

Ocena możliwości wykorzystania technologii mobilnego skanowania laserowego do identyfikacji drzew i ich wymiarów na przykładzie wybranych drzewostanów bukowych

Assessment of the possibility of using mobile laser scanning technology to identify trees and their dimensions on the example of selected beech stands

Grzegorz Zajączkowski*, Aleksandra Falkowska

Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Zarządzania Zasobami Leśnymi
Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn, Polska

*e-mail: G.Zajaczkowski@ibles.waw.pl, nr tel. +48 22 71 50 664

Abstract. This article evaluates the usefulness of mobile laser scanning technology (MLS) for determining selected tree and stand parameters. Usefulness was determined based on measurements taken with the Zeb-Horizon mobile scanner in four beech stands located in different parts of the country. For each stand, an XYZ point cloud was acquired and reference measurements of tree diameter at breast height (DBH) were taken. The data analysis involved processing the acquired MLS data and comparing it with the reference data. Preliminary tree location plans were prepared for the individual plots, and their accuracy was verified during subsequent fieldwork. The proportion of correctly identified trees ranged from 95.2 % to 100 %, with underestimation mainly affecting trees with small DBH (7–10 cm). The average differences between the mean DBH measured with the MLS technology and with a caliper were small and ranged from -4.0% to 0.3% (1 mm to 16 mm) for individual stands. Overestimation of DBH mainly affected thinner trees (up to 10 cm DBH), while underestimation affected thicker trees. Despite the high value of the coefficient of determination R^2 (correlation of 0.9435 to 0.9945 for MLS data compared to reference data), only for one plot were the differences between these data in the Wilcoxon test non-significant. Differences in average DBH cross-sectional area calculated from the two methods ranged from 0.19% to -8.37% for individual stands and -2.86% on average for all trees. The greatest differences were found in a stand located on a mountain slope, where a large section had dense undergrowth. Such stand structure made it difficult to remotely detect the position of breast height on the point cloud. The results confirmed that the MLS technology can be applied in forest inventory. This method, due to the accuracy of the acquired data as well as the speed of its acquisition, can be an important alternative to traditional methods of measuring trees and stands.

Słowa kluczowe: SLAM, LIDAR, mobilne skanowanie laserowe (MLS), detekcja drzew, pomiar drzew, inwentaryzacja lasu

Keywords: Simultaneous localization and mapping (SLAM), light detection and ranging (LiDAR), mobile laser scanning (MLS), single-tree attributes, tree detection, forest inventory

1. Wstęp

Jednym z głównych zadań realizowanych przez leśników jest inwentaryzacja zasobów leśnych, w tym przede wszystkim pomiar drzew i drzewostanów. Niewątpliwie najczęściej mierzoną cechą dendrometryczną jest pierśnica drzewa. Podstawowym narzędziem do pomiaru grubości drzew pozostaje średnicomierz. Dane z wykonanych w ten sposób pomiarów mają szerokie zastosowanie. Na ich podstawie określa się m.in. przyrost grubości drzewa, służą też do określania pochodnej cechy dendrometrycznej jaką jest pierśnicowe pole przekroju drzew.

Stanowi ono ważny element składowy przy określaniu miąższości zarówno pojedynczych drzew jak i całych drzewostanów. Jednakże, pomiar pierśnicy wielu drzew z wykorzystaniem średnicomierza generuje dużą praco- i czasochłonność (Pace i in. 2022; Shao i in. 2022; Howie, De Stefano 2024). Z tego względu, w ostatnich latach nastąpiło wzmożone zainteresowanie technologią skanowania laserowego, dzięki której terenowe pomiary dendrometryczne mogą być realizowane szybciej przy zachowaniu wymaganej dokładności tych pomiarów (Watt i in. 2003; Thies, Spiecker 2004; Krok i in. 2020; Wardius, Hein 2024).

Wpłynęło: 23.05.2025 r., zrecenzowano: 30.07.2025 r., zaakceptowano: 24.09.2025 r., opublikowano: 16.10.2025 r.

 BY-NC-ND 4.0 © 2025 G. Zajączkowski, A. Falkowska

Sama technologia skanowania laserowego, nazywana technologią LIDAR (ang. Light Detection and Ranging), należy do aktywnych systemów teledetekcyjnych. Oznacza to, że urządzenie samo generuje i emituje impuls świetlny z zakresu bliskiej podczerwieni (ang. Near Infra Red – NIR). W przeciwieństwie do pasywnych systemów teledetekcyjnych, technologia ta jest niezależna wobec warunków oświetleniowych, w związku z czym może ona być wykorzystywana także w nocy (Wężyk 2006). Wynikiem zastosowania technologii skanowania jest chmura punktów, w której każdemu z punktów przypisane jest położenie w postaci współrzędnych x, y, z. Wyróżnia się kilka typów skanerów oraz sposobów skanowania. Nazemne skanowanie laserowe (ang. Terrestrial Laser Scanning – TLS) jest jednym z trzech sposobów wykonywania skanowania laserowego, obok lotniczego (ang. Airborne Laser Scanning – ALS) i satelitarnego skaningu laserowego (ang. Satellite Laser Scanning – SLS), przy czym ten ostatni znajduje się dopiero w początkowej fazie rozwoju. Sposoby te różnią się ze względu na rodzaj nośnika sprzętu skanującego (Wężyk 2006). Skanowanie naziemne polega na rejestrowaniu danych z terenu z wyznaczonych stanowisk. W danym miejscu, np. na środku powierzchni próbnej, skaner montowany jest na statywie. Podczas pracy urządzenie obraca się wokół własnej osi, rejestrując obraz otaczającej rzeczywistości (Liang i in. 2016). Największym problemem jaki jest napotykanym podczas skanowania naziemnego to efekt przysłaniania drzew. Drzewa znajdujące się bliżej środka powierzchni przysłaniają te znajdujące się w większej odległości. Prowadzone badania udowodniły, że im większy jest promień powierzchni, tym więcej drzew jest przysłanianych i tym samym pomijanych w ocenie (Zasada i in. 2013). Dane TLS umożliwiają zdalne pozyskanie informacji o wielu cechach drzew, m.in.: średnicy, wysokości, długości korony (Li i in. 2025; Parhizgar i in. 2025). Alternatywą dla opisanych metod inwentaryzacji bazujących na danych TLS jest mobilne skanowanie laserowe (ang. Mobile Laser Scanning – MLS). Technologia ta już od około 20 lat znajduje zastosowanie w badaniach prowadzonych na obszarach leśnych, szczególnie w aspekcie identyfikacji i położenia drzew w drzewostanie,

a także ich wymiarów (Holvoet i in. 2025; Kükenbrink i in. 2025). Dane pozyskuje się skanerem trzymanym w dłoni lub na stelażu plecakovym. Operatorem sprzętu jest człowiek, dlatego w literaturze można spotkać się z różnymi określeniami tej technologii, jak np.: *Hand Personal Laser Scanning* (HPLS) (Balenović i in. 2020), *Personal Laser Scanning* (PLS), *Hand-held Mobile Laser Scanner* (HMLS), *Wearable Laser Scanning* (WLS), *Hand-held Laser Scanner* (HLS) (Gollob i in. 2020). W niniejszej pracy wykorzystywany będzie skrót MLS.

Celem opisanych w niniejszym artykule badań było sprawdzenie, czy mobilne skanowanie laserowe może skutecznie zastąpić tradycyjne metody identyfikacji i położenia drzew w drzewostanie oraz pomiaru ich pierśnicy. Badania przeprowadzono na przykładzie czterech drzewostanów bukowych.

2. Materiał badawczy i metodyka badań

2.1. Teren badań

Dane badawcze pozyskano na czterech stałych powierzchniach obserwacyjnych (SPO) wchodzących w skład sieci monitoringu lasu II rzędu, na których gatunkiem panującym jest buk pospolity (*Fagus sylvatica* L.) w wieku od 81 do 104 lat. Powierzchnie badawcze o numerze 1 (SPO nr 114/2) i 2 (SPO 104/2) zlokalizowane są w Krainie Śląskiej. Pierwsza z nich położona jest w Mezuregionie Lasów Raciborskich, natomiast druga w Mezuregionie Równiny Niemodlińskiej. Trzecia powierzchnia badawcza (SPO 132/13) leży na terenie Mezuregionu Pogórza i Gór Wałbrzyskich w Krainie Sudeckiej. Natomiast powierzchnia o numerze 4 (SPO 4/7) należy do Mezuregionu Pojezierza Iławskiego, będącego częścią Krainy Bałtyckiej (Zielony, Kliczkowska 2012) (ryc. 1). Powierzchnie 1 i 2 zlokalizowane są na terenie płaskim, natomiast powierzchnie nr 3 i 4 położone są na zboczach wzniesień, a dodatkowo na dużej części powierzchni nr 3 występuje naturalne odnowienie dorastające 2 m wysokości. Podstawowe charakterystyki poszczególnych powierzchni przedstawiono w tabeli 1, natomiast zdjęcia pokazujące ich rzeczywisty obraz na rycinach 2–5.



Rycina 1. Lokalizacja powierzchni badawczych
Figure 1. Location of research plots

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki powierzchni badawczych

Table 1. Basic characteristics of research plots

Nr	Powierzchnia Area [ha]	Typ siedliskowy lasu Forest habitat type*	Wiek Age	Średnia pierśnica Average DB [mm]	Średnia wysokość Average height [m]	Zagęszczenie drzew Tree density[szt./ha]	Pierśnicowe pole przekroju Basal area [m ² /ha]
1	0,73	LMśw	81	416	32,7	207	30,03
2	0,89	LMśw	98	399	33,4	199	25,47
3	0,82	LGśw	104	400	33,3	285	37,86
4	0,56	Lśw	98	314	30,0	445	39,31

* LMśw – las mieszany świeży (fresh mixed broadleaved forest), LG – las górski (mountain broadleaved forest), Lśw – las świeży (fresh broadleaved forest)

**Rycina 2. Powierzchnia badawcza nr 1 (fot. G. Zajączkowski)**

Figure 2. Research plot no. 1 (photo G. Zajączkowski)

**Rycina 3. Powierzchnia badawcza nr 2 (fot. G. Zajączkowski)**

Figure 3. Research plot no. 2 (photo G. Zajączkowski)



Rycina 4. Powierzchnia badawcza nr 3 (fot. G. Zajączkowski)
Figure 4. Research plot no. 3 (photo G. Zajączkowski)



Rycina 5. Powierzchnia badawcza nr 4 (fot. G. Zajączkowski)
Figure 4. Research plot no. 4 (photo G. Zajączkowski)

2.2. Urządzenia pomiarowe

Do pozyskania danych terenowych wykorzystano skaner mobilny Zeb-Horizon 3D Mobile Scanner firmy GeoSlam (ryc. 6). W tabeli 2 przedstawiono wybrane parametry techniczne skanera (ZEB-HORIZON – podręcznik użytkownika). Zaletą skanera Zeb-Horizon jest zastosowany system operacyjny oparty na technologii SLAM, bazujący na matematycznych przeliczeniach pozycji punktów bez korzystania z sygnału GPS, co predestynuje tę technologię do wykorzystania na obszarach leśnych (TPI 3D 2021).

Dla potrzeb weryfikacji przydatności danych pozyskanych mobilnym skanerem ręcznym w wybranych czterech drzewostanach

wykonano pomiary referencyjne z zastosowaniem pierśnicomierza firmy Hagloff z podziałką milimetrową

2.3. Dane terenowe

Prace terenowe, w tym skanowanie laserowe i pomiary referencyjne, zostały wykonane w okresie bezlistnym. Zdecydowano się na to, ponieważ skanowanie drzew poza okresem wegetacyjnym stwarza dogodne warunki do właściwego zobrazowania zdrewniałych części drzew. Aparat asymilacyjny krzewów należących do warstwy podszytu mógłby przysłonić dolne części pni drzew. Podjęte w ten sposób działania znacząco wpływają na eliminację potencjalnego efektu przysłaniania drzew (Krok

Tabela 2. Wybrane parametry skanera Zeb-Horizon
 Table 2. Selected parameters of the Zeb-Horizon scanner

Parametr Parameter	Wielkość parametru Value
Maksymalny zasięg Maximum range	100 m
Szybkość skanowania Scanning speed	300 000 pkt/s / points/sec
Dokładność pomiaru Measurement accuracy	1-3 cm
Pole widzenia Range of view	270° x 360°
Rozmiar pliku File size	100-200 MB min
Czas pracy Operating time	3 godziny ciągłej pracy na wbudowanej baterii 3 hours of continuous work on the built-in battery



Rycina 6 Skaner Zeb-Horizon przygotowany do rejestracji danych (fot. G. Zajączkowski)
 Figure 6. Zeb-Horizon scanner prepared for data recording (photo G. Zajączkowski)

i in. 2020). Dane MLS pozyskano w listopadzie 2021 r. obchodząc poszczególne powierzchnie po linii ich granic, a następnie przechodząc przez drzewostan równolegle do dłuższej granicy z zachowaniem odstępów od linii przejścia nie większych niż 10–15 m. Jest to zgodne z zaleceniami opisanymi przez Del Perugia i in. (2019), którzy stwierdzili, że w drzewostanach o prostej strukturze taka odległość pozwala na detekcję praktycznie wszystkich drzew. W młodych drzewostanach oraz o złożonej strukturze zaleca się zachowanie maksymalnie 10 m odległości pomiędzy liniami przejścia. Czas skanowania jednej powierzchni dendrometrycznej nie przekraczał 20 minut.

Dane referencyjne pozyskano w kwietniu 2022 r. Obejmowały one pomiar dwóch prostokątnych średnic drzew na wysokości 1,3 metra od poziomu gruntu z wykorzystaniem średnicomierza firmy Hagloff. W przypadku, gdy skala pierśnicomierza nie obejmowała średnicy drzewa wykonano pomiar obwodu za pomocą taśmy mierniczej. Zebrane w ten sposób dane zostały przyjęte w dalszych obliczeniach jako dane referencyjne. Jednocześnie w trakcie tych prac dokonano weryfikacji wstępnych planów rozmieszczenia drzew na poszczególnych powierzchniach opracowanych na podstawie przetworzonych danych MLS. Drzewom na planie

przypisano numerację z drzew w terenie – na powierzchniach dendrometrycznych wszystkie drzewa opisane są numerem. Weryfikacja drzew w terenie wraz z ich pomiarem zajmowała około 2–2,5 godziny na każdej z czterech powierzchni. Stwierdzone w terenie rozbieżności dotyczące lokalizacji drzew skorygowano na cyfrowych wersjach planów powierzchni.

2.4. Przetworzenie danych MLS

Dane zebrane podczas mobilnego skanowania terenu domyślnie zostały zapisane w formacie SLAM, który jest dedykowany wyłącznie dla urządzeń typu SLAM (np. Zeb-Horizon). Eksport do formatu wymiany danych LIDAR laz z uwzględnieniem stosownych filtrów, wykonano z wykorzystaniem oprogramowania GeoSlam Hub. Utworzone chmury punktów przetworzono w darmowym programie CloudCompare v 2.12.1, który jest dedykowany do analizy chmury punktów 3D (Girardeau-Montaut i in. 2005). Dla potrzeb niniejszej pracy chmury punktów obrazujące przestrzenną strukturę drzewostanów przetworzono przy zastosowaniu algorytmu CSF (ang. Cloth Simulation Filtering) (Zhang i in. 2016), dzięki czemu wydzielono punkty repre-

zentujące grunt i warstwę roślinności. W celu identyfikacji drzew z chmury punktów reprezentujących roślinność pozyskano 20-centymetrowe wycinki, tzw. slice, z wysokości 1,3 oraz 4,0 metra od poziomu gruntu. Wycinek obrazujący przekrój na wysokości 1,3 m obejmował zbiór punktów od 1,2 do 1,4 metra wysokości nad poziomem gruntu. Z wykorzystaniem algorytmu Hough Transfor (Mukhopadhyay, Chaudhuri 2015), który umożliwia wyszukiwanie grup punktów układających się we wzorce przypominające okręgi – w tym przypadku przekroje pni drzew – wygenerowano wstępny plan rozmieszczenia drzew na powierzchni. Obecność drzew w danych lokalizacjach zweryfikowano wykonując powyższą analizę na wycinkach punktów pozyskanych z wysokości 4 m. Dla każdej z czterech powierzchni przygotowano plan rozmieszczenia drzew, który ostatecznie został zweryfikowany podczas prac terenowych w kwietniu 2022 r.

Dla wszystkich zatwierdzonych punktów obrazujących na planie drzewa w programie QGIS wykonano pomiar pierśnic drzew z wykorzystaniem fragmentów chmur punktów wyciętych na wysokości 1,3 metra od poziomu gruntu. Średnicę zmierzono dwukrotnie. Pomiary były względem siebie prostopadłe (ryc. 7). Ze względu na deklarowaną przez producenta skanera dokładność pomiaru lokalizacji punktu wynoszącą 1–3 cm oraz specyficzną dla buka gładkość kory, po przeprowadzeniu testów zdecydowano aby analogowy pomiar średnic wykonywać z wykorzystaniem punktów reprezentujących środkową część obwodu pnia (ryc. 7). Taki sposób podejścia do pomiarów na chmurze przetestowano wcześniej na wybranych drzewach na powierzchni 1 – korespondował on najlepiej z danymi referencyjnymi.

Dane wynikowe, zarówno te pozyskane z pomiaru pierśnic drzew z wykorzystaniem średnicomierza, jak i z pomiarów na chmurze punktów, wykorzystano przy porównaniu wyników oraz do obliczenia pierśnicowego pola przekroju (PPP) dla każdego drzewa, oddzielnie z danych z pomiaru referencyjnego i mobilnego skanowania z zastosowaniem wzoru na pole koła. Na podstawie sumy wyników dla pojedynczych drzew obliczono pole przekroju dla poszczególnych drzewostanów badawczych.

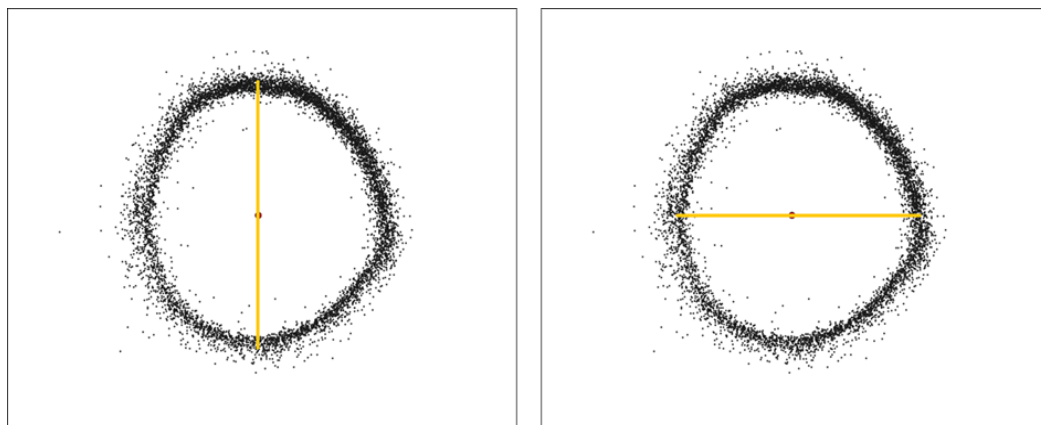
3. Wyniki

3.1. Detekcja drzew

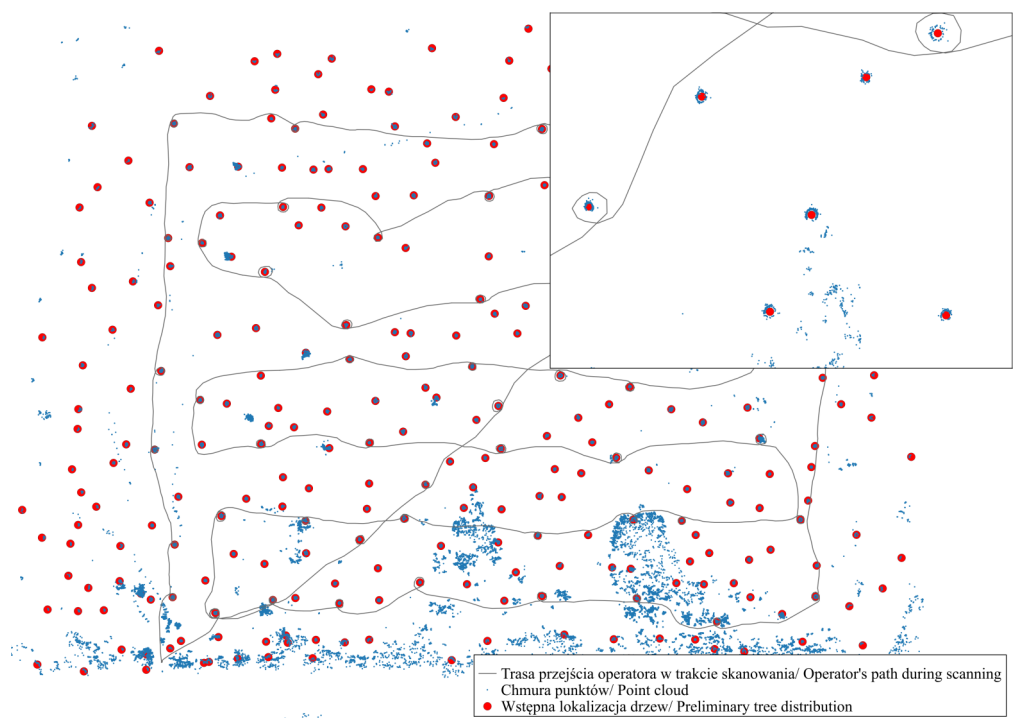
Wyniki dotyczące przestrzennej detekcji drzew przedstawiono na rycinach 3–4, natomiast wyniki ilościowe identyfikacji drzew zaprezentowano w tabeli 3.

Na rycinie 8 przedstawiono wstępny plan rozmieszczenia drzew na przykładzie powierzchni nr 2 wygenerowany z wykorzystaniem algorytmu Hough Transform. Pokazano na niej również trasę przejścia operatora skanera podczas rejestracji chmury punktów. Na rycinie 9 przedstawiono efekt weryfikacji terenowej. Na obrazie widoczne są ręcznie naniesione poprawki i numery odczytane z pni drzew. Zmiany dotyczyły przede wszystkim wykreślenia drzew, które nie zostały objęte pomiarami. W przypadku tej powierzchni nie było konieczne dodanie na planie lokalizacji drzew, których nie uwzględniono podczas tworzenia wstępnego planu powierzchni. Na rycinie 3. pokazano rzeczywisty obraz skanowanego drzewostanu.

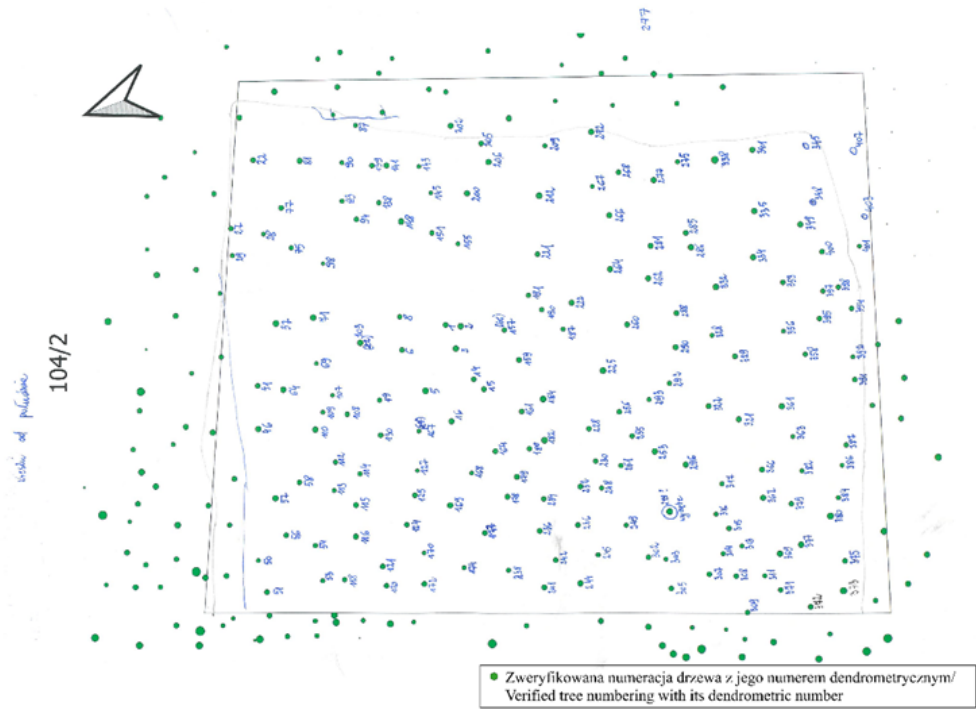
Na poszczególnych powierzchniach badawczych pomiarom poddano od 150 do 249 drzew (tab. 3). W przypadku powierzchni numer 1 i 2 na wstępnym planie powierzchni uwzględniono 100% drzew objętych pomiarami, co potwierdziła przeprowadzona weryfikacja terenowa. Natomiast w przypadku dwóch pozostałych powierzchni, tj. 3 i 4, nie uwzględniono odpowiednio 5. (2,1 % wszystkich drzew) i 12. (4,8%) drzew. Drzewa te reprezentowały nieliczną warstwę podrostu i charakteryzowały się małą pierśnicą (7–10 cm). Przestrzenną lokalizację tych drzew potwierdzono na planie na podstawie powtórnej analizy chmury punktów. Kolejną informacją odnotowaną w tabeli 3 jest liczba drzew, które zostały uwzględnione na wstępnym planie powierzchni, natomiast po weryfikacji terenowej okazały się być drzewami niepodlegającymi pomiarom (tj. pierśnica < 70 mm). W przypadku obszaru numer 1 i 4 była to stosunkowo mała liczba, odpowiednio 8 i 4 drzewa. Natomiast na wstępnym planie powierzchni nr 3 ponad miarowo wyznaczono 45 lokalizacji drzew. Tylko na planie pow. 2 nie stwierdzono dodatkowych lokalizacji drzew.



Rycina 7. Pomiar pierśnicy na wybranym wycinku chmury punktów w dwóch prostopadłych kierunkach
 Figure 7. Measurement of DBH on a selected section of the point cloud in two perpendicular directions



Rycina 8. Wstępny plan rozmieszczenia drzew na powierzchni nr 2 wraz ze ścieżką przejścia przez drzewostan podczas skanowania
Figure 8. Preliminary tree distribution plan for plot 2 with the path through the stand during scanning



Rycina 9. Plan rozmieszczenia drzew dla powierzchni badawczej nr 2 po weryfikacji w terenie
Figure 9. Tree distribution plan for study plot 2 after field verification

Tabela 3. Wyniki detekcji drzew
Table 3: Tree detection results

	Numer powierzchni badawczej Test plot number			
	1	2	3	4
Rzeczywista liczba drzew (szt.) Real number of trees (pcs).	150	177	234	249
Liczba drzew nie uwzględnionych na wstępnym planie powierzchni (szt.) Number of trees not included in the initial plot plan (pcs).	0	0	5	12
Liczba zarejestrowanych drzew nieobjętych pomiarem (szt.) Number of registered trees not covered by the survey (pcs).	8	0	45	4

3.2. Detekcja pierśnicy

Przeciętne wielkości pierśnic pomierzone w chmurze punktów i z pomiaru referencyjnego charakteryzowały się podobnymi miarami statystycznymi (tab. 4, ryc. 10). Przeciętne pierśnice z obu pomiarów różniły się w zakresie od -4,0% (-16 mm) w przypadku pow. nr 3 do 0,3% (tj. o 1 mm) w przypadku pow. nr 4. Tylko w przypadku powierzchni nr 4 przeciętna pierśnica z pomiarów na chmurze punktów okazała się nieznacznie wyższa w odniesieniu do danych z pomiarów referencyjnych (1 mm). W pozostałych przypadkach wartość ta była niedoszacowana – również nieznacznie (od -18 do -5 mm). Stwierdzono, że przeszacowanie pierśnicy na chmurze punktów dotyczyło przeważnie nielicznych drzew o małych średnicach, tj. do 10 cm, natomiast niedoszacowanie drzew odnosiło się do drzew grubszych, których w badaniu było zdecydowanie więcej.

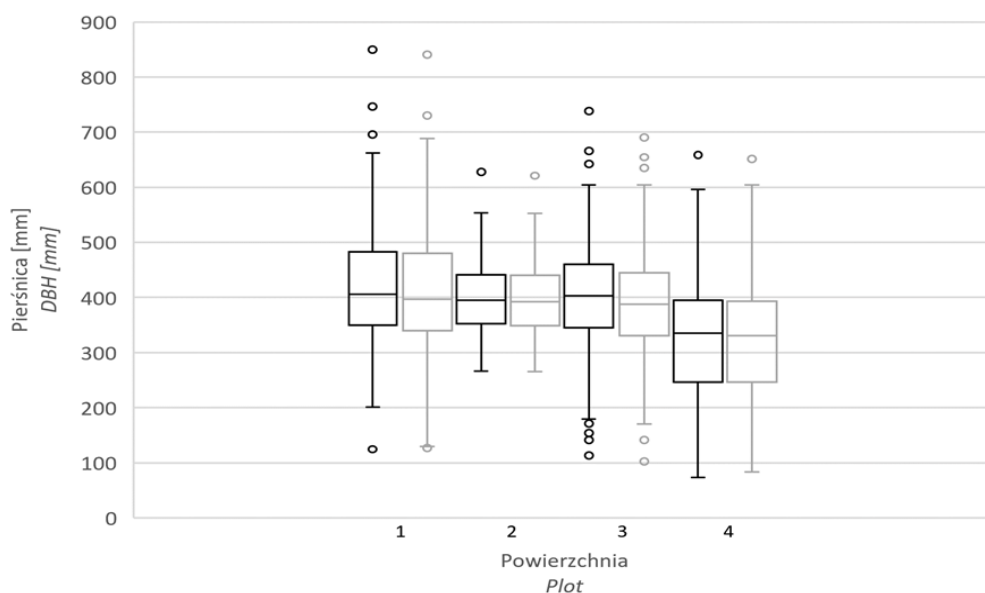
Najmniej zróżnicowanym drzewostanem pod względem rozkładu pierśnic była powierzchnia nr 2 (najmniejsze wartości

współczynnika zmienności i odchylenia standardowego), natomiast najbardziej zróżnicowane okazały się powierzchnie 3 i 4 (największe wartości ww. statystyk) (tab. 4). Wartości błędu średniokwadratowego (RMSE) były stosunkowo niewielkie. W przypadku BIAS błąd ten sięgał od -18 mm dla powierzchni nr 3 do 1 mm dla powierzchni nr 4. Zależność liniowa pomiędzy danymi referencyjnymi a danymi z chmury punktów była bardzo silna, co potwierdzają wartości współczynnika determinacji na poziomie od 0,9435 dla powierzchni nr 3 do 0,9945 dla powierzchni nr 1 (ryc. 11). Istotność różnic wyników pomiarów wykonanych dwiema metodami dla drzew na poszczególnych powierzchniach sprawdzono testem Wilcozona. Okazało się, że przy poziomie ufności 0,95 tylko w przypadku powierzchni nr 4 różnice te nie były istotne. W pozostałych trzech przypadkach, pomimo wysokiej korelacji, wyniki pomiarów pierśnicy z MLS statystycznie istotnie różniły się od referencyjnych pomiarów pierśnicy.

Tabela 4. Podstawowe statystyki dla pomiarów pierśnicy drzewa (Ref. – na podstawie danych referencyjnych, MLS – na podstawie danych z pomiarów z wykorzystaniem mobilnego skanera laserowego)

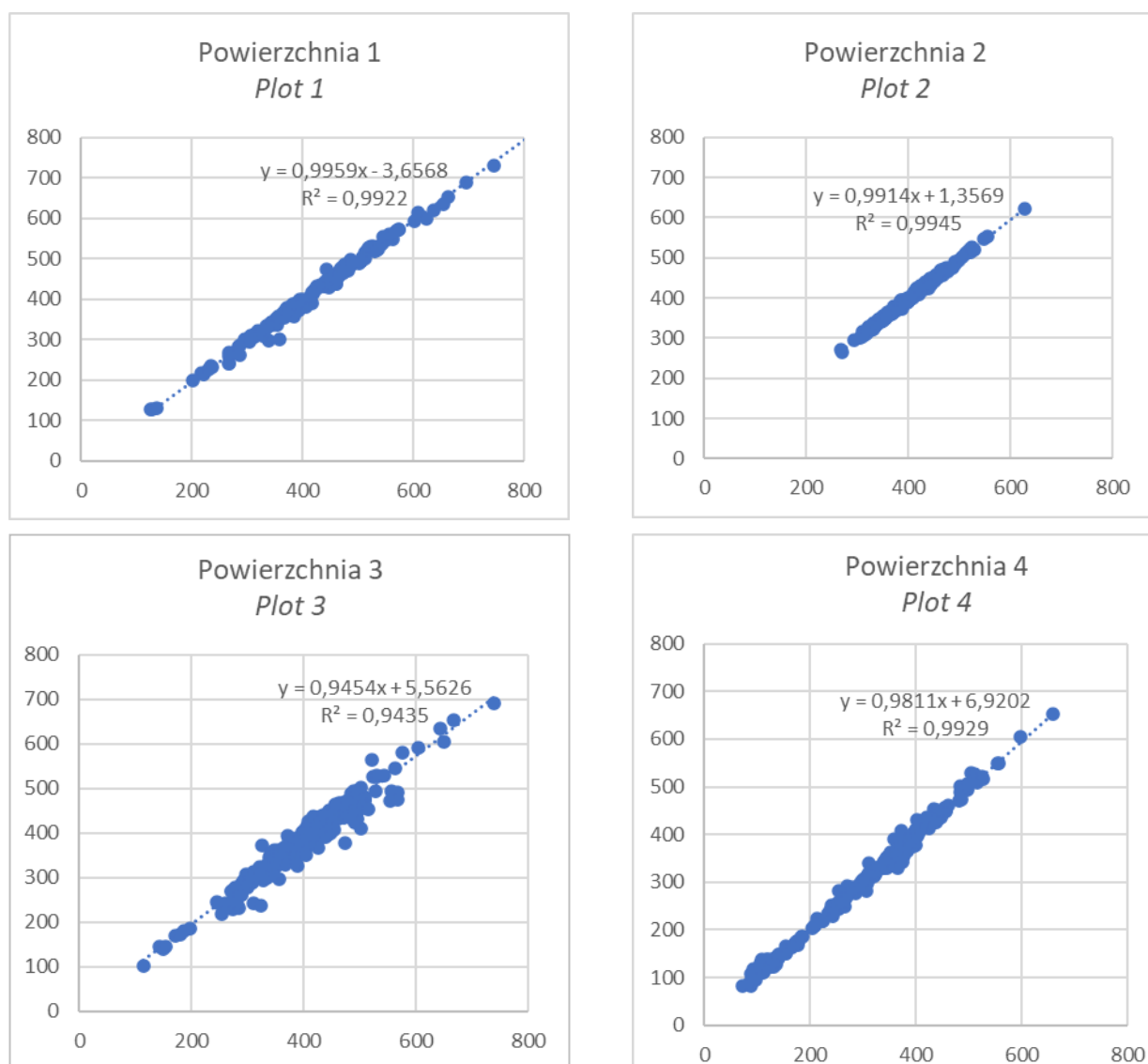
Table 4. Basic statistics for tree DBH measurements (Ref. – based on reference data, MLS – based on mobile laser scanner measurement data)

	Numer powierzchni badawczej Test plot number							
	1		2		3		4	
	Ref.	MLS	Ref.	MLS	Ref.	MLS	Ref.	MLS
Przeciętna pierśnica (mm) Average DBH	416	411	399	397	400	384	314	315
Mediana Median	406	397	395	393	403	388	335	331
Odchylenie standardowe Standard deviation	114	114	61	60	140	130	118	116
Współczynnik zmienności Coefficient of variation	27,4	27,6	15,2	15,2	35,1	33,8	37,4	36,7
Błąd średniokwadratowy RMSE (mm)		11		9		32		10
Błąd systematyczny BIAS (mm)		-5		-2		-18		1
Przeszacowanie (szt.) Overestimation (pcs)		49		61		48		129
Niedoszacowanie (szt.) Underestimation (pcs)		101		116		186		120



Rycina 10. Rozkład wartości przeciętnej pierśnicy pomierzonej na chmurze punktów (kolor szary) oraz z pomiarów referencyjnych (kolor czarny) dla poszczególnych powierzchni badawczych

Figure 10. Distribution of average DBH values measured on the point cloud (gray) and from reference measurements (black) for each study plot



Rycina 11. Zależność pomiędzy wynikami pomiarów pierśnicy z wykorzystaniem MLS a wynikami pomiarów referencyjnych
Figure 11. Relationship between the results of DBH measurements using MLS and the results of reference measurements

3.3. Pomiar pierśnicowego pola przekroju

Pierśnicowe pole przekroju wyliczone dla czterech badanych powierzchni określone na podstawie danych referencyjnych wyniosło od niespełna 21,92 m² w przypadku pow. 1 do nieco ponad 31,04 m² dla pow. nr 3 (tab. 5). Z kolei PPP obliczone na podstawie danych ze skanowania laserowego wyniosło od 21,40 m² do 28,45 m². Stwierdzono niedoszacowanie w przypadku trzech z czterech powierzchni, tj. 1, 2 i 3 i przeszacowaną

wartość dla powierzchni nr 4. Najmniejsze wartości różnic uzyskano w przypadku pow. nr 4 (+0,19%) i pow. nr 2 (-0,87%), zaś największe dla pow. nr 3 (-8,37%).

Pierśnicowe pole przekroju dla ponad 70% drzew określono z błędem nieprzekraczającym $\pm 5\%$ i dla niespełna 83% drzew z błędem niższym niż $\pm 10\%$ (tab. 6). Większe wartości błędów dotyczyły drzew rosnących na powierzchni nr 3. Charakteryzując się występowaniem warstwy podrostu.

Tabela 5. Kształtowanie się wielkości pierśnicowego pola przekroju dla danych z mobilnego skanowania laserowego i danych referencyjnych
Table 5. Evolution of basal area for mobile laser scanning and reference data

	Numer powierzchni badawczej Test plot number			
	1	2	3	4
Liczba drzew objętych pomiarem (szt.) Number of trees measured (pcs.)	150	177	234	249
PPP z referencji (m²) Basal area from reference	21,9206	22,6701	31,0441	22,0159
PPP ze skanowania (m²) Basal area from scanning	21,3992	22,4720	28,4467	22,0572
Błąd pomiarowy (%) Measurement error	-2,38	-0,87	-8,37	+0,19

Tabela 6. Liczebność i udział drzew w zależności od wielkości błędu procentowego dla pierśnicowego pola przekroju
 Table 6. Share of trees according to the size of the percentage error for basal area

Błąd procentowy (%) Percentage error	Liczba drzew w danym przedziale błęd (szt.) Number of trees in a given error range (pcs.)				Udział drzew w danym przedziale błęd (%) Share of trees in a given error range (%)				
	Pow. 1 Plot 1	Pow. 2 Plot 2	Pow. 3 Plot 3	Pow. 4 Plot 4	Pow. 1 Plot 1	Pow. 2 Plot 2	Pow. 3 Plot 3	Pow. 4 Plot 4	Razem Total
<5	123	173	103	174	82,00	97,74	44,02	69,88	70,74
5–10	18	2	41	36	12,00	1,13	17,52	14,46	11,98
10–20	7	0	59	27	4,67	0,00	25,21	10,84	11,48
> 20	2	2	31	12	1,33	1,13	13,25	4,82	5,80

4. Dyskusja

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki zastosowania technologii mobilnego skanowania laserowego dla potrzeb detekcji drzew i ich wymiarów. Podobna tematyka była już przedmiotem analiz innych autorów, choć w większości przypadków badania te odnosiły się nie do całych drzewostanów, a tylko do niewielkich powierzchniowo fragmentów lasu, nieprzekraczających 0,25 ha (Del Perugia i in. 2019; Mokroś i in. 2021; Zeybek i Vatandaşlar 2021; Kükenbrink i in. 2022). W tym przypadku badania przeprowadzono w drzewostanach bukowych o powierzchni od 0,56 do 0,89 ha.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono wykrywalność drzew na chmurze punktów pozyskanej skanerem Zeb-Horizon na poziomie 95,2%–100% (tab. 3). W drzewostanach pozbawionych warstwy podrostów (pow. 1 i 2) zidentyfikowano 100% drzew, natomiast tam gdzie taka warstwa występowała pojawił się problem z detekcją cieńszych drzew charakteryzujących się pierśnicą w zakresie 7–10 cm (pow. 3 i 4). Zarejestrowane przez skaner drobne pędy młodych drzewek tworzyły nieregularne skupiska chmury punktów. Stąd podczas sporządzania wstępnego planu powierzchni nie było możliwe jednoznaczne potwierdzenie wystąpienia w danej lokalizacji drzew objętych pomiarem. Podobny poziom detekcji drzew potwierdzają w swoich badaniach także inni autorzy, np. Vatandaşlar i Zeybek (2021). W zależności od struktury drzewostanów i ukształtowania terenu uzyskali oni wykrywalność drzew na poziomie 71,9%–100%, przy czym wyższe wartości dotyczyły drzewostanów o prostej strukturze. Także Hyyppä i in. (2020) analizując chmury punktów dla dwóch różnych pod względem struktury drzewostanów – monokultury sosnowej i lasu mieszanego z udziałem sosny, świerka i brzozy uzyskali wykrywalność odpowiednio 92,9% i 76,7%. Z kolei Kükenbrink i in. (2025), na bazie wyników z doświadczenia przeprowadzonego na 29. kwadratowych powierzchniach inwentaryzacyjnych 50 × 50 m, stwierdzili przeciętną wykrywalność drzew na poziomie 82,6%, przy czym dla blisko połowy z nich uzyskano wykrywalność wyższą niż 90%, a dla ok. 30% nawet 100%. Jednocześnie wskazano na fakt, że niższy stopień wykrywalności drzew wystąpił w przypadku powierzchni zlokalizowanych na stromych zboczach. Cytowane wyniki świadczą o tym, że na efektywność technologii MLS w detekcji drzew ma wpływ struktura drzewostanów i ukształtowanie terenu.

Technologia MLS pozwala na uzyskanie danych o drzewo-

stanie w istotnie krótszym czasie w porównaniu do technologii TLS (Gollob i in. 2020; Mokroś i in. 2021). W przypadku niniejszych badań czas pozyskania chmury punktów z wykorzystaniem skanera Zeb-Horizon dla każdej z 4. powierzchni nie przekroczył 20 minut. Jednak wybór zastosowanej technologii może mieć wpływ na efektywność detekcji drzew. Gollob i in. (2020) stosując ten sam skaner na 17. powierzchniach kołowych o promieniu 20 m zróżnicowanych pod względem gatunkowym i ukształtowania terenu uzyskali wykrywalność drzew na poziomie 96–100%. Z kolei wykonany przez nich pomiar wielostanowiskowy (3 pozycje) z zastosowaniem skanera naziemnego Faro Focus 3D pozwolił na detekcję drzew w zakresie 78,5%–99,0%. Autorzy stwierdzili, że dane TLS miały ogólnie niższe wskaźniki wykrywalności w porównaniu do danych MLS, szczególnie w przypadku drzew o mniejszej pierśnicy położonych w większej odległości od skanera, które dodatkowo mogły być przesłaniane przez inne drzewa. Przeciętny czas pozyskania danych MLS wyniósł 11 minut, zaś danych TLS 50 minut dla pojedynczej powierzchni (ok. 17 minut jedno skanowanie).

Z kolei Mokroś i in. (2021) pozyskując i przetwarzając dane TLS (Faro Focus s70) i MLS (GeoSLAM Horizon) z 8 bukowo-świerkowych powierzchni badawczych o wymiarach 25 × 25 m, na których rosło od 26 do 54 drzew o pierśnicy co najmniej 7 cm, uzyskali ich wykrywalność na poziomie od 93% do 100,0% dla danych TLS i od 55,6% do 74,3% dla danych MLS. Dane TLS pozyskano każdorazowo z 8. stanowisk skanera, natomiast dane MLS zarejestrowano na podstawie przejścia przez powierzchnie pasami oddalonymi od siebie o ok. 5 m. Mniejszą wykrywalność drzew przy wykorzystaniu technologii MLS autorzy tłumaczą zbyt dużą ilością danych do przetworzenia i powstawaniem szumów w chmurze punktów. Sugerują, że zwiększenie odległości pomiędzy pasami przejścia do 10. m powinno poprawić detekcję drzew, co potwierdzają m.in. badania Del Perugia i in. (2019). Autorzy ci stwierdzili również zależność detekcji drzew od wymiarów pierśnicy, tzn. im średnica drzewa mniejsza tym jego wykrywalność jest mniejsza, niezależnie od zastosowanej technologii. W przypadku drzew charakteryzujących się pierśnicą większą niż 10 cm wykrywalność ta wyniosła odpowiednio 96,1% i 76,2%, zaś w przypadku drzew o pierśnicy powyżej 20 cm 100% i 92,2%.

Kükenbrink i in. (2022) porównując dokładność detekcji drzew z wykorzystaniem różnych urządzeń, w tym skanerów FARO Focus 3D S120 i ZebRevo RT na przykładzie 3 bukowo-świerkowych powierzchni inwentaryzacyjnych o wymiarach

50 × 50 m uzyskał lepsze wyniki w przypadku zastosowania technologii TLS. Dane ze skanera stacjonarnego pozwoliły na detekcję 92,2% drzew o średnicy powyżej 7 cm w przypadku powierzchni o prostej budowie i 59,9% drzew na powierzchni pokrytej gęstą warstwą podszytów i podrostów. Z kolei wyniki uzyskane z wykorzystaniem skanera mobilnego wyniosły odpowiednio 78,9% i 27,8%. W tym przypadku stwierdzono negatywny wpływ występowania dolnej warstwy lasu na efektywność detekcji drzew, szczególnie w przypadku technologii MLS.

W niniejszej pracy zastosowano nadzorowany (ręczny) pomiar średnicy drzew na chmurze punktów, jako metodę najbardziej obiektywną, gdyż każdy z wycinków został przeanalizowany i pomierzony oddzielnie. Sposób pomiaru na wycinkach chmury reprezentujących przekrój na wysokości 1,3 m określono na podstawie przeprowadzonych testów. W przypadku buka, charakteryzującego się gładką korą zdecydowano się na określenie średnicy wycinka poprzez pomiar pomiędzy punktami położonymi przeciwległe w środku otoczki reprezentującej obwód pnia drzewa (ryc. 7). Wyniki tych pomiarów najlepiej korespondowały w pomiarze referencyjnym. Należy jednak zaznaczyć, że istnieje możliwość automatycznej detekcji drzew i ich wymiarów, w tym pierśnicy, z wykorzystaniem algorytmów dopasowania okręgu lub cylindra, np. metodą RAMSAC (Fritz i in. 2013; Olofsson i in. 2014) czy też okręgu metodą najmniejszych kwadratów (Huang i in., 2011).

W niniejszej pracy stwierdzone różnice w wymiarach przeciętnej pierśnicy pomierzonej na chmurze punktów pozyskanej w technologii SLAM w odniesieniu do danych referencyjnych wyniosły od 1 do 16 mm, co przekłada się na błąd na poziomie od -4,0% do 0,3% (tab. 4). W większości przypadków przy ręcznym pomiarze na wycinkach chmury punktów stwierdzono niedoszacowanie średnicy drzewa na wysokości 1,3 m. Taką tendencję potwierdzają wyniki badań Vandendaele i in. (2022), którzy przy pomiarze drzew w technologii MLS stwierdzili niedoszacowanie w stosunku do danych referencyjnych na poziomie -6,32%. W przypadku badań Vatandaşlar i in. (2023), podczas których obserwacje i pomiary z wykorzystaniem skanera Zeb-Horizon przeprowadzono w drzewostanach z dominującym świerkiem pospolitym, stwierdzono systematyczne niedoszacowanie wielkości pierśnicy drzewa określonej na podstawie danych cyfrowych o 9 mm względem danych referencyjnych. Z kolei w badaniach Vytsehy i Zajączkowskiego (2024) przy porównaniu wyników pomiarów pierśnicy dla 4 dojrzałych drzewostanów sosnowych pozyskanych z wykorzystaniem skanera Zeb-Horizon i z pomiaru referencyjnego stwierdzono niedoszacowanie przeciętnej wielkości pierśnicy maksymalnie do 20 mm, co przekłada się na przeciętny błąd ok. 9%. Natomiast Stal i in. (2021) porównując wyniki pomiaru pierśnicy topoli kanadyjskiej uzyskane z pomiarów ręcznych w odniesieniu do wyników pomiarów TLS oraz MLS wykazali, że mniejsze różnice wystąpiły w przypadku MLS (błąd absolutny to 2,5 cm) niż w przypadku technologii TLS (błąd absolutny 4,3 cm). W analizie uwzględniano tylko drzewa o pierśnicy nie mniejszej niż 30 cm. Kükenbrink i in. (2022) zwrócili ponadto uwagę

na wystąpienie niewielkiego przeszacowania pierśnicy dla małych drzew i niewielkiego niedoszacowania wartości tego wymiaru dla większych drzew. Podobne obserwacje odnotowano w niniejszej pracy przy analizie wyników dla pojedynczych drzew. Większość przypadków przeszacowania wartości pierśnicy na danych MLS dotyczyła drzew o grubości do 10. cm. Tylko w badaniach Mokroś i in. (2021) odnotowano przeszacowanie wyników pomiaru na danych MLS względem danych referencyjnych o 13,1%, co jak stwierdzili autorzy, było spowodowane pozyskaniem zbyt gęstej chmury punktów, co utrudniło jej przetworzenie.

W przypadku niniejszej pracy, w której pomiary wykonano w sposób nadzorowany na wycinkach chmury punktów, w większości przypadków stwierdzono niedoszacowanie wielkości pierśnicowego pola przekroju wyliczonego na danych ze skanowania w odniesieniu do pola obliczonego na danych z pomiaru referencyjnego w drzewostanie, odpowiednio -2,38%; -0,87%, -8,37% (tab. 5). Tylko w przypadku powierzchni 4 uzyskano nieznaczne przeszacowanie pierśnicowego pola przekroju (0,19%). Stosunkowo duże niedoszacowanie na powierzchni 3 (-8,37%) wynikało głównie z przesłonięcia części pni grubych drzew przez gęsty podrost bukowy oraz problemów z precyzyjnym określeniem położenia pierśnicy na chmurze punktów (część drzew rosła na terenie o dużym nachyleniu) – dla ponad 38% drzew błąd oszacowania pierśnicy był większy 10% (tab. 6). Tendencję niedoszacowania PPP na podstawie danych MLS potwierdzają wyniki wspomnianych już wcześniej badań Vatandaşlar i in. (2023) oraz Vytsehy i Zajączkowskiego (2024). W obu przypadkach pomiary na danych MLS skutkowały zaniżeniem wartości PPP o odpowiednio 0,25 m²/ha oraz 3,8 m²/ha. W pracy badawczej (Vatandaşlar, Zeybek 2021) na podstawie danych lidarowych, uzyskanych za pomocą skanera mobilnego Zeb-Revo, określono pierśnicowe pole przekroju drzewostanu dla 9 powierzchni badawczych, na których gatunkami dominującymi były: *Pinus pinaster*, *Liquidambar orientalis*, *Fraxinus excelsior*, *Pinus pinea* oraz *Abies nordmanniana*. Pierśnicę drzew, na podstawie której wykonano kolejne obliczenia, uzyskano wykorzystując algorytm dopasowania elipsy bądź okręgu, a następnie automatycznie określono wartość średnicy. Uzyskane wyniki różniły się w stosunku do danych referencyjnych od -7,7% do 11,6% i w większości przypadków – niezależnie od gatunku – wskazywały na przeszacowanie wielkości PPP. Była to odwrotna tendencja w porównaniu do wyników uzyskanych w badaniach prowadzonych przez autorów niniejszego opracowania. Powodem rozbieżności jest inne podejście metodyczne oparte na zastosowaniu automatycznych algorytmów dopasowania średnic drzewa oraz przeprowadzanie prac badawczych na zróżnicowanych pod względem składu gatunkowego obszarach.

5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że technologia mobilnego skanowania laserowego stanowi skuteczną alternatywę dla tradycyjnych metod pomiarowych oraz

technologii TLS w zakresie detekcji drzew w drzewostanach, ich przestrzennej lokalizacji oraz określania pierśnicy. Taki wniosek dotyczy głównie drzewostanów starszych o prostej strukturze. Szczególnie obiecujące wyniki uzyskano na poziomie średnich dla drzewostanów w odniesieniu zarówno do liczebności drzew, jak i ich pierśnic i pierśnicowego pola przekroju.

Do czynników wpływających na obniżenie prawidłowej detekcji drzew i ich wymiarów należą: urozmaicona struktura drzewostanu, w tym występowanie warstwy gęstego podszytu i podrostu oraz nachylenie terenu powodujące trudności w określeniu położenia pierśnicy na chmurze punktów.

Należy zwrócić uwagę również na fakt, że mobilne skanowanie laserowe drzewostanu jest zdecydowanie szybsze, niż manualny, indywidualny pomiar drzew, czy naziemne skanowanie laserowe w wersji wielostanowiskowej, co wyraźnie skraca czas pracy w terenie, a jednocześnie nie wpływa istotnie na pogorszenie wyników detekcji drzew (Gollob i in. 2020; Mokroś i in. 2021).

Obecnie w coraz większym stopniu dane ze skanowania laserowego można przetwarzać w oprogramowaniu darmowym. W niniejszych badaniach do analizy chmury punktów, w tym separacji punktów reprezentujących pnie drzew, wycinaniu przekrojów na wybranych wysokościach oraz pomiarów średnicy tych wycinków, wykorzystano dwie aplikacje typu open source, tj. CloudCompare oraz QGIS.

Wkład autorów

G.Z. – koncepcja, analiza statystyczna, pisanie pracy;
A.F. – przegląd literatury, pisanie pracy.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Źródła finansowania badań

Sfinansowano ze środków GIOŚ w ramach tematu „Monitoring i ocena stanu zdrowotnego lasów w roku 2022 – część II oraz w latach 2023–25”

Literatura

- Balenović I., Liang X., Jurjević L., Hyypä J., Seletković A., Kukko A. 2020. Hand-held personal laser scanning – current status and perspectives for forest inventory application, *Croatian Journal of Forest Engineering* 42 (1): 165–183. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.858>.
- Del Perugia B., Giannetti F., Chirici G., Travaglini D. 2019. Influence of scan density on the estimation of single-tree attributes by hand-held mobile laser scanning, *Forests* 10 (3). DOI: <https://doi.org/10.3390/f10030277>.
- Fritz A., Kattenborn T., Koch B. 2013. UAV-based photogrammetric point clouds—Tree stem mapping in open stands in comparison to terrestrial laser scanner point clouds. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 40: 141–146. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-141-2013>.
- Girardeau-Montaut D., Roux M., Marc R., Thibault G. 2005. Change Detection on Points Cloud Data acquired with a Ground Laser Scanner. ISPRS Workshop Laser Scanning 2005, Enschede, the Netherlands, September 12–14.
- Gollob C., Ritter T., Nothdurft A. 2020. Forest inventory with long range and high-speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technology, *Remote Sensing* 12 (9). DOI: <https://doi.org/10.3390/RS12091509>.
- Holvoet J., Latte N., Perin J., Bastin J.F., Delame H., Kuekenbrink D., Lejeune P. 2025. Mobile Laser Scanning in Support of National and Regional Forest Inventories, *SSRN*. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.5358704>.
- Howie N.A., De Stefano A. 2024. Measuring Tree Diameter Using LiDAR Equipped iPad: An Evaluation of Forest Scanner and Arboresal Forest Applications, *Forest Science* 70 (4), 304–310. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/xfac017>.
- Huang H., Li Z., Gong P., Cheng X., Clinton N., Cao C., Ni W., Wang L. 2011. Automated methods for measuring DBH and tree heights with a commercial scanning lidar, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 77: 219–227. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.77.3.219>.
- Hyypä E., Yu X., Kaartinen H., Hakala T., Kukko A., Vastaranta M., Hyypä J. 2020. Comparison of backpack, handheld, under-canopy UAV, and above-canopy UAV laser scanning for field reference data collection in boreal forests, *Remote Sensing* 12 (20): 1–31. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12203327>.
- Krok G., Kraszewski B., Stereńczak K. 2020. Zastosowanie naziemnego skanowania laserowego w inwentaryzacji lasu – przegląd wybranych zagadnień, *Leśne Prace Badawcze* 81 (4): 175–194. DOI: <https://doi.org/10.2478/frp-2020-0021>.
- Kükenbrink D., Marty M., Bösch R., Ginzler C. 2022. Benchmarking laser scanning and terrestrial photogrammetry to extract forest inventory parameters in a complex temperate forest, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102999>.
- Kükenbrink D., Marty M., Rehush N., Abegg M., Ginzler C. 2025. Evaluating the potential of handheld mobile laser scanning for an operational inclusion in a national forest inventory – A Swiss case study, *Remote Sensing of Environment* 321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114685>.
- Li Z., Qiao Q., Han Z., Liu X., Wang Y., Tang H., Deng L. 2025. Terrestrial laser scanning in forestry: Accuracy and efficiency in measuring individual tree parameters, *PLOS One* 20 (9): e0331126. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0331126>.
- Liang X., Kankare V., Hyypä J., Wang Y., Kukko A., Haggren H., Yu X., Kaartinen H., Jaakkola A., Guan F., Holopainen M., Vastaranta M. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115: 63–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>.
- Mokroś M., Mikita T., Singh A., Tomaščík J., Chudá J., Wężyk P., Kuželka K., Surový P., Klimánek M., Zięba-Kulawik K., Bobrowski R., Liang X. 2021. Novel low-cost mobile mapping systems for forest inventories as terrestrial laser scanning alternatives, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102512>.
- Mukhopadhyay P., Chaudhuri B.B. 2015. A survey of Hough Transform, *Pattern Recognition* 48 (3): 993–1010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.08.027>.
- Olofsson K., Holmgren J., Olsson H. 2014. Tree stem and height measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC algorithm, *Remote Sens* 6: 4323–4344. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6054323>.
- Pace R., Masini E., Giulianielli D., Biagiola L., Tomao A., Guidolotti G., Agrimi M., Portoghesi L., De Angelis P., Calfapietra C. 2022. Tree Measurements in the Urban Environment: Insights from Traditional and Digital Field Instruments to Smartphone Applications, *Arboriculture & Urban Forestry* 48 (2): 113–123. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2022.009>.
- Parhizgar L., Pattnaik N., Yazdi H., Qiguan S., Pauleit S., Rahman M.A., Ludwig F., Pretzsch H., Rötzer T. 2025. Branch biomass allometries for urban tree species based on terrestrial laser scanning (TLS) data, *Trees* 39 (4): 57. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-025-02637-7>.
- Shao T., Qu Y., Du J. 2022. A low-cost integrated sensor for measuring tree diameter at breast height (DBH), *Computers and Electronics in Agriculture* 199: 107140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107140>.
- Stal C., Verbeurgt J., De Sloover L., De Wulf A. 2021. Assessment of

- handheld mobile terrestrial laser scanning for estimating tree parameters, *Journal of Forestry Research* 32 (4): 1503–1513. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01214-7>.
- Thies M., Spiecker H. 2004. Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories, *Remote Sensing XXXVI* (8/W2): 192–197.
- TPI 3D. 2021. GeoSLAM ZEB-HORIZON/ ZEB-HORIZON RT <https://3d.tpi.com.pl/produkt/geoslam-zeb-horizon/> (dostęp 4.12.2024)
- Vandendaele B., Martin-Ducup O., Fournier R.A., Pelletier G., Lejeune P. 2022. Mobile Laser Scanning for Estimating Tree Structural Attributes in a Temperate Hardwood Forest, *Remote Sensing* 14 (18). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14184522>.
- Vatandaşlar C., Seki M., Zeybek M. 2023. Assessing the potential of mobile laser scanning for stand-level forest inventories in near-natural forests, *Forestry* 96 (4): 448–464. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad016>.
- Vatandaşlar C., Zeybek M. 2021. Extraction of forest inventory parameters using handheld mobile laser scanning: A case study from Trabzon, Turkey, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 177: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109328>.
- Vytseha R., Zajączkowski G. 2024. The usage of mobile laser scanning technologies for the estimation of forestry and forest inventory indexes of the forest stands, w: *Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects*. International Science-Practical Conference, Lviv. DOI: <https://doi.org/10.36930/conf150.1.27>.
- Wardius Y., Hein S. 2024. Terrestrial laser scanning vs. manual methods for assessing complex forest stand structure: a comparative analysis on plenter forests, *European Journal of Forest Research* 143 (2): 635–649. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01641-1>.
- Watt P.J., Donoghue D.N.M., Dunford R.W. 2003. Forest Parameter Extraction Using Terrestrial Laser Scanning. Proc. ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests, Umeå, Sweden, s. 237–244.
- Wężyk P. 2006. Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie, *Roczniki Geomatyki* 4 (4): 119–132.
- Zasada M., Stereńczak K., Dudek W.M., Rybski A. 2013. Horizon visibility and accuracy of stocking determination on circular sample plots using automated remote measurement techniques, *Forest Ecology and Management* 302: 171–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.041>.
- Zeybek M., Vatandaşlar C. 2021. An Automated Approach for Extracting Forest Inventory Data from Individual Trees Using a Handheld Mobile Laser Scanner, *Croatian journal of forest engineering* 42 (3): 515–528. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.1096>.
- Zhang W., Qi J., Wan P., Wang H., Xie D., Wang X., Yan G. 2016. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation, *Remote Sensing* 8 (6): 501. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8060501>.
- Zielony R., Kliczkowska A. 2012. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa. 356 s.
- ZEB-HORIZON – podręcznik użytkownika: <https://manuals.plus/pl/geoslam/zeb-horizon-3d-mobile-scanner-manual> (dostęp 1.04.2025)