

**NAZIEMNY SKANING LASEROWY
W INWENTARYZACJI MIĄŻSZOŚCI
DRZEWOSTANÓW SOSNOWYCH**

**TERRESTRIAL LASER SCANNING IN THE INVENTORY
OF SCOTS PINE STAND VOLUME**

Piotr Wężyk, Radosław Sroga

Laboratorium GIS i Teledetekcji, Katedra Ekologii Lasu, Wydział Leśny
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Słowa kluczowe: naziemny skaniny laserowy, miąższność drzewa, wykładnik kształtu
Keywords: terrestrial laser scanning, tree trunk volume, shape exponent

Wstęp

Nadrzędnym celem gospodarki leśnej w ostatnich dekadach przestało być jedynie pozyskiwanie surowca drzewnego i maksymalizacja jego produkcji, ale w głównej mierze zapewnienie trwałości ekosystemów leśnych przez niedopuszczenie do przerwania ciągłości procesów: wzrostu, pozyskania i odnawiania lasu. Jednocześnie należy zapewnić by las pełnił funkcje pozaprodukcyjne, ochronne i ogólnospołeczne (Stępień, 2008). Prawidłowe prowadzenie gospodarki leśnej wymaga odpowiedniego zaplanowania zabiegów gospodarczych i ich realizacji, które opierają się przede wszystkim na dokładnej inwentaryzacji zasobów leśnych, a także określeniu dynamiki zmian w nich zachodzących (wzrostu, uszkodzeń, wyleśień itp.). Tradycyjne metody inwentaryzacyjne stosowane w leśnictwie opierają się na dokonaniach naukowców i praktyków często jeszcze z XIX i XX wieku (Grunder, Schwappach, 1952). Do obliczania miąższności drzew używa się specjalnych tablic opracowanych na bogatym materiale empirycznym. Tablice te stanowią najczęściej zestawienie modelowych miąższności dla drzew o znanych parametrach: pierśnicy ($d_{1,3}$ – średnicy na wysokości 1,3 m od powierzchni gruntu) oraz wysokości (h). Bardzo często zdarza się jednak, że wartości odczytane z tablic nie korespondują z rzeczywistością, tj. pnie drzew okazują się na przykład o wiele bardziej pełne (mniej zbieżyste) niż ich wzorce. Zmienność ekotypowa w obrębie gatunku może być duża i kształtowana przez liczne czynniki środowiska, stąd wciąż istnieje potrzeba stworzenia nowej metody inwentaryzacyjnej, uniezależniającej wykonawców tych prac od danych tablicowych, pochodzących sprzed bardzo wielu lat, ale wciąż w Polsce stosowanych (Cieszewski, Zasada, 2003; Szymkiewicz, 1971). Nowe możliwości dla in-

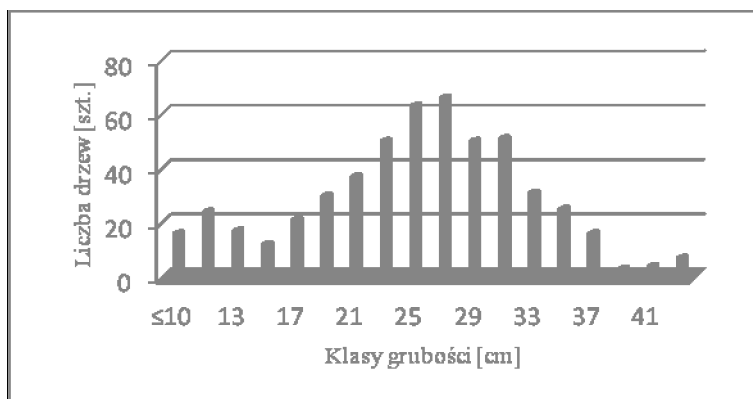
wentaryzacji leśnej otwierają technologie zdalnego pozyskiwania informacji, a w szczególności naziemne skanowanie laserowe (ang. *Terrestrial Laser Scanning* – TLS), które może posłużyć w celu określania wybranych cech dendrometrycznych drzew i parametrów drzewostanów (Wężyk i in., 2009; Tompalski, Kozioł, 2008; Simonse et al., 2004; Bienert et al., 2010). Celem prezentowanych badań było zaproponowanie nowej metody obliczania miąższości drzew za pomocą danych pozyskanych technologią TLS, przy jednoczesnym wykorzystaniu własności brył obrotowych. Wyniki otrzymane metodą naziemnego skaningu TLS porównano do wartości referencyjnych z tablic miąższości drzew stojących.

Metodyka prac

Prace terenowe

Naziemny skanowanie laserowe przeprowadzono w drzewostanach sosnowych na terenie nadleśnictwa Milicz (Obręb Milicz, RDLP Wrocław; woj. dolnośląskie) w listopadzie 2006 roku, w ramach projektu zleconego przez DGLP i koordynowanego przez SGGW. W pracach wykorzystano skaner FARO LS880, charakteryzujący się technologią przesunięcia fazowego (ang. *phase shift*). Badaniami objęto 21 kołowych powierzchni próbnych położonych w drzewostanach sosnowych różnych klas wieku (20 ÷ 107 lat; rys. 1). Przeciętna pierśnica dla wszystkich analizowanych powierzchni kołowych w drzewostanach sosnowych obrębu Milicz wynosiła odpowiednio: $d_{1,3TAX} = 26,28$ cm, $d_{1,3OBWÓD} = 26,02$ cm i $d_{1,3AUC} = 26,25$ cm.

Skaner ustawiano najpierw na środku powierzchni kołowej (s1), a następnie na trzech stanowiskach zewnętrznych (s2÷s4). Działanie to umożliwiało (po połączeniu wszystkich 4 skanów) otrzymanie pełnej chmury 3D obrazującej pnie drzew na powierzchniach kołowych (Wężyk et al., 2007). Prace terenowe obejmowały także pozyskanie zestawu danych referencyjnych, pochodzących z pomiarów przeprowadzonych metodami tradycyjnymi stosowanymi w inwentaryzacji leśnej. Dane referencyjne (pozyskane przez firmę TAXUS SI i Uniwersytet Rolniczy w Krakowie) obejmowały takie parametry drzew jak: położenie względem środka powierzchni (pomiar biegunowy), pierśnica (d1,3 m), średnicę pni na wysokości 5,0 m od



Rys. 1. Histogram liczebności drzew w poszczególnych klasach grubości analizowanych drzewostanów sosnowych w obrębie Milicz

powierzchni gruntu, wysokość drzewa, wysokość podstawy korony, wymiary korony (w ośmiu kierunkach). Dane te były weryfikowane i uzupełniane podczas badań terenowych realizowanych w czerwcu 2007 roku i w 2008 roku (Wężyk et al., 2008b; rys. 1).

Prace kameralne

Integrację chmur punktów TLS z poszczególnych stanowisk przeprowadzano w oprogramowaniu Faro Scene 4.0 (FARO) na drodze selekcji (wskazanie półautomatycznie w obrazie planarnym), a tym samym wyznaczenia środka (znany promień 0,07 m) poszczególnych sfer (kul) referencyjnych. W celu integracji chmur ze sobą należało spełnić warunek widoczności co najmniej 3 sfer na każdym z czterech obrazów planarnych. W oprogramowaniu tym dokonywano także wstępnej filtracji chmury punktów, czyli usuwano licznie występujące błędne odbicia (tzw. szumy). Po tym etapie dokonano pomiarów średnicy pni drzew na wysokościach 1,3 m i 5,0 m od wymodelowanej powierzchni gruntu (NMT) metodą PIXEL i PIPE (Wężyk i in., 2007). Metoda PIXEL (rys. 2) polegała na manualnym pomiarze odległości pomiędzy pikselami obrazu planarnego pnia, natomiast metoda PIPE (rys. 3) polegała na półautomatycznym wpasowaniu walca na punkty TLS tworzące pień drzewa. Kolejny etap działań przeprowadzany był w oprogramowaniu Terrasolid (moduły: Terrascan, Terramodeler) i obejmował pomiar wysokości drzew oraz wysokości podstawy koron. W dalszej kolejności tworzone przekroje poprzeczne pni przez chmurę punktów uzyskując tzw. wycinki (ang. *slice*). W tym celu należało wyznaczyć klasę gruntu (Aschoff, Spiecker, 2004), co wykonano przy użyciu programu Terrascan (Axelsson, 2000). Dopiero od klasy gruntu rozpoczynało się selekcjonowanie przekrojów (szerokości w pionie 4 cm; Aschoff et al., 2004) i klasyfikacja punktów na podstawie odległości pionowej od gruntu (rys. 4). Zastosowano analizy typu *convex-hull* oprogramowania ArcGIS ESRI 9.2. – z punktów należących do poszczególnych klas wycinków generowano poligony przekrojów poprzecznych pni drzew na różnych wysokościach. W sytuacji, gdy nie wszystkie pnie drzew zostały zeskanowane z 3 lub 4 pozycji skanera (s1÷s4), wygenerowane poligony stanowiły jedynie wycinek walca. By uzyskać rzeczywiste pola przekrojów takich pni drzew, zastosowano algorytm działający w środowisku ArcView 3.2 ESRI (Kozioł, Wężyk, 2007).

Metoda brył obrotowych

Metoda brył obrotowych służy określeniu miąższości drzew, wykorzystując w tym celu wykładnik kształtu obliczany na podstawie relacji kolejnych pól powierzchni przekrojów poprzecznych pnia drzewa położonych w określonej odległości od jego wierzchołka (wzór 1). W tym celu korzysta się z własności brył obrotowych (Bruchwald, 1999):

$$\frac{g_a}{g_b} = \left(\frac{a}{b}\right)^r \quad (1)$$

gdzie:

g_a , g_b – pola powierzchni przekrojów pnia drzewa w odległości a i b od wierzchołka [m^2],

a , b – odległości kolejnych przekrojów od wierzchołka [m],

r – wykładnik kształtu bryły obrotowej (pnia drzewa).

Po przekształceniu powyższej zależności otrzymuje się wzór na wykładnik kształtu:

$$r = \log_{\frac{a}{b}} g_a - \log_{\frac{a}{b}} g_b \quad (2)$$

Przy określonej powyższym równaniem (2) wartości wykładnika kształtu drzewa, a także dzięki pomiarzeniu wysokości (długość pnia) i pola powierzchni przekroju (dla danej odległości od wierzchołka), można obliczyć miąższość drzewa ze wzoru (3):

$$V = \frac{1}{1+r} * g_a * \left(\frac{h}{a}\right)^r * h \quad (3)$$

gdzie: V – miąższość drzewa [m^3],
 h – wysokość drzewa [m].

Wyniki

Pole pierśnicowego przekroju ($g_{1.3}$)

Miąższość drzew określana jest tradycyjnie iloczynem pierśnicowego pola przekroju ($g_{1.3}$), wysokości drzewa (h) i pierśnicowej liczby kształtu ($f_{1.3}$). Ten ostatni parametr jest z kolei ilorazem miąższości strzały (pnia) w korze oraz objętości walca opartego na przekroju pierśnicowym w korze i całkowitej wysokości drzewa (Bruchwald i in., 2000). Największe znaczenie dla dokładności określania miąższości drzewa ma błąd popełniany przy określaniu $g_{1.3}$. W prezentowanej pracy koncentrowano się na analizie różnic wynikających pomiędzy polem powierzchni przekrojów pierśnicowych ($g_{1.3}$) drzew generowanych z wycinków chmury punktów TLS z tymi, obliczanymi na podstawie tradycyjnych pomiarów. Zestaw danych referencyjnych stanowiły różne pola powierzchni obliczone na podstawie: obwodów pnia ($g_{1.3 \text{ OBWODY}}$) wykonywanych taśmą oraz pomiaru pierśnic drzew. Pomiaru wykonane zostały przez Uniwersytet Rolniczy w Krakowie (tzw. AUC, $g_{1.3 \text{ AUC}}$ – średnia z pomiarów średnicomierzem w czterech kierunkach prostopadłych do promieni lasera) i przez firmę TAXUS SI (tzw. TAX, $g_{1.3 \text{ TAXUS}}$ – pomiar w jednym kierunku). Uzyskane wyniki pozwoliły na dokonanie zestawienia wartości błędów określania pola powierzchni przekroju pierśnicowego dla poszczególnych stopni grubości, w pełni automatyczną metodą TLS (Kozioł, Wężyk, 2007; tab.1). Średni błąd dla analizowanych pni sosen wyniósł zaledwie -2,72%, co można interpretować jako zaniżenie wartości przekroju pierśnicowego. W stosunku do pomiarów średnicomierzem średnia wartość błędu dla analizowanych klas wyniosła -1,60% (-1,42% dla pomiaru TAX i -1,78% dla pomiaru AUC). W stosunku do pomiarów obwodów taśmą, błąd metody TLS osiągnął poziom aż -4,97%, co wskazuje na wyraźne zawyżanie pomiaru przez pomiary nieregularnych obwodów. Zaobserwowano, iż wartość błędu metody TLS zmienia znak z dodatniego (przeszacowanie) na ujemny (niedoszacowanie) wraz z wiekiem drzewostanu i ma to miejsce w przypadku klasy 17 cm grubości (rys. 5). Maksymalne błędy metody TLS stwierdzono dla klasy > 42 cm, które dla wariantu referencji TAX wyniosły -10,45%. W przypadku referencji pomiaru AUC dokonywanego pierśnicomierzem dla klasy grubości 33 cm wyniosły -6,71%. Maksymalny błąd metody TLS w stosunku do metody bazującej na pomiarze obwodu stwierdzono w klasie grubości 17 cm (-12,42%).

Stosując wagowanie wartości błędu metody TLS liczbą drzew w poszczególnych stopniach grubości, błąd metody TLS kształtował się w stosunku do pomiaru średnicomierzem na poziomie: -2,14% pomiar TAX, -2,54 pomiar AUC. Błąd metody TLS w stosunku o obwodów pni mierzonych taśmą wynosił -6,15%.

Pierśnicowe pole przekroju było również określane na podstawie pierśnicy mierzonej na obrazie planarnym (intensywności) chmury punktów TLS metodami: manualną PIXEL i półautomatyczną PIPE. Do pomiaru zastosowano oprogramowanie Faro Scene 4.0 (Wężyk et al., 2007). Wyniki otrzymane metodą PIXEL wykazały bardzo wysoką zgodność $R^2 = 96.1\%$ (praktycznie identyczną) z wynikami metodą PIPE, w przypadku której otrzymano $R^2 = 96,2\%$ w stosunku do referencji jaką stanowiły pomiary pierśnicomierzem wykonywane prostopadłe do padającej wiązki lasera. Obie te metody są jednak niezmiernie pracochłonne i tylko w przypadku PIPE możliwa jest pewna jej półautomatyzacja.

Pole przekroju pnia na wysokości 5,0 m od gruntu

Średnia bezwzględna różnica wyliczona z modułów różnic pól powierzchni przekrojów określanych metodami standardowego pomiaru oraz TLS wyniosła 7.4%. Błędy określania pierśnicowych pól przekrojów metodą TLS są niewielkie. Pomiar tradycyjny nie jest pozbawiony błędów, co wynika z zastosowania optycznych urządzeń do pomiaru grubości pnia na wysokości 5 m. Mając powyższe na uwadze należałoby się poważnie zastanowić nad odpowiedzią na pytanie: Czy dane z naziemnego skaningu laserowego nie powinny w zasadzie stanowić referencji?

Analogicznie jak w przypadku pierśnicowego pola przekroju, także w tym przypadku badano poprawność określania powierzchni przekroju metodami PIXEL i PIPE, otrzymując średni błąd bezwzględny odpowiednio 6,76% i 1,61%.

Wysokość drzewa

Dokładność określania wysokości drzew obliczono w oparciu o dane referencyjne pochodzące z dwóch niezależnych źródeł, tj.: z pomiarów tradycyjnych przeprowadzonych przy pomocy hipsometru Vertex IV (Haglöf) oraz z numerycznego modelu powierzchni terenu (NMPT) wygenerowanego na podstawie lotniczego skanowania laserowego (ang. *Airborne Laser Scanning; ALS*) przeprowadzonego dla analizowanych drzewostanów w 2007 roku (Wężyk et al., 2008b). Średnia różnica wysokości drzew pomiędzy odczytami z chmury punktów TLS a pomiarami wysokościomierzem wyniosła +0,42 m. Różnica odczytów wysokości drzew pomiędzy chmurą punktów ALS a TLS wyniosła +0,83 m przy współczynniku $R^2 = 0,94$. Należy zaznaczyć, że wysokości pochodzące z lotniczego skaningu laserowego (ALS) przyjęte zostały jako referencyjne (Wężyk i in., 2008a), stąd też przy obliczaniu miąższości drzew metodą „brył obrotowych”, skorygowano wysokości (długości pni) o wartość 0,83 m.

Miąższość pni drzew

Wartości miąższości drzew uzyskane technologią TLS przy wykorzystaniu wzoru na bryły obrotowe różniły się od odczytów z tablic Schwappacha (Grunder, Schwappach, 1952) średnio o 4,5%. Stwierdzono tendencję powiększającego się niedoszacowania miąższości drzew określaną metodą TLS, wzrastającą wraz z wiekiem drzewostanu (tab. 1).

Tabela 1. Zestawienie średnich ważonych różnic miąższości drzew określonej metodą brył obrotowych (TLS) w stosunku do danych referencyjnych (tablic Schwappacha) w poszczególnych klasach wieku drzewostanu

Wiek drzewostanu (lata)	Klasa wieku	Średnia ważona różnic miąższości TLS oraz tablic Schwappacha [%]
21 ÷ 40	II	+ 1,8
41 ÷ 60	III	- 2,4
61 ÷ 80	IV	- 4,1
81 ÷ 100	V	- 5,5
101 ÷ 120	VI	- 6,6

Przeprowadzone badania, poza opisaną tendencją metody, wykazały również pewną niedoskonałość stosowanych powszechnie tablic jako danych referencyjnych. W jednym z analizowanych pododdziałów (220d, powierzchnie nr: 19, 20, 21) zaobserwowano stałe różnice w stosunku do danych tablicowych na poziomie około -8.0%, utrzymujące się niemal dla wszystkich sosen. Analizując przyczyny zwrócono uwagę na stosunkowo niskie wartości dla stosunku pól powierzchni przekrojów drzew na wysokości 5,0 m i 1,3 m. Konfrontacja tych wyników z danymi referencyjnymi zebranymi w terenie oraz z wynikami metod PIXEL i PIPE potwierdziła, iż automatycznie generowane pola przekrojów metodą TLS mają prawidłową wartość. Opisane drzewa charakteryzują się silniejszą zbieżnością niż zakładają to modele użyte w tablicach Schwappacha, a ich bryła walca jest mniej regularna.

Na podstawie uzyskanych wyników obliczono zasobność drzewostanów [m³/ha] w poszczególnych pododdziałach, w których rozlokowano powierzchnie kołowe TLS i porównano ją do danych z tablic zasobności i przyrostu drzewostanów (Szymkiewicz, 1971) dla drzew stojących (tab. 2). Średnia bezwzględna różnica kształtowała się na poziomie około -6.0%, co oznacza stosunkowo niewielkie niedoszacowanie w przypadku zastosowania automatycznej metody TLS.

Tabela 2. Zestawienie średnich ważonych różnic miąższości drzew określonej metodą brył obrotowych (TLS) w stosunku do danych referencyjnych (tablic Szymkiewicza) w poszczególnych pododdziałach

Nr pododdziału w obrębie Milicz	Wiek drzewostanu (wg SILP)	Średnia ważona różnic miąższości TLS oraz tablic Szymkiewicza (1971) [%]
213h	107	- 5,91
214c	97	- 4,56
217b	53	- 1,95
217c	42	- 0,29
220d	107	- 7,93
230b	33	+ 1,82
232a	80	- 5,04
232b	67	- 5,62
233a	77	+ 5,48
233b	57	- 4,22
236a	105	- 6,10

Wnioski

Badania potwierdziły wysoką przydatność technologii naziemnego skaningu laserowego TLS w nowej metodzie określania miąższości drzew i zasobności drzewostanów, którą można by zastosować w pracach z zakresu inwentaryzacji zasobów leśnych. Różnice w uzyskiwanych wynikach miąższości, wobec tradycyjnie wykorzystywanych modelowych tablic, nie powinny być traktowane jedynie jako błąd metody. Tylko badania wykonane na drzewach ściętych mogłyby jednoznacznie wskazać czy wartości tabelaryczne mogą być wciąż uważane za referencyjne. Zmienność osobnicza (genetyczna) – potęgowana oddziaływa-

niem mikrosiedliska, mikroklimatu czy zabiegów hodowlanych – wskazuje na potrzebę tworzenia lokalnych tablic (np. dla poziomego obrębu czy oddziału, a może nawet siedliska) dla celów inwentaryzacji drzewostanów. Dokładność określania miąższości pni drzew na podstawie wykładnika kształtu obliczanego z przekrojów pni prawdopodobnie odpowiada dokładności określania pola powierzchni przekroju pierśnicowego. Tę wartość można było oszacować w oparciu o dane referencyjne. Pole powierzchni automatycznie wygenerowanych przekrojów pni z chmury punktów TLS okazały się bliższe danym referencyjnym niż obliczone metodami manualną PIXEL czy półautomatyczną PIPE (w obrazie planarnym TLS). Wysokości drzew, użyte we wzorach w prezentowanych badaniach, przyjęto ze skaningu lotniczego ALS jako bardziej wiarygodnego od pomiarów naziemnych wykonywanych tradycyjnie. Wcześniejsze badania (Wężyk et al., 2008b) wykazały, iż wysokości drzew odczytane z chmury punktów TLS są wysoko skorelowane z wartościami modelu koron drzew generowanego z pierwszego odbicia (ang. *First Echo; FE*) i różnią się od nich o niemal stałą wartość. Można oczekiwać, że w niedalekiej przyszłości dane ALS będą szeroko dostępne w Polsce i z czasem zostaną przyjęte jako referencja do modeli wzrostu drzewostanów. Pozostałe dane referencyjne, takie jak średnica pnia na wysokości 5,0 m, były w zasadzie niemożliwe do zweryfikowania bez ścinki drzew i dokonania bezpośrednich pomiarów.

Zaproponowana nowa metoda określania miąższości drzew pozwala na odejście od tradycyjnego sposobu pomiaru pierśnicy drzewa, pola przekroju pierśnicowego i wysokości drzewa. Do obliczenia wykładnika kształtu potrzebna jest znajomość pól dwóch dowolnych przekrojów pnia położonych na różnych wysokościach. Optymalna sytuacja dotyczy przekrojów leżących powyżej podszytu (np. 2-3 m) oraz poniżej nasady korony drzewa (np. 15 m). Na tych wysokościach pnie sosen nie są zwykle zasłonięte, dlatego ułatwione jest generowanie poprawnych przekrojów pni (ang. *slice*). Niezmiernie ważna jest również przyjęta metoda skanowania, tj.: jendo- lub wielostanowiskowa, od której w głównej mierze zależy poprawność automatycznego określania liczby drzew na powierzchni kołowej (Tompalski, Wężyk, 2009). Pozyskanie danych technologią skaningu naziemnego, w niedalekiej przyszłości może stać się podstawą prac z zakresu inwentaryzacji lasu (Thies, Spiecker, 2004), przy założeniu, iż opracowane zostaną weryfikowalne procedury automatycznego przetwarzania chmur punktów TLS, prowadzące do szybkiego określania zasobności drzewostanów i innych cech taksacyjnych. Obecnie stosowane metody są dość przestarzałe, a ich dokładność w wielu przypadkach jest niemożliwa do zweryfikowania. Ważnym argumentem, w dyskusjach prowadzonych z właścicielem lasu na temat wprowadzania nowoczesnej technologii TLS do praktyki, może być informacja, iż odbiorcy drewna w niektórych krajach UE, płacą za nie wyłącznie na podstawie informacji o miąższości obliczanej przez systemy bazujące na skanerach 3D, montowanych na liniach technologicznych w tartakach. Pierwsze komputery osobiste PC instalowane w nadleśnictwach kilkanaście lat temu wzbudzały sprzeciw i emocje, a dziś nie dziwią już nikogo. Dlaczego więc ze skanerami 3D miałyby być inaczej?

Literatura

- Aschoff T., Spiecker H., 2004: Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. [In:] Thies M., Koch B., Spiecker H., Weinacker H., (eds.), *Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XXXVI-8/W2.
- Aschoff T., Thies M., Spiecker H., 2004: Describing forest stands using terrestrial laser-scanning. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XXXV, Comm. 5, 237- 241.

- Axelsson P., 2000: DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33 (4B): 203-210.
- Bienert A., Queck R., Schmidt A., Bernhofer Ch., Maas H.-G., 2010: Voxel space analysis of terrestrial laser scans in forests for wind field modelling. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38, Part 5.
- Bruchwald A., 1999: Dendrometria. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Bruchwald A., Rymer-Dudzińska T., Dudek A., Michalak K., Wróblewski L., Zasada M., 2000: Wzory empiryczne do określania wysokości i pierścicowej liczby kształtu grubizny drzewa. *Sylvan* 10, 5-13.
- Cieszewski Ch.J., Zasada M., 2003: Model bonitacyjny dla sosny na podstawie tablic zasobności Szymkiewicza. *Sylvan* 1: 51-62.
- Grundner F., Schwappach A., 1952: Massentaffeln zur Bestimmung des Holzgehaltes stehender Waldbäume und Waldbestände. Berlin.
- Kozioł K., Wężyk P., 2007: Zastosowanie algorytmu Delanuay'a w eliminacji i klasyfikacji chmury punktów z naziemnego skaningu laserowego. *Roczniki Geomatyki* t. 5, z. 5, 33-4. PTIP, Warszawa.
- Simonse M., Aschoff T., Spiecker H., Thies T., 2004: Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laserscanning. *Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*, 251-257.
- Stępień E., 2008: Potrzeby inwentaryzacyjne w zarządzaniu leśnictwem wielofunkcyjnym. [W:] Zawila-Niedzwiecki T., Zasada M. (ed.). *Techniki geomatyczne w inwentaryzacji lasu – potrzeby i możliwości*. Wydawnictwo SGGW. 31-41.
- Szymkiewicz B., 1971: *Tablice zasobności i przyrostu drzewostanów*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Thies M., Spiecker H., 2004: Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories. *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2, Laser-Scanners for forest and Landscape assessment*. Freiburg, Germany. 3-6 October 2004, 192-198.
- Tompalski P., Kozioł K., 2008: Określanie wybranych parametrów drzew za pomocą naziemnego skaningu laserowego. *Materiały III Krakowskiej Konferencji Młodych Uczonych, Kraków 25-27.09.2008*. Sympozja i Konferencje KKMU nr 3, 337-346.
- Tompalski P., Wężyk P., 2009: Wady i zalety automatycznego określania liczby drzew oraz pierścicowego pola przekroju sosny zwyczajnej jednonastanowiskową metodą naziemnego skanowania laserowego. [W:] *Wielokierunkowość badań w rolnictwie i leśnictwie. Monografia 2009. Tom 1*. Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, 313-322.
- Wężyk P., Kozioł K., Glista M., Pierzchalski M., 2007: Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory. First results From the Polish forests. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVI, Part 3 / W52, 424-429.
- Wężyk P., Sroga R., Szwed P., 2008a: Precyzyjne pozycjonowanie pni drzew na kołowych powierzchniach próbnych przy użyciu urządzenia PosTex (Haglöf), *Roczniki Geomatyki* t. 6, z. 8. PTIP, Warszawa. 109-118.
- Wężyk P., Sroga R., Szwed P., Szostak M., Tompalski P., Kozioł K., 2009: Wykorzystanie technologii naziemnego skaningu laserowego w określaniu wybranych cech drzew i drzewostanów. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 447-457.
- Wężyk P., Tompalski P., Szostak M., Glista M., Pierzchalski M., 2008b Describing the selected canopy layer parameters of the Scots pine stands using ALS data. 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. SilviLaser. Sept. 17-19.2008, Edinburgh, UK, 636-645.

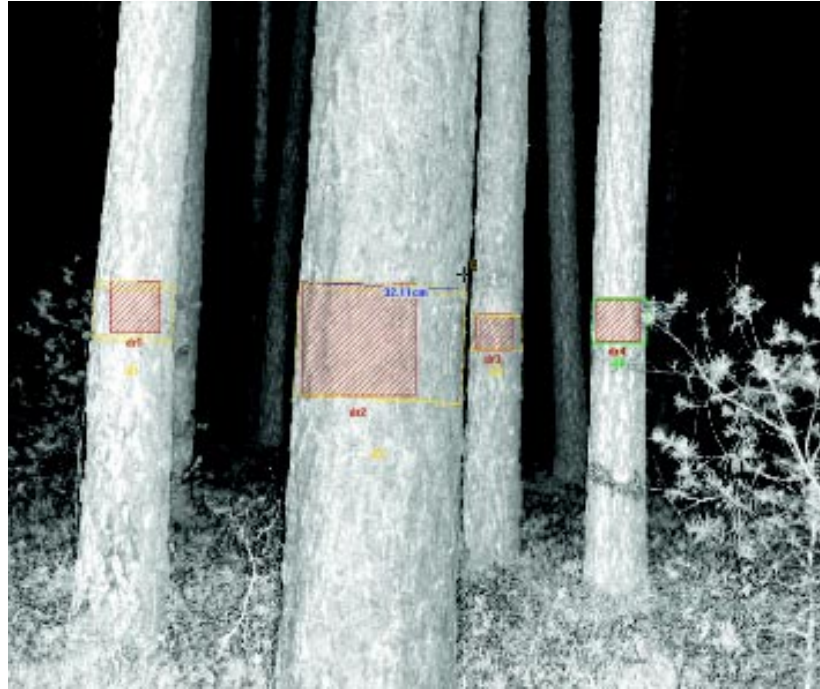
Abstract

Managing a sustainable forest requires very precise identification of yearly wood gain level. To identify that volume an exact inventory of existing forest resources should be performed. This refers to planning and achievement of economical goals. Forests are large spatial objects, so their management requires the use of remote sensing technologies, especially terrestrial laser scanning (TLS). TLS is one of the clues to identify tree dimensions and stand characteristics. The aim of the presented work was to demonstrate a new method of forest stock calculation ($m^3/1ha$) in Scots pine stands with the use of TLS.

Research was conducted with the use of scanner FARO LS 880, which characterizes phase displacement technology. The results based on TLS point cloud were compared with reference data (traditional terrestrial measures: trunk diameter at breast height = 1.3 m, tree height and airborne laser scanning: tree height). Single tree trunk volume was been obtained by using dendrometrical methods (granted that the tree trunk is a solid of revolution), on the basis of tree trunk shape exponent and its height. Point cloud slices were generated in Terrasolid program, a special script (ArcView ESRI) enabled to calculate their area (g). Single tree heights were defined on the basis of the tree crown model (ALS). The mean difference between tree trunk volumes gained by TLS technology and values contained in traditional trunk volume tables is about -4.5%; forest stock differs by about -6%. Tree height gained from ALS as +0,83 m higher than TLS, brings growth of single tree volume by about +2.75%. The results of the research challenge the validity of treating schematic stock tables as the reference data.

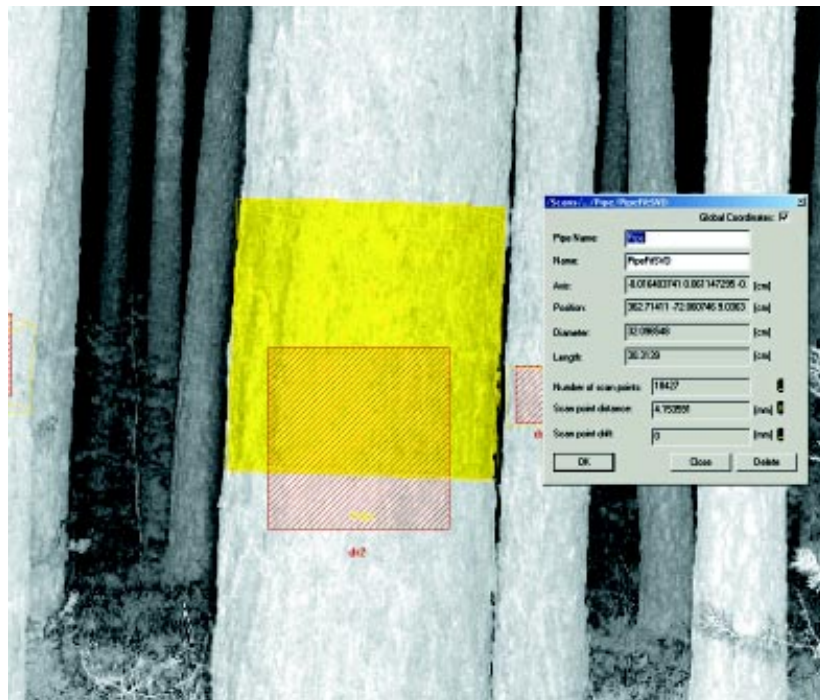
dr inż. Piotr Węzyk
rlwezyk@cyf-kr.edu.pl
tel. +48 12 662 50 82

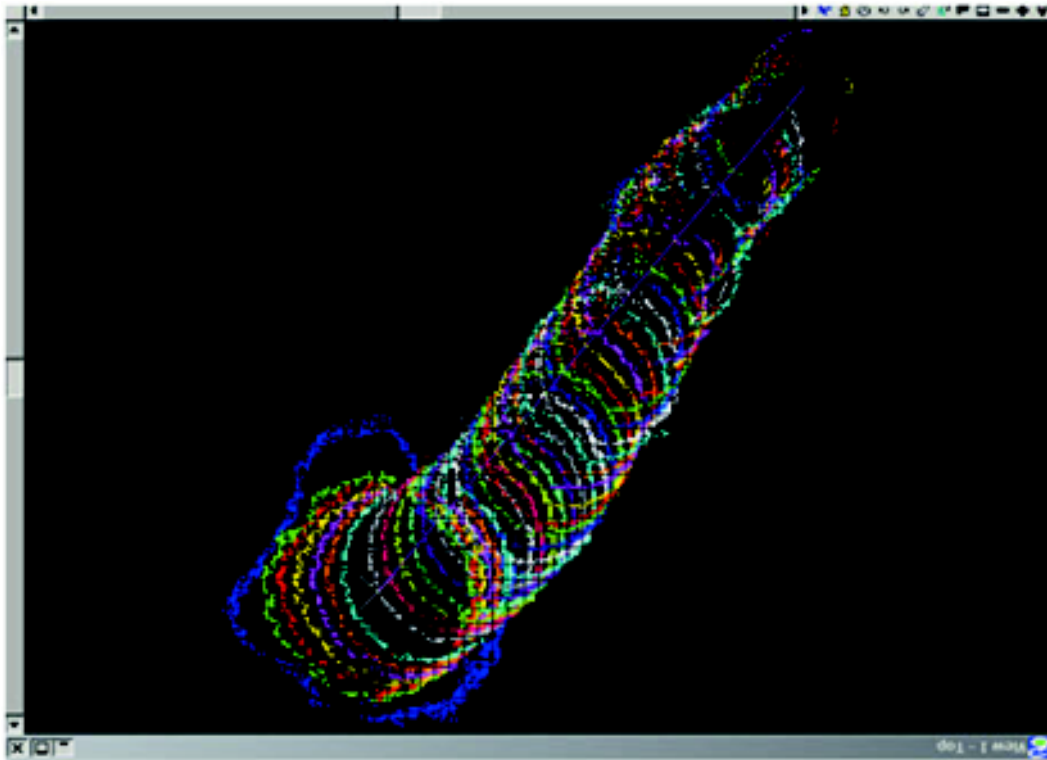
Radosław Sroga
<http://geo.ur.krakow.pl>



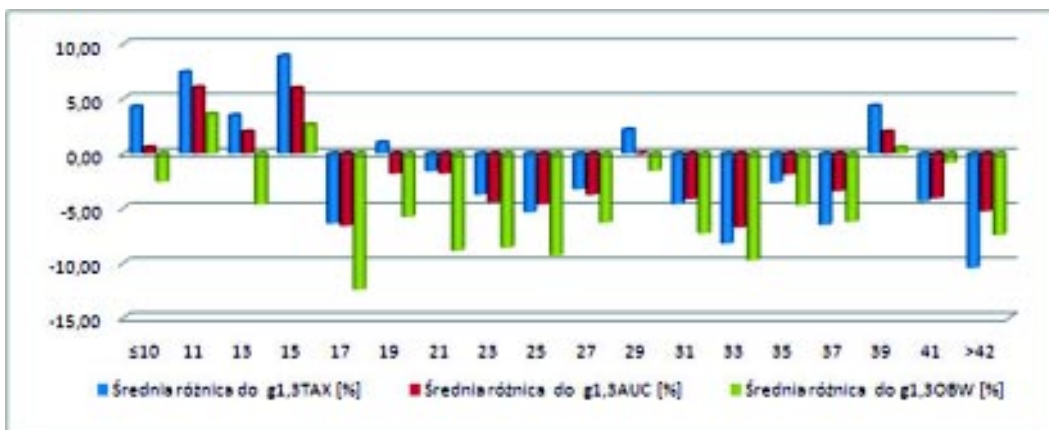
Rys. 2. Manualna metoda pomiaru pierśnicy drzewa – TLS PIXEL

Rys. 3. Półautomatyczna metoda pomiaru przez dopasowanie walca na wycinek pnia – TLS PIPE





Rys. 4. Wynik automatycznej klasyfikacji chmury punktów TLS w celu generowania przekrojów na wybranych wysokościach pnia (sekcja co 0,25m; rzut od góry; Terrascan, Terrasolid)



Rys. 5. Rozkład błęd określenia pola pierścicowego metodą TLS w stosunku do danych referencyjnych (pierśnicomierz – pomiar TAX i AUC)