

# **RAPORT KOŃCOWY**

z realizacji tematu „Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskiwanych różnymi technikami geomatycznymi”

## **CZĘŚĆ II – WYNIKI Z ZAKRESU SKANOWANIA NAZIEMNEGO**

## Spis treści

1. Wstęp .....	3
2. Koncepcja i metoda badań na kołowych powierzchniach urządzeniowych w Nadleśnictwie Milicz (RDLP Wrocław) metodą skaningu naziemnego (TLS) .....	4
3. Metoda badań nad wykorzystaniem TLS w pracach urządzeniowych w ramach projektu MILICZ.....	7
4. Metodyczne wskazówki odnośnie praktycznego wykorzystania technologii TLS, scenariusze aplikacji, zalecenia, wnioski odnośnie dalszych etapów prac.....	23
5. Automatyczne określanie cech drzewostanów za pomocą naziemnego skanowania laserowego .....	46
6. Założenia i algorytmy aplikacji do automatycznej obróbki danych z naziemnego skaningu laserowego dla potrzeb inwentaryzacji lasu .....	60
7. Automatyzacja pomiaru drzew przy pomocy skaningu naziemnego .....	76

### ZAŁĄCZNIKI

- Zestawienie wyników pomiarów oraz przetwarzania chmury punktów skaningu naziemnego na powierzchniach kołowych w Nadleśnictwie Milicz
- Podstawowe statystyki oraz analiza regresji dla wybranych cech taksacyjnych i parametrów drzew określanych metodą skaningu laserowego TLS w drzewostanach Nadleśnictwa Milicz

# 1. Wstęp

Etap prac dotyczący terenowego skaningu laserowego wykonywany był przez interdyscyplinarny zespół specjalistów z Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, SGGW, firmy Treemetrics z Cork w Irlandii, BULiGL w Brzegu oraz Taxus SI. Prace, po sformułowaniu koncepcji i metodyki badań na kołowych powierzchniach urządzeniowych, koncentrowały się na ocenie dokładności skaningu i zmierzały do sformułowania praktycznych wskazówek wykorzystania tej techniki geomatycznej. Ważnym etapem prac w tym zakresie było opracowanie oprogramowania, które pozwala na automatyczne określanie parametrów drzew na powierzchni próbnej.

W ramach projektu wykonywano pomiary drzewostanów według istniejącego systemu inwentaryzacji lasu. Doświadczenia zdobyte w projekcie pokazują, że stosowanie nowoczesnych metod wymaga opracowania nowej instrukcji inwentaryzacyjnej (inna stratyfikacja drzewostanów, mniejsza ilość powierzchni próbnych, większa powierzchnia próbna).

Prace w ramach tego etapu sprawozdawanego tematu wykonywał zespół:

- w zakresie badania możliwości zastosowania naziemnego skanowania laserowego w inwentaryzacji lasu: dr inż. Piotr Wężyk (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie), Marcin Beza (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie), Mateusz Glista (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie), mgr inż. Barbara Joniec (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie), dr inż. Krystian Kozioł (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie), Marcin Pierchalski (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie), Radosław Seweryn (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie), Adam Sieczka (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie), Radosław Sroga (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie), dr inż. Marta Szostak (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie), Huber Szostecki (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie), Piotr Szwed (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie), Piotr Tompalski (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie),
- w zakresie możliwości automatyzacji przetwarzania danych: mgr inż. Agata Wencel (Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu), dr hab. Michał Zasada (SGGW), prof. dr hab. Tomasz Zawila-Niedźwiecki (Uniwersytet Nauk Stosowanych w Eberswalde i IBL), mgr Garrett Mullooly (Treemetrics Ltd.), mgr inż. Adam Konieczny (Taxus SI Sp.z o.o.), Paweł Konieczny (Taxus SI Sp. z o.o.), dr inż. Rafał Wojtan (SGGW)

## 2. Koncepcja i metoda badań na kołowych powierzchniach urządzeń w Nadleśnictwie Milicz (RDLP Wrocław) metodą skaningu naziemnego (TLS)

### ***2.1 Wprowadzenie do koncepcji badań nad naziemnym skanowaniem laserowym (TLS)***

Techniki fotogrametrii przez ostatnie dziesięciolecia umożliwiały w urządzaniu i inwentaryzacji lasu możliwości pozyskiwania informacji przestrzennej (3D) na podstawie obserwacji stereoskopowej pary lotniczych bądź naziemnych zdjęć. Wiązało się to jednak z opanowaniem skomplikowanego warsztatu fotogrametrycznego od momentu wykonania zdjęć, poprzez ich orientację, aż do samego opracowania (fotointerpretacji, stereodigitalizacji). Nakład sił i czasu przeznaczony na generowanie numerycznego modelu terenu (NMT) czy odczyty pozycji pni drzew i ich wysokości był niezmiernie duży i obciążony subiektywizmem interpretatora. Szczególnie w obszarach leśnych charakteryzujących się dużym zagęszczeniem pni na jednostce powierzchni oraz występującym dolnym piętrzem czy podszytem - technologie fotogrametryczne miały i wciąż mają spore ograniczenia. Rozwój technologii geoinformatycznych przyniósł ze sobą skanowanie laserowe, który stał się poważnym wyzwaniem dla „tradycyjnej fotogrametrii i miernictwa”, szczególnie w sytuacji wydajności przy tworzeniu opracowań na dużą skalę i z dużą dokładnością czy integracji technologii skaningu z sensorami rejestrującymi w zakresie optycznym promieniowania (skanery hiperspektralne, kamery termowizyjne etc).

Szybkie pozyskiwanie informacji o stanie lasu i zmianach, które często bardzo dynamicznie zmieniają jego postać (huragany, gradacje, pożary, etc) jest podstawowym zadaniem urządzania lasu. Tradycyjne bazowało ono na podstawowej zasadzie dbałości o trwałość zasobów, m.in. poprzez zdefiniowanie okresu rębności, czy etatów cięć równoważonych odpowiednim przyrostem zasobów leśnych w okresie obowiązywania 10-letniego planu. Dzisiejsze rozumienie trwałości czy zrównoważonego rozwoju obejmuje również poza-produkcyjne funkcje lasu, takie jak turystyczne, ochronne, estetyczne czy też dbałość o bioróżnorodność. Informacja musi być pozyskiwana niezmiernie szybko i precyzyjnie i to na dużych obszarach i w dodatku nie może być ona obciążona subiektywizmem wielu obserwatorów. Technologia skaningu laserowego dostarcza GB czy

TB danych, którymi trudno zarządzać. Niosą one jednak ze sobą zupełnie nową jakość informacji (precyzję i brak subiektywności), której nawet do końca nie potrafimy obecnie wykorzystać (Wężyk 2006).

## **2.2 Aplikacje TLS w leśnictwie**

Urządzanie i inwentaryzacja lasu wypracowały metody opisu lasu jako zjawiska przestrzennego i wielkopowierzchniowego na podstawie metod statystyczno-matematycznych opartych na siatce powierzchni kołowych. Metody te wymagają w głównej mierze pozyskania informacji w terenie o geometrii drzew tworzących drzewostany. W bardzo uproszczonym podejściu podstawowe parametry je opisujące to: pierśnica (średnica drzewa mierzona na 1,3 metra od gruntu) oraz wysokość drzewa. Dość liczne już opracowania, wskazują jednoznacznie na możliwości stosowania skaningu naziemnego w pracach z zakresu urządzania lasu czy inwentaryzacji zapasu. Wyniki, jakie uzyskiwali autorzy tych prac w dużej mierze uzależnione były od konkretnego typu skanera laserowego jak i od parametrów samego drzewostanu (Danson et al. 2006). Większość prac wskazuje jednak na potrzebą stosowania takich urządzeń, które gwarantowałyby: maksymalna odległość - co najmniej 20 do 100 metrów, częstotliwość wysyłania wiązki lasera - co najmniej 10kHz (10.000 punktów pomiarowych na 1 sekundę), pozyskanie pełnej panoramy w poziomie i niemal pełnej w pionie a dokładność pomiaru nie powinna być gorsza niż 10 mm (Bienert et al. 2006).

Opierając się na przeglądzie prac naukowych i raportów projektów (Thies, Specker 2003, 2004; Danson et al. 2006, Bienert et al. 2006; Aschoff, Specker 2004) można stwierdzić, iż współczesny naziemny skaning laserowy (TLS) umożliwia w oparciu o algorytmy automatyczne lub pół-automatyczne pozyskiwanie takich cech taksacyjnych pojedynczych drzew jak:

- pierśnica ( dbh 1,3m),
- wysokość drzewa,
- długość korony,
- szerokość korony,
- długość strzały pozbawionej gałęzi,
- zwarcie koron drzew,
- zagęszczenie pni (szt./1ha),

- gatunek drzewa (obraz intensywności - kory drzewa bądź zdjęcie cyfrowe ze zintegrowanej ze skanerem kamery)
- położenia pnia w przestrzeni 3D,
- zbieżności pnia i jego krzywizna,
- stopień defoliacji korony (i związany z nim parametr Leaf Area Index, czy powierzchnia luk),
- kąt nasady gałęzi,
- całkowite pole przekroju G ( $m^2/ha$ ),
- minimalna i maksymalna wysokość drzewa,
- tzw. wysokość Lorey'a, zasobność ( $m^3/ha$ )
- pionowy profil zmienności biomasy drzewostanu;
- jakość drewna strzały (skręt włókien, raki, choroby);
- „widoczność” w drzewostanie - wskazujące na istnienie lub brak podszytu są ważnym elementem w rozumieniu wielofunkcyjnego leśnictwa (np. walory estetyczne, turystyczne czy zagrożenia pożarowego etc.).

Uwagę w aktualnej literaturze naukowej zwraca fakt podejmowania badań nad tworzeniem w pełni automatycznych algorytmów pozwalających w szybki sposób pozyskiwać cechy taksacyjne skanowanego drzewostanu.

Nakład sił i czasu poświęcony na manualne pozyskiwanie parametrów obrazowanego chmurą 3D punktów drzewostanu, w przypadku badań jest jeszcze możliwy, ale przy wdrożeniach do praktyki leśnej już wykluczony. Badania więc zmierzają do skonstruowania „roboty” automatycznie określającego niezbędne w nowoczesnym leśnictwie cechy drzew i drzewostanów mające wpływ na ich pielęgnację, wartość rynkową.

### **2.3 Podsumowanie**

Integracja chmury punktów ze skaningu naziemnego z pozyskanymi z poziomu lotniczego czy satelitarnego, wraz z jednoczesnym stosowaniem zaawansowanych modeli przyrostu drzew, może okazać się dopiero pełnym źródłem informacji zasilającym systemy wspomaganie decyzji obsługiwane przez decydentów zarządzających obszarami leśnymi (Chasmer i in. 2004).

### 3. Metoda badań nad wykorzystaniem TLS w pracach urządzeniowych w ramach projektu MILICZ

#### ***3.1 Wybór cech taksacyjnych drzew i drzewostanu przewidzianych do określenia w badaniach nad wykorzystaniem TLS w urządzaniu i inwentaryzacji zasobów leśnych***

Zdecydowano o wyborze następujących cech taksacyjnych drzew oraz innych parametrów pozyskiwanych podczas prac na urządzeniowych powierzchniach kołowych, dla których określi się przydatność (możliwość, dokładność) użycia skanera naziemnego. Są to kolejności:

- gatunek (rodzaj np. Db) drzewa
- azymut do pnia drzewa
- odległość do pnia drzewa
- pierśnica pnia na 1.30 metra
- średnica pnia na 5,0 metra
- wysokość drzewa H
- wysokość nasady korony
- azymut środka korony
- odległość środka korony
- kształt korony oparty na rzutowaniu poszczególnych skrajnych punktów korony na płaszczyznę poziomą.

Zakłada się określenie wybranych cech i parametrów na podstawie analizy chmury punktów odpowiednio przetworzonej (filtracja, nadanie układu współrzędnych) przy wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania FARO Scene. W sytuacji, gdyby część parametrów okazała się niemożliwa do określenia tym programem, niezbędny będzie odpowiedni dobór i zakup zewnętrznego oprogramowania (np. PolyWorks).

### **3.2 Charakterystyka urządzenia skanującego do TLS**

Do wykonania skanów na potrzeby projektu wybrano urządzenie LS 880 HE80 (Ryc. II.1), które dostarczyła firma FARO Technologies Polska Sp. z o.o. z Poznania.

W urządzeniu zastosowano technologię fali ciągłej (z pomiarem przesunięcia fazy – ang. *phase shift*) emitowanej wiązki lasera, co różni ten skaner od większości innych producentów stosujących laser pulsacyjny (pomiar typu ang. *time of flight*). Dzięki temu rozwiązaniu skaner może obrazować do 250 000 punktów na sekundę (pps). Model HE80 ma budowę modułową składającą się z czterech komponentów zainstalowanych na obrotowej podstawie. Są to w kolejności: moduł bazowy (podstawowy), moduł sensora, moduł sterowania lustrem oraz moduł komputera PC (kontrolni).

**Skaner FARO HE80** charakteryzuje się następującymi podstawowymi parametrami:

- a) zasięg obrazowania do 76 m;
- b) rozdzielczość radiometryczna: 17 Bit / 9 Bit intensywność;
- c) częstotliwość wysyłanej fali: 120 kHz;
- d) moc lasera 22.0 mW
- e) błąd linowy: 3 mm na 10 m;
- f) długość fali lasera: 785 nm (NIR);
- g) wielkość plamki lasera na wyjściu ze skanera: 3 mm
- h) zakres pionowego kąta skanowania: 320 stopni;
- i) zakres poziomego kąta skanowania: 0-360 stopni;
- j) moduł komputera wewnętrznego: procesor PIII 700 MHz, 60 GB HDD, Win XP
- k) Fast Ethernet – połączenie do komputera (laptopa);
- l) kamera cyfrowa NIKON D70 podłączana złączem USB;



**Ryc. II.1. Skaner FARO HE80.**

**Moduł zasilający:** składa się z przenośnej walizki zawierającej 2 akumulatory pozwalające na prowadzenie skaningu w warunkach terenowych, przez co najmniej 7 godzin. Do modułu należy także ładowarka oraz kabel zasilający (w tym także funkcje transmisji danych). Akumulatory nie charakteryzują się tzw. „efektem pamięci” stąd czas ładowania akumulatorów nie wpływa negatywnie na jakość baterii. Ładowarka oraz walizka wyposażona jest w kolorowe diody informujące o trybie ładowania oraz poziomie baterii (kolor zielony, żółty i czerwony).



2a



2b

**Ryc. II.2. Moduł zasilający skanera FARO.**

**UWAGI praktyczne:** Niska temperatura (ok. 1-3 °C) otoczenia powoduje nieznaczny spadek kondycji akumulatorów. Walizkę należy kłaść a nie stawiać na jej podstawie dolnej ze względu na jej niestabilność i możliwość przewrócenia się wraz z zapiętym do niej kablem zasilania co może spowodować zachwianie skanerem zamontowanym na statywie podczas pracy.

**Statyw FARO:** posiada odkręcana głowicę, która przed wyjęciem samego skanera ze skrzyni transportowej powinna zostać przykręcona do jego podstawy. Umożliwia to bezpieczny montaż skanera ważącego kilkanaście kilogramów na statywie. Statyw FARO o bardzo stabilnej konstrukcji posiada wysuwany element umożliwiający dodatkowe wywyższenie urządzenia skanującego

**Kable transmisji danych oraz PC** – w trakcie prac ze skanerem FARO używane są dwa kable. Pierwszy z nich w kolorze niebieskim odpowiedzialny jest za zasilanie skanera energią z akumulatorów poprzez specjalne złącza. Jednocześnie tym kablem następuje komunikacja ze skanerem i transfer danych. W przyszłości sama komunikacja ma zostać rozwiązana poprzez łącze Bluetooth. Drugi kabel o kolorze zielonym łączy komputer PC lub notebook ze skanerem. Wpina się go w złącze Ethernet (sieciowe) komputera oraz drugim końcem do gniazda w walizce z akumulatorami. Jest to kabel odpowiednio „scrossowany” umożliwiający komunikację pomiędzy dwoma komputerami. Ze względu na sposób mocowania kabla przy podstawie skanera należy zachować niezmierną uwagę podczas przenoszenia skanera będącego w trybie włączonego zasilania.

**Zestaw kul sygnalizacyjnych** (referencyjnych) – 5 sztuk o promieniu 0.0725 metra, umożliwiających przestrzenną orientację pozyskanych chmur punktów polegająca na ich wzajemnej orientacji oraz przyjęciu referencji lokalizacji wg. określonego stanowiska (pozycji skanowania XYZ)

### **3.3 Metodyka prowadzenia pomiarów – w tym wybór trybu skanowania oraz rozdzielczości**

W oparciu o wcześniejsze doświadczenia ze skanowaniem naziemnym oraz dane literaturowe przyjęto za wariant skanowania tzw „*multiscan mode*” (kilka skanów dla jednej powierzchni) zamiast „*single scan mode*” (pojedynczy skan dla powierzchni). Prace znane z literatury wskazują na brak jednoznacznego podejścia do pomiarów TLS w drzewostanach głównie w zależności od tzw. tradycji w urządzeniu lasu czy aspektów ekonomicznych. Z jednej strony szuka się możliwości zwiększenia poprawności pomiarów poprzez zagęszczenie stanowisk obserwacyjnych (często nawet do 5-ciu; Thies et al. 2003), z drugiej poszukuje jednak analogii do prac urządzeniowych wykonywanych z jednego stanowiska (Bienert et al. 2006).

Eksperymentalnie wykonywany był tzw. „skan rozgrzewający” na środku powierzchni kołowej. Urządzenie FARO w niskich warunkach temperatury otoczenia (podczas pomiarów panowała temperatura zaledwie kilku stopni C i występowały opady śniegu) może w pierwszych minutach pracy dostarczać niewymiernych wyników ze względu na brak gotowości urządzenia (wg. producenta, aspekty mechaniki precyzyjnej i generowania wiązki). Na etapie planowania badań nie można było jeszcze określić jego przydatności, choć niewątpliwie dostarcza nowych punktów 3D, w dużej części jednak pokrywających się z istniejącymi i być może o niepoprawnych lokalizacjach współrzędnych XYZ. Nie wyklucza się jednak użycia danych po przeanalizowaniu ich przydatności.

Należy pamiętać, iż proponowanie w metodyce więcej niż 1-2 stanowisk skanera z jednej strony podnosi ilość punktów 3D, z drugiej drastycznie wydłuża cykl pomiarowy na powierzchni, przez co metoda TLS może stać się już na samym początku „mało konkurencyjna” w stosunku do tradycyjnych prac urządzeniowych.

Dla badań w Miliczu zaplanowano tryb „*multiscan mode*” pozwalający na generowanie chmury punktów na całej przestrzeni 3D wewnątrz powierzchni kołowej obserwowanej z trzech pozycji rozlokowanych poza powierzchnią tuż za jej granicą. Rezerwowo wykonywano dodatkowy skan rozgrzewający urządzenie.

## **Rozdzielczość**

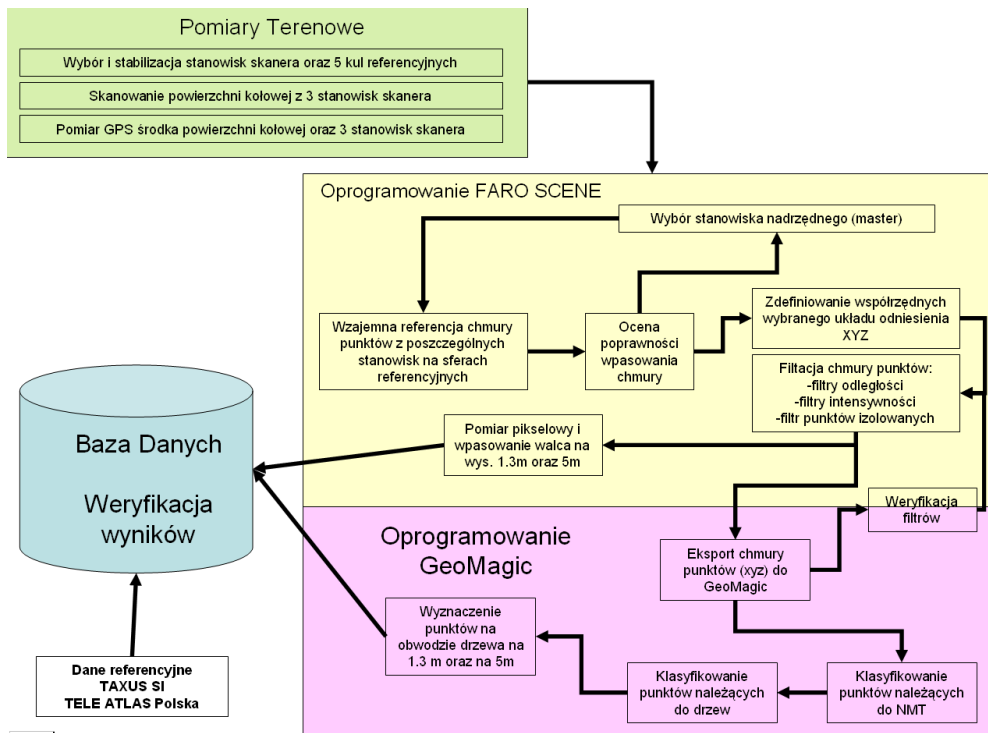
W pracach na powierzchniach kołowych w Nadleśnictwie Milicz przyjmując sugestie trenerów oraz eksperymentalnie określają czas pomiaru pełnej rozdzielczości trwający około 30 minut, zdecydowano się na  $\frac{1}{4}$  rozdzielczości. W przypadku 3 pozycji skanera na powierzchni oznaczałoby 120 minut (2 godziny) samego tylko skanowania. Ustawienie rozdzielczości na  $\frac{1}{4}$  pełnej możliwości pozwala na uzyskanie imponującej liczby punktów pomiarowych w liczbie około 50.000.000 z jednego stanowiska pomiarowego. Czas jednego obrotu skanera (bez opcji pozyskiwania zdjęć cyfrowych kamerą NIKON) wynosi około 7 minut dla tej rozdzielczości.

## **Trening przygotowujący do pracy z urządzeniem oraz z oprogramowaniem dedykowanym FARO Scene**

W dniach 03 oraz 04.11.2006 firma FARO przeprowadziła trening osób uczestniczących po stronie Wykonawcy (AR Kraków + AR Poznań + SGGW Warszawa) w badaniach. Pierwszy dzień treningowy, teoretyczny i wprowadzający do oprogramowania zrealizowano we Wrocławiu. Część praktyczną realizowano bardzo trudnych warunkach terenowych (po opadzie śniegu) wykonano w drzewostanach N-ctwa Milicz. Obejmowała ona ustawienia urządzenia skanującego, pracę z oprogramowaniem, zarządzanie danymi, przetwarzanie danych, instruktaż pracy z peryferiami (ładowarka, baterie, kable etc).

## **Pozyskanie danych TLS w drzewostanie**

Założona metodyka badawcza przewiduje pozyskanie skanerem naziemnym umieszczonym na stabilnej podstawie, chmury punktów 3D reprezentujących: drzewostan (pnie drzew + korony) wraz z podszytem, runem, podrostem, istniejącymi pniakami, grunt (odkryty) i najbliższym otoczeniem (obiekty poza powierzchnią urządzeniową na odległość obrazowania)



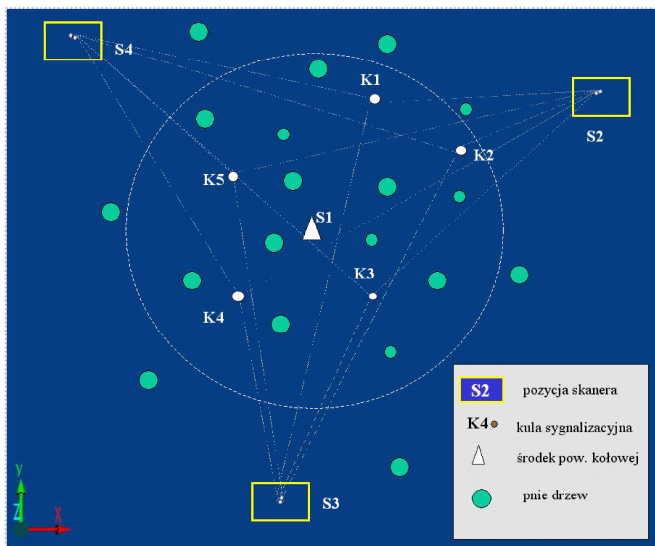
Ryc. II.3. Schemat metodyki badań nad wykorzystaniem TLS w ekstrakcji parametrów drzew

Prace na samej urządzeniowej powierzchni kołowej przebiegać będą wg schematu:

1. Przygotowanie skanera FARO do działań w terenie
  - ◇ ustawienia rozdzielczości, nazw plików, katalogów, innych zdefiniowanych trybów pozyskiwania np. kolorowych zdjęć
  - ◇ naładowanie baterii, sprawdzenie kabli, statywu
2. Nawigacja do powierzchni
3. Odnalezienie środka powierzchni
4. Weryfikacja przebiegu granic powierzchni
5. Wytypowanie najbardziej odpowiednich stanowisk skanera, z uwzględnieniem następujących czynników:
  - ◇ należy unikać bliskiego występowania pnia drzewa w kierunku powierzchni co w znaczący sposób wywołuje efekt „ocienienia”

- ◇ należy wybierać lokalne luki w celu lepszego obrazowania pni i koron drzew a także optymalnego odbioru sygnału NAVSTAR-GPS;
  - ◇ z każdej pozycji skanera powinny być widoczne min. 3 kule
  - ◇ rozmieszczenie skanerów optymalne jak najbliżej granicy powierzchni ale tak aby w pełni obrazować pnie drzew należących do powierzchni
6. Wytypowanie stanowisk 5-ciu kul referencyjnych. Ich rozmieszczenie wynikać będzie z warunków panujących w samym drzewostanie. Dochowa się staranności w następującym postępowaniu:
    - ◇ odległość kuli od pozycji skanera nie powinna przekraczać 15-17 metrów ze względu na uzyskanie dobrej precyzji identyfikacji sfery przy orientacji skanów;
    - ◇ kul nie należy ustawiać w jednej linii przebiegającej przez środek skanera i środki sfer;
    - ◇ kule należy rozmieszczać na różnych wysokościach (Z);
    - ◇ kul nie można dotykać bezpośrednio dłońmi ze względu na specylną farbę pokrywającą ich powierzchnię
    - ◇ kule powinny być idealnie widoczne tj. nie powinny być przesłaniane przez gałęzie czy fragmenty pnia co w późniejszej orientacji utrudnia bądź uniemożliwia ich selekcje jako obiektu wiążącego skany ze sobą.
  7. Stabilizacja stanowisk obserwacyjnych skanera kołkami geodezyjnymi.
  8. Wykonanie dodatkowych czynności w sytuacji źle widocznego (zasłoniętego) fragmentu pnia na 1.3 metra – sygnalizacja farbą fluorescencyjną, paskiem odblaskowym (folia 3M).
  9. Pomiar dGPS w trybie statycznym (300 epok, Pathfinder ProXRS; TRIMBLE).
  10. Numeracja kul referencyjnych oraz numerów stanowisk skanera
  11. Przeprowadzenie skaningu z opcją kamery cyfrowej NIKON (tzw. color scan) na kolejnych stanowiskach, obejmujące: przeniesienie urządzenia, jego złożenie, poziomowanie instrumentu, wyznaczeniu kierunku północy, uruchomienie systemu Windows, uruchomienie skanera

12. Pozyskanie dodatkowych danych na powierzchni oraz poza nią (domiary drzew: DBH, H, Azymuty i odległość – wykonywane dodatkowo nie objęte umową, służą weryfikacji i poszerzeniu ewentualnych badań).
13. Zakończenie pomiarów, zebranie sprzętu, przejście do samochodu w celu nawigacji do następnej powierzchni urządzeniowej



Ryc. II.4. Schemat dokonywanych pomiarów TLS w terenie (MILICZ 2006)

## Realizacja

### Statyw:

Możliwe jest wnoszenie głowicy statywu a tym samym urządzenia na wysokość około 2,30 metra od ziemi. Wykorzystywano to rozwiązanie w drzewostanach z występującym podrostem i podszytem przesłaniającym bezpośrednio pnie drzew podczas skanowania. Umieszczenie skanera na możliwie dużej wysokości (należało rozważyć ryzyko przesunięcia środka ciężkości i niestabilność całego systemu) stwarza możliwość skanowania pod większym kątem pni drzew od poziomu skanera w kierunku wysokości 1,3m na pniu gdzie powinna być określana pierśnica drzewa. Statyw powinien zostać poziomowany przed nałożeniem na niego skanera, co umożliwi libelka zamontowana w górnej jego części. Statyw FARO dostarczany jest w specjalnym pokrowcu, który jednak nie umożliwia przewożenia go bez odkręcania głowicy, co skutkuje jego transportem w stanie z zamontowaną głowicą.

### **Okablowanie:**

Jak wykazała praktyka pozyskiwania danych kabelem ten jest konieczny podczas prac terenowych w co najmniej dwóch przypadkach:

- wykonywania barwnych skanów – opcja z kamerą cyfrową tylko w trybie pozyskiwania danych bezpośrednio na komputer przenośny;
- ponownej inicjalizacji skanera i jego konfiguracji z przyczyn technicznych (utrata parametrów, wypełnienie dysku wewnętrznego PC skanera etc).

### **Kule referencyjne:**

W celu ułatwienia procesu tworzenia modeli składających się z 3 obserwacji (3 pozycje skanera obejmujące jedna powierzchnię kołowa) przygotowano odpowiednie plansze z numerami od 1 do 5 podwieszane bezpośrednio pod kulą sygnalizacyjną. Odnalezienie tej samej kuli sygnalizacyjnej na kolejnych obrazach chmur punktów w obrazie planarnym jest niejednokrotnie bardzo utrudnione szczególnie w drzewostanach, w których odstęp między poszczególnymi pniami są bardzo zbliżone i brak jest elementów charakterystycznych pozwalających na bezbłędne wskazaniu kuli o konkretnym numerze na 3 kolejnych skanach. Z tego właśnie powodu zakupiono zestaw wysuwanych tyczek pozwalających regulować wysokość podstawy sfery w zależności od warunków panujących w drzewostanie – głównie podszytu). Stosowano odpowiednie rękawiczki dostarczone w zestawie i kule za każdym razem pakowano osobno w foliowe worki w celu uniknięcia zadrapania ich powierzchni.

### **Baterie**

Nawet przy niskiej temperaturze powietrza możliwe było prowadzenie pomiarów kilkogodzinnych przy użyciu jednego zestawu baterii.

### **Color scans:**

Opcja barwnych skanów (tzw. „color scan”) wiąże się ze zintegrowaniem ze skanerem FARO aparatu cyfrowego dobrej klasy z obiektywem o znanej dystorsji. Producent skanera dostarczył do testów zestaw z kamerą NIKON D70 wyposażoną w obiektyw rybie oko oraz łącze USB, ale niestety po zakończeniu prac na 30 kołowych powierzchniach. Przesyłka dotarła do Krakowa po powrocie ekipy z Milicza. Wykonanie skanów z opcją zdjęć cyfrowych wymagało więc dodatkowego wyjazdu w teren badań kilka dni po zakończeniu sesji pomiarowej.

Specjalne jarzmo pozwala na zamontowanie kamery nad skanerem. Stosując oprogramowanie FARO należało zainstalować sterowniki tej kamery (zostały dołączone przez pomoc techniczną FARO) oraz ustawić parametry pozyskiwania barwnych skanów. Niestety w tej opcji skanowania w lesie niezbędny jest przenośny komputer !. Ogranicza to poważnie możliwość pozyskiwania obrazów ze względu na czas pracy baterii notebooka w warunkach niskiej temperatury. W trudnych warunkach drzewostanowych pozyskano obrazy barwne dla 3 powierzchni kołowych.

Pozyskiwane zdjęcia cyfrowe wydłużają o około 6 minut pracę na każdym stanowisku. Skaner w pierwszej kolejności dokonuje pełnego obrotu wokół swojej osi i mierzy w tym czasie warunki oświetleniowe (kompensacja światła). Dopiero przy drugim obrocie kamera pozyskuje zdjęcia, które są automatycznie docinane i zapisywane w binarnym pliku \*.fls wraz z chmurą punktów.

Całkowity czas pracy na jednej powierzchni kołowej obejmujący czynności od momentu pojawienia się na powierzchni do jej opuszczenia wynosił średnio 1 godz. 20 minut. W przypadku skanowania 3 powierzchni w opcji „color scan” całkowity czas przedłużał się o około 30 minut, co było związane z trybem pracy kamery oraz montażem i demontażem uchwytów kamery i jej transportem.

### **Archiwizacja danych oraz obróbka danych w oprogramowaniu dedykowanym FARO SCENE**

W kampanii pomiarowej w listopadzie 2006 – założono codzienną archiwizację danych z dysku twardego urządzenia FARO i wykonywanie kopii na dyski twarde komputery PC oraz zapis na nośniku DVD. Pozwoliło to na zachowanie danych oryginalnych (zwanych RAW) i bezpieczne ich przechowywanie oraz przekazanie pozostałym uczestnikom projektu. Nie przeprowadzono kompresji danych. Założono, że każda powierzchnia zajmie około 150 MB x 3 x 2 (zapis danych oryginalnych oraz kopii roboczej pomiarowej) przestrzeni dyskowej.

Wykonano kilka kopii bezpieczeństwa każdego dnia pomiarowego. Zarchiwizowano dane w formacie binarnym \*.fls także na nośniku DVD. Dane przekazano na przenośnym HDD oraz DVD pozostałym uczestnikom projektu.

Przewidywano, że zarządzanie skanami w formacie binarnym fls oraz projektami fws przeprowadzane będzie dzięki oprogramowaniu FARO SCENE. Zakładano, iż co najmniej 1 licencja zostanie udostępniona do pracy z danymi TLS.

Zakładano, że obróbka zebranych danych miała polegać na przeprowadzeniu filtracji, pozyskaniu większości cech analizowanego drzewostanu, automatycznym generowaniu wycinków z chmury punktów na określonych wysokościach oraz dokonaniu pomiarów bezpośrednich na chmurze punktów 3D w oprogramowaniu FARCO SCENE. Przewidywano nadawanie referencji przestrzennej chmurze punktów

- Niestety udostępniane zostały jedynie licencje czasowe programu FARCO SCENE, co często utrudnia kontynuację prac.
- W oprogramowaniu FARCO SCENE przeprowadzane są pomiary DBH (1.3m) oraz średnicy drzewa (5.0 m) w obrazie planarnym (2D) przy wykorzystaniu funkcji pomiaru pomiędzy pikselami obrazu oraz półautomatyczna metoda wpasowania walca na fragment wyselekcjonowanej chmury punktów pnia. Możliwe będzie więc porównanie manualnie i półautomatycznie wyznaczonej średnicy pnia na 1.3m oraz 5m.
- Wysokości drzew są prawie możliwe do odczytania w obrazie planarnym. W obrazie 3D nie można dokonać bezpośrednich pomiarów..
- Oprogramowanie FARCO SCENE wykazuje pewne ograniczenie w zakresie możliwości dokonywania pomiarów w chmurze punktów w widoku 3D (np. cecha – podstawa korony czy wysokość drzewa).
- FARCO SCENE nie zapewnia możliwości generowania wycinków na wysokości uzależnionej od rzędnej Z przy podstawie pojedynczego drzewa a jedynie na określonej płaszczyźnie. Częste problemy zarządzania pamięcią wirtualną komputera, brak możliwości używania pełnego zapisu współrzędnych terenowych i inne usterki są na bieżąco wyjaśniane z pomocą techniczną FARCO.

### **Przetwarzanie danych pomiarowych w innym zewnętrznym oprogramowaniu**

Ze względu na niedostatek funkcji narzędziowych dostępnych we FARCO SCENE wymaganych do ekstrakcji wybranych parametrów drzew (Tab. 1), koniecznym stało się użycie innego zewnętrznego oprogramowania do pracy z chmurą punktów TLS. Zakładano wykorzystanie innych dostępnych na rynku programów do przetwarzania obrazu, edycji tekstu (edytory dedykowane do dużych plików ASCII) czy też baz danych z możliwością zarządzania danymi przestrzennymi. Testowano również inne komercyjne oprogramowanie takie jak rozszerzenia pakietów GIS/CAD (np. Lidar Analyst).

Określenie cechy: gatunek (rodzaj) drzewa wydaje się być jednym z najtrudniejszych zadań do realizacji. Zamierzenie opiera się na możliwości:

- wykorzystaniu danych fotogrametrycznych (zdjęcia cyfrowe, ALS) do określenia gatunku poprzez analizę kształtu i odpowiedzi spektralnej aparatu asymilacyjnego drzew (klasyfikacja obiektowa w oprogramowaniu eCognition) ;
- przeprowadzenia analizy statystycznej oraz znalezienie odpowiedniego algorytmu dokonującego klasyfikacji chmury punktów na podstawie wartości intensywności światła odbijanego przez powierzchnie kory oraz obrazu RGB w przypadku „color scans” (udało się jednak tylko pozyskać 3 takie powierzchnie). Wartości te jednak mogą okazać się niejednoznaczne na co wskazują publikacje w literaturze fachowej.
- rozpoznawania wzorca przestrzennego 3D gatunku drzewa (jego pokroju) w oprogramowaniu Geomagic Qualify.

Ekstrakcja pozostałych parametrów w oprogramowaniu FARO oraz innym zewnętrznym nie powinna nastęrczać dużo kłopotów poza wysoką pracochłonnością działań. Zakłada się pomiar czasu wykonywanych czynności w celu przedstawienia obiektywnego raportu oraz wskazań praktycznych po zakończeniu badań.

Tab. II.1. Możliwości ekstrakcji parametrów przy użyciu dedykowanego oprogramowania

Cecha	Oprogramowanie	Możliwość bezpośredniego określenia/ wykonania	
		TAK	NIE
Gatunek (rodzaj) drzewa	<b>FARO SCENE</b>		x
Manualny pomiar odległości do pnia (cm dokładności)		x	
Pomiar azymutu (stopnie)		x	
Pomiar manualny średnicy (DBH 1.3 m) – 2D Planar View		x	
Pomiar manualny Średnicy na 5m – 2D Planar View		x	

Cecha	Oprogramowanie	Możliwość bezpośredniego określenia/ wykonania	
		TAK	NIE
Pomiar półautomatyczny średnicy drzewa (1.3m ; 5m) metoda wpasowania walca		x	
Wysokość drzewa H (m) – widok planarny 2D		x	
Azymut środka korony		x	
Odległość do środka korony		x	
Kształt korony (wektor/obrys)			x
Wysokość posadowienia korony – 2D		x	
Wysokość posadowienia korony – 3D			x
Wysokość posadowienia korony – widok planarny – 2D		x ???	x
Filtracja danych 3D		x	
Nadawanie pełnych współrzędnych układu odniesienia			x
Generowanie wycinka na określonej wysokości od podstawy drzewa			x
Generowanie NMT			x
Klasyfikacja chmury punktów			x
Eksport do zewnętrznego oprogramowania		x	
Import danych z FARO SCENE	<b>Geomagic Qualify</b>	x	

Cecha	Oprogramowanie	Możliwość bezpośredniego określenia/ wykonania	
		TAK	NIE
Filtracja		x	
Nadawanie pełnych współrzędnych		x	
Generowanie NMT		x	
Generowanie wycinków z chmury 3D (wys. 1.3.m i 5m)			x
Modelowanie 3D			x ?

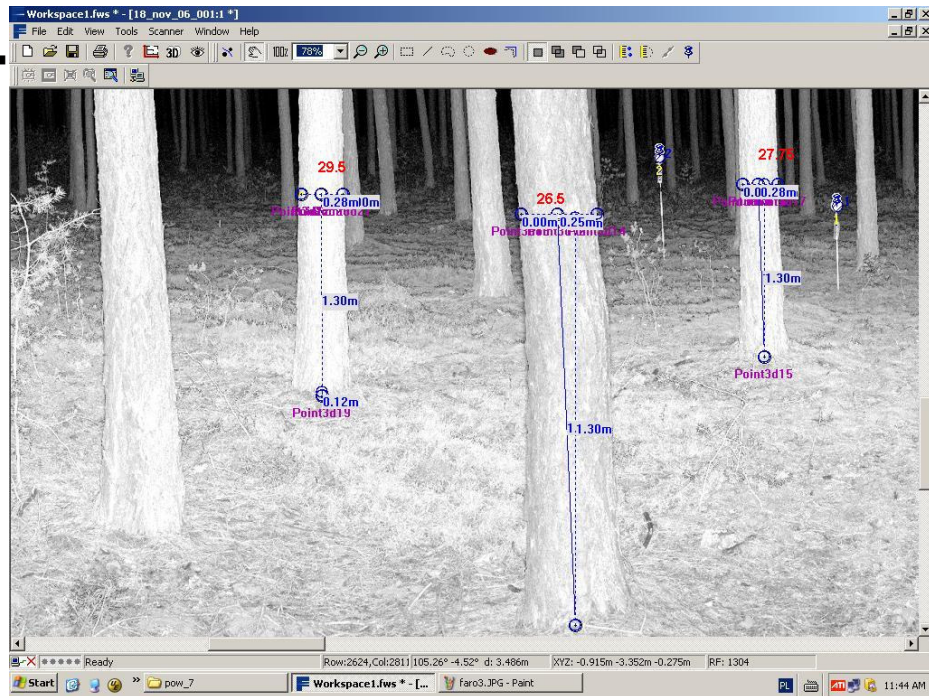
(x – TAK/NIE; x ? – być może; opcja niesprawdzona)

### **3.4 Analiza statystyczna wyników w oparciu o dane referencyjne (z powierzchni kołowych oraz danych fotogrametrycznych)**

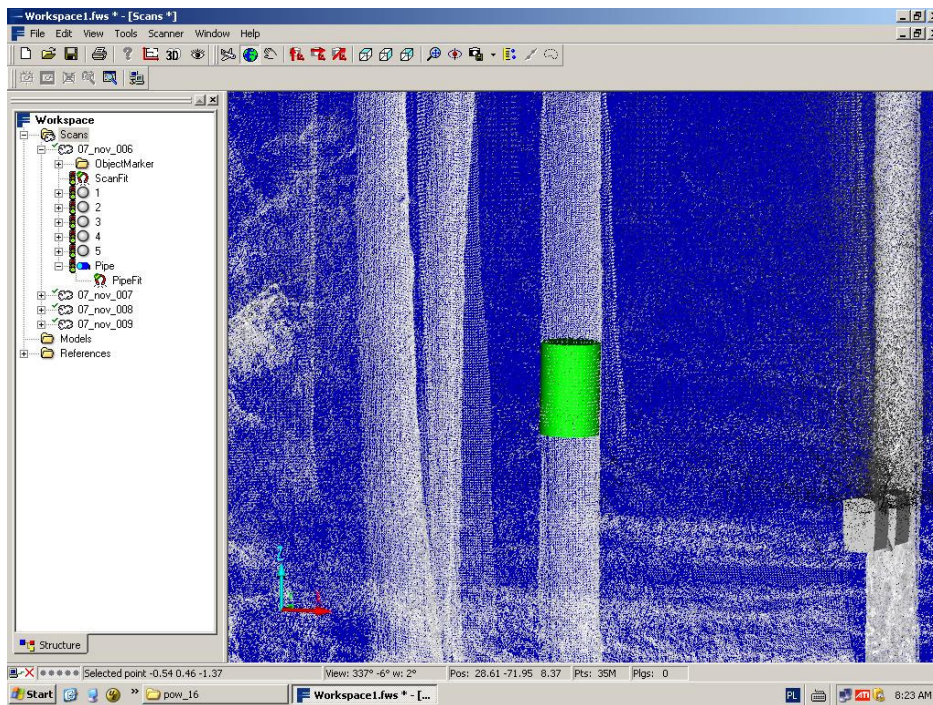
Na podstawie pomiarów przeprowadzonych w oprogramowaniu FARO Scene w projekcie założono, że przeprowadzona zostanie analiza statystyczna (regresji) wyników w oparciu o dane referencyjne, do których zaliczają się: dane z prac terenowych na powierzchniach urządzeniowych przeprowadzone przez TAXUS SI oraz dane fotogrametryczne (cyfrowe ortofotografie) przekazane przez wykonawcę Tele Atlas Polska.

Analizowane były np. takie parametry jak:

- dokładność określenia pierśnicy w zależności od odległości do pozycji skanera i gatunku drzewa;
- dokładność wyznaczenia azymutu przez ekipy pomiarowe (odchylenie kątowe);
- precyzja pomiaru odległości do pnia drzewa;
- dokładność pomiarów poziomych;
- precyzja określenia wysokości drzewa;
- dokładność wyznaczenia podstawy korony (dość subiektywna ocena)
- dokładność określenia powierzchni oraz kształtów korony,
- możliwość określenia gatunku drzewa, oraz inne jakie mogą pojawić się podczas prowadzonych w tym momencie badań.



Ryc. II.5. Ekran roboczy programu FARO Scene.



Ryc.II.6. Półautomatyczna metoda pomiaru – zwana „Pipe” – wykonywana poprzez wpasowania walca w chmurę punktów reprezentujących pień sosny (MILICZ, pow. 19)

## 4. Metodyczne wskazówki odnośnie praktycznego wykorzystania technologii TLS, scenariusze aplikacji, zalecenia, wnioski odnośnie dalszych etapów prac

### **4.1 Wstęp**

W niniejszym rozdziale przedstawiono skrótowo wyniki prac nad przydatnością skanera FARO LS 880 w pracach z zakresu inwentaryzacji lasu, uwagi, wnioski a także wskazania metodyczne dotyczące naziemnego skaningu laserowego (TLS), który był przedmiotem zlecenia SGGW dla Akademii Rolniczej w Krakowie.

Zestawione w grupach tematycznych powyższe skrótowe podsumowanie uzyskanych wyników, uwagi, zalecenia praktyczne i wnioski kolejno poruszają kwestie:

- dokładności określania wybranych cech taksacyjnych w stosunku do danych referencyjnych;
- samego urządzenia skanującego (skanera FARO 880 LS);
- oprogramowania Faro Scene ver. 4;
- technologii pomiaru oraz
- wyników prac.

### **4.2 Podsumowanie uzyskanych wyników określania wybranych cech taksacyjnych metoda TLS (FARO LS 880)**

#### ***Liczba drzew oraz możliwość pomiaru pierśnicy***

Naziemny skaningu laserowy pozwala określić liczbę drzew na powierzchni próbnej z dokładnością wynoszącą 94.5% już przy zastosowaniu tylko jednego stanowiska skanera (single scan mode). Użycie czterech stanowisk, właściwie rozmieszczonych (stanowisko centralne oraz stanowiska na zewnątrz powierzchni), pozwala zwiększyć tą dokładność do 99.25% drzew. Dodatkowo, używając bardziej zaawansowanego oprogramowania (Terrasolid) pozwalającego na detekcję drzew na podstawie wycinków pni (slice) możliwe jest zwiększenie omawianej dokładności do 99.85%.

Głównym czynnikiem wpływającym na możliwość prawidłowego określenia ilości drzew na powierzchni jest wybór lokalizacji stanowiska skanera. Określenie ilości drzew na powierzchni wynika wyłącznie z faktu ich „widoczności” z danej pozycji skanera i nie jest tożsame z możliwością pomiaru pierśnicy. Specyfika wybranych metod pomiaru pierśnicy drzew (PIXEL oraz PIPE), która przejawiała się przede wszystkim w dobrej widoczności mierzonego fragmentu pnia, skutkowałą niejednokrotnie brakiem możliwości przeprowadzenia tego pomiaru. Metodą PIXEL zmierzono 88.9%, a metodą PIPE 88.2% drzew.

Wpływ na podane wyżej wartości miały również zabiegi gospodarcze przeprowadzone w okresie pomiędzy pomiarami terenowymi (07.2006) a skanowaniem laserowym (11.2006) w wyniku których zostało usunięte 11.07% drzew.

### ***Odległość i azymut***

Dokładność określenia odległości oraz azymutu drzew pozwala jednoznacznie stwierdzić, iż naziemny skanowanie laserowe pozwala na precyzyjne określenie położenia drzew w drzewostanie.

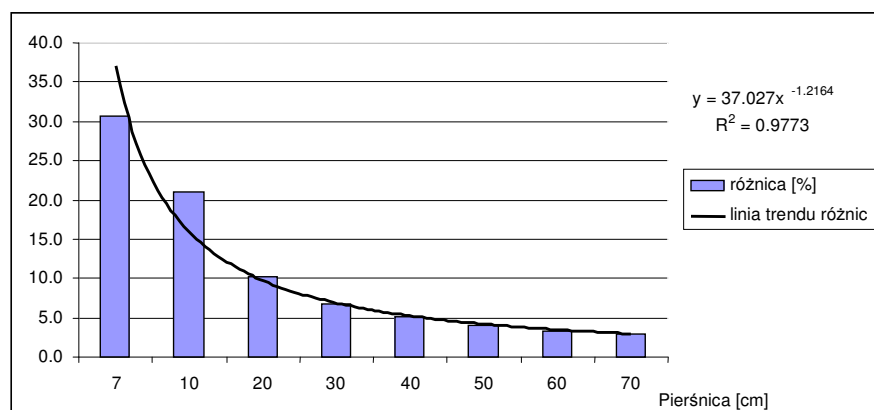
### ***Pierśnica drzewa***

Wysokie współczynniki regresji liniowej ( $R^2$  - współczynnik determinacji) dla analizowanego związku danych referencyjnych a pomiarami TLS (PIXEL oraz PIPE) wskazują na wysokie prawdopodobieństwo opisu rzeczywistej pierśnicy na podstawie skanowania laserowego. Zależność ta osiągała nieco wyższe wartości dla drzewostanów liściastych ( $R^2_{PIPE}=0.988$ ;  $R^2_{PIXEL}=0.978$ ) niż w przypadku analizowanych drzewostanów iglastych ( $R^2_{PIPE}=0.969$ ;  $R^2_{PIXEL}=0.963$ ). W obu rozważanych grupach stratyfikacyjnych współczynnik  $R^2$  dla półautomatycznej metody PIPE wskazuje na wyższe prawdopodobieństwo poprawnego pomiaru pierśnicy drzewa.

Analizując poszczególne gatunki w grupie drzewostanów liściastych stwierdzono najwyższą wartość współczynnika determinacji dla dębu ( $R^2_{PIPE}=0.988$ ;  $R^2_{PIXEL}=0.972$ ) i w dalszej kolejności dla buka ( $R^2_{PIPE}=0.981$ ;  $R^2_{PIXEL}=0.965$ ) i graba ( $R^2_{PIPE}=0.926$ ;  $R^2_{PIXEL}=0.948$ ). Analiza w grupie gatunków iglastych, najliczniej reprezentowanej przez sosnę, wykazała, iż rzeczywistą wartość pierśnicy można określić z prawdopodobieństwem 0.964 lub 0.959, odpowiednio dla metody PIPE oraz PIXEL. Dla drugiego gatunku iglastego (świerk) analiza regresji osiągnęła wartość współczynnika determinacji na poziomie 0.938 i 0.924 odpowiednio dla metody pomiaru PIPE oraz PIXEL.

Podsumowując, można stwierdzić, iż dla obu metod pomiarowych (PIXEL oraz PIPE) osiągnięto niezwykle wysokie współczynniki determinacji R<sup>2</sup> opisujące prawdopodobieństwo poprawnego określenia pierśnicy drzewa. We wszystkich analizowanych przypadkach, wyższe współczynniki uzyskane dla metody PIPE wskazują, iż kształt przekroju poprzecznego mierzonych drzew był zbliżony do okręgu a tym samym pień do walca.

Wykazywanie różnic w dokładnościach pomiarowych, pomiędzy metodą TLS a tradycyjną metodą pomiaru ze względu na zróżnicowanie grubości drzew oraz stosowanie wzorów dendrometrycznych nie prowadzi do poprawnych interpretacji. Wzory określające zasobność drzew i drzewostanów wykorzystywane jest pierśnicowe pole przekroju, stąd ta wartość wydaje się być najważniejsza w szukaniu rozwiązań technologicznych prowadzących do automatyzacji jej pozyskiwania. Posługiwanie się wartością średnicy (promienia), pierśnicy, w analizie TLS nie jest właściwe w sytuacji dążenia do automatyzacji procesów, w których liczy się poprawność końcowego wyniku zasobności drzewostanu. Przykładowo średni błąd (różnica) pomiaru pierśnicy (np. 1.0 cm) pomiędzy metodami: tradycyjną oraz TLS - przekłada się na wartość pierśnicowego pola przekroju w zależności od wartości promienia (średnicy) pnia. Im większa wartość pierśnicy drzewa tym stałe różnice odczytu (pierśnicomierz, oprogramowanie FARO) mniej wpływają na wynik pierśnicowego pola przekroju drzewa (Ryc. II.7).



Ryc. II.7 Zależność zmiany wielkości różnic określenia pola pierśnicowego przekroju przy stałym błędzie równym 1.0 cm i zmiennej wartości pierśnicy.

Metoda TLS PIXEL zastosowana w kombinacji czterech stanowisk pomiarowych na każdej powierzchni kołowej pozwoliła w wariancie D (relacja referencja:TLS = 1:1) na określenie pola pierśnicowego przekroju drzewa g [m<sup>2</sup>] z dokładnością sięgającą 96.4% dla wszystkich analizowanych gatunków. W grupach stratyfikacyjnych dla poszczególnych

gatunków osiągnięto wartości: 96.1% dla sosny, 89.5% dla świerka, 97.3% dla buka, 97.5% dla dębu oraz 94.8% dla graba.

Analogicznie metoda TLS PIPE pozwoliła na uzyskanie jeszcze lepszy rezultatów dla wszystkich analizowanych gatunków na poziomie 98.4%. W grupach stratyfikacyjnych dla poszczególnych gatunków osiągnięto wartości: 96.2% dla sosny, 89.9% dla świerka, 102.0% dla buka, 106.3% dla dębu oraz 97.0% dla graba.

Porównywanie się do niezweryfikowanych danych referencyjnych może prowadzić (wariant A) do niewłaściwych interpretacji. Zestaw danych referencyjnych w krótkim czasie okazał się nieaktualny ze względu na przeprowadzone zabiegi hodowlane (trzebież). Gdyby przyjąć zestaw danych referencyjnych bezkrytycznie to wartość  $G$  [ $m^2 \cdot ha^{-1}$ ] określana metodą TLS przyjęłaby wartości mniejsze o 14.9% (PIXEL) oraz 14.0% (PIPE). Uwzględnienie w analizie drzew usuniętych w trzebieży (wariant B) prowadzi do zmniejszenia wyżej wymienionych wartości odpowiednio do 14.1% (PIXEL) oraz 13.3% (PIPE). Te wciąż wysokie wartości wynikają częściowo z niemożności określenia  $G$  na powierzchni kołowej nr 22 (tyczkowina). Kolejne zmniejszenie wartości różnic określenia  $G$  dla analizowanych powierzchni kołowych przynosi wariant C (bez powierzchni nr 22 oraz drzew usuniętych), które przyjmują odpowiednio 11.7% (PIXEL) oraz 10.8% (PIPE). Najlepsze rezultaty osiągnięto porównując pomiary dotyczące drzew w wariantcie D (relacja 1:1, tj.: porównanie parametrów drzew na obrazie TLS do tych samych drzew w terenie). Procentowa wartość różnicy  $G$  określonego metodą tradycyjną (TAXUS) oraz PIXEL wahała się w granicach +5.3% do -0.03% przyjmując średnią wartość na poziomie 3.5%. Metoda PIPE analogicznie przy wyższych wahaniach sięgających od +9.0% do -0.02%, osiągnęła lepszy wynik dla średniej wynoszącej 1.9%.

### ***Grubość pnia na wysokości 5,0m***

Podobnie jak w przypadku pierśnicy, wysokie wartości współczynnika regresji liniowej ( $R^2_{PIPE}=0.957$ ;  $R^2_{PIXEL}=0.968$ ) dla pomiarów grubości drzewa na wysokości 5.0 m nad gruntem, wskazują na duże prawdopodobieństwo określenia rzeczywistej grubości drzewa na tej wysokości przy użyciu naziemnego skaningu laserowego (TLS).

Dla drzewostanów stwierdzono wartości współczynnika determinacji ( $R^2_{PIPE}=0.992$ ;  $R^2_{PIXEL}=0.981$ ), pozwalającego z dużym prawdopodobieństwem określić rzeczywistą grubość pnia na 5.0m wysokości. Nieco niższe wartości notowano analogicznie w grupie

drzewostanów iglastych ( $R2_{PIPE}=0.930$ ;  $R2_{PIXEL}=0.911$ ). Może to świadczyć o różnicach w kształcie geometrycznym pnia oraz właściwościach kory odbijającej promienie lasera.

W grupie drzewostanów liściastych najwyższą wartość współczynnika determinacji zanotowano dla dębu ( $R2_{PIPE}=0.989$ ;  $R2_{PIXEL}=0.983$ ), a w dalszej kolejności dla buka ( $R2_{PIPE}=0.990$ ;  $R2_{PIXEL}=0.976$ ) oraz graba ( $R2_{PIPE}=0.954$ ;  $R2_{PIXEL}=0.881$ ). Analiza w grupie drzewostanów iglastych obejmowała tylko sosnę, w przypadku której wartość współczynnika determinacji wyniosła 0.928 dla metody PIPE oraz 0.908 dla metody PIXEL. Ze względu na niską wysokość świerków oraz gęste korony, pomiar ich grubości na wysokości 5.0 m nie był możliwy do przeprowadzenia.

Wysokie wartości współczynnika determinacji wskazują na możliwość wykorzystania TLS w określaniu zbieżności, liczby kształtu i innych parametrów wymagających pomiaru pnia na różnych wysokościach. Pamiętać należy o tym, iż pomiar referencyjny został wykonany metodą, która nie jest pozbawiona błędów i nie weryfikowano jej na drzewach leżących.

### ***Wysokość drzewa***

Analiza regresji liniowej przeprowadzona dla pomiarów wysokości drzew na powierzchniach próbnych wykazała wysoki związek pomiędzy danymi referencyjnymi a danymi ze skaningu laserowego. Współczynnik determinacji dla wszystkich analizowanych drzew łącznie wyniósł 0.914, a średnia różnica -0.61m. W grupie drzewostanów liściastych ( $R2=0.910$ ) największą zgodność z pomiarami referencyjnymi otrzymano dla graba ( $R2=0.952$ , średnia różnica -0.27m), nieco gorszą dla buka ( $R2=0.810$ , średnia różnica -0.23m), najmniejszą dla dębu ( $R2=0.095$ , średnia różnica +1.34m). Natomiast dla drzewostanów iglastych współczynnik determinacji wyniósł ( $R2=0.893$ ), a największą zgodność otrzymano dla sosny ( $R2=0.829$ , średnia różnica -0.81m), mniejszą dla świerka ( $R2=0.375$ , średnia różnica -0.14m). Powyższe rezultaty analiz odnoszą się jedynie dla tych gatunków drzew, których liczba przekroczyła 10 sztuk. Wpływ zarówno na wielkość otrzymywanego współczynnika determinacji jak i wartość średniej różnicy ma wielkość samej próby.

Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że naziemny skaningu laserowy umożliwia precyzyjny pomiar wysokości drzew. Wynik tego pomiaru jest w większości przypadków zaniżony, co wynika z niedocierania impulsów lasera do wierzchołków drzew. Spowodowane jest to wzajemnym przesłanianiem się gałęzi oraz malejącą gęstością punktów wraz ze

wzrostem odległości od urządzenia. Dlatego duże znaczenie ma termin wykonywania skaningu i wiążący się z nim stan aparatu asymilacyjnego skanowanych drzew.

### ***Długość korony drzewa***

Długość korony, określana jako różnica pomiędzy wysokością drzewa a wysokością podstawy korony, należy do bardzo subiektywnych zmiennych określanych przez taksatora podczas prac terenowych. Subiektywność polega głównie na ocenie początku korony, tj. jej podstawy określanej od wysokości pierwszej żywej gałęzi. Właśnie ta interpretacja podstawy korony powodować może przy silnym subiektywizmie obserwatora oraz braku weryfikacji w obrazie chmury punktów (listopad, brak aparatu asymilacyjnego) otrzymanie niepoprawnych rezultatów. W metodyce znanej z obszaru Niemiec za podstawę korony uważa się dopiero trzy żywe gałęzie.

Współczynnik regresji liniowej (R) obliczony dla długości korony pomiędzy danymi referencyjnymi a TLS FARO wyniósł 0.710, co świadczy o silnych zależnościach po mimo wyżej przytoczonych obiektywnych trudności. Długość korony określana w TLS była średnio większa o +1.27m, co może być spowodowane po pierwsze niewłaściwym odczytem w FARO Scene, a po drugie zaniżaniem pomiaru wysokości drzewa i zawyżaniem podstawy korony przez taksatora w pracach terenowych. Jedynie ścięcie drzewa i pomiar długości korony na drzewie leżącym mógłby potwierdzić poprawność referencji.

Współczynnik determinacji w grupie drzewostanów liściastych był stosunkowo niewysoki i wyniósł 0.411, natomiast w iglastych osiągnął jeszcze niższe wartości na poziomie 0.178. Średnie różnice długości korony wyniosły +0.70m dla drzewostanów liściastych oraz +1.36m dla drzewostanów iglastych. W grupie drzewostanów liściastych największą zgodność z pomiarami referencyjnymi wykazał grab ( $R^2=0.640$ , średnia różnica -0.13m), następnie dąb ( $R^2=0.449$ , średnia różnica -0.31m) i w dalszej kolejności buk ( $R^2=0.340$ , średnia różnica +1.62m). Dla gatunków iglastych największą zgodność zanotowano w przypadku świerka ( $R^2=0.729$ , średnia różnica +0.22m) i sporo niższą dla sosny ( $R^2=0.164$ , średnia różnica +1.44m).

### ***Powierzchnia koron drzew***

Analiza regresji dla pary zmiennych: powierzchnia koron drzew z pomiaru terenowego (w ośmiu kierunkach) i pomiarów TLS wykazała wysoką wartość współczynnika determinacji  $R^2=0.773$ , dowodząc stosunkowo wysokiej przydatności naziemnego skaningu laserowego w pracach związanych z określaniem zwarcia.

Analizę cechy powierzchni koron drzew przeprowadzono w różnych wariantach. Różnica między nimi polegała na uwzględnianiu, bądź też nie, tych fragmentów koron drzew, które sięgały poza powierzchnię kołową oraz traktowaniu powierzchni koron drzew oddzielnie (pojedyncze poligony) bądź też łączeniu ich w jeden wspólny poligon (analiza dissolve ESRI).

W przypadku wariantu I (Raport „2\_Zestawienie wyników pomiarów... 2007”), w którym uwzględniano powierzchnię fragmentów koron drzew poza powierzchnią kołową, uzyskano średnią różnicę dla sumy pojedynczych koron wynoszącą -4.10% z pomiarów TLS w stosunku do metod naziemnych. Wariant łączenia koron w jeden poligon wykazał różnice na poziomie zaledwie +4.04%. Dla wariantu II, w którym powierzchni koron poza powierzchnią próbną nie uwzględniano, różnica powierzchni z TLS w stosunku do pomiarów referencyjnych wyniosła -5.94%. Różnica około 1.8% pomiędzy analizowaniem fragmentów koron przekraczających granicę powierzchni wydaje się być do pominięcia, szczególnie w aspekcie zastosowania w urządzaniu lasu klasyfikacji zwarcia opartej na czterech stopniach.

Analiza dokładności lokalizacji oraz kształtu korony (analiza intersect ESRI) wykazała, iż część wspólna obiektów tworzonych na podstawie pomiarów TLS oraz domiarów naziemnych wynosi 7136.08 m<sup>2</sup> (Tabela 49, Raport „2\_Zestawienie wyników pomiarów... 2007”) co świadczy o stosunkowo wysokiej zgodności obu metod wynoszącej ponad 80%.

Niewątpliwie kształt i lokalizacja korony drzewa pozyskiwane na drodze wektoryzacji chmury punktów TLS jest poprawna i uwzględnia więcej niż 8 kierunków pomiarowych stosowanych w pomiarach tradycyjnych. Nasuwa się jednak pytanie o przydatność tak kosztochłonnej metody wektoryzacji chmury punktów. Może i powinna ona mieć zastosowanie w przypadku stałych powierzchni obserwacyjnych czy też powierzchni badawczych (monitoringowych). Niewątpliwie procesy automatyzacji przetwarzania chmury punktów (klasyfikacji; segmentacji; klastrowania) mogą w przyszłości ułatwić pozyskiwanie precyzyjnych informacji o wymiarach koron drzew nie tylko 2D ale również 3D.

Skaning naziemny z całą pewnością umożliwia precyzyjne określenie zwarcia drzewostanu (0-100%) a nie jak dotychczas w bardzo subiektywny sposób.

### ***Identyfikacja gatunku drzewa***

Próba automatycznej identyfikacji gatunku drzewa na podstawie danych TLS (intensity) oraz cyfrowych zdjęć (RGB) okazała się bardzo skomplikowana i nie przyniosła

oczekiwanych rezultatów. Jedynie dla sosny w drugiej i w trzeciej klasie wieku uzyskano zadowalająco wysokie współczynniki korelacji (odpowiednio 0.80 i 0.75) między gatunkiem drzewa a wartościami sygnału rejestrowanego przez lidar. Niewątpliwie algorytm klasyfikacyjny wymaga jako danych wejściowych szeregu innych parametrów takich jak: zbieżystość, krzywizna, podstawa korony, typ korowiny, cechy szczególne, ekotyp i innych. Stworzenie rozbudowanego modelu opartego o w/w cechy w przyszłości może doprowadzić do automatycznego klasyfikowania chmury punktów pod kątem gatunku (ekotypu) drzewa a nawet sortymentu i jakości surowca. Stworzenie takiego algorytmu wymaga jednak wielu lat pracy interdyscyplinarnego zespołu badawczego.

### ***4.3 Skaner laserowy FARO 880 LS***

#### *Zalety skanera*

- możliwość konfiguracji urządzenia (gęstość skanowania, kąty, wstępny skan, definiowanie nazw plików) w warunkach kameralnych (np. w samochodzie w terenie lub w dzień poprzedzający pomiary w warunkach biurowych) lub ewentualnie w terenie, za pomocą komputera przenośnego;
- proste uruchamianie w terenie typu „one-button” (wymagające jednak kluczyka zabezpieczającego przed włączeniem ze względu na klasę bezpieczeństwa promienia lasera);
- budowa modułarna (w jednej z części skanera umieszczono komputer klasy PC z systemem operacyjnym Windows) umożliwiającą przechowywanie danych na dysku wewnętrznym urządzenia;
- duża przestrzeń dyskowa zapewniająca zapis wyników wielu dni pracy przy skanowaniu w podstawowej rozdzielczości (np. 1/4);
- wysoka częstotliwość skanowania do 120 kHz;
- duża szybkość pozyskiwania i jednoczesnego zapisu danych (1 skanu około 7 minut przy 1/4 maksymalnej rozdzielczości);
- zasięgi kątowe pracy skanera: pionowy do 320 stopni i poziomy 360 stopni;
- możliwość wykonywania skanu w opcji color scan (integracja z kamerą cyfrową NIKON);

- możliwość wysuwania statywu na znaczną wysokość (ograniczanie negatywnego wpływu podszytu).

### ***Wady skanera***

- brak możliwości automatycznego określania wysokości urządzenia nad gruntem (dalmierza laserowego);
- brak elektronicznego kompasu – brak możliwości nadania kierunku azymutu dla pierwszych pikseli obrazu a tym samym całemu obrazowi planarnemu;
- ciężkie i nieporęczne baterie zewnętrzne (walizka) wymagają użycia dodatkowego personelu przy przemieszczaniu się z urządzeniem po lesie;
- usterkowe okablowanie – konstrukcja połączeń (wtyczki) i długie kable zwiększają ryzyko zahaczenia się o nie i spowodowania awarii;
- duża obudowa (skrzynia zabezpieczająca) uniemożliwia transport w drzewostanach z gęstym podszytem a jednocześnie wymaga dużej przestrzeni bagażowej w samochodzie;
- duży ciężar całego zestawu wymagająca zespołu co najmniej 2 osób;
- brak (stan: listopad 2006) specjalistycznego plecaka do przenoszenia skanera pomiędzy stanowiskami w drzewostanie (opcja „mobilna”);
- niedopracowana opcja wykonywania barwnych skanów tzw. „color scan” – niesymetryczne położenie kamery powodujące kłopoty z odpowiednią integracją chmury punktów z obrazem fotogrametrycznym;
- konieczność stosowania notebooka (bezpośredni zapis zdjęć na dysk HDD notebooka) w terenie w przypadku opcji color scan (aparat fotograficzny);
- brak komunikacji Wi-Fi z urządzeniem czy Bluetooth (stan: XI. 2006);
- zbyt mała liczba dostarczonych przez producenta sfer (kul) referencyjnych (utrudnienia w przypadku 5 kul i podszytu);
- brak przypisania plikom pomiarowym wstępnej lokalizacji GPS (nawet w pomiarze autonomicznym);

- konieczność zamykania systemu Windows XP (OS skanera) podczas zmiany stanowiska skanowania drzewostanie) co jest niezmiernie ważne gdyż jedyną cechą pozwalającą na identyfikację kolejnych skanów jest czas (zegar PC).
- duża ilość tzw. phantom points (punktów o nieprawidłowym położeniu, szumów), wynikająca z zastosowanej metody pomiaru odległości opartej o przesunięcie fazowe (phase shift).

### ***Zalecenia praktyczne dotyczące skanera FARO***

- w przypadku wybrania skanera do stosowania w PG LP – możliwie szybkie wnioskowanie do producenta (firmy FARO) o modyfikację okablowania szczególnie podłączenia kabli do obrotowej części skanera (narażenie na wyłamanie kabla; odnotowano taki defekt w trudnych warunkach drzewostanowych);
- wymiana ciężkiego statywu na konstrukcję z włókien węglowych (byłby lżejszy w przenoszeniu ale musi być stabilny);
- praca w terenie tylko z wersją skanera FARO LS 880 posiadającą komunikację z urządzeniem typu PDA poprzez Bluetooth czy Wi-Fi ale bez opcji wykonywania color-scan (zdjęć cyfrowych – to wymaga notebooka – ewentualnie wybór wodoodpornego urządzenia typu panel PC);
- zakup lub wypożyczenie dla kolejnych prac/testów - co najmniej 10 sfer (kul) referencyjnych;
- zaleca się wykorzystanie autorskiego pomysłu (AR Kraków) odpowiedniego zanumerowanie sfer podczas skanowania (specjalnych podstaw, na których sfery są umieszczane lub w ich pobliżu);
- przygotowanie odpowiednich stabilnych platform dla sfer referencyjnych;
- wnioskowanie do producenta o integrację skanera z urządzeniami peryferyjnymi: takimi jak GPS czy kompas elektroniczny;
- należy na każdej powierzchni wstępnie zeskanować 1 dodatkową pozycję ze względu na tzw. „rozgrzanie urządzenia” tj szczególnie podczas rozpoczynania pracy ze skanerem;

- powinno się stosować najnowsza wersję baterii (lżejszą) podwieszanych bezpośrednio do statywu oraz plecak do przenoszenia skanera pomiędzy stanowiskami (zaprezentowane na targach Intergeo jesienią 2007);
- należy bezzwłocznie zwrócić producentowi FARO uwagę w zakresie poprawienia jakości sensora FARO LS 880, co może znacząco wpłynąć na eliminację generowanych błędów (tzw. ghost czy phantom points), które szczególnie często występują w obrębie korony;
- posiadanie okresowego certyfikatu kalibracji urządzenia wydawanego przez producenta FARO (wiąże się z określonymi opłatami ale jest konieczne);
- przy każdym stanowisku pomiarowym skanera należy poprawnie określać wysokość położenia głowicy skanującej nad gruntem i zapisywać do odpowiedniego formularza;
- zaleca się wykonywanie dokumentacji fotograficznej podczas prowadzenia skaningu na powierzchniach.

#### ***4.4 Oprogramowanie FARO SCENE ver.4.***

##### ***Zalety oprogramowania***

- oprogramowanie przyjazne dla niezaawansowanego użytkownika;
- dedykowane oprogramowanie wczytujące dane binarne ze skanera FARO LS880 bez potrzeby ich konwersji do innych formatów;
- stosunkowo łatwa procedura wpasowywania skanów w jeden układ odniesienia;
- możliwy eksport chmury punktów do innych formatów (np. ASCII; IGES);
- możliwość ograniczania ilości wczytywanych punktów z chmury np. tylko do 4.000.000;
- możliwość filtracji chmury punktów.
- możliwość dokonywania pomiarów w obrazie planarnym (intensywności).

##### ***Wady oprogramowania***

- wysokie wymagania sprzętowe w stosunku do PC - nie zawsze jednoznaczne do interpretacji problemu (karta grafiki, RAM, taktowanie procesora, itp.);

- zdarzające się błędy filtracji punktów związane z eliminacją tzw. ghost points oraz phantom points;
- brak możliwości bezpośredniego pomiaru wierzchołków drzew w widoku planarnym 2-D;
- brak możliwości wstawienia punktu pomiarowego precyzyjnie w widoku planarnym w celu dokonania pomiaru w opcji 3D;
- silny subiektywizm operatora w przypadku pomiaru metodą „PIXEL” w widoku planarnym;
- brak funkcji przywracającej stan chmury punktów sprzed wykonywanego procesu (np. powrót po nieudanej filtracji punktów) ;
- brak możliwości przeprowadzenia klasyfikacji chmury punktów do odpowiednich klas wysokości;
- brak możliwości tworzenia modeli CAD;
- w przypadku realizowanego projektu – brak zakupionej licencji oprogramowania co wiązało się z cyklicznym wysyłaniem próśb do producenta FARO o licencje czasowe (max. 3 miesięczne). Często kłopoty z licencjonowaniem odpowiednich PC (zmiany konfiguracji powodujące zmiany ID).

***Zalecenia praktyczne dotyczące oprzyrządowania oraz oprogramowania do analizy chmury punktów TLS***

- należy posługiwać się możliwie najlepiej skonfigurowanym komputerem PC:
  - **szybki procesor** > Core2Duo,
  - minimum **2 GB RAM**,
  - **wydajną kartę grafiki** z własną pamięcią RAM, wcześniej zweryfikowaną przez firmę FARO jako nadająca się do obsługi programu FARO Scene;
  - duża przestrzeń dyskowa min **min. 250 GB**;
  - **moduł archiwizacji** DVD, streamer, dyski twarde USB np. 1TB lub odpowiednie infrastruktura z centralną archiwizacją danych;
  - **monitor** – szybkie odświeżanie, wysoki kontrast, min 17” LCD; zalecane 2 monitory;

- należy posiadać **własną licencje FARO Scene ver.4** (i wyższa) oraz serwis licencyjny (maintenance);
- należy przejść **profesjonalne szkolenie** z obsługi oprogramowania i oprzyrządowania (konfiguracja skanera) najlepiej u autoryzowanego dealera FARO;
- w przypadku określania wysokości drzew oraz podstaw korony wymagany jest zakup dodatkowego oprogramowania np.: Geomagic, Terrasolid (TerraScan; TerraModeler) + Microstation;

#### ***4.5 Technologia laserowego skaningu naziemnego (TLS) – scenariusze aplikacji***

Technologia TLS, pomimo najwyższego zaawansowania technologicznego, wciąż podlega pewnym ograniczeniom wynikającym ze specyfiki zastosowanych rozwiązań technicznych jak i warunków pracy skanera. Jest to technologia nowa i dynamicznie się rozwijająca, dlatego należy spodziewać się, że wiele problemów w pomiarach TLS zostanie wkrótce wyeliminowana dzięki udoskonalaniu sprzętu jak i opracowywaniu nowych metod analizy danych. Poniżej zestawiono grupy czynników ograniczających lub wręcz uniemożliwiających, na obecnym etapie rozwoju technologii, pracę ze skanerem TLS w warunkach drzewostanowych:

##### ***Ograniczenia abiotyczne***

- należy unikać pomiaru TLS w niekorzystnych warunkach atmosferycznych (deszcz, śnieg, mgła, zadymienie) ze względu na możliwość powstania uszkodzeń samego urządzenia (zasilania elektrycznego, przepięcia, wniknięcie wody do urządzenia);
- nie można uzyskać poprawnych wyników skanowania podczas opadów deszczu (pochłanianie zakresu NIR przez wodę) lub występowania zamglenia;
- w warunkach niewielkiego opadu śniegu zauważalne jest zakłócenie pomiaru poprzez pojawianie się tzw. *air points* (rejestracja na płatkach śniegu);
- warstwa śniegu, która może zalegać na pniach drzew (szczególnie iglastych – wpływ szorstkości kory) powoduje liczne błędy odczytu wartości pomiarowych zarówno w trybie manualnym jak i automatycznym (wykazano w testach prowadzonych przez AR Kraków);
- niska temperatura otoczenia wpływa negatywnie na sprawność ogniw baterii;

- producent ogranicza poprawność mechanicznego funkcjonowania urządzenia do warunków temperaturowych powyżej 0° C;
- wysoka pokrywa śnieżna, wilgotna ściółka, niebezpieczne skalne podłoże etc. utrudnia oraz stwarza ryzyko uszkodzenia sprzętu podczas jego przemieszczania pomiędzy stanowiskami pomiarowymi;
- wiatr powodujący ruchy koron drzew i podszytu jest przyczyną pojawienia się błędów pomiarowych (*ghost points*);
- skanowanie nocą, choć teoretycznie zalecane, ze względu na niebezpieczeństwo uszkodzenia sprzętu w drzewostanie powinno być minimalizowane do „bezpiecznych drzewostanów” (np. bez podszytu z dobrym dojściem na powierzchnię).

#### ***Ograniczenia biotyczne (drzewostanowe)***

- niefortunnie usytuowany środek powierzchni kołowej (tuż przy pniu drzewa) powoduje niemożliwość przeprowadzenia skanowania ze środkowej powierzchni;
- w przypadku drzewostanów młodszych klas wieku o dużym zagęszczeniu, skanowanie TLS może być wręcz niemożliwe do przeprowadzenia ze względu na więźbę drzewek i trudności z wniesieniem i ustawieniem skanera;
- identyfikacja poszczególnych drzew oraz pomiary parametrów drzew w młodszych klasach wieku są niezmiernie utrudnione lub wręcz niemożliwe do przeprowadzenia w przypadku drzewostanów gospodarczych, kiedy regularna więźba – powoduje przesłanianie się wzajemne drzew;
- w starszych drzewostanach pochodzących ze schematycznych nasadzeń (regularna więźba) źle ulokowany środek powierzchni może przyczynić się do wzajemnego przesłaniania się drzew;
- długie i gęste korony drzew (np. świerka) mogą skutecznie uniemożliwić penetrację wiązki lasera do kory pnia drzewa, a tym samym spowodować niemożność określenia średnicy pnia;
- w drzewostanach starszych klas wieku występujący podszyt/dolne piętro może skutecznie uniemożliwić precyzyjny pomiar wartości pierśnicy;
- pomiary w drzewostanach liściastych w okresie wegetacji nie zapewniają uzyskania poprawnych wyników takich cech jak wysokość drzewa;

- mokre pnie drzew (np. buka) lub występowanie porostów na korze powoduje powstawanie znacznych różnic w intensywności sygnału rejestrowanego a w ekstremalnych warunkach brak odbicia;
- wysoka roślinność runa leśnego (paprocie, trawy, krzewy borówki) może powodować ograniczenia w skaningu podstawy drzewa a tym samym poprawnego wskazania innych pochodnych cech (np. pierśnicy czy średnicy na 5,0 m itp.);
- występowanie wysokiego i gęstego podszytu może często szczególnie w okresie wegetacji skutecznie uniemożliwić przeprowadzenie skaningu;
- duże wartości spadku terenu powodują określone trudności w transporcie, poprawnym usytuowaniu poszczególnych stanowisk skanera jak i poziomowaniu urządzenia.

### ***Scenariusze przygotowania prac pomiarowych TLS***

Przed przeprowadzeniem skaningu naziemnego:

- Skaner FARO używany w kampanii terenowej codziennie powinien zostać poddany przeglądowi pod kątem zapełnienia przestrzeni dyskowych, komunikacji z serwerem wewnętrznym oraz powinien zostać odpowiednio skonfigurowany do pracy (data, katalogi, nazwy plików, rozdzielczość skanowania, etc.);
- Drużyna pomiarowa TLS musi posiadać odpowiedni samochód terenowy, charakteryzujący się dużymi wymiarami przedziału transportowego, umożliwiający przewożenie skanera w oryginalnych opakowaniach zabezpieczających (standardowo kufer Peli Case), waga samego skanera około 15 kg + akcesoria, uchwyty, aparat cyfrowy, baterie etc).
- Dla sprawnej nawigacji umożliwiającej logistykę sprzętu oraz przemieszczanie się personelu powinno się posiadać poprawne współrzędne „X/Y” (ewentualnie „Z” w warunkach górskich) powierzchni kołowych oraz innych danych (np. wektora LMN). W takiej sytuacji należy stosować odbiornik GPS w celu ułatwienia odszukania drogi do miejsca pomiaru;
- W przypadku dokonywania pomiarów różnicowych dGPS należy upewnić się czy najbliższa wykorzystywana stacja referencyjna pracuje poprawnie (poprzez Internet/ GPRS lub telefonicznie);

- Personel drużyny pomiarowej musi zostać przeszkolony z obsługi urządzenia FARO LS 880, urządzeń peryferyjnych (ładowarki, aparat cyfrowy, PC, oprogramowanie FARO Scene) oraz zasad bezpieczeństwa pracy (klasa bezpieczeństwa lasera, używanie okularów ochronnych);
- Zestaw pomiarowy powinien zawierać 2 zestawy sprawnych i naładowanych akumulatorów oraz ładowarkę umożliwiającą pracę z gniazda zapalniczki w samochodzie terenowym; *Uwaga: W przypadku prac w terenie trudnym bez możliwości codziennego ładowania akumulatorów skanera należy rozważyć zakup agregatora prądu 220V.*
- Zespoły musi posiadać narzędzia typu: tasak, toporek do usuwania gałęzi lub podszytu bezpośrednio utrudniającego pracę skanera przy stanowisku pomiarowym;
- Należy przygotować zabezpieczenie urządzenia od opadów atmosferycznych (np. odpowiednio duży parasol, który przy niewielkich i szybko zanikających opadach może umożliwić większą oszczędność czasu niż likwidowanie stanowiska (rozmontowywanie skanera));
- Jako termin prowadzenia standardowej (pomiaru podstawowych cech taksacyjnych drzew: DBH, H, L, pozycja drzewa) kampanii TLS proponuje się wczesną wiosnę tj. okres marca/kwietnia (być może bezśnieżny luty), kiedy w drzewostanie nie występuje już pokrywa śnieżna a wegetacja znajduje się jeszcze w stanie spoczynku (brak liści w koronach i podszycie ważny szczególnie w drzewostanach liściastych).
- Dla oszczędności czasu w pobliżu (samochód, lesniczówka) powinien znajdować się notebook z zainstalowanym oprogramowaniem FARO Scene do komunikacji i rekonfiguracji urządzenia.
- W najnowszych wersjach FARO LS 880 komunikacją z komputerem jest już możliwa przy wykorzystaniu Wi/Fi i urządzeń typu PDA. Problemem jednak wciąż są zdjęcia cyfrowe pozyskiwane kamera NIKON (opcja color scan) ze względu na ich ilość i wielkość zbiorów.

Na powierzchni obserwacyjnej (kołowej, monitoringowej):

- W celu ułatwienia późniejszych prac przestrzennego pasowania chmur punktów (wyszukanie i numerację odpowiednich sfer na obrazach planarnych) należy przygotować odpowiednie numeratory dla każdej sfery referencyjnej (kuli), które będą

widoczne z wielu kierunków. Nadruki numeracji muszą być odporne na niekorzystne warunki atmosferyczne (zafoliowane).

- W przypadku wykonywania standardowego skaningu powierzchni kołowej czy obserwacyjnej nie ma potrzeby wywieszania numeratorów identyfikujących same powierzchnie czy też poszczególne drzewa (etykiety na pniach). Ma to duży sens tylko w pracach naukowych i prowadzeniu testów na drzewach referencyjnych.
- Zaleca się dokonanie wstępnej lokalizacji poszczególnych stanowisk pomiarowych skanera przy zastosowaniu palików/ tyczek w jaskrawych kolorach przy jednoczesnym interaktywnym rozmieszczaniu sfer referencyjnych. Zabieg ten pozwala szczególnie w pierwszym okresie wdrażania się w metodę TLS osiągnąć najlepsze wyniki (orientacji chmur punktów), ale wymaga jednak minimum 2-3 osób pracujących na powierzchni;
- W warunkach skaningu TLS w drzewostanie zaleca się mocowanie sfer zaopatrzonych w magnesy na specjalnych platformach zintegrowanych z tyczkami geodezyjnymi (wykładanie sfer bezpośrednio na ziemi nie przynosi dobrych rezultatów i może spowodować zabrudzenie lub wręcz uszkodzenie sfery);
- Wysokość tyczek przeznaczonych do mocowania sfer ze względu na występujący podszyt oraz liczne gałęzie drzew musi być możliwa do regulacji.
- Sfery powinny być rozmieszczone na różnych wysokościach, co korzystnie wpływa na późniejsze łączenie chmur punktów z pojedynczych skanów;
- Proponuje się zaznaczać na pniach drzew miejsca pomiaru pierśnicy (na wysokości 1.30 m od podstawy) w postaci kropki farby lub paska. Czynność ta jest jednak czasochłonna ale na etapie opracowywania danych w oprogramowaniu FARO Scene, może przynieść wymierne korzyści. W określonych przypadkach może się to nawet okazać konieczne np. w sytuacji przesłaniania podstawy drzewa przez roślinność, inne pnie, skały, pniaki, zagłębienie terenowe etc. Wtedy nie można precyzyjnie określić (szczególnie tereny górskie lub inne charakteryzujące się spadkiem terenu) wysokości 130 cm na pniu w celu dokonania pomiaru w obrazie planarnym.
- Praca ze skanerem TLS FARO LS możliwa jest w systemie zmianowym tzn zarówno w dzień jak i w nocy, co może przyczynić się do osiągnięcia korzystniejszych współczynników ekonomicznych.

- Pomiar w godzinach nocnych lub w warunkach braku bezpośredniego oświetlenia słonecznego (po zmroku) jest niewątpliwie najdogodniejszy dla uzyskania bardziej poprawnych skanów, ale praca w takich warunkach stwarza poważne trudności logistyczne i realne zagrożenie uszkodzenia skanera przy jego transporcie na powierzchni.

### *Liczba stanowisk skanera*

- Liczba stanowisk skanera zależy przede wszystkim od celu wykonywania obrazowania skanerem. W scenariuszu wykonywania skaningu TLS w drzewostanach gospodarczych w metodyce zbliżonej do standardowej inwentaryzacji – skanowanie ze środka powierzchni kołowej pozycji może okazać się wystarczające. Liczyć się jednak należy z wystąpieniem braku niektórych drzew przesłanianych przez inne lub podszyt.
- Ekipa dokonująca prac TLS musi zachować kompromis pomiędzy dążeniem do bardzo szczegółowego obrazowania skanerem (wysoka rozdzielczość = czas + wielkość zbiorów) z wielu pozycji a praktycznym podejściem do wdrożenia technologii TLS w urządzaniu lasu.
- Przeprowadzanie laserowego skaningu naziemnego TLS z 3 stanowisk rozmieszczonych wokół powierzchni kołowej, może również być niewystarczające do określenia z dużą dokładnością parametrów wszystkich drzew – stąd decyzję o liczbie skanów należy podjąć na miejscu w drzewostanie;
- Skaniny przeprowadzany jedynie ze stanowisk zewnętrznych (nawet powyżej 3-4 stanowisk) uniemożliwia jednoznaczną identyfikację drzew referencyjnych, których cechy zostały pozyskane w tradycyjny sposób;
- Skanowanie ze środka powierzchni kołowej zalecane jest w przypadku prowadzenia badań naukowych, testów urządzenia lub prac monitoringowych, w których wymagana jest poprawna lokalizacja drzew (nadawanie im konkretnych numerów, porównania do referencji, istniejących szkiców i map);
- W przypadku prowadzenia szacunków brakarskich skanowanie większych powierzchni np. całych fragmentów drzewostanów przed ich bezpośrednim usunięciem jest jak najbardziej zalecane. W tym celu potrzebne są jednak dodatkowe zestawy sfer referencyjnych;

- Skanowanie FARO LS 880 w rozdzielczości tzw. 1/4 zabezpiecza w pełni uzyskanie poprawnych wyników na powierzchniach kołowych o promieniu do około 13-17 metrów przy użyciu 5 sfer referencyjnych. Ta sama stosunkowo niewielka rozdzielczość (1/4) pozwala na zaoszczędzenie czasu pomiaru o około kilkadziesiąt minut na każdym stanowisku skanera. Łącznie można więc zaoszczędzić przy 4 stanowiskach nawet około 120 minut.
- W trakcie skanowania nie zbliżać się na odległość nie mniejszą niż 3 metry (laser klasy 3R)
- Nie przemieszczać się po powierzchni w trakcie skanowania z poszczególnych powierzchni
- Należy wykorzystywać czas skanowania (jedna pozycja około 7 minut) do pomiaru dGPS wcześniejszych pozycji i wykonywania dokumentacji fotograficznej (jeśli nie wykonywana jest opcja color scan);
- Opcja dodatkowego wykonywania zdjęć cyfrowych (color scan) znacznie podnosi czasochłonność prac.

#### ***4.6 Zalecenia praktyczne dla stosowania skanera FARO LS 880***

- Pora roku prowadzenia prac terenowych TLS. Stwierdzono bardzo negatywny wpływ liści pozostających w koronach drzew na jakość skaningu (powstawanie ghost points; 76 metrów – przesunięcie fazy) i przenikanie promienia lasera do wierzchołkowych fragmentów korony. W celu negatywnego ograniczenia tego zjawiska konieczność wykonywania skaningu w okresie całkowitego braku liści, tj. początkiem wiosny lub końcem zimy;
- Negatywny wpływ podszytu - w drzewostanach z gęstym podszytem wskazane jest skanowanie na głowicy urządzenia wysuniętej ponad górne fragmenty koron podszytu. Należy korzystać z oryginalnego statywu umożliwiającego dodatkowe wysunięcie (podniesienie ) głowicy przy zapewnieniu stabilności. Ograniczeniem jest waga statywu;
- Skaningu TLS w drzewostanach młodszych klas wieku – skanowanie możliwe ze stabilnej platformy wyniesionej ma kilka metrów lub z boku wydzielenia (doga, wizura);

- W sytuacji prowadzenia podstawowych prac inwentaryzacyjnych skanowanie ze środkowego stanowiska w drzewostanach starszych klas wieku powinien być wystarczający przy założeniu dopuszczalnych „strat” wynikających z przesłaniania się drzew (należy rozważyć możliwość powiększenia powierzchni opracowania lub zmianę jej kształtu).
- W przypadku porównywania pomiarów TLS do danych referencyjnych uzyskanych w tradycyjny sposób wskazana jest numeracja pni poprzez zastosowanie wywieszek na drzewach (wielkość cyfr min 10 cm);
- W sytuacjach występowania podszytu lub skanowania na duże odległości (max. 76m) należy rozważyć możliwość wykorzystania odpowiednich folii odbłaskowych. Trzeba jednak sobie zdawać sprawę, iż taki materiał o silnych właściwościach odbijania światła może spowodować „przeświecenie” obszaru pomiaru pierśnicy na obrazie planarnym;
- Nie należy przenosić włączonego skanera ze względów bezpieczeństwa uruchomienia emitora w ruchu oraz uszkodzenia dysku HDD i samego urządzenia. Na każdym stanowisku skanowania należy bezpiecznie wyłączyć system operacyjny Windows i przestrzegać zasad bezpieczeństwa (class 3R)
- Transport urządzenia - ze względu na wagę skanera i osprzętu, urządzenie przenosić należy w skrzyni zabezpieczającej nawet na niewielkich dystansach. Jeżeli istnieje opcja mobilna (plecak) można ją zastosować na niedużych odległościach;
- Dane – po każdym zakończonym dniu pracy należy zgrać dane ze skanera FARO i zarchiwizować w postaci 2 kopii w formacie FARO;
- Archiwizacja danych – notebook lub PC z kartą sieciową (komunikacja z serwerem FARO). Wymagane dyski zewnętrzne (np. USB);
- Bezpieczeństwo:
  - zachować przepisową odległość ze względu na klasę bezpieczeństwa skanera
  - stosować okulary z filtrem NIR przy pracy na bliskim dystansie;
  - nie przemieszczać się po powierzchni kołowej w czasie pracy urządzenia;

- kule referencyjne należy dotykać jedynie w rękawiczkach ochronnych i niezmiernie uważać na delikatną ich powierzchnię.
  - chronić skaner przed uszkodzeniami w terenie oraz w samochodzie
  - stosować oryginalne opakowania transportowe
  - zapewnić dozór urządzenia
- ubezpieczyć skaner oraz oprzyrządowanie. Akumulatory - należy pamiętać o regularnym ładowaniu 2 kompletów baterii do skanera FARO ;
- Dbłość o skaner - niezmiernie uważnie należy traktować FARO LS i nigdy nie wycierać lustra! (czynność serwisowa);
- Skaner powinien być regularnie certyfikowany (kalibrowany).

#### ***4.7 Zalecenia i wnioski końcowe***

- Prace realizowane w ramach projektu nad TLS potwierdziły wysoką precyzję urządzenia i jego szerokie zastosowanie w pracach z zakresu inwentaryzacji lasu;
- W przypadku wykorzystywania technologii TLS korzystniejsze wydaje się być zakładanie nowych sieci pomiarowych (np. stałych powierzchni obserwacyjnych) a nie wykorzystywanie już istniejących. Powierzchnie obserwacyjne należy zakładać w taki sposób, aby:
  - środek powierzchni (a tym samym centralna pozycja skanera) nie był położony zbyt blisko pni najbliższych drzew, ze względu na ich negatywny wpływ na „ocienianie” przestrzeni;
  - pomiar dGPS pozycji skanera prowadzi bezpośrednio po wykonaniu skaningu (minimum 240-300 epok pomiarowych; maska 10 stopni, min 4 satelity, PDOP <9, stacja referencyjna do 75 km);
  - miejsca opróbowania były wybierane przy wykorzystaniu istniejących danych np. zdjęć lotniczych czy też ALS;
- Metodykę prac TLS należy modyfikować dla poszczególnych typów drzewostanów (np. gospodarczych; lasów naturalnych czy rezerwatu), klas wieku i zwarcia drzewostanów:

- w drzewostanach młodszych skanowanie należy prowadzić „na klasycznej wysokości głowicy” a w przypadku upraw do około 1,0 metra wysokości przy możliwie wysoko wysuniętym statywie;
- w zwartych młodnikach, tyczkowie czy w sytuacjach zaniedbanych drzewostanów (brak czyszczeń i trzebieży) przeprowadzenie skaningu naziemnego (TLS) może okazać się niemożliwie do przeprowadzenia i całkowicie bezzasadne;
- w starszych klasach wieku skanować „z klasycznej wysokości” zwracając baczna uwagę na podszyt i roślinność zielną, które mogą znacznie utrudniać pomiary i wpływać negatywnie na jakość generowanego NMT czy klasyfikację;
- Należy optymalizować wielkość powierzchni urządzeniowej w zależności od klasy wieku tzn. tak dobierać pozycję (liczbie i rozmieszczenia), aby było ich jak najmniej a z drugiej strony maksymalnie wykorzystywać chmurę punktów (maksymalizacja – lepsze statystyczne reprezentacja);
- Należy prowadzić testy nad optymalizacją liczby oraz lokalizacji stanowisk skanera tj. dążyć do ograniczenia ilości stanowisk i skrócenia czasu skanowania ustalając kompromis pomiędzy jakością i automatyzacją prac i osiąganą wartością błędu;
- Wciąż istnieje konieczność opracowania algorytmu filtracji chmury punktów w zależności od typu i struktury drzewostanu oraz gęstości skanowania;
- Należy zintensyfikować prace nad rozwojem oprogramowania służącego do automatycznego określania wybranych parametrów TLS (np. liczby drzew, wartości pierśnicy, wysokości drzewa, długości pnia do określonych średnic etc).
- Wdrożenie TLS na większą skalę w pracach z zakresu inwentaryzacji i urządzania lasu, wymusi niebawem od użytkownika konieczność stosowania rozwiązań pół- lub w pełni automatycznych do określania wybranych elementów taksacyjnych ze względu na kosztocłonność przetwarzania danych metodami manualnymi;
- Zmiany na rynku pracy oraz rozwój technologii a przez to jej upowszechnienie spowodują w niedalekiej przyszłości, iż tego typu rozwiązania zostaną zaimplementowane w procesie inwentaryzacji czy wykonywania prac brakarskich lub nawet prac towarzyszących zrębom (ocena objętości kłód, mygł)

- Wydaje się, iż szybki rozwój technologii TLS może być przesłanką do uwzględnienia jej podczas opracowywania nowej IUL.
- Osobną kwestię stanowi zagadnienie wzorców i danych referencyjnych służących utrzymywaniu standardów pomiarowych. Nie należy metody TLS porównywać wprost z tradycyjnymi pracami inwentaryzacyjnymi ze względu na różne poziomy dokładności i bogactwo informacji zapisane dzięki TLS, której jeszcze przez długi czas nie będziemy w stanie do końca wykorzystać. W aspekcie integracji wielu źródeł danych TLS, ALS, zdjęcia lotnicze etc, nowe podejście do opisywania drzewostanów metodami TLS może całkowicie zmienić dotychczasowe standardy stosowane w polskim leśnictwie.

## 5. Automatyczne określanie cech drzewostanów za pomocą naziemnego skanowania laserowego

### 5.1 Wstęp

Współczesna gospodarka leśna wymaga wykorzystania dokładnej i aktualnej informacji o lesie, szczególnie o cechach i strukturze poszczególnych drzewostanów. Stąd jednym z najważniejszych zadań dendrometrii i geomatyki jest opracowywanie coraz lepszych metod pomiaru lasu.

W ostatnich latach znacząco rozwinęły się nowoczesne technologie służące do automatycznego wykonywania precyzyjnych pomiarów wykorzystywanych do wspomagania procesu projektowania, prototypowania i produkcji elementów maszyn i urządzeń. Jednym z kierunków rozwoju tych metod pomiarowych stało się wykorzystanie wiązki laserowej, co w efekcie doprowadziło do powstania technologii o nazwie LIDAR (ang. **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging). Urządzenia pomiarowe wykorzystujące LIDAR-owej są dziś używane nie tylko w przemyśle, ale również w architekturze, archeologii, a nawet branży rozrywkowej.

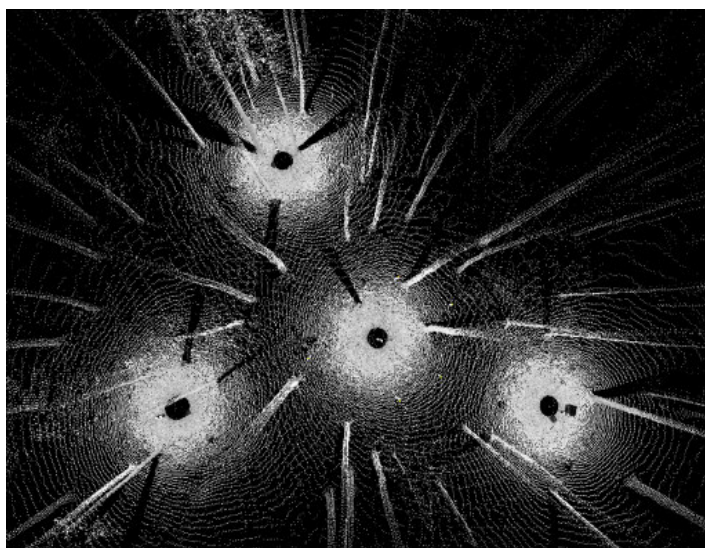
Warunkiem wprowadzenia naziemnej technologii LIDAR do praktyki jest istnienie oprogramowania służącego do automatycznego wykonywania pomiarów (Wężyk i in. 2007). Jednym z niewielu, jeżeli nie jedynym tego typu programem dla zastosowań leśnych, jest *Autostem* wyprodukowany przez irlandzką firmę *Treemetrics*. Program ten, będący elementem systemu wspomagania decyzji, służy do określania miąższości i optymalizacji udziału różnego rodzaju sortymentów na podstawie pomiarów drzew stojących w drzewostanie. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki automatycznego określania niektórych cech drzew i drzewostanów na podstawie danych z naziemnego skanowania laserowego, będące częścią wspomnianego tematu badawczego.

### 5.2 Metodyka i materiał badawczy

Typowe zastosowanie systemu *Autostem* zakłada użycie danych pozyskanych za pomocą LIDAR-a ustawionego w środku powierzchni próbnej o promieniu do około 30 metrów, zależnym od zagęszczenia drzew w drzewostanie. Oprogramowanie zostało opracowane dla gatunków iglastych, szczególnie świerka. Prace nad możliwością dokładnego określania cech w drzewostanach innych gatunków, w tym gatunków liściastych, nadal

trwają. Dane pochodzące ze skanera są przetwarzane przez program, który dostarcza informacji o cechach wszystkich zidentyfikowanych drzew na powierzchni próbnej. Cechami tymi są: położenie drzewa, pierśnica, wysokość oraz miąższość strzały i jej części (<http://www.treemetrics.com>). Algorytmy służące do przetwarzania danych zostały opracowane przy współpracy z Uniwersytetem we Freiburgu (np. Aschoff i Spiecker 2004).

W ramach pracy zleconej przez DGLP, na powierzchniach próbnych założonych na terenie nadleśnictwa Milicz, wykonano pomiary referencyjne, a następnie wykonano skanowanie laserowe z czterech pozycji (środek powierzchni próbnej i 3 pozycje w formie trójkąta otaczającego środek powierzchni – patrz ryc. II.8).



**Ryc. II.8. Widok powierzchni próbnej utworzony w wyniku wizualizacji chmury punktów zarejestrowanej z 4 pozycji skanera.**

Chmury punktów zebrane za pomocą skanera wczytywano (po wstępnym opracowaniu) do programu Autostem, gdzie wyseparowane zostały poszczególne drzewa, określona ich lokalizacja na powierzchni, pierśnica i wysokość, a także profile strzał. Miąższość strzał określana była wzorem sekcyjnym na podstawie pomiaru sekcji o długości 10 centymetrów, przy czym minimalna ilość punktów, dla której wpasowywany był łuk i określana średnica, wynosiła 10, a pozostałe, niewidoczne odcinki strzały były modelowane przez oprogramowanie. Autostem pozwala na modelowanie kształtu strzały zależnie od gatunku, z jakim mamy do czynienia (cztery grupy: gatunki liściaste, sosna, świerk i inne).

Wyniki przetwarzania chmur punktów zarejestrowanych na powierzchniach próbnych zapisano w postaci bazy danych i porównano z danymi referencyjnymi. Dla cech takich, jak liczba drzew na powierzchni próbnej, pierśnicowe pole przekroju drzewostanu na 1 ha, przeciętna pierśnica drzew na powierzchni próbnej oraz średnia wysokość drzew na powierzchni próbnej, określono błędy absolutne i procentowe wtórne (przyjmując dane pochodzące z pomiarów tradycyjnych jako referencję). Dla wszystkich analizowanych powierzchni określono zakres, średnią arytmetyczną i odchylenie standardowe błędów<sup>1</sup>. Wartość błędów analizowano w zależności od różnych cech drzewostanu mogących mieć wpływ na uzyskane wyniki.

Przeprowadzono również szczegółową analizę pomiarów dla poszczególnych drzew. Określono różnice w pomiarach takich cech, jak: azymut do drzewa, odległość drzewa od środka powierzchni próbnej oraz pierśnica, pierśnicowe pole przekroju i wysokość. Pomiarów porównano za pomocą analizy regresji, a istotność różnic między pomiarami zbadano za pomocą testu t dla prób zależnych.

Do analizy dokładności algorytmów oprogramowania wykorzystano dane pochodzące z 21 sosnowych powierzchni próbnych zlokalizowanych w Nadleśnictwie Milicz (będących podzbiorem 24 sosnowych powierzchni referencyjnych). Ponadto – w celu sprawdzenia funkcjonowania programu dla gatunków liściastych – podjęto próbę przetworzenia danych z 6 powierzchni z gatunkami liściastymi: dębem, bukiem i grabem. Szczegółową charakterystykę powierzchni próbnych przedstawiono w tabeli II.2.

Tabela II.2. Charakterystyka powierzchni próbnych

<b>Nr</b>	<b>Gat</b>	<b>Wiek</b>	<b>A</b>	<b>N</b>	<b>G</b>	<b>Dg</b>	<b>H<sub>sr</sub></b>
1	Db	142	0,05	820	68,8	326	21,78
2	Bk	87	0,04	525	44,9	330	30,31
3	Db	142	0,05	280	41,3	433	31,20
4	Bk	142	0,10	70	20,4	609	34,93
5	Bk	152	0,05	120	32,1	584	33,65
6	Gb	50	0,02	750	28,0	218	22,41
7	So	105	0,05	500	33,9	294	20,61

<sup>1</sup> W tym miejscu komentarza wymaga określenie „błąd”. W analizowanym przypadku przyjęto, że tradycyjne pomiary referencyjne są bezbłędne, co w stosunku do zastosowanej technologii, charakteryzującej się wysoką precyzją pomiarów, wydaje się być dyskusyjne. Dlatego w dalszej części pracy pojawiające się słowo „błąd” powinno być raczej rozumiane jako „różnica między pomiarami wykonanymi za pomocą LIDAR-a pomiarami tradycyjnymi”.

Nr	Gat	Wiek	A	N	G	D <sub>g</sub>	H <sub>sr</sub>
8	So	105	0,05	420	29,6	300	22,66
10	So	105	0,05	320	36,6	381	22,56
11	So	105	0,05	400	25,5	285	21,44
12	So	57	0,02	1200	42,9	213	19,65
13	So	77	0,03	667	32,6	249	20,01
14	So	67	0,03	933	35,8	221	19,18
15	So	67	0,03	700	27,7	225	20,39
16	So	67	0,03	700	28,6	228	19,78
17	So	80	0,03	433	20,5	246	19,42
18	So	33	0,01	2300	29,8	129	12,43
19	So	107	0,05	600	39,8	291	22,49
20	So	107	0,05	600	37,3	281	22,10
21	So	107	0,05	340	25,4	309	22,38
23	So	42	0,02	1900	32,4	147	14,00
24	So	52	0,05	460	13,3	192	17,20
25	So	97	0,04	600	28,9	248	23,01
27	So	97	0,04	500	33,1	291	24,34
28	So	97	0,04	550	34,7	283	23,46
29	So	97	0,04	625	39,7	284	22,34
30	So	107	0,05	360	28,6	318	20,32

Gdzie:

- Nr - numer powierzchni próbnej
- Gat - gatunek panujący
- Wiek - wiek drzewostanu na podstawie opisu taksacyjnego
- A - wielkość powierzchni próbnej [ha]
- N - liczba drzew na 1 ha
- G - pierśnicowe pole przekroju drzewostanu [m<sup>2</sup>/ha]
- D<sub>g</sub> - przeciętna pierśnica przekrojowa [mm]
- H<sub>sr</sub> - średnia wysokość [m]

Na każdej z analizowanych powierzchni próbnych ustalono lokalizację wszystkich drzew mierząc azymut i odległość do każdego drzewa. Pierśnice drzew mierzono średnicomierzem z zaokrągleniem do 1 mm, zaś wysokości drzew określono za pomocą

wysokościomierza Vertex z zaokrągleniem do 1 cm. Pomiary zapisano w postaci komputerowej bazy danych służącej do wykonywania dalszych analiz.

Ze środka każdej analizowanej powierzchni wykonano pomiary za pomocą skanera FARO LS880. Częstotliwość skanowania wynosiła 120 kHz, poziomy kąt skanowania - 360° a kąt pionowy - 320°. Uzyskaną w ten sposób chmurę punktów poddano wstępnemu przetwarzaniu (m.in. filtrowaniu mającemu na celu skorygowanie lub usunięcie błędnie zarejestrowanych punktów, polegającemu na analizie intensywności odbicia i sąsiedztwa poszczególnych punktów) za pomocą oprogramowania FARO Scene, dostarczanego przez producenta skanera. Uzyskano w ten sposób pliki danych o rozmiarach 60-90 MB każdy, które następnie przetwarzano za pomocą programu Autostem.

W ramach niniejszego opracowania przeanalizowano łącznie 431 drzew sosny z 21 powierzchni próbnych oraz 96 drzew gatunków liściastych z 6 powierzchni próbnych.

### **5.3 Wyniki**

Pierwsza seria wyników dotyczy cech całego drzewostanu. Analizowano różnice w liczbie drzew, pierśnicowym polu przekroju, przeciętnej pierśnicy i średniej wysokości. Druga seria wyników dotyczy pomiarów poszczególnych drzew. Analizowano różnice w lokalizacji drzew (azymut i odległość od środka powierzchni), pierśnicy, pierśnicowym polu przekroju i wysokości drzew.

#### ***Liczba drzew drzewostanu***

Liczbę zidentyfikowanych przez Autostem drzew na poszczególnych powierzchniach przedstawiono w tabeli II.3. W sumie automatycznie zostało zidentyfikowanych 90% wszystkich drzew na sosnowych powierzchniach próbnych. Największy ujemny błąd automatycznego określania liczby drzew (7 pominiętych drzew, co odpowiada błędowi procentowemu wtórnemu -35%) zaobserwowano na powierzchni 13, a największy błąd dodatni (3 nieistniejące drzewa zidentyfikowane na powierzchni, co odpowiada błędowi procentowemu wtórnemu +10%) na powierzchni 20. Średnio na każdej powierzchni próbnej pominięto 1 drzewo (0, 95), co odpowiada zaniżeniu liczby drzew (błędowi systematycznemu) o 4,12%. Odchylenie standardowe błędów wyniosło 2,3 drzewa (10,3%).

Drzewa nie zostały automatycznie rozpoznane na 16 z 21 powierzchni (76,2%), nieistniejące drzewa zostały dodane na 10 powierzchniach (47,6%), a dokładnie oszacowano

liczbę drzew na 3 powierzchniach (14,3%). Na 9 powierzchniach (42,9%) powstał wyłącznie błąd ujemny określania liczby drzew, a na 3 powierzchniach (14,3%) – wyłącznie błąd dodatni.

W przypadku powierzchni z gatunkami liściastymi, na 2 powierzchniach nie odnaleziono niektórych drzew, zaś na 1 znaleziono nieistniejące drzewo. Błędy określania liczby drzew dla gatunków liściastych są średnio nieco większe, niż w przypadku powierzchni sosnowych (błąd systematyczny określania liczby drzew równy -6,41%), jednak w tym przypadku – ze względu na ograniczoną liczebność próby oraz wpływ innych cech - nie można wnioskować o istotności różnic między gatunkami.

Tabela II.3. Wyniki określania liczby drzew i pierśnicowego pola przekroju drzewostanu dla sosny

Pow	Gat	Wiek	A	N <sub>ref</sub>	N <sub>auto</sub>	N <sub>diff</sub>	N <sub>diff%</sub>	N <sub>nie</sub>	N <sub>ponad</sub>	G <sub>ref</sub>	G <sub>auto</sub>	G <sub>diff%</sub>
7	So	105	0,05	25	26	1	4,0	0	1	33,92	32,65	-3,7
8	So	105	0,05	21	20	-1	-4,8	2	1	29,64	26,05	-12,1
10	So	105	0,05	16	15	-1	-6,3	1	0	36,55	23,12	-38,7
11	So	105	0,05	20	19	-1	-5,0	1	0	25,49	20,68	-18,9
12	So	57	0,02	24	20	-4	-16,7	7	3	42,88	39,29	-8,4
13	So	77	0,03	20	13	-7	-35,0	7	0	32,59	21,80	-33,1
14	So	67	0,03	28	24	-4	-14,3	5	1	35,79	27,73	-22,5
15	So	67	0,03	21	22	1	4,8	0	1	27,71	26,86	-3,1
16	So	67	0,03	21	18	-3	-14,3	3	0	28,58	25,35	-11,3
17	So	80	0,03	13	13	0	0,0	0	0	20,52	19,87	-3,2
18	So	33	0,01	23	23	0	0,0	0	0	29,85	29,34	-1,7
19	So	107	0,05	30	29	-1	-3,3	1	0	39,82	35,21	-11,6
20	So	107	0,05	30	33	3	10,0	2	5	37,27	35,75	-4,1
21	So	107	0,05	17	18	1	5,9	1	2	25,45	24,27	-4,6
23	So	42	0,02	38	35	-3	-7,9	3	0	32,35	26,65	-17,6
24	So	52	0,05	23	21	-2	-8,7	2	0	13,31	11,96	-10,2
25	So	97	0,04	24	24	0	0,0	4	0	28,91	23,13	-20,0
27	So	97	0,04	20	22	2	10,0	0	2	33,14	36,34	9,7
28	So	97	0,04	22	23	1	4,6	1	2	34,66	32,17	-7,2
29	So	97	0,04	25	24	-1	-4,0	1	2	39,69	31,69	-20,2
30	So	107	0,05	18	17	-1	-5,6	6	5	28,59	26,42	-7,6

Gdzie:

- $N_{ref}$  - liczba drzew na powierzchni próbnej  
 $N_{auto}$  - liczba drzew określona automatycznie [drzew/pow.prb.]  
 $N_{diff}$  - różnica między określoną automatycznie a rzeczywistą liczbą drzew  
 $N_{diff\%}$  - różnica procentowa między określoną automatycznie a rzeczywistą liczbą drzew  
 $N_{nie}$  - liczba drzew nie zidentyfikowanych przez oprogramowanie  
 $N_{ponad}$  - liczba nie istniejących drzew zidentyfikowanych automatycznie  
 $G_{ref}$  - referencyjne pierśnicowe pole przekroju drzewostanu [ $m^2/ha$ ]  
 $G_{auto}$  - pierśnicowe pole przekroju drzewostanu określone automatycznie [ $m^2/ha$ ]  
 $G_{diff\%}$  - błąd procentowy wtórny określania pierśnicowego pola przekroju drzewostanu

Inne oznaczenia zostały zdefiniowane w tabeli II.2.

### ***Pierśnicowe pole przekroju drzewostanu***

Wyniki automatycznego określania pierśnicowego pola przekroju drzewostanu przedstawiono w tabeli II.3. Największy błąd ujemny (-36,74%) zanotowano na powierzchni 10, a największy błąd dodatni (+9,65%) na powierzchni 27. Średnia arytmetyczna błędów procentowych wtórnych (błąd systematyczny) wyniosła -11,8% przy odchyleniu standardowym 10,8%. Dla drzewostanów gatunków liściastych wtórne błędy procentowe pierśnicowego pola przekroju na 1 ha wyniosły od -18,8% (pow. 4) do 15,99% (pow. 6), co przekłada się na błąd systematyczny równy -11,8%.

### ***Przeciętna pierśnica drzewostanu***

Przeciętną pierśnicę określono na podstawie pierśnicowego pola przekroju drzewostanu i liczby zidentyfikowanych drzew. Porównanie przeciętnej pierśnicy z wartościami referencyjnymi dla poszczególnych powierzchni przedstawiono w tabeli II.4. Największe zaniżenie przeciętnej pierśnicy (-67 mm, tj. -17,59%) zaobserwowano na powierzchni 10. Największy błąd dodatni (+11 mm, tj. 5,16%) stwierdzono na powierzchni 12. Średnio przeciętna pierśnica była zaniżana o blisko 11 mm (-3,7%) przy odchyleniu standardowym wyników równym 15,7 mm (4,6%). Dla powierzchni gatunków liściastych uzyskano rezultaty lepsze o mniej więcej połowę (5 mm / 2%).

Tabela II.4. Porównanie przeciętnej pierśnicy i średniej wysokości drzew określonych na podstawie LIDAR-a z danymi referencyjnymi

Pow	Gat	Wiek	A	Dg <sub>ref</sub>	Dg <sub>auto</sub>	Dg <sub>diff</sub>	Dg <sub>diff%</sub>	H <sub>ref</sub>	H <sub>auto</sub>	H <sub>diff</sub>	H <sub>diff%</sub>
7	So	105	0,05	294	283	-11	-3,74	20,61	22,80	2,19	10,63
8	So	105	0,05	300	288	-12	-4,00	22,66	25,27	2,61	11,52
10	So	105	0,05	381	314	-67	-17,59	22,56	24,91	2,35	10,42
11	So	105	0,05	285	263	-22	-7,72	21,44	24,47	3,03	14,13
12	So	57	0,02	213	224	11	5,16	19,65	21,80	2,15	10,94
13	So	77	0,03	249	253	4	1,61	20,01	18,90	-1,11	-5,55
14	So	67	0,03	221	210	-11	-4,98	19,18	22,57	3,39	17,67
15	So	67	0,03	225	216	-9	-4,00	20,39	21,48	1,09	5,35
16	So	67	0,03	228	232	4	1,75	19,78	24,11	4,33	21,89
17	So	80	0,03	246	242	-4	-1,63	19,42	22,81	3,39	17,46
18	So	33	0,01	129	127	-2	-1,55	12,43	14,09	1,66	13,35
19	So	107	0,05	291	278	-13	-4,47	22,49	25,20	2,71	12,05
20	So	107	0,05	281	263	-18	-6,41	22,10	23,73	1,63	7,38
21	So	107	0,05	309	293	-16	-5,18	22,38	23,48	1,10	4,92
23	So	42	0,02	147	139	-8	-5,44	14,00	16,02	2,02	14,43
24	So	52	0,05	192	190	-2	-1,04	17,20	21,57	4,37	25,41
25	So	97	0,04	248	243	-5	-2,02	23,01	19,67	-3,34	-14,52
27	So	97	0,04	291	290	-1	-0,34	24,34	23,95	-0,39	-1,60
28	So	97	0,04	283	267	-16	-5,65	23,46	25,15	1,69	7,20
29	So	97	0,04	284	259	-25	-8,80	22,34	25,86	3,52	15,76
30	So	107	0,05	318	315	-3	-0,94	20,32	22,82	2,50	12,30

Gdzie:

- Dg<sub>ref</sub> - przeciętna pierśnica na podstawie pomiarów tradycyjnych [mm]
- Dg<sub>auto</sub> - przeciętna pierśnica na podstawie pomiarów LIDAR-em [mm]
- Dg<sub>diff</sub> - błąd absolutny przeciętnej pierśnicy [mm]
- Dg<sub>diff%</sub> - błąd procentowy wtórny przeciętnej pierśnicy [%]
- H<sub>ref</sub> - średnia wysokość na podstawie pomiarów tradycyjnych [m]
- H<sub>auto</sub> - średnia wysokość na podstawie pomiarów LIDAR-em [m]
- H<sub>diff</sub> - błąd absolutny średniej wysokości [m]
- H<sub>diff%</sub> - błąd procentowy wtórny średniej wysokości [%]

### *Średnia wysokość drzewostanu*

W przedstawionych badaniach wysokość drzewostanu scharakteryzowano za pomocą wartości średniej. Wyniki porównania wartości średniej wysokości drzewostanu z danymi

referencyjnymi przedstawiono w tabeli II.4. Wartości średniej wysokości uzyskane za pomocą skanowania naziemnego na badanych powierzchniach sosnowych charakteryzują się systematycznym błędem dodatnim 1,95 m, co odpowiada 10,05% przy odchyleniu standardowym równym 1,8 m (9,02%). Największy błąd ujemny (-3,34 m, -14,52%) zanotowano na powierzchni 25, zaś największy dodatni (4,37 m, 25,41%) na powierzchni 24.

#### ***Azymut ze środka powierzchni do drzewa***

Istotność różnic między azymutem ze środka powierzchni próbnej do drzewa sprawdzono za pomocą testu t dla par związanych (test t dla prób zależnych), który bada hipotezę zerową o zerowej średniej różnicy pomiarów. Średnia odchyłka azymutu wyniosła 4,85 stopnia i okazała się istotnie większa od zera (prawdopodobieństwo testowe p bliskie 0,03455).

#### ***Odległość drzewa od środka powierzchni***

Średnia różnica odległości ze środka powierzchni do drzewa między pomiarem automatycznym a referencyjnym wyniosła -2 cm. Zastosowany test t dla prób zależnych wykazał, że jest to wartość nieistotnie różna od zera ( $p=0,282$ ).

#### ***Pierśnica drzew***

Średnia różnic między pierśnicami drzew określonymi automatycznie i w sposób tradycyjny wyniosła -23 mm. Jest to wartość istotnie różna od zera ( $p=0,0000$ ).

#### ***Pierśnicowe pole przekroju drzew***

Średnia różnic między pierśnicowym polem przekroju drzew określonym automatycznie i w sposób tradycyjny wyniosła  $-0,0055 \text{ m}^2$ . Jest to wartość istotnie różna od zera ( $p=0,0000$ ).

#### ***Wysokość drzew***

Średnia różnic między wysokościami drzew określonymi automatycznie i w sposób tradycyjny wyniosła 2,16 m. Jest to wartość istotnie różna od zera ( $p=0,0000$ ).

### **5.4 Dyskusja**

Największy błąd określania różnych cech drzewostanu wynika z faktu, że analiza pojedynczej chmury punktów (zbieranej za pomocą skanera zlokalizowanego w środku powierzchni) nie pozwala na zidentyfikowanie wszystkich drzew. Spowodowane jest to

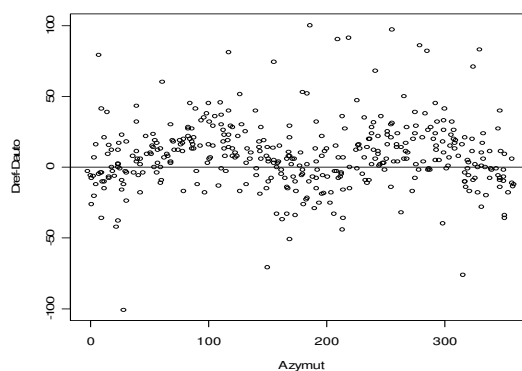
wzajemnym zasłanianiem się drzew (ryc. II.8). Efekt ten uzależniony jest przede wszystkim od zagęszczenia drzew w drzewostanie oraz wielkości powierzchni próbnej. Jednak przeprowadzona analiza zależności między liczbą pominiętych drzew, a tymi cechami nie wykazała istnienia istotnej zależności. Wydaje się, że znacznie większe znaczenie mają warunki skanowania na powierzchni, np. istnienie drugiego piętra, bujnej roślinności runa itp. Rozwiązaniem tego problemu może być – opisywane przez niektórych autorów (np. Bienert i in 2006b, Thies i Spiecker 2004, Henning i Radtke 2006) - wykonywanie rejestracji chmury punktów z kilku miejsc na jednej powierzchni (ryc. II.8). Powoduje to jednak zwiększenie pracochłonności pomiarów terenowych. Ponadto skanowanie w drzewostanach charakteryzujących się obecnością drugiego piętra, podszytu, podrostu czy bujnego runa powinno być wykonywane poza okresem wegetacji. Te dwa ograniczenia stawiają pod znakiem zapytania zastosowanie technologii w praktyce.

Znajdowanie większej liczby drzew, niż rzeczywiście istnieje w drzewostanie, nie zależy od liczby drzew ani od wielkości powierzchni próbnej (współczynniki korelacji nieistotnie różne od zera), a spowodowane jest istnieniem dużej liczby przypadkowych, fałszywych odbić od innych obiektów, niż pnie drzew (gałęzie, liście, podszyt, II piętro, itp.). Wydaje się, że kluczowe jest tu odpowiednie wstępne filtrowanie chmury punktów, wykorzystujące dodatkową informację, np. obraz intensywności. Wymaga to jednak przeprowadzenia dodatkowych testów.

Azymuty ze środka powierzchni do poszczególnych drzew różnią się co prawda istotnie, jednak jest to różnica niewielka (niecałe 5 stopni). Powstałe różnice wynikać jednak mogą z niedokładności (zbyt małej precyzji) określania azymutu podczas wykonywania pomiarów referencyjnych oraz niedokładności określania położenia środka drzewa. Tak niewielki (mimo, że istotny) błąd systematyczny nie dyskwalifikuje możliwości zastosowania technologii w praktyce – różnice w azymucie i odległości przekładają się na średnie przesunięcie lokalizacji poszczególnych drzew o około 45 cm. Uzyskane w prezentowanych badaniach wyniki są podobne do wyników uzyskiwanych przez innych autorów. Bienert i in. (2006a) byli w stanie zidentyfikować wszystkie drzewa na powierzchniach próbnych założonych w lesie mieszanym na podstawie skaningu wykonanego z dwóch pozycji. Hopkinson i in. (2004) uzyskali dokładność identyfikacji drzew na poziomie 95-97% oraz średnio 2-metrowe przesunięcie lokalizacji drzew. W przypadku badań Thiesa i Spieckera (2004) uzyskano niewielki procent drzew zidentyfikowanych na podstawie skaningu laserowego: 22% dla skanowania z jednej pozycji i 52% dla kilku pozycji skanera, oraz

bardzo dużą dokładność określenia współrzędnych poszczególnych drzew. Wyniki te uzyskane jednak zostały na powierzchni próbnej założonej w drzewostanie mieszanym o złożonej strukturze pionowej, położonym na stromym stoku. Autorzy twierdzą – co potwierdzają m.in. prezentowane w tej pracy wyniki - że w przypadku zastosowania skaningu laserowego w drzewostanach o prostszej strukturze wyniki powinny być znacznie lepsze.

Dokładność określania pierśnicowego pola przekroju i przeciętnej pierśnicy drzewostanu jest uzależniona od dokładności określania liczby drzew oraz dokładności pomiaru pierśnic drzew. W przypadku analiz przeprowadzonych na badanych powierzchniach, wnioskowanie o dokładności tych cech wydaje się być bezcelowe, gdyż jest ona w znacznym stopniu zniekształcona przez błąd określania liczby drzew. W przypadku, gdyby liczba drzew była określona dokładnie, o dokładności określania pierśnicowego pola przekroju i przeciętnej pierśnicy drzew decydowałaby wyłącznie dokładność pomiaru grubości. Z analizy pomiarów poszczególnych drzew wynika, że na badanych powierzchniach pierśnice określone automatycznie są przeciętnie o 11 mm mniejsze od referencyjnych. Problemem w interpretacji tego wyniku jest fakt, że pomiary referencyjne wykonane były w sposób tradycyjny, zgodny z Instrukcją Urządzenia Lasu z 2003 r., która precyzuje, iż pomiar grubości drzew dokonuje się z listwą średnicomierza skierowaną do środka powierzchni. W przypadku prowadzenia dalszych badań konieczna jest zmiana kierunku wykonywania pomiaru, wykorzystanie średnicy obliczonej z obwodu pnia i porównywanie nie średnic, ale pól przekrojów (patrz np. Wężyk i in. 2007). Dodatkowym źródłem błędów określania może być również kierunkowe spłaszczenie kształtu przekroju poprzecznego drzew (Konieczny, komunikacja ustna). Na rycinie II.9 przedstawiono zależność błędu absolutnego określania grubości drzew od azymutu drzewa w stosunku do środka powierzchni, na którym wyraźnie widoczne są większe błędy dodatnie w kierunku wschód-zachód (azymut 100-300°).



Ryc. II.9. Zależność błędu absolutnego określania grubości drzew od azymutu drzewa w stosunku do środka powierzchni

W literaturze opisywane są wyniki podobnych badań. Bienert i in. (2006a) podają, że uzyskane na podstawie danych laserowych grubości okazały się średnio za duże, co tłumaczy średnicą wiązki lasera. Hopkinson i in. (2004) uzyskali dość dużą dokładność określania pierśnicy drzew na powierzchniach próbnych, bez żadnej tendencji do zawyżania lub zaniżania wyników. Thies i Spiecker (2004) uzyskali na podstawie pojedynczego skanu pierśnice zaniżone średnio o -4,1%. Znacznie lepszą dokładność cytowani autorzy uzyskali na podstawie pięciu skanów, jednak zakres zmienności uzyskiwanych pierśnic był w tym przypadku bardzo duży (od 84,0 do 111,6% wartości porównawczych).

Określanie wysokości na podstawie naziemnego skanowania laserowego jest procesem skomplikowanym. Odbicia promieni lasera w okolicach wierzchołków drzew są znacznie mniej liczebne, niż w niższych częściach drzew, głównie z powodu odległości od skanera oraz przesłaniania wierzchołków drzew przez niżej położone gałęzie i niższe warstwy drzewostanu. Zauważają to m.in. Hopkinson i in. (2004), którzy uzyskali wysokości drzew określone na podstawie danych ze skanera laserowego zaniżone średnio o 1,5 m, to jest ok. 7% średniej wysokości. Problemem jest też – zwłaszcza w przypadku gatunków liściastych – jednoznaczne określenie położenia wierzchołka (dotyczy to również pomiarów referencyjnych wykonywanych za pomocą wysokościomierza).

Braki lub niedostateczna ilość informacji w części wierzchołkowej pnia muszą być uzupełniane. Przykładem rozwiązania pozwalającego na określenie wysokości drzewa w przypadku braku widoczności wierzchołka jest wykorzystanie modeli zbieżystości budowanych ad hoc na podstawie danych pozyskanych za pomocą lasera (Thies i Spiecker 2004). Autorzy cytowanej pracy wykazali, że średnio wysokość drzew była większa o 7% od

wysokości mierzonej wysokościomierzem. Jednak odchylenie standardowe określania wysokości równe 5.6 metra oraz poszczególne wysokości wahające się od 54.6 do 190.7% wartości rzeczywistej autorzy uznali za zbyt duże, by pomiary te zastosować w praktycznej inwentaryzacji lasu. W przypadku badanych powierzchni w Nadleśnictwie Milicz, uzyskane wyniki były zdecydowanie lepsze, co można tłumaczyć prostszą strukturą analizowanych drzewostanów oraz udoskonaleniem algorytmów określających wysokość. Zastosowanie tej metody wymaga jednak automatycznego rozpoznania gatunku analizowanego drzewa oraz dostępności modeli zbieżystości dla różnych gatunków drzew. Rozwiązaniem problemu niedostatecznej ilości informacji w wierzchołkowej części pnia może być również integracja danych pochodzących ze skanowania naziemnego z danymi ze skanowania wykonywanego z poziomu lotniczego. W temacie podjęto próbę połączenia chmur punktów pochodzących ze skanowania naziemnego i lotniczego, jednak - pomimo użycia precyzyjnych współrzędnych pochodzących z zastosowania techniki DGPS - natrafiono na trudności z ich koregistracją. Podobne problemy są zgłaszane również przez badaczy z Niemiec i Skandynawii. Prace w tym zakresie są kontynuowane.

W przypadku stosowania skanera laserowego miąższość drzewa i poszczególnych sortymentów określana jest zwykle na podstawie pomiaru wysokości na różnych wysokościach z wykorzystaniem wzoru sekcyjnego. W takim przypadku dokładność określania tej cechy zależeć będzie od dokładności identyfikacji drzew, dokładności określania wysokości oraz dokładności określania grubości na różnych wysokościach. Zagadnienie to wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań, w których referencją byłyby dane uzyskane z pomiaru drzew próbnych ściętych (skanowanych przed ścięciem) lub informacje uzyskane za pomocą precyzyjnych pomiarów geodezyjnych. Dodatkowo, w przypadku zestawu danych dostępnych dla powierzchni referencyjnych, miąższość powierzchni próbnych musiała by być określona za pomocą wzorów empirycznych, co czyni porównanie wyników bezcelowym.

## **5.5 Wnioski**

Przeprowadzone badania wykazały, że możliwa jest automatyzacja pomiarów cech drzew i drzewostanów wykonywanych na podstawie danych uzyskanych z naziemnego skanowania laserowego. Uzyskane wyniki nie są może w wielu wypadkach zadowalające, ale pamiętać należy o kilku warunkach ograniczających możliwość praktycznego zastosowania oprogramowania Autostem w warunkach polskich. Najważniejsze wydaje się to, że oprogramowanie sprawdza się w warunkach drzewostanów świerkowych o stosunkowo

niskim stopniu zagęszczenia (czyli w typowych drzewostanach zachodniej Europy i Skandynawii, hodowanych przy znacznie luźniejszej więźbie, niż w Polsce). W przypadku drzewostanów o wyższym stopniu zagęszczenia zwiększa się liczba drzew, które przesłaniają się wzajemnie, przez co dokładność określania różnych cech drzewostanu zmniejsza się. Skład gatunkowy ma również znaczenie dla uzyskiwanej dokładności – szczególnie w kontekście innych parametrów filtrowania danych oraz dostępnych modeli zbieżystości. Z drugiej jednak strony wydaje się, że możliwe jest doskonalenie algorytmów do automatyzacji pomiarów w określonych warunkach gospodarowania oraz podniesienie dokładności uzyskiwanych wyników do wartości akceptowalnych w praktyce.

Nie bez znaczenia jest również fakt, że w wielu wypadkach prowadzenie pomiarów jest związane z uwzględnianiem warunków lokalnych (na przykład zniekształceń lub uszkodzeń pnia w miejscu pomiaru, nierówności terenu itp.). Zastosowanie oprogramowania komputerowego do automatycznej obróbki danych LIDAR-owych nie daje jeszcze takich możliwości.

# 6. Założenia i algorytmy aplikacji do automatycznej obróbki danych z naziemnego skaningu laserowego dla potrzeb inwentaryzacji lasu

## 6.1 Wstęp

Możliwość praktycznego zastosowania technologii naziemnego skaningu laserowego (TLS) w leśnictwie uwarunkowana jest istnieniem wyspecjalizowanego oprogramowania, które pozwalałoby na automatyzację pomiarów podstawowych cech taksacyjnych drzewostanów zarejestrowanych przez skaner. Na fakt ten zwracają uwagę badacze zajmujący się tym tematem (np. Thies i in. 2004, Wężyk i in. 2007). Pomimo gwałtownego rozwoju technologii, istniejące dziś oprogramowanie do obróbki chmury punktów, które doskonale sprawdza się w zastosowaniach inżynierskich i przemysłowych, nie pozwala na wydajne przetwarzanie danych o lesie pozyskanych za pomocą skanowania naziemnego. Istnieje zatem konieczność budowy aplikacji służącej do obróbki chmury punktów dla potrzeb inwentaryzacji lasu. Oprogramowanie to wypełniłoby lukę między profesjonalnymi produktami do zastosowań inżynierskich a programami służącymi do przetwarzania danych pozyskanych na drodze skanowania lotniczego.

W niniejszym opracowaniu podjęto próbę określenia metod i algorytmów, jakie można rozważać przy projektowaniu aplikacji służącej do automatyzacji pomiarów prowadzonych za pomocą naziemnego skaningu laserowego. Przedstawiono również komercyjne i wolne oprogramowanie, które można wykorzystać przy analizie danych z TLS oraz narzędzia programistyczne (biblioteki), które mogą znaleźć bezpośrednie zastosowanie przy budowie oprogramowania. Uwagi zamieszczone w niniejszym opracowaniu są wynikiem analizy leśnej literatury naukowej na temat obróbki danych z TLS, testów oprogramowania komercyjnego przeprowadzonych w trakcie trwania tematu badawczego „Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji wybranych technik geomatycznych” oraz dyskusji z twórcami lub użytkownikami różnych programów.

## 6.2 Charakterystyka danych pochodzących ze skanera laserowego

Laser - **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**missions of **R**adiation (wzmocnienie światła przez wymuszoną emisję promieniowania), nazywany też wzmacniaczem optycznym, to urządzenie generujące lub wzmacniające spójne promieniowanie elektromagnetyczne w

zakresie między ultrafioletem a podczerwienią. Lidar - **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging - to aktywny system zdalnego pozyskiwania informacji, wykorzystujący skoncentrowaną wiązkę promieni świetlnych (laserowych), która wysyłana w kierunku obiektu ulega od niego odbiciu (i rozproszeniu), a wiązka zwrotna jest rejestrowana i następnie analizowana. Analiza własności powracającej wiązki światła umożliwia charakteryzowanie obiektów, od których uległa ona odbiciu. Określenie odległości od źródła promieniowania do obiektu odbywa się najczęściej poprzez analizę czasu od wysłania do powrotu promieniowania bądź przez pomiar przesunięcia fazowego sygnałów.

W wyniku wykonania skaningu laserowego powstaje chmura zawierająca miliony punktów. Liczba punktów zależy od typu skanera, zasięgu skanera, rozdzielczości skanera i zastosowanego trybu pracy. Na przykład Aschoff i in. (2004) raportują, że skaner panoramiczny IMAGER 5003 by Z+F oferuje prace przy maksymalnej rozdzielczości 20 000 punktów w pionie i 36 000 punktów w poziomie. Zastosowanie rozdzielczości zmniejszonej do 5 000 x 10 000 punktów z zachowaniem informacji o intensywności odbicia daje dla pojedynczego skanu plik wynikowy o rozmiarze 250 MB.

Podsumowanie parametrów współczesnych skanerów lotniczych i naziemnych różnych producentów można znaleźć m.in. w pracy Samberga (2007). Skanery lotnicze charakteryzują się PRR do 200 kHz, średnią gęstością pokrycia do 40 punktów na m<sup>2</sup> przy szybkości 70m/s, mogą być używane przy wysokości nalotu do 4000 m oraz pracować w technologii "full-wave". Skanery naziemne charakteryzują się PRR do 190 kHz przy pracy pulsacyjnej i do 500 kHz przy pomiarze realizowanym z wykorzystaniem przesunięcia fazowego, zasięgiem pracy do 4000 m oraz osiągalnym krokiem skanowania od 0.00067° do 0.009°. Fröhlich i Mettenleiter (200x) porównują skanery naziemne różnych producentów, opisują dokładność pomiarów oraz opisują oprogramowanie mogące znaleźć zastosowanie przy obróbce danych pochodzących z TLS.

Już na pierwszy rzut oka zauważyć można, że rozkład punktów uzyskanych za pomocą TLS w przestrzeni jest nierównomierny (zwłaszcza w porównaniu z wynikiem ALS). Obszar położony bezpośrednio pod skanerem nie ma ani jednego zarejestrowanego punktu, bezpośrednio przy skanerze obserwuje się ogromną liczbę punktów, zaś wraz z oddalaniem się od skanera gęstość punktów gwałtownie maleje. Jest to szczególnie widoczne w obrębie koron drzew. Spowodowane jest to stałą częstotliwością wysyłania impulsów laserowych i zmienną odległością. Ponadto na obrazie chmury punktów widoczne są charakterystyczne cienie powstające z powodu przesłaniania przestrzeni przez drzewa. (Ryc. II.10). Problem ten

można zmniejszyć stosując nie wyniki z pojedynczego skanu realizowanego ze środka powierzchni próbnej, ale wykonując skanowanie z kilku pozycji (np. Henning i Radtke 2006b, Wężyk i in. 2007). Z jednej strony zastosowanie skanowania z wielu punktów pozwala co prawda na częściowe wyeliminowanie efektu cienia, ale z drugiej strony rodzi problemy związane z zestrojeniem chmur punktów powstałych w czasie skanowania z poszczególnych pozycji. Ponieważ poszczególne chmury punktów są w różnych lokalnych układach współrzędnych, konieczna jest w związku z tym taka ich transformacja, by znajdowały się one we wspólnym układzie współrzędnych lub – co jest zdecydowanie bardziej pożądane – sprowadzone zostały do globalnego układu współrzędnych. Nierównomierność pokrycia przestrzeni punktami powoduje, że w niektórych miejscach dysponujemy nadreprezentacją punktów, prowadzącą do niepotrzebnego zwiększenia objętości plików z danymi, w niektórych zaś punktów jest za mało lub nie ich wcale, co uniemożliwia wykonanie dokładnych pomiarów.



Ryc. II.10. Widok chmury punktów uzyskanej w wyniku naziemnego skaningu laserowego

Oprócz wzajemnego zasłaniania się drzew, problem niedostatecznej ilości danych powstaje również w wyniku istnienia II piętra oraz liści. Powodują one rozpraszanie i odbijanie wiązki lasera i powstawanie lokalnych braków w danych. Problemów tych można uniknąć jedynie wykonując skanowanie laserowe przed rozwojem liści (w praktyce

najczęściej wczesną wiosną, gdyż niektóre gatunki, np. dąb, utrzymują liście przez długą część zimy).

Skanery laserowe są coraz częściej stosowane w przemyśle, szczególnie do tzw. szybkiego prototypowania produktów. W przypadku zastosowań przemysłowych skanowanie odbywa się w optymalnych warunkach (temperatura, wilgotność, czystość powietrza, stała pozycja obiektu, itp.), które pozwalają na uzyskanie precyzyjnego obrazu bez nadmiernego szumu. W przypadku wykonywania skanowania w terenie – warunki są znacznie mniej korzystne. W powietrzu znajdują się drobiny kurzu odbijające i rozpraszające promienie lasera, wilgotność i temperatura są często dalekie od optymalnych, zaś same obiekty (drzewa) nie są nieruchome. Powoduje to, że obrazy uzyskane w czasie skanowania lasu mają znacznie więcej szumów i zakłóceń w porównaniu ze skanami przemysłowymi. Stanowi to dodatkowy problem podczas obróbki danych.

### **6.3 Potrzeby w zakresie pomiarów**

Głównym celem realizowanego projektu badawczego było opracowanie metody inwentaryzacji lasu wykorzystującej różne techniki geomatyczne. Jednym z elementów tematu było sprawdzenie, w jakim stopniu i przy jakich warunkach nowe techniki mogą zastąpić tradycyjne pomiary wykonywane na powierzchniach próbnych. W przypadku naziemnego skaningu laserowego podstawowe pomiary dotyczyć powinny:

- określenia liczby drzew
- określenie pierśnic drzew (pierśnicowego pola przekroju drzew)
- określenia pierśnicowego pola przekroju drzewostanu
- określenie wysokości drzew
- określenie średniej (górnej) wysokości drzewostanu
- określenie miąższości drzew, w tym miąższości sortymentów
- określenie miąższości drzewostanu

Tak więc przy budowie oprogramowania do automatycznej analizy danych gromadzonych za pomocą TLS brać należy pod uwagę możliwość określenia powyżej wymienionych elementów.

## **6.4 Praktyczne sposoby wykonywania analiz chmury punktów**

Najbardziej pożądanym sposobem przetwarzania danych z naziemnego skaningu laserowego byłoby zastosowanie aplikacji pozwalającej na automatyczne lub półautomatyczne wykonywanie pomiarów. Niestety, oprogramowania takiego praktycznie nie ma na rynku. Konieczne jest więc posiłkowanie się innymi programami służącymi do obróbki chmur punktów lub do automatycznej klasyfikacji danych rastrowych (po uprzednim wyeksportowaniu danych punktowych do tego formatu). Obecnie jedyną praktyczną możliwością obróbki chmury punktów dla potrzeb leśnych pozostaje w zasadzie pomiar ręczny lub półautomatyczny (m.in. Wężyk i in. 2007). Wyjątkiem jest wykorzystanie oprogramowania Autostem firmy Treemetrics, jednak cena i warunki licencyjne postawione przez producenta powodują, że nie jest to łatwe.

## **6.5 Oprogramowanie do obróbki chmury punktów**

Zdecydowana większość programów używanych do obróbki chmury punktów ma swoje źródło w zastosowaniach inżynierskich – do szybkiego projektowania i prototypowania elementów maszyn i urządzeń – bądź jest dostarczana razem z laserem. Poniżej przedstawiono przykładowe programy, które mogą znaleźć (lub znalazły) zastosowanie do przetwarzania leśnych obrazów pozyskanych skanerem naziemnym. Opisy innych programów do obróbki i modelowania danych znaleźć można w opracowaniu Fröhlicha i Mettenleitera (2004).

FARO Scene jest programem dostarczającym wraz ze skanerem FARO, pozwalającym na prostą obróbkę danych pozyskanych skanerem. Umożliwia on m.in. prostą filtrację danych, rejestrację chmur punktów oraz przeprowadzenie prostych ręcznych i półautomatycznych pomiarów cech drzew bezpośrednio na chmurze punktów oraz eksport danych do różnych formatów. Więcej informacji na temat produktu znaleźć można w Internecie pod adresem <http://www.faro.com>

PolyWorks – program dostarczany przez firmę InnovMetric, którego oryginalnym zastosowaniem jest obróbka danych pozyskanych skanerem dla celów przemysłowych (rapid prototyping, reverse engineering). Dla celów leśnych był on wykorzystany m.in. przez Hopkinsona i in. (2004). Więcej informacji na temat produktu znaleźć można w Internecie pod adresem <http://www.innovmetric.com>

Geomagic jest programem o możliwościach zbliżonych do PolyWorks, jednak zdecydowanie mniejszym i tańszym. Jego oryginalnym zastosowaniem jest obróbka danych pozyskanych skanerem dla celów przemysłowych (rapid prototyping, reverse engineering). Więcej informacji na temat produktu znaleźć można w Internecie pod adresem <http://www.geomagic.com/en/products/studio/>

Terrascan i Terramodeller – produkty fińskiej firmy TerraSolid przeznaczone do obróbki danych pozyskanych laserem, przede wszystkim laserem lotniczym. Pozwalają one m.in. na wczytanie, klasyfikację i modelowanie chmury punktów. Oprogramowanie wykorzystane było m.in. przez Wężyka i in. (2007) do klasyfikacji chmury punktów i oddzielenia NMT od drzew i innych elementów (np. roślinności). Więcej informacji na temat produktu znaleźć można w Internecie pod adresem <http://www.terrasolid.fi>

Lidar Analyst jest rozszerzeniem popularnego oprogramowania ArcGIS firmy ESRI, dostarczonym przez firmę Visual Learning Systems, przeznaczonym to automatycznej ekstrakcji cech z chmury punktów pochodzącej z lotniczego skaningu laserowego. Dodatek pozwala na automatyczne wyznaczenie powierzchni terenu, budynków, drzew, obszarów leśnych, itp. Jego przydatność do obróbki danych ze skaningu naziemnego nie została podczas realizacji tematu badawczego określona.

Francuska firma Technodigit jest dostawcą programu 3DReshaper służącego do obróbki danych w postaci chmur(y) punktów. Pozwala on na import danych, filtrowanie, wygładzanie powierzchni, tworzenie siatki trójkątów, eksport do postaci shapefile i oprogramowania CAD, podstawowe pomiary i obliczenia. Wraz z programem dostarczana jest biblioteka funkcji C++ pozwalająca na pisanie własnych programów do obróbki danych pochodzących ze skanerów laserowych. Więcej informacji dostępnych jest na stronach firmy: <http://www.3dreshaper.com>

AutoStem irlandzkiej firmy Treemetrics jest jedynym obecnie dostępnym komercyjnym oprogramowaniem służącym do obróbki danych ze skaningu laserowego do zastosowań leśnych. Uzyskał on w roku 2005 nagrodę Schweighofera za innowacyjność. Program pozwala (przy wykorzystaniu pojedynczego skanu zlokalizowanego w środku powierzchni próbnej) na automatyczną identyfikację drzew oraz pomiar podstawowych ich charakterystyk (pierśnica, wysokość, grubości na różnych wysokościach, miąższość).

TreesVis jest produktem opracowanym w laboratorium FELIS na Uniwersytecie we Freiburgu. Jest to oprogramowanie służące pierwotnie do obróbki danych pochodzących z

lotniczego skaningu laserowego, przede wszystkim do budowy NMT, NMPT i nNMPT. W miarę rozwoju program ten został wzbogacony o możliwość przetwarzania danych ze skaningu naziemnego i jest stale uzupełniany o dodatkowe moduły (z reguły napisane z wykorzystaniem biblioteki Halcon) służące do wykonywania specyficznych zadań, jak np. rozpoznawanie pojedynczych drzew, dróg, linii podziału powierzchniowego, wydzielanie luk, klasyfikacja składu gatunkowego itp. Spośród programów dostępnych na rynku i przetestowanych w trakcie prac wykonywanych w temacie badawczym stwierdzono, że oprogramowanie to jest jednym z najbardziej godnych polecenia przy wykonywaniu analiz na bazie ALS w praktyce.

TreeVaW to oprogramowanie opracowane przez Popescu (Kini i Popescu 2004), służące do identyfikacji i pomiaru poszczególnych drzew na podstawie danych z lidara lotniczego lub obrazów multispektralnych. Wynikiem działania programu są następujące dane: lokalizacja poszczególnych drzew, wysokości drzew i wielkości ich koron. Do tej pory nie raportowano wykorzystania tego oprogramowania do obróbki danych ze skanowania naziemnego.

BRL-CAD to oprogramowanie pochodzące z armii amerykańskiej, służące do modelowania danych przestrzennych przy pomocy podstawowych brył geometrycznych. Więcej informacji znajduje się pod adresem <http://brlcad.org/>

GRASS – oprogramowanie Open Source służące do przetwarzania i analizy danych przestrzennych. Program zawiera około 350 modułów pozwalających m.in. na przetwarzanie obrazów, manipulację rastrowymi i wektorowymi danymi przestrzennymi, wyświetlanie danych, prowadzenie analiz wektorowych (m.in. analizy sieciowe, wydzielenie stref buforowych, analiza intersekcji) i rastrowych, digitalizację, georeferencję, geokodowanie, rasteryzację i wektoryzację danych. GRASS umożliwia pracę z różnymi źródłami danych. Specjalistyczne analizy matematyczne i statystyczne mogą być wykonywane za pomocą języków R, Octave i Matlab. GRASS pozwala na pracę na wektorowych i rastrowych danych trójwymiarowych, w tym formacie xyz i voxelach. W literaturze znaleźć można opis możliwości wykorzystania programu GRASS do przetwarzania danych lidarowych (Brovelli i in. 2002, Sanchez i Brovelli 200x).

Point Cloud jest prostym i tanim (niecałe 300 Euro) oprogramowaniem do modelowania kształtów na podstawie chmury punktów uzyskanych ze skanera laserowego. Więcej informacji na stronie [http://www.sycode.com/products/point\\_cloud/index.htm](http://www.sycode.com/products/point_cloud/index.htm)

## **6.6 Narzędzia programistyczne do obróbki chmury punktów**

Poniżej przedstawiono kilka przykładów bibliotek Open Source, które można rozważać przy budowie oprogramowania do zastosowań leśnych. Są to w większości pakiety zawierające zaimplementowane metody geometrii obliczeniowej (computational geometry) bądź biblioteki przeznaczone do obróbki danych trójwymiarowych.

CGAL (Computational Geometry Algorithms Library) jest to zaawansowany projekt Open Source, którego celem jest stworzenie Biblioteki Algorytmów Geometrii Obliczeniowej dla języka C++. Biblioteka zawiera m.in. takie struktury danych i algorytmy, jak różne rodzaje triangulacji (triangulacja dwuwymiarowa oraz dwu- i trójwymiarowa triangulacja Delaunay), diagramy Voroni, operacje logiczne na poligonach, porządkowanie krzywych, generowanie siatki dwu- i trójwymiarowej (mesh), operacje geometryczne na siatkach, alpha shapes, dwu- trzy- i wielowymiarowe algorytmy otoczki wypukłej (convex hull), operacje na poligonach, wyszukiwanie struktur, interpolację, analizę i dopasowanie kształtów, określanie i analiza odległości i inne. Wymienione powyżej struktury danych i algorytmy można stosować m.in. dla danych punktowych. Biblioteka i dokumentacja dostępna jest w Internecie na serwerze: <http://www.cgal.org>

Open CASCADE jest jądrem i platformą programistyczną tworzoną do modelowania 3D. Oprogramowanie składa się z biblioteki obiektów języka C++ oraz zestawu narzędzi programistycznych udostępnionych jako Open Source. Biblioteka oferuje m.in. automatyczną obsługę pamięci, operacje na wektorach i macierzach, rozwiązywanie układów równań liniowych, algorytmy do poszukiwania pierwiastków równań nieliniowych, algorytmy do znajdowania minimów funkcji jednej lub więcej zmiennych niezależnych, modelowanie i opis kształtów podstawowych (punktów, wektorów, linii, okręgów, stożków, płaszczyzn i powierzchni, możliwość przesuwania, obrotu i skalowania obiektów, modelowanie danych na płaszczyźnie i w przestrzeni oraz modele topologiczne. Biblioteka i jej dokumentacja są dostępne w Internecie: <http://www.opencascade.org/occ> i <http://www.opencascade.org/>

Open Source Computer Vision Library – projekt wspomagany przez firmę Intel – powstał głównie z myślą o komputerowym przetwarzaniu obrazów w czasie rzeczywistym. Przykładowe potencjalne zastosowania obejmują m.in. takie zagadnienia, jak identyfikacja, segmentacja i rozpoznawanie obrazów. Więcej informacji na temat biblioteki można znaleźć w Internecie pod adresem: <http://www.intel.com/technology/computing/opencv/index.htm> i <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary>

Biblioteka GD jest wolną biblioteką programistyczną (język C) do dynamicznego tworzenia obrazów m.in. w formatach PNG, JPEG i GIF. Więcej informacji na temat biblioteki dostępnych jest w Internecie pod adresem <http://www.libgd.org>

GUL jest to biblioteka funkcji języka C++, rozwijana na Visual C++ 7.0, zawierająca podstawowe funkcje do operacji na krzywych i powierzchniach NURBS \*, oraz funkcje służące do interpolowania danych punktowych za pomocą krzywych i powierzchni NURBS. Ponadto zawiera ona również wiele funkcji będących w zakresie zainteresowania geometrii obliczeniowej. Największą wadą biblioteki GUL jest prawie całkowity brak dokumentacji, co czyni ją trudną do implementacji. Biblioteka dostępna jest w Internecie pod adresem <http://gul.sourceforge.net/>

Poza dużymi, drogimi bibliotekami komercyjnymi i bibliotekami Open Source, możliwe jest również zaproponowanie mniejszych produktów o dużych możliwościach, a stosunkowo niskiej cenie. Do oprogramowania tego typu należy np. Wykobi, 3DReshaper firmy Technodigit, GeoLib, SurfaceLib czy Halcon firmy MVTech.

Wykobi jest biblioteką języka C++ zawierającą szereg funkcji 2- i 3-wymiarowej geometrii obliczeniowej. Jest biblioteką strukturalną, nie obiektową, skoncentrowaną na łatwości użycia i efektywności kodu wynikowego. Wykobi dostarczana jest jako bezpłatna biblioteka Open Source dla celów niekomercyjnych. W przypadku jej komercyjnego wykorzystania konieczne jest wykupienie licencji. Szczegółowy opis biblioteki znajduje się pod adresem <http://www.wykobi.com>

Francuska firma Technodigit – producent programu 3DReshaper – dostarcza również bibliotekę funkcji C++ pozwalającą na pisanie własnych programów do obróbki danych pochodzących ze skanerów laserowych. Biblioteka zawiera wiele przykładów pozwalających na szybkie pisanie aplikacji. Szczegółowy opis biblioteki znajduje się pod adresem <http://www.3dreshaper.com>

GeoLib to napisana w C++ biblioteka 2-wymiarowych algorytmów geometrii obliczeniowej, zawierająca zestaw klas wektorów, punktów, linii, okręgów, prostokątów, poligonów i pozycji geodezyjnej (konwersja do prostokątnego układu współrzędnych z różnych projekcji). Cena biblioteki nie przekracza 1000 funtów. Więcej informacji znaleźć można w Internecie pod adresem <http://www.geolib.co.uk/>

SurfaceLib to biblioteka C++ pozwalająca na dopasowanie powierzchni czy siatki do chmury punktów. Cena biblioteki nie przekracza 200 euro. Więcej informacji znaleźć można w Internecie pod adresem <http://www.sycode.com/technologies/surfacelib>

Halcon jest to dynamicznie rozwijany produkt sprzedawany – w zależności od opcji – w cenie od kilkuset do półtora tysiąca euro. Jego głównym zastosowaniem jest różnego rodzaju klasyfikacja obiektów dwu i trzywymiarowych.

Poza językiem C++ dostępne są również pojedyncze produkty dla innych języków oprogramowania. Przykładem może być tu biblioteka geometryczna FastGeo dla Object Pascala, której szczegółowy opis znaleźć można pod adresem: <http://www.partow.net/projects/fastgeo/index.html>

## ***6.7 Koncepcja algorytmu aplikacji do automatycznej obróbki danych z TLS na potrzeby inwentaryzacji lasu***

Poniżej przedstawione zostały etapy analizy danych z TLS, które powinny być zaimplementowane w tworzonym oprogramowaniu, oraz możliwości ich rozwiązań. Ponieważ analiza literatury wykazała, że w wielu wypadkach schemat postępowania jest podobny, wskazano również na źródła, w których opisano bądź zastosowano proponowane rozwiązanie. Najprawdopodobniej najpełniejszy opis procedury służącej do uzyskania informacji o drzewostanie znajduje się w pracy Aschoffa i współpracowników (Aschoff i in. 2004).

Oprogramowanie do automatycznej analizy danych z TLS powinno umożliwić uzyskanie opisanych na wstępie opracowania danych o lesie. Ponadto oprogramowanie powinno umożliwiać wstępną obróbkę danych (szczególnie filtrację i rejestrację) oraz ich prezentację graficzną. Opisy poszczególnych modułów funkcjonalnych programu podane będą w podrozdziałach uporządkowanych w kolejności wykonywania poszczególnych kroków przetwarzania danych.

### Import danych

Oprogramowanie powinno umożliwiać wczytywanie (import) najpowszechniej używanych formatów danych. Najbardziej uniwersalnym i najbezpieczniejszym formatem jest zbiór danych w postaci kolumn danych zawierających współrzędne X, Y i Z każdego punktu. Rozważyć należy możliwość importu dodatkowych danych związanych z intensywnością odbicia, co ułatwić może m.in. filtrowanie danych. Rozważyć też można możliwość importowania danych w formacie LAS. LAS jest binarnym formatem danych

zaakceptowanym przez ASPRS, służącym do wymiany danych pochodzących głównie z lotniczego skaningu laserowego (ALS). Format ten charakteryzuje się kilkoma zaletami:

- uznanie przez ASPRS jako standard
- kompatybilność z wieloma programami do obróbki chmury punktów
- pełna dokumentacja specyfikacji dostępna w Internecie
- postać binarna danych pozwalająca na zmniejszenie pliku z danymi a co za tym idzie – zwiększenie szybkości przetwarzania (rozmiar pliku danych z pojedynczego skanu w formacie XYZ przetworzony do formatu LAS zajmuje 30% wyjściowej wielkości)
- istnienie dodatkowych narzędzi (wraz z kodem) pozwalających na konwersję danych, ich analizę i wizualizację

Twórcy specyfikacji formatu udostępniają bibliotekę LIBLAS. Jest to biblioteka języka C++ przeznaczona do odczytywania i zapisywania plików z danymi pochodzącymi z różnego rodzaju skaningu laserowego w formacie LAS. Biblioteka zawiera również zestaw niewielkich narzędzi służących do konwersji danych lidarowych do formatu LAS, kopiowania plików oraz ich wizualizacji. Wszystkie programy udostępniane są jako wolne oprogramowanie wraz z kompletnym kodem. Biblioteka i narzędzia są stale rozwijane. Ostatnie zmiany (kwiecień 2008) wprowadzone po kontakcie z twórcami narzędzi umożliwiają na przykład „wycinanie” z chmury punktów fragmentów zdefiniowanych przez Xmin, Ymin, Xmax i Ymax.

Format LAS ma również wady. Jedną z nich jest to, że ze względu na oryginalne przeznaczenie, pliki zapisane w tym formacie niosą zbyt dużo zbędnej informacji, która powoduje, że nie jest to format optymalny do przetwarzania. W sytuacji jednak, gdy stworzenie własnego formatu binarnego nie jest możliwe, zastosowanie formatu LAS jest zdecydowanie lepszym rozwiązaniem, niż pozostanie przy formacie ASCII.

### Rejestracja danych

Po wczytaniu danych z pojedynczego skanu można przeprowadzić jego georeferencję, tj. przejście z lokalnego układu współrzędnych na układ globalny (w przypadku zastosowań leśnych w Polsce – układ 1992). Operacja ta umożliwić może łączenie skanów wykonanych na powierzchni z danymi ze skaningu lotniczego – w celu zwiększenia dokładności szacowania cech. W przypadku operowania na pojedynczej chmurze, której nie zamierzamy

łączyć z danymi z ALS – czynność ta nie jest konieczna. Rejestracja skanów jest natomiast konieczna a przypadku wykorzystywania do pomiarów danych z kilku pozycji skanera. Wówczas istnieje konieczność sprowadzenia wszystkich chmur punktów do jednego lokalnego układu współrzędnych lub do układu globalnego. W tym celu konieczne jest wyznaczenie na poszczególnych skanach minimum 3 punktów referencyjnych, na bazie których prowadzić się będzie wzajemne dopasowanie danych z poszczególnych chmur punktów (ich przesunięcie, obrót i skalowanie). Mogą to być np. kule dostarczane wraz ze skanerem FARO, których pozycje względem środka powierzchni trzeba dokładnie wyznaczyć, lub tyczki *ustawiane w miejscach kolejnych pozycji skanera* (Weinacker, informacja ustna). Możliwe jest również wykorzystanie do rejestracji obrazów samych skanowanych obiektów (np. środków kilku drzew możliwych do zidentyfikowania na poszczególnych skanach; Henning i Radtke 2006b, 2008). Z kolei Bae i Lichti (2008) opisali algorytm automatycznej rejestracji chmur punktów. Punkty do rejestracji powinny zostać wybrane na obrazie a następnie chmury punktów powinny być przetworzone tak, by w efekcie uzyskać najmniejszy błąd dopasowania skanów do siebie.

#### „Wycinanie” danych

Pozyskana w terenie chmura punktów obejmuje swoim zasięgiem obszar o wielkości ograniczonej z jednej strony parametrami skanera (w przypadku skanera FARO –około 70m), z drugiej zaś widzialnością związaną z sytuacją na danej powierzchni. W przypadku, gdy analizie podlegać ma powierzchnia próbna o określonej wielkości, konieczne jest ograniczenie wielkości chmury do pożądanego obszaru tak, by analizie podlegały wyłącznie drzewa położone na powierzchni próbnej o zadanej wielkości. Z drugiej strony wydaje się jednak, że takie postępowanie powoduje ograniczenie możliwości zastosowanej technologii. W perspektywie, przy rozwoju metody inwentaryzacji lasu z wykorzystaniem skanera naziemnego, konieczna jest zmiana podejścia do obszaru (wielkości) powierzchni próbnej tak, by maksymalnie wykorzystać możliwości, jakie daje ten sposób zbierania danych.

#### Wizualizacja danych

Dane z naziemnego skaningu laserowego zawierają informacje o milionach punktów, których wyświetlanie w czasie rzeczywistym może być trudne. Dlatego też należy rozważyć możliwość:

- wyświetlania (renderowania obiektów 3D) przy pomocy OpenGL lub DirectX (nie GDI)

- przekształcenia danych XYZ do postaci rastrowej (np. za pomocą algorytmów GDAL) i wyświetlanie uzyskanego wyniku na ekranie
- próbkowania (sąplowania) chmury punktów dla celów wizualizacji
- wyświetlania tylko części obrazu w zależności od pozycji obserwatora względem danych (Weinacker, informacja ustna o algorytmach programu TreeVis)

### Filtrowanie danych

Filtrowanie danych ma na celu wyeliminowanie z dalszych analiz tych punktów, których obecność na zarejestrowanym obrazie jest przypadkowa lub niepożądana. W szczególności dotyczy to tzw. „ghost-pointów”, powstałych np. w wyniku błędów skanera, rozproszonego odbicia na większych odległościach, ruchu obrazowanych obiektów czy zanieczyszczeń znajdujących się w powietrzu. Eliminacji powinny być poddane punkty izolowane (bez sąsiedztwa innych punktów w pewnej odległości). Warto również zwrócić uwagę na miejsca, gdzie punktów jest zdecydowanie za dużo, np. bezpośrednie otoczenie skanera. Dzięki filtracji zmniejsza się liczba danych (wielkość zbioru), przetwarzanie ulega przyspieszeniu i zwiększa się jego jakość (dokładność).

Filtrowanie może być wykonane w oprogramowaniu dostarczanym przez producenta skanera (np. FARO Scene) na etapie zbierania i przygotowania danych. Oprogramowanie to ma jednak pewne ograniczenia, np. w przypadku FARO Scene niemożliwe jest wyeliminowanie punktów powyżej lub poniżej zadanego progu intensywności, co byłoby skuteczne w przypadku przetwarzania danych zbieranych w lesie (Wencel, informacja ustna). Aschoff i Spiecker (200x) sugerują wyeliminowanie punktów o intensywności poniżej 500. Filtrowanie odbywać się może również z wykorzystaniem informacji wynikającej z porównania pozycji skanera (kąta wiązki/odbicia względem pozycji skanera) i kilku sąsiadujących punktów (Aschoff i Spiecker 200x, Aschoff i in. 2004).

### Budowa NMT (DTM)

W literaturze, zwłaszcza dotyczącej technik lotniczych, spotyka się wiele sposobów dochodzenia do numerycznego modelu terenu. W przypadku skaningu naziemnego duża część autorów stosuje podobne podejście. Skanowany obszar dzielony jest na kwadraty o boku zależnym od parametrów skanowania oraz wymaganej rozdzielczości NMT. Następnie w każdym z kwadratów poszukiwany jest punkt o najmniejszej wartości „z”, zaś z wynikowego zbioru danych odfiltrowywane są punkty nie należące do powierzchni terenu.

Henning i Radtke (2006a) opisują budowę NMT z wykorzystaniem kwadratów o boku 0,25m oraz metodyki opisanej przez Axelssona (1999) i Henninga (2005). Aschoff i Spiecker (200x) oraz Aschoff i in. (2004) opisują tworzenie NMT na bazie siatki kwadratów o boku 0,5m. W niektórych przypadkach NMT tworzony jest w formie TIN.

#### Identyfikacja drzew i rekonstrukcja przekrojów

Celem tego kroku jest zidentyfikowanie drzewa, określenie jego położenia oraz grubości na różnych wysokościach. Możliwość określenia grubości na różnych wysokościach pozwala na potwierdzenie istnienia drzewa w danej lokalizacji, budowę modelu kształtu podłużnego oraz określenie sortymentów i miąższości.

Schemat postępowania przy rekonstrukcji przekrojów jest podobny we wszystkich pracach opisujących tę procedurę. Najpełniejszy opis procedury identyfikacji drzew znaleźć można w pracy Aschoffa i Spieckera (200x) opublikowanej jako jeden z rezultatów uzyskanych w projekcie NATSCAN finansowanym przez niemieckie Ministerstwo Edukacji i Badań. Autorzy wycinali z chmury punktów warstwy o grubości 10 cm (co 0,5 m) w odległości 0,5 do 20 metrów od opracowanego wcześniej NMT. Dodatkowo wycinano dane z wysokości 1,2m, 1,3m, 1,4m (do modelowania pierśnicy), 0,6m, 0,7m, 6,9m, oraz 7,1m. Poszczególne przekroje były uśredniane oraz konwertowane do postaci rastrowej w celu wykorzystania standardowych narzędzi do rozpoznawania obrazów z wykorzystaniem transformacji Hougha. Aschoff i in. (2004) wycinali z chmury punktów warstwy o grubości 10 cm (20 cm w przypadku pierśnicy) w odległościach położonych co 0,5 m w stosunku do opracowanego NMT. Uzyskane fragmenty okręgów (walców) podlegały dalszemu przetwarzaniu w celu dopasowania okręgu lub walca przy pomocy transformacji Hougha (np. Aschoff i in. 2004, Wężyk i in. 2007). W innych pracach spotyka się również opisy innych algorytmów, np. ICP (iterative closest point, Besl i McKay 1992, Henning i Radtke 2006b). W celu określenia pierśnicy Wężyk i in. (2007) wycinali z chmury punktów zaklasyfikowanej jako „roślinność” fragmenty położone w odległości 1,28-1,32 od NMT (lub wyżej, jeżeli nie było to możliwe). Punkty przypisywano do poszczególnych drzew, generowano dopełnienie wypukłe dla tych punktów, ewentualnie uzupełniano brakujące fragmenty obwodu, a następnie określano pole przekroju. Przekrój drzewa rekonstruowany był z reguły jako koło, elipsa, fragment cylindra, w wynik transformacji Hougha (po przetworzeniu danych punktowych do postaci rastrowej). Zidentyfikowanie przekrojów na różnych wysokościach pozwala nie tylko na określenie grubości drzewa, ale również (a może przede wszystkim)

potwierdza istnienie drzewa w danej lokalizacji (jeżeli zidentyfikowane przekroje z różnych wysokości mają środki leżące w określonym obszarze).

### Budowa NMPT (DSM)

Numeryczny model pokrycia terenu jest narzędziem pozwalającym m.in. na określenie wysokości drzew (poprzez budowę nDSM, tj. odjęcie NMT od NMPT). Jest to technika powszechnie stosowana m.in. w lotniczym skaningu laserowym. W przypadku danych pochodzących ze skaningu naziemnego budowa NMPT jest znacznie utrudniona, szczególnie w drzewostanach liściastych w sezonie wegetacyjnym i w gęstych drzewostanach iglastych. Trudność polega na tym, że wiązka lasera nie dociera do wierzchołków drzew, ale jest zatrzymywana w koronach i aparacie asymilacyjnym, a w związku z tym – nie odbija się od wierzchołkowych części drzew. Mimo to w niektórych przypadkach możliwe jest zbudowanie nDSM i jego wykorzystanie do określania wysokości drzew. Przykładem może być praca Henninga i Radtke (2006a), którzy stworzyli DSM dla swoich powierzchni określając dla każdego kwadratu o boku 0,25m maksymalną wysokość odbitej wiązki lasera, nie stosując przy tym filtrowania danych.

### Określanie wysokości drzew

Wysokość poszczególnych drzew określić można kilkoma sposobami. Najbardziej klasycznym i najczęściej stosowanym sposobem jest zastosowanie nDSM. W przypadku skaningu naziemnego problemem jest jednak budowa dokładnego DSM. Ciekawe podejście, w którym nie wykorzystuje się DSM, opisał Spiecker, który przedstawił możliwość wykorzystania modelu zbieżności strzał do szacowania wysokości drzew. Po zidentyfikowaniu przekrojów drzewa na różnych wysokościach do danych tych dopasowywano model kształtu podłużnego, który z jednej strony pozwalał na dokładną interpolację grubości w miejscach, gdzie niemożliwe było znalezienie przekroju, z drugiej zaś na znalezienie wysokości odpowiadającej wierzchołkowi bryły regularnej o znanym wzorze modelu kształtu podłużnego. Uzyskana dokładność określania wysokości (1,5m) wydaje się zadowalająca. Zwiększenie dokładności wymaga zintegrowania danych z TLS i ALS i/lub wykonanie zobrazowania w odpowiednim terminie (kiedy wierzchołki drzew są najlepiej widoczne).

## Określanie miąższości

Określenie miąższości poszczególnych drzew może być zrealizowane na różne sposoby. W przypadku, gdy pomiarowi podlega jedynie pierśnica lub wysokość, miąższość drzewa można określić stosując wzory empiryczne. W przypadku pomiarów naziemnych jest to sposób standardowy (IUL 2003), natomiast w przypadku TLS – jest to sposób najmniej dokładny, nie wykorzystujący możliwości, jakie daje technologia laserowa. Drugim sposobem określenia miąższości drzew jest wykorzystanie modeli zbieżności dopasowywanych ad hoc dla każdego drzewa (np. w formie funkcji typu spline). Pozwala to na dokładne uwzględnienie kształtu drzewa, nie bierze jednak pod uwagę zmienności kształtu poprzecznego pnia. Wady tej nie posiada sposób obliczenia na podstawie bryły zidentyfikowanego drzewa modelowanej przy pomocy TIN. Jest to jednak sposób, który może sprawiać trudności natury programistycznej. Wydaje się, że najprostszym, ale jednocześnie najdokładniejszym sposobem określenia miąższości poszczególnych drzew, jest wykorzystanie wzorów sekcyjnych (Hubera lub Smaliana) przy małej długości sekcji (np. 0,1m) z wykorzystaniem opisanego wcześniej sposobu określania grubości na różnych wysokościach w stosunku do NMT.

## **6.8 Podsumowanie**

W niniejszej części opracowania przedstawiono możliwości wykorzystania różnego oprogramowania do przetwarzania danych lidarowych oraz przesłanki i koncepcję budowy oprogramowania służącego do automatycznej lub półautomatycznej obróbki danych pochodzących ze skaningu naziemnego. Przedstawiono szkielet takiego oprogramowania oraz opisane w literaturze rozwiązania poszczególnych modułów ze wskazaniem najlepszych rozwiązań. Wydaje się, że od strony teoretycznej zagadnienie zostało już opracowane na tyle, że możliwe jest przystąpienie do prac nad tworzeniem takiego oprogramowania.

# 7. Automatyzacja pomiaru drzew przy pomocy skaningu naziemnego

## 7.1 Wstęp

Olbrzymi postęp techniczny, jaki ma miejsce na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci, zaowocował szeregiem rozwiązań automatyzujących żmudną i podatną na powstawanie błędów pracę manualną. Jednym z rozwiązań, wkraczającym do dziedzin działalności wymagających szczegółowych pomiarów, jest skaningu laserowy. Od kilku lat trwają próby wykorzystania tej technologii w leśnictwie - podczas prac inwentaryzacyjnych związanych z pomiarami pojedynczych drzew jak i całych drzewostanów.

Dość oczywista stała się możliwość wykorzystania skaningu lotniczego jako elementu w części uzupełniającego, a w części zastępującego dotychczas stosowane techniki teledetekcyjne i fotogrametryczne. Natomiast nie do końca jasna jest kwestia wykorzystania skaningu naziemnego, który mógłby zastąpić pomiar drzew na różnego typu powierzchniach próbnych.

W Polsce, wymagania dotyczące dokładności takich pomiarów są bardzo wysokie (IUL 2003), stąd przed każdą nową technologią wkraczającą do praktyki urządzania lasu stoją duże wyzwania. W przypadku metody pomiaru drzew przy wykorzystaniu skaningu naziemnego na dokładność wpływają dwa podstawowe elementy: jakość zebranego materiału, wynikająca z możliwości sprzętu, zastosowanych ustawień itp., oraz dokładność przetworzenia zebranego materiału (chmury punktów) w celu określenia wybranych parametrów drzew.

Dalsza część opracowania dotyczy wyłącznie drugiego elementu, tj. określenia możliwości i dokładności zlokalizowania drzew na powierzchni próbnej oraz pomiaru ich pierśnic, pomijając aspekt sposobu i dokładności, przy której utworzone zostały zbiory punktów dla poszczególnych powierzchni.

## 7.2 Cel i zakres pracy

Celem pracy opisanej w niniejszym rozdziale była ocena możliwości automatyzacji procesu identyfikowania pojedynczych drzew z chmury punktów, pomiaru ich pierśnic oraz ocena dokładności otrzymanych wyników. W odróżnieniu od innych podobnych prac, podstawowe założenie dotyczyło wykorzystania wyłącznie procedur obliczeniowych

stworzonych bez wykorzystania jakiegokolwiek oprogramowania komercyjnego lub też zewnętrznych bibliotek. Założenie to przyjęto ze względu na dodatkowy aspekt pracy polegający na sprawdzeniu możliwości powstania oprogramowania dostosowanego do wymagań metodycznych i jakościowych dla prac urządzania lasu w Polsce.

Dla prototypu takiego programu określono następujące zadania:

1. Czytanie plików z danymi ze skaningu
2. Przetworzenie danych i utworzenie plików wyjściowych z danymi przetworzonymi z zaznaczeniem pomierzonych elementów
3. Wizualizacja 3D danych wejściowych i wyjściowych

Ze względu na sprawdzenie możliwości praktycznego wykorzystania takiego programu, elementem krytycznym był czas przetworzenia danych z pojedynczej powierzchni, który powinien być na tyle krótki, aby można było przyjąć możliwość przetworzenia danych z kilkuset powierzchni próbnych (liczba powierzchni dla pojedynczego obrębu leśnego na podstawie wzoru z IUL wynosi zwykle 700- 1000) w realnym czasie na przeciętnej klasy sprzęcie komputerowym.

### **7.3 Materiał badawczy**

Do analizy dokładności zastosowanych algorytmów wykorzystano dane pochodzące z siedmiu powierzchni próbnych zlokalizowanych w nadleśnictwie Milicz (podzbiór 30 powierzchni referencyjnych opisanych w części 1; w opracowaniu wykorzystano jedynie kilka powierzchni ze względu na długi czas wielokrotnego przetwarzania danych podczas testowania oprogramowania). Dane referencyjne dla analizowanych powierzchni próbnych pochodziły z pomiaru terenowego. Każde drzewo na powierzchni próbnej ma określony azymut i odległość od środka powierzchni. Pierśnice drzew zmierzone są z dokładnością do 1 mm. Wielkość powierzchni próbnych i sposób pomiaru pierśnic zgodny jest z metodyką przyjętą podczas prac urządzania lasu (IUL 2003). Pliki z chmurami punktów powstały poprzez jednokrotny pomiar wykonany ze środka powierzchni za pomocą skanera FARO LS880. Częstotliwość skanowania wynosiła 120 kHz, poziomy kąt skanowania - 360° a kąt pionowy - 320°

### **7.4 Metodyka**

Prototyp programu komputerowego napisany został w języku C++. Możliwe jest skompilowanie programu pod dowolnym systemem operacyjnym.

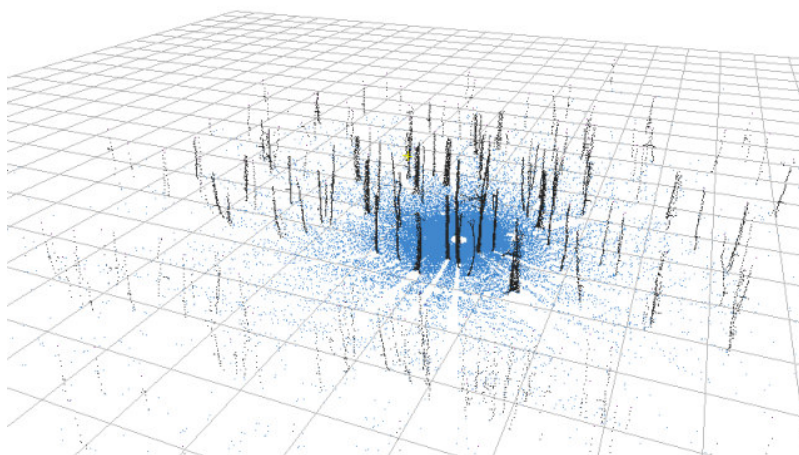
Program działa w 3 odrębnych fazach:

- modelowanie terenu
- grupowanie punktów
- identyfikacja i pomiar drzew

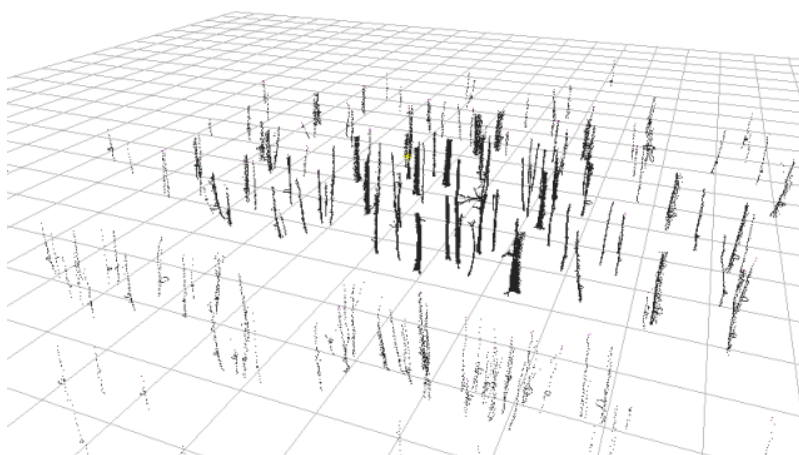
W algorytmie bardzo duży nacisk położono na identyfikowanie i wyodrębnianie grup punktów. Grupowanie pozwala na użycie lepszych aproksymacji średnicy pnia, zwiększa wiarygodność znalezionych wyników i pozwala na przybliżenie pierśnicy na podstawie innych fragmentów drzewa, jeśli pień na wysokości pierśnicy jest zasłonięty. Ponadto, podejście to daje dużo większe możliwości rozwoju technologii, pozwala na analizowanie kształtu całego pnia – a zatem w przyszłości możliwe będzie przeprowadzanie dokładniejszych pomiarów miąższości w oparciu o całą bryłę drzewa, a może również prosta identyfikacja gatunku.

#### *Modelowanie terenu:*

Na obszarze objętym skanowaniem (ograniczonym przez maksymalne i minimalne wartości X i Y) tworzona jest siatka prostokątów modelujących ukształtowanie terenu. Wysokość każdego prostokąta określona jest na podstawie pięciu najmniejszych wartości Z (wysokość) dla punktów znajdujących się w zasięgu tego prostokąta, a jego wymiary poziome wynikają z podziału obszaru na siatkę 200 na 200 prostokątów. W przypadku większego zróżnicowania terenu siatka może być zagęszczana. Punkty znajdujące się na wysokości do 5 cm od poziomu siatki uznawane są za część terenu. Dzięki temu nawet nieregularny kształt powierzchni zostanie poprawnie odfiltrowany i nie przeszkadza w dalszych obliczeniach.



**Ryc. II.11. Punkty zakwalifikowane jako teren (kolor niebieski)**



**Ryc. II.12 Chmura punktów po odfiltrowaniu terenu**

### *Grupowanie punktów*

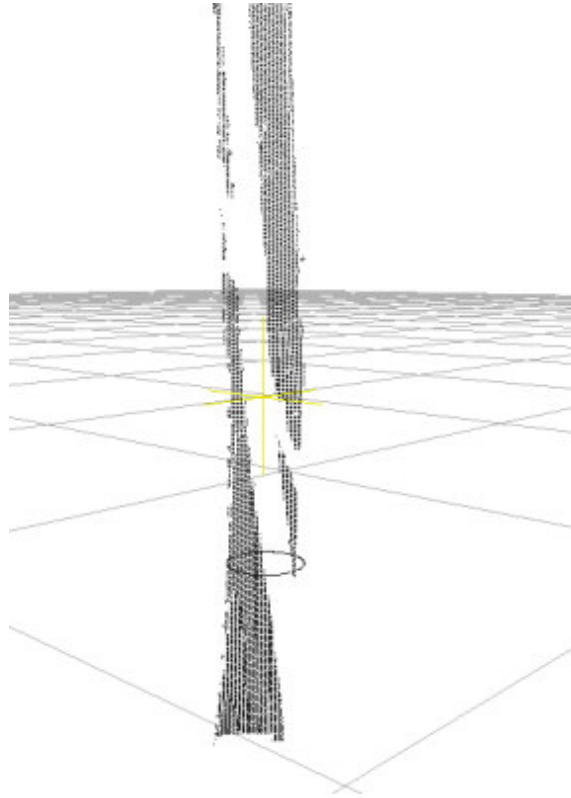
Proces ten odbywa się w dwóch fazach: najpierw tworzone są grupy punktów znajdujących się w niewielkich odległościach od siebie, po czym następuje łączenie pobliskich grup.

Dla każdego punktu szukane są pobliskie grupy, w zasięgu ustalonego promienia, po czym punkt przyłączany jest do najbliższej z nich. Jeśli nie zostanie znaleziona żadna taka grupa, to tworzona jest nowa zawierająca tylko ten punkt. W czasie poszukiwania, punkty posortowane są rosnąco ze względu na wysokość nad poziom terenu – a zatem grupy budowane są od dołu. Ze względu na postawiony cel, jakim jest pomiar pierśnicy, grupowanie zatrzymuje się na wysokości 5 m nad poziomem gruntu. Wraz z przesuwaniem się w górę, zasięg poszukiwania najbliższych grup jest stopniowo zmniejszany, aby do grup będących drzewami zminimalizować dołączanie szumu, którego ilość rośnie wraz z wysokością nad poziomem gruntu. Mały promień poszukiwań gwarantuje łączenie w grupy tylko punktów o dużym zagęszczeniu.

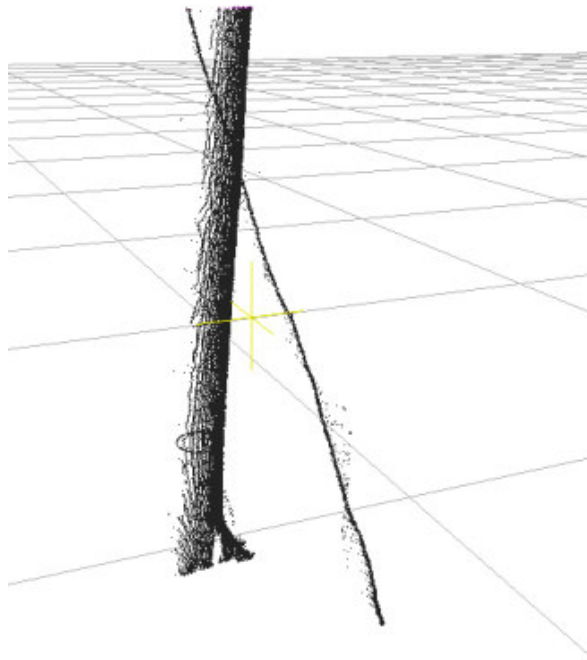
Przy odpowiednich strukturach danych, pozwalających na sprawne szukanie najbliższych grup, algorytm ten jest bardzo szybki – jednak duże skupiska punktów, np. drzewa, mogą zostać odnalezione jako parę niezależnych grup. Dzieje się tak, jeśli na samym początku utworzone zostaną niezależne grupy dla paru różnych punktów pnia. Problem ten naprawia kolejna faza: sklejanie grup. Zanim to jednak nastąpi, przeprowadzane jest wstępne filtrowanie szumu przez usuwanie grup o zbyt małej liczebności.

Sklejanie grup jest procesem bardzo prostym: dla każdej grupy szukane są grupy najbliższe względem niej, po czym dla każdej z grup następuje sprawdzenie, czy posiada ona punkty oddalone o nie więcej niż 5cm od grupy pierwotnej. Jeśli warunek jest spełniony, to następuje sklejenie.

Grupa powstała po sklejeniu staje się potencjalnym drzewem – o ile ma wystarczająco dużo punktów (co najmniej 500), jest wystarczająco wysoka (przynajmniej 2 m) oraz nie unosi się w powietrzu (tzn. posiada punkty dość blisko poziomemu gruntu, nie wyżej niż 1 m). Grupy nie spełniające tych warunków są traktowane jako szum. Parametry grupowania i sklejanie grup zostały dobrane doświadczalnie, na zasadzie kompromisu między łączeniem pobliskich drzew w jedną grupę, a nie łączeniem częściowo przesłoniętych drzew.



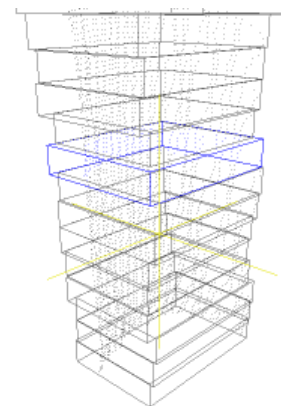
**Ryc. II.13 Przesłonięte drzewo, poprawnie zakwalifikowane jako jedna grupa**



**Ryc. II.14 Pobliskie drzewa zakwalifikowane jako jedna grupa (z poprawnie znaną pierśnicą)**

### *Identyfikacja i pomiar drzew:*

Potencjalne drzewa dzielone są poziomo na sekcje o grubości 10 cm. Jeśli utworzony kawałek ma zbyt mało punktów (co skutkowałoby niską skutecznością aproksymacji), łączony jest ze znajdującym się powyżej. Punkty każdej takiej sekcji rzutowane są na płaszczyznę, a następnie przeprowadzona zostaje na nich zmodyfikowana wersja Transformaty Hougha (Aschoff i Spiecker 2004) z paroma dodatkowymi usprawnieniami.

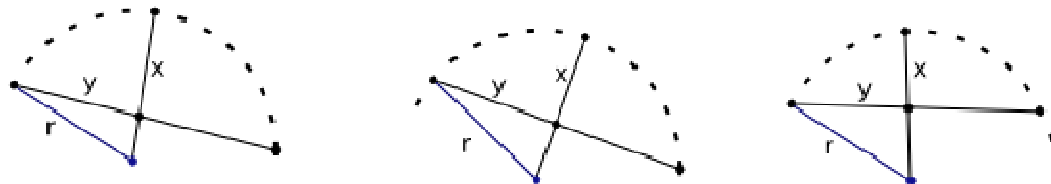


Dla każdej sekcji najpierw liczona jest przybliżona wartość promienia. Przybliżanie to ma duże znaczenie wydajnościowe: właściwy promień szukany jest przy użyciu Transformaty Hougha z dokładnością do 1 cm, dla zakresu promieni zależnego od wcześniej znalezionej wartości przybliżonej. Konkretnie, szukany jest promień w przedziale wartości od 10 cm mniej do 10 cm więcej niż pierwszy przybliżony promień. Czas działania Transformaty Hougha jest dość długi, więc istotne jest ograniczenie zakresu poszukiwań promienia. Poszczególne sekcje traktowane są inaczej w zależności od tego, czy jest to podstawa drzewa (pierwsza sekcja, najbliższej ziemi), czy dowolna wyższa.

Sporym problemem okazało się znalezienie przybliżonej wartości promienia dla podstawy (segmentu najbliższej ziemi). Jedną z przyjętych koncepcji polegała na wykorzystaniu geometrii analitycznej. Dla podstawy najpierw liczona była otoczka wypukła (aby zminimalizować wpływ nieregularności kształtu pnia na wynik), po czym algorytm sprawdzał, czy kawałek jest pełnym kołem, czy też łukiem.

W przypadku pełnego koła znalezienie promienia jest bardzo proste, dla paru losowo wybranych punktów znajdowany był punkt najbardziej odległy (leżący po przeciwnej stronie okręgu), dzięki czemu można było otrzymać średnicę okręgu. Wynikiem była mediana znalezionych wartości podzielona przez 2.

W przypadku łuku, przybliżony promień znajdowany był na podstawie wzoru geometrycznego, również na podstawie paru próbek, z których później liczona była mediana. Przybliżenie polegało na wybraniu dwóch punktów (algorytm wybierał pary najbardziej odległe) oraz wyznaczeniu środka cięciwy określonej przez te punkty. Jeżeli przez środek cięciwy poprowadzi się odcinek do niej prostopadły, to można łatwo wyznaczyć promień oraz środek ze znanych wartości ( $x$  oraz  $y$  na schemacie).



$$(r-x)^2 + y^2 = r^2$$

Metoda ta była bardzo skuteczna dla dobrze zeskanowanych drzew, jednak w pojedynczych przypadkach, kiedy w jednej grupie znajdowały się połączone dwa drzewa lub drzewa połączone z fragmentami młodego pokolenia, źle wyznaczony przybliżony promień powodował błędne działanie dalszej części algorytmu. W praktyce skuteczniejsza okazała się dużo prostsza metoda, polegająca na policzeniu zasięgu punktów (prostokąta, w którym wszystkie punkty się zawierają) i przyjęcia jako przybliżonego promienia połowy większego z wymiarów (długości lub szerokości). Teoretycznie, wydaje się, że powinny pojawiać się przypadki, kiedy ta metoda może znacznie zaniżyć startową wartość, jednak w praktyce nie wystąpił ani jeden taki przypadek – dlatego też w programie wykorzystana została właśnie ta metoda. W celu zabezpieczenia algorytmu w sytuacji, gdy startowy promień istotnie różni się od rzeczywistego, zakres przeszukiwanych promieni dla pierwszej sekcji jest dwukrotnie zwiększany. Dla sekcji znajdujących się wyżej, jako promień przybliżony przyjmowany jest promień sekcji znajdującej się bezpośrednio pod nią.

Po zastosowaniu Transformaty Hougha, z przybliżonym promieniem jako parametrem, otrzymujemy środek oraz promień, wyznaczone z precyzją do 1cm. Następnym krokiem jest kalibracja wyniku, tak, aby otrzymać większą precyzję. Doświadczalnie sprawdzone zostały dwie metody: uproszczona wersja Transformaty Hougha oraz algebraiczne rozwiązywanie nieliniowego układu dla problemu najmniejszych kwadratów.

Pierwsza metoda polega na wyznaczeniu kwadratu, w którym znajduje się środek okręgu (na podstawie wyniku działania Transformaty Hougha z poprzedniej fazy), podzieleniu go na siatkę kwadratów o boku 1mm, a następnie dla każdego pola siatki sprawdzenie, czy lepiej przybliży środek od pozostałych, poprzez ponowne wykorzystanie idei stojącej za Transformatą Hougha. W ten sposób można uzyskać dokładność 1mm.

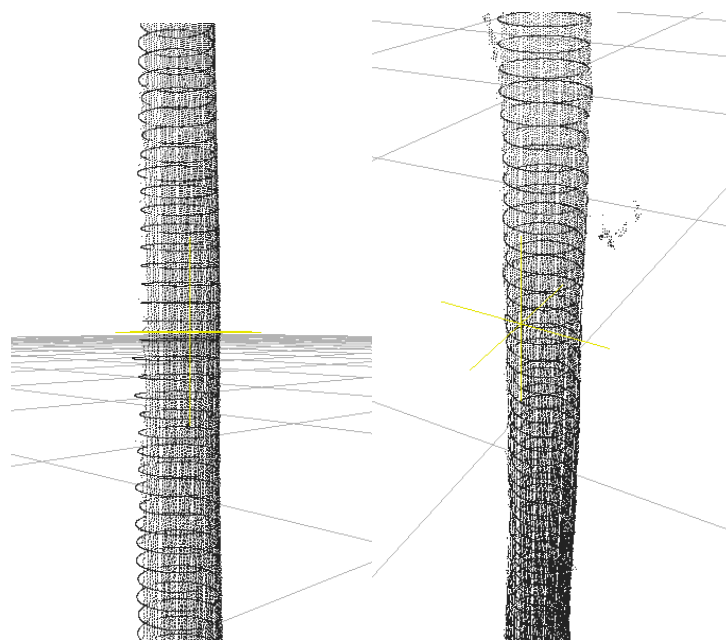
Drugie podejście jest czysto matematyczne i sprowadza się do iteracyjnego rozwiązania nieliniowego układu równań opisujących koło (Chernov 2008). Podejście to

wykorzystuje metodę Levenberga-Marquardta rozwiązywania tego typu równań. Startowymi parametrami algorytmu są przybliżony środek i promień znalezione metodą Transformaty Hougha w poprzedniej fazie. Metody iteracyjne łączą się z reguły z dużymi kosztami czasowymi i są odradzane w podobnych zastosowaniach, jednak przy odpowiednich parametrach startowych, dobrze przybliżających wynik (jak w tym przypadku), algorytm bardzo szybko znajduje rozwiązanie.

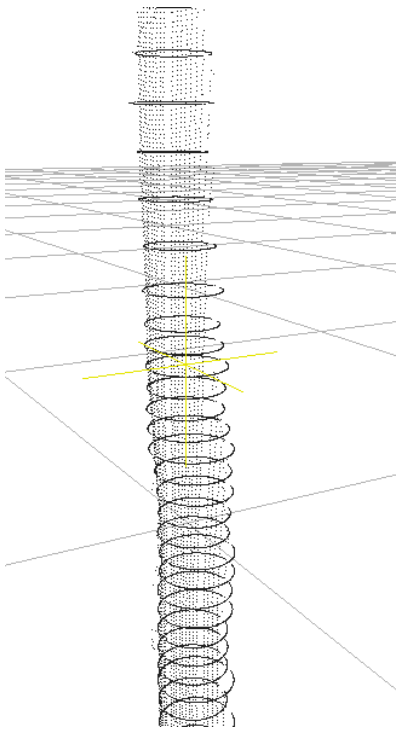
Obie te metody mają swoje wady i zalety, praktyczne testy nie wykazały zdecydowanej wyższości którejkolwiek z nich. Ze względu na zbliżoną skuteczność, w programie zaimplementowane są obydwie i można je przełączać poprzez podanie parametru.

#### *Wyznaczenie pierśnicy*

Po zakończeniu poprzedniej fazy wszystkie drzewa są już zmierzone, a zatem wystarczy odczytać średnicę wyznaczoną dla sekcji na wysokości pierśnicy. Nawet, jeśli drzewo było na tej wysokości przesłonięte, to algorytm odnajdywania średnic uśrednił wynik z większej liczby punktów. Jak wspomniano wcześniej, algorytm wyznacza średnice pnia na większej długości (obecnie 5m ale możliwe jest wyznaczenie na całej długości pnia). Odpowiedni moduł wizualizacji 3D pozwala obejrzeć zlokalizowane drzewa oraz wyznaczone średnice:



**Ryc. II.15** Pomiary średnicy w kolejnych sekcjach pnia



**Ryc. II.16. Wraz z wysokością zmniejsza się liczba punktów, więc sekcje stają się szersze**

#### *Algorytmy korygujące*

Podczas analizy przeprowadzonych pomiarów stwierdzono szereg błędów wynikających ze szczególnego kształtu drzewa lub bliskiego sąsiedztwa gałęzi krzewów lub sąsiedniego pnia. W celu wyeliminowania błędów powstających podczas tworzenia grup, zastosowano mechanizm uśredniający dane pomiarowe z całego pnia i filtrujący punkty wokół średnic wyraźnie odbiegających od reszty. Poszczególne wyniki pomiaru drzewa są uśredniane przy wykorzystaniu regresji prostoliniowej. Jest to uproszczenie zakładające, że drzewo na badanym odcinku (od 30 cm nad ziemią do wysokości 5m) jest stożkiem ściętym. Oczywiście, możliwe jest tutaj zastosowanie bardziej odpowiednich funkcji, oddających charakter krzywej morfologicznej pnia, jednak równanie prostej ma tym przypadku tę zaletę, że trudniej ulega zniekształceniu na podstawie pojedynczych, odstających danych. W miejscach, gdzie wyznaczone średnice wykazują różnicę większą od 20% w stosunku do wartości wyliczonych z równania regresji, następuje odfiltrowanie punktów.

Po odfiltrowaniu wykonywana jest ponownie procedura wyznaczania średnic. Pierśnica wyznaczana jest wprost z pomiaru wykonanego dla sekcji na odpowiedniej wysokości lub też możliwe jest powtórne wyliczenie równania regresji i przyjęcie jako wyniku wartości uśrednionej.

## 7.5 Wyniki

Na badanych powierzchniach próbnych dokonano porównania pomiaru referencyjnego z danymi uzyskanymi po przetworzeniu chmury punktów. Tabela II.5 przedstawia porównanie danych referencyjnych z danymi uzyskanymi ze skaningu laserowego przy wykorzystaniu dwóch różnych algorytmów: geometrycznego i algebraicznego. W tabeli II.8 znajdują się wyniki porównania podstawowego algorytmu z algorytmem uśredniającym. Tabela II.11 zawiera porównanie wyników z podstawowego modułu obliczeniowego z dwoma wariantami korekty danych – filtrowanie na podstawie regresji i uśredniania wyników.

Tabela II.5. Wyniki dla powierzchni numer 1

Nr	gat	Wys	d1.3 pom	d1.3 geo	d1.3 alg	geo – pom	alg – pom
1	Db	362	493	518	532	25	39
2	GB	146	94	104	91	10	-3
3	Db	333	554	530	515	-24	-39
4	Gb	149	107	116	130	9	23
5	Gb	134	95	138	85	43	-10
6	Gb	121	57			-57	-57
7	Gb	151	128	154	129	26	1
8	Gb	154	92	113	77	21	-15
9	Gb	230	186	197	203	11	17
10	Gb	110	71	60	68	-11	-3
11	Gb	178	114	106	109	-8	-5
12	Db	363	528	490	463	-38	-65
13	Gb	177	142	146	148	4	6
14	Św	105	130	113	123	-17	-7
15	Gb	138	96	139	155	43	59

<b>Nr</b>	<b>gat</b>	<b>Wys</b>	<b>d1.3 pom</b>	<b>d1.3 geo</b>	<b>d1.3 alg</b>	<b>geo – pom</b>	<b>alg – pom</b>
16	Db	390	785	768	790	-17	5
17	Jw	172	89	172	208	83	119
18	Kl	202	188	188	207	0	19
19	Db	425	700	743	763	43	63
20	Gb	99	183	220	238	37	55
21	Jw	198	182	198	206	16	24
22	Bk	256	266	293	263	27	-3
23	Bk	151	112	113	98	1	-14
24	Gb	205	165	185	182	20	17
25	Gb	173	142	201	175	59	33
26	Db	373	730	758	742	28	12
27	Gb	123	85	113	86	28	1
28	Jw	265	255	102		-153	-255
29	Gb	96	74	75	76	1	2
30	Db	315	775	663	611	-112	-164
31	Św	105	106	106	188	0	82
32	Gb	159	106	91	91	-15	-15
33	Św	87	95	81	92	-14	-3
34	Jw	157	117	126	112	9	-5
35	Gb	117	83	80	87	-3	4
36	Św	86	101	129	90	28	-11
37	Db	344	607	667	682	60	75
38	Kl	144	89	148	165	59	76

Nr	gat	Wys	d1.3 pom	d1.3 geo	d1.3 alg	geo – pom	alg – pom
39	Gb	173	135	221	165	86	30
40	Db	297	612	937	975	325	363
41	Gb	101	81	72	61	-9	-20
<b>Średnia arytm.</b>			238	259	261	15	11
<b>Suma</b>						624	431
<b>Odch. stand.</b>						65.57	83.38
<b>Dprz [cm]</b>			32.7	35.2	35.7		
<b>G [m2/ha]</b>			68.82	77.76	77.94		
<b>Różnica [%]</b>				13.0	13.2		

Poszczególne kolumny tabeli zawierają następujące dane:

**Nr** : numer kolejny

**gat** : kod gatunku

**wys** : referencyjna wysokość drzewa

**d1.3 pom** : pierśnica referencyjna (zmierzona średnicomierzem)

**d1.3 geo** : pierśnica wyznaczona automatycznie metodą geometryczną (Transformata Hougha)

**d1.3 alg** : pierśnica wyznaczona algebraicznie

**geo – pom** : różnica pomiędzy pierśnicą wyznaczoną geometrycznie a pierśnicą referencyjną

**alg – pom** : różnica pomiędzy pierśnicą wyznaczoną algebraicznie a pierśnicą referencyjną

**Średnia arytm.** : średnia arytmetyczna liczona dla poszczególnych pierśnic oraz różnic pierśnic

**Suma** : suma dla różnic pierśnic

**Odch. stand.** : odchylenie standardowe dla różnic pierśnic

**Dprz** : przeciętna pierśnica liczona jako średnia kwadratowa pierśnic

**G** : pole przekroju pierścicowego

**Różnica:** procentowa różnica dla pól przekroju pierścicowego.

Kolejne tabele przedstawiają wyniki porównania danych referencyjnych z danymi uzyskanymi ze skaningu laserowego przy wykorzystaniu algorytmu geometrycznego (Transformata Hougha):

Tabela II.6. Powierzchnia nr 2

nr	gat	wys	d1.3 pom	d1.3 geo	geo - pom
1	Bk	353	335	393	58
2	Bk	345	374	444	70
3	Bk	348	358	427	69
4	Bk	322	282	340	58
5	Bk	327	478	564	86
6	Bk	232	181	203	22
7	Bk	303	260	241	-19
8	Bk	314	323	309	-14
9	Bk	270	387	451	64
10	Bk	300	315	304	-11
11	Bk	302	230	220	-10
12	Bk	280	268	318	50
13	Bk	294	299	317	18
14	Bk	305	320	357	37
15	Bk	310	509	436	-73
16	Bk	308	269	261	-8
17	Bk	303	417	382	-35
18	Bk	274	319	324	5

nr	gat	wys	d1.3 pom	d1.3 geo	geo - pom
19	Bk	280	308	299	-9
20	Bk	317	251	279	28
21	Bk	279	251	319	68
<b>Średnia arytm.</b>			321	342	22
<b>Suma</b>					476
<b>Odch.stand.</b>					42.22
<b>Dprz [cm]</b>			33.0	35.3	
<b>G [m2/ha]</b>			44.87	51.3	
<b>Różnica [%]</b>				14.33	

Nazwy kolumn jak w tabeli II.5.

Tabela II.7. Powierzchnia nr 3

nr	gat	wys	d1.3 pom	d1.3 geo	geo - pom
1	Db	293	375	599	224
2	Db	321	426	481	55
3	So	314	508	493	-15
4	Db	313	416	418	2
5	Db	315	450	463	13
6	Db	301	360	359	-1
7	Db	291	344	358	14
8	Db	287	392	389	-3
9	Db	320	323	440	117
10	Db	324	458	474	16
11	Db	331	478	505	27
12	Db	336	563	586	23

nr	gat	wys	d1.3 pom	d1.3 geo	geo - pom
13	Db	297	507	530	23
14	Bk	325	454	452	-2
<b>Średnia arytm.</b>			432	468	35
<b>Suma</b>					493
<b>Odch.stand.</b>					63.36
<b>Dprz [cm]</b>			43.8	47.3	
<b>G [m2/ha]</b>			42.1	49.21	
<b>Różnica [%]</b>				16.89	

Nazwy kolumn jak w tabeli II.5.

Tabela II.8. Powierzchnia nr 5

Nr	gat	wys	d1.3 pom	d1.3 geo	geo - pom	d1.3 geo śr	geo śr - pom
1	Bk	334	689	871	182	585	161
2	Bk	318	508	839	331	637	77
3	Bk	350	695	612	-83	588	-58
4	Bk	335	499	584	85	437	89
5	Bk	330	469	371	-98	718	-32
6	Bk	352	600	674	74	585	118
<b>Średnia arytm.</b>			577	659	82	635	59
<b>Suma</b>					491		355
<b>Odch.stand.</b>					162,3		78.61
<b>Dprz [cm]</b>			58,4	67,9		64,8	
<b>G [m2/ha]</b>			32,12	43,51		39,63	
<b>Różnica [%]</b>				35,46		18,95	

**d1.3 geo śr** – średnica wyznaczona automatycznie z uwzględnieniem uśrednienia z różnych wysokości

Pozostałe nazwy kolumn jak w tabeli II.5.

Tabela II.9. Powierzchnia nr 17

Nr	gat	wys	d1.3 pom	d1.3 geo	geo - pom
1	So	207	245	264	19
2	So	205	270	301	31
3	So	179	186	186	0
4	So	203	327	327	0
5	So	195	240	257	17
6	So	201	250	230	-20
7	So	205	217	215	-2
8	So	203	243	279	36
9	So	206	273	320	47
10	So	200	240	234	-6
11	So	168	178	232	54
12	So	173	212	205	-7
13	So	180	273	293	20
<b>Średnia arytm.</b>			243	257	15
<b>Suma</b>					189
<b>Odch.stand.</b>					22.68
<b>Dprz [cm]</b>			24.6	26.1	
<b>G [m2/ha]</b>			20.52	23.13	
<b>Różnica [%]</b>				12.72	

Nazwy kolumn jak w tabeli II.5.

Tabela II.10. Powierzchnia nr 19

<b>nr</b>	<b>Gat</b>	<b>wys</b>	<b>d1.3 pom</b>	<b>d1.3 geo</b>	<b>geo - pom</b>
1	So	227	337	372	35
2	So	225	311	336	25
3	So	233	295	311	16
4	So	232	260	300	40
5	So	200	237	286	49
6	So	225	221	233	12
7	So	229	363	349	-14
8	So	200	256	238	-18
9	So	217	349	334	-15
10	So	214	265	297	32
11	So	198	252	217	-35
12	So	213	312	338	26
13	So	196	231	222	-9
14	So	225	340	378	38
15	So	218	295	297	2
16	So	213	263	342	79
17	So	234	305	328	23
18	So	232	266	298	32
19	So	240	286	281	-5
20	So	227	320	303	-17
21	So	242	293	277	-16

nr	Gat	wys	d1.3 pom	d1.3 geo	geo - pom
22	So	227	223	199	-24
23	So	234	327	248	-79
24	So	232	325	305	-20
25	So	258	320	306	-14
26	So	247	325	294	-31
27	So	251	289	280	-9
28	So	228	312	310	-2
29	So	220	222	246	24
30	So	210	235	0	-235
<b>Średnia arytm.</b>			289	263	-27
<b>Suma</b>					-373
<b>Odch.stand.</b>					65.89
<b>Dprz [cm]</b>			29.1	29.7	
<b>G [m2/ha]</b>			39.82	40.28	
<b>Różnica [%]</b>				1.16	

Nazwy kolumn jak w tabeli II.5.

Tabela II.11. Powierzchnia nr 23

Nr	Gat	wys	d1.3 pom	d1.3 geo	geo - pom	d1.3 geo md	geo md - pom	d1.3 geo śr	geo śr - pom
1	So	140	151	197	46	154	3	170	19
2	So	126	105	101	-4	110	5	125	20
3	So	136	170	206	36	212	42	197	27

Nr	Gat	wys	d1.3 pom	d1.3 geo	geo – pom	d1.3 geo md	geo md – pom	d1.3 geo śr	geo śr – pom
4	So	143	116	101	-15	128	12	128	12
5	So	150	180	188	8	172	-8	190	10
6	So	135	134	146	12	120	-14	141	7
7	So	163	183	181	-2	198	15	199	16
8	So	141	114	108	-6	112	-2	129	15
9	So	150	234	226	-8	184	-50	227	-7
10	So	133	120	110	-10	130	10	130	10
11	So	119	93	109	16	143	50	123	30
12	So	135	140	151	11	159	19	153	13
13	So	137	143	162	19	150	7	148	5
14	So	128	118	118	0	108	-10	113	-5
15	So	150	150	188	38	179	29	184	34
16	So	140	120	138	18	137	17	153	33
17	So	131	144	146	2	148	4	147	3
18	So	139	114	140	26	133	19	146	32
19	So	125	103	128	25	148	45	148	45
20	So	153	186	199	13	189	3	212	26
21	So	147	194	159	-35	192	-2	192	-2
22	So	139	115	151	36	157	42	167	52
23	So	146	145	174	29	165	20	164	19
24	So	147	129	157	28	147	18	149	20
25	So	146	133	198	65	139	6	142	9
26	So	150	188	195	7	185	-3	188	0

Nr	Gat	wys	d1.3 pom	d1.3 geo	geo – pom	d1.3 geo md	geo md – pom	d1.3 geo śr	geo śr – pom
27	So	101	73	70	-3	103	30	95	22
28	So	148	154	226	72	188	34	174	20
29	So	139	133	142	9	142	9	176	43
30	So	154	195	203	8	181	-14	216	21
31	So	157	175		-175		-175		-175
32	So	147	176		-176		-176		-176
33	So	135	119	111	-8	126	7	141	22
34	So	128	120	83	-37	116	-4	120	0
35	So	127	113	137	24	146	33	134	21
36	So	141	137	120	-17	144	7	137	0
37	So	148	193	210	17	205	12	209	16
38	So	146	134	230	96	167	33	178	44
<b>Średnia arytm.</b>			145	141	-4	145	2	151	8
<b>Suma</b>					-61		75		309
<b>Odch.stand.</b>					75.01		45.98		45.47
<b>Dprz [cm]</b>			14.7	16.2		15.6		16.3	
<b>G [m2/ha]</b>			32.35	36.87		34.39		37.44	
<b>Różnica [%]</b>				13.97		5.93		13.59	

**d1.3 geo md** – pierśnica wyznaczona po odfiltrowaniu odsuniętych punktów

**d1.3 geo śr** – pierśnica wyznaczona po uśrednieniu kolejnych średnic

Pozostałe nazwy kolumn jak w tabeli II.5.

Tabela II.12. Zbiorcze zestawienie wyników

Nr pow	Pow [ha]	Gat pan	Wiek	D <sub>ref</sub> [cm]	D <sub>aut</sub> [cm]	σ <sub>D</sub> [cm]	G <sub>ref</sub> [m <sup>2</sup> /ha]	G <sub>aut</sub> [m <sup>2</sup> /ha]	R [%]
1	0.05	Db	142	32.7	35.2	6.5	68.82	77.76	13.0
2	0.04	Bk	87	33.0	35.3	4.2	44.87	51.30	14.3
3	0.05	Db	142	43.8	47.3	6.3	42.10	49.21	16.9
5	0.05	Bk	152	58.4	64.8	7.9	32.12	39.63	18.9(35.5)
17	0.03	So	80	24.6	26.1	2.2	20.52	23.13	12.7
19	0.05	So	107	29.1	29.7	6.5	39.82	40.28	1.2
23	0.02	So	42	14.7	15.6	7.5	32.35	34.39	5.9(14.0)

Poszczególne kolumny tabeli II.12 zawierają następujące dane:

**Nr pow** : numer powierzchni próbnej

**W pow** : wielkość powierzchni próbnej w ha

**Gat pan** : gatunek panujący w drzewostanie

**Wiek** : wiek gatunku panującego

**D<sub>ref</sub>**: przeciętna pierśnica wg pierśnic referencyjnych

**D<sub>aut</sub>** : przeciętna pierśnica wg pierśnic wyznaczonych przez program

**σ<sub>D</sub>** : odchylenie standardowe dla różnic pomiędzy pierśnicami

**G<sub>ref</sub>** : pole przekroju pierśnicowego wg pierśnic referencyjnych

**G<sub>aut</sub>** : pole przekroju pierśnicowego wg pierśnic wyznaczonych przez program

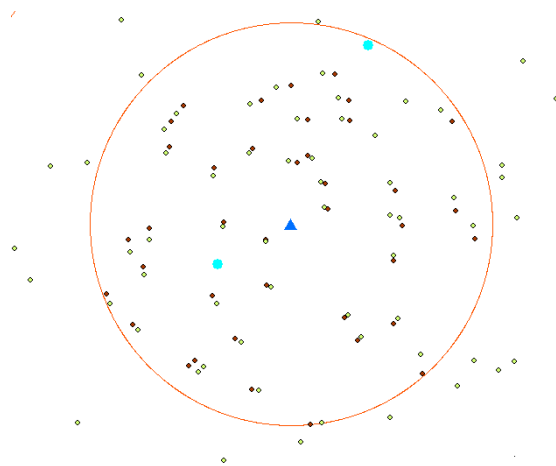
**R** – Procentowa różnica pomiędzy polem przekroju pierśnicowego obliczonym z danych wyznaczonych przez program i referencyjnych

*Lokalizacja drzew*

Na wszystkich badanych powierzchniach drzewa są rozpoznawane w stopniu bardzo dobrym Na trzech spośród badanych powierzchni (2, 3, 17) odnajdywanych jest 100% drzew. Na powierzchni nr 1 nie zostało odnalezione jedno drzewo nr 6 (obydwoma metodami) o

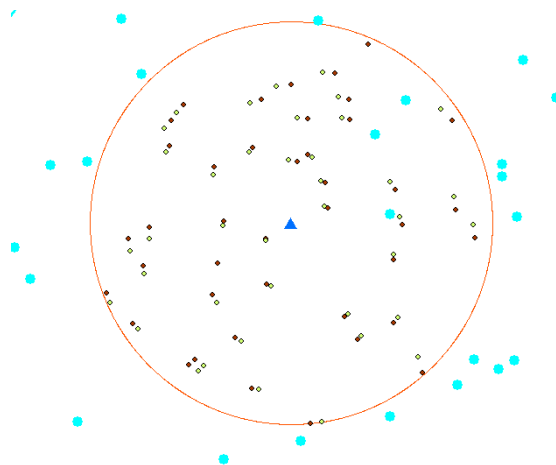
bardzo małej pierśnicy (5.6 cm). Metoda algebraiczna nie była w stanie wyznaczyć promienia również dla drzewa nr 28 (metoda geometryczna wykazała dla tego drzewa duży błąd).

Na powierzchni nr 19 pominięte zostało jedno drzewo (nr 30) a na powierzchni 23 dwa drzewa (nr 31, nr 32). Analiza lokalizacji pominiętych drzew wykazuje, że znajdują się one zwykle na obrzeżach powierzchni i zasłonięte są w całości innym drzewem leżącym bliżej środka. Sytuację na powierzchni numer 1 obrazuje poniższy rysunek:



**Ryc. II.17 Drzewa nie zlokalizowane na powierzchni nr 1 (kolor niebieski)**

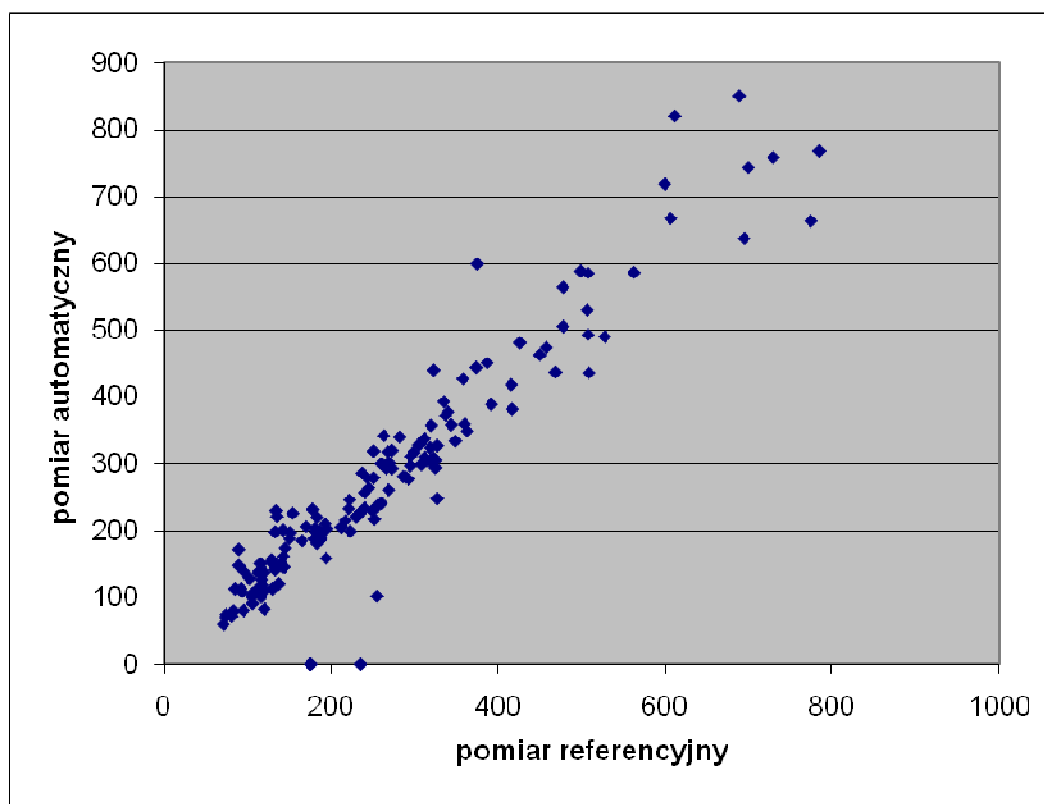
Na żadnej powierzchni nie stwierdzono drzew nadmiarowych, poza drzewami o pierśnicach poniżej 7 cm. Lokalizację takich drzew na powierzchni nr 1 przedstawiono poniżej:



**Ryc. II.18 Drzewa zlokalizowane na powierzchni nr 1 bez odpowiedników w danych referencyjnych (kolor niebieski)**

### *Pomiar pierśnic*

Pierśnice drzew określone przy pomocy programu różnią się od pierśnic referencyjnych w zakresie od 0 mm (np. pow. nr 17, drzewa nr 3 i 4) do 325 mm (pow. nr 1 drzewo nr 40). Większe różnice dotyczą drzew grubszych. Zdecydowana większość odpowiadających sobie par pierśnic wykazuje dużą zbieżność. Poniższy wykres przedstawia tę zależność dla wszystkich drzew z siedmiu badanych powierzchni próbnych. Współczynnik korelacji dla przedstawionych danych wynosi 0.95.



**Ryc. II.19 Zależność wielkości pierśnic wyznaczonych przez program i pierśnic referencyjnych**

Przeciętne pierśnice wyliczone z danych referencyjnych i wyznaczonych przez program różnią się od siebie w zakresie od 6 mm (pow. 19) do 64 mm (pow. 5). Wyliczone na podstawie pierśnic pola przekroju pierśnicowego wykazują różnice procentowe od 1.2% dla powierzchni nr 3 do 18.9% (35.5% bez korekty) dla powierzchni nr 5. We wszystkich

przypadkach zarówno przeciętna pierśnica, jak i pole przekroju pierśnicowego wykazuje wyższe wartości dla danych wyznaczonych przez program.

Porównanie metody geometrycznej i algebraicznej przeprowadzone dla powierzchni nr 1 wykazuje większą zbieżność metody geometrycznej z danymi referencyjnymi. Różnice procentowe pola przekroju to 12.99% i 13.25% dla metod odpowiednio: geometrycznej i algebraicznej. Różnice pierśnic dla metody algebraicznej wykazują również większe zróżnicowanie – odchylenie standardowe wynosi dla tej metody 83.4 mm przy wartości 65.6 dla metody geometrycznej. Co jednak ciekawe, obydwie metody „wpasowania” okręgu w chmurę punktów, choć metodycznie zupełnie różne, dają bardzo zbliżone do siebie wyniki.

Największe błędy pojawiają się w najstarszych drzewostanach, z pierśnicami o dużych wielkościach. Wśród badanych powierzchni próbnych zdecydowanie największymi różnicami pierśnic wyznaczonych i referencyjnych charakteryzuje się powierzchnia nr 5 ze 152 letnim drzewostanem bukowym. Po pierwszy pomiarze automatycznym dla tej powierzchni różnica w polu przekroju wynosiła 35.5. W drugim podejściu zastosowano dla tej powierzchni metodę wyznaczenia średnicy z danych dla całej pomierzonej części pnia. Różnica zmniejszyła się niemal dwukrotnie do wartości 18.9%. W tabeli szczegółowej (Tabela II.8) przedstawiono wyniki z obydwu pomiarów.

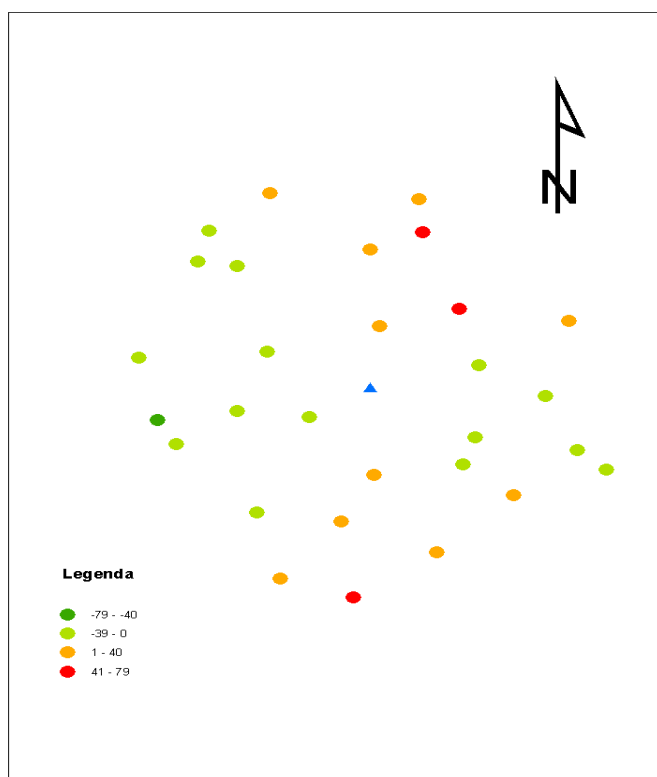
Dla porównania wykonano również pomiar z korektą dla drzewostanu młodszego. W tabeli 7 zestawiono dwie różne formy korekty danych wykonanej na powierzchni nr 23. Również w tym wypadku korekta przyniosła pozytywny efekt. Różnica pierśnicowego pola przekroju zmniejszyła się z 13.97 % na 5.93% w przypadku filtrowania punktów za pomocą równania regresji, a na 13.59% w przypadku uśredniania wielkości średnicy.

## **7.6 Dyskusja**

Na wszystkich powierzchniach obserwuje się zawyżenie wyników w stosunku do danych referencyjnych. Sytuacja ta wynika z kilku elementów, ale podstawowym jest niewłaściwe odnajdywanie środka okręgu i jego promienia na podstawie punktów ze skaningu. Z założenia, elementy te określane są poprzez dopasowanie okręgu do grupy punktów. Kształt przekroju poprzecznego pnia drzewa często dość znacznie odbiega od kształtu koła i w zależności od kierunku pomiaru średnicy, wyniki mogą różnić się dość znacznie. Pomiar referencyjne na powierzchniach, przeprowadzone były zgodnie z metodyką przyjętą w Instrukcji Urządzania Lasu, tzn. pierśnice mierzone były w kierunku łączącym środek drzewa z środkiem powierzchni próbnej. Skaner, ustawiony w środku

powierzchni próbnej, zbiera punkty z części pnia skierowanej do środka drzewa, więc można założyć, że wyznaczone na tej podstawie pierśnica odpowiada kierunkowi pomiaru prostopadłemu do kierunku pomiaru referencyjnego.

Drugim ważnym elementem jest elipsoidalny, a nie okrągły kształt przekroju pni. Dłuższe osie elipsy są zwykle zgodne z kierunkiem panujących wiatrów, a więc w przypadku Polski jest to kierunek E-W. Taką sytuację obserwuje się też na części powierzchni próbnych w nadleśnictwie Milicz. Dla drzew położonych na północ i południe w stosunku do środka powierzchni występują największe błędy dodatnie, natomiast błędy ujemne na wschód i zachód. Dość wyraźnie widać to na powierzchni nr 19:



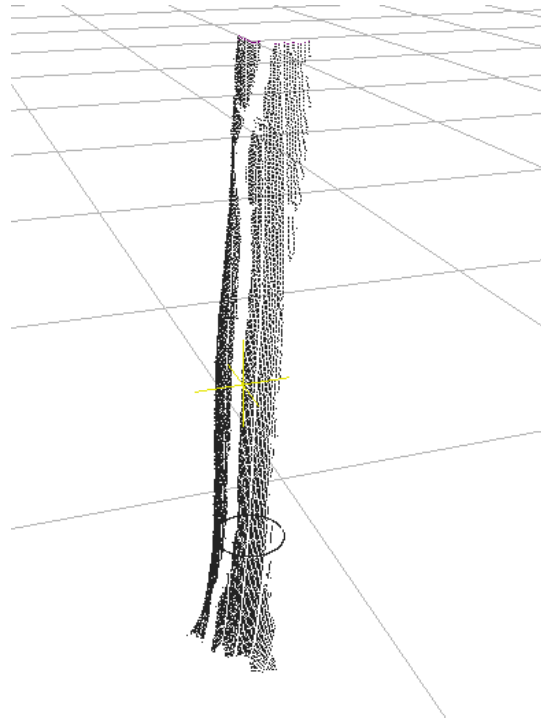
**Ryc. II.20. Rozmieszczenie błędów określania grubości drzew na powierzchni próbnej**

Wspomniane zjawisko powinno jednak dawać w konsekwencji znoszące się błędy, tym czasem na wszystkich badanych powierzchniach widoczna jest tendencja do zawyżania wielkości pierśnic. Zjawisko to można wytłumaczyć dość charakterystycznym układem punktów pochodzących z zeskanowania pnia z jednej tylko strony. Największa liczba punktów znajduje się w płaszczyźnie „czołowej” pnia, przez co tworzony z punktów zarys fragmentu pnia podlega w tym miejscu spłaszczeniu. Duża liczba punktów w „spłaszczonym”

miejscu pnia istotnie wpływa na algorytmy wpasowujące okrąg, a słabo reprezentowane boczne strony mają znacznie mniejszy wpływ. Jest to widoczne na przykładowych rysunkach w dalszej części opracowania. W trakcie pisania aplikacji do automatycznego pomiaru pierśnic drzew podjęto próbę wprowadzania poprawek pozwalających na zmniejszenie systematycznego błędu określania grubości, które zakończyły się częściowym sukcesem. Założeniem podjętych w temacie prac było stworzenie zrębów oprogramowania do automatyzacji pomiarów. Doskonalenie jego algorytmów, w tym metod filtrowania, jest przedmiotem aktualnie prowadzonych prac.

*Drzewa połączone lub znajdujące się bardzo blisko siebie.*

Jednym z problemów są drzewa, które znajdują się bardzo blisko siebie, ponieważ algorytm grupowania może połączyć je w jedną grupę. Zmniejszenie promienia łączenia grup eliminuje ten problem, jednak wówczas drzewa, które są częściowo przesłonięte przez gałęzie lub inne drzewa – i tym samym występują w paru niezależnych kawałkach – zostałyby znalezione jako parę niezależnych grup. Jako że przy połączonych drzewach algorytm znajdowania pierśnic działa poprawnie (znajduje promień tego drzewa, które ma większe zagęszczenie punktów, czyli zazwyczaj po prostu większe drzewo), problem ten nie jest zbyt poważny.

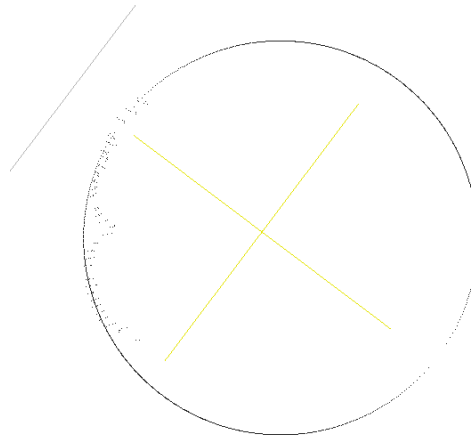


**Ryc. II.21. Wyznaczanie drzewa jako połączonych grup**

#### *Nieregularny kształt przekroju pnia*

Jest to największy problem przy znajdowaniu pierśnic. Nieregularny kształt drzewa może wpłynąć negatywnie na wyniki znajdowania średnicy, zwłaszcza w przypadku, kiedy zeskanowany jest tylko niewielki łuk drzewa. Wklęsły lub spłaszczony fragment pnia, jeśli nie będzie otoczony wystarczająco dużą liczbą punktów wskazujących prawdziwy kształt drzewa, może spowodować znalezienie niepoprawnego promienia lub środka.

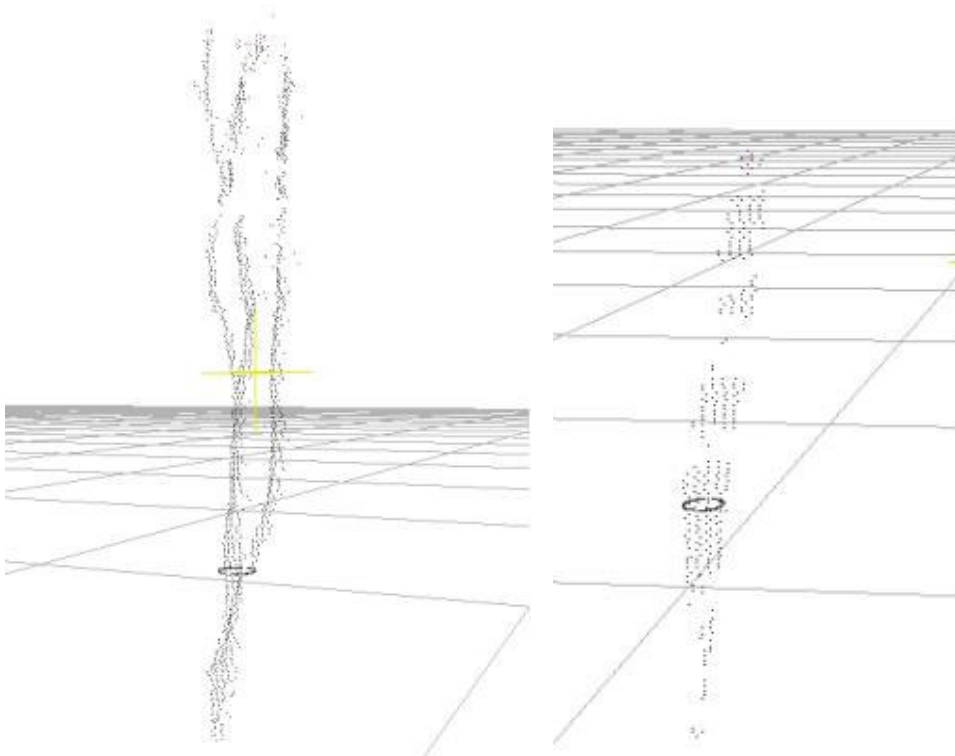
Szczególnie trudne jest kontrolowanie tego typu przypadków, ponieważ znaleziony okrąg może idealnie pasować do większości punktów – jednak znacznie różnić się od prawdziwego pomiaru drzewa. Jest to niedoskonałość metody uśredniania przekroju pnia drzewa za pomocą okręgu,. Niekiedy kształt drzewa uniemożliwia dobre przybliżenie go przez regularną figurę, jaką jest okrąg. Błąd w takim przypadku można znacznie zmniejszyć poprzez zwiększenie ilości danych – np. większą liczbę skanów (Thies i Specker 2004, Henning i Radtke 2006).



**Ryc. II.22. Nieregularny przekrój pnia**

*Drzewa z niewielką liczbą punktów*

Kolejnym problemem są drzewa, które posiadają małą liczbę punktów, która przy nieregularnym rozkładzie prowadzi do niepoprawnych wyników. Dotyczy to przede wszystkim drzew bardzo oddalonych od skanera.

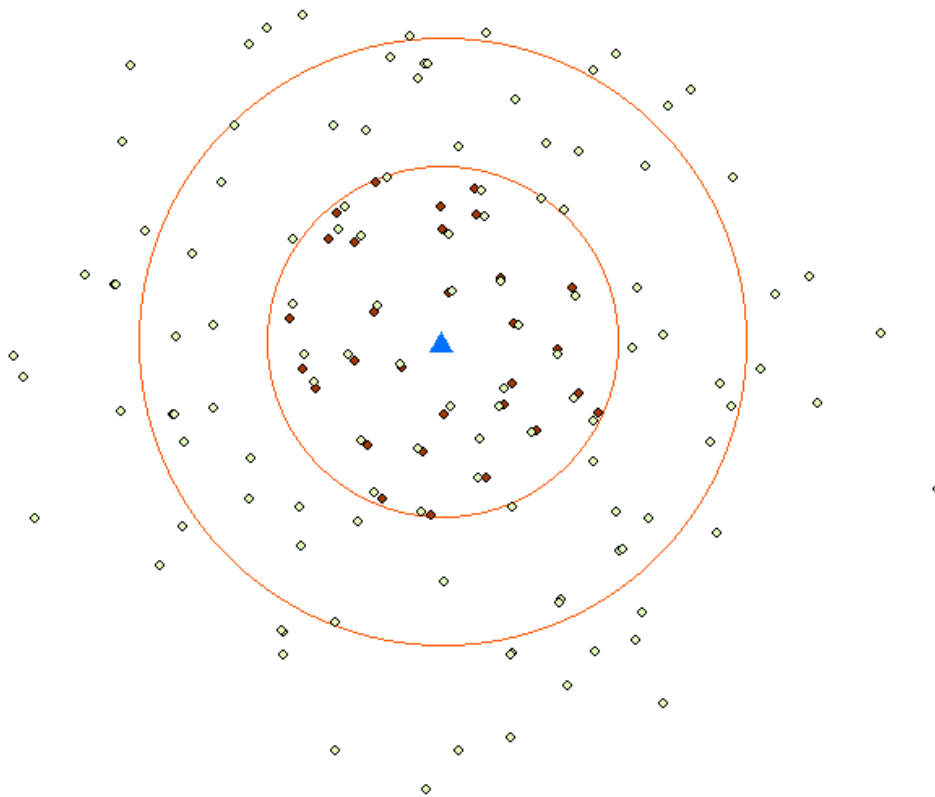


**Ryc. II.23. Drzewa oddalone około 20m od środka powierzchni próbnej**

Z drugiej strony jednak, większość drzew nawet z bardzo niewielką liczbą punktów, zostaje poprawnie zlokalizowana, a pierśnice są względnie dokładne, nawet przy dużej odległości od skanera. Problematiczne są zazwyczaj pojedyncze przypadki, które ciężko jednoznacznie zidentyfikować. Jedynym sensownym rozwiązaniem jest obcinanie chmury punktów w pewnej odległości od punktu skanowania – jednak oznacza to poświęcenie wielu poprawnych wyników, dlatego w programie cała powierzchnia próbna jest brana pod uwagę.

## **7.7 Wnioski**

Podczas przeprowadzonych prac udało się w bardzo krótkim czasie i przy zaangażowaniu niedużych zasobów stworzyć prototyp programu przetwarzającego dane z naziemnego skaningu laserowego. Program działa w sposób bardzo wydajny. Przetwarzanie danych z jednej powierzchni próbnej (jednego stanowiska skanera) trwa kilka minut, maksymalnie około dziesięciu na średniej klasy sprzęcie komputerowym. Otrzymane wyniki z jednej strony są obarczone na tyle dużym błędem, że wydaje się niemożliwe wprowadzenie tej technologii do metodyki prac urządzania lasu, z drugiej jednak strony stwierdzono szereg elementów pozwalających optymistycznie spojrzeć na możliwości wykorzystania naziemnego skaningu laserowego w leśnictwie. Do tych elementów należy niewątpliwie bardzo duża rozpoznawalność drzew w chmurze punktów. Nawet w przypadku skanu z jednego stanowiska, pomijane są jedynie pojedyncze drzewa. Prawidłowo zlokalizowane są nawet drzewa znajdujące się w dużej odległości od skanera. Umożliwia to pobranie z jednego stanowiska próby o kilkukrotnie większej powierzchni niż stosowane tradycyjnie.



**Ryc. II.24** Możliwość zastosowania większej powierzchni próbnej

Powyższy rysunek przedstawia powierzchnię próbną nr 19 o promieniu 12.62 m (wewnętrzny okrąg). Jest to największa ze stosowanych w praktyce urządzeniowej powierzchni ( $500 \text{ m}^2$ ). Jak widać, na podstawie skaningu można rozpoznać drzewa na co najmniej trzykrotnie większej powierzchni (zewnętrzny okrąg o promieniu 21.85 m obejmuje powierzchnie  $1500 \text{ m}^2$ ). Zwiększenie wielkości powierzchni próbnej ma niewątpliwie istotny wpływ na dokładność inwentaryzacji, szczególnie w przypadku drzewostanów zróżnicowanych, gdzie losowo wybrana próba nie zawsze reprezentuje przeciętne parametry drzewostanu.

Pierśnice drzew wyznaczone przez program wykazują czasem dość dużą różnicę w stosunku do pomiaru referencyjnego. Wynika to z dwóch powodów. Pierwszy to stosowana w algorytmach zasada sprowadzania przekroju pnia drzewa do koła. Powoduje to powstawanie różnicy w stosunku do pojedynczego pomiaru pierśnicy w określonym kierunku, jednak, biorąc pod uwagę obliczenie pierśnicowego pola przekroju oraz miąższości drzewa, to właśnie średnica koła, która powinna odpowiadać średniej wartości dla nieregularnego pnia powinna dawać dokładniejszy wynik. W celu potwierdzenia tej hipotezy, należy, podczas

wykonywania pomiarów referencyjnych, mierzyć pierśnicę w kilku kierunkach (co najmniej dwóch prostopadłych).

Druga z przyczyn to wyznaczanie koła na podstawie małego wycinka zeskanowanego pnia lub też trudności z odfiltrowaniem przylegających do pnia elementów (sąsiednie drzewo, krzew itp.). W tym wypadku konieczne jest podjęcie decyzji dotyczącej podjęcia próby określenia pierśnicy z ryzykiem popełnienia dużego błędu, lub też traktowania takich drzew jako nierozpoznane. W obecnej wersji programu stosowana jest pierwsza zasada, co skutkuje dużą rozpoznawalnością drzew, ale też generuje istotne błędy w pojedynczych przypadkach. Rozwiązaniem problemu powinna być próba doskonalenia algorytmów wyznaczania pierśnicy drzewa oraz eliminowania dużych błędów. Można tutaj wykorzystać szczegółowe pomiary poszczególnych sekcji. Na ich podstawie można wykonać regresję do równania krzywej morfologicznej pnia. Współczynnik korelacji może stać się wyznacznikiem poprawności wykonania pomiaru, dając sygnał do przyjęcia lub odrzucenia wyniku. Pierwsze takie próby wykonano na dwóch badanych powierzchniach uzyskując obiecujące wyniki.

Przyjęte algorytmy obliczeniowe dość dobrze zachowują się w przypadku drzew o regularnych kształtach pni i stosunkowo dobrze zeskanowanych (w przypadku pojedynczego skanu może to być co najwyżej połowa pnia). Pnie elipsoidalne, zniekształcone lub też fragmentarycznie zeskanowane, mogą generować duże błędy pomimo zastosowania kilku procedur ograniczających to zjawisko. Jest tutaj miejsce do dalszych badań. Wykorzystane mogą być z jednej strony bardzo zaawansowane obliczeniowo procedury sztucznej inteligencji a z drugiej np. prosta sygnalizacja obiektów, dla których automatyczne rozpoznanie pierśnicy może być ryzykowne i „ręczna” korekta na podstawie podglądu chmury punktów w badanym miejscu może być skutecznym rozwiązaniem.

Pomimo sygnalizowanych trudności, które prawdopodobnie uniemożliwiają zastosowanie omawianej metody już dzisiaj w praktyce prac inwentaryzacyjnych w leśnictwie, to jednak wyraźnie widoczne są korzyści takie jak obiektywizm pomiaru, duża powierzchnia próbna, możliwość dokładnego obliczenia miąższości lub innych parametrów strzały drzewa. Wykonane testowe prace wykazały, że można dane pochodzące ze skaningu przetwarzać w sposób wydajny, w przeciągu kilku minut generować kolejne wyniki zmieniając parametry czy nawet algorytmy obliczeniowe. Otwiera to szansę na szybkie doskonalenie samych algorytmów jak i precyzowania wymagań co do sposobu zbierania danych w terenie.