

**WYKORZYSTANIE TECHNOLOGII NAZIEMNEGO SKANINGU
LASEROWEGO W OKREŚLANIU WYBRANYCH CECH DRZEW
I DRZEWOSTANÓW**

**THE APPLICATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNING FOR
DETERMINING THE SELECTED TREES AND FOREST STAND PARAMETERS**

**Piotr Wężyk¹, Radosław Sroga¹, Piotr Szwed¹, Marta Szostak¹, Piotr Tompalski¹,
Krystian Koziol²**

¹Laboratorium GIS i Teledetekcji, Katedra Ekologii Lasu, Wydział Leśny,
Uniwersytet Rolniczy im. Hugo Kołłątaja w Krakowie

²Katedra Geomatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: naziemny skaniny laserowy (TLS); pierśnica (d); pierśnicowe pole przekroju
drzewa (g); miąższość pnia (V).

STRESZCZENIE: Rozwój technologii pozyskiwania geodanych nabrał w ostatnich latach dużego tempa co skutkuje rewolucyjnymi zmianami w wielu dziedzinach gospodarki, w tym w leśnictwie, gdzie obserwuje się wdrażanie takich rozwiązań jak naziemny skaniny laserowy (Terrestrial Laser Scanning; TLS). Pomiaru wybranych cech drzew takich jak: wysokość, średnica, zbiezystość i objętości (miąższość grubizny) pnia są przedmiotem badań i wdrożeń. Generowane zbiory danych (chmur punktów) TLS wymagają automatycznego procesu ich przetwarzania. Prezentowana praca dotyczy zastosowania metody TLS w inwentaryzacji lasu, tj. określaniu wybranych parametrów takich jak pole przekroju pierśnicowego drzewa (g), wysokości (h) i w efekcie miąższość pnia (V). Analizie poddano drzewostan sosnowy w Nadleśnictwie Milicz (wydzielenie 236a; wiek 105 lat). Skaniny przeprowadzono z 4 stanowisk stosując skaner fazowy FARO LS 880. Dane referencyjne dla średnicy pnia pozyskano tradycyjnymi instrumentami (pierśnicomierz) oraz w oparciu o lotniczy skaniny laserowy dla wysokości. Testowano szereg metod i wzorów na obliczenie miąższości grubizny pni 21 drzew, tj.: metodę brył obrotowych (3 różne zestawy par przekrojów: 1.3 /6.0; 2.0/5.0 oraz 2.0/6.0 m nad gruntem) oraz pomiar sekcyjny. Obie bazują na algorytmie określania pola przekroju wycinków pnia metodą otoczki wypukłej. Za referencję przyjęto tzw. wzór empiryczny dla sosny oraz zamiennie pomiar sekcyjny TLS (długość sekcji 0.5m). Stosowano także tradycyjną metodę bazującą na tzw. tablicach miąższości drzew stojących. Wyniki wskazują, iż miąższości uzyskane metodą sekcyjnego pomiaru TLS nie różnią się istotnie statystycznie od stosowanego w praktyce leśnej wzoru empirycznego, a wartości różnic sięgają jedynie 1.5%. W przypadku wzoru na bryły obrotowe, różnice w określaniu miąższości na poziomie powierzchni sięgają od 6.1% (przekroje z wysokości: 2.0/6.0m) do 8.4% (2.0/5.0m;) powodując jej zaniżenie. Wartości maksymalne określone na poziomie pojedynczych drzew różnią się czasem aż o 38.4% (2.0/5.0), co wskazuje na zmienność geometryczną brył pni drzew. Praca potwierdziła przydatność metody pomiaru sekcyjnego TLS oraz potrzebę dalszych prac nad opracowaniem nowych standardów i parametrów w inwentaryzacji lasu oraz konieczność stosowania zautomatyzowanych procesów przetwarzania danych.

1. WSTĘP

Pomiar parametrów drzew i drzewostanów za pomocą nowoczesnych technologii geoinformatycznych takich jak naziemny skaning laserowy (ang. Terrestrial Laser Scanning; TLS) jest od kilku lat przedmiotem intensywnych badań i praktycznych wdrożeń (Lichti et al., 2002; Aschoff et al., 2004; Pfeifer, Winterhalder 2004; Watt, Donoghue 2005; Henning, Radtke 2006; Wężyk et al., 2007). Badania potwierdzają niezmiernie duży potencjał technologii TLS, w tym pomiaru i modelowania chmury punktów w celu określenia wybranych parametrów drzew i drzewostanów takich jak: liczba drzew, zagęszczenie, zwarcie koron, LAI (ang. Leaf Area Index), średnica pnia na dowolnej wysokości (w tym pierśnica na wysokości 1.3m od gruntu; ang. DBH), wysokość wierzchołka drzewa, wysokość podstawy korony, długość korony, powierzchnia korony, zbieżystość i krzywizna pnia oraz objętości (miąższości) pnia itp. Technologia TLS napotyka jednak sporo ograniczeń w zakresie samego skanowania w trudnych warunkach drzewostanowych oraz na etapie obliczeń ze względu na pracochłonność przetwarzania (modelowania) dużych zbiorów danych (punktów XYZ). Jedynym rozwiązaniem tych problemów jest automatyzacja obliczeń i poszukiwanie nowych metod i parametrów opisujących drzewa i drzewostan. W niektórych badaniach do pomiaru grubości pni drzew stosowano transformację Hough, która wymaga interpolacji punktów tworzących przekrój drzewa (wycinek; ang. slice) do regularnej siatki. W rezultacie transformacji generowane (wpasowywane) są okręgi wyznaczające krawędź pnia, a tym samym jego środek geometryczny (Aschoff et al. 2004; Aschoff, Spiecker 2004). W innych pracach zastosowano algorytm analizujący przekrój chmury punktów pod kątem grup punktów (klastrów) o liczbie większej od progowej wartości (n), w które wpasowywano okrąg. W celu zwiększenia dokładności algorytmu, ta sama procedura przeprowadzana była na wyższym przekroju pnia, zaledwie kilka centymetrów powyżej pierwszego pomiaru. Metoda pozwoliła wykryć średnio 96% pni drzew ze średnim błędem określenia ich średnicy w przedziale od -0.96cm do +0.93cm (Bienert et al. 2006). W pracach Pfeifer, Winterhalder (2004) opracowano algorytm selekcyjny punkty tworzące pień drzewa, a na ich podstawie tworzący dalej krzywe (ang. B-spline curves) trzeciego stopnia do opisanego przekroju poprzecznego. Dokładność wpisania tych krzywych wyniosła około 1-2cm, a dzięki uniknięciu założenia o formie pnia jako koła, możliwe było także obliczenie parametru jego owalności. Zasadniczą wadą tej metody jest jednak potrzeba pełnego pokrycia pnia punktami. Bienert (2007) wraz z firmą TreeMetrics (Cork, Irlandia) opracowała program AutoStem, który pozwala na automatyczny pomiar parametrów drzew (liczby drzew, pola przekroju na dowolnej wysokości, położenia drzewa w przestrzeni oraz wysokości wierzchołka) w chmurze punktów TLS. Podejmowano też próby opisane przez Maas et al. (2008) polegające na wykrywaniu i pomiarze drzew metodą opartą na pikselach przestrzennych czyli tzw. voxelach (Gorte, Winterhalder 2004; Gorte, Pfeifer 2004). Okazała się ona jednak mało skuteczna, gdyż w najlepszym przypadku udało się wykryć tylko 52% drzew, a pomiar średnicy pnia charakteryzował się odchyleniem standardowym wynoszącym 3.5cm.

Celem prezentowanej pracy była analiza dokładności określenia miąższości pnia drzewa (tzw. grubizny do średnicy 7cm) w oparciu o różne metody, w tym technologię TLS. Na podstawie pomiaru parametrów: pierśnicy drzewa (d), jego wysokości (h), wykorzystano tradycyjne tablice miąższości drzew stojących oraz tzw. wzór empiryczny opracowany dla

sosny (Bruchwald 2000). Dodatkowo korzystano z wzorów na objętość brył obrotowych i metody wirtualnego pomiaru sekcyjnego (TLS_sekc). Badania poszukiwały nowej metody realizacji skaningu naziemnego w drzewostanie w oparciu o obserwację pnia na innych niż tradycyjna wysokościach (1.3m od gruntu) i przyjęcie rozwiązań (wirtualny pomiar sekcyjny TLS) niewymagających, jak do tej pory, ścinania referencyjnych drzew próbnych.

2. TEREN BADAŃ

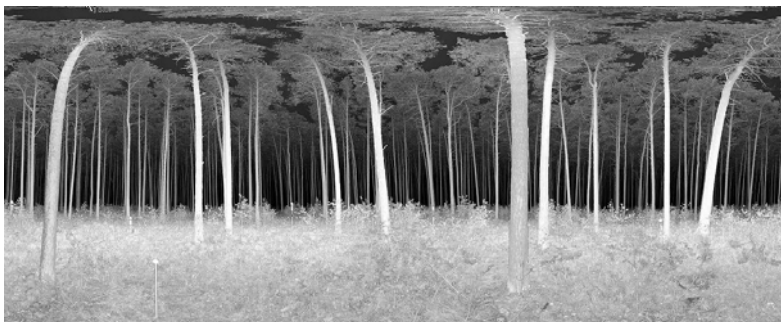
Materiał badawczy w postaci chmur punktów TLS oraz bezpośrednich pomiarów pierśnicy zebrany został na powierzchni kołowej nr 8 (500m²; pododdział 236a), zlokalizowanej w 105 letnim (VI klasa wieku) drzewostanie sosnowym II klasy bonitacji w Nadleśnictwie Milicz, RDLP Wrocław (WGS84: 51°26' 42" N; 17°10' 34" E). Średnia pierśnica drzew odczytana z bazy danych SILP/LAS (stan aktualności 2006 rok) wynosiła 30cm a wysokość drzewostanu 23,0 m.

3. METODYKA

Praca przedstawia różne podejście metodyczne do określania miąższości grubizny pnia drzewa. Analizie poddano zarówno metody stosowane w praktyce leśnej w niedalekiej przeszłości (np. tablice drzew stojących; Grudner, Schwappach 1952), obecnie wdrażane (wzór empiryczny; Bruchwald 2000) i testowane w badaniach naukowych dwa rozwiązania, tj.: pomiar sekcyjny pnia (TLS_sekc) oraz wzór na objętość brył obrotowych. W przypadku dwóch ostatnich metod, bazujących na określeniu średnicy drzewa na dowolnej wysokości, pole powierzchni poszczególnych przekrojów pnia obliczano na podstawie opracowanego wcześniej algorytmu (Kozioł, Wężyk 2007; Tompalski, Kozioł 2008).

3.1. Naziemny skaner laserowy

Praca bazuje na materiale zebrany podczas realizacji projektu dla Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych w Warszawie, koordynowanym przez SGGW Warszawa w latach 2006-09. Wykorzystano skaner FARO LS 880, który należy do grupy urządzeń bazujących na przesunięciu fazowym światła emitowanego (Wężyk 2006). Skaner jest w stanie wysłać do 120.000 impulsów na sekundę, na odległość do 76m wycinka sfery 360° w poziomie i 320° w pionie. Skaningu dokonano z 4 stanowisk (1 centralne + 3 obwodowe) w trybie pracy ¼ pełnej rozdzielczości (Wężyk et al. 2007). Użyto oprogramowania FARO Scene ver. 4 do zarządzania skanami (Rys. 1; Rys. 2), tj. filtracji i połączenia ich w jedną chmurę punktów na podstawie 5 sfer referencyjnych.



Rys.1. Obraz planarny intensywności typu 2D (stanowisko 1).



Rys. 2. Widok typu 3D.

3.2. Dane referencyjne do obliczania miąższości drzewa

Za zestaw danych referencyjnych uznano pomiary wykonywane przez autorów pracy (reprezentujących UR w Krakowie) w lipcu 2007 roku, podczas których zgromadzono informacje o średnicy pnia na wysokości 1.3 (dAUC). Była to średnia z 4 pomiarów wykonanych średnicomierzem (precyzja odczytu do 0.001m) prostopadle do kierunku skanowania dla każdego stanowiska skanera. Dane o wysokości drzewa (h) określono na podstawie pomiaru chmury punktów TLS. Wcześniejsze badania autorów (Wężyk et al. 2008) pozwoliły określić błąd pomiaru wysokości metodą TLS na podstawie chmur punktów skaningu lotniczego (ALS). W tym przypadku, zastosowano więc poprawkę (+0.9m), na zaniżenie tego parametru przez skaner naziemny. Powyższe dane referencyjne (dAUC oraz hTLS) wykorzystano we wzorze na obliczanie miąższości drzew zwanym dalej wzorem empirycznym (AUC_emp; Bruchwald 2000; wzór 1).

$$v_q = \frac{\Pi}{4000} d^2 \times h \times f_q \quad (1)$$

gdzie: v_q - miąższość grubizny drzewa [m^3],
 d - pierśnica drzewa [cm],
 h - wysokość drzewa [m],
 f_q - pierśnicowa liczba kształtu grubizny drzewa.

Wzór empiryczny zastosowano także dla danych zebranych podczas tradycyjnych prac inwentaryzacyjnych w 2006 roku (dalej nazwane TAXUS), w których posługiwano się pierśnicomierzem i wysokościomierzem (VERTEX; Haglöf). Dla obu zestawów danych (AUC i TAXUS) miąższość pni określono tradycyjną metodą przez odczyt z tzw. tablic miąższości drzew stojących (Grundner, Schwappach 1952).

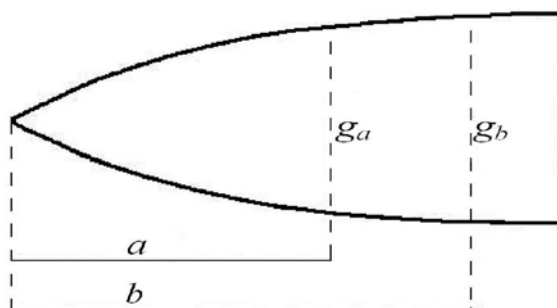
3.2. Metoda brył obrotowych

Metoda brył obrotowych wykorzystuje wykładnik kształtu obliczany na podstawie stosunku pól powierzchni z dwóch przekrojów poprzecznych pnia drzewa, położonych w określonej odległości od jego wierzchołka. W tym celu wykorzystuje się własności brył obrotowych (wzór 2; Rys. 3), które mogą posłużyć obliczeniu wykładnika kształtu r (wzór 3) i dalej do obliczenia miąższości pnia (wzór 4).

$$\frac{g_a}{g_b} = \left(\frac{a}{b}\right)^r \quad (2)$$

$$r = \log_{\frac{a}{b}} g_a - \log_{\frac{a}{b}} g_b \quad (3)$$

gdzie: g_a – pole przekroju w odległości a od wierzchołka
 g_b – pole przekroju odległości b od wierzchołka



Rys.3. Określanie wykładnika kształtu r w oparciu o kolejne pola przekroju pnia drzewa na odległości a oraz b od wierzchołka

$$V = \frac{1}{1+r} * g_a * \left(\frac{h}{a}\right)^r * h \quad (4)$$

gdzie: V – miąższość drzewa [m^3],
 g_a – pole przekroju pnia w odległości a ,
 h – wysokość drzewa [m].

W pracy testowano 3 pary przekrojów (wycinków) pnia wyselekcjonowanych na wysokościach 2.0/5.0m, 2.0/6.0m oraz 1.3/6.0m.

3.3. Pomiar sekcyjny pnia drzewa TLS

Tradycyjny dendrometryczny pomiar sekcyjny pnia drzewa wykonywany jest po jego ścięciu i opiera się na jego podziale na tzw. sekcje (walce), których miąższość (V) określa się wzorem opartym na polu środkowego przekroju (wzór 5).

$$V = g_{l/2} \cdot l \quad (5)$$

gdzie: $g_{l/2}$ – pole przekroju w połowie długości l sekcji.

Jeżeli przyjąć jednakową długość sekcji (wzór 6) to pozostaje zwykle niepełna ostatnia sekcja (V_a), dla której stosuje się objętość stożka (Bruchwald, 1999).

$$V = l_s (g_{s_1} + g_{s_2} + \dots + g_{s_{n-1}} + g_{s_n}) + V_a \quad (6)$$

gdzie: g_{s_x} - powierzchnia przekroju w środku poszczególnych sekcji;
 V_a - miąższość ostatniej sekcji.

W pracy przyjęto 0.5m długości wirtualnych sekcji dla analizowanych pni drzew. Pomiar prowadzono do momentu, w którym możliwa była selekcja punktów TLS na pniu drzewa

i gwarantowały one wciąż poprawne określenie pola przekroju (g). Najczęściej selekcja wycinków kończyła się pod koroną sosny na odległości około 5,5m od wierzchołka drzewa. Do selekcjonowania wycinków wykorzystano oprogramowanie TerraSolid (TerraScan), w którym przeprowadzono klasyfikacje chmury punktów TLS (Wezyk et al. 2007). W kolejnym kroku wyselekcjonowane punkty eksportowano do ArcView 3.2 (ESRI), gdzie poddawano je działaniu algorytmu do automatycznego wyznaczania pola przekroju.

3.4. Algorytm do obliczania pola przekroju pnia

Algorytm (Kozioł, Wężyk 2007; Tompalski, Kozioł 2008) bazuje na wykorzystaniu wycinka chmury punktów (*ang.* slice), z określonej wysokości pnia (np. 1.3m). Wycinek w pierwszym kroku jest kwalifikowany do jednej z trzech kategorii na podstawie kryterium jakim jest stopień pokrycia pnia drzewa punktami TLS. Najtrudniejsze w analizie i stąd narażone na największe błędy są pnie zakwalifikowane do kategorii 1, tj. zeskanowane tylko z jednego stanowiska (fragmenty walca). Działanie algorytmu polega na wygenerowaniu otoczki wypukłej w oparciu o punkty z wycinka pnia. Pole otoczki jest następnie mierzone (A_c) i w przypadku, gdy przekrój drzew jest równomiernie pokryty punktami (kategoria 3), wartość ta jest uznawana za pole przekroju pnia. W przypadku wycinków pokrycia na obwodzie > 50%, (kategoria 2) pole brakującego fragmentu pnia obliczane jest ze wzoru (wzór 7):

$$A_{popr} = \frac{(360 - \alpha) * A_1}{\alpha} \quad (7)$$

Pole przekroju całego pnia (A_c) określa się jako sumę (wzór 8):

$$A_c = A_1 + A_{popr} \quad (8)$$

gdzie: A_1 - pole zeskanowanego fragmentu.

4. WYNIKI

W pierwszym etapie przetwarzania danych ocenie poddano istotność różnic pomiędzy poszczególnymi metodami wyznaczenia miąższości grubizny drzew (V). Z uwagi na fakt, iż wartości nie charakteryzowały się rozkładem normalnym oraz na niewielką liczbę drzew, zastosowano test nieparametryczny Wilcozona dla par wiązanych (Tab. 1).

Tabela 1. Istotność różnic dla różnych metod pomiaru na powierzchni nr 8. (**) - różnice wysoce istotne statystycznie $p < 0.01$; (*) - różnice istotne $0.01 < p < 0.05$; (n) - różnice nieistotne.

Istotność różnic dla metod określania V	Bryły obrotowe m/m			TLS_ sekc	AUC_ tab	TAX_ tab	AUC_ emp	TAX_ emp
	2/5	2/6	1.3/6					
AUC_emp	*	**	*	n	**	*	-	n
TLS_sekc	*	**	*	-	*	n	n	n

Miąższość pni drzew określana metodą brył obrotowych dla wszystkich 3 par wycinków pnia (2.0/5.0, 2.0/6.0 oraz 1.3/6.0m) wykazała istotne i wysoce istotne różnice w stosunku do metod referencyjnych podobnie jak użycie tablic drzew stojących.

4.1. Wyniki dla poziomu powierzchni kołowej.

Wzór empiryczny (AUC_emp; Buchwald 2000) dawał wyniki jedynie o 1.5% różne od zastosowania wirtualnego pomiaru sekcyjnego (TLS_sekc), co wskazywać może z jednej strony na wysoką poprawność opracowania wzoru dla sosny a z drugiej, na fakt, iż to właśnie technologia skaningu naziemnego jest w stanie dostarczać precyzyjnych danych z różnych wysokości pnia drzewa. Należy pamiętać, iż wzór empiryczny (Buchwald 2000) uwzględniający liczbę kształtu f opracowany został na materiale zebrany na podstawie drzew ściętych, czego nie wymaga już metoda sekcyjna TLS. Zastosowany wzór na obliczanie objętości brył obrotowych, dawał około 10.4% niedoszacowania w stosunku do wzoru empirycznego (referencja). Najkorzystniej w przypadku brył obrotowych wypadły dwie pary analizowanych przekrojów poprzecznych pni wykonane na wysokościach 2.0/5.0 m oraz 2.0/6.0 m, które wykorzystane do automatycznego określenia pola powierzchni

zaniżyły miąższość o odpowiednio: 9.4 i 9.5% w stosunku do danych referencyjnych. Największe różnice wykazały przekroje z wysokości 1.3/6.0 m dając wynik około 13.8% niższy od wzoru empirycznego korzystającego z pierśnicy ale określonej manualnie (AUC).

Stosując ten sam wzór empiryczny (Bruchwald 2000), ale z wartościami pomierzonymi podczas standardowej inwentaryzacji (2006 TAXUS) otrzymano różnicę na poziomie 3.2% (TAX_emp), co wskazuje jedynie na nieznaczne zniżenie miąższości wszystkich pni na powierzchni w stosunku do referencji. Należy zwrócić uwagę, iż wysokość drzew określona podczas inwentaryzacji różniła się około +1.13m (moduł średniej) od referencji ($h_{TLS} +$ poprawka), natomiast pole pierśnicowego przekroju (g_{TAX}) było większe o około +12.2%.

Zastosowanie tablic zasobności drzew stojących stosowanych tradycyjnie w leśnictwie wymagało podania pierśnicy i wysokości drzewa, co spowodowało w efekcie powstanie różnic na poziomie +4.0% (TAXUS) i +4.8% (AUC) w stosunku do referencji. Oznaczać to może, iż w przypadku stosowania tablic popełniany jest niewielki błąd generujący zawyżone wartości miąższości pni. Jeżeli przyjąć metodę wirtualnego pomiaru sekcyjnego TLS za referencję, jako najdokładniejszego dla lokalnego drzewostanu, to okazuje się, iż zastosowanie tablic miąższości drzew stojących powoduje nieznaczne zawyżenie wartości na poziomie +2.5 i +3.3% w przypadku zastosowania danych pomiarowych TAXUS oraz AUC. Dla tego wariantu wszystkie pozostałe metody zaniżają wartość miąższości grubości pnia od 4.6% (wzór empiryczny uwzględniający dane TAXUS) przez około 10.6% (wzór na bryły obrotowe; przekroje 2.0/5.0-6.0 m) aż do wartości 15% (przekrój 1.3/6.0 m).

4.2. Analizy miąższości dla poziomu pojedynczych pni drzew.

Analizując wyniki otrzymane na podstawie wzorów na objętość bryły obrotowych, stwierdza się zaniżanie przez nie miąższości w stosunku do przyjętej referencji (wzór AUC_emp). Wartości różnic wahają się od poziomu 6.1% (przekroje 2.0/6.0m; odch. std. 8.0) do 8.4% (2.0/5.0m; Tab. 2).

Tabela 2. Różnice pomiędzy poszczególnymi metodami określania miąższości pni drzew stojących w stosunku do pomiaru referencyjnego (AUC_emp).

Różnice	Wzór na bryły obrotowe [m/m]			Inne metody			
	2/5	2/6	1.3/6	TLS_sekc	TAX_emp	TAX_tab	AUC_tab
średnia [%]	-8.4	-6.1	-7.8	1.7	-1.0	8.2	8.0
średnia moduł [%]	14.9	10.2	13.2	7.2	6.2	12.6	10.4
minimalna [%]	0.1	0.9	1.9	0.8	0.4	0.6	0.1
maksymalna [%]	38.4	28.8	27.5	27.1	16.5	33.8	27.2
odchylenie std.	11.7	8.0	6.9	6.8	5.5	8.2	7.1

Jeszcze większe wartości osiągają te różnice w przypadku średniej liczonej z wartości bezwzględnych, bo odpowiednio 10.2% (przekroje 2.0/6.0m) do niemal 15% (2.0/5.0m; Tab. 2). Wartości maksymalne określone dla pojedynczych drzew różniły się aż o 38.4% (Tab. 2; przekroje 2.0/5.0).

Znacznie lepsze wartości odnotowano w przypadku zastosowania metody wirtualnego pomiaru sekcijnego (TLS_sekc), który wykazał średnie różnice na poziomie zaledwie 1.7% (7.2% średnia moduł). Podobnie zastosowanie wzoru empirycznego z wartościami pomiarowymi TAXUS dały wynik zaniżony jedynie o około 1%. Może to wynikać z sytuacji, iż wyniki pomiaru pierśnicy (d), a tym samym pola pierśnicowego przekroju wykonane przez TAXUS były o 12.24% wyższe od wartości g z pomiarów referencyjnych AUC. Średnia wysokość drzew (TAXUS) różniła się zaledwie (+0.21m) co miało znikomy wpływ na różnice miąższości. Przeprowadzona symulacja dla wzoru empirycznego dowodzi, iż przy tej samej wysokości drzewa (średnie $h = 22,45\text{m}$), zmiana wartości pierśnicy o $\pm 1\text{cm}$ powoduje zmianę miąższości w granicach $\pm 7.0\%$.

W przypadku zastosowania tablic miąższości drzew stojących uzyskano zbliżone do siebie wyniki na poziomie 8.2% (Taxus) i 8.0% (AUC). Wartości różnie dochodziły maksymalnie do poziomu 33.8% (odch. std. 8.2).

5. WNIOSKI

Podstawowy problem poruszany w pracy wynika z trudności przyjęcia jednej z metod za jednoznaczną referencję w stosunku do innych. Najlepszym rozwiązaniem byłyby pomiary dendrometryczne (sekcyjne) wykonane na ściętych drzewach lub zatapianie tych sekcji w celu określenia objętości poszczególnych fragmentów pnia. Niestety nie udało się przeprowadzić tego doświadczenia podczas trwania projektu. Jakość pomiaru TLS maleje wraz z odległością od skanera (wysokością drzewa), jednak największa biomasa drewna zakumulowana jest w części odziomkowej. Wysoka dokładność metody TLS i jej bezinwazyjność może skłaniać do przyjęcia jej za referencyjną, szczególnie w sytuacji lokalnej zmienności ekotypowej drzew, czego wzór empiryczny nie jest w stanie przewidzieć.

Nowe technologie pomiarowe takie jak TLS otwierają możliwości automatyzacji przetwarzania danych i umożliwiają przyjęcie innych niż dotychczas tradycyjnie stosowanych rozwiązań. Wdrożenie do praktyki leśnej będzie jednak możliwe w momencie zapewnienia wysokiej automatyzacji procesu przetwarzania danych. Opracowanie prawidłowej metody automatycznego pomiaru pola przekroju pnia drzew skanowanych tylko z jednego stanowiska jest niezmiernie ważne z punktu widzenia obniżania pracochłonności prac i kosztów. Tradycyjnie stosowany pomiar grubości drzewa na wysokości 1.3m od gruntu wynikał z łatwości jego przeprowadzenia. Częstym zjawiskiem w drzewostanach jest przesłanianie się drzew szczególnie na wysokościach najgrubszych pni czyli przy podstawie. Liczba drzew otrzymana na drodze analizy TLS na wysokości 1.3m może być obciążona sporymi błędami. W takiej sytuacji właśnie metoda brył obrotowych wykorzystująca wycinki z wyższych fragmentów może okazać się właściwym rozwiązaniem. Miąższość drzew określana metodą sekcijną TLS ma szansę w niedługim czasie stać się wartością referencyjną dla innych metod pomiarowych, co ma szczególne znaczenie w aspekcie problematyki sekwestracji węgla oraz handlu emisją CO₂.

6. LITERATURA

- Aschoff T. i Spiecker H., 2004. Algorithms for the Automatic Detection of Trees in Laser Scanner Data. [W] M. Thies, B. Koch, H. Spiecker i Weinacker H. (eds.): Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVI - 8/W2. 66-70. Freiburg, Germany. 03-06.10.2004, p. 71-75.
- Aschoff T., Thies M. i Spiecker H., 2004. Describing Forest Stands Using Terrestrial Laser-Scanning. [W] Geo-Imagery Bridging Continents. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXV, Part B. Istanbul, Turkey. 12-23.07.2004, p.237-241.
- Bienert A., Scheller S., Keane E., Mohan F. i Nugent C., 2007. Tree Detection and Diameter Estimations by Analysis of Forest Terrestrial Laserscanner Point Clouds. [W] Rönnholm P., Hyypä H. i Hyypä J. (eds.): ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVI, Part 3 / W52. Espoo, Finland. 12-14.09.2007, p. 50-55.
- Bienert A., Scheller S., Keane E., Mullooly G., Mohan F., 2006. Application of Terrestrial Laserscanners for the Determination of Forest Inventory Parameters. [W] Maas H.-G. i Schneider D. (eds.): Image Engineering and Vision Metrology. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVI, part 5. Dresden. 25-27.09.2006.
- Bruchwald A., 1999. Dendrometria. *Wydawnictwo SGGW*.
- Bruchwald A., Dudek A., Michalak K., Rymer-Dudzinska T., Wróblewski L., Zasada M., 2000. Wzory empiryczne do określania wysokości i pierścicowej liczby kształtu grubizny drzewa. *Sylvan* 10: 5-13.
- Grundner F., Schwappach A., 1952. Massentaffeln zur Bestimmung des Holzgehaltes stehender Waldbäume und Waldbestände. Berlin
- Henning J. G. i Radtke P. J., 2006. Detailed Stem Measurements of Standing Trees from Ground-Based Scanning Lidar. *Forest Science*, Vol: 52 (1), p. 67-80.
- Lichti D. D., Gordon S. J. i Stewart M. P., 2002. Ground-Based Laser Scanners: Operation, Systems and Applications. *Geomatica*, Vol: 56 (1), p. 21-33.
- Maas H. G., Bienert A., Scheller S. i Keane E., 2008. Automatic Forest Inventory Parameter Determination from Terrestrial Laser Scanner Data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol: 29 (5), 1579-1593.
- Pfeifer N., Winterhalder D., 2004. Modelling of Tree Cross Sections from Terrestrial Laser-Scanning Data with Free-Form Curves. [W] M. Thies, B. Koch, H. Spiecker i Weinacker H. (Eds.): Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVI - 8/W2. Freiburg, Germany. 03-06.10.2004, p.76-81
- Terrasolid. 2001: Tutorial TerraScan, TerraPhoto, TerraModel: <http://www.terrasolid.fi>
- Tompalski P., Koziol 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, s. 337-346.
- Watt P. J., Donoghue D. N. M., 2005. Measuring Forest Structure with Terrestrial Laser Scanning. *International Journal of Remote Sensing*, Vol: 26 (7), p.1437-1446.
- Wencel A., Wężyk P., Zasada M., 2008. Możliwości zastosowania naziemnego skaningu laserowego w leśnictwie. W: Zawila-Niedźwiecki T., Zasada M. (Eds.) *Techniki geomatyczne w inwentaryzacji lasu – potrzeby i możliwości*. *Wydawnictwo SGGW*. s.77-89

Węzyk P., 2006. Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego lidar w leśnictwie. *Annals of Geomatics*. Vol. IV. Number 4., s. 119-132

Węzyk P., Koziół K., Glista M. i Pierzchalski M., 2007. Terrestrial Laser Scanning Versus Traditional Forest Inventory. First Results from the Polish Forests. [W] Rönnholm P., Hyypä H. i Hyypä J. (eds.): ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVI, Part 3 / W52.. Espoo, Finland. 12-14.09.2007. p. 424-429

Węzyk P., Tompalski P., Szostak M., Glista M., Pierzchalski M., 2008. Describing the selected canopy layer parameters of the Scots pine stands using ALS data. In: 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. SilviLaser 2008. Sept. 17-19. 2008 – Edinburgh, UK. p. 636-645

THE APPLICATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNING FOR DETERMINING THE SELECTED TREES AND FOREST STAND PARAMETERS

KEY WORDS: TLS; DBH, basal area, volume of tree trunk

SUMMARY: The development of geodata acquiring technology has become very fast in recent years and leads to changes in many areas of economy, also in forestry, where new, revolutionary solutions such as terrestrial laser scanning are being implemented. Measurements of such tree characteristics, as the tree height, DBH, taper and the stem volume are subject of a number of studies. Generated sets of data (point clouds) need a chain of automatic processing. This paper describes the application of TLS in forest inventory control, i.e. in determining several parameters such as basal area (g), height (h) and finally the stem volume (V). The 105 years old pine stand in Milicz Forest District was analysed (plot no. 8). Scanning was performed from 4 stations with the use of a FARO LS 880 laser scanner. Reference data were collected using both the traditional instruments (DBH), and airborne laser scanning (h). Several methods and formulas were tested to calculate the stem volume, i.e. methods based on solid of revolution (involving 3 different pairs of cross-sections: 1.3 /6.0; 2.0/5.0 and 2.0/6.0 m above the ground), and sectional measurements. In both methods, the surface area of the cross-sections was calculated using the author's algorithm (convex hulls).

As the reference, the so-called empirical formula designed for pine was applied, together with volume calculated for 0.5 m sections on TLS point cloud. Traditional methods based on tables with volumes calculated for single trees were also used. The results indicate that volume measurements based on sections do not differ statistically from volumes calculated by means of the empirical formula, while the differences amount to 1.5 % only. As regards the method based on solid of revolution, the differences amount to 6.1% (cross-sections: 2.0/6.0 m, Std. dev 8.0) and 8.4% (2.0/5.0 m) causing the underestimation of the volume. Maximum values, calculated for single trees, are sometimes very high (38.4% for 2.0/5.0 m cross-sections), which indicates geometrical differences in the stem solid. The paper confirmed usability of section measurements within TLS point cloud and the need for further research on defining new standards and parameters for forest inventory control, as well as the necessity of applying automatic algorithms for data processing.

Dr inż. Piotr Wężyk
e-mail: rlwezyk@cyf-kr.edu.pl
tel. +12 6625082
fax +12 6625082

Dr inż. Marta Szostak
e-mail: rlszosta@cyf-kr.edu.pl

Mgr inż. Piotr Tompalski
e-mail: piotr.tompalski@ur.krakow.pl
tel. +12 6625076

Dr inż. Krystian Koziol
e-mail: krystian.koziol@agh.edu.pl
tel. +12 6173323