Poznań, dnia 8 lipca 2019

Dr hab. Katarzyna Kaźmierczak
Zakład Dendrometrii i Produkcyjności Lasu
Katedra Urządzania Lasu
Wydział Leśny
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Ratajczaka
pt. „Określanie cech biometrycznych drzew i drzewostanów
metodą skanowania laserowego"
wykonanej w Zakładzie Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa
Instytutu Zarządzania Zasobami Leśnymi
na Wydziale Leśnym Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie
pod kierunkiem dr hab. inż. Piotra Wężyka prof. UR

Zrównoważona gospodarka leśna bazuje na aktualnej i kompleksowej charakterystyce ekosystemów leśnych, której podstawą są szczegółowe dane biometryczne drzewostanów pozyskiwane podczas inwentaryzacji. Prace inwentaryzacyjne polegają głównie na tradycyjnych pomiarach terenowych, w których wykorzystuje się podstawowe przyrządy dendrometryczne – średnicomierz i wysokościomierz. Pomiary wykonywane przez wykształcony zespół generują spore koszty i są niezmiernie czasochłonne. Informacje pozyskiwane tą drogą nie są niestety pozbawione błędów. Wynikają one głównie z błędów instrumentów, niedokładności odczytów czy niewłaściwego zlokalizowania położenia wierzchołków mierzonych drzew. Brak jest obecnie metody pozwalającej na bezbłędne określenie cech biometrycznych drzewostanu, w tym cech koron drzew.

W ostatnich dziesięcioleciach coraz powszechniej wykorzystuje się nowoczesne technologie geoinformacyjne. Jedną z nich jest skaning laserowy (LiDAR), który dzięki wysokiej wydajności pracy oraz dokładności pomiaru może być stosowany także w leśnictwie. Technologie lidarowe dają możliwość analizy różnych cech taksacyjnych, zarówno poszczególnych drzew, jak i struktury całych drzewostanów. Interpretacja danych może dotyczyć lokalizacji drzew w przestrzeni, wymiarowania koron i pni oraz ich fragmentów. Jednak ograniczenia wynikające z kosztów zakupu sprzętu, braku odpowiedniego oprogramowania do automatycznych analiz, powodują, że skaning laserowy nie jest w leśnictwie powszechnie stosowany.Nadalzasadniczo jest w fazie badań i testów. Budowa przestrzenna drzewostanu oraz skład gatunkowy to czynniki determinujące dokładność pomiaru. W drzewostanach o złożonej budowie występują problemy w zbieraniu danych. Wynik pomiaru wysokości drzewa z zastosowaniem skaningu laserowego może być obarczony błędem wynikającym z tego, że wierzchołek drzewa nie zawsze jest wyznaczony przez najwyższy punkt z chmury oraz z faktu, że teren na którym znajduje się drzewo może utrudniać właściwy odczyt usytuowania podstawy pnia. Ponadto wysokość drzew w gęstych drzewostanach jest trudna do bezpośredniego zmierzenia za pomocą skanera laserowego, a ustalenie wielkości korony pojedynczego drzewa może być utrudnione bądź nawet niemożliwe.

Dzięki numerycznemu modelowi terenu i numerycznemu modelowi pokrycia terenu poprzez dane pozyskane metodą lotniczego skaningu laserowego (ALS) w ramach projektu Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami (ISOK) otwierają się drogi dostępu do wielkoobszarowych geodanych, które mogą być wykorzystywane w leśnictwie. Chmury punktów lotniczego skaningu laserowego i dane z projektu ISOK są nieodpłatnie udostępnienie dla administracji publicznej i na cele naukowe. Tak wygenerowane wielkopowierzchniowe geodane pozwalają na uzyskanie wielu informacji o drzewostanie, które w połączeniu z danymi pozyskiwanymi przez system skanowania naziemnego umożliwią z jednej strony ograniczenie czasu i kosztów przy pozyskiwaniu danych biometrycznych, a z drugiej pozwolą na zwiększenie dokładności tych danych. Wykorzystując skaning laserowy można w znacznym stopniu skrócić czas pomiaru. Jednak później potrzebne są automatyczne algorytmy

profesjonalnego oprogramowania, które poza oszczędnością czasu pracy operatora pozwolą zwiększyć dokładność pomiaru na podstawie interpretacji chmury punktów wykonanego skanu.

W ten obszar badań i poszukiwań twórczych wpisuje się swoją dysertacją Pan mgr inż. Michał Ratajczak. Założonym celem przestawionej pracy doktorskiej było opracowanie takich rozwiązań metodycznych, które pozwolą na dokładniejsze określanie cech biometrycznych na podstawie chmur punktów skanowania laserowego LiDAR. Pan mgr inż. Michał Ratajczak zweryfikował hipotezę, iż czas prac tradycyjnego pomiaru na kołowych powierzchniach badawczych jest większy niż przy wykorzystaniu autorskiego oprogramowania Doktoranta, który bazuje na przetwarzaniu chmur punktów LiDAR. Udowodnił ponadto, iż miąższość drzew stojących na powierzchniach zrębowych określona w oparciu o automatyczne przetwarzanie chmur punktów skanowania laserowego nie odbiega od wartości rzeczywistych.

Recenzowana praca liczy 142 ponumerowane strony oraz 122 strony załączników w postaci tabel z wynikami. Wykaz literatury uwzględnia 154 pozycje (w połowie anglojęzyczne).Rozprawę podzielono na dziewięć rozdziałów, w tym sześć zasadniczych. **Wstęp** zawarto na 38 stronach (27%). Główna jego część poświęcona została opisowi technologii skanowania laserowego ze szczegółowym opisem poszczególnych rodzajów, charakterystyką przekształceń morfologicznych obrazu oraz formatom zapisu chmur punktów skanu. W dwóch kolejnych podrozdziałach opisano dalsze procesy przetwarzania danych. Ostatni z podrozdziałów **Wstępu** poświęcono głównemu i wyróżnionym cząstkowym celom dysertacji. Opis technologii skanowania laserowego został napisany podręcznikowo w oparciu o bogatą literaturę i jest niezwykle cenną częścią rozprawy. Jedynym mankamentem jest umieszczenie go we **Wstępie**. Fragment ten powinien stanowić osobny rozdział. Sugerowałabym w pierwszym rozdziale zawrzeć fragment poprzedzający charakterystykę technologii oraz cel, zaś pozostały tekst wydzielić w osobnym rozdziale.

Drugi rozdział **Teren badań** (4 strony)poświęcono opisowi Nadleśnictwa Przymuszewo, na terenie którego zlokalizowano powierzchnie badawcze oraz charakterystyce tych powierzchni. W 8 wydzieleniach z zaplanowaną rębnią zupełną

założono 12 kołowych powierzchni badawczych. Usytuowano je unikając większych luk w okapie drzewostanu, ze środkiem z którego widoczna była większość drzew w promieniu 15.0 m. Wszystkie kołowe powierzchnie badawcze założono w jednowiekowych drzewostanach sosnowych rosnących na siedliskach borowych (9 na Bśw, 3 na BMśw).

W trzecim rozdziale **Metodyka** (39 stron) opisano wykonane prace terenowe oraz prace kameralne. Zarówno wykonując pomiar metodą tradycyjną, jak i metodą skanowania laserowego, zapisywano czas ich realizacji na każdym etapie. Podrozdział poświęcony pracom kameralnym przeznaczono opisowi autorskiego oprogramowania Omega. Autor opracował szereg algorytmów służących automatycznemu przetwarzaniu chmur trójwymiarowych punktów z lotniczego i naziemnego skanowania laserowego oraz obu zintegrowanych zbiorów danych. Doktorant w sposób przystępny wprowadza czytelnika w kolejne algorytmy, ich przeznaczenie i działanie. Pan mgr inż. M. Ratajczaka krok po kroku prowadzi czytelnika przez skomplikowane meandry programu w jasny, pozbawiony nudy sposób. Co uwydatnia w Doktorancie zdolności dydaktyczne. Cały opis procesu prac kameralnych jest w sposób wyważony uzupełniony graficznie, co z jednej strony ubogaca pracę, a z drugiej jeszcze bardziej czyni zrozumiałym opracowane i zastosowane oprogramowanie. Program Omega, w którego skład wchodzi jedenaście algorytmów jest autorską aplikacją. Zabrakło, moim zdaniem, wyraźnego podkreślenia tego w dysertacji. Opis autorskiego oprogramowania jest częścią **Metodyki**, a można by opis zawrzeć w oddzielnym rozdziale, który uwypukliłby ten fakt i rangę aplikacji, do czego zachęcam przy przygotowaniu tekstu do druku.

Kolejny rozdział o objętości 25 stron (13%) poświęcono **Wynikom**. Zaprezentowano je w ośmiu podrozdziałach. Jako pierwszą omówiono czasochłonność pomiarów. Uzyskane wyniki są imponujące. Średni czas pomiaru metodą tradycyjną jednego drzewa w terenie, obejmujący pomiar pierśnicy, wysokości i zapis wyników pomiaru, wyniósł prawie 90 sekund. Czas określania wysokości i pierśnicy drzewa przy użyciu oprogramowania Omega dla jednego drzewa wyniósł średnio zaledwie 0,6 sekundy dla metody jednostanowiskowej, przy 3-stanowiskowej wzrósł do 1 sekundy, a 4-stanowiskowej do 1,6 sekundy. Obliczenia te poprzedził proces segmentacji drzewa, który kolejno dla metody 1-, 3- i 4-stanowiskowej wyniósł: 0,9; 1,0 oraz 1,6 sekundy.

Przeprowadzenie obliczeń na danych zintegrowanych wymagało nieco więcej czasu analogicznie: 0,8; 1,7 oraz 2,3 sekundy. Jednak w pracy nie uwzględniono czasu samej czynności skanowania oraz przygotowania sprzętu do pracy w terenie.

W kolejnych podrozdziałach Autor ocenił dokładność automatycznego procesu segmentacji drzew w chmurze punktów naziemnego i lotniczego skaningu laserowego, określania pierśnicy drzew w zintegrowanej chmurze punktów, wysokości drzew, wysokości podstawy korony drzewa i miąższości drzew w oparciu o chmury punktów naziemnego i zintegrowanego skaningu oraz miąższości drzewostanu w oparciu o analizy zintegrowanych chmur punktów. Za pomiary referencyjne przyjął cechy ustalone metodą tradycyjną. Doktorant opracował dwa niezależne algorytmy do pomiaru średnic, z których jeden *Vector Diameter* bazuje bezpośrednio na odbiciach wiązki lasera od pnia drzewa, a drugi *Diameter Estimator* na interpretacji krzywej opisującej pień drzewa. Pierśnicę drzew określono na podstawie zintegrowanej chmury punktów. Przy wykorzystaniu pierwszego algorytmu *Vector Diameter* określono pierśnice 72,4% drzew na podstawie zintegrowanej chmury punktów dla metody jednostanowiskowej. Dla pozostałych 27,6% drzew algorytm zwrócił błąd pomiaru. Średni bezwzględny błąd pomiaru pierśnicy wyniósł 6,3 cm z odchyleniem standardowym 5,6 cm i przy błędzie RMSE 8,4 cm. Drugi algorytm *Diameter Estimator* określił pierśnicę pnia dla wszystkich wykrytych drzew, a średni bezwzględny błąd określania pierśnicy tym algorytmem wyniósł 2,9 cm z odchyleniem standardowym wynoszącym już tylko 2,8 cm. Średni błąd RMSE w tym przypadku wyniósł 4,0 cm. Autor wykorzystując algorytm *Top Distance* do automatycznego pomiaru wysokości wierzchołków drzew w jednostanowiskowej metodzie naziemnego skanowania laserowego uzyskał wyniki pomiaru wysokości drzew obarczone średnim bezwzględnym błędem RMSE równym 3,7 m, a przy zintegrowanym zestawie danych obarczone średnim bezwzględnym błędem RMSE niższym o 0,3 m. Zwiększanie liczby stanowisk skanera powodowało wzrost dokładności określania cech biometrycznych drzew.

W analogicznej sekwencji podrozdziałów na 13 stronach Doktorant przeprowadził szczegółową **Dyskusję wyników**, opierając się na dostępnych źródłach literaturowych. **Podsumowanie wyników i wnioski** Autor ujął w dziewięciu opisowych punktach.

Dzięki przeprowadzonej wnikliwej analizie Doktorant udowodnił dokładność autorskiego oprogramowania OMEGA i celowość jego stosowania. Pan mgr inż. M. Ratajczak uzyskał blisko czterokrotne przyspieszenie prac w określaniu cech biometrycznych drzew z 1-stanowiskowej metody skanowania naziemnego i prawie dwukrotne przy 4-stanowiskowej w porównaniu z pomiarem tradycyjnym. Metoda oparta na wykorzystaniu automatycznych algorytmów do ustalania cech biometrycznych drzew dzięki skróceniu czasu pracy okazała się zdecydowanie tańsza od tradycyjnej metody pomiaru drzew. Zgodnie z doświadczeniem Autora dysertacji w procesie przetwarzania chmury punktów skanu laserowego najwięcej czasu zabiera segmentacja pni drzew. Opracowany i zastosowany algorytm *Steam Classifier* prawidłowo zalicza fragmenty chmury punktów naziemnego skanowania zarówno dolnych partii pni, jak i górnych umiejscowionych w wyższych fragmentach koron. Doktorant wskazuje potrzebę przemyślanego lokalizowania stanowisk skanera TLS w drzewostanach o dużym zagęszczeniu, by wyeliminować obszary tzw. „cienia" powodujące błędy w klasyfikacji drzew. Zwrócił ponadto uwagę, iż optymalizacja działania autorskiego algorytmu *Stem Classifier* wraz z zastosowaniem bardziej zaawansowanych technologicznie komputerów dają szansę w przyszłości na dalsze ograniczenie czasu przy klasyfikacji pni. Kolejny opracowany algorytm *Growth Classifer* wykrywał 100% drzew na kołowych powierzchniach badawczych w drzewostanach przy zagęszczeniu drzew poniżej 360 sztuk/ha. Doktorant stwierdził, iż wielkość kołowych powierzchni badawczych musi być indywidualnie dobierana do zagęszczenia mierzonego drzewostanu. Wzrost zagęszczenia powinien skutkować redukcją wielkości powierzchni kołowej. Zjawisko przesłaniania się pni drzew może być wyeliminowane dzięki metodzie skanowania wielostanowiskowego przy odpowiednim rozmieszczeniu stanowisk skanera i optymalnym przyjęciu środka powierzchni. Wykorzystanie metod statystycznych do przewidywania grubości drzew w algorytmie*Diameter Estimator* zwiększyło dokładność pomiaru, jednak nie wyeliminowało błędów. Autor dzięki odpowiednio dopracowanemu algorytmowi uzyskał wysoki stopień zgodności tak określonej miąższość pojedynczego drzewa z rzeczywistą. To przyczyni się do wzrostu dokładności określenia miąższości na powierzchniach badawczych oraz zasobności całego konkretnego drzewostanu. Przedstawiona do oceny dysertacja wpisuje

się w koncepcję leśnictwa precyzyjnego, w którym obiektem nie pozostają wyłącznie całe drzewostany, a już pojedyncze drzewo charakteryzujące się indywidualnymi cechami wymiarowymi.

Rozprawa napisana została językiem poprawnym, ale nie jest wolna od drobnych błędów, głównie w postaci literówek. Zawarte w recenzji uwagi dotyczą zasadniczo układu dysertacji. Mam nadzieję, że pomogą Autorowi w przygotowaniu pracy do druku, ponadto w planowaniu i prowadzeniu dalszych prac badawczych.

Przeprowadzona przez Doktoranta integracja chmury punktów pochodzącej z naziemnego skanowania laserowego z danymi ze skanowania lotniczego dla powierzchni badawczych wpłynęła na polepszenie określania cech wymiarowych drzew dzięki uzupełnieniu informacji z górnych części drzew. Wysokość i miąższość drzew można było określić dokładniej niż wykorzystując jedynie dane z naziemnego skanowania. **Doktorant osiągnął założony cel.** Recenzowana praca stanowi oryginalny dorobek Doktoranta. Wzbogacił on zarówno naukę, jak i praktykę o nowe narzędzie do pozyskiwania dokładniejszych danych dotyczących powierzchni kołowych i rosnących tam pojedynczych drzew dzięki nowoczesnym technologiom pomiarowym. Na tej podstawie **stwierdzam, iż rozprawa spełnia kryteria określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki zgodnie z art. 179 ust. 1 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. przepisy wprowadzające Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1669) i składam wniosek o dopuszczenie Pana mgr inż. Michała Ratajczaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego**.

Katarzyna Kaźmierczak

dr hab. Katarzyna Kaźmierczak