

Kraków, 4 kwietnia 2019 r.

Profesor dr hab. inż. Krystian Pyka  
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska  
AGH w Krakowie

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż Bogusława Kaczałka „Klasyfikacja danych lotniczego skaningu laserowego z wykorzystaniem algorytmu random Forests”**

Recenzja została przygotowana dla Rady Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Rolniczego we Wrocławiu, na podstawie pisma prof. dr hab. inż. Bernarda Kontnego z 21 lutego 2019 r.

### **1. Struktura, cel i teza pracy rozprawy**

Rozprawa ma formę tekstu zwartego o łącznej objętości 147 stron. Po wstępie zawierającym tezę, cel i zakres pracy następuje rozdział przedstawiający lotniczy skaningu laserowy, ujmujący szeroki przegląd literatury dotyczącej metod klasyfikacji chmury punktów. Kolejne dwa rozdziały są kluczowe dla pracy: rozdział trzeci opisuje autorską metodę klasyfikacji a czwarty jest poświęcony testom numerycznym zaproponowanej metody na szerokim materiale badawczym. Całość wieńczy podsumowanie i bibliografia. Opis algorytmu Random Forest znalazł się w rozdziale trzecim, co okazało się korzystne z punktu widzenia zintegrowanej prezentacji metody zaproponowanej przez Doktoranta. Co prawda już w rozdziale drugim algorytm jest kilkakrotnie przywoływany, ale jego szeroka rozpoznawalność uzasadnia taką kolejność. Strukturę pracy uznaję za prawidłową, rozprawę za kompletną pod względem formalnym.

Zarówno teza jak i cel pracy wskazują algorytm Random Forests jako uniwersalny klasyfikator, który po odpowiednim przygotowaniu danych pozwoli automatycznie nadać punktom laserowym atrybut wskazujący rodzaj pokrycia terenu. Teza badawcza, cel badań i ich zakres są sformułowane prawidłowo i stanowią logiczną całość. Moim zdaniem w tezie można było silniej wyeksponować rolę metody przygotowania danych do klasyfikacji, gdyż zaproponowany przez Doktoranta zestaw cech klasyfikacyjnych jest największym osiągnięciem rozprawy i sprzęgnięty z bardzo dobrym klasyfikatorem przyniósł pozytywny efekt końcowy.

### **2. Znaczenie i oryginalność problemu badawczego podjętego w rozprawie**

Lotniczy skaningu laserowy stał się w ostatnich latach źródłem danych wysokościowych o niespotykanej dotąd dokładności jak na pomiary masowe. Kilka lat doświadczeń z tymi danymi wskazało ich zalety ale też wady. W sposób naturalny nadeszła faza doskonalenia metod przetwarzania danych ze skaningu laserowego, w tym poszukiwania doskonalszych algorytmów klasyfikacji. Na potencjał algorytmu Random Forests, szeroko stosowanego w klasyfikacji m.in.

treści zobrażeń satelitarnych, zwróciło już uwagę kilku badaczy, jednak pierwsze próby klasyfikacji danych ALS nie przyniosły spektakularnych wyników. Doktorant wyszedł ze słusznego założenia, że kluczem do sukcesu jest przygotowanie takiego zespołu cech, wśród których choćby część będzie dystynktywna względem szukanych klas, co pozwoli algorytmowi Random Forests wybrać cechy najkorzystniejsze i dokonać optymalnej klasyfikacji. Jednak nie sam pomysł przygotowania wielowymiarowego wektora cech uznaję za autorski wkład Doktoranta lecz systemowe podejście do poszukiwania cech dystynktywnych, wywodzących się zarówno z właściwości ukrytych w samej chmurze jak też z danych fotogrametrycznych wspomagających skaningu oraz ze skaningu wielospektralnego.

Uznaję problem podjęty przez mgr. inż. Bogusława Kaczałka jako ważny zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia. Tworzy to silne uzasadnienie podjętej w dysertacji tematyki badawczej.

### **3. Ocena metody badawczej, sposobu przeprowadzenia badań i uzyskanych wyników**

Wybrany przez Doktoranta algorytm Random Forests był już wcześniej stosowany do klasyfikacji danych ALS, jednak uzyskiwano wyniki gorsze niż innymi metodami. Zaletą klasyfikatora Random Forests jest umiejętność walidacji istotności cech na etapie uczenia, co pozwala optymalizować wektor cech na etapie klasyfikacji docelowej. W zbiorze cech muszą znajdować się cechy dystynktywne, dlatego ich wybór jest kluczowy dla sukcesu klasyfikacji. Doktorant wykazał godną podkreślenia dojrzałość naukową na etapie poszukiwania optymalnych cech klasyfikacyjnych. Podszedł do problemu systemowo, wykorzystał doświadczenia przedstawione w publikacjach, rozszerzył listę stosowanych przez innych badaczy cech, usystematyzował je w kilka grup. Nadto mgr inż. Bogusław Kaczałek pokazał, że możliwe jest wydzielenie bardziej szczegółowych klas względem listy zaproponowanej przez ASPRS a przyjętej jako standard de facto przez międzynarodową społeczność użytkowników ALS. Listę standardowych wydzieleni wzbogaca zwłaszcza klasa powierzchni utwardzone, która może być przydatna w modelowaniu powierzchni nieprzepuszczalnych. Metoda klasyfikacji opracowana przez Doktoranta okazała się też przydatna do poprawiania i uszczegóławiania istniejącej klasyfikacji, wykonanej wg wydzieleni ASPRS.

Random Forests jest narzędziem potrafiącym klasyfikować dowolne dane, jednak wymaga od użytkownika pogłębionej wiedzy o działaniu algorytmu. Doktorant wykazał w rozprawie, że rozumie nie tylko ogólne założenia klasyfikatora lecz doskonale zna specyfikę jego działania, w tym skłonność do nadmiernego dopasowania do próbki uczącej co potem daje gorsze wyniki na docelowych danych klasyfikowanych. Dobra znajomość algorytmu Random Forest pozwoliła Doktorantowi na optymalizację jego działania w trakcie testów numerycznych oraz na ocenę istotności cech i wskazanie najważniejszych oraz najmniej istotnych dla wyniku klasyfikacji.

Doktorant zaproponował kilkadziesiąt cech klasyfikacyjnych, które podzielił na siedem grup, spośród których sześć wywodzi się z chmury punktów a jedna wykorzystuje dane radiometryczne pochodzące ze zdjęć lub ze skanerów wielospektralnych (indeksy wegetacyjne).

Bardzo interesujące są zaproponowane przez Doktoranta grupy cech wynikających z triangulacji 2,5D, 3D i z rozkładu wartości osobliwych. Wnoszą do klasyfikacji informacje o relacjach przestrzennych zachodzących pomiędzy analizowanym punktem a jego otoczeniem. Co prawda nie okazały się liderami w rankingu istotności cech ale zawsze były cechami pożytecznymi. Jak wykazały testy cechami najbardziej dystynktywnymi były: różnica wysokości punktu względem NMT, indeksy wegetacji, lokalna gęstość chmury i cechy pochodne względem intensywności.

Mgr inż. Bogusław Kaczałek podjął się opracowania metody która praktycznie w całości ma charakter autorski. Takie podejście jest z jednej strony godne uznania bo świadczy o ambicji naukowej, z drugiej zaś, rodzi pytanie, czy w sytuacji gdy metoda jest kilku etapowa, nie lepiej skupić się na jednym ogniwie i opracować go w sposób wyczerpujący. Tym wiodącym ogniwem metodycznym pracy było przygotowanie wektora cech dla klasyfikatora, to zadanie Doktorant rozwiązał bardzo dobrze. Zdecydował się też, niejako dodatkowo, na opracowanie własnej drogi filtracji punktów laserowych odbitych od terenu. Wybrana droga jest ciekawa poznawczo, jednak moim zdaniem opiera się na założeniach których słuszność można kwestionować. Każde rozwiązanie filtrujące chmurę na podstawie arbitralnie wybranej teselacji prostokątnej jest obciążone wpływem wyboru jej punktu początkowego i rozmiarów siatki. W rozwiązaniu Doktoranta operator podejmuje kilkakrotnie decyzje sterujące przebiegiem filtracji co czyni podejście nazbyt arbitralnym. Znacznie prostszą parametryzację zaproponował Doktorant na etapie generowania elementów wektora cech dla potrzeb klasyfikacji, zasadniczym dla podjętego w dysertacji problemu. Praktycznie połowa cech wynika z indywidualnych właściwości punktu laserowego, dla dwunastu cech deklarowane jest kołowe otoczenie punktu, dla czterech - wymiar kostki grupującej. Im prostsza parametryzacja tym lepiej dla metody. Trzeba wziąć pod uwagę, że pomimo bardzo bogatego materiału badawczego jak na pracę badawczą wykonaną przez jedną osobą, Doktorant przebadał jednak tylko cztery przypadki danych, co nie pozwala na pełne uogólnienie zasad postępowania przy doborze parametrów sterujących generowaniem cech.

Moim zdaniem dobrą metodą filtracji terenu jest progresywne zagęszczanie siatki TIN, realizowane np. przez algorytm Axelsson-a. Jest stosowana od stosunkowo długiego czasu w wielu programach, była wykorzystana do opracowania skaningu w ramach projektu ISOK. Metoda jest zaimplementowana w częściowo otwartym oprogramowaniu LAStools, a parametryzacja filtracji jest dobrze udokumentowana w publikacjach (np. Karolina Korzeniowska, Norbert Pfeifer, Gottfried Mandlbürger & Agata Lugmayr (2014), Experimental evaluation of ALS point cloud ground extraction tools over different terrain slope and land-cover types, International Journal of Remote Sensing, 35:13, 4673-4697). Uważam, że wykorzystanie do filtracji terenu znanego i sprawdzonego rozwiązania wcale nie obniżyłoby rangi naukowej badań Doktoranta a być może zobiektywizowałoby ocenę jakości klasyfikacji wykonanej zaproponowaną w dysertacji metodą.

Wielkim atutem rozprawy jest część poświęcona testowaniu zaproponowanego rozwiązania klasyfikującego chmurę punktów. Doktorant zgromadził bogaty, wręcz unikalny materiał, pochodzący z przedsięwzięć o charakterze badawczym i komercyjnym, ujmujący skanowanie jedno i wielospektralne jak też różnorodny materiał testowy pomagający. Różnorodny materiał testowy pozwolił uwypuklić zalety zaproponowanej metody, w której łatwo

dostosowywać wektor cech do specyfiki danych. Dwa z wykorzystanych zestawów danych były testowane różnymi metodami przez badaczy z wielu krajów świata. Podany w rozprawie ranking testu ISPRS lokuje bardzo wysoko wyniki Doktoranta.

Mgr inż. Bogusław Kaczałek wykazał się umiejętnościami informatycznymi, które pozwoliły mu na napisanie autorskich programów do generowania cech i zarządzania dużymi zbiorami danych jak również na optymalizację działania algorytmu Random Forests poprzez dobór liczby i wielkości drzew decyzyjnych, liczby wykorzystywanych cech i sposobu wagowania klas.

Badanie wykonane przez Doktoranta są dobrze udokumentowane, osiągnięte wyniki potwierdzają zasadność postawionej tezy i celów szczegółowych.

#### **4. Uwagi szczegółowe i pytania**

Praca jest napisana komunikatywnym językiem zważywszy na używanie przez Doktoranta wielu terminów informatycznych. Tekst zawiera sporo uchybień językowych i edycyjnych, w tym często powtarzające się słowa w jednym zdaniu. Uchybienia językowe, choć liczne, nie rażą czytelnika gdyż na pierwszy plan z tekstu wybija się pasja i zaangażowanie Doktoranta w rozwiązanie postawionego problemu naukowego. W bardzo efektywny została wykonana wizualizacja wartości poszczególnych cech klasyfikacyjnych.

Bibliografia jest dość bogata ale sposób jej zestawienia mało przejrzysty. Doktorant nie podał źródeł skąd zaczerpnął szeroką listę indeksów wegetacyjnych wykorzystanych jako cechy klasyfikacyjne. Nie wiadomo zatem czy cechy oparte o indeksy liczone dla skanera wielospektralnego są oryginalną propozycją Doktoranta czy też są inspirowane lub zaczerpnięte z literatury (str. 78).

Trudno zgodzić ze stwierdzeniem, że chmura punktów to nieprzystępna forma danych (str. 15). Nie jest tak wdzięczna jak postać rastrowa, ale jak udowodnił Doktorant, są sposoby usprawniające pracę z naprawdę dużym wolumenem danych ALS.

Opisując metodę filtracji terenu Doktorant nie podał rozwiązania sytuacji gdy w oczku 1 m x 1 m nie ma żadnego punktu chmury. Nie zgadzam się ze stwierdzeniem ze str. 50: „wielkość równa około 1 m pozwala mieć pewność, iż niezależnie od gęstości danych, w oczku siatki znajdzie się przynajmniej kilka punktów zbioru źródłowego”. Występowanie białych plam w chmurze laserowej nie jest wcale rzadkim przypadkiem. Zdarza się na dachach i na terenie, a zjawiska te są wytłumaczalne interakcją promieniowania z powierzchnią odbijającą: odbicie może być skupione w jednym kierunku i odbiornik nie zarejestruje echa, promieniowanie może też zostać całkowicie pochłonięte.

Kieruję do Doktoranta kilka pytań i proszę o udzielenie na nie odpowiedzi w trakcie obrony.

Dlaczego poza cechą deltaGroundHeight przechowywana jest w zbiorze klasyfikacyjnym informacja o przynależności punktu do NMT (isGround)? Atrybut ten jest wtórny co potwierdziła bardzo niska ocena jego istotności dla klasyfikatora Random Forest.

Charakteryzując materiał badawczy Doktorant nie podał informacji o zróżnicowaniu wysokościowym terenu. Czy nie ma ono wpływu na dokładność klasyfikacji a w szczególności na filtrację terenu, która jest pierwszym z dwóch zasadniczych etapów zaproponowanej metody?

Czy Doktorant porównywał jakość klasyfikacji dachów na danych które posiadały pierwotną klasyfikację? Czy analizował jak rozkładają się punkty występujące w bezpośrednim otoczeniu krawędzi czy wręcz wyznaczające przebieg zewnętrznych krawędzi dachów? Pytanie związane jest z faktem, że przedstawione w pracy statystyki wyrażające poprawność klasyfikacji mają charakter globalny, są liczone z bardzo licznego zbioru. Tymczasem dla modelowania obiektów kubaturowych krytyczne są punkty zlokalizowane przy krawędziach.

Czy zdaniem Doktoranta skanery wielospektralne wnoszą więcej zalet do klasyfikacji w stosunku do korzystania z atrybutów radiometrycznych pochodzących ze zdjęć lotniczych?

## **5. Konkluzja**

W pracy zauważam: interesujące cele i tezę, prawidłowy proces dowodzenia tezy i krytyczną analizę wyników. Doktorant wykonał dobrze zaplanowane, obszerne a zarazem właściwie udokumentowane badania. Wysoce cenię silne powiązanie tematyki z praktyką. Mgr inż. Bogusław Kaczałek udowodnił w rozprawie, że posiada gruntowną wiedzę z zakresu geoinformacji i potrafi znaleźć rozwiązanie postawionego problemu naukowego. Wyrażam opinię, że Doktorant udowodnił umiejętność prowadzenia badań naukowych.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Bogusława Kaczałka spełnia warunki określone w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Z 2003 r. nr 65 poz.595, z późn. zm.). Rekomenduję Radzie Wydziału dopuszczenie mgr inż Bogusława Kaczałka do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

