

**AUTOMATYCZNE OKREŚLANIE ŚREDNICY PNIA, PODSTAWY
KORONY ORAZ WYSOKOŚCI SOSNY ZWYCZAJNEJ (*PINUS
SYLVESTRIS* L.) NA PODSTAWIE ANALIZ CHMUR PUNKTÓW 3D
POCHODZĄCYCH Z WIELOSTANOWISKOWEGO NAZIEMNEGO
SKANOWANIA LASEROWEGO**

**AUTOMATIC DETERMINATION OF TRUNK DIAMETER, CROWN
BASE AND HEIGHT OF SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) BASED
ON ANALYSIS OF 3D POINT CLOUDS GATHERED FROM MULTI-
STATION TERRESTRIAL LASER SCANNING**

Michał Ratajczak, Piotr Wężyk

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Leśny
Instytut Zarządzania Zasobami Leśnymi
Zakład Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa

SŁOWA KLUCZOWE: naziemne skanowanie laserowe (TLS), automatyzacja przetwarzania chmur punktów, algorytmy, cechy biometryczne drzew.

STRESZCZENIE: Rozwój technologii naziemnego skanowania laserowego (TLS) w ostatnich latach spowodował jej uznanie i wdrożenie w wielu gałęziach gospodarki, w tym w leśnictwie i ochronie przyrody. Wykorzystanie chmur punktów 3D TLS w procesie inwentaryzacji drzew i drzewostanów oraz określaniu wybranych cech biometrycznych drzewa (np. średnicy pnia, wysokości drzewa, podstawy korony, liczby kształtu pnia) oraz wielkości surowca drzewnego (objętość drzew) staje się już praktyką. Wartością dodaną technologii TLS poza dokładnością samego pomiaru jest automatyzacja procesu przetwarzania chmury punktów 3D pod kątem ekstrakcji wybranych cech drzew i drzewostanów. Praca prezentuje autorskie oprogramowanie (GNOM) służące do automatycznego pomiaru wybranych parametrów drzew na podstawie chmury punktów pozyskanych skanerem laserowym FARO FOCUS 3D. Dzięki opracowanym algorytmom (GNOM) określono lokalizację pni drzew na kołowej powierzchni badawczej oraz dokonano pomiarów: pierśnicy pnia ($d_{1.3}$), kolejnych średnic pnia na różnych wysokościach pnia, wysokości wierzchołka drzewa, podstawy korony i objętości pnia (metoda pomiaru sekcyjnego) oraz korony drzewa. Prace badawcze realizowano na terenie Nadleśnictwa Niepołomice w jednogatunkowym drzewostanie sosnowym (*Pinus sylvestris* L.) na powierzchni kołowej o promieniu 18.0 m w zasięgu której znajdowało się 16 sosen (14 z nich ścięto). Drzewostan w wieku 147 lat miał jednopiętrową budowę i był pozbawiony podszytu. Naziemne skanowanie laserowe przeprowadzono tuż przed pracami zrębowymi. Pierśnicę 16 sosen określono w pełni automatycznie algorytmem GNOM z błędem około +2,1% w stosunku do pomiaru referencyjnego wykonanego średnicomierzem. Średni, bezwzględny błąd pomiaru w chmurze punktów - półautomatycznymi metodami "PIXEL" (pomiędzy punktami) oraz PIPE (wpasowanie walca) w programie FARO Scene 5.x, wykazał błąd odpowiednio: 3.5% oraz 5.0%.

Za referencyjną wysokość wierzchołka przyjęto pomiar taśmą mierniczą na ściętym drzewie. Średni błąd automatycznego określania wysokości drzew algorytmem GNOM na podstawie chmury punktów TLS wyniósł 6.3%, i był niewiele większy niż przy zastosowaniu manualnej metody pomiaru na przekrojach w programie TerraScan (Terrasolid; błąd ~5.6%). Pomiar wysokości podstawy korony wykazał błąd na poziomie +9.5%. Referencję w tym przypadku stanowił pomiar taśmą wykonany ściętych sosnach. Przetwarzanie chmur punktów TLS algorytmami GNOM w przypadku 16 analizowanych sosen trwało poniżej 10 min (37 sek. /drzewo).

W pracy wykazano jednoznacznie przydatność technologii TLS w leśnictwie i jej wysoką dokładność przy pozyskiwaniu danych biometrycznych drzew oraz dalszą potrzebę zwiększania stopnia automatyzacji przetwarzania chmur punktów 3D pochodzących z naziemnego skanowania laserowego.

1. WPROWADZENIE

W każdej dyscyplinie życia człowieka towarzyszy mu informacja a jej posiadanie jest niezbędne w celu osiągnięcia zamierzonego celu. Również w leśnictwie bardzo ważne jest pozyskanie i opracowanie informacji o drzewostanie, tak by odpowiednio dobrze nim zarządzać. Pierwsze badania nad wykorzystaniem naziemnych skanerów laserowych w leśnictwie przeprowadzili Welles i Cohen (1996), testując go do wykrywania luk w drzewostanie. Używany przez nich skaner „laser leaf” dostarczał informacji tylko o tym czy promień lasera natknął się na przeszkodę czy też nie. Tanaka (1998) wykazał przydatność naziemnego skaningu laserowego, w celu określenia kształtu koron drzew. Hopkinson (2004) przeprowadził badania nad wykrywaniem pni drzew w drzewostanie. Metody manualne pomiarów były jednak zbyt pracochłonne, dlatego też zaczęto stopniowo wprowadzać automatyzację pomiarów. Bienert (2006) zastosowała w swych pracach półautomatyczną metodę detekcji drzew.

Hopkinson (2004) przeprowadził badania nad dokładnością pomiarów pierśnicy drzew z wykorzystaniem naziemnego skaningu laserowego. W pełni automatyczny algorytm pomiaru pierśnic wykorzystujący transformację Hough'a zaproponowali Aschoff i Spicker (2004).

W warunkach Polski, Wężyk *et al.* (2007) w badaniach realizowanych w Nadleśnictwie Milicz zastosował dwie metody pomiaru pierśnic. Pierwsza z nich określona jako metoda „PIXEL” polegała na pomiarze odległości pomiędzy dwoma skrajnymi punktami reprezentującymi pień jednego drzewa w widoku planarnym programu FARO Scene. Drugą metodą był tzw. pomiar „PIPE” polegający na półautomatycznym wpasowaniu walca we fragment chmury punktów TLS reprezentujący pień drzewa na wysokości 1.3m.

Wężyk i Koziół (2007) opracowali algorytm do pomiaru pola pierśnicowego przekroju drzew. Co ważne, algorytm nie przyrównywał przekroju pnia drzewa do okręgu. Algorytm działał dla drzew zeskanowanych, co najmniej w 50% obwodu pnia. Tompański i Koziół (2008) zmodyfikowali algorytm dodając możliwość pomiaru drzew zeskanowanych nawet poniżej 50% obwodu pnia drzewa.

Hennin i Radtke (2006) prowadzili badania nad dokładnością pomiarów średnicy pnia przy użyciu naziemnego skanowania laserowego na różnych wysokościach drzewa. Za

referencje przyjęli manualne pomiary średnic przy użyciu średnicomierza na ściętych drzewach.

Nad określaniem miąższości pnia drzewa pracowali między innymi Király *et al.* (2010). Holopainen *et al.* (2011) prowadzili badania dotyczące określania biomasy w oparciu o chmury punktów z naziemnego skaningu laserowego.

Nad wysokością drzew prowadził badania między innymi Hopkinson (2004). Jako wysokość drzewa uznawał on odległość pomiędzy najwyższym i najniższym zidentyfikowanym punktem (echem odbicia promienia lasera) drzewa.

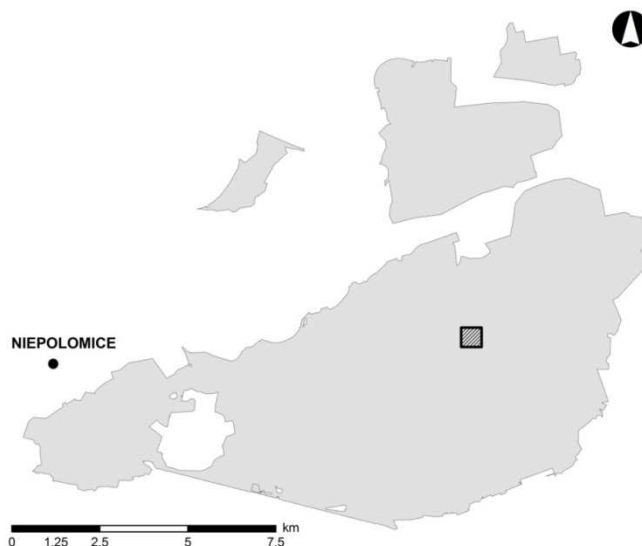
Przydatność skanerów laserowych w leśnictwie jest ściśle uzależniona od procesu automatyzacji przetwarzania chmury punktów. Prace związane z manualnym przetwarzaniem chmury punktów TLS były i są bardzo pracochłonne i długotrwałe, co powoduje dziś ograniczenie ich przydatności dla gospodarki leśnej. Obecnie znaczna część operacji na chmurach punktów obrazujących pojedyncze drzewo, zmierzająca do określenia poszczególnych cech tego drzewa, przebiega automatycznie (Dassot *et al.* 2011). Automatyzacja pozwala na znaczne przyspieszenie prac i jednocześnie umożliwia wdrożenie technologii TLS do bardziej zaawansowanych prac związanych z pozyskaniem surowca drzewnego. Tartak wyposażony w skaner będzie mógł określić najbardziej ekonomiczne wykorzystanie surowca drzewnego a także umożliwi jego wirtualną obróbkę jeszcze w fazie kłody.

Celem pracy było opracowanie algorytmów do automatycznego określania pierśnicy pnia, wysokości wierzchołka i wysokości podstawy korony sosny na podstawie chmury punktów z naziemnego skanowania laserowego (TLS) oraz określenie dokładności metody w stosunku do tradycyjnych pomiarów stosowanych w gospodarce leśnej.

2. TEREN BADAŃ

Badania zostały przeprowadzone w 2009 roku na powierzchni badawczej nazwanej „ZRAB” (wykonywano na niej pozyskanie) zlokalizowanej na terenie Nadleśnictwa Niepołomice (Rys.1), wchodzącym w skład Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Krakowie (oddział 153, pododdział „f”). Powierzchnia badawcza miała kształt koła o promieniu 18.0 m i zajmowała powierzchnię 1017.87 m².

Drzewostan sosnowy (II klasa bonitacji) w tym wydzieleniu wzrastał na siedlisku boru mieszanego wilgotnego (BMw). Wydzielenie 153f zajmowało powierzchnię 1.4 ha, a zapas drzewostanu wynosił 388.95 m³ (źródło: SILP, Nadleśnictwo Niepołomice 2009).



Rys.1. Lokalizacja powierzchni badawczej „ZRĄB” na terenie Nadleśnictwa Niepołomice (RDLP Kraków).

3. METODYKA PRACY

Metodykę pracy opisano w dwóch podrozdziałach. W pierwszym z nich przedstawiono informacje dotyczące pomiarów przeprowadzonych na powierzchni próbnej, natomiast w drugim - opisano prace kameralne, tj. proces przetwarzania chmury punktów TLS przy użyciu autorskich algorytmów.

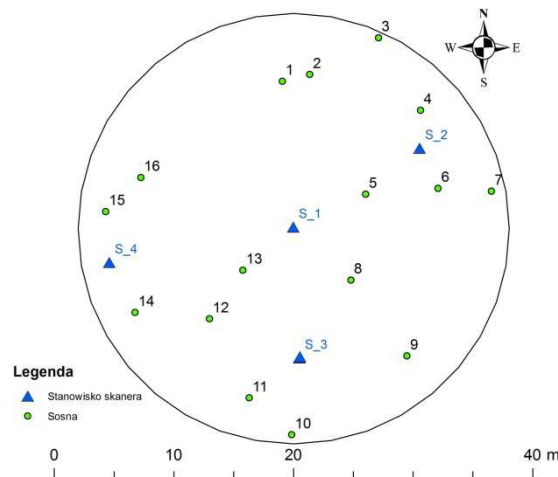
3.1. Prace terenowe

W pierwszym etapie prac wyznaczono optymalną lokalizację dla czterech stanowisk skanera (S_1 do S_4), tak by z każdego z nich widoczna była możliwie największa liczba drzew. Wszystkie drzewa w promieniu 18.0m od środka powierzchni (S_1) ponumerowano (ID = 1÷16) oraz zaznaczono na ich pniach miejsce pomiaru pierśnicy (130 cm od gruntu) w kierunku wszystkich 4 stanowisk skanera. W kolejnym kroku przeprowadzono podstawowe pomiary dendrometryczne poszczególnych drzew polegające na określeniu:

- pierśnicy pnia na wysokości 1.3m od gruntu, przy pomocy średnicomierza w pięciu kierunkach;
- obwodu pnia na wysokości 1.3m od gruntu, przy pomocy taśmy mierniczej;
- wysokości drzew przy pomocy wysokościomierza Suunto i Vertex I (Haglöf);
- wysokości podstawy korony drzew wysokościomierzem Vertex I (Haglöf).

Skanowania laserowego dokonano przy użyciu skanera FARO Photon 80 dzięki uprzejmości firmy Faro Polska. Zastosowano metodę pomiaru z 4 stanowisk skanera

(Rys. 2) tj. jednego centralnego (S_1) oraz kolejnych trzech umieszczonych blisko obwodu powierzchni wg. metodyki opracowanej przez Wężyka i in. (2007).



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia stanowisk (S_1 ÷ S_4) TLS wraz z lokalizacją drzew

Ostatnim etapem prac terenowych było wykonanie pomiarów dendrometrycznych na ściętych sosnach. Pomierzono jedynie 14 z 16 drzew, gdyż dwóm pozostałym sosnom nadano status tzw. drzew ekologicznych i nie podlegały one pozyskaniu. Na wszystkich drzewach dokonano pomiarów długości pnia pomiędzy odziomkiem a wierzchołkiem oraz odległości pomiędzy odziomkiem a podstawą korony (nasada gałęzi żywych).

3.2. Przetwarzanie chmury punktów TLS

Dane były analizowane w dwojaki sposób. Pierwszym z nich była obróbka chmury punktów przy użyciu programów takich jak: FARO Scene Version (4.5.20.2) oraz TerraScan (Terrasolid). Drugi sposób polegał na opracowywaniu autorskich algorytmów i odpowiednim ich zaprogramowaniu (program GNOM). Poniżej zaprezentowano zastosowaną metodykę postępowania z pozyskaną chmurą punktów w komercyjnym oprogramowaniu. W pierwszej kolejności dokonano pomiaru pierśnic metodami PIXEL i PIPE w programie FARO Scene. W programie Terrascan (Terrasolid) dokonywano pomiaru wysokości drzew oraz wysokości podstawy koron wszystkich drzew na dokonywanych manualnie przez operatora przekrojach poprzecznych przez chmurę punktów TLS.

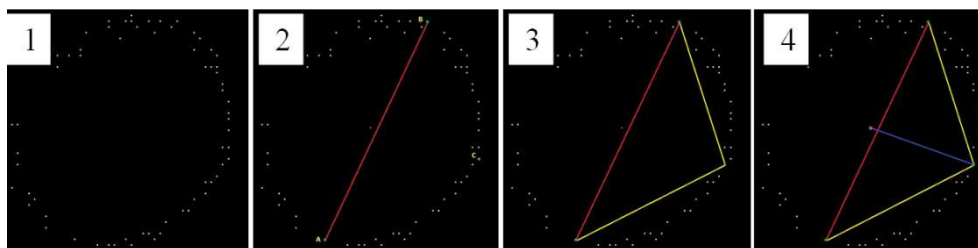
Zestaw programów GNOM został napisany w językach programowania C/C++. Aplikacja GNOM może być używana w dwojaki sposób, tzn. jako pojedyncze narzędzie do przetwarzania chmury punktów TLS (XYZ) przy stałym nadzorze i udziale operatora lub jako zestaw algorytmów, do automatycznego przetwarzania chmury punktów TLS przy minimalnej ingerencji operatora. Podstawowe narzędzia aplikacji GNOM to: *DensityCube*,

DensityElevation oraz odpowiednie filtry. Do automatycznych algorytmów GNOM zaliczamy: *TreeFinder*, *Centroid*, *DiameterMeasure*, *CrownHeight*, *TreeHeight*, *CrownVolume* oraz *SectionCutter*. W niniejszej pracy zaprezentowano jedynie część narzędzi i algorytmów.

***DensityCube*.** Przy jego użyciu algorytmu *DensityCube* chmura punktów TLS konwertowana jest do postaci wokseli (ang. voxel), czyli piksela 3D zawierającego informację o liczbie punktów w przestrzeni trójwymiarowej (Popescu *et al.*, 2008).

***DensityElevation*.** Wykorzystując algorytm *DensityElevation* określać można liczbę punktów w klasach wysokości.

Centroid (GNOM) służy do obliczenia w sposób matematyczny współrzędnych środka poprzecznego przekroju pnia na podstawie wycinka chmury punktów TLS. Wynikiem działania programu może być jeden centroid dla określonej wysokości lub wiele centroidów z różnych wysokości. Algorytm umożliwia wyznaczenie osi pnia drzewa przebiegającej przez centroidy oraz obliczenie średnicy pnia na dowolnej wysokości.

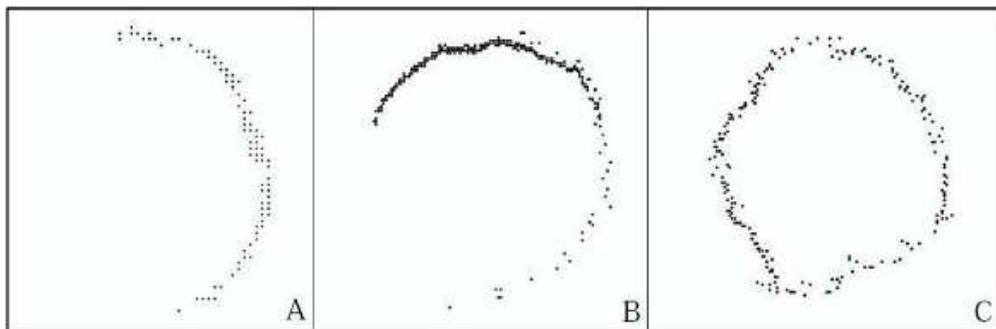


Rys. 3. Kolejne kroki działania algorytmu Centroid (GNOM). 1-wycinek chmury punktów; 2 - wyznaczenie najdłuższej cięciwy AB oraz punktu C; 3 - wyznaczeni cięciw pośrednich (AC i BC); 4 - wyznaczenie promienia i współrzędnych środka przekroju pnia.

W pierwszym kroku wykorzystując algorytm „*Centroid*” wyselekcjonowany zostaje pierścień z chmury punktów TLS, a następnie wyznaczana jest najdłuższą cięciwą oraz punkt ‘C’ leżący na środku łuku pomiędzy punktami ‘A’ i ‘B’ (Rys. 3 -2). W kolejnym kroku wylicza się wektory *AC*, *CB* i *BA*. Przy użyciu wzoru (1) obliczana jest długość promienia (R) okręgu opartego na tych trzech punktach. Następnie, na podstawie promienia obliczane są współrzędne potencjalnego środka. Program losuje dwa kolejne punkty przy założeniu, że odległość między nimi jest większa niż połowa najdłuższej cięciwy. Program powtarza całą operację traktując wylosowane punkty jako A i B. W ten sposób obliczane są współrzędne dla sześciu różnych centroidów, a na ich podstawie średnia centroida. W kolejnym kroku obliczana jest średnia oraz odchylenie standardowe dla odległości pomiędzy centroidą a punktami tworzącymi obwód pnia. Jako właściwy środek pnia, wybierana jest centroida z najmniejszym odchyleniem standardowym.

$$R^2 = |\overrightarrow{AC}| \div \left(2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\overrightarrow{BA} \circ \overrightarrow{CB}}{|\overrightarrow{BA}| \cdot |\overrightarrow{CB}|} \right)} \right) \quad (1)$$

Algorytm można stosować dla dowolnego wycinka pnia, przy założeniu że chmura punktów TLS zawiera tylko punkty tworzące pień. W przypadku obecności korony lub innych zakłóceń (np. krzewy, podszyt, drugie piętro drzew) algorytm zwraca błędne wartości. Algorytm dobrze radzi sobie z wszystkimi trzema kategoriami pni przedstawionymi na Rys. 4, zaproponowanymi przez Tompalskiego i Koziola (2008). Z uwagi na brak referencji, w niniejszych badaniach nie określano błędu wyznaczania środka pnia.



Rys. 4. Podział na kategorie pni (źródło: Tompalski, Koziół, 2008): A- chmura punktów reprezentuje poniżej 50% obwodu pnia; B- chmura punktów reprezentuje od 50% do 83% obwodu pnia; C- chmura punktów reprezentuje powyżej 83% obwodu pnia.

DiameterMeasure. Przy użyciu tego algorytmu obliczana jest średnica pnia na podstawie punktu wyznaczonego przy użyciu algorytmu Centroid. Algorytm oblicza średnią odległość pomiędzy centroidą a punktami tworzącymi obwód pnia (R) i podwajają ją zwracając tym samym średnią wartość średnicy pnia. Algorytm można zastosować dla wycinka chmury punktów z dowolnej wysokości pnia drzewa.

CrownHeight. Algorytm określa wysokość podstawy korony drzewa na podstawie chmury punktów TLS dla pojedynczego drzewa oraz grunt wokół niego.

TreeHeight. Wysokość wierzchołka drzewa obliczana jest na podstawie odległości pomiędzy najwyższym punktem (przyjmowany za wierzchołek) w chmurze punktów TLS a rzędną Z dla wykrytego gruntu.

4. WYNIKI I DYSKUSJA

Dane uzyskane poprzez modelowanie i automatyczne przetwarzanie chmury punktów TLS zostały porównane z danymi z pomiarów przeprowadzonych metodami tradycyjnymi, które uznano za referencyjne (dalej oznaczane jako Ref). Drzew o numerach 3 i 7 nie ścięto w wyniku czego nie było możliwe pełne porównanie wyników dla cech wysokość drzewa i wysokość podstawy korony.

4.1. Pierśnica drzewa

Pomiar pierśnicy (DBH; ang. Diameter at Breast Height) na powierzchni badawczej „ZRAŃ” odbywał się w pięciu kierunkach tj. ramieniem średnicomierza skierowanym do środka powierzchni (w stronę pierwszego stanowiska skanera; dalej jako *DBH do środka*), ramieniem skierowanym poprzecznie do środka powierzchni (DBH S_1) oraz w trzech przypadkach pomiaru - ramieniem skierowanym poprzecznie do każdego ze stanowisk skanera: DBH S_2, DBH S_3 oraz DBH S_4 (Wężyk *et al.*, 2007). Pomierzono również taśmą obwód pnia drzewa, a następnie na jego podstawie pierśnicę (*DBH obwód*) ze wzoru na obwód koła oraz średnią pierśnicę z pięciu pomiarów pierśnicomierzem (*DBH średnia*). Dane z pomiarów terenowych traktowano, jako dane referencyjne. Podczas prac kameralnych określono automatycznie pierśnicę przy pomocy programu „GNOM” (DBH) oraz manualnie pomierzono pierśnicę metodą „PIXEL” (*PIXEL DBH*) i półautomatycznie metodą „PIPE” (*PIPE DBH*) w programie FARO Scene. Średnia pierśnica sosen na powierzchni badawczej „ZRAŃ” wyniosła 45.76 cm dla pomiarów średnicomierzem oraz 46.37 cm dla pomiarów dokonywanych taśmą (na podstawie obwodu).

Dla każdej metody pomiaru pierśnicy obliczono bezwzględny błąd pomiaru w porównaniu z pomiarami referencyjnymi (średnia z pięciu pomiarów średnicomierzem i średnicy obliczonej na podstawie obwodu pnia). Przy użyciu automatycznego programu GNOM uzyskano wyniki DBH z bezwzględnym błędem średnim na poziomie ok. 2%, przy czym rozrzut błędów wyniósł od 0.1% do 5%. Metoda pomiaru „PIXEL” obciążona była średnim bezwzględnym błędem na poziomie 3.65% w stosunku do średniej pierśnicy (teren) i 3.91% w stosunku do pomiaru obwodu pnia. Metoda półautomatycznego pomiaru „PIPE” obciążona była bezwzględnym błędem średnim na poziomie 5.18% w stosunku do średniej pierśnicy oraz 4.92% w stosunku do pierśnicy wyliczonej z obwodu pnia (tabela 1).

Pomiar jednej pierśnicy drzewa w programie FARO Scene, wraz z wyznaczeniem wysokości pomiaru (130 cm nad gruntem) metodą "PIXEL" trwał średnio 40 sekund natomiast metodą "PIPE" 30 sekund. Przy użyciu algorytmu *DiameterMeasure* (GNOM) pomiar pierśnicy drzewa dokonywał się średnio w 15 sek., z uwzględnieniem manualnego wyboru drzewa do pomiaru. W przypadku programu GNOM wyniki obliczeń zapisywane są automatycznie do pliku, a w przypadku pomiarów "PIXEL" oraz "PIPE" wyniki należy zanotować lub przekopiować z właściwości tworzonych obiektów (linii 3D lub walca).

W toku prac okazało się iż wyniki pomiaru określone automatycznym algorytmem *DiameterMeasure* (GNOM) obciążone były mniejszymi błędami niż zastosowane metody "PIXEL" oraz "PIPE" zaimplementowane w programie FARO Scene. Wartość błędów pomiaru pierśnicy związana jest ściśle z poprawnym określeniem miejsca przyłożenia średnicomierza (130 cm). Program GNOM określa wysokość gruntu w obrysie korony drzewa statystycznie z przybliżeniem do około 20 cm (w przypadku roślinności runa). Pomiar średnicy pnia w terenie niejednokrotnie jest przypadkowy i wynika często z sytuacji błędnego wskazania miejsca pomiaru ze względu na złożoność jednoznacznego wskazania poziomu gruntu wokół pnia (szczególnie w warunkach górskich lub dużej aktywności zwierzyny wznuszającej glebę wokół pni).

W innych podobnych badaniach Thies (2004) zastosował tzw. algorytm Hough'a, uzyskując przy pomiarze pierśnic dokładność na poziomie 4.1%. Wężyk *et al.* (2007) przy pomiarze pierśnic sosen uzyskali dane z błędem 2.53% stosując metodę „PIXEL”, natomiast dla metody „PIPE” 3.83 %. Bienert *et al.* (2006) w badaniach nad automatycznym określeniem średnicy pnia drzewa uzyskała średni błąd pomiaru ok. 1cm, przy czym maksymalny błąd wyniósł 3.3 cm. Z raportu Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych (2007) wynika, iż błąd automatycznego pomiaru pierśnicy dla gatunków iglastych wyniósł 3.7%.

Tabela 1. Zestawienie błędów pomiarów pierśnicy (DBH) różnymi metodami.

ID drzewa	Dane referencyjne DBH		Moduł błędu określania DBH					
	Średnicomierz [cm] (ref_1)	Taśma [cm] (ref_2)	GNOM		FARO Scene PIXEL		FARO Scene PIPE	
			GNOM - ref_1 [%]	GNOM - ref_2 [%]	PIXEL - ref_1 [%]	PIXEL - ref_2 [%]	PIPE - ref_1 [%]	PIPE - ref_2 [%]
1	43.6	44.4	3.31	1.48	5.91	4.04	11.96	9.98
2	70.8	70.9	2.10	2.24	4.91	4.77	3.93	3.78
3	45.7	45.7	1.39	1.44	1.31	1.26	5.41	5.46
4	35.8	36.6	4.08	1.85	2.57	4.66	0.34	2.47
5	51.1	50.8	2.59	2.09	4.03	3.55	0.93	0.43
6	48.1	48.9	3.06	1.36	4.61	6.18	3.50	5.09
7	36.5	37.8	1.58	4.74	4.49	7.55	4.78	7.83
8	49.4	50.1	3.03	4.41	4.21	2.73	1.49	0.05
9	40.9	41.9	0.65	1.63	1.12	1.17	7.74	5.30
10	43.0	41.6	3.31	0.11	2.51	0.71	4.94	1.80
11	44.7	45.5	0.35	1.37	3.49	1.72	3.95	2.17
12	43.0	44.2	0.52	2.01	2.93	0.34	5.02	2.38
13	52.7	53.8	1.10	3.20	2.24	4.32	0.69	1.45
14	47.2	48.2	2.78	0.73	0.64	1.37	4.94	2.85
15	45.9	47.1	2.63	0.16	9.73	12.18	14.15	16.49
16	33.6	34.4	1.48	3.82	3.75	6.04	9.10	11.26
średnia	45.8	46.4	2.12	2.04	3.65	3.91	5.18	4.92

4.2. Wysokość drzewa

Wysokość drzew na powierzchni doświadczalnej „ZRĄB” została określona sześcioma metodami, z czego, czterema w terenie i dwoma dodatkowymi na podstawie danych z naziemnego skaningu laserowego (TLS). Pomiar w terenie wykonano przy użyciu wysokościomierza Suunto (h_{Suunto}) oraz VERTEX (h_{Vertex}). Instrukcja Urządzenia Lasu (2003) przewiduje zaokrąglanie pomiarów do pełnych metrów, jednak dla celów badawczych w pracy pomiarów nie generalizowano. Wysokość drzew została pomierzona

także przy użyciu tachimetru elektronicznego Leica (h_{tachim}). Po ścięciu drzew ich długość pomierzono taśmą mierniczą i uznano go za pomiar referencyjny (h_{ref}).

Na podstawie chmury punktów TLS dokonano pomiaru wysokości poszczególnych sosen wykorzystując w tym celu automatyczny algorytm *TreeHeight* (h_{GNOM}) oraz manualne pomiary dokonywane przez operatora w programie TerraScan (h_{Terra}). Dane wynikowe zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Błędy pomiaru wysokości [%], E*- drzewo ekologiczne, które nie podlegało wycince.

ID	Moduł błędu [%]				
	$h_{\text{ref}} - h_{\text{Vertex}}$ [%]	$h_{\text{ref}} - h_{\text{Suunto}}$ [%]	$h_{\text{ref}} - h_{\text{tachim}}$ [%]	$h_{\text{ref}} - h_{\text{GNOM}}$ [%]	$h_{\text{ref}} - h_{\text{Terra}}$ [%]
1	13.27	5.13	0.67	0.08	0.04
2a	11.50	1.59	0.99	4.76	1.88
2b	b.d.	13.80	4.17	35.16	15.22
3	E*	E*	E*	E*	E*
4	9.98	10.37	5.65	4.11	3.25
5	8.60	6.81	1.18	4.18	9.39
6	7.55	4.53	0.27	2.22	2.57
7	E*	E*	E*	E*	E*
8	13.10	16.67	3.59	2.17	0.48
9	6.75	9.52	1.25	2.12	1.39
10	16.38	17.07	1.01	2.26	1.36
11	1.03	10.21	2.73	3.88	9.07
12	5.04	5.43	3.35	7.20	8.37
13	11.66	10.95	0.55	2.81	7.24
14	3.10	13.95	0.04	6.46	9.65
15	7.80	23.05	0.94	14.27	12.20
16	12.03	19.50	3.09	3.22	3.24
średnia	9.13	11.24	1.96	6.33	5.69
odch. stand.	4.3	6.1	1.7	8.6	4.8

Najdokładniejszą metodą określenia wysokości drzewa okazał się pomiar tachimetrem elektronicznym, który wykazał błąd bezwzględny około 1.96%. Znacznie mniejszą dokładnością cechowały się już pomiary manualne na przekrojach przez chmure punktów TLS w programie TerraScan (Terrasolid). Wyniki obarczone były błędem średnim 5.56%. Wykorzystanie automatycznego algorytmu *TreeHeight* (GNOM) pozwoliło określić wysokość drzew z niewiele większym błędem, kształtującym się na poziomie 6.33%. Powodem dość dużych błędów w pomiarach wysokości drzewa jest fakt, iż jego

wierzchołek mógł być niezeskanowany w wyniku przesłonięcia przez inne gałęzie z dolnych części koron. Drzewo o numerze 2 znacznie zawyżało średni błąd pomiaru algorytmu, z tego względu, iż była to tzw. dwójka na co algorytm był nieprzygotowany. Część punktów reprezentujących jedno z rozwidleń pnia mogła zostać potraktowana przez algorytm jako punkty należące do sąsiedniego drzewa, w tym punkty reprezentujące wierzchołek. Gdyby nie analizować tego rozgałęzienia pnia, to błąd średni automatycznego pomiaru kształtowałby się na poziomie 4.27%. Wyniki uzyskane tradycyjnymi metodami naziemnego pomiaru wysokości obarczone były znacznie większymi błędami wynoszący w przypadku wysokościomierza Suunto - 11.24% a Vertex - 9.13% (Tab. 2).

W badaniach nad wysokością drzewa Bienert *et al.* (2006) określiła dokładność pomiaru 0.8m, a zespół Heurich *et al.* (2004) uzyskali nieco lepszy wynik wynoszący 0.76m. W pracach Hopkinson *et al.* (2004) autorzy stwierdzili zaniżanie wysokości drzew na podstawie danych z naziemnego skaningu laserowego średnio o 7%. Podobnie Pierzchalski (2009) w swoich badaniach nad wysokością sosen, w programie TerraScan osiągnął dokładność około 5%. Wykorzystując algorytm *TreeHeight* (GNOM) określono wysokość drzew z błędem średnim na poziomie 4.27% (1,1m). Według raportu DGLP (2007) wysokość sosen mierzona manualnie na przekrojach poprzecznych w chmurze TLS była zaniżana średnio o 0.81m. Moskal *et al* (2012) w pomiarach wysokości drzew prowadzonych bezpośrednio na chmurze punktów z TLS uzyskali błąd RMSE 0.75 m.

4.3. Wysokość podstawy korony

Na powierzchni „ZRAŁB” wysokość podstawy korony pomierzono przy użyciu wysokościomierza Vertex (h_{k_Vertex}) oraz dokonano przy pomocy taśmy mierniczej na ściętych drzewach (pomiar referencyjny; h_{k_grunt}). Chmura punktów TLS była wykorzystana do pomiaru wysokości podstawy korony drzewa przy użyciu automatycznego algorytmu *CrownHeight* (h_{k_GNOM}) oraz w trybie manualnym program TerraScan (h_{k_Terra}). W tabeli 3 zestawiono uzyskane wyniki pomiarów.

Najdokładniejszą metodą określania wysokości podstawy korony okazał się pomiar wykonany przy pomocy programu TerraScan (Terrasolid). Błąd bezwzględny kształtował się tu na poziomie 4.37%. Należy również zwrócić uwagę, iż wyznaczenie wysokości podstawy korony jest bardzo subiektywne i zależy od dokładności oraz doświadczenia operatora i interpretacji chmury punktów TLS.

Znacznie większe błędy określenia wysokości podstawy korony wykazała metoda automatycznego pomiaru wysokości programem GNOM wynosząca aż 9.58% (Tab. 3). Związane to było z faktem, iż algorytm jako podstawę korony mógł uznać dużą liczbę martwych gałęzi sosny co automatycznie zaniżało wynik. Zdarzało się że algorytm pomijał pojedyncze żywe gałęzie z niewielką ilością aparatu asymilacyjnego, co z kolei wynik zawyżało.

W swych badaniach nad wysokością podstawy korony Pierzchalski (2009) uzyskał wyniki obarczone błędem od 3 do 6%. Zastosował on metodę manualnego pomiaru w programie TerraScan (Terrasolid) na przekrojach poprzecznych, a za dane referencyjne przyjął pomiary wykonane wysokościomierzem Suunto.

Długość korony drzewa obliczana jest jako różnica pomiędzy wysokością drzewa a wysokością podstawy korony. Zasadne zatem jest przytoczenie wyników badań Moorthy *et al.* (2011), którzy określając długość korony uzyskali błąd RMSE = 0.14 m.

Pojedynczy pomiar wysokości podstawy korony w programie TerraScan (Terrasolid), wraz z wczytaniem chmury punktów TLS trwa średnio 20 sek. przy założeniu, że drzewa są zapisane w osobnych plikach *.LAS. Wykorzystując algorytm *CrownHeight* (GNOM) automatyczny pomiar wysokości podstawy korony pojedynczego drzewa trwa średnio ok. 10 sek., uwzględniając wczytanie chmury punktów oraz manualny wybór plików do analizy.

Tabela 3. Zestawienie wyników pomiaru wysokości podstawy korony.

ID drzewa	Wysokość podstawy korony				Moduł błędu [%]		
	h_{k_Vertex} [m]	h_{k_grunt} [m]	h_{k_GNOM} [m]	h_{k_Terra} [m]	$h_{k_grunt} - h_{k_Vertex}$ [%]	$h_{k_grunt} - h_{k_GNOM}$ [%]	$h_{k_grunt} - h_{k_Terra}$ [%]
1	18.7	19.6	20.0	21.2	4.79	1.83	7.69
2a	20.6	21.0	19.0	21.3	1.90	9.52	1.62
2b	23.3	21.6	19.5	21.3	7.87	9.72	1.57
4	18.3	15.8	20.5	15.8	16.19	30.16	0.32
5	18.9	19.8	19.0	19.1	4.30	3.80	3.29
6	21.4	21.0	22.5	19.5	1.90	7.14	7.10
8	23.7	20.7	19.5	20.6	14.49	5.80	0.43
9	21.2	17.5	17.5	17.4	21.14	0.00	0.63
10	23.1	20.5	21.0	20.4	12.68	2.44	0.73
11	23.3	22.0	22.5	21.7	5.81	2.18	1.54
12	20.0	20.1	17.5	19.8	0.50	12.94	1.69
13	17.9	19.3	22.0	19.7	7.25	13.99	2.18
14	15.3	20.8	18.5	21.2	26.44	11.06	2.02
15	17.0	20.8	18.0	19.4	18.27	13.46	6.92
16	24.2	21.8	17.5	15.7	11.01	19.72	27.84
średnia	20.1	20.2	19.6	19.4	10.30	9.58	4.37
odch. stand.					7.7	8.0	7.0

5. Wnioski

W prezentowanej pracy zademonstrowano funkcjonalność opracowanych algorytmów do automatycznego pomiaru wybranych cech drzew na podstawie naziemnego skaningu laserowego (TLS) oraz porównano dokładność wyników otrzymanych przy ich użyciu, do

tradycyjnych metod pomiaru. Na podstawie przeprowadzonych badań i zaprezentowanych wyników wyciągnięto następujące wnioski, które przedstawiono poniżej.

Średnica pnia (*DiameterMeasure*)

- stosując automatyczny algorytm *DiameterMeasure* do pomiaru średnicy pnia drzewa otrzymujemy wyniki zbliżone do wartości referencyjnych obliczonych na podstawie obwodu pnia, gdyż algorytm realizuje pomiar we wszystkich możliwych kierunkach, tym samym uśredniając pojedyncze wartości;
- niezbędne jest ciągle udoskonalanie algorytmu *DiameterMeasure*, gdyż błąd określania lokalizacji pierśnicy (miejsca pomiaru; wycinka chmury) może mieć znaczący wpływ na wartość powstającego błędu;
- stosowanie algorytmu *DiameterMeasure* (GNOM) jest dwukrotnie szybsze i znacznie dokładniejsze niż pomiary manualne realizowane w oprogramowaniu FARO Scene (FARO).

Wysokość drzewa (*TreeHeight*)

- najdokładniejszą metodą pomiaru wysokości drzewa okazał się pomiar geodezyjny (tachimetr), jednak jest to zbyt pracochłonna metoda do szerokiego stosowania w praktyce leśnej, jednak może być jednak traktowana jako pomiar referencyjny w badaniach naukowych;
- wykorzystanie algorytmu *TreeHeight* pozwala co najmniej dwukrotnie uzyskać pomiary niż stosując manualny pomiar w oprogramowaniu TerraScan (Terrasolid), przy jednoczesnym podobnym poziomie błędów;
- błąd określania wysokości drzewa przy zastosowaniu automatycznego algorytmu *TreeHeight* jest ściśle związany z brakiem danych TLS lub niewielką ich ilością w wierzchołkowej części drzewa.

Wysokość podstawy korony drzewa (*CrownHeight*)

- przyczyną powstawania błędów pomiarowych w określaniu wysokości podstawy korony algorytmem *CrownHeight* są występujące licznie na sosnie martwe gałęzie, które znacznie zaniżają wysokość korony. Z drugiej strony pojedyncze żywe gałęzie, niewykrywane przez program, zawyżają podstawę korony.
- niewątpliwie algorytm *CrownHeight* należy przetestować w drzewostanach liściastych i mieszanych, gdyż rozkład pionowy punktów TLS w tych drzewostanach może odbiegać od schematu jednopiętrowych drzewostanów sosnowych.

Automatyzacja

- stosowanie automatycznych algorytmów do przetwarzania chmury punktów TLS pozwala na znaczne przyspieszenie prac z zakresu inwentaryzacji a tym samym może prowadzić wprost do znacznego ograniczenia kosztów;
- manualne określanie cech biometrycznych drzew jest pracą dość monotonną i powoduje zmęczenie nawet doświadczonego operatora. Automatyczne

przetwarzanie danych TLS nie dotyczy tych problemów, jednak kontrola wyników wciąż jest potrzebna;

- automatyczne przetwarzanie danych TLS jest jedyną drogą, która pozwoli w przyszłości na przyspieszenie prac takich jak inwentaryzacja lasu, szacunki brakarskie, ścinka, sortymentacja, optymalizacja wytwarzania produktów drzewnych oraz klasyfikację surowca.

Spoglądając optymistycznie w przyszłość można spodziewać się wdrożenia w pracach leśnych maszyn wielooperacyjnych wyposażonych w autonomiczne systemy (w tym także skaner), dzięki którym komputer określi sortymenty jakie można wytworzyć z pojedynczego drzewa jeszcze przed jego ścięciem. By osiągnąć takie rezultaty niezbędne jest jednak opracowanie w pełni automatycznych metod obróbki chmury punktów TLS połączone z przetwarzaniem innych geodanych w tym obrazowych (np. zdjęć cyfrowych) oraz GIS (np. danych geometrycznych i opisowych).

LITERATURA

- Aschoff T., 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. s. 71-74.
- Bienert A., Maas H. G., Scheller S., 2006. Analysis of the Information Content of Terrestrial Laserscanner Point Clouds for the Automatic Determination of Forest Inventory Parameters. [W] Koukal T. i Schneider W. (Eds.): Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry. EARSel SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11. Vienna, 14-15.02.2006, s. 1-6.
- Brolly G., Király G., 2010. *Algorithm for individual stem mapping from terrestrial laser scanning*, Silvilaser 2010, Freiburg, Germany
- Dassot M., Constant T., Fournier M., 2011. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science*, 68 (5), s. 959-974.
- Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, 2007. *Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskanych różnymi technikami geomatycznymi. Raport końcowy*, Część II – wyniki z zakresu skanowania naziemnego.
- Heurich M., Weinacker H., 2004. Automatic Tree Detection And Measurement In Temperate Forests Of Central Europe Using Laserscanning Data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*, Vol. XXXVI - 8/W2, s. 198-202.
- Holopainen M., Vastaranta M., Kankare V., Raty M., Vaaja M., Liang X., Yu X., Hyypä J., Hyypä H., Viitala R., Kaasalainen S., 2011. Biomass Estimation Of Individual Trees Using Stem And Crown Diameter TLSS Measurements. W: Lichti, D.D., Habib, A.F. (Eds.), ISPRS Workshop Laser Scanning 2011. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-5/W12, 2011, Calgary, Canada.
- 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 (3), s. 573-583.
- Kozioł K., Wężyk P., 2007. Zastosowanie algorytmu Delaunay`a w eliminacji i klasyfikacji chmury punktów z naziemnego skaningu laserowego Polskie Towarzystwo Informatyki Przestrzennej, *Rocznik Geomatyki*; tom V, zeszyt 5, s. 33-43.

- Moorthy I., Miller J.R., Berni J.A.J., Zarco-Tejada P., Hu B., Chen J., 2011. Field characterization of olive (*Olea europea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, s. 204-214.
- Moskal L.M., Zheng G., 2012. Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest. *Remote Sensing*, 4 (1), s. 1-20.
- Pierzchalski M., 2009. *Naziemny skaning laserowy (TLS) w określaniu wybranych cech taksacyjnych drzewostanu w sosnowych na kołowych powierzchniach próbnych w Nadleśnictwie Milicz*. Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Ekologii Lasu. Praca magisterska.
- Popescu S.C., Zhao K., 2008. A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), s. 767-781.
- 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 (3-4), s. 149-160.
- Thies M., Aschoff T. i Spiecer H., 2003. *Terrestrische Laserscanner Im Forst - Fuer Forstliche Inventur Und Wissenschaftliche Datenerfassung*. AFZ/Der Wald, 58, s. 1430-2713.
- Tompalski P., Kozioł K. 2008. Określanie wybranych parametrów drzew za pomocą naziemnego skaningu laserowego. *Krakowska Konferencja Młodych Uczonych*, s. 337 – 346
- Welles J. M., Cohen S., 1996. Canopy Structure Measurement by Gap Fraction Analysis Using Commercial Instrumentation. *Journal of Experimental Botany*, 47 (302), s. 1335-1342.
- Węzyk P., Kozioł K., Glista M., Pierzchalski M., 2007. Terrestrial Laser Scanning Versus Traditional Forest Inventory. First Results from the Polish Forests. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVI, Part 3 / W52. 424-429. Espoo, Finland. 12-14.09.2007, s. 424-429.

**AUTOMATIC DETERMINATION OF TRUNK DIAMETER, CROWN
BASE AND HEIGHT OF SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) BASED
ON ANALYSIS OF 3D POINT CLOUDS GATHERED FROM MULTI-
STATION TERRESTRIAL LASER SCANNING**

KEY WORDS: terrestrial laser scanning (TLS), point cloud processing, algorithms, biometric characteristics of trees

Summary

Rapid development of terrestrial laser scanning (TLS) in recent years resulted in its recognition and implementation in many industries, including forestry and nature conservation. The use of the 3D TLS point clouds in the process of inventory of trees and stands, as well as in the determination of their biometric features (trunk diameter, tree height, crown base, number of trunk shapes), trees and lumber size (volume of trees) is slowly becoming a practice. In addition to the measurement precision, the primary added value of TLS is the ability to automate the processing of the clouds of points 3D in the direction of the extraction of selected features of trees and stands. The paper presents the original software (GNOM) for the automatic measurement of selected features of trees, based on the cloud of points obtained by the ground laser scanner FARO. With the developed algorithms

(GNOM), the location of tree trunks on the circular research surface was specified and the measurement was performed; the measurement covered the DBH (l: 1.3m), further diameters of tree trunks at different heights of the tree trunk, base of the tree crown and volume of the tree trunk (the selection measurement method), as well as the tree crown. Research works were performed in the territory of the Niepolomice Forest in an unmixed pine stand (*Pinussylvestris* L.) on the circular surface with a radius of 18 m, within which there were 16 pine trees (14 of them were cut down). It was characterized by a two-storey and even-aged construction (147 years old) and was devoid of undergrowth. Ground scanning was performed just before harvesting. The DBH of 16 pine trees was specified in a fully automatic way, using the algorithm GNOM with an accuracy of +2.1%, as compared to the reference measurement by the DBH measurement device. The medium, absolute measurement error in the cloud of points - using semi-automatic methods "PIXEL" (between points) and PIPE (fitting the cylinder) in the FARO Scene 5.x., showed the error, 3.5% and 5.0%, respectively. The reference height was assumed as the measurement performed by the tape on the cut tree. The average error of automatic determination of the tree height by the algorithm GNOM based on the TLS point clouds amounted to 6.3% and was slightly higher than when using the manual method of measurements on profiles in the TerraScan (Terrasolid; the error of 5.6%). The relatively high value of the error may be mainly related to the small number of points TLS in the upper parts of crowns. The crown height measurement showed the error of +9.5%. The reference in this case was the tape measurement performed already on the trunks of cut pine trees. Processing the clouds of points by the algorithms GNOM for 16 analyzed trees took no longer than 10 min. (37 sec. /tree).

The paper mainly showed the TLS measurement innovation and its high precision in acquiring biometric data in forestry, and at the same time also the further need to increase the degree of automation of processing the clouds of points 3D from terrestrial laser scanning.

Dane autorów:

Mgr inż. Michał Ratajczak
e-mail: m.ratajczak@ur.krakow.pl
telefon: +48-12-6625076
fax: +48-12-4119715

Dr hab. inż. Piotr Wężyk
e-mail: p.wezyk@ur.krakow.pl
telefon: +48 12 662 5082
fax: +48-12 411 9715

Przesłano 5.11.2015
Zaakceptowano 22.12.2015