

MICHAŁ ZASADA, KRZYSZTOF STEREŃCZAK, MICHAŁ BRACH

## Zależność między pierśnicą a cechami koron uzyskanymi z lotniczego skanowania laserowego\*

Relationship between dbh and crown characteristics derived by airborne laser scanner

### ABSTRACT

Zasada M., Stereńczak K., Brach M. 2011. Zależność między pierśnicą a cechami koron uzyskanymi z lotniczego skanowania laserowego. Sylwan 155 (11): 725-735.

The main goal of the study was the determination of the relationship between selected crown parameters derived from automatically processed airborne laser scanning (ALS) data and tree diameter. It has been found that the best set of features for that purpose is crown projection area (CPA) as a predictor and tree basal area (BA) as dependent variable. Two algorithms of crown segmentation ('growing' and 'pouring') have been analysed. Weibull, exponential and hyperbole functions have been the best for description of the relationship between CPA and BA. The relationship between tree diameter and crown characteristics was significant, but relatively weak. This can be attributed to the fact, that the relationship can be modified by various stand characteristics. Including such variables as tree stocking and crown closure should improve the model significantly.

### KEY WORDS

airborne laser scanning, dbh, crown parameters

### ADDRESSES

Michał Zasada <sup>(1)</sup> – e-mail: Michal.Zasada@wl.sggw.pl

Krzysztof Stereńczak <sup>(2)</sup> – e-mail: Krzysztof.Sterenczak@wl.sggw.pl

Michał Brach <sup>(2)</sup> – e-mail: Michal.Brach@wl.sggw.pl

<sup>(1)</sup> Samodzielny Zakład Dendrometrii i Nauki o Produkcyjności Lasu, SGGW; Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa

<sup>(2)</sup> Katedra Urządzenia Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW; Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa

### Wstęp

Współczesne techniki teledetekcyjne oferują coraz większe możliwości automatycznego określania cech drzew i drzewostanów. W przypadku wysokorozdzielczych danych pochodzących z teledetekcji lotniczej i satelitarnej są to przede wszystkim takie cechy jak liczba drzew, ich wysokość oraz charakterystyki korony. Najbardziej obiecującymi technikami do określania cech pojedynczych drzew są wysokorozdzielcze cyfrowe zdjęcia lotnicze [Pollock 1996; Gong i in. 2002; Korpela 2004; Wang i in. 2004] oraz lotnicze skanowanie laserowe [Hyypä i in. 2001; Naesset 2004].

Pierwsze prace opisujące możliwość automatycznego fotogrametrycznego pomiaru wysokości drzew czy wymiarów korony na zdjęciach lotniczych pojawiły się już w latach 70. XX wieku [Kalliovirta, Tokola 2005 za Jakobsons 1970; Talts 1977], choć sama koncepcja jest dużo

\* Dane zostały pozyskane w ramach tematu badawczego „Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskiwanych różnymi technikami geomatycznymi” finansowanego przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych w latach 2006-2008.

starsza [Sayn-Wittenstein, Aldred 1967]. Pomiary takie charakteryzują się dużą niedoskonałością, dotyczą bowiem jedynie wymiarów koron widzianych na zdjęciach, zaś dokładność pomiarów zależy m.in. od skali zdjęcia. Jednak nawet między tak określonymi wymiarami koron (ich średnicą czy powierzchnią) a pierśnicą drzew i ich miąższością istnieje dość silny związek. Zależność ta może być zatem wykorzystana w praktyce pomiaru lasu technikami zdalnymi. Rozwiązania takie funkcjonują z powodzeniem w praktyce leśnej w krajach Ameryki Północnej i Skandynawii [Eid, Naeset 1998; Gingrich i in. 1955; Avery, Meyer 1959].

Zastosowanie lotniczego skanowania laserowego do określania charakterystyk drzew i drzewostanów jest konsekwencją technologicznego rozwoju klasycznej fotogrametrii lotniczej. Stąd też na wstępie zasadne wydaje się przytoczenie krótkiej historii pomiarów fotogrametrycznych takich cech jak wymiary koron drzew i wysokość oraz cech pochodnych, jak np. pierśnica, miąższość, zagęszczenie drzew czy biomasa. Pierwsze zdjęcia fotograficzne dla celów urządzania lasu wykonano w celu wspomagania prac kartograficznych aparatem wyniesionym przez balon w Niemczech w końcu XIX wieku [Będkowski, Mikrut 2006]. W latach 20. XX wieku w Niemczech i Kanadzie rozpoczęto próby określania cech taksacyjnych drzewostanów za pomocą zdjęć lotniczych, zaś do powszechnego użytku technologia ta weszła w latach 40. XX wieku [Wynne 2004]. Szczególnym zainteresowaniem cieszyły się wówczas zagadnienia związane z możliwością wykonywania pomiarów różnych cech drzew i drzewostanów metodami fotogrametrycznymi, w tym przede wszystkim określanie miąższości drzewostanu w rozbiciu na gatunki. Prawdziwy rozkwit badań w zakresie zastosowania zdjęć lotniczych rozpoczął się w latach 60. XX wieku i trwał co najmniej trzy dekady. Powstałe wówczas rozwiązania i aplikacje wykorzystywały zdjęcia analogowe oraz bazowały na doświadczeniu fotointerpretatorów. Pomimo obiecujących wyników, klasyczne pomiary fotogrametryczne na zdjęciach lotniczych nigdy nie zastąpiły pomiarów terenowych. Związane to jest ze znacznie mniejszą precyzją uzyskiwanych wyników, uzależnionych dodatkowo od doświadczenia interpretatora, stosunkowo dużymi kosztami i pracochłonnością oraz pojawieniem się nowych technik (LIDAR, radar, wysokorozdzielcze obrazy cyfrowe), pozwalających na podjęcie prób automatyzacji przetwarzania.

LIDAR (ang. LIght Detecting And Ranging) jest, w uproszczeniu, optycznym odpowiednikiem radaru, wykorzystującym wiązkę światła do uzyskania informacji o badanym obiekcie [Helms 1998]. Większość aktualnie wykorzystywanych w leśnictwie skanerów lotniczych rejestruje co najmniej dwa odbicia (pierwsze i ostatnie), które często odpowiadają górnej warstwie koron oraz powierzchni ziemi. W wielu wypadkach jednak odbierane jest jedno odbicie, które może pochodzić od nieokreślonego obiektu (ziemi, drzew, gałęzi, roślinności runa itp.). Za pomocą odpowiednich algorytmów filtrujących jest jednak możliwe zidentyfikowanie większości niejednoznacznych odbić, co pozwala na budowę numerycznego modelu terenu (NMT) powierzchni ziemi, a następnie na interpolację pierwszych odbić w celu budowy modelu górnej powierzchni drzewostanu (numeryczny model pokrycia terenu, NMPT) i określenie wysokości wszystkich drzew górnej warstwy na badanym obszarze (wysokościowy model koron, WMK). NMPT służyć również może do określenia liczby drzew oraz szerokości widzialnej części koron [Wack, Wimmer 2002; Wynne 2004; Hyypä i in. 2006; Koch i in. 2006].

Przetwarzanie i używanie danych LIDAR-owych niesie ze sobą podobne problemy, jakie znane są z klasycznej fotogrametrii:

- LIDAR mierzy odległość tylko do koron górnej warstwy drzewostanu,
- pomiary wykonane z wykorzystaniem danych LIDAR-owych charakteryzują się błędem systematycznym [Nilsson 1996],

- technologia pozyskiwania danych jest wciąż dosyć droga, szczególnie przy jej zastosowaniu w niewielkiej skali, jednak cena danych systematycznie spada, można się więc z czasem spodziewać znacznie większej ich dostępności.

Jednocześnie dane pochodzące ze skanowania laserowego drzewostanów (zwłaszcza dla gatunków iglastych) nadają się doskonale do automatycznego przetwarzania. Dzięki temu uzyskiwane wyniki są wolne od subiektywizmu interpretatora i z reguły dokładniejsze niż klasyczne pomiary fotogrametryczne. Ponadto w sytuacji, gdy dane LIDAR-owe wykorzystywane są bezpośrednio w modelach empirycznych, to uzyskiwane wielkości (np. wysokość drzewostanu, pierśnicowe pole przekroju, miąższość) są nieobciążone pomimo błędu systematycznego danych LIDAR-owych [Means i in. 2000; Naesset 2002]. Warte podkreślenia jest również to, że model warstwy koron jest charakterystyką całej populacji wysokości drzew górnej warstwy, a nie tylko próbą.

Średnica korony jest jedną z charakterystyk możliwych do bezpośredniego pomiaru za pomocą LIDAR-u i innych nowoczesnych technik fotogrametrycznych. Ze względu na nieregularny kształt koron i ich rzutów problemem jest jednak – podobnie, jak w przypadku pomiarów fotogrametrycznych – definicja średnicy korony i sposób jej określenia. Różni autorzy proponują określanie średnicy korony za pomocą kilku (zwykle 2 lub 4) promieni korony pomierzonych w różnych (zwykle prostopadłych) kierunkach [Popescu i in. 2003; Coops i in. 2004; Heurich, Weinacker 2004; Weinacker i in. 2004]. Popescu i in. [2000] określili średnią szerokość korony wykorzystując do tego celu zwarcie koron i zagęszczenie drzew w drzewostanie. Średnia powierzchnia rzutu korony może być określona poprzez podzielenie powierzchni sumy rzutów koron drzewostanu przez liczbę drzew. Przeciętna średnica korony określana jest wówczas najczęściej jako średnica koła o polu powierzchni równej powierzchni rzutu korony [Popescu i in. 2003].

Badania charakterystyk koron w drzewostanach w wielu wypadkach prowadzone są z myślą o zastosowaniu tych informacji do określania innych cech drzew i drzewostanów. Najczęściej przedmiotem badań jest zależność pomiędzy charakterystykami koron a pierśnicą. Zależność ta może znaleźć zastosowanie przy określaniu grubości drzew na podstawie danych o koronach, co pozwolić może na zastosowanie zdalnych technik pomiarowych do określania cech drzewostanów (pierśnica, pierśnicowe pole przekroju, miąższość, biomasa), oraz do określania cech koron na podstawie prostych pomiarów naziemnych, co wzbogacić może analizy stosunków przestrzennych w drzewostanach [Krajceek i in. 1961; Gering 1995; Wack i in. 2003; Holmgren, Jonsson 2004; Andersen i in. 2005; Hyypä i in. 2005; Persson i in. 2006]. Liczne badania dotyczące zależności między wielkością korony określaną na podstawie pomiarów naziemnych a grubością drzew potwierdzały istnienie dość silnego związku między tymi cechami. Jego siła, mierzona za pomocą współczynnika determinacji, waha się od 0,49 dla drzew różnych gatunków w drzewostanach Puszczy Białowieskiej [Bolibok, Brzeziecki 2000] do ponad 0,96 dla drzew rosnących na otwartej przestrzeni [Krajceek i in. 1961] i różni się w zależności od gatunku, siedliska, położenia geograficznego i stopnia zagęszczenia [Ilvessalo 1950; Kalliovirta, Tokola 2005]. Opisywany związek ma najczęściej charakter liniowy, przynajmniej dla części zakresu pierśnic [Kalliovirta, Tokola 2005; Lamson 1987; Bolibok, Brzeziecki 2000; Hemery i in. 2005].

Pomiary charakterystyk koron na zdjęciach i obrazach lotniczych różnią się znacznie od pomiarów wykonywanych w terenie. Wynika to z faktu, że na zdjęciach lotniczych widoczne są zwykle jedynie drzewa drzewostanu panującego, zaś kształty koron są dodatkowo zniekształcane wpływem koron drzew sąsiadujących [Ilvessalo 1950]. Z tego powodu średnice koron określone zdalnie są zawsze obciążone systematycznym błędem ujemnym. Jako czynniki

ograniczające wykorzystanie zdjęć lotniczych w leśnictwie Będkowski [2005] wymienia dużą zmienność wymiarów drzew w lesie, niedostateczne oświetlenie niższych partii drzewostanów, geometrię kształtu koron drzew, ograniczoną rozdzielczość obrazów, brak lub ograniczony wgląd do poziomu terenu oraz specyfikę rzutu środkowego (zmiana odwzorowania drzew ze wzrostem odległości ich obrazów od punktu głównego). Gering [1995] badał zależność pierśnicy od średnicy korony określonej na podstawie pomiarów naziemnych i lotniczych. Dla badanych gatunków liściastych uzyskał on współczynnik determinacji dla pomiarów terenowych równy 0,801, zaś dla pomiarów lotniczych – 0,708. Współczynnik determinacji dla poszczególnych gatunków wahał się w granicach od 0,644 do 0,935 dla pomiarów terenowych oraz od 0,678 do 0,851 dla pomiarów lotniczych. Podobne badania przeprowadził Oladi [2001]. Dla związku pierśnicy i średnicy korony uzyskał on współczynnik korelacji 0,95 dla danych naziemnych i 0,873 dla danych lotniczych. W literaturze istnieją również prace, w których obserwuje się silniejszy związek między średnicą korony określoną na podstawie zdjęć lotniczych a grubością (pierśnicą) poszczególnych drzew [Spurr 1960; Wynne 2004]. Podczas swoich badań Nash [1949] uzyskał błąd standardowy określania średnicy koron drzew na podstawie zdjęć lotniczych równy 0,6 m. Worley i in. [1955] uzyskali na zdjęciach lotniczych w skali 1:12 000 błąd standardowy określania szerokości koron od 0,9 do 1,2 m. Anderson i in. [2000] badali powierzchnie rzutu korony w celu zbudowania modelu obrazującego związek pomiędzy pierśnicą oraz powierzchnią rzutu korony. Zastosowali oni model liniowy i uzyskali dla różnych gatunków współczynnik determinacji od 0,37 do 0,79.

Głównym celem niniejszej pracy było określenie zależności między niektórymi parametrami koron określonymi na podstawie automatycznie przetworzonych danych LIDAR-owych a pierśnicą na powierzchniach próbnych w nadleśnictwie Milicz (RDLP Wrocław).

## Material i metody

Do analizy zależności między pierśnicą a charakterystykami koron drzew wykorzystano dane pochodzące z pomiaru 24 sosnowych powierzchni próbnych (tab.). Na każdej z nich zarejestrowano położenie każdego drzewa mierząc azymut i odległość od środka powierzchni. Za pomocą średnicomierza pomierzono jego pierśnicę, a za pomocą wysokościomierza elektronicznego Vertex – wysokość.

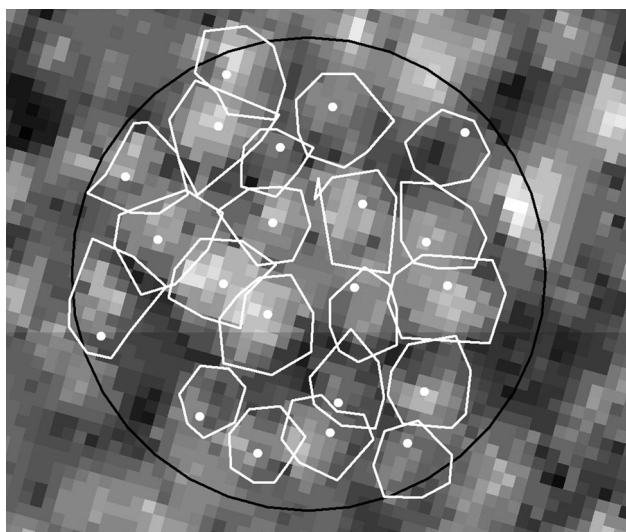
Na każdej z powierzchni dokonano rzutowania koron na powierzchnię. W każdym z 8 analizowanych kierunków określono odległość krańca korony od pnia. Pomiarzy zebrane w terenie zostały przetworzone do postaci cyfrowej. Każdy rzut korony drzewa na powierzchni próbnej stanowił osobny poligon o kształcie ośmiokąta. Poligony te zapisano jako wektorową warstwę danych (ryc. 1).

Na podstawie danych uzyskanych za pomocą lotniczego skanowania laserowego dokonano segmentacji koron drzew na powierzchniach próbnych za pomocą algorytmów wzrastającego regionu (ang. region growing [Hyypä i in. 2001; Maltamo i in. 2004]) i opadowego (ang. pouring [Weinacker i in. 2004; Stereńczak i in. 2008]). Pierwszy z nich wykorzystuje teselację do zlokalizowania wierzchołków lub najwyższych części drzew. W pierwszej kolejności drzewostan dzielony jest na 5-metrowe warstwy wysokościowe. Analiza rozpoczyna się od piętra górnego. Najpierw selekcionowane są najwyższe korony. Ich warstwa jest podwójnie filtrowana filtrem Gaussa. Dla każdej przefiltrowanej warstwy wyznaczane są lokalne maksima, a następnie algorytm przesuwa się o jedną warstwę w dół i analizuje ją w analogiczny sposób. Wszystkie wyszukane maksima stanowią wyjście dla algorytmu „region growing”, który zaczynając od nich rozrasta się równomiernie we wszystkich kierunkach, aż do momentu napotkania innego rosnącego regionu.

Tabela.

Charakterystyka powierzchni próbnych  
Sample plots characteristics

Numer	Wiek [lata]	Powierzchnia [ha]	Liczba drzew [szt./ha]	Pierśnicowe pole przekroju [m <sup>2</sup> /ha]	Przeciętna pierśnica przekrojowa [mm]	Średnia wysokość [m]
7	105	0,05	500	33,9	294	20,61
8	105	0,05	420	29,6	300	22,66
10	105	0,05	320	36,6	381	22,56
11	105	0,05	400	25,5	285	21,44
12	57	0,02	1200	42,9	213	19,65
13	77	0,03	667	32,6	249	20,01
14	67	0,03	933	35,8	221	19,18
15	67	0,03	700	27,7	225	20,39
16	67	0,03	700	28,6	228	19,78
17	80	0,03	433	20,5	246	19,42
18	33	0,01	2300	29,8	129	12,43
19	107	0,05	600	39,8	291	22,49
20	107	0,05	600	37,3	281	22,10
21	107	0,05	340	25,4	309	22,38
23	42	0,02	1900	32,4	147	14,00
24	52	0,05	460	13,3	192	17,20
25	97	0,04	600	28,9	248	23,01
27	97	0,04	500	33,1	291	24,34
28	97	0,04	550	34,7	283	23,46
29	97	0,04	625	39,7	284	22,34
30	107	0,05	360	28,6	318	20,32



Ryc. 1.

Dane referencyjne pozyskane dla powierzchni próbnych

Reference data for sample plots

biała linia – zasięg poszczególnych koron; biała kropka – pozycja wierzchołka drzewa; czarna linia – zasięg powierzchni próbnej  
white line – crown borders; white dot – tree top position; black line – sample plot border

Dlatego granica między dwoma koronami znajduje się zawsze w połowie odległości między parą wierzchołków (lokalnych maksimów). Drugi z zastosowanych algorytmów polega na tworzeniu koron poprzez „oblewanie” punktów uznanych za wierzchołki zidentyfikowanych drzew. Po automatycznej rekonstrukcji koron utworzono bazy danych służące do badania zależności między pierśnicą drzew a charakterystykami koron. Włączono do nich wyłącznie drzewa, które zostały prawidłowo odnalezione przez algorytm segmentujący. W obu przypadkach wyłączono z analiz luki pomiędzy koronami drzew z najwyższego piętra drzewostanu.

Następnie dla wyników obu algorytmów segmentacji koron dokonano badania zależności grubości poszczególnych drzew od cech ich korony. Za pomocą regresji liniowej i nieliniowej określono parametry funkcji opisujących zależność między cechami, zaś poszczególne modele porównano za pomocą współczynnika determinacji oraz AIC (Akaike's Information Criterion). Obliczenia i analizy wykonano za pomocą pakietu statystycznego R [Ihaka, Gentleman 1996].

## Wyniki

Najlepszym zestawem cech do określania zależności między grubością drzew a charakterystykami koron okazały się pierśnicowe pole przekroju drzew jako zmienna zależna oraz powierzchnia rzutu korony (CPA) jako zmienna niezależna. Z analizowanych modeli dla algorytmu „growing region” najlepsze (prawie identyczne) wyniki uzyskano dla zmodyfikowanej funkcji Weibulla o postaci:

$$G_{drzewa} = 1 - e^{-0,009681 \cdot CPA^{0,613236}} \quad [1]$$

i funkcji potęgowej w postaci:

$$G_{drzewa} = 0,009983 \cdot CPA^{0,592654} \quad [2]$$

Wartość współczynnika AIC dla funkcji [1] i [2] równa się odpowiednio  $-1\,113,009$  i  $-1\,113,024$ , a współczynnik determinacji w obu przypadkach wynosi  $0,34$ . Niewiele gorsze wyniki uzyskano dla hiperboli (odwróconego wielomianu pierwszego stopnia – wzór [3]), dla której uzyskano  $AIC = -1111,87$  i  $R^2 = 0,33$ :

$$G_{drzewa} = \frac{CPA}{212,478 + 6,136 \cdot CPA} \quad [3]$$

Wynikowe modele przedstawiono na rycinie 2. Aby na podstawie wartości  $G_{drzewa}$  obliczyć pierśnicę drzewa  $D_{1,3}$  należy użyć wzoru:

$$D_{1,3} = \sqrt{\frac{4000000 \cdot G_{drzewa}}{\pi}} \quad [4]$$

Podobne modele zbudowano używając algorytmu „pouring”, choć w tym przypadku siła związku mierzona wartością współczynnika determinacji była większa niż dla pierwszego algorytmu. Używając równania hiperboli uzyskano model w postaci:

$$G_{drzewa} = \frac{CPA}{178,9232 + 6,7378 \cdot CPA} \quad [5]$$

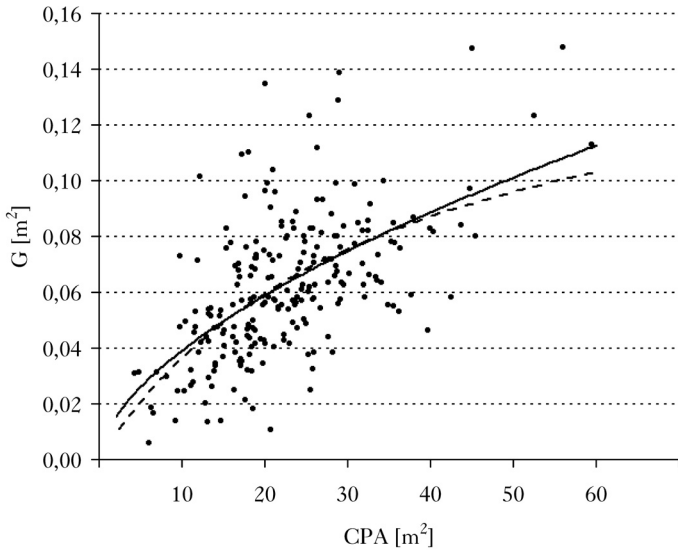
oraz wartość współczynnika determinacji równą  $0,51$ . Modele wykorzystujące funkcję Weibulla

$$G_{drzewa} = 1 - e^{-0,013201 \cdot CPA^{0,529743}} \quad [6]$$

oraz funkcję potęgową

$$G_{drzewa} = 0,013546 \cdot CPA^{0,510109} \quad [7]$$

były niemal identyczne i charakteryzowały się wartością  $R^2$  równą  $0,52$ . Powstałe modele przedstawiono na rycinie 3.

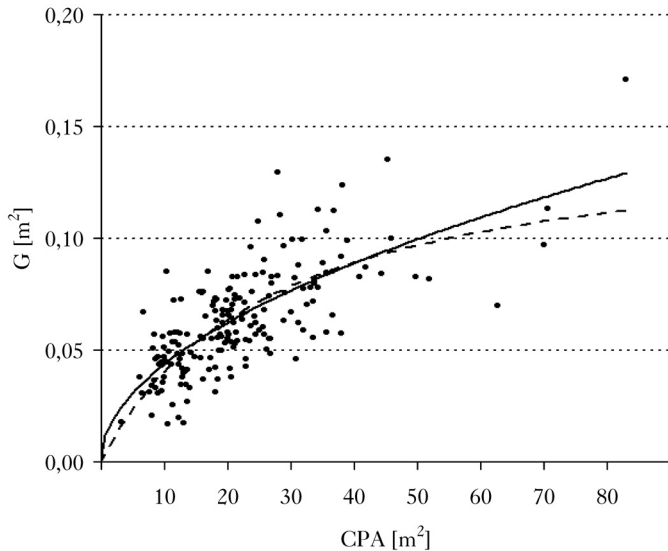


Ryc. 2.

Zależność między grubością drzew a powierzchnią poziomego rzutu korony dla pomiarów laserowych (metoda „region growing”)

Relationship between tree diameter and cross-sectional crown area for laser measurements (‘region growing’ method)

linia ciągła – funkcja Weibulla i potęgowa; linia przerywana – hiperbola  
solid line – Weibull and exponential functions; dotted line – hyperbole



Ryc. 3.

Zależność między grubością drzew a powierzchnią poziomego rzutu korony dla pomiarów laserowych (metoda „pouring”)

Relationship between tree diameter and cross-sectional crown area for laser measurements (‘pouring’ method)

linia ciągła – funkcja Weibulla i potęgowa; linia przerywana – hiperbola  
solid line – Weibull and exponential functions; dotted line – hyperbole

## Dyskusja

Związek między grubością drzew a parametrami koron jest istotny, lecz stosunkowo słaby ( $R^2$  od 0,33 do 0,52). Wynika to zapewne z faktu, że zależność ta może być modyfikowana przez cechy drzewostanu. Jedną z nich jest zagęszczenie drzewostanu i jego zwarcie. Obie te cechy wpływają zarówno na wielkość koron, jak i na wzrost grubości. Włączenie tych cech do modelu mogłoby go poprawić.

Modele uzyskane dla drugiego analizowanego algorytmu charakteryzują się lepszym dopasowaniem. Związane jest to przede wszystkim z niedoskonałością pierwszej metody, wykorzystującej prostą teselację. W jej wyniku automatycznie uzyskane wielkości koron są jedynie pochodną odległości między zidentyfikowanymi wierzchołkami drzew i nie uwzględniają indywidualnego kształtu koron drzew. Algorytmem tym można by zapewne uzyskiwać lepsze wyniki w przypadku analizy drzewostanów o pełnym zwarciu i regularnym rozmieszczeniu drzew.

W pracy niniejszej założono, że wszystkie drzewa w drzewostanie zostały poprawnie zidentyfikowane. Jednak w praktyce największy błąd określania cech całego drzewostanu (np. pierśnicowego pola przekroju czy zapasu) wynika z dużego błędu określania liczby drzew [Hyypä i in. 2005, 2006; Korpela i in. 2007]. Problem segmentacji podejmowany jest przez wiele zespołów badawczych na świecie. Jak wskazują dotychczasowe wyniki porównań opublikowanych algorytmów [Kartinen, Hyypä 2008; Vauhkonen i in. 2010], wiele z nich zostało zweryfikowanych na małej liczbie drzew. Co więcej, metody weryfikacji nie były porównywalne, gdyż wiele z algorytmów wymaga dodatkowych informacji o analizowanym drzewostanie, a niewiele jest w stanie dopasowywać swoje ustawienia do różnej wielkości koron drzew. Często okazywało się, że algorytm wykazywał różną skuteczność (wyrażoną w odsetku poprawnie określonych drzew) w zależności od tego, gdzie był on opracowywany [Vauhkonen i in. 2010]. Wskazuje to na potrzebę rozwijania własnych algorytmów bądź modyfikacji istniejących w celu uchwycenia indywidualnych różnic w gospodarce leśnej i jej wpływu na budowę drzewostanów.

Optymalnym rozwiązaniem, możliwym do praktycznego zastosowania przy pomiarze powierzchni próbnych, może być system teledetekcyjny dostosowany do poziomu pojedynczych drzew (ang. single-tree remote sensing; STRS), łączący w sobie dane z LIDAR-u i cyfrowych zdjęć lotniczych. System taki, opisany m.in. przez Korpelę [2007], może przyjąć formę półautomatycznej aplikacji, w której największym problemem jest automatyczne rozpoznanie gatunku drzewa. Badania wykonane przez autora cytowanej pracy wykazały, że system taki, w którym pomiar pojedynczego drzewa trwa kilka sekund i pozwala na uzyskanie dokładności pomiarów akceptowalnej w praktyce (wysokość około 0,6 m, szerokość korony około 10%, pierśnica drzewa – 13-18 %, współrzędne drzewa – ok. 0,3 m, rozpoznawania gatunku – około 95%).

## Podsumowanie

W pracy przedstawiono zależność między grubością drzew a powierzchnią rzutu koron określoną na podstawie wyników automatycznej segmentacji chmur punktów pozyskanych za pomocą LIDAR-u. Znacznie lepsze wyniki uzyskano dla drugiego, bardziej zaawansowanego algorytmu, dla którego wartość współczynnika determinacji pomiędzy wartościami CPA i G drzewa wyniosła 0,52. Mimo stosunkowo niewielkiej siły tego związku, możliwe jest stworzenie nieobciążonego modelu służącego do automatycznego określania pierśnic drzew. Włączenie do modelu dodatkowych cech modyfikujących wielkość koron i grubości drzew (liczby drzew, stopnia zagęszczenia, zwarcia koron, siedliska, położenia geograficznego) powinno poprawić uzyskiwane modele i ich użyteczność.



Docelowo, system określania cech drzew w drzewostanie, podobny do opisywanego przez Korpele [2007], mógłby wyglądać w następujący sposób:

- ✦ dane ze skanowania lotniczego (ALS) służą do budowy NMT i NMPT oraz identyfikacji wierzchołków drzew, co pozwala na określenie ich współrzędnych oraz wyznaczenie wysokości drzew (z wykorzystaniem WMK),
- ✦ dane te łączone są z informacją o gatunku drzewa oraz uzupełniane o pomiary szerokości/średnicy koron drzew pochodzące z zastosowania automatycznych algorytmów segmentujących wykorzystanych do obróbki danych z ALS lub wysokorozdzielczych obrazów cyfrowych,
- ✦ znajomość gatunku drzewa, jego wysokości oraz wymiarów korony pozwala na wykorzystanie modeli allometrycznych do określenia takich cech drzew, jak pierśnica, miąższość czy wiek,
- ✦ możliwe jest również wykorzystanie informacji o drzewostanach, jakie zawarte są w bazach danych SILP, a znajomość wieku drzewostanu, liczby drzew czy zadrzewienia może w znaczący sposób podnieść dokładność szacowania innych cech drzew.

## Literatura

- Andersen H. E., McGaughey R. J., Reutrbuch S. E. 2005. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sensing of Environment* 94: 441-449.
- Anderson S. C., Kupfer J. A., Wilson R. R., Cooper J. 2000. Estimating forest crown area removed by selection cutting: a linked regression-GIS approach based on stump diameters. *Forest Ecology and Management* 137 (1-3): 171-177.
- Avery G., Meyer M. P. 1959. Volume tables for aerial timber estimating in Northern Minnesota. USDA Lakes States Forest Experimental Station. Station Paper 78.
- Będkowski K. 2005. Fotogrametryczna metoda oceny stanu i zmian wysokościowej struktury warstwy koron w drzewostanach. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Będkowski K., Mikrut S. 2006. Skanowanie laserowe jako źródło informacji przestrzennych dotyczących lasów. Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe „Opracowania cyfrowe w Fotogrametrii, Teledetekcji i GIS”, Stare Jabłonki 2006.
- Bolibok L., Brzeziecki B. 2000. Analiza wybranych zależności allometrycznych dla głównych gatunków drzew Białowieckiego Parku Narodowego. *Sylvan* 144 (6): 73-81.
- Coops N. C., Wulder M. A., Culvenor D. S., St-Onge B. 2004. Comparison of forest attributes extracted from fine spatial resolution multispectral and LIDAR data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 6: 855-866.
- Eid T., Naesset E. 1998. Determination of stand volume in practical forest inventories based on field measurements and photo-interpretation: The Norwegian experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13: 246-254.
- Gering L. R. 1995. The relationship of diameter at breast height and crown diameter for four species groups in Hardin County Tennessee. *Southern Journal of Applied Forestry* 19: 177-181.
- Gingrich S. F., Meyer H. A. 1955. Construction of an aerial stand volume table for upland oak. *Forest Science* 1: 140-147.
- Gong, P., Sheng, Y., Biging, G. S. 2002. 3D Model-based tree measurement from high-resolution aerial imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68 (11): 1203-1212.
- Helms J. A. 1998. The dictionary of forestry. The Society of American Foresters, Bethesda.
- Hemery G. E., Savill P. S., Pryor S. N. 2005. Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. *Forest Ecology and Management* 215: 285-294.
- Heurich M., Weinacker H. 2004. Automated tree detection and measurement in temperate forest of central Europe using laserscanning data. „Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment”, WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Holmgren J., Jonsson T. 2004. Large Scale Airborne Laser Scanning of Forest Resources in Sweden. W: Proceedings of the ISPRS working group VII/2 „Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment”, Freiburg, Germany. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (8/W2): 157-160.
- Hyypä J., Kelle O., Lehtikoinen M., Inkinen M. 2001. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-dimensional tree height models produced by laser scanner. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing* 39: 969-975.
- 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. ISPRS Workshop „Laser scanning 2005”. Enschede, Holandia.
- Hyypä J., Yu X., Hyypä H., Maltamo M. 2006. Methods of airborne laser scanning for forest information extraction. W: Koukal T., Schneider W. [red.]. 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11: 63-78.

- Ihaka R., Gentleman R. 1996. R: a language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics* 5: 299-314.
- Ilvessalo Y. 1950. On the correlation between crown diameter and the stem of trees. *Communications Instituti Forestalis Fenniae* 38 (2).
- Kaartinen H., Hyypä J. 2008. EuroSDR/ISPRS Project, Commission II "Tree Extraction", Final Report, EuroSDR. European Spatial Data Research, Official Publication 53.
- Kalliovirta J., Tokola T. 2005. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information. *Silva Fennica* 39 (2): 227-248.
- Koch B., Diederhagen O., Straub Ch., Weinacker H. 2006. Standwise delineation based on 3-D information from LIDAR. W: Koukal T., Schneider W. [red.]. 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11: 1-14.
- Korpela I. 2004. Individual tree measurements by means of digital aerial photogrammetry. *Silva Fennica monographs* 3.
- Korpela I. 2007. Single-Tree Remote Sensing with LiDAR and Multiple Aerial Images. University of Helsinki.
- Krajicek J. E., Brinkman K. A., Gingrich S. F. 1961. Crown competition - A measure of density. *Forest Science* 7 (1): 35842.
- Lamson N. I. 1987. D.b.h./crown diameter relationship in mixed Appalachian hardwood stands. Res. Pap. NE-610. Broomall, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.
- Maltamo M., Mustonen K., Hyypä J., Pitkanen J., Yu. X. 2004. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1791-1801.
- Means J. E., Acker S. A., Fitt B. J. 2000. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66 (11): 1367-1371.
- 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. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, Wiedeń, Austria.
- Naesset E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*. 80: 88-99.
- Naesset E. 2004. Practical large-scale forest stand inventory using small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19 (2): 164-179.
- Nash A. J. 1949. Some tests on the determination of tree heights from air photographs. *Forest Chronicle* 25: 243-249.
- Nilsson M. 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of the Environment* 56: 1-7.
- Oladi D. 2001. Developing A Forest Growth Monitoring Model Using Thematic Mapper Imagery. W: Proceedings ACRS 2001 - 22 Asian Conference on Remote Sensing, Singapur, 5-9 listopada 2001. Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP), National University of Singapore 2: 1457-1462.
- Persson A., Holmgren J., Soderman U. 2006. Identification of individual trees by combining very high resolution laser data with multi-spectral imagines. W: Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, Wiedeń, Austria.
- Pollock, R. J. 1996. The automatic recognition of individual trees in aerial images of forests based on a synthetic tree crown model. *Praca doktorska*. University of British Columbia.
- Popescu S. C., Wynne R. H., Nelson R. H. 2000. Estimating forest vegetation biomass using airborne lidar measurements. W: Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, 10-12 January 2000, Lake Buena Vista, Fla. ERIM International, Inc., Ann Arbor, Mich. 346-353.
- Popescu S. C., Wynne R. H., Nelson R.F. 2003. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29 (5): 564-577.
- Sayn-Wittenstein L., Aldred A. H. 1967. Tree volumes from large scale photos. *Photogrammetric Engineering* 33 (1): 69-73.
- Spurr S. H. 1960. *Photogrammetry and photo-interpretation with a section on applications to forestry*. New York, Ronald Press.
- 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, Youth Forum* 38(B6b): 27-33.
- Vauhkonen J., Ene L., Gupta S., Heinzl J., Holmgren J., Pitkanen J., Solberg S., Wang Y., Weinacker H., Hauglin K. M., Lien V., Packalen P., Gobakken., Koch B., Naesset E., Tokola T., Maltamo M. 2010. Comparative testing of single-tree detection algorithms. *Proceedings of SilviLaser 2010 Freiburg, Niemcy*.
- Wack R., Schardt M., Barrucho L., Lohr U., Oliveira T. 2003. Forest inventory for eucalyptus plantations based on airborne laserscanner data. WG III/3 Workshop „3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data”. Drezno, Niemcy.
- Wack R., Wimmer A. 2002. Digital Terrain Models from Airborne Laser scanner Data – a Grid based approach. In: *Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium Graz*: 293-296.

- Wang L., Gong P., Biging G. S. 2004. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70 (3): 351-358.
- Weinacker H., Koch B., Heyder U., Weinacker R. 2004. Development of filtering, segmentation and modeling modules for LIDAR and multispectral data as a fundament of an automatic forest inventory system. „Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment”, WG VIII/2. Freiburg, Niemcy.
- Worley D. P., Meyer H. A. 1955. Measurements of crown diameter and crown cover and their accuracies for 1:12 000 photographs. *Photogrammetric Engineering* 1955: 372-375
- Wynne R. H. 2004. *Forest Mensuration with Remote Sensing: A Retrospective and a Vision for the Future*. Gen. Tech. Rep. SRS-75, Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 109-116.

## SUMMARY

### Relationship between dbh and crown characteristics derived by airborne laser scanner

Contemporary remote sensing techniques offer increasing possibility for automatic determination of tree and stand characteristics. One of the most promising technologies for determining some features of single trees is airborne laser scanning (ALS). The main goal of the presented study was to determine the relationship between selected tree crown parameters derived using automatically processed LIDAR data and their breast height diameter on the sample plots located in the Milicz forest district (SW Poland). Twenty four pine sample plots have been used for the analyses (tab.)

Based on the performer analyses it has been found that the best set of features that the best set of features for determination of relationship between tree diameter and crown characteristics is crown projection area (CPA) as a predictor and tree basal area (BA) as dependent variable. Out of the analyzed models for 'growing' algorithm, models [1] and [2] performed the best, slightly worse appeared to be model [3]. For 'pouring' algorithm, models [5], [6] and [7] have been built.

The relationship between tree diameter and crown characteristics is significant, but relatively weak ( $R^2$  from 0,33 to 0,52). This is probably due to the fact, that there are various stand characteristics influencing this relationship. One of them is tree stocking and stand closure, which affect both: crown width and diameter growth. Including these characteristics would improve the model.

Models elaborated based on the second analyzed algorithm are characterized by better fit to the data. This is partially attributed to the fact, that the first method uses simple tessellation, in which automatically determined sizes crown sizes are the result of the distance between identified tree tops and it does not take into account gaps in the stand.

In the presented study it has been assumed that all trees in the stand were correctly identified. However, in practice the largest error in the whole stand characteristics determination (e.g. basal area or volume) arises from the error in determination of number of trees. This problem urgently requires further development and improvement.

The optimal solution, possible for the practical use during plots' measurements, can be remote sensing system applied on the single tree level (so called 'single-tree remote sensing' – STRS), which uses LIDAR data and digital airborne photos. Such a system, described among others by Korpela [2007], could be designed as an automatic computer application, which biggest problem would be automatic recognition of tree species.