

Czynniki wpływające na proces detekcji pojedynczych koron drzew na podstawie danych z lotniczego skanowania laserowego

Factors influencing individual tree crowns detection based on airborne laser scanning data

Krzysztof Stereńczak

Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Informatyki i Modelowania, Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej nr 3, 05–090 Raszyn

Tel. +48 22 7150 325, fax: +48 22 7200 397, e-mail: K.Stereńczak@ibles.waw.pl

Abstract. Airborne laser scanning (ALS) technology allows accurate information about the forest environment to be obtained. The high precision of ALS allows the detection of individual trees. An individual tree is composed of many elements and requires relatively complex algorithms. Factors that determine and affect the accuracy of calculating the number of trees can be split into the following groups: biological factors, technical factors related to the flight and data acquisition parameters, technical factors related to data processing, problems of results verification.

The article synthesizes the main problems arising during the development of methods for detection of individual trees and acquisition of their characteristics in a managed forest in Central Europe.

Key words: segmentation, tree detection, Crown Height Model, accuracy

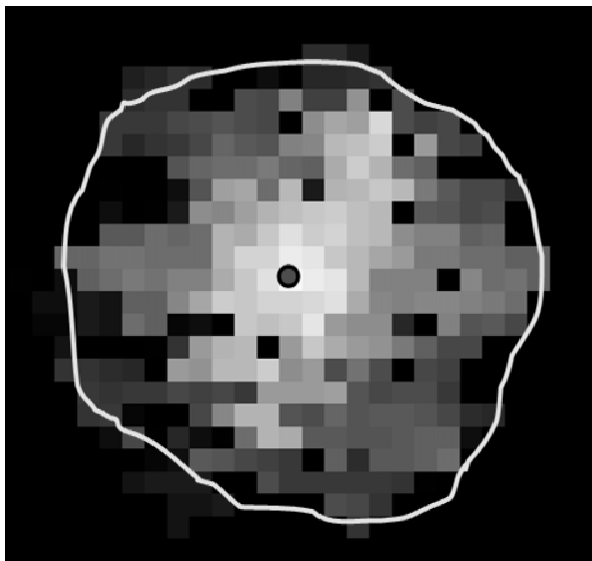
1. Wstęp

Lotnicze skanowanie laserowe (LSL) (ang: *Airborne Laser Scanning – ALS*) jest od kilkunastu lat efektywnym narzędziem do pozyskiwania dokładnej informacji o powierzchni ziemi (Baltsavias et al. 1999). Badania nad możliwościami wykorzystania lotniczego skanowania laserowego w analizach środowiska leśnego rozpoczęto w latach siedemdziesiątych XX w. (Soloduchin et al. 1977; Nelson et al. 1984). Począwszy od lat 90. ubiegłego wieku znaleźć można bardzo wiele prac traktujących o wykorzystaniu lotniczego skanowania laserowego do określania parametrów drzewostanu na podstawie modeli terenu oraz chmury punktów (Clark et al. 2004; Weinacker et al. 2004; St-Onge et al. 2005; Hyypä et al. 2006).

Jedną z ważnych charakterystyk pozyskiwanych w analizie danych LSL jest informacja o liczbie drzew na jednostce powierzchni. Parametr ten może być wyrażony jako zagęszczenie lub współczynnik zagęszczenia i może zostać uzyskany w wyniku analizy wysoko-

ciowego modelu koron (WMK) lub chmury punktów LSL. Z reguły punkty reprezentują najwyższe partie koron, czyli potencjalne wierzchołki drzew. Poligony będące wynikiem analizy WMK lub chmury punktów lotniczego skanowania laserowego są odzwierciedleniem zasięgu rzutu poziomego korony drzewa, a więc faktycznie dostarczają pełniejszej i ważniejszej informacji z punktu widzenia gospodarki leśnej (ryc. 1).

Dokładność określania liczby drzew oraz dokładność określania zasięgów koron jest istotna z punktu widzenia metody określania zapasu drzewostanu, bazującej na pojedynczych drzewach (Korpela et al. 2007; Kaartinen, Hyypä 2008; Miścicki, Stereńczak 2012). W literaturze znajduje się opis wielu algorytmów służących do określania liczby drzew (Hyypä J. et al. 2001; Maltamo et al. 2004b; Tiede et al. 2005; Koch et al. 2006; Stereńczak et al. 2008; Tompalski et al. 2009; Myszkowski et al. 2009; Stereńczak 2010a; Wężyk et al. 2010). W zależności od składu gatunkowego drzewostanu oraz sposobu jego prowadzenia algorytmy te dają różne wyniki. Analiza wielu z nich (Kaartinen, Hyypä



Rycina 1. Wynik detekcji pojedynczego drzewa z wykorzystaniem wysokościowego modelu koron (ciemny punkt – lokalizacja piksela z najwyższą wartością wysokości (punkt utożsamiany z wierzchołkiem drzewa), biała linia – zasięg rzutu poziomego korony drzewa)
 Figure 1. Result of single tree detection based on Canopy Height Model (dark point – position of pixel with highest height value (equated as tree top), with line – crown extend

2008; Vauhkonen et al. 2010) dowiodła, iż są one najbardziej dokładne dla drzewostanów, dla których zostały opracowane. Wynika to przede wszystkim z faktu, że ich parametry zmiennych dopasowane zostały do konkretnych warunków przyrodniczych danego kraju.

Istnieje wiele czynników mających wpływ na dokładność segmentacji. Segmentacja to, z punktu widzenia cyfrowej analizy obrazu, proces dzielący obraz na segmenty (regiony grupujące więcej niż 1 piksel), które są jednorodne – homogeniczne pod względem wybranych właściwości. Część czynników zależy od własności drzewostanów będących przedmiotem analiz, część od specyfiki użytych danych, pozostałe od sposobu analizy danych LSL. Lista najważniejszych z nich przedstawia się następująco:

1. Czynniki biologiczne:
 - a) gatunek drzewa,
 - b) sposób zmieszania drzew różnych gatunków,
 - c) struktura pionowa drzewostanu,
 - d) zagęszczenie drzew,
 - e) pochodzenie drzewostanu,
 - f) ekotyp danego gatunku,
 - g) termin rozwoju liści,
 - h) szkody aparatu asymilacyjnego,
 - i) wiek drzewostanu.
2. Czynniki techniczne związane z parametrami nalotu LSL i pozyskaniem danych:

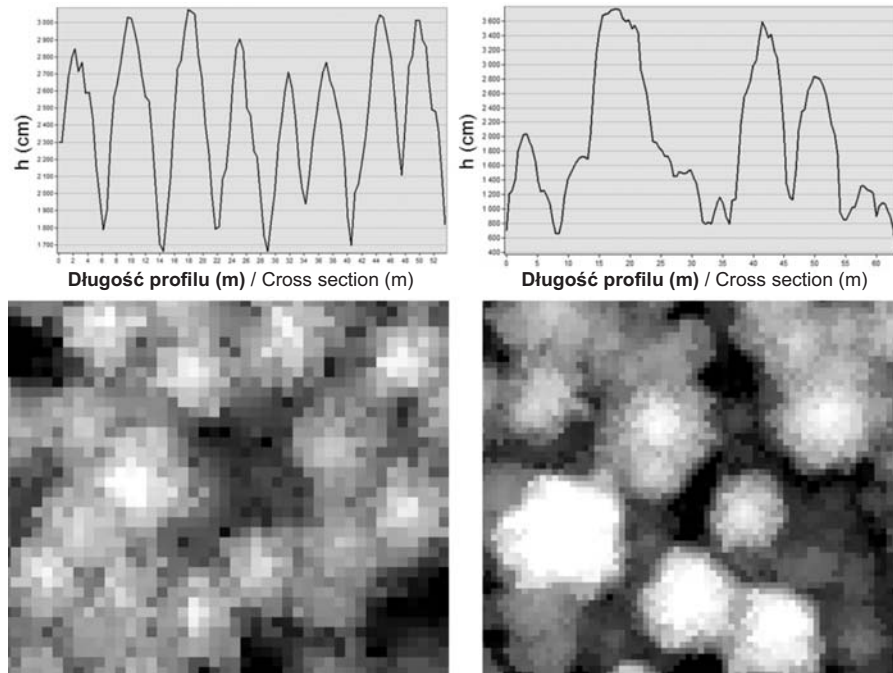
- a) wysokość nalotu nad terenem,
 - b) wielkość plamki lasera na obiekcie,
 - c) maksymalny kąt odchylenia wiązki lasera od pionu (nadir-off),
 - d) liczba punktów ALS na jednostkę powierzchni,
 - e) typ skanera – impulsowy (dyskretny) lub fali ciągłej.
3. Czynniki techniczne związane z przetwarzaniem danych:
 - a) algorytm wykorzystany do generowania numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT),
 - b) rozdzielczość numerycznego modelu terenu (NMT), NMPT i wysokościowego modelu koron,
 - c) przetworzenia wstępne (filtracja),
 - d) algorytm użyty do segmentacji zasięgu korony drzewa.
 4. Sposób weryfikacji wyników:
 - a) rodzaj użytych do weryfikacji danych referencyjnych,
 - b) sposób weryfikacji wyników (punkt do punktu, poligon do poligonu).

Celem prezentowanej pracy jest określenie i scharakteryzowanie najważniejszych czynników warunkujących dokładność określania liczby drzew i ich cech na podstawie chmury punktów ALS. Praca podsumowuje doświadczenia zdobyte w trakcie realizacji kilku projektów badawczych i analizy wybranych obiektów leśnych.

2. Czynniki biologiczne warunkujące dokładność segmentacji

Czynniki biologiczne związane są z właściwościami drzew i drzewostanów, które podlegają analizie – struktura drzewostanu oraz jego skład gatunkowy, wiek, sposób zmieszania to najważniejsze cechy drzewostanów, które warunkują dokładność segmentacji oraz określanie cech pojedynczych drzew. Analiza chmur punktów ALS reprezentujących drzewostany jednopiętrowe jest nieco prostsza niż analiza chmury reprezentującej drzewostany o strukturze przerębowej czy wielopiętrowej. Drzewostany o jednorodnym składzie gatunkowym i wiekowym tworzą podobny wzorzec przestrzenny, stąd łatwiej jest zautomatyzować proces ich detekcji (ryc. 2).

Drzewostany o strukturze przerębowej charakteryzują się różnorodnym kształtem i wielkością koron, oraz złożoną strukturą pionową drzewostanu. Często małe drzewa na obrazie przenikają się z większymi drzewami rosnącymi obok. Wynika to z tego, że przy rejestracji sygnału z góry niższe drzewa „przykrywane” są przez wyższe. Przy wykorzystaniu chmury punktów pozyskanej w wyniku lotniczego skanowania laserowego de-



Rycina 2. Porównanie struktury pionowej (profil u góry) i poziomej (obraz rastrowy WMK u dołu) dwóch drzewostanów: po lewej stronie – struktura prosta, po prawej – struktura złożona; jasne piksele odpowiadają największym wartościom wysokości drzew H (cm)

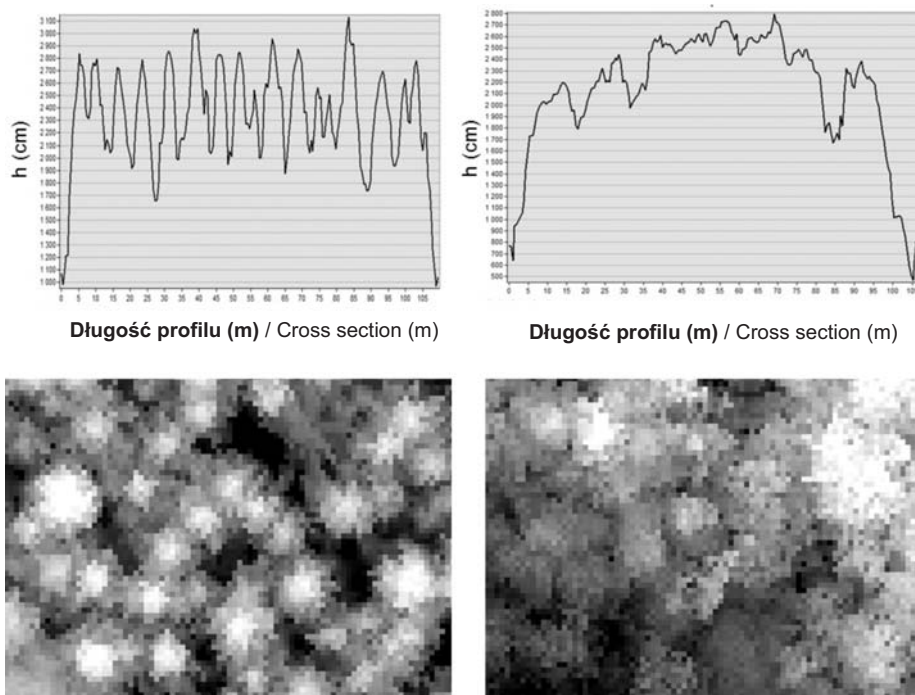
Figure 2. Comparison of vertical structure (cross section above) and horizontal structure (images below) of two tree stands: on the left – simple structure, on the right – complex structure; the bright pixels represent the greatest tree height values H (cm)

tekcja drzew w drugim piętrze drzewostanu jest możliwa wyłącznie w określonych warunkach. Z kolei przy wykorzystaniu wysokościowego modelu koron taka analiza nie jest w ogóle możliwa, gdyż model ten odzwierciedla tylko najwyższą warstwę koron drzew. Obiekty znajdujące się pod okapem pierwszej warstwy drzew nie biorą udziału w aproksymacji powierzchni przebiegającej po pierwszych odbiciach (echo) rejestrowanych od wyższych drzew. Problem ten jednak nie ma większego znaczenia przy założeniu, że celem analizy jest określenie zasobności drzewostanu na podstawie zebranych danych. Dokładność określania tej cechy jest ciągle bardzo wysoka, pomimo nieuwzględnienia w analizach drugiego piętra drzewostanu (Persson et al. 2002; Hyypä et al. 2005). Szczególnie w drzewostanach iglastych i jednogeneracyjnych liściastych prawie całkowita masa grubizny znajduje się właśnie w pierwszym piętrze. Stąd właściwe określenie liczby drzew w tej najwyższej warstwie ma decydujące znaczenie dla określania zasobności przy wykorzystaniu zdecydowanej większości algorytmów do detekcji pojedynczych drzew.

Kolejnym analizowanym czynnikiem był gatunek drzewa. Wyniki przedstawione w licznych pracach badawczych wskazują na dużo większą dokładność metod detekcji drzew w drzewostanach iglastych niż w liś-

ciastych (Persson et al. 2002, 2003; Heurich et al. 2005; Tiede et al. 2004). Wynika to przede wszystkim ze specyfiki budowy koron poszczególnych gatunków drzew oraz ze wzorców przestrzennych, jakie te drzewostany tworzą (ryc. 3).

Drzewa iglaste już w młodym wieku wykształcają korony, które w mniejszym (sosna) lub większym (świerk, jodła i modrzew) stopniu przypominają stożek. Z reguły korona ma jeden wierzchołek, mocno górujący nad resztą jej gałęzi. Z kolei gatunki liściaste mają tendencję do wytwarzania koron zdecydowanie bardziej rozbudowanych, z wieloma konarami głównymi, oraz szczelnego wypełniania przestrzeni pomiędzy drzewami. Skutkuje to wytworzeniem dość jednorodnej powierzchni zewnętrznej WMK w górnej warstwie koron, przez co detekcja pojedynczych wierzchołków jest bardzo utrudniona. Szczególnie dotyczy to takich rodzimych rodzajów, jak: buk, klon, jesion czy dąb. W odróżnieniu od nich, drzewostany olszowe i brzożowe raczej nie rosną w takim zwarciu, poza tym ich korony nie tworzą aż tak zróżnicowanych form, są raczej dość jednorodne z głównym pędem górującym nad pędami bocznymi, co ułatwia ich analizę z wykorzystaniem WMK. Problem ten również przekłada się na drzewostany mieszane, gdzie niekorzystny wpływ gatunków liściastych obniża dokładność analiz (Stereńczak 2013).



Rycina 3. Porównanie struktury pionowej (profil u góry) i poziomej (obraz rastrowy WMK u dołu) drzewostanów iglastych – po lewej stronie, i liściastych – po prawej stronie; jasne piksele odpowiadają największym wartościom wysokości drzew (H)

Figure 3. Comparison of vertical structure (cross section above) and horizontal structure (images below) of coniferous – on the left, and deciduous stands – on the right; the bright pixels represent the greatest tree height values (H)

Wynika to przede wszystkim z faktu wzajemnego przenikania się koron o zmiennym kształcie i wielkości, oraz z problemów z odpowiednim ustawieniem algorytmu.

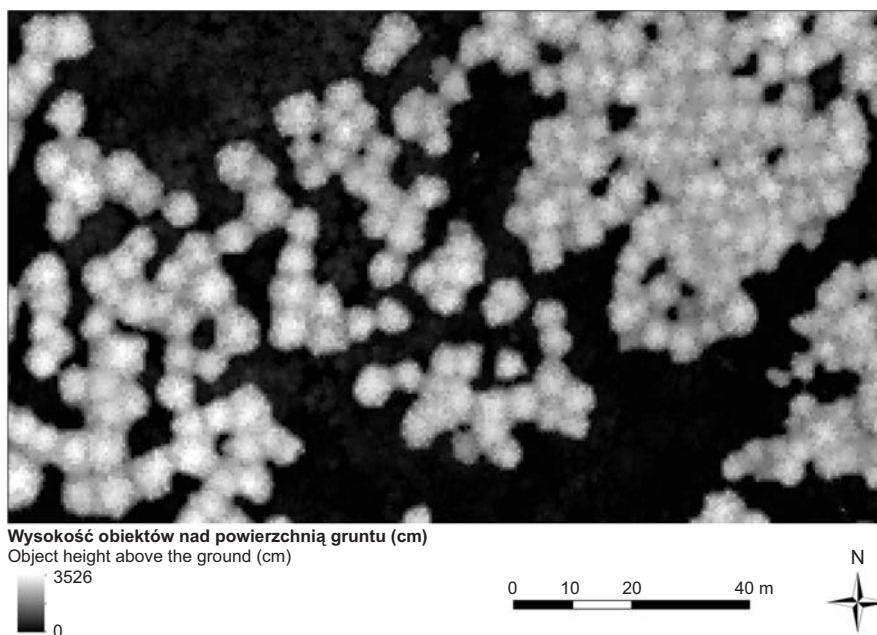
Zagęszczenie drzewostanu jest kolejnym czynnikiem wpływającym na dokładność detekcji drzew. Wyniki badań wskazują na lepszą skuteczność metod detekcji drzew w drzewostanach o mniejszym zagęszczeniu (Hyypä et al. 2005). Jest to spowodowane głównie tym, że drzewa rosnące w większym zagęszczeniu w wyniku konkurencji bardzo efektywnie wykorzystują ograniczoną przestrzeń i tworzą bardzo jednorodne warstwy koron drzew przeplatających się między sobą. Z kolei zabiegi gospodarcze lub sposób hodowli drzew na plantacjach skutkuje regularnym pokryciem powierzchni i wyraźnymi przestrzeniami pomiędzy drzewami. Z racji większych przestrzeni pomiędzy pojedynczymi koronami penetracja przez wiązki laserowe jest większa i pojedyncze korony drzew lepiej reprezentowane są przez WMK (ryc. 4). Wyniki segmentacji osiągnane w przypadku plantacji drzew są zdecydowanie lepsze od tych uzyskiwanych w drzewostanach. Pochodzenie drzewostanu i sposób jego odnowienia wpływa pośrednio na wynik detekcji pojedynczych drzew.

Dokładność określania gatunku drzew na podstawie danych z lotniczego skanowania laserowego zależy od

znajomości jego ekotypu. Duże różnice w kształcie koron można obserwować np. dla świerka. Forma płacząca wytwarza korony o pędach zwisających lub wykazujących geotropizm dodatni (*Picea abies* ‘Inversa’), forma zwisająca (*Picea abies* ‘Pendula’) z kolei tworzy delikatne gałęzie łukowato wygięte w dół, formy stożkowate (*Picea abies* ‘Piramidata’) tworzą korony w kształcie mocno wyciągniętych stożków. Duża zmienność w kształcie korony drzew powoduje trudności w ustaleniu optymalnych ustawień parametrów algorytmu i obniża skuteczność ich zastosowania.

Innym czynnikiem biologicznym wpływającym na dokładność algorytmów do określania liczby drzew jest występowanie form drzew, które charakteryzują się dużą zmiennością w terminie wzrostu ulistnienia na wiosnę i utraty liści na zimę (Będkowski, Stereńczak 2012, 2013). Dąb jest tu typowym przykładem. Różnice w długości procesu wzrostu liści na początku okresu wegetacyjnego pomiędzy osobnikami w ramach jednego wydzielenia wynosi nawet kilkanaście dni, podobnie jest na końcu sezonu wegetacyjnego. Czynnikiem ten, w przypadku niewłaściwego terminu nalotu, może powodować duże problemy z odnalezieniem drzew w stanie bezliśnym (już/jeszcze).

Kolejnym czynnikiem biologicznym jest uszkodzenie aparatu asymilacyjnego przez owady i grzyby. Typo-



Rycina 4. Przykład drzewostanu świerkowego o zmiennym zwarciu drzew. Piksele obrazu oznaczają wysokość obiektów na powierzchni ziemi; jasne piksele odpowiadają obiektom wysokim.

Figure 4. Example of Spruce stand with various stand closures. Pixels values are height of the objects above ground surface. Bright pixels represent height objects.

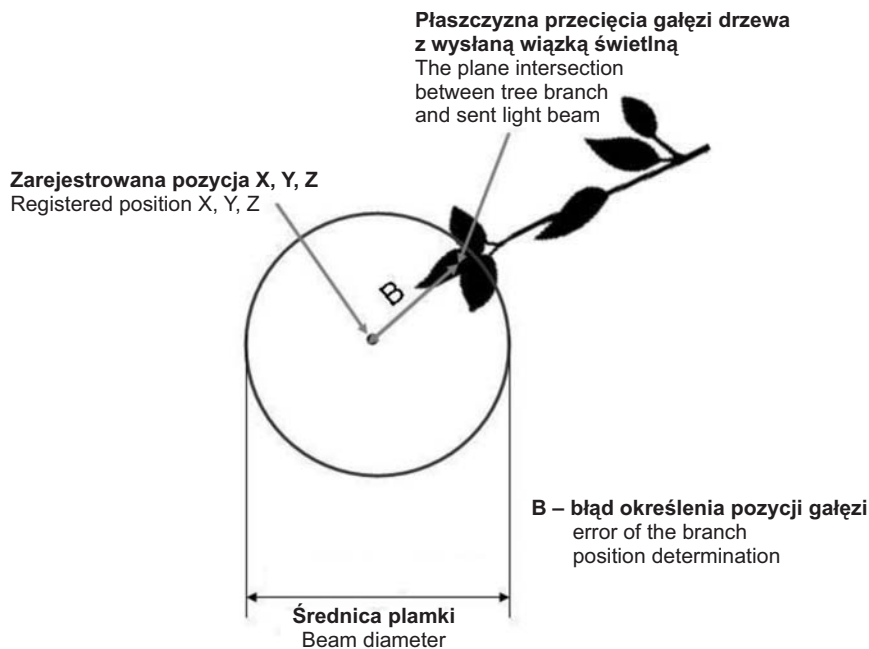
wym przykładem jest żer szkodników pierwotnych, który powoduje zniszczenie liści i młodych pędów na drzewach. W skrajnych przypadkach może on powodować nawet zmianę kształtu koron drzew. Oczywiście wystąpienie szkód od żeru owadów jest raczej rzadkie, niemniej jednak z punktu widzenia detekcji pojedynczych drzew może mocno skomplikować całą procedurę.

Ostatnim czynnikiem biologicznym wpływającym na dokładność określania liczby drzew jest wiek drzewostanu. Im młodsze są drzewa, tym mniejszą mają koronę. Gdyby odzwierciedlać wszystkie klasy wieku danego gatunku drzewa w jednym modelu rastrowym o wymiarze boku piksela np. 0,5 m, spowodowałyby to dla najmłodszych drzew (1–2 klasa wieku) generalizację ich kształtu i znaczny spadek liczby znalezionych właściwie drzew, z kolei dla starszych (5–6 klasa wieku) powodowałyby to bardzo mocne uszczegółowienie kształtu powierzchni pojedynczej korony drzewa, przez co możliwe byłoby w wyniku segmentacji otrzymanie zamiast jednej dużej korony kilku mniejszych. W związku z tym segmentacja większych drzew wymagałaby wcześniejszego zgeneralizowania ich kształtu. Aby zoptymalizować proces określania liczby drzew możliwe jest stosowanie dla najmłodszych klas wieku mniejszego rozmiaru piksela, np. 0,25 m, a dla starszych większego – 1,0 m. Poza tym powstaje pytanie o zasadność i możliwość detekcji drzew w młodszych klasach wieku. Po pierwsze jest to bardzo trudne i wymaga znacznych

nakładów finansowych – zakup gęstszych, a tym samym droższych danych. Poza tym, z gospodarczego punktu widzenia nie jest to ekonomicznie uzasadnione. Segmentacja w starszych drzewostanach daje lepsze wyniki pozwalające na automatyzację tego procesu i ma uzasadnienie gospodarcze.

3. Czynniki techniczne związane z parametrami nalotu

Do najważniejszych czynników technicznych należą charakterystyki wykonania nalotu fotogrametrycznego oraz gęstość danych lotniczego skanowania laserowego, wyrażone w liczbie pierwszych odbić na jeden metr kwadratowy (pkt/m²). Charakterystyka ta określa faktyczną liczbę efektywnych sygnałów, jakie powróciły do odbiornika. Wysokość nalotu oraz wielkość promienia wiązki świetlnej na powierzchni obiektu mają wpływ na dokładność segmentacji (Hirata 2004; Hyypä et al. 2005). W miarę zwiększania wysokości lotu, a co się z tym wiąże – wielkości plamki laserowej na ziemi, dokładność określania liczby drzew zmniejsza się. Są to niewielkie różnice sięgające kilku procent, niemniej jednak wielkość plamki ma wpływ na dokładność określania zasięgu korony i wysokości drzew, stąd plamka powinna być możliwie mała (Persson et al. 2002). Poprawia to dokładność analiz i penetrację środowiska leśnego. Wysłana przez skaner wiązka, napotykać na



Rycina 5. Wpływ wielkości plamki i miejsca przecięcia z obiektem na błąd określenia pozycji gałęzi, maksymalny teoretyczny błąd osiąga wartość równą połowie średnicy plamki

Figure 5. Influence of footprint size and its interaction with object on location error size, maximal error is equal to half diameter of the footprint

przeszkodę, odbija się od niej i na tej podstawie wyliczana jest współrzędna położenia tej przeszkody. Stąd, im większa wiązka, tym większy może być błąd określenia pozycji elementów przestrzeni leśnej, przy założeniu, że wiązka przetnie dany element skrajną częścią (ryc. 5). Wielkość tego błędu jest niemożliwa do określenia.

Kolejnym czynnikiem warunkującym dokładność detekcji drzew jest minimalna liczba pierwszych odbić zarejestrowanych na określonej jednostce powierzchni. Liczba minimalna, która pozwala na określenie wiarygodnej liczby drzew, wynosi, w zależności od wieku i składu gatunkowego drzewostanu, od 3 do 5 pkt/m² (Hirata 2004) lub 6 do 10 punktów przypadających na jedną koronę drzewa (Maltamo et al. 2004c). W Skandynawii stosuje się z powodzeniem dane o gęstości około 1 pkt/m², głównie ze względu na mniejsze zwarcie drzewostanów. Gęstość danych z lotniczego skanowania laserowego warunkuje dokładność i szczegółowość wysokościowych modeli koron, które są na ich podstawie generowane (Hirata 2004). Zbyt mała liczba punktów powoduje potrzebę generowania modeli o mniejszej rozdzielczości, czyli o większym pikselu, co prowadzi do obniżenia dokładności określania liczby drzew (Stereńczak et al. 2008). Dodatkowo gęstość i średnica, jaką uzyskują na obiekcie wysłane wiązki, warunkują prawdopodobieństwo trafienia wierzchołka.

Czynniki te pośrednio wpływają na określenie dokładności pomiaru wysokości drzew.

Gęstość chmury punktów pozyskana w wyniku lotniczego skanowania laserowego warunkowana jest przede wszystkim rodzajem skanera oraz wysokością lotu. Rodzaj skanera wpływa na wzór przestrzenny, jaki tworzą wysłane wiązki oraz na częstotliwość ich wysyłania (Stereńczak 2010b). Im naloć wykonywany jest na niższym pułapie i z mniejszą prędkością, tym gęstość chmury punktów jest większa, a średnica wysłanych wiązek na obiekcie – mniejsza. Gęstsza chmura punktów pozwala na uzyskanie dokładniejszej liczby drzew.

Ostatnim analizowanym czynnikiem związanym z technicznymi aspektami naloću fotogrametrycznego jest kąt skanowania. Wpływa on przede wszystkim na penetrację środowiska leśnego oraz na dokładność pomiarów. Przy plamce o średnicy 1 metra i kącie padania wiązki wynoszącym 10° błąd określenia wysokości gruntu wynosi +8,5 cm (Wack, Stelzl 2005). Stwierdzono, że kąt skanowania do 15° nadaje się do bardzo dokładnych badań (± 20 cm) w drzewostanach strefy borealnej (Ahokas et al. 2005). Przy kącie skanowania w granicach 7–15° nie znaleziono znaczących różnic w wartościach wysokości w numerycznym modelu terenu tworzonego z danych lotniczego skanowania laserowego (Morsdorf et al. 2006). W trosce o jak najwyższą dokładność analiz leśnych powinno się tak planować naloć, by kąt padania wiązki nie był większy niż 15° od

nadiru. Oczywiście w takich warunkach szerokość pasa nalotu będzie mała i wpłynie na wzrost kosztów pozyskania danych lotniczego skanowania laserowego.

4. Czynniki techniczne związane z przetwarzaniem danych

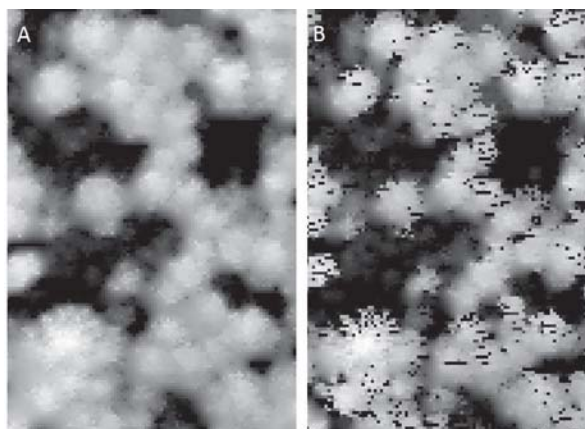
W procesie przetwarzania danych LSL możliwe jest odnotowanie dużej grupy czynników wpływających na dokładność tego procesu (Stereńczak 2010b). Przetworzona i dostarczona przez dostawcę danych chmura punktów osiąga dokładność około 10–15 cm. Takie dane poddawane są kolejnym przetworzeniom lub bezpośrednim analizom. Jednym z podstawowych przetworzeń jest generowanie numerycznych modeli terenu i powierzchni terenu, które mogą być pierwotnymi danymi do wielu analiz stosowanych w leśnictwie. Algorytm użyty do generowania numerycznego modelu pokrycia terenu jest kolejnym czynnikiem, tym razem związanym z aspektami technicznymi przetwarzania danych, który wpływa na efektywność detekcji pojedynczych drzew oraz na dokładność określania ich cech (ryc. 6).

Rycina 6 przedstawia wyniki użycia 2 różnych algorytmów do generowania NMPT. Po lewej stronie znajduje się obraz, na którym wszystkie piksele obrazu mają przypisane wartości wysokości, po prawej części pikseli jest czarna i ma wartość zerową (brak danych). W pierwszym przypadku (ryc. 6A) algorytm generował wartości wszystkich pikseli NMPT, a w miejsca gdzie nie zarejestrowano danych LSL, wartości pikseli ekstrapolowane były z pikseli sąsiednich (8 sąsiadów). W drugim przypadku (ryc. 6B) algorytm pominął obszary, na powierzchni których nie zarejestrowano punktów LSL. Dla tych pikseli określona została wartość zerowa – brak danych LSL.

Sposób przetworzenia i przygotowania modelu do segmentacji jest kolejnym czynnikiem mającym wpływ na dokładność uzyskiwanych wyników. Odpowiednie przygotowanie modelu ułatwia jego interpretację i zwiększa dokładność uzyskiwanych wyników (Malta et al. 2004a). Bardzo często w celu poprawienia jakości przetworzeń obrazu poddawane są filtracji (Nieniewski 2005). Filtracja jest szczególnym etapem przetwarzania obrazów, decydującym o wynikach segmentacji. Ma charakter kontekstowy, czyli polega na wyznaczeniu wartości pikseli na podstawie obliczeń wykonanych na sąsiednich pikselach w określonym oknie (Malina, Smiatacz 2005). Okno filtra przyjmuje z reguły kształt kwadratu o wymiarach 3×3, 5×5, 7×7 pikseli itd., przy czym dla każdego z elementów macierzy filtra zdefiniowane są współczynniki/wagi, przez które wartość pikseli w obrazie oryginalnym są wyznaczane. Zwiększenie rozmiaru ruchomego okna (ang. moving window)

powoduje większą generalizację analizowanego fragmentu obrazu. Budowę przykładowego filtra Gaussa przedstawiono na rycinie 7.

W procesie segmentacji koron drzew najczęściej wykorzystywane są filtry dolnoprzepustowe, szeroko opisane w literaturze poświęconej cyfrowej analizie obrazu (Malina, Smiatacz 2005). Podstawowe z nich to: filtr uśredniający, Gaussa, medianowy i inne. Dzięki filtracji możliwe jest zniwelowanie dużych różnic wysokościowych w obrębie pojedynczych koron drzew, podkreślenie granic pomiędzy sąsiadującymi koronami czy



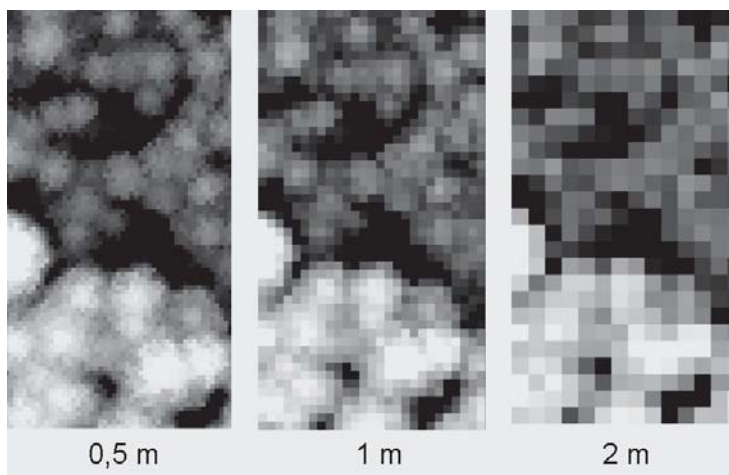
Rycina 6. Różnice w wysokościowym modelu koron tego samego fragmentu drzewostanu spowodowane użyciem różnych metod do interpolacji numerycznego modelu pokrycia terenu: A – z interpolacją wysokościową wszystkich pikseli WMK, B – bez interpolacji wysokościowej wszystkich pikseli

Figure 6. Differences in Canopy Height Models interpolation for the same area, resulted from using different methods of Digital Surface Model interpolation: A – with the height interpolation of all CHM pixels, B – without the height interpolation of all CHM pixels

	2	4	5	4	2
	4	9	12	9	4
1	5	12	15	12	5
115	4	9	12	9	4
	2	4	5	4	2

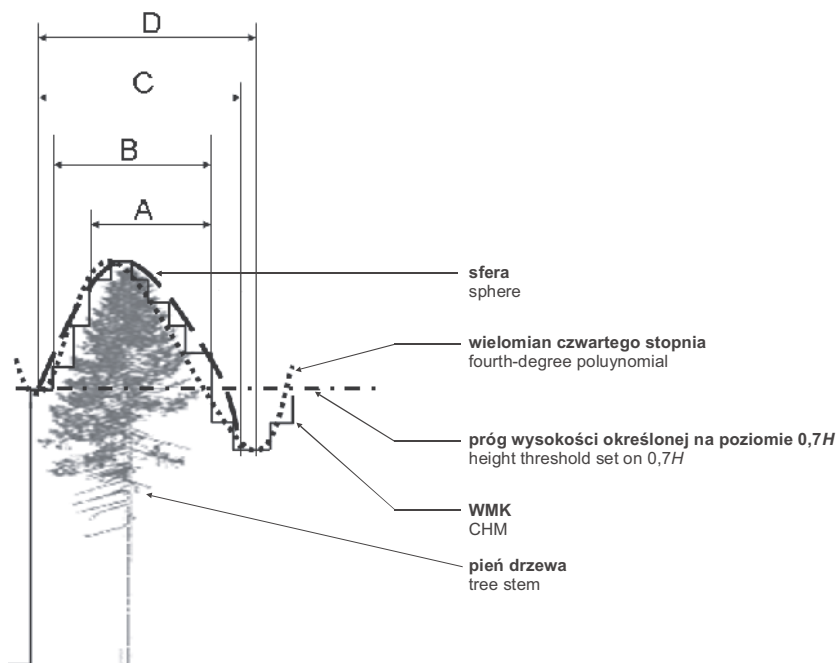
Rycina 7. Budowa filtra Gaussa dla okna o wielkości 5×5 pikseli (Green 2002)

Figure 7. Typical 5×5 pixel Gauss kernel structure (Green 2002)



Rycina 8. Wpływ wielkości piksela na sposób wizualizacji koron drzew: 0,5 m, 1 m, 2 m – długość boku piksela tworzącego obraz WMK (m)

Figure 8. Image pixel size influence on tree crown representation: 0.5 m, 1 m, 2 m – CHM pixel size (m)



Rycina 9. Poziomy zasięg korony drzewa (przekrój) określony na podstawie różnych metod: A – wielkości spadku, B – określonego progu wysokości, C – dopasowanej sfery, D – wielomianu czwartego stopnia

Figure 9. Tree crown extend delineated by using different methods: A – scale of the decrease, B – specified height threshold, C – fitted sphere, D – fourth-degree polynomial

uwypuklenie maksymalnych wartości WMK w ramach pojedynczych koron.

Wielkość piksela w WMK wykorzystanym do segmentacji ma wpływ na dokładność określania liczby drzew. Im piksel jest większy, tym liczba właściwie określonych drzew mniejsza (Holmgren, Persson 2004; Stereńczak et al. 2008). Jest to efekt generalizacji wysokościowego modelu koron drzew, przez co zacierają się

granice pomiędzy pojedynczymi koronami odzwierciedlonymi w modelu (ryc. 8).

Zwiększenie wielkości pikseli powoduje, iż mniejsze z koron dołączane są do większych, które znajdują się w ich najbliższym sąsiedztwie. Ma to miejsce szczególnie w zwartych drzewostanach (Hyypä et al. 2005). Najlepsze wyniki segmentacji otrzymywane są dla modeli o rozdzielczości około 0,5 m (Holmgren, Persson

2004; Heurich, Weinacker 2004; Stereńczak et al. 2008). Zastosowanie modelu o rozdzielczości mniejszej, tj. 1 m, powoduje istotny statystycznie spadek liczby prawidłowo określonych drzew w porównaniu do modeli o rozdzielczości 0,5 m i 0,25 m (Stereńczak et al. 2008). Generalną zasadą, która może wpłynąć na poprawę segmentacji, jest dopasowanie wielkości oczka rastra do wielkości koron. Oczywiście jest to uzasadniona operacja w przypadku obiektów o małej zmienności wielkości koron.

Kolejnym istotnym elementem przetworzenia danych jest sposób określenia zasięgu korony pojedynczego drzewa. W literaturze znaleźć można kilka metod określania zasięgu pojedynczych koron (ryc. 9). Jedną z metod wykorzystuje między innymi dwa przekroje, ustawione do siebie pod kątem prostym. Następnie do obrazu korony, odzwierciedlonej osobno na każdym z przekrojów, dopasowywany jest wykres funkcji wielomianu 4 stopnia. Po określeniu punktu krytycznego dopasowanych funkcji średnica korony określana jest jako średnia z pomiarów wykonanych na dwóch profilach (Popescu 2007). Inną metodą określania zasięgu koron drzew jest dopasowanie wcześniej zdefiniowanej sfery do obrazu korony odzwierciedlonej w WMK w miejscu położenia potencjalnego wierzchołka drzewa (Weinacker et al. 2004). W kolejnej metodzie zasięg korony definiuje się za pomocą granicznej wielkości spadku pomiędzy sąsiednimi pikselami WMK (Diedershausen et al. 2003). Może być ona wyrażona wartością różnicy wysokości czy wielkością spadku pomiędzy sąsiadującymi pikselami, po przekroczeniu której piksel nie jest uznawany za element korony. Inną metodą określania zasięgu koron drzew jest wykorzystanie wartości granicznej definiowanej w odniesieniu do maksymalnej wysokości drzewa (Stereńczak 2013). Na tej podstawie określa się wysokość (np. $0,7 \times H$), poniżej której piksele nie są rozpatrywane jako element korony drzewa. Metoda ta ma na celu zachowanie proporcji pomiędzy odzwierciedloną w WMK najwyższą częścią korony drzewa, a jego faktyczną wielkością (Stereńczak, Miścicki 2012).

5. Sposób weryfikacji wyników detekcji pojedynczych drzew

Rozdział ten nie jest związany bezpośrednio z opisem algorytmów do segmentacji koron drzew. Ma na celu jedynie zasygnalizowanie problemu posiadania odpowiednio dokładnych danych referencyjnych do weryfikacji uzyskanych wyników segmentacji. W tym procesie mogą zostać wykorzystane różnego rodzaju dane, pozyskane w wyniku:

- pomiaru naziemnego pozycji pnia drzewa,

- pomiaru naziemnego pozycji wierzchołka drzewa,
- pomiaru naziemnego zasięgu rzutu poziomego korony drzewa,
- pomiaru stereoskopowego wierzchołka drzewa na stereogramie zdjęć lotniczych,
- pomiaru stereoskopowego zasięgu rzutu poziomego korony drzewa na stereogramie,
- manualnej digitalizacji ortofotomapy lub wysokościowego modelu koron w celu pozyskania pozycji wierzchołków drzew lub zasięgów rzutów poziomych koron drzew,
- naziemnego skanowania laserowego w drzewostanie zintegrowanego z chmurą punktów z lotniczego skanowania laserowego (LSL).

Opisane pomiary naziemne odbywają się z wykorzystaniem sprzętu różnej jakości, przez co wyniki uzyskuje się z różną dokładnością, od centymetrów do metrów. Podobnie interpretacja fotogrametryczna może dotyczyć obrazów cyfrowych o różnej wielkości piksela, pozyskanych w różnych fazach fenologicznych roślinności. Wykorzystanie ortofotomapy czy *true-ortofotomapy* znacząco wpływa na jakość uzyskanych danych, zdecydowanie zmniejszając wiarygodność danych opartych na ortofotomapie na rzecz *true-ortofotomapy*. Poza tym może wystąpić pewna przerwa czasowa pomiędzy pozyskaniem danych z lotniczego skanowania laserowego a pozyskaniem danych referencyjnych, co utrudnia bądź uniemożliwia rzetelne analizy dokładności działania algorytmów. Wszystkie te czynniki mają wpływ na dokładność danych, do których będą odnoszone wyniki automatycznej czy półautomatycznej segmentacji drzewostanu. Trzeba zaznaczyć, że skaner umieszczony jest na samolocie, analizuje więc przestrzeń z lotu ptaka, stąd bardziej prawdopodobne, że dane referencyjne pozyskiwane z tej samej perspektywy lepiej zweryfikują opracowywaną metodę. Niewątpliwie, przy weryfikacji metod do określania liczby pojedynczych drzew oraz metod analizy drzewostanu na poziomie pojedynczych drzew niezbędne jest właściwe zaplanowanie pozyskania danych referencyjnych, by możliwe było wiarygodne ich zweryfikowanie.

6. Podsumowanie

Celem pracy było wskazanie i scharakteryzowanie różnego rodzaju czynników, których wpływ należy rozważyć w trakcie opracowywania metod do detekcji pojedynczych drzew i ich cech z wykorzystaniem danych z lotniczego skanowania laserowego. Świadomość ich występowania i różnego ich wpływu na wyniki detekcji pojedynczych drzew w znacznym stopniu skraca czas prac analitycznych przy tworzeniu nowych algorytmów. Z punktu widzenia rozwoju metod do detekcji poje-

dynczych drzew niezbędne są dalsze prace, szczególnie w drzewostanach wielopiętrowych i liściastych o złożonej strukturze.

Podziękowania

Badania zostały wykonane dzięki grantowi promotorskiemu z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego: „Wykorzystanie danych lotniczego skanowania laserowego do określania zagęszczenia drzew w jedno-piętrowych drzewostanach sosnowych”, NN309 113237 w latach 2009–2011.

Literatura

- Ahokas E., Yu X., Oksanen J., Hyypä J., Kaartinen H., Hyypä H. 2005. Optimization of the scanning angle for countrywide laser scanning. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 3/W19: 115–119.
- Będkowski K., Stereńczak K. 2012. Zarys koncepcji quasi-objektowej metody wielospektralnych zdjęć lotniczych i jej zastosowania do analizy składu gatunkowego drzewostanów. *Roczniki Geomatyki*, 10, 5(55): 19–26.
- Będkowski K., Stereńczak K. 2013. Sessile oak (*Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.) trees variability according to an analysis of multispectral images taken from UAV – first results. *Ecological Questions* (w druku).
- Clark M. L., Clark D. B., Roberts D. A. 2004. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in tropical rain forest landscape. *Remote Sensing of Environment*, 91: 68–89.
- Diedershausen O., Koch B., Weinacker H., Schütt Ch. 2003. Combining LIDAR and GIS Data for the extraction of forest inventory parameters, in: Proceeding of the Scand-Laser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests (red. J. Hyypä, E. Næsset, H. Olsson, T. Granqvist Pahlén, H. Reese). Umeå, Sweden, 157–166. ISSN 1401-1204.
- Green B. 2002. Canny Edge Detection Tutorial. http://www.pages.drexel.edu/~weg22/can_tut.html [17.12.2009].
- Heurich M., Weinacker H. 2004. Automated tree detection and measurement in temperate forest of central Europe using laserscanning data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 8/W2: 198–203.
- Hirata Y. 2004. The effects of footprint size and sampling density in airborne laser scanning to extracting individual trees in mountainous terrain. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 8/W2, 102–107.
- Holmgren J., Persson A. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 90: 415–423.
- Hyypä J., Mielonen T., Hyypä H., Maltamo M., Yu X., Honkovaara E., Kartinen H. 2005. Using individual tree crown approach from forest volume extraction with aerial images and laser point clouds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 3/W19, 144–149.
- Hyypä J., Yu X., Hyypä H., Maltamo M. 2006. Methods of airborne laser scanning for forest information extraction, in: 3-D Remote Sensing in Forestry (eds. T. Koukal, W. Schneider). Feb 14–15, 2006, Vienna, 74–89.
- Kaartinen H., Hyypä J. 2008. Tree Extraction – final report. EuroSDR/ISPRS Commission II Project, 53.
- Koch B., Heyder U., Weinecker H. 2006. Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72 (4): 357–363.
- Korpela I., Dahlin B., Schäfer H., Bruun E., Haapaniemi F., Honkasalo J et al. 2007. Single-tree forest inventory using LIDAR and aerial images for 3D treetop positioning, species recognition, height and crown width estimation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 3/W52: 227–233.
- Malina W., Smiatacz M. 2005. Cyfrowe przetwarzanie obrazów. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. ISBN 978-83-60434-54-3.
- Maltamo M., Eerikäinen K., Pitkänen J., Hyypä J. Vehmas M. 2004a. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment*, 90: 319–330.
- Maltamo M., Mustonen K., Hyypä J., Pitkanen J., Yu.X. 2004b. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research*, 34: 1791–1801.
- Maltamo M., Packalén P., Yu X., Eerikäinen K., Hyypä J., Pitkänen J. 2004c. Identifying and quantifying heterogeneous boreal forest structures using laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 8/W2: 153–156.
- Miścicki S., Stereńczak K., 2012. Cechy uzyskiwane z przetworzeń wysokościowego modelu koron wykorzystywane w dwufazowej metodzie inwentaryzacji zapasu. *Roczniki Geomatyki*, 10, 5(55): 47–54.
- Morsdorf F., Frey O., Meier E., Itten K. I., Allgower B. 2006. Assessment on the influence of flying height and scan angle on biophysical vegetation products derived from airborne laser scanning, in: Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry (red. T. Koukal, W. Schneider). Feb 14–15, 2006, Vienna, 156–161.
- Myszkowski M., Ksepko M., Gajko K. 2009. Detekcja liczby drzew na podstawie danych lotniczego skanowania laserowego. *Archiwum Instytutu Inżynierii Łądowej*, 6: 63–72.
- Nelson R., Krabill W., Maclean G. 1984. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, 15: 201–212.
- Nieniewski M. 2005. Segmentacja obrazów cyfrowych. Metody segmentacji wododziałowej. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. ISBN 83-87674-82-6.
- Persson A., Holmgren J., Soderman U. 2002. Detecting and measuring individual trees using airborne laser scanning.

- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(9): 925–932.
- Persson A., Holmgren J., Söderman U. 2003. Detection, measurements, and species classification of individual trees for forest inventory and visualization, in: Proceeding of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests (red. J. Hyypä, E. Næsset, H. Olsson, T. Granqvist Pahlén, H. Reese). Umeå, Sweden, 223–234. ISSN 1401-1204.
- Popescu S. C. 2007. Estimating biomass of individual pine trees using airborne LIDAR. *Biomass and Bioenergy*, 31(9): 646–655.
- Soloduchin V. I., Kulasov A. G., Utenkov B. I., Żukov A. J., Mažugin I. N., Emaljanov V. P., Kopolov I. A. 1977. Sēmka profila korony dereva s pomoščju lazernego dalnomera. *Lesnoe Chożajstvo*, 2: 71–73.
- 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. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, B6b: 27–33.
- Stereńczak K. 2010a. Wykorzystanie danych lotniczego skanowania laserowego do określania zagęszczenia drzew w jednopiętrowych drzewostanach sosnowych. Praca doktorska. Wydział Leśny, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.
- Stereńczak K. 2010b. Technologia lotniczego skanowania laserowego jako źródło danych w półautomatycznej inwentaryzacji lasu. *Sylwan*, 154(2): 88–99.
- Stereńczak K., Miścicki S. 2012. Crown delineation influence on standing volume calculations in protected area. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, B8: 441–445.
- Stereńczak K. 2013. Określenie zagęszczenia drzewostanów sosnowych i mieszanych z wykorzystaniem danych z lotniczego skanowania laserowego. *Sylwan*, 157 (w druku).
- St-Onge B., Jumelet J., Cobello M., Vega C. 2005. Measuring individual tree height using a combination of stereophotogrammetry and LIDAR. *Canadian Journal of Forest Research*, 34: 2122–2130.
- Tiede D., Blaschke T., Heurich M. 2004. Object-based semi-automatic mapping of forest stands with laser scanner and multi-spectral data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 8/W2: 328–333.
- Tiede D., Hochleitner G., Blaschke T. 2005. A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. ISPRS Workshop CMRT 05. 29–30.08.2005. Wiedeń, Austria.
- Tompalski P., Wężyk P., de Kok R., Kukawski M., 2009. Determining tree number in pine stands using airborne laser scanning data and orthophotos. *Annals of Geomatics*, 2(32): 133–141.
- Vauhkonen J., Ene L., Gupta S., Heinzl J., Holmgren J., Pitkanen J. at al. 2010. Comparative testing of single-tree detection algorithms. w: Proceedings SilviLaser 2010. Freiburg, Niemcy.
- Wack R., Stelzl H. 2005. Laser DTM generation for South-Tyrol and 3D – visualization. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop “Laser scanning 2005”, Enschede, the Netherlands, September 12–14, 2005, 48–53.
- 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. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 8/W2, 50–55.
- Wężyk P., Tompalski P., de Kok R., Szostak M., Kukawski M. 2010. Metoda określania liczby drzew w drzewostanie z wykorzystaniem danych ALS oraz ortoobrazów. *Sylwan*, 154(11): 773–782.

