

MICHAŁ ZASADA, KRZYSZTOF STEREŃCZAK

## Dokładność określania wybranych parametrów rozkładów pierśnic drzew w drzewostanach sosnowych za pomocą naziemnego skanowania laserowego\*

Accuracy of the selected tree diameter distributions parameters assessed using terrestrial laser scanning in Scots pine stands

### ABSTRACT

Zasada M., Stereńczak K. 2013. Dokładność określania wybranych parametrów rozkładów pierśnic drzew w drzewostanach sosnowych za pomocą naziemnego skanowania laserowego. Sylwan 157 (12): 883-891.

When using such methods as terrestrial laser scanning (TLS), one of the major factors influencing the accuracy of stand characteristics determination is the visibility of trees on a sample plot, which is often obscured by the shadow effect caused by trees located closer to the plot center. Because of this, the percentage of the identified trees and basal area depends on the distance from the plot center: the accuracy of stocking determination decreases as the plot radius increases. The values of such stand characteristics as average breast height diameter, standard deviation of tree diameters and percentiles of the tree diameters' distributions assessed based on all trees and the visible trees only are not significantly different from each other for circular sample plots with 20 m radius. Skewness and kurtosis are not significantly different in plots with radius of 5 and 10 meters. For the 15 m plot radius the difference was significant for about 15% of the analyzed plots. The obtained results correspond with previous findings that report that on the circular sample plots with radius up to 15 m the errors for the number of trees and basal area are relatively small and can be accepted in the practical inventory. The results support the circular sample plots size optimization, including measurements performed using a point cloud.

### KEY WORDS

forest inventory, circular sample plots, quadratic mean diameter, percentile, skewness, kurtosis

### ADDRESSES

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

Krzysztof Stereńczak <sup>(2)</sup> – e-mail: K.Sterenczak@ibles.waw.pl

<sup>(1)</sup> Samodzielna Pracownia Dendrometrii i Nauki o Produkcyjności Lasu; SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa

<sup>(2)</sup> Zakład Informatyki i Modelowania; Instytut Badawczy Leśnictwa; Sękocin Stary; ul. Braci Leśnej 3; 05-090 Raszyn

### Wstęp

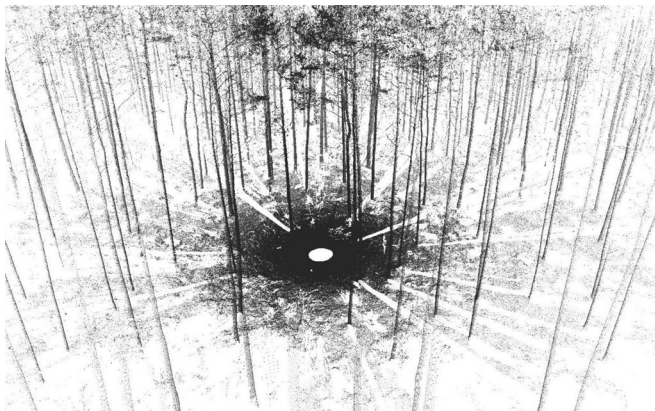
Podczas inwentaryzacji zasobów drzewnych, zwłaszcza za pomocą metod matematyczno-statystycznych, leśnicy często wykorzystują kołowe powierzchnie próbne. Rozwój technologiczny dostarcza coraz nowocześniejszych narzędzi pomiarowych, szczególnie metod zdalnych. Wśród nich szczególnie obiecującą i szybko rozwijającą się technologią, dającą duże nadzieje na automatyzację wykonywanych pomiarów, jest naziemne skanowanie laserowe (NSL, ang. terrestrial

\* Praca powstała w ramach realizacji grantu N N309 139739 pt. „Zastosowanie terenowego skanowania laserowego do pomiaru wybranych cech ekosystemów leśnych” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

laser scanning, TLS). We współczesnej literaturze naukowej znaleźć można wiele publikacji opisujących potencjał skanowania laserowego [Thies i in. 2003; Simonse i in. 2003; Aschoff, Spiecker 2004; Hopkinsom i in. 2004; Thies, Spiecker 2004; Henning, Radtke 2006; Bienert i in. 2006b, 2007] czy prace traktujące o możliwości automatyzacji analiz [Bienert i in. 2006a; Maas i in. 2008]. Również w Polsce od kilku lat prowadzone są badania dotyczące zastosowania technologii NSL w leśnictwie, co znajduje swoje odzwierciedlenie w coraz większej liczbie publikacji na ten temat [Chirrek i in. 2007; Wencel i in. 2008; Zawila-Niedźwiecki, Zasada 2008; Zawila-Niedźwiecki i in. 2008; Chmielewski i in. 2010; Chmielewski, Bator 2012].

Jednym z czynników wpływających na dokładność określania różnych cech drzewostanu za pomocą NSL jest widoczność drzew na powierzchni próbnej. Brak możliwości zidentyfikowania niektórych drzew spowodowany jest przez efekt cienia, tj. przez przesłanianie drzew leżących dalej przez osobniki znajdujące się bliżej środka powierzchni/miejsca, gdzie znajduje się skaner (ryc. 1). W związku z tym istnieje duże prawdopodobieństwo powstania systematycznego błędu ujemnego podczas szacowania liczby drzew czy pierśnicowego pola przekroju. Zagadnienie to było przedmiotem zainteresowania od lat, gdyż podobny problem występuje np. przy pomiarach wykonywanych relaskopem [Bitterlich 1948, 1984]. W metodzie tej jednym z głównych źródeł błędów systematycznych jest opuszczanie drzew zasłoniętych przez inne. W wyniku prowadzonych badań tego zjawiska ustalone zostały optymalne praktyczne wartości stałych relaskopu odpowiednie do zastosowania w różnych warunkach [Iles 2012], co w istocie oznacza wyznaczenie właściwej wielkości powierzchni próbnej pozwalającej na zminimalizowanie zaniżania mierzonych wartości z powodu ograniczonej widoczności drzew. Podobne badania zostały wykonane przez Zasadę i in. [2013] w stosunku do pomiarów wykonywanych na kołowych powierzchniach próbnych. Autorzy ci stwierdzili, że liczba drzew ukrytych przed osobą mierzącą bądź promieniem lasera emitowanym przez skaner rośnie wraz ze wzrostem promienia powierzchni próbnej, co oznacza jednocześnie zwiększanie się błędu szacowania liczby drzew i innych pokrewnych charakterystyk drzewostanu. Z drugiej strony nie musi to oznaczać jednakowego spadku szacowania innych parametrów drzewostanu, np. średniej i przeciętnej pierśnicy, miar zmienności czy też parametrów różnych rozkładów pierśnic.

W literaturze spotkać można wiele prac poświęconych modelowaniu rozkładów pierśnic oraz metodom szacowania ich parametrów. Najczęściej opisywanymi są rozkład Weibulla [Bailey, Dell 1973; García 1981; Shifley, Lentz 1985; Gorgoso i in. 2007; Lei 2008], wykładniczy [Meyer, Stevenson 1943; Meyer 1952; Leak 1964], Pearsona [Schnur 1934], gamma [Nelson 1935], logarytmiczno-normalny [Bliss, Reinker 1964], beta [Clutter, Bennett 1965; McGee, Della-Bianca



Ryc. 1.

Przykładowa chmura punktów będąca efektem zobrazowania powierzchni leśnej za pomocą naziemnego skanowania laserowego z widocznym efektem cienia (jaśniejsze pasma)

Sample TLS cloud points, which illustrates forest area, with the visible shade effect (lighter bands)

1967; Lenhard, Clutter 1971], logit-logistyczny [Wang, Rennols 2005], SB Johnsona [Hafley, Shreuder 1977; Siekierski 1992], podwójny normalny [Bruchwald 1988; Siekierski 1991] czy Birnbaum-Saundersa [Podlaski 2008]. W ostatnim czasie opublikowano również kilka prac dotyczących zastosowania rozkładów mieszanych do modelowania rozkładów pierśnic w drzewostanach o złożonej strukturze [Zhang i in. 2001; Liu i in. 2002; Zasada, Cieszewski 2005; Podlaski 2010, 2011; Podlaski, Roesch 2013].

Do najczęściej stosowanych metod określania parametrów rozkładów pierśnic należą:

- metoda największej wiarygodności (wymagająca jak najlepszego oszacowania początkowych wartości parametrów),
- metoda momentów (wykorzystująca związek między momentami zwykłymi bądź centralnymi rozkładów teoretycznych a momentami wyznaczonymi na podstawie próby),
- metoda percentyli (wiążąca poszczególne charakterystyki rozkładów z określonymi percentylami skumulowanej funkcji gęstości rozkładu).

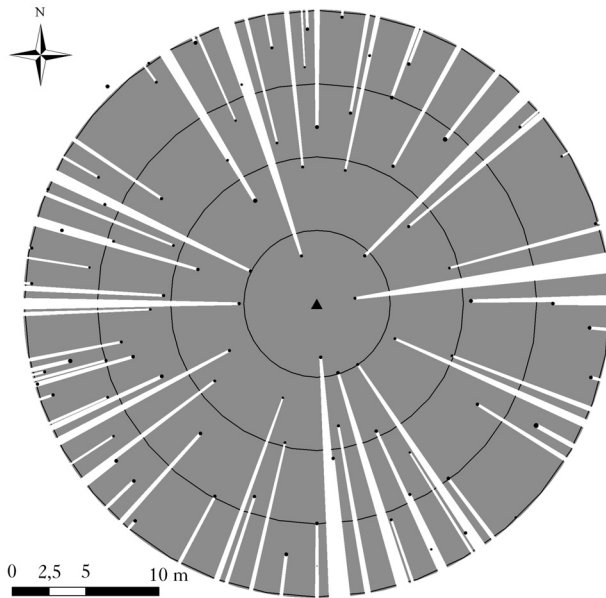
Spośród cech wykorzystywanych przez różne algorytmy do określania parametrów rozkładów pierśnic wykorzystuje się takie wielkości jak liczba drzew, minimalna i maksymalna pierśnica drzew w drzewostanie, średnia arytmetyczna pierśnic drzew, przeciętna pierśnica drzew, odchylenie standardowe pierśnic drzew, pierśnica modalna, mediana pierśnic drzew, percentyle (szczególnie 25, 31, 63, 75 i 95) czy skośność i kurtoza rozkładu.

Celem niniejszej pracy jest określenie dokładności szacowania wybranych parametrów rozkładów pierśnic za pomocą danych pozyskanych wyłącznie z drzew widocznych ze środka kołowych powierzchni próbnych o różnym promieniu. Analiza ta ma sprawdzić możliwość wykorzystania danych pochodzących z naziemnego skanowania laserowego, które pozwalają na pomiar wyłącznie widocznych drzew. Wartości te mogą służyć do ogólnego scharakteryzowania drzewostanu oraz znaleźć zastosowanie przy ewentualnym kalibrowaniu obciążonych błędem systematycznym wyników uzyskanych na drodze skanowania laserowego. W pracy przeprowadzono wyłącznie analizę teoretyczną związaną z wpływem wzajemnego zasłaniania się drzew na uzyskane wyniki, pomijając na tym etapie znaczenie dokładności pomiaru grubości wykonywanego na chmurze punktów pozyskanej ze skanera laserowego.

## Materiał i metody

W pracy wykorzystano dane pochodzące z 27 powierzchni próbnych założonych w drzewostanach sosnowych zlokalizowanych w Uroczysku Głuchów (Leśny Zakład Doświadczalny SGGW w Rogowie, 51°45'19"N, 20°06'30"E). Drzewostany te rosły na siedlisku Bśw, BMśw i LMśw. Ich wiek wahał się od 41 do 116 lat, a zasobność – od 156 do 327 m<sup>3</sup>/ha. Przeciętna pierśnica wynosiła 14-36 cm, a wysokość – 14-26 m.

Na każdej z powierzchni określono położenie i pierśnicę każdego drzewa znajdującego się w odległości do 20 metrów od jej środka. Na wszystkich powierzchniach pomierzono łącznie 2671 drzew. Na każdej ze współśrodkowych powierzchni o promieniu 5, 10, 15 i 20 m określono następujące cechy: liczbę drzew na hektar, minimalną i maksymalną pierśnicę, średnią arytmetyczną pierśnic, przeciętną pierśnicę, odchylenie standardowe pierśnic, 25, 31, 50, 63, 75 i 95 percentyl pierśnic, skośność i kurtozę rozkładu, które potraktowano jako referencję. Dla każdej powierzchni za pomocą oprogramowania ArcGIS utworzono plan pni (ryc. 2), który użyto do określenia cechy rozkładu pierśnic drzewostanu na podstawie drzew widocznych ze środka powierzchni w odległości 5, 10, 15 i 20 m. Uzyskane wyniki porównano z wartościami referencyjnymi (określonymi na podstawie pomiarów wszystkich drzew na powierzchni o założonym promieniu). Hipotezę, że zbiór drzew widocznych pochodzi z populacji o takim samym rozkładzie co zbiór wszystkich



Ryc. 2.

Przykładowy plan pni na powierzchni próbnej nr 13  
Spatial distribution of trees on study site #13

drzew na powierzchni o danym promieniu, zbadano testem Kołmogorowa-Smirnowa dla dwóch prób. Ze względu na niezgodność rozkładów analizowanych cech z rozkładem normalnym, do testowania hipotez o równości średnich i median zastosowano test Wilcozona. Hipotezę o równości odpowiednich percentyli testowano za pomocą modyfikowanego testu znaków. Równość wariancji badano testem F. Z braku formalnych testów do określania istotności różnic między skośnością i kurtozą rozkładów posłużono się metodą symulacyjną „bootstrap” [Efron 1982], określając przedziały ufności ( $\alpha=0,95$ ) dla różnic między skośnością i kurtozą rozkładów na podstawie 10 tysięcy prób. Wszystkie analizy przeprowadzono za pomocą pakietu statystycznego R [Ihaka, Gentleman 1996].

## Wyniki

Uzyskane statystyki testu Kołmogorowa-Smirnowa nie pozwoliły odrzucić hipotezy, że zbiór drzew widocznych i zbiór wszystkich drzew na powierzchni charakteryzują się takim samym rozkładem dla żadnej z analizowanych powierzchni. Wartość statystyki testowej  $p$  dla promieni 5 i 10 m we wszystkich przypadkach była równa jeden, dla promienia 15 m – nie mniejsza niż 0,9979, zaś dla 20 m wahała się od 0,8768 do 1,0000.

Również w przypadku średniej i przeciętnej pierśnicy obliczanych na podstawie widocznych drzew dla żadnej z powierzchni nie odrzucono hipotezy, że są one równe wartościom referencyjnym. Stwierdzono, że przeciętna pierśnica określana na podstawie widocznych drzew jest większa niż określana na podstawie wszystkich drzew na powierzchni. Wiąże się to z większym prawdopodobieństwem zasłonięcia drzew cieńszych niż grubszych. Różnica między średnimi pierśnicami rośnie liniowo wraz ze zwiększaniem się promienia powierzchni. Jednak jest ona nieistotnie różna od zera (wartości statystyki testowej  $p$  dla promienia 5 m były nie mniejsze niż 0,8079, dla 10 m – nie mniejsze niż 0,707, dla 15 m równe co najmniej 0,5521, a dla 20 m – 0,3369).

Test znaków dla żadnego z analizowanych percentyli nie pozwolił na odrzucenie hipotezy o równości tych miar przy ich określaniu na podstawie wszystkich drzew na powierzchni oraz na

podstawie drzew widocznych. Wykonując test F dla wariancji rozkładów, również nie można było odrzucić hipotezy o równości tych statystyk dla żadnego z analizowanych promieni. Dla poszczególnych promieni wartości statystyki testowej p były nie mniejsze niż odpowiednio: 0,8058; 0,8457; 0,5950 i 0,3778. Symulacje „bootstrap” różnic między wskaźnikami skośności rozkładów wykazały, że przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$  różnią się one istotnie między sobą dla 33% powierzchni o promieniu 20 metrów oraz dla 18,5% powierzchni o promieniu 15 metrów. W pozostałych przypadkach różnica między wskaźnikami skośności była nieistotnie różna od zera. Wyniki dla kurtozy były podobne. Stwierdzono, że przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$  kurtozy różnią się istotnie między sobą również dla 33% powierzchni o promieniu 20 metrów oraz dla 15% powierzchni o promieniu 15 metrów. W pozostałych przypadkach różnica między kurtozami była nieistotnie różna od zera.

## Dyskusja

Pomimo szybkiego rozwoju skanowania laserowego niewiele jest prac kompleksowo ujmujących kwestię dokładności określania cech drzewostanów z wykorzystaniem tej technologii. Stosunkowo bogata jest literatura dotycząca zastosowania lotniczego skanowania laserowego (LSL) do modelowania rozkładu pierśnic. Gobbaken i Nasset [2005] określili dokładność szacowania parametrów rozkładów pierśnic przy użyciu percentyli uzyskanych za pomocą LSL. Używając 12 różnych percentyli obliczonych na podstawie danych z 141 powierzchni próbnych o obszarze 300-400 m<sup>2</sup>, stwierdzili, że uzyskana miąższość różniła się od tej określonej na ziemi o od 1,2 do 2,1%. Z kolei Maltamo i in. [2007] badali dokładność określania zapasu drzewostanu z wykorzystaniem rozkładów pierśnic uzyskanych za pomocą LSL. Analizując 472 powierzchnie próbne o promieniu 9 m, stwierdzili, że uzyskane wyniki charakteryzują się dużą dokładnością. Z kolei Thomas i in. [2008] wykorzystali rozkład Weibulla i stwierdzili wysoką zależność między modelowanym a zmierzonym zagęszczeniem i powierzchnią pierśnicowego pola przekroju dla różnych grup pierśnic ( $R^2$  od 0,78 do 0,88).

W przypadku naziemnego skanowania laserowego liczba prac jest znacznie mniejsza. Tanaka i in. [1998] stwierdzili, że przy odległości do nieco ponad 10 m możliwe jest uzyskanie dokładnych pomiarów grubości przy pomocy naziemnego skanera laserowego. Nie zajmowali się oni jednak wpływem widoczności na dokładność szacowania parametrów drzewostanu, w tym rozkładów pierśnic. Hopkinson i in. [2004] stwierdzili, że na powierzchniach próbnych o wymiarach 35×35 m obserwuje się niewielki systematyczny błąd ujemny określania miąższości, równy średnio około 7% wartości referencyjnej. Autorzy ci skonkludowali, że naziemne skanowanie laserowe stanowi obiecującą technologię do zastosowania w leśnictwie, która wymaga jednak intensywnych prac nad polepszaniem algorytmów automatycznej identyfikacji i pomiaru drzew. Ujemny błąd miąższości [Hopkinson i in. 2004] jest wynikiem tego, że przy obserwacji drzew na kołowych powierzchniach próbnych część z nich jest przesłonięta, przez co przy określaniu liczby drzew popełnia się błąd systematyczny. Do podobnych wniosków doszli też Zasada i in. [2013] po przeprowadzeniu analizy widoczności drzew na kołowych powierzchniach próbnych.

Błąd wynikający z zaniżania liczby widocznych drzew jest stosunkowo niewielki przy promieniu powierzchni próbnej nieprzekraczającym 15 m [Zasada i in. 2013]. Okazuje się jednak, że dokładność określania wielu innych cech rozkładów grubości drzew na powierzchniach próbnych jest znacznie większa. Takie parametry rozkładów pierśnic, jak przeciętna pierśnica, odchylenie standardowe pierśnic czy percentyle są zbliżone do wartości porównawczych (tj. określanych na podstawie wszystkich drzew na powierzchni), a różnica jest nieistotna statystycznie przy poziomie istotności 0,05. Wskaźniki skośności i kurtozy były istotnie różne dla 33% powierzchni o promieniu 20 m, zaś wraz ze zmniejszaniem się analizowanego obszaru różnice

w stosunku do wartości referencyjnych zmniejszyły się. Przy promieniu 15 m miary te były istotnie różne jedynie dla około 15% analizowanych powierzchni, zaś przy promieniach mniejszych różnice między wskaźnikami skośności i kurtozami były nieistotne. W aspekcie praktycznym rezultaty te pokrywają się z wynikami Zasady i in. [2013], którzy badając użyteczną z punktu widzenia szacowania liczby drzew wielkość promienia kołowej powierzchni próbnej, stwierdzili, że dla 15 m dokładność określania zagęszczenia i pierścnicowego pola przekroju jest akceptowalna (błąd nie przekracza 5%).

## Wnioski

- ✦ Przęciana pierśnica, odchylenie standardowe pierśnic i percentyle rozkładów określane na podstawie wszystkich drzew i drzew widocznych na kołowych powierzchniach próbnych o promieniu do 20 metrów nie różnią się od siebie istotnie.
- ✦ Wskaźniki skośności i kurtozy nie różnią się istotnie od siebie dla powierzchni o promieniu 5 i 10 m. Przy powierzchni o promieniu 15 m istotną różnicę stwierdzono jedynie na około 15% analizowanych powierzchni.
- ✦ Uzyskane rezultaty korespondują z wynikami opublikowanymi przez Zasadę i in. [2013], którzy stwierdzili, że przy promieniu powierzchni próbnej równym 15 m popełniany jest stosunkowo niewielki, akceptowalny błąd szacowania liczby drzew i pierścnicowego pola przekroju drzewostanu.

## Podziękowania

Autorzy dziękują Aleksandrowi Rybskiemu za pomoc w opracowywaniu danych naziemnych.

## Literatura

- Aschoff T., Spiecker H. 2004. Algorithms for the Automatic Detection of Trees in Laser-Scanner Data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (8/W2): 71-75.
- Bailey R. L., Dell T. R. 1973. Qualifying diameter distributions with the Weibull function. *Forest Science* 19: 97-104.
- Bienert A., Maas H. G., Scheller S. 2006a. Analysis of the information content of terrestrial laser scanner point clouds for the automatic determination of forest inventory parameters. W: Koukal T., Schneider W. [red.]. 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11. 44-49.
- Bienert A., Scheller S., Keane E., Mohan F., Nugent C. 2007. Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laser scanner point clouds. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (3/W52): 50-55.
- Bienert A., Scheller S., Keane E., Mullooly G., Mohan F. 2006b. Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters. W: Maas H. G., Schneider D. [red.]. Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', Dresden, 25-27 October 2006.
- Bitterlich W. 1948. Die Winkelzählprobe. *Allg. Forst-und Holzwirt. Zeitung* 59: 4-5.
- Bitterlich W. 1984. The relascope idea: relative measurements in forestry. Commonwealth Agricultural Bureau, Slough, UK.
- Bliss C. I., Reinker K. A. 1964. A log-normal approach to diameter distribution in even-aged stands. *Forest Science* 10: 350-360.
- Bruchwald A. 1988. Simulation algorithm of the distribution of b.h. diameters of trees in pine stands. *Annals of Warsaw Agricultural University – SGGW-AR, Forestry and Wood Technology* 37: 91-95.
- Chirrek M., Strzełiński P., Wencel A., Zawila-Niedzwiecki T., Zasada M., Jagodziński A. M. 2007. Wybrane zdalne metody szacowania biomasy roślinnej w ekosystemach leśnych jako podstawa raportowania bilansu węgla. *Roczniki Geomatyki* 5 (4): 7-16.
- Chmielewski L. J., Bator M. 2012. Hough transform for opaque circles measured from outside and fuzzy voting for and against. W: Computer Vision and Graphics: Proc. Int. Conf. ICCVG 2012, Warsaw, Poland, 24-26 Sep 2012. Springer Verlag. 313-320.
- Chmielewski L., Bator M., Zasada M., Stereńczak K., Strzełiński P. 2010. Fuzzy Hough transform-based methods for extraction and measurements of single trees in large-volume 3D terrestrial LIDAR data. W: Bolc L., Tadeusiewicz R., Chmielewski L. J., Wojciechowski K. [red.]. Computer Vision and Graphics: Proc. Int. Conf. ICCVG 2010, Warsaw, Poland, 20-22 Sep 2010. Springer Verlag. 265-274.

- Clutter J. L., Bennett F. A. 1965. Diameter distributions in old-field slash pine plantations. Georgia Forest Research Council Report 13.
- Efron B. 1982. The jackknife, the bootstrap, and other resampling plans. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA.
- García O. 1981. Simplified method-of-moments estimation for the Weibull distribution. New Zealand Journal of Forestry Science 11: 304-306.
- Gorgoso J. J., Álvarez González J. G., Rojo A., Grandas-Arias J. A. 2007. Modelling diameter distributions of *Betula alba* L. stands in northwest Spain with the two-parameter Weibull function. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 16 (2): 113-123.
- Gobakken T., Naset E. 2005. Weibull and percentile models for lidar-based estimation of basal area distribution. Scandinavian Journal of Forest Research 20: 490-502.
- Hafley W. L., Shreuder H. T. 1977. Statistical distributions for fitting diameter and height data in even-aged stands. Canadian Journal of Forest Research 7: 481-487.
- Henning G. H., Radtke P. J. 2006. Ground-based Laser Imaging for Assessing Three-dimensional Forest Canopy Structure. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 72 (12): 1349-1358.
- Hopkinson C., Chasmer L., Young-Pow C., Treitz P. 2004. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. Canadian Journal of Forest Research 34: 573-583.
- Ihaka R., Gentleman R. 1996. R: A Language for Data Analysis and Graphics. Journal of Computational and Graphical Statistics 5 (3): 299-314.
- Iles K. 2012. Some Current Subsampling Techniques in Forestry. Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences 4 (2): 77-80.
- Leak W. B. 1964. An Expression of Diameter Distribution For Unbalanced, Uneven-Aged Stands and Forests. Forest Science 10: 39-50.
- Lei Y. 2008. Evaluation of three methods for estimating the Weibull distribution parameters of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*). Journal of Forest Science 54 (12): 566-571.
- Lenhard J. D., Clutter J. L. 1971. Cubic-foot yield tables for old-field loblolly pine plantations in the Georgia Piedmont. Georgia Forest Research Council Report 22 (3).
- Liu C., Zhang L., Davis C. J., Solomon D. S., Gove J. H. 2002. A finite mixture model for characterizing the diameter distribution of mixed-species forest stands. Forest Science 48: 653-661.
- Maas H.-G., Bienert A., Scheller S., Keane E. 2008. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. International Journal of Remote Sensing 29 (5): 1579-1593.
- Maltamo M., Suvanto A., Packalen P. 2007. Comparison of basal area and stem frequency diameter distribution modelling using airborne laser scanner data and calibration estimation. Forest Ecology and Management 247 (1-3): 26-34.
- McGee C. E., Della-Bianca L. 1967. Diameter distributions in natural yellow-poplar stands. USDA Forest Service Research Paper SE-25.
- Meyer H. A. 1952. Structure, growth, and drain in balanced uneven-aged forests. Journal of Forestry 50: 85-92.
- Meyer H. A., Stevenson D. D. 1943. The structure and growth of virgin beech-birch-maple-hemlock forests in northern Pennsylvania. Journal of Agricultural Research 67: 465-484.
- Nelson T. C. 1964. Diameter distribution and growth of loblolly pine. Forest Science 10: 105-115.
- Podlaski R. 2008. Characterization of diameter distribution data in near-natural forests using the Birnbaum-Saunders distribution. Canadian Journal of Forest Research 38: 518-527.
- Podlaski R. 2010. Two-component mixture models for diameter distributions in mixed-species, two-age cohort stands. Forest Science 56: 379-390.
- Podlaski R. 2011. Modelowanie rozkładów pierśnic drzew z wykorzystaniem rozkładów mieszanych. I. Definicja, charakterystyka i estymacja parametrów rozkładów mieszanych. Sylwan 155 (4): 244-252.
- Podlaski R., Roesch F. A. 2013. Aproksymacja rozkładów pierśnic w dwugeneracyjnych drzewostanach za pomocą rozkładów mieszanych. I. Estymacja parametrów. Sylwan 157 (8): 587-596.
- Schnur G. L. 1934. Diameter distributions for old-field loblolly pine stands in Maryland. Journal of Agricultural Research 49: 731-743.
- Shifley S. R., Lentz E. L. 1985. Quick estimation of the three-parameter Weibull to describe tree size distributions. Forest Ecology and Management 13: 195-203.
- Siekierski K. 1991. Three methods of estimation of parameters in the double normal distribution and their applicability to modelling tree diameter distributions. Annals of Warsaw Agricultural University – SGGW, Forestry and Wood Technology 42: 13-17.
- Siekierski K. 1992. Comparison and evaluation of three methods of estimation of the Johnson SB distribution. Biometrical Journal 34: 879-895.
- Simone M., Aschoff T., Spiecker H., Thies M. 2003. Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial Laserscanning. Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests, Umea. 251-257.

- Tanaka T., Yamaguchi J., Takeda Y. 1998. Measurement of forest canopy structure with a laser plane range-finding method – development of a measurement system and applications to real forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 91: 149-160.
- Thies M., Aschoff T., Spiecker H. 2003. Terrestrische Laserscanner im Forst – für forstliche Inventur und wissenschaftliche Datenerfassung. *AFZ/Der Wald* 58 (22): 1126-1129.
- Thies M., Spiecker H. 2004. Evaluation and Future Prospects of Terrestrial Laser-Scanning for Standardized Forest Inventories. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (8/W2): 192-197.
- Thomas V., Oliver R. D., Lim K., Woods M. 2008. LiDAR and Weibull modeling of diameter and basal area. *Forestry Chronicle* 84 (6): 866-875.
- Wang M., Rennols K. 2005. Tree diameter modelling: introducing the logit-logistic distribution. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 1305-1313.
- Wencel A., Wężyk P., Zasada M. 2008. *Możliwości zastosowania naziemnego skaningu laserowego w leśnictwie*. W: Zawila-Niedźwiecki T., Zasada M. [red.]. 2008. *Techniki geomatyczne w inwentaryzacji lasu – potrzeby i możliwości*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa. 77-89.
- Zasada M., Cieszewski C. J. 2005. A finite mixture distribution approach for characterizing tree diameter distributions by natural social class in pure even-aged Scots pine stands in Poland. *Forest Ecology and Management* 204: 145-158.
- Zasada M., Stereńczak K., Dudek W. M., Rybski A. 2013. Horizon visibility and accuracy of stocking determination on circular sample plots using automated remote measurement techniques. *Forest Ecology and Management* 302: 171-177.
- Zawila-Niedźwiecki T., Stereńczak K., Bałazy R., Wencel A., Strzeliński P., Zasada M. 2008. Lidar w leśnictwie. *Teledetekcja Środowiska* 39: 57-64.
- Zawila-Niedźwiecki T., Zasada M. [red.]. 2008. *Techniki geomatyczne w inwentaryzacji lasu – potrzeby i możliwości*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Zhang L. J., Gove J. H., Liu C., Leak W. B. 2001. A finite mixture of two Weibull distributions for modeling the diameter distributions of rotated-sigmoid, uneven-aged stands. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 1654-1659.

## SUMMARY

### Accuracy of the selected tree diameter distributions parameters assessed using terrestrial laser scanning in Scots pine stands

During the inventory of forest resources, especially when using the statistics-based methods, foresters often use circular sample plots. At the same time the development of the technology provides new innovative measuring tools, particularly utilizing remote-sensing techniques. Among them one of the most promising and fast-developing technologies seems to be terrestrial laser scanning (TLS). When using such methods as TLS, one of the major factors influencing the accuracy of stand characteristics determination is the visibility of trees on a sample plot, which is often obscured by the shadow effect caused by trees located closer to the plot center. Because of this, the percentage of the identified trees and basal area depends on the distance from the plot center: the accuracy of stocking determination decreases as the plot radius increases.

The main goal of the presented studies was to assess the theoretical accuracy of the selected parameters of the diameter distributions that were determined using exclusively data from trees visible from the center of the circular sample plots of various radii. The study was carried out only for errors related to the impact of mutual shadowing of the trees, omitting at this stage the impact of the accuracy of the diameter measurements based on the cloud of points originating from TLS data. The obtained values can be used for the overall description of the stand structure and for the calibration of the biased data originating from TLS. The total of 27 circular sample plots located in Forest Experimental Station Rogów, central Poland, was used, with 2671 trees measured and mapped within 5, 10, 15 and 20 m radius from the plot center.



The values of such stand characteristics as average breast height diameter, standard deviation of tree diameters and percentiles (25<sup>th</sup>, 31<sup>st</sup>, 50<sup>th</sup>, 63<sup>rd</sup>, 75<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup>) of the tree diameters' distributions assessed based on all trees and the visible trees only were not significantly different from each other for circular sample plots with 20 m radius. Skewness and kurtosis are not significantly different in plots with radius of 5 and 10 meters. For the 15 m plot radius the difference was significant for about 15% of the analyzed plots. The obtained results correspond with conclusions of Zasada et al. [2013] that on the circular sample plots with radius up to 15 m the errors for the number of trees and basal area are relatively small and can be accepted in the practical inventory. The results support the circular sample plots size optimization, including measurements performed using a point cloud.