

KRZYSZTOF STEREŃCZAK, KRZYSZTOF BĘDKOWSKI

Wykorzystanie numerycznego modelu terenu i modelu pokrycia terenu do klasyfikacji drzewostanów na podstawie ich struktury pionowej i gatunkowej*

Using digital terrain model and digital surface model for stands classification basing on their species and vertical structure

ABSTRACT

Stereńczak K., Będkowski K. 2011. Wykorzystanie numerycznego modelu terenu i modelu pokrycia terenu do klasyfikacji drzewostanów na podstawie ich struktury pionowej i gatunkowej. Sylwan 155 (4): 219-227.

Aim of the presented study was to use DTM, DSM and CHM, generated from LIDAR data acquired in two year seasons, for forest species composition and structure analysis. Study was carried out in Głuchów Forest District (central Poland). Obtained results proved that using a DSM and DTM or DSM, DTM and CHM classification enables to reach 71-79 % of accuracy in forest stands classification.

KEY WORDS

Digital Terrain Model, Digital Surface Model, Airborne Laser Scanning, stand structure

ADDRESSES

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

Krzysztof Będkowski – e-mail: krzysztof.bedkowski@wl.sggw.pl

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

Wstęp

Struktura pionowa lasów jest ważnym czynnikiem, mającym znaczny wpływ na warunki ich rozwoju. Informacje dotyczące poszczególnych warstw w drzewostanach gromadzi się w trakcie okresowych inwentaryzacji. Zebrane dane są wykorzystywane do szacowania wielkości zasobów (biomasy), a także w procesie planowania różnorodnych czynności pielęgnacyjnych. Obecnie inwentaryzacja wykonywana jest za pomocą pomiarów naziemnych, które z powodu dużej pracochłonności ograniczone są do powierzchni próbnych. Jej wyniki, po opracowaniu statystycznym, są wiarygodne dla dużego kompleksu leśnego, jednak nie zawsze dobrze odzwierciedlają warunki występujące w poszczególnych drzewostanach. Zmienność czynników przyrodniczych oraz efekty działalności gospodarczej sprawiają bowiem, że drzewostany różnią się między sobą. Istnieje także zmienność wewnątrz każdego drzewostanu – między poszczególnymi jego fragmentami mogą występować różnice podstawowych cech, np. wysokości drzew, ich liczby na jednostce powierzchni (zagęszczenia), zwarcia, form zmieszania lub struktury pionowej.

Technika lotniczego skanowania laserowego (LIDAR) umożliwia uzyskiwanie w krótkim czasie danych dotyczących dużych obszarów i z tego powodu znalazła się w sferze zaintereso-

* Niniejsza praca była finansowana ze środków przeznaczonych na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy N N309 114537 „Las i jego cechy w rastrowym modelu danych przestrzennych”

wania także leśników. Przeprowadzone dotychczas badania wskazują, że za pomocą tej metody można określić wiele cech drzewostanów, istotnych z punktu widzenia potrzeb inwentaryzacyjnych [Naesset, Bjerkres 2001; Lefsky i in. 2002; Holmgren, Persson 2004; Tickle i in. 2006; Będkowski i in. 2008; Będkowski, Stereńczak 2008a; Hyypä i in. 2008; Stereńczak i in. 2008; Wang i in. 2008]. Wysyłane przez lotniczy skaner laserowy (LIDAR) impulsy odbijane są przez warstwę koron najwyższych drzew, tzw. górnego piętra. Jednak pewna ich część przenika w głąb drzewostanu i jest następnie odbijana przez niżej położone warstwy – tzw. drzewostan drugiego piętra, krzewy lub runo leśne [Chasmer i in. 2004; Watt i in. 2004]. Jednym z ważniejszych produktów analizy danych laserowych są numeryczne modele terenu (NMT) i jego pokrycia (NMPT). Dla uzyskiwanych wyników znaczenie ma również stan rozwoju roślinności w czasie sezonu wegetacyjnego. Uważa się, że numeryczne modele terenu obszarów zalesionych powinny być budowane na podstawie danych skanowania laserowego wykonanego w okresie bezlistnym lub wczesnowiosennym, gdy promienie laserowe bez większych przeszkód docierają do dna lasu, natomiast modele pokrycia terenu – opisujące warstwę koron drzew – w pełni sezonu wegetacyjnego [Hyypä i in. 2005]. Jak wynika z dotychczasowych badań, również elementy struktury pionowej drzewostanów, tj. warstwowa budowa lasu, znajdują odzwierciedlenie w przestrzennym rozmieszczeniu miejsc odbić impulsów laserowych [Chasmer i in. 2004; Maltamo i in. 2004; Będkowski, Stereńczak 2008b].

Zagadnienie budowy modeli terenu i jego pokrycia dla obszarów leśnych było tematem wielu badań, choć problem ich dokładności w różnych warunkach nadal nie został do końca rozwiązany [Hyypä i in. 2005]. Opracowano wiele algorytmów służących do interpolacji NMT oraz NMPT [Kraus, Pfeifer 1998; Marmol, Jachimski 2004; Sithole, Vosselman 2004], które zostały także zaimplementowane w kilku komercyjnie dostępnych programach. Wykazano m.in., że na dokładność modeli ma wpływ zarówno rodzaj roślinności (gatunki iglaste/liściaste), jak i jej sezonowa zmienność [Hyypä i in. 2005; Stereńczak 2009], a także warunki środowiska, tj. głównie ukształtowanie terenu i rodzaj jego pokrycia, zastosowane algorytmy filtracji chmur punktów LIDAR oraz algorytmy interpolacji. Możliwe jest otrzymanie modeli o dokładności wysokościowej rzędu 20-25 cm. Jest to wynik w zupełności spełniający wymagania związane z pomiarami wysokości drzew i drzewostanów. W bogatej literaturze poświęconej zastosowaniu danych laserowych w analizach środowiska przyrodniczego, autorzy niniejszej pracy nie znaleźli dotychczas doniesień na temat wykorzystania cyfrowych modeli terenu do klasyfikacji drzewostanów na podstawie ich struktury pionowej i gatunkowej.

Teoretyczne relacje NMT–NMPT obszarów leśnych i ich przewidywana zmienność sezonowa

Stwierdzone doświadczalnie różnice między NMT i NMPT, wynikające z warunków środowiska oraz wpływu sezonowej zmienności lasu, mają negatywny wpływ na proces określania wysokości drzewostanów. Te obiektywnie istniejące uwarunkowania można jednakże wykorzystać do uzyskania innego rodzaju informacji o lesie. Autorzy niniejszej pracy postanowili sprawdzić czy możliwe jest wykorzystanie zależności NMT i NMPT do automatyzacji procesu klasyfikacji drzewostanów na podstawie ich struktury pionowej i gatunkowej.

Podstawę analizy stanowi zbudowany na bazie przesłanek z literatury przedmiotu oraz obserwacji własnych, teoretyczny zespół relacji między NMT i NMPT drzewostanów iglastych i liściastych, uwzględniający wpływ sezonu wegetacyjnego oraz budowę pionową drzewostanów.

W przypadku drzewostanów iglastych o strukturze jednowarstwowej NMT zbudowane na podstawie danych skanowania wiosennego i letniego nie różnią się. Obserwowane drobne zmiany

w warstwie runa leśnego (rozwój pokrywy liści) nie wpływają na „podniesienie” rzędnych NMT w okresie letnim. Dodatkowo przyjęto, że drzewa przez cały rok mają podobny garnitur igieł, stąd struktura koron nie zmienia się. Założenie to odnosi się tylko do najmłodszych dwóch garniturów igieł, określających faktyczny zewnętrzny obrys korony. Zatem jeżeli NMT i NMPT są w obu fazach sezonu wegetacyjnego podobne, to także WMK, czyli ich różnice, są podobne. W przypadku iglastych drzewostanów wielowarstwowych rozwój aparatu asymilacyjnego drugiego piętra w okresie letnim (w warunkach polskich jest ono złożone zwykle z gatunków liściastych) wpływa na zatrzymywanie się impulsów laserowych powyżej dna lasu. Do dna lasu impulsy nie docierają w ogóle lub tylko w niewielkiej części. Algorytmy interpolują „letnią” powierzchnię NMT o rzędnych wyższych od rzeczywistych, zatem zachodzi relacja $NMT_1 > NMT_w$. Należy przyjąć podobne jak w przypadku drzewostanów jednowarstwowych założenie dotyczące garnituru igieł. W efekcie zmiany w NMT powodują zmiany w WMK, co odbierane jest jako pozorne zmniejszenie się wysokości drzewostanu.

W jednowarstwowych drzewostanach liściastych zmiany w pierwszej (od góry) warstwie drzewostanu (rozwój liści) wpływają na liczbę impulsów laserowych docierających do dna lasu. Letni NMT budowany jest w oparciu o mniejszą liczbę punktów, które w związku z tym mają mniejsze znaczenie (wagę) dla zastosowanego algorytmu interpolacyjnego. W efekcie NMT_1 daje zawyżone rzędne w stosunku do wartości NMT_w . Dodatkowo rozwój liści w pierwszej warstwie wpływa na NMPT. Korony stają się lepiej „wypełnionymi” bryłami, które „stawiają większy opór” impulsom laserowym, także w rejonie najwyższej położonych drobnych gałązek, które niedostatecznie były „zauważane” przy skanowaniu w okresie bezliśnym ($NMPT_1 > NMPT_w$). W rezultacie wynikowe modele WMK_1 i WMK_w różnią się od siebie. W przypadku drzewostanów wielowarstwowych rozwój liści wpływa na liczbę impulsów LIDAR-owych docierających do dna lasu, co powoduje różnice w NMT. Obecność i rozwój drugiego piętra, które jest złożone głównie z gatunków liściastych, powoduje dodatkowe znaczne jej zmniejszenie, stąd $NMT_1 > NMT_w$. Efekt „ekranizujący” jest większy niż w drzewostanach jednopiętrowych. Zmiany ulistnienia generują różnice w NMPT. Sezonowe zmiany stanu wielowarstwowych drzewostanów liściastych powodują jednocześnie zmiany rzędnych NMT i NMPT. Możliwe są zatem różne warianty relacji: $WMK_1 > WMK_w$, $WMK_1 < WMK_w$ oraz $WMK_1 = WMK_w$.

Do opisu przedstawionych relacji wykorzystano następujące cyfrowe modele terenu: NMT, NMPT i WMK (wysokościowy model koron, $WMK = NMPT - NMT$) [Stereczak 2008]. W zamyśle autorów przedstawione zależności umożliwią klasyfikację drzewostanów na iglaste i liściaste oraz na jednowarstwowe i wielowarstwowe. Istotnym jest, iż porównywane są wartości średnie, obliczone dla pewnych wybranych obszarów lasu, tj. na podstawie dużej liczby oczek rastra.

Materiał i metody

Przedstawione wyżej teoretyczne relacje między NMT, NMPT i WMK wykorzystano do analizy modeli opracowanych dla kilkudziesięciu drzewostanów uroczyska Głuchów stanowiącego część Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie, należącego do Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Uroczysko Głuchów, o powierzchni 967,39 ha, składa się z drzewostanów zróżnicowanych pod względem składu gatunkowego i struktury przestrzennej. Główne gatunki to sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.) oraz dąb bezszypułkowy (*Quercus petraea* Liebl.).

W badaniach wykorzystano wyniki skanowania laserowego wykonanego w dniach 2-3 maja, 9 lipca i 30 sierpnia 2007 roku. Zastosowano skaner laserowy FALCON II firmy TopoSys GmbH

Tabela 1.

Istotność różnic między średnimi wartościami rzędnych wyznaczonych w „wiosennych” i „letnich” wariantach NMT, NMPT oraz WMK badanych grup drzewostanów

Significance of difference between average heights in ‘spring’ and ‘summer’ variants of DTM, DSM and CHM in analysed groups of stands

Model	Drzewostan	Średnia [m]	Odchylenie standardowe [m]	Istotność różnicy
NMT	Iglasty	-0,033	0,339	Tak
	Liściasty i wielogatunkowy	0,170	0,227	Tak
NMPT	Iglasty	0,161	0,195	Tak
	Liściasty i wielogatunkowy	0,363	0,202	Tak
WMK	Iglasty	0,194	0,369	Nie
	Liściasty i wielogatunkowy	0,193	0,243	Nie

o pulsacyjno-włóknistym typie sensora. Długość wysyłanej fali wynosiła 1560 nm, a częstotliwość pulsów – 5 nsec. Skanowania dokonywano z wysokości 700 m z częstotliwością 83 kHz w zakresie 14,3°. Skaner rejestrował pierwsze (FE) i ostatnie (LE) odbicie z ponad 50% poprzecznym pokryciem sąsiadujących szeregów. Średnica plamki skanera wynosiła 0,7 m. Dane w postaci surowej chmury punktów analizowano za pomocą programu TreesVis, dedykowanego do przetwarzania danych dotyczących obszarów leśnych [Weinacker i in. 2004].

Do wygenerowania numerycznego modelu terenu wykorzystano chmury punktów zawierające tylko tzw. ostatnie odbicia, a do wygenerowania numerycznego modelu pokrycia terenu chmury zawierające tzw. pierwsze odbicia. Modele interpolowano w rozdzielczości przestrzennej 1 m, z rzędnymi wysokościami wyrażonymi z zaokrągleniem do 1 cm.

Drzewostany do doświadczenia wybrano na podstawie analizy bazy danych urzędzenia lasu zapisanych w systemie informacji przestrzennych oraz fotointerpretacji barwnych mozaik zdjęć lotniczych uzyskanych z kanałów BGR oraz IR zarejestrowanych w lipcu i sierpniu 2007 roku przez MGGP Aero Sp. z o.o. za pomocą kamery cyfrowej DMC. Zdjęcia miały rozdzielczość przestrzenną 0,15 m. Interpretację przeprowadzono w celu wyboru takich drzewostanów, które są jednorodne pod względem struktury i tekstury ich obrazu, aby zapewnić odpowiednie, stabilne warunki doświadczenia. Granice fragmentów wybranych do analizy poprowadzono w pewnej odległości od faktycznych granic drzewostanów, gdyż w ten sposób można uniknąć wpływu tzw. efektu brzegowego, wynikającego z innego rozwoju drzewostanu w jego wnętrzu i w strefie granicznej. Wydzielono 87 drzewostanów o różnej strukturze i składzie gatunkowym. W oparciu o gatunek główny podzielono je na drzewostany iglaste (48) oraz liściaste i wielogatunkowe (39).

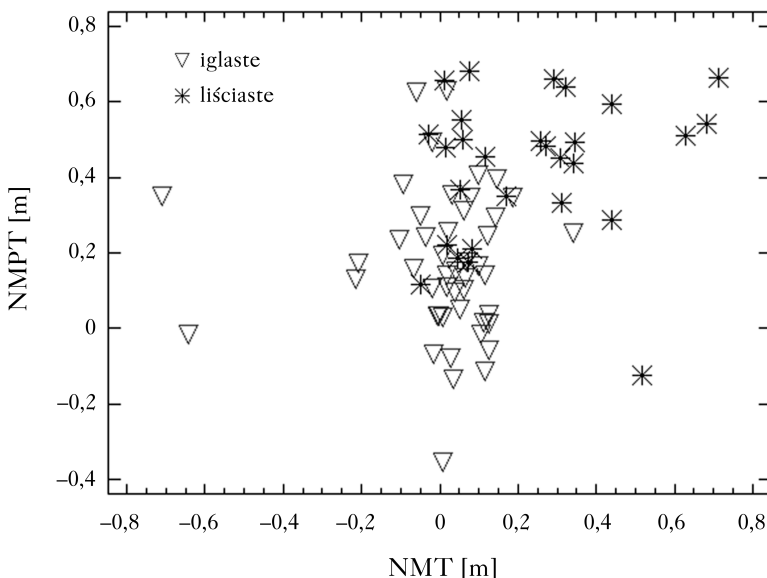
W doświadczeniu pierwszym badano hipotezę, że pora sezonu wegetacyjnego (wiosna, lato) powoduje, że pomiędzy drzewostanami iglastymi i liściastymi z mieszanymi istnieje statystycznie istotna różnica pomiędzy średnimi wartościami wysokości (rzędnych): NMT, NMPT i WMK. W tym celu w granicach każdego drzewostanu obliczono wartości średnie rzędnych z modeli „wiosennych” i „letnich”. Do oceny istotności różnic między średnimi wykorzystano analizę ANOVA pakietu Statgraphics. Wynik tego doświadczenia upoważnił do podjęcia próby wykorzystania tej informacji do klasyfikacji struktury pionowej i gatunkowej drzewostanów. Aby mieć pewność, że przetwarzane dane nie są zniekształcone przez inne czynniki (np. niewłaściwą kalibrację chmur punktów laserowych), wprowadzono do analizy także dwie grupy innych obiektów kontrolnych – łąki (24 obiekty) oraz utwardzone drogi (20 obiektów). Wybór tych obiektów uzasadniony jest założeniem, że budowane dla nich modele NMT, NMPT

i wynikowe modele różnicowe NMPT – NMT, nie powinny wykazywać różnic wynikających z pory sezonu wegetacyjnego.

Doświadczenie drugie miało na celu sprawdzenie czy budowa pionowa (warstwowa) drzewostanów ma wpływ na tworzone modele NMT, NMPT oraz wynikowy WMK. Dzięki analizie stereoskopowej zdjęć lotniczych możliwe było znalezienie drzewostanów iglastych i liściastych oraz mieszanych o strukturze jedno- i dwuwarstwowej. W przedstawionym doświadczeniu, biorąc pod uwagę pierwszą warstwę drzewostanu, połączono drzewostany liściaste i wielogatunkowe w jedną grupę. Analizowano, jak poprzednio, różnice między wartościami średnimi modeli NMT, NMPT oraz WMK, obliczonymi dla wariantu „wiosennego” i „letniego”. Przy budowie funkcji dyskryminacji wykorzystano wszystkie modele, gdyż pozwoliło to na osiągnięcie wyższej dokładności klasyfikacji.

Wyniki

DOŚWIADCZENIE 1. Stwierdzono istotną statystycznie różnicę w NMT i NMPT między grupą drzewostanów iglastych oraz liściastych i wielogatunkowych. Dodatkowo wykonane analizy wykazały występowanie istotnych różnic między wartościami średnich rzędnych wyznaczonych w modelach „wiosennych” i „letnich” w tych grupach drzewostanów (tab. 1). Klasyfikację drzewostanów na iglaste oraz liściaste i wielogatunkowe można oprzeć na analizie wykonanych dla nich dwóch wariantów („wiosennego” i „letniego”) modeli NMT i NMPT. Na taką możliwość wskazuje także podział różnic między analizowanymi wariantami modeli NMT i NMPT na dwa zbiory dokonany na podstawie funkcji dyskryminacji wygenerowanej w jednym z modułów programu Statgraphics (ryc.). Moduł ten posiada dwie opcje – możliwe jest przyjęcie założenia dotyczącego jednakowego lub proporcjonalnego prawdopodobieństwa przydzielenia obiektu do grupy. W prezentowanej pracy sprawdzono obydwa warianty.



Ryc.

Rozrzut wartości różnic między średnimi dla „wiosennego” i „letniego” wariantu NMT oraz NMPT
Distribution of differences between mean values of ‘spring’ and ‘summer’ variants of DTM (NMT) and DSM (NMPT)

W pierwszej kolejności sprawdzono wariant, w którym założono, że prawdopodobieństwo przyporządkowania obiektu do jednej z dwóch grup drzewostanów jest równe i wynosi 0,5 (tab. 2). Ogólna dokładność opracowanej funkcji klasyfikacji drzewostanu ze względu na gatunek (udział prawidłowo sklasyfikowanych obiektów) wyniosła 71%. Następnie sprawdzono dokładność klasyfikacji przy założeniu, że prawdopodobieństwo przyporządkowania obiektu do grupy jest proporcjonalne do liczebności grup wykorzystanych do budowy funkcji (tab. 2). W tym przypadku prawdopodobieństwo dla drzewostanów iglastych wyniosło 0,55, a dla liściastych i wielogatunkowych – 0,45. Ogólna dokładność opracowanej funkcji klasyfikacji również wyniosła 71%. Nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic między modelami „wiosennymi” i „letnimi” wykonanymi dla obiektów kontrolnych. Wartości średnie różnic rzędnych w modelach między wariantami letnimi i wiosennymi NMT, NMPT oraz WMK wyniosły odpowiednio dla łąk: 0,09 m; 0,07 m i –0,02 m; a dla dróg: 0,05 m; 0,04 m i –0,01 m.

DOŚWIADCZENIE 2. Poszukiwano także możliwości podzielenia drzewostanów ze względu na ich budowę pionową (na jedno- lub dwuwarstwowe). Do tego celu wykorzystano wszystkie modele (NMT, NMPT i WMK) z obydwu faz sezonu wegetacyjnego. Podobnie jak poprzednio, w analizie przyjęto równe prawdopodobieństwo przynależności do grup lub uzależniano je od liczebności obiektów w poszczególnych grupach. Ogólna dokładność klasyfikacji drzewostanów iglastych wyniosła 75% i 71%. Dokładność klasyfikacji grupy drzewostanów liściastych i wielogatunkowych wyniosła 77% i 79% (tab. 3)

Tabela 2.

Klasyfikacja drzewostanów na grupy gatunkowe
Classification of analysed into species groups

Drzewostan	Sklasyfikowane jako			
	iglaste		liściaste i wielogatunkowe	
	A	B	A	B
Iglasty	35 73%	38 79%	13 27%	10 21%
Liściasty i wielogatunkowy	12 31%	15 38%	27 69%	24 62%

Prawdopodobieństwo przyporządkowania obiektu do danej grupy: A – jednakowe; B – proporcjonalne
Probability of classification of individual object to given group: A – equal; B – proportional

Tabela 3.

Klasyfikacja drzewostanów na jedno- i wielowarstwe
Classification of analysed stands into single- and multi-layer

Drzewostan	Sklasyfikowane jako			
	jednowarstwowe		wielowarstwowe	
	A	B	A	B
Iglasty	23 74%	26 84%	13 76%	8 47%
Liściasty i wielogatunkowy	21 75%	23 82%	9 82%	8 73%

Prawdopodobieństwo przyporządkowania obiektu do danej grupy: A – jednakowe; B – proporcjonalne
Probability of classification of individual object to given group: A – equal; B – proportional

Dyskusja

Zaproponowana metodyka pozwala podzielić drzewostany na liściaste z wielogatunkowymi i iglaste z dokładnością rzędu 71%. Przy klasyfikacji drzewostanów na jedno- i wielowarstwowe osiągnięto dokładność około 71-79%. Podobnie jak w pracach Hyypä i in. [2005] czy Stereńczaka [2009] stwierdzono, że wiosenne i letnie warianty NMT w różnych typach drzewostanów różnią się w niewielkim stopniu, przy czym bardziej wiarygodnym jest wariant wiosenny. Rodzaj roślinności ma pewien wpływ na dokładność modeli terenu [Jan 2005]. Różnice między wariantami NMT wskazują, że niższe warstwy drzewostanu oraz runo mają wpływ na ich rzędne. W analizowanych danych nie stwierdzono błędów systematycznych ani wpływu innych czynników, co wykazano na podstawie wyników uzyskanych dla 45 powierzchni kontrolnych umieszczonych na łąkach i drogach.

Obiektywnie należy stwierdzić, że wykorzystane dane nie były idealnymi z punktu widzenia celów przeprowadzonych analiz. Wiosenne skanowanie laserowe było wykonane zbyt późno, bo już w okresie początku rozwoju roślinności liściastej, natomiast na wyniki nalotu letniego mógł mieć wpływ przyrost drzewostanu (analizowane gatunki drzew w Polsce kończą przyrost wysokości na przełomie czerwca/lipca). Zdaniem autorów optymalne byłoby wykorzystanie zestawu danych LIDAR-owych z sierpnia i z okresu tuż po zejściu śniegu, lecz w roku następnym. W ten sposób nie zostałyby zarejestrowany wiosenny przyrost drzewostanów. Należy mieć także na uwadze, iż zakwalifikowanie drzewostanów mieszanych, pomimo znacznego w nich udziału gatunków liściastych do grupy drzewostanów liściastych, mogło pogorszyć wynik klasyfikacji.

Przedstawiona w pracy koncepcja wykorzystania modeli NMT, NMPT i WMK do klasyfikacji struktury pionowej i gatunkowej drzewostanów wymaga doskonalenia i sprawdzenia na większym materiale doświadczalnym, w którym wyodrębnione zostaną dwa zbiory drzewostanów – uczący i weryfikujący (kontrolny). Szczególnie wykorzystanie tej metody do klasyfikacji drzewostanów według ich struktury pionowej jest bardzo interesujące, gdyż jak dotąd w „klasycznej” teledetekcji opartej na analizach obrazów rastrowych nie opracowano skutecznej metody różnicowania obiektów.

Podsumowanie

Zastosowanie statystycznej analizy opracowywanych na podstawie wyników skanowania laserowego modeli NMT i NMPT (w I etapie) oraz NMT, NMPT i WMK (w II etapie) pozwoliło dokonać klasyfikacji drzewostanów na iglaste oraz liściaste i wielogatunkowe z dokładnością 71% oraz na jedno- i wielowarstwowe z dokładnością rzędu 71-79%. Ponieważ różnice między wiosennym i letnim wariantem NMPT są nieznaczące, niezależnie od rodzaju drzewostanu, można zaproponować wykorzystanie tych modeli, jako źródła danych o wysokości drzewostanu. Niezbędne jednak jest posiadanie dokładnych danych o terenie (NMT). Wiarygodne dane do budowy NMT można uzyskać za pomocą skanowania laserowego przeprowadzonego w okresie wiosennym.

Literatura

- Będkowski K., Adameczyk J., Brach M., Gzowski P., Karaszkievicz W., Krawczyk A., Marmol U., Mikrut S., Miściecki S., Morańda M., Olenderek H., Stereńczak K., Stępniewski P., Walo J., Zawadka R. 2008. Raport końcowy projektu badawczego 2 P06L. 02229 „Zastosowanie lotniczego i naziemnego skaningu laserowego w analizie struktury przestrzennej i funkcjonowania lasów w krajobrazie”. Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie.

- Będkowski K., Stereńczak K. 2008a. Porównanie zasięgów koron drzew wyznaczonych na podstawie danych skanowania laserowego i pomiarów fotogrametrycznych. *Czasopismo Techniczne* 2-Ś: 16-25.
- Będkowski K., Stereńczak K. 2008b. Przestrzenny rozkład punktów odbić impulsów skanera laserowego a wybrane cechy drzewostanu. *Roczniki Geomatyki* 6 (8): 55-60.
- 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. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (8/W2): 66-70.
- Holmgren J., Persson A. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment* 90: 415-423.
- Hyypä H., Yu X., Hyypä J., Kaartinen H., Kaasalainen S., Honkovaara E., Ronnholm P. 2005. Factors affecting quality of DTM generation in forested areas. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (3/W): 85-90.
- Hyypä J., Hyypä H., Leckie D., Gougeon F., Yu X., Maltamo M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29 (5): 1339-1366.
- Jan J. F. 2005. Comparison of Forest Height Derived Using LIDAR Data and Aerial Photos. *Taiwan Journal of Forest Science* 20: 13-27.
- Kraus K., Pfeifer N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53: 193-203.
- Lefsky M. A., Cohen W. B., Parker G. G., Harding D. J. 2002. LIDAR Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience* 52 (1): 19-30.
- Maltamo M., Packalén P., Yu X., Eerikäinen K., Hyypä J., Pitkänen J. 2004. Identifying and quantifying heterogeneous boreal forest structures using laser scanner data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (8/W2): 153-156.
- Marmol U., Jachimski J. 2004. A FFT based method of filtering airborne laser scanner data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35 (B3): 1147-1152.
- 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.
- Sithole G., Vosselman G. 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59: 85-101.
- Stereńczak K. 2008. Możliwości wykorzystania wysokościowego modelu koron w badaniach środowiska leśnego. *Czasopismo Techniczne* 2-Ś: 273-279.
- Stereńczak K. 2009. Accuracy of Digital Terrain Models generated from laser scanning data under forest conditions. Praca magisterska. UNIGIS Master of Science Programme, Paris-Lodron University of Salzburg, Uniwersytet Jagielloński, Kraków.
- Stereńczak K., Będkowski K., Weinaecker 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. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Youth Forum* 37 (B6b): 27-33.
- Tickle P. K., Lee A., Lucas R. M., Austin J., Witte C. 2006. Quantifying Australian forest floristic and structure using small footprint LIDAR and large-scale aerial photography. *Forest Ecology and Management* 223: 379-394.
- Wang Y., Koch B., Weinaecker H., Stereńczak K. 2008. LIDAR point cloud based fully automatic 3D single tree modeling in forest and evaluations of the procedure. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Youth Forum* 37 (B6b): 45-53.
- Watt P. J., Donoghue D. N. M., McManus K. B., Dunford R. W. 2004. Predicting forest height from IKONOS, LANDSAT and LIDAR data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (8/W2): 228-231.
- Weinaecker H., Koch B., Weinaecker R. 2004. TREESVIS - A software system for simultaneous 3D-Real-Time visualization of DTM, DSM, Laser raw data, Multi-spectral data, simple tree and building models. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (8/W2): 90-95.

SUMMARY

Using digital terrain model and digital surface model for stands classification basing on their species and vertical structure

LIDAR become wide use tool for different forest parameter extraction. Main products of this technology are very accurate DTM and DSM. Generally digital models are used for measuring

single tree and stand variables. Aim of the presented study was to use DTM, DSM and CHM, generated from LIDAR data acquired in two year seasons, for detecting, not measuring, forest species composition and structure. Above mentioned models and Statgraphics discrimination module were used to classify 76 stands to coniferous or deciduous, and single- or multi-layer stands group.

During study following hypothesis was evaluated: is it possible to detect species group and differences in vertical forest structure based on digital models analyses acquired in two year seasons. Until this time, authors did not find similar study in studied literature. Presented work was carried out in Głuchów Forest (central Poland), where structure and species composition is varied. Acquired results proved that using a DSM and DTM or DSM, DTM and CHM classification could reach 71-79% of accuracy. Presented study should be expanded for larger data sets, with two different groups of sample plots.