detail on large areas.

Since a long time, the forestry has sought efficient and effective methods of treestand stock-taking. Traditional practical ground methods are replaced by developing geomatic techniques: photogrammetry, remote sensing, GPS and other ones.

Data originating from laser scanning can be applied in forestry to build digital terrain models (DTM) and digital surface models (DSM – digital surface Models), which, in turn, are the sources of data to prepare the forest survey descriptions relating to species composition, height structure of treestands, distribution of tree sizes, supply of timber, assortment composition and many others.

The paper is a review of literature.

Dane autorów:

Dr inż. Krzysztof Będkowski
e-mail: Krzysztof.Bedkowski@wl.sggw.pl
telefon: (22) 593 82 22
fax: -

Dr inż. Sławomir Mikrut
e-mail: smikrut@agh.edu.pl
telefon: (12) 617 23 02
fax: (012) 633 17 91