

Dr hab. inż. Krzysztof Będkowski
Prof. Uniwersytetu Łódzkiego
Uniwersytet Łódzki
Wydział Nauk Geograficznych
Instytut Geografii Miast, Turyzmu i Geoinformacji
ul. Kopcińskiego 31, 90-142 Łódź

Łódź, 4 marca 2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
pana mgr. Macieja Lisiewicza
pod tytułem

**Metoda korekcji detekcji pojedynczych drzew z wykorzystaniem danych
z lotniczego skanowania laserowego**

przygotowanej w Instytucie Badawczym Leśnictwa w Sękocinie Starym pod opieką
naukową dr hab. inż. Krzysztofa Stereńczaka, prof. IBL (promotora) oraz dr
Agnieszki Kamińskiej (promotorki pomocniczej)

Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzję rozprawy wykonałem zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Instytutu
Badawczego Leśnictwa podjętą w dniu 15 grudnia 2022 r. oraz pismem prof. dr. hab.
Iwony Skrzecz – Zastępcy Przewodniczącego Rady Naukowej IBL nr RN-0000-
238/2022 z dnia 30 grudnia 2022 r.

Wstęp

Zdalne metody badania środowiska – fotogrametryczne i teledetekcyjne – od dawna są stosowane także w leśnictwie. Już w połowie lat 20-tych ubiegłego wieku metodami fotogrametrycznymi na podstawie zdjęć lotniczych uzyskiwano informacje o podstawowych cechach drzew i drzewostanów, w tym o tak ważnej charakterystyce jaką jest zapas, czyli zasobność drewna. Metody fotogrametryczne, opierające się na manualnym opracowywaniu pojedynczych zdjęć lotniczych lub ich stereogramów, wprawdzie wykazały że można tą drogą uzyskiwać wiarygodne informacje o lesie, były jednak zbyt kosztowne i pracochłonne. W późniejszych latach rozwijano metody

cyfrowego przetwarzania obrazów wielokanałowych, które pozwoliły na pewną automatyzację rozpoznawania gatunków oraz wnioskowanie o stanie drzewostanów i pojedynczych drzew. Od blisko 50 lat prowadzone są prace nad pozyskiwaniem informacji o lasach za pomocą lotniczego skanowania laserowego (ang. LiDAR), a w ostatnich dwóch dekadach rozwój tej techniki i technologii jest niezmiernie dynamiczny. Istotną cechą skanowania laserowego jest możliwość wniknięcia w głąb profilu lasu i dostarczenia informacji o jego pionowej budowie. Dane skanowania laserowego mają pierwotnie postać chmur punktów, które odpowiadają miejscom, do których przeniknęły impulsy laserowe. Istnieją dwa główne podejścia do analizy danych skanowania – obszarowa (Area-Based Approach, ABA) oraz detekcji indywidualnych drzew (Individual Tree Detection). Wprawdzie pierwsze z nich jest częściej stosowane, jednak stale dąży się do doskonalenia podejścia ITD, ponieważ posiadanie informacji o położeniu i cechach pojedynczych drzew jest bardzo ważne dla celów naukowych (np. modelowanie procesów wzrostu, zjawisk konkurencji między drzewami, przenikania światła itp.) oraz praktycznych (gł. w inwentaryzacji lasu). Rozprawa doktorska mgr. Macieja Lisiewicza dotyczy bardzo ważnego i trudnego zagadnienia, jakim jest detekcja pojedynczych drzew, która prowadzić powinna do wskazania położenia ich wierzchołków oraz segmentacji zajmowanej przestrzeni, czyli wyodrębnienia koron. Obiekt badań – las – ma skomplikowaną budowę, zmienną w czasie i przestrzeni. Rozwiązania wypracowywane w wielu rejonach świata nie mogą być wprost przenoszone do naszego leśnictwa. Niezbędne jest uwzględnienie lokalnej specyfiki, aby uzyskiwać coraz dokładniejsze wyniki. Mimo wysiłków wielu zespołów badawczych, w obszarze opracowania danych LiDAR wciąż jest wiele zagadnień czekających na rozwiązanie.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa składa się z trzech artykułów opublikowanych w języku angielskim w trzech renomowanych czasopismach naukowych:

1. Lisiewicz M., Kamińska A., Stereńczak K., 2022. Recognition of specified errors of Individual Tree Detection methods based on Canopy Height Model. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*,

25, 100690. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100690 Impact Factor = 3,371; 100 p. wg listy MNiSW (obecnie MEiN).

2. Lisiewicz M., Kamińska A., Kraszewski B., Stereńczak K., 2022. Correcting the Results of CHM-Based Individual Tree Detection Algorithms to Improve Their Accuracy and Reliability. *Remote Sensing*, 14(8), 1822. DOI: 10.3390/rs14081822 Impact Factor = 5,349; 100 p. MNiSW (obecnie MEiN).
3. Lisiewicz M., Kamińska A., Stereńczak K., 2022. Influence of the correction method of CHM-based Individual Tree Detection algorithms results on the estimation of stand characteristics. *Sylvan* 166(6), 362-377. DOI: 10.26202/sylvan.2022040 Impact Factor = 0,654; 70 p. MNiSW (obecnie MEiN).

Artykuły ukazały się w 2022 r. Pan mgr Maciej Lisiewicz jest pierwszym autorem prac. Wszyscy autorzy mają znaczące doświadczenie naukowe i dorobek w zakresie przetwarzania danych skanowania laserowego. Z przedłożonych oświadczeń (podpisanych przez autorów) oraz odpowiednich informacji zawartych w samych artykułach wynika, że udział p. mgr. Macieja Lisiewicza w sformułowaniu problemu badawczego, opracowaniu koncepcji badań i ich realizacji (np. zbieraniu i przetwarzaniu danych) oraz opracowaniu i dyskusji uzyskanych wyników, a także przygotowywaniu tekstu do druku był znaczący, a także wiodący – w kolejności prac wyniósł odpowiednio: 75%, 75% i 80%. Prace wyczerpująco omawiają zagadnienia będące tematem rozprawy - łącznie zajmują 54 strony (16, 22, 16). Należy podkreślić, iż redakcje czasopism, w których opublikowano prace stosują bardzo ścisłe, rygorystyczne procedury oceny materiałów przeznaczonych do druku. Czasopisma zajmują wysoką pozycję w rankingu czasopism naukowych publikujących wyniki badań dotyczących m.in. problemów zdalnego badania środowiska leśnego.

Przekazany do recenzji zbiór artykułów p. mgr Maciej Lisiewicz zatytułował **Metoda korekcji detekcji pojedynczych drzew z wykorzystaniem danych z lotniczego skanowania laserowego (ang. Individual tree detection correction method using airborne laser scanning data)**. Artykuły zostały opatrzone obszernym opisem, który będę nazywał dalej *Komentarzem*, a którego struktura jest następująca: Strona tytułowa, *Oświadczenie promotora pracy doktorskiej* i *Oświadczenie autora pracy*, *Streszczenie* (w j. polskim – s. 3-4 oraz j. angielskim – s. 5-6), *Spis treści* (s. 7),

Wykaz skrótów i zwrotów używanych w tekście (s. 8), następnie znajdujemy rozdział 1. *Forma rozprawy doktorskiej*, który jest w istocie wykazem artykułów wchodzących w skład rozprawy przy których podano punktację wg *Impact Factor (IF)* oraz listy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (obecnie Ministerstwa Edukacji i Nauki). Dalej jest właściwe omówienie przeprowadzonych badań (s. 11-42), które zaczyna się od rozdziału 2. *Wprowadzenie* (s. 11-15). Następne rozdziały to: 3. *Cel naukowy i hipotezy* (s. 16), 4. *Materiały i metody badawcze* (s. 17-28) z podziałem na 4.1. *Obszar badawczy*, 4.2. *Materiały i dane przestrzenne*, 4.3. *Metodyka*, w której wyróżniono także cztery podrozdziały trzeciego rzędu, tj. 4.3.1. *Wykorzystane metody segmentacji*, 4.3.2. *Identyfikacja i klasyfikacja błędów segmentacji*, 4.3.3. *Metoda korekcji błędów segmentacji*, 4.3.4 *Wpływ metody korekcji na szacowanie parametrów drzewostanowych*. Na omówienie wyników przeznaczono s. 29-37 podzielone na rozdziały 5. *Najważniejsze wyniki*, 5.1. *Klasyfikacja błędów segmentacji – wybór metody uczenia maszynowego oraz wyniki*, 5.2. *Ważność zmiennych*, następnie 5.3. *Wyniki metody korekcji* z dwoma podrozdziałami trzeciego rzędu 5.3.1. *Wyniki metody korekcji w różnych wariantach wysokościowych* oraz 5.3.2. *Wpływ metody korekcji na szacowanie parametrów drzewostanowych*. Zakończenie stanowią rozdziały 6. *Podsumowanie* (s. 38), 7. *Wnioski* (s. 39-40), 8. *Możliwe kierunki dalszych badań* (s. 41-42). Obszerny rozdział 9. *Bibliografia* zawiera 74 pozycje. Są tu tylko dane tych prac, które cytowano w tekście *Komentarza*, bowiem w pracach wchodzących w skład rozprawy powołano znacznie więcej artykułów, głównie z literatury zagranicznej (odpowiednio: 59, 60 i 50 – część z nich w poszczególnych pracach pokrywa się). Załącznikami do *Komentarza* są oświadczenia o procentowym wkładzie autorów do cyklu publikacyjnego przewodu doktorskiego oraz pełne teksty trzech opublikowanych prac wchodzących w skład rozprawy doktorskiej. Warto zauważyć, że wszystkie trzy prace powstały przy łącznym udziale tego samego Zespołu autorskiego: p. Macieja Lisiewicza oraz Promotora dr. hab. inż. Krzysztofa Stereńczaka i Promotora pomocniczego w osobie pani dr Agnieszki Kamińskiej. Jedynie w przypadku drugiej pracy do Zespołu dołączył p. Bartłomiej Kraszewski (udział 5%).

Oryginalne teksty prac wchodzących w skład rozprawy posiadają własną, mniej lub bardziej rozbudowaną strukturę, która jest typowa dla tego rodzaju opracowań dotyczących prac eksperymentalnych. Poszczególne rozdziały i podrozdziały spełniają więc funkcje: wstępu, przeglądu literatury, omówienia celu i zakresu pracy

oraz hipotez badawczych, następnie opisu metodyki badań, uzyskanych wyników i wniosków oraz są zaopatrzone w obszerne bibliografie cytowanych i komentowanych prac innych autorów.

Artykuły stanowią jedną spójną całość. Tytuł rozprawy jest w pełni zgodny z zawartością merytoryczną opracowań. Przygotowany przez Doktoranta *Komentarz* dobrze oddaje zawartość oryginalnych artykułów. Doktorant wraz ze Współautorami wykonali odpowiednie głębokie studia literatury krajowej i zagranicznej, sformułowali i uzasadnili cel i zakres badań, poprawnie zdefiniowali hipotezy i cele badawcze, oraz odpowiednio dobrali materiały i metody użyte do rozwiązania problemów badawczych. Wyprowadzone wnioski znajdują uzasadnienie w uzyskanych wynikach i ich dyskusji.

Ocena istotności i aktualności tematu rozprawy

Jedną z charakterystycznych cech dokonującego się obecnie postępu w technikach i technologiach teledetekcyjnych jest szeroki dostęp do danych przestrzennych, jak to ma miejsce w przypadku systemów pozycjonowania satelitarnego (GNSS) i cywilnych systemów satelitarnych, których najlepszymi przykładami są amerykański Landsat i europejski Sentinel. Podobne pozytywne znaczenie ma udostępnienie danych obrazowania lotniczego oraz skanowania laserowego (LiDAR). Jest to czynnik pozytywnie wpływający na rozwój zdalnych metod analizy stanu środowiska. Podkreślić należy zwiększającą się stale rozdzielczość, szczególnie przestrzenną i czasową, dzięki czemu możemy uzyskiwać informacje o stanie lasów na jego coraz mniejszych jednostkach przestrzennych. Tak zbierane dane są bezcenne dla tzw. „leśnictwa precyzyjnego”, które podobnie jak „rolnictwo precyzyjne” charakteryzuje się tym, że może planować i realizować różnorodne zabiegi pielęgnacyjne, zmienne przestrzennie, a więc dopasowane do lokalnych potrzeb.

Opracowane i stosowane obecnie algorytmy detekcji i określania zasięgów koron tj. segmentacji nie dają jeszcze możliwości bezbłędnego wyodrębnienia wszystkich drzew. Przeszkodę stanowi duża złożoność przestrzennej budowy lasów, a tutaj głównie zróżnicowanie wysokości drzew oraz budowy koron. Prowadzi to do niedoszacowania lub przeszacowania liczby wykrywanych drzew, tj. gdy korony kilku drzew zostaną zaliczone do jednego segmentu lub podzielone na segmenty będące

w istocie częściami koron. Sytuację utrudnia fakt, że obydwa rodzaje błędów mogą wystąpić w danym fragmencie lasu równocześnie. Błędy te Doktorant nazywa odpowiednio podsegmentacją oraz nadsegmentacją.

Tak postawione zagadnienie ma bardzo duże znaczenie praktyczne gdyż wynik segmentacji, czyli m.in. liczba wykrytych drzew, jest charakterystyką, która istotnie wpływa na oszacowanie wielu innych cech lasu, w tym przekłada się bezpośrednio na wielkość obliczonego zapasu lub ogólniej - biomasy. Jest to tematyka ważna i aktualna, nad którą prowadzone są prace badawcze i aplikacyjne na całym świecie.

Rozprawa jest bardzo dobrze umocowana w literaturze krajowej i zagranicznej o czym świadczy treść starannie przygotowanego przeglądu literatury.

Cel i tezy rozprawy

W tym miejscu odniosę się najpierw do samego tytułu pracy, który powinien być przecież zwięzłym zapisem celu pracy badawczej. Uważam, że zyskałby na komunikatywności, gdyby został uzupełniony następująco: *Metoda korekcji **wyników detekcji pojedynczych drzew uzyskiwanych** z wykorzystaniem danych lotniczego skanowania laserowego*. Sądzę bowiem, że słowo „detekcja” użyte zostało przez Autora w oryginalnym tytule w znaczeniu efektu czynności polegającej na detekcji. Zatem poprawiamy efekt, a nie czynność. Natomiast bez słowa „uzyskiwanych” można odnieść wrażenie, że detekcja drzew dokonywana była z wykorzystaniem danych niebędących danymi skanowania laserowego, a dopiero właśnie tego rodzaju dane pozwoliły na skorygowanie wyników segmentacji. I w pewnym sensie tak jest, z tym jednak, że korygowane segmenty też powstały na podstawie danych LiDAR (w postaci numerycznego modelu pokrycia terenu).

W rozprawie sformułowano trzy hipotezy badawcze, które podaję poniżej w oryginalnym brzmieniu:

- Wykorzystanie w klasyfikacji statystycznych miar opisujących rozkład przestrzenny chmury punktów, pozwala na określanie wybranych błędów uzyskiwanych w wyniku segmentacji pojedynczych koron drzew. (Publikacja I).

- Możliwe jest opracowanie automatycznej metody korekcji błędów umożliwiającej znaczącą poprawę wyników detekcji pojedynczych drzew. (Publikacja II).
- Skorygowanie błędów detekcji pojedynczych drzew umożliwia dokładniejsze szacowanie parametrów drzewostanowych, takich jak zagęszczenie drzew i średnia wysokość drzewostanu. (Publikacja III).

Nie mam zastrzeżeń do merytorycznej zawartości hipotez, jednak moim zdaniem pierwszą z nich można było sformułować nieco inaczej, a mianowicie: *Wykorzystanie w klasyfikacji statystycznych miar opisujących rozkład przestrzenny chmury punktów, pozwala na **identyfikację** wybranych błędów **powstających w procesie segmentacji pojedynczych koron drzew.***

Przyjęte hipotezy badawcze zostały rozwinięte w postaci celów szczegółowych: (1) opracowanie metody identyfikacji (klasyfikacji) poprawnych i błędnych segmentów oraz (2) korekty segmentów błędnych, a także (3) zbadanie, jak przeprowadzona korekta wpływa na wyniki określenia wybranych cech taksacyjnych drzewostanów. Do klasyfikacji segmentów zaproponowano algorytmy uczenia maszynowego (Random Forest, Support Vector Machine, k-Nearest Neighbor), a skuteczność korekty segmentów sprawdzono poprzez porównanie z wynikami inwentaryzacji naziemnej, a także poprzez ocenienie jej wpływu na dokładność wyznaczania zagęszczenia drzew oraz średniej wysokości drzewostanu.

Cele szczegółowe rozprawy moim zdaniem są bardzo dobrze sformułowane i dobrze oddają zakres przeprowadzonych badań. Z lektury tekstu *Komentarza* oraz artykułów wnioskuję również, że wszystkie cele rozprawy zostały osiągnięte.

Wartość naukowa rozprawy

Pragnę przede wszystkim podkreślić, że Autor rozprawy wraz z Zespołem badawczym zmierzali się z trudnym zagadnieniem. Podejście do przetwarzania danych skanowania laserowego, określane jako *Individual Tree Approach*, jest bez wątpienia trudniejsze od częściej stosowanego podejścia *Area-Based*, gdyż wymaga wykrycia poszczególnych drzew. Jest jednak rozwiązaniem moim zdaniem przyszłościowym, bowiem jest bliższe znanym i od dawna stosowanym metodom

inwentaryzacji lasu, w których podstawą jest ustalenie liczby, gatunku i wymiarów poszczególnych drzew. Las bowiem z drzew się składa... Jak wiele obiektów przyrodniczych jest on bardzo skomplikowany pod względem składu gatunkowego i budowy przestrzennej. Zauważmy jeszcze, że badania prowadzono w Puszczy Białowieskiej, a więc w lasach o bardzo złożonej strukturze.

Do identyfikacji błędów segmentacji koron drzew zaproponowano oryginalne rozwiązanie, w postaci schematu postępowania, w którym użyto znane algorytmy uczenia maszynowego, oraz nowe autorskie algorytmy. Wykonano analizę rozkładów chmur punktów lotniczego skanowania laserowego, co pozwoliło na detekcję błędów segmentacji i ich korektę. W pierwszej kolejności z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego następuje (1) identyfikacja poprawnych i błędnych segmentów (z podziałem na pod- i nadsegmentację), następnie (2) dokonuje się poprawy segmentów obarczonych błędem podsegmentacji poprzez ich ponowną segmentację (podział na mniejsze części), a dalej (3) segmenty obciążone błędem nadsegmentacji (tj. niebędące pojedynczymi drzewami lecz ich częściami) są łączone z segmentami poprawnymi. Jak wykazano, zaproponowane kryteria korekty wyników segmentacji sprawdziły się, co pozwoliło na poprawienie wyników trzech różnych metod detekcji pojedynczych drzew oraz poprawienie dokładności określenia zagęszczenia drzew i średniej wysokości drzewostanu.

W tym miejscu pragnę zwrócić uwagę na kilka szczegółów pracy, jak uważam wartych podkreślenia i ewentualnego przedyskutowania podczas publicznej obrony rozprawy:

1. Moim zdaniem cel pracy określony w Streszczeniu (s. 3) jest niezbyt fortunnie sformułowany, gdyż ogranicza się do **wykorzystania rozkładu chmur punktów** z lotniczego skanowania laserowego do detekcji i korekty błędów przy segmentacji koron na podstawie wysokościowego modelu koron. W tym eksponowanym miejscu rozprawy, a właściwie *Komentarza*, należało podkreślić, że celem było opracowanie autorskiej ścieżki postępowania i odpowiedniego algorytmu, który wykorzystywał chmury punktów do rozwiązywania omawianego zadania.
2. Badania przedstawione w pierwszej publikacji, dotyczące identyfikacji błędów segmentacji przeprowadzono na próbie liczącej 30 kołowych

powierzchni próbnych, które dodatkowo podzielono na trzy równoliczne podgrupy (iglaste, liściaste i mieszane). Moim zdaniem można mieć wątpliwości, czy tak pobrana próba nie jest zbyt mała.

3. Z opisu doświadczenia wynika, że do analiz wybrano te kołowe powierzchnie próbne, w których stwierdzono istnienie błędów segmentacji. Nie wiadomo jakimi kierowano się tutaj kryteriami – czy obecność błędów stwierdzono poprzez porównanie liczby zidentyfikowanych drzew z liczbą ustaloną w wyniku inwentaryzacji naziemnej, czy też wzięto pod uwagę wyniki ewentualnej wizualnej inspekcji uzyskanych segmentów? Czy możliwe jest np., że liczba drzew się zgadza, liczba segmentów też, jednak znajdują się one nie w tych miejscach, w których powinny być wykazane? Inaczej mówiąc, czy oprócz oceny ilościowej nie powinno się zwrócić uwagi także na ocenę jakościową i zaproponować do tego celu odpowiednie narzędzia?
4. Czy sprawdzono, jak zachowują się opracowane metody korekcji błędów segmentacji w przypadku testowania na tych powierzchniach próbnych, na których błędów nie było? Czy w takim przypadku „poprawianie” nie doprowadzi do wytworzenia błędów segmentacji?
5. Od badań do aplikacji często jest długa i wyboista droga. Jak, zdaniem Doktoranta, można operacyjnie, a więc przy wykonywaniu inwentaryzacji lasu, wykorzystać uzyskane rezultaty pracy? Jaki byłby schemat postępowania?

Uwagi dotyczące edytorskiego opracowania tekstu rozprawy

Rozprawa jest napisana bardzo dobrym i komunikatywnym językiem. W *Komentarzu* tak niewiele jest błędów stylistycznych lub edytorskich, że nie warto się nad nimi pochylać. Zwraca również uwagę staranne opracowanie i właściwe cytowanie bibliografii - wszystkie pozycje znajdujące się w bibliografii są omawiane w tekście i każde cytowanie znajduje pełne rozwinięcie w spisie literatury. Wszystkie artykuły i *Komentarz* są odpowiednio ilustrowane dobrze czytelnymi rysunkami.

Wnioski

Bardzo pozytywnie oceniam merytoryczną zawartość przedłożonej rozprawy doktorskiej. Badania zaplanowano i przeprowadzono bardzo starannie. Uważam, że zaplanowany cel badań został konsekwentnie zrealizowany. Doktorant starannie dobrał i przeanalizował literaturę, opracował metodykę własnych badań, zgromadził odpowiednie dane skanowania laserowego oraz dane referencyjne pochodzące z inwentaryzacji terenowej wykonanej na kołowych powierzchniach próbnych. Doktorant wykazał się zatem odpowiednią wiedzą teoretyczną i umiejętnościami praktycznymi, posiada umiejętność samodzielnego i zespołowego prowadzenia eksperymentów naukowych, a także prawidłowego interpretowania uzyskanych wyników.

Najważniejszym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie i weryfikacja autorskiego algorytmu służącego do korekcji błędów detekcji (segmentacji) koron pojedynczych drzew wyznaczonych na podstawie wysokościowego modelu koron (WMK). Istotną wartością naukową rozprawy jest jej wkład w rozwój zdalnych metod inwentaryzacji lasów, które zweryfikowano na bardzo trudnych obiektach jakimi są lasy Puszczy Białowieskiej. Zaletą opracowanych przez Doktoranta rozwiązań jest to, że można je zastosować z wykorzystaniem ogólnodostępnych i bezpłatnych danych.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska przedłożona przez p. mgr. Macieja Lisiewicza pod tytułem Metoda korekcji detekcji pojedynczych drzew z wykorzystaniem danych z lotniczego skanowania laserowego spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim określone w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r., art. 187, z późniejszymi zmianami (tekst jednolity: Dz.U. z 2022 r., poz. 574) i stawiam wniosek o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów postępowania.

Ze względu na liczne walory poznawcze oraz duży potencjał aplikacyjny wyników pracy wnoszę o jej wyróżnienie.

Dr hab. inż. Krzysztof Będkowski, prof. UŁ