

dr hab. inż. Sławomir Mikrut, Prof. AGH  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie  
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska  
Katedra Fotogrametrii, Teledetekcji Środowiska  
i Inżynierii Przestrzennej  
Al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków  
smikrut@agh.edu.pl

Kraków, 1 czerwca 2022 r.

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgra Macieja Adamiaka**

**na temat :**

### **Wykorzystanie technik uczenia maszynowego i teledetekcji do wspomagania interpretacji przestrzeni geograficznej**

#### **1. Podstawa formalna opracowania recenzji**

Formalną podstawą opracowania recenzji jest uchwała Komisji Uniwersytetu Łódzkiego ds stopni naukowych w dyscyplinie Nauki o Ziemi i Środowisku podjęta w dniu 15 marca 2022 roku wraz pismem przewodnim z dnia 15 marca 2022 roku.

Promotorem rozprawy doktorskiej był Pan dr hab. inż. Krzysztof Będkowski, prof. UŁ, promotorem pomocniczym dr Anna Majchrowska.

## 2. Ocena istotności i aktualności tematu

Temat naukowy podjęty przez Doktoranta w przewodzie doktorskim dotyczy wykorzystania technik uczenia maszynowego i teledetekcji do wspomagania interpretacji przestrzeni geograficznej.

Jest to temat bardzo aktualny, ważny z punktu widzenia praktycznego, nad którym pracuje wiele ośrodków naukowo-badawczych na całym świecie.

Od kilkunastu lat techniki teledetekcyjne pozwalają na wspomaganie interpretacji przestrzeni geograficznej niemniej jednak wykonanie tego przy pomocy technik uczenia maszynowego to bardzo nowoczesne podejście. Bardzo duże znaczenie w ostatnich latach zyskały techniki uczenia maszynowego w różnych dziedzinach. W niniejszej pracy Doktorant podjął próbę opracowania metodyki wspierania procesu badawczego przestrzeni geograficznej, stosowanego w naukach o Ziemi i środowisku, opartego na analizie zobrażeń lotniczych i satelitarnych, co jest bardzo cenne. W badaniach obejmujących teledetekcję, w szczególności dotyczącą środowiska od kilku lat coraz popularniejsze stały się metody oparte o algorytmy uczące się. Od lat uczenie maszynowe wykorzystywane jest w teledetekcji do rozpoznania obiektów i zjawisk środowiskowych, a także do określania ich stanu i dostarczenia informacji pozwalającej na prognozowanie dynamiki zmian. W praktyce odbywa się to na dwa sposoby: w sposób nadzorowany i nienadzorowany. Metoda nadzorowana wykorzystuje obiekty wzorcowe przy dużej kontroli użytkownika. Metoda nienadzorowana działa autonomicznie, w oparciu o wyliczane sygnatury statystyczne a rolą użytkownika jest dokonanie tylko prawidłowej interpretacji. Zaproponowana w pracy przez Doktoranta metodyka oparta jest o zastosowania modeli uczenia maszynowego (ang. *machine learning*, ML), zbudowanych w oparciu o głębokie splotowe sieci neuronowe (ang. *deep convolutional neural networks*, DCNN) jest bardzo nowoczesnym podejściem.

Proponowane rozwiązania mają bardzo duży aspekt praktyczny, umożliwiają bowiem wykonanie analiz dotyczących pokrycia terenu. Wpisują się zatem w światowe trendy rozwijania tego typu badań. Doktorant potwierdził przydatność transformacji, jaka zachodzi w splotowej głębokiej sieci neuronowej podczas procesu uczenia reprezentacji (ang. *representation learning*) obrazu cyfrowego, w interpretacji przestrzeni geograficznej oraz opracował cztery wysokiej jakości modele głębokiego uczenia wraz z obsługującymi je programami komputerowymi. Te rozwiązania pozwoliły na przeprowadzenie nadzorowanej i nienadzorowanej klasyfikacji oraz segmentacji pokrycia terenu

przy użyciu zobrażeń satelitarnych i lotniczych. Zwieńczeniem badań jest opracowanie autorskiej metody nienadzorowanej segmentacji przestrzeni geograficznej z wykorzystaniem współzawodniczących generatywnych sieci neuronowych (ang. *generative adversarial networks*, GAN).

Tematyka ta jest niezmiernie istotna, ze względu na rozwój zaawansowanych algorytmów jak również badań środowiskowych. Są to badania interdyscyplinarne ponieważ obejmują kilka dziedzin takich jak: przetwarzanie danych obrazowych czy analiza danych środowiskowych zarówno z pułapu satelitarnego jak i lotniczego.

Uważam, że podjęty w rozprawie problem jest aktualny i ważny, a także bardzo mocno osadzony w realiach.

### **3. Cel i teza rozprawy doktorskiej**

Cel pracy został jasno sprecyzowany w rozdziale 2 rozprawy na stronie 8 i brzmi następująco:

"Celem nadrzędnym pracy było wykazanie zasadności zastosowania zaawansowanych metod i technik uczenia maszynowego, a przede wszystkim głębokiego uczenia, we współczesnym procesie badawczym w obszarze geografii, obejmującym przetwarzanie i analizę danych przestrzennych, pozyskanych w formie zobrażeń lotniczych i satelitarnych".

Doktorant podał też tzw. pytania badawcze. W pracy zostały one opisane na stronach 8-9 .

1. W jaki sposób przebiega nadzorowana klasyfikacja i segmentacja, prowadzona w ramach wybranej przestrzeni geograficznej, której reprezentacją w procesie analitycznym jest obraz cyfrowy uzyskany metodami teledetekcyjnymi?
2. Czy informacje, dotyczące cech badanej przestrzeni geograficznej przechowywane w warstwach spłotowej sieci neuronowej, umożliwiają prowadzenie analizy zjawisk zachodzących w tej przestrzeni?
3. Czy istnieje możliwość zastosowania rezultatów otrzymanych przy pomocy metod głębokiego uczenia jako danych wejściowych klasycznych algorytmów analizy przestrzennej, w tym analizy skupień?
4. W jakim stopniu analiza przestrzeni geograficznej może być prowadzona w oparciu o uczenie nienadzorowane?

5. Czy możliwe jest zaprojektowanie sieci neuronowej pozwalającej na zapis cech przestrzennych w postaci dopuszczającej przeprowadzenie z ich udziałem analizy skupień i nienadzorowanego podziału przestrzeni geograficznej na odrębne jednorodne fragmenty?

6. Czy jakość opracowanej metody może być weryfikowana na podstawie procesu rekonstrukcji, polegającego na porównaniu prawdziwych próbek do ich sztucznie wytworzonych odpowiedników?

**Zdefiniowane głównego celu badawczego oraz celów szczegółowych (pytań badawczych) stanowią w mojej opinii spójną całość potwierdzoną badaniami opisanymi w załączonych publikacjach.**

Celem zweryfikowania celów badawczych Doktorant zebrał dostępne materiały, prawidłowo przeprowadził eksperymenty oraz bardzo szczegółowo je opisał w wysoko-punktowanych czasopismach.

Założone osiągnięcie naukowe miało zostać udowodnione poprzez przeprowadzone eksperymenty badawcze na podstawie odpowiednio zebranych materiałów oraz prawidłowo zdefiniowanej - w mojej opinii - metodyce badawczej.

**W mojej opinii postawiony w rozprawie cel pracy oraz pytania badawcze są prawidłowe, a wykazanie ich słuszności ma zarówno aspekt poznawczy jak i duże znaczenie praktyczne.**

#### **4. Układ i treść rozprawy**

Rozprawa jest cyklem spójnych tematycznie publikacji. Składa się z pięciu artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych znajdujących się na liście Ministerstwa Edukacji i Nauki i obejmuje następujące pozycje.

1. Krysiak S., Papińska E., Majchrowska A., Adamiak M., Koziarkiewicz M. (2020). *Detecting Land Abandonment in Łódź Voivodeship Using Convolutional Neural Networks*. Land, 9(3), 82. <https://doi.org/10.3390/land9030082> (MEiN: 70, IF'20: 3,398, CiteScore'20: 3.0.)

2. Adamiak M., Biczkowski M., Leśniewska-Napierała K., Nalej M., Napierała T. (2020). *Impairing Land Registry: Social, Demographic, and Economic Determinants of Forest*

*Classification Errors*. Remote Sensing, 12(16), 2628, <https://doi.org/10.3390/rs12162628>, (MEiN: 100, IF'20: 4.848, CiteScore'20: 6.6. 2)

3. Adamiak M., Jażdżewska I., Nalej M., (2021).

*Analysis of Built-Up Areas of Small Polish Cities with the Use of Deep Learning and Geographically Weighted Regression*. Geosciences, 11(5), 223, <https://doi.org/10.3390/geosciences11050223>, (MEiN: 70, CiteScore'21: 3,4)

4. Adamiak M., Będkowski K., Majchrowska A., (2021).

*Aerial Imagery Feature Engineering Using Bidirectional Generative Adversarial Networks: A Case Study of the Pilica River Region, Poland*. Remote Sensing, 13(2), 306, <https://doi.org/10.3390/rs13020306>, (MEiN: 100, IF'20: 4.848, CiteScore'21: 6,9).

5. Adamiak M., (2021).

*Głębokie uczenie w procesie teledetekcyjnej interpretacji przestrzeni geograficznej przegląd wybranych zagadnień*. Czasopismo Geograficzne, 92(1), 49, <https://doi.org/10.12657/czageo-92-03>, (MEiN: 70. )

Prezentowane publikacje stanowią w mojej opinii zwarty cykl tematyczny dobrze zdefiniowany tytułem rozprawy. Cztery prace są wielo-autorskie (trzech i pięciu osób) a jedna samodzielna.

W publikacjach wielo-autorskich na podstawie oświadczeń współautorów udział Doktoranta wydaje się być znaczny. Artykuły są opublikowane w dobrych czasopismach z punktacją odpowiednio: trzy mają 70 pkt. w MEiN oraz dwa 100 pkt. w MEiN.

Całość rozprawy składa się z 9 rozdziałów.

W części opisowej rozprawy doktorskiej Doktorant zrobił dobre wprowadzenie do publikacji tworzących cykl, szczegółowo opisał problemy badawcze oraz metody, które posłużyły do ich rozwiązania, podając na końcu podsumowanie i wnioski. I tak:

w rozdziale 1 pt. "Wprowadzenie", Doktorant przedstawił podstawowe pojęcia z zakresu geoinformatyki, w rozdziale 2 pt. "Problem badawczy" opisuje nowe rozwiązania w uczeniu maszynowym, które są stosowane w teledetekcji. Rozdział 3 - "Metody badawcze" obejmuje autorską publikację, gdzie w sposób przeglądowy Doktorant opisał kluczowe elementy uczenia maszynowego w badaniach środowiska przyrodniczego oraz dokonał ciekawego podsumowania dostępnej literatury. Rozdział 4 pt. "Wyniki" obejmuje opis najważniejszych osiągnięć uzyskanych w publikacjach. W rozdziale 5 - "Dyskusja" - Doktorant analizuje i podsumowuje

uzyskane wyniki, natomiast w rozdziale 6 pt. "Wnioski" zaprezentował uzyskane wyniki w sposób syntetyczny. Rozdział 7 to literatura z zacytowanymi 66 pozycjami referencyjnymi i ostatni rozdział 8 stanowi kopia publikacji tworzących rozprawę doktorską.

## **5.1. Uwagi merytoryczne:**

### **5.1.1. Ocena wartości naukowej rozprawy**

Istotną wartością naukową pracy i jej wkład w rozwój współczesnych nauk o Ziemi i środowisku, a przede wszystkim istotny rozwój teledetekcji, jest zaproponowanie autorskiej metody generowania sztucznych próbek obrazu teledetekcyjnego oraz nienadzorowanej semantycznej segmentacji przez zastosowanie generatywnych sieci współzawodniczących (ang. *generative adversarial networks*, GANs).

Temat ten jest stosunkowo nowym zagadnieniem, podejmowanym od niedawna w nauce z zakresu teledetekcji. Nie byłoby to możliwe bez podjęcia się badań stosujących głębokie splotowe sieci neuronowe (ang. *convolutional neural networks*, CNNs) jako główny element modeli dokonujących klasyfikacji oraz segmentacji w oparciu o obraz satelitarny lub lotniczy (ortofotomapa).

Zrozumienie możliwości i ograniczeń zastosowania sieci typu CNN w analizie obrazu teledetekcyjnego było kluczowe w procesie budowania złożonej sieci GAN. Rezultaty zostały zawarte w pracy: *Aerial Imagery Feature Engineering Using Bidirectional Generative Adversarial Networks: A Case Study of the Pilica River Region, Poland*.

Przedstawiona rozprawa nosi znamiona pracy interdyscyplinarnej. Doktorant dobrze porusza się w zagadnieniach zarówno przetwarzania obrazów jak i teledetekcji czy zagadnień środowiskowych. W swoich publikacjach widać staranność zarówno w doborze obszarów testowych jak i nowoczesnych technik pomiarowych czy uczenia maszynowego.

Prowadzone badania cechuje również dobre planowanie eksperymentów badawczych jak i późniejsze opracowanie wyników badań. Wartością naukową pracy wydaje się być autorska metodyka prowadzenia badań i stworzonych algorytmów. Warto również zwrócić uwagę na bardzo przejrzysty schemat prowadzenia badań naukowych z zakresu nauk o Ziemi i środowisku powiązany z metodami i technikami uczenia maszynowego oraz teledetekcji

przygotowany pod kątem rozprawy (Ryc.9, str.30). Jest bardzo przemyślany, przejrzysty i świadczy o dojrzałości naukowej Doktoranta.

Ważnym walorem badań jest też porównanie aktualnie najnowszych dostępnych metod analizy obrazu oraz zaproponowanie weryfikacji tych metod. Kolejnym walorem naukowym pracy jest wykonanie analiz statystycznych, które powalają na weryfikowanie tych metod. W tym miejscu należy wyraźnie podkreślić, że zarówno cel jak i przyjęte pytanie badawcze zostały pozytywnie zweryfikowane.

Reasumując, można zgodzić się z Doktorantem w części wniosków, że *"przeprowadzenie wnioskowania w zakresie wybranych problemów badawczych, powiązanych ze sobą przedmiotowo, przestrzennie, czasowo oraz spójnych pod względem użytych danych, pochodzących ze zobrażeń satelitarnych i lotniczych, pozwoliło zapoznać się, scharakteryzować oraz rozwinąć metody klasyfikacji oraz semantycznej segmentacji pokrycia terenu i tym samym zrealizować nadrzędny cel pracy"* (pokręślenie fragmentu cytowanego tekstu wykonane przez recenzenta).

### **5.1.2 Uwagi krytyczne**

W mojej opinii praca jest bardzo dobra, nie mam uwag krytycznych, niemniej jednak miałyby jeszcze większą wartość naukową - a może też jako szersza publikacja w przyszłości - gdyby Doktorant pokusił się o poszerzenie pewnych zagadnień.

1. W pracy mało miejsca poświęcono na omówienie najnowszych trendów w pozyskiwaniu danych obrazowych. Co prawda Doktorant skupił się na danych satelitarnych i lotniczych, ale proszę pamiętać, że niski pułap jest też w pewnym sensie realizowany nalotami fotogrametrycznymi. Brakuje zatem wspomnienia o danych zarówno niskiego pułapu jak i też satelitarnego w odniesieniu do najnowszych trendów na rynku czyli nano i mikro-satelitów i takiej predykcji związanej z rozdzielczością przestrzenną: czyli jakie rozdzielczości z jakiego pułapu będziemy mogli wykorzystywać do klasyfikacji obrazów.

Technologia pozyskiwania danych z niskiego pułapu będzie następną technologią w pozyskiwaniu danych z racji niskich kosztów. Dzisiaj na rynku znajduje się coraz więcej sprzętu i oprogramowania pozwalającego na realizację tych badań. Spodziewałem się również odniesienia w części wprowadzającej pracy czy porównania do tej technologii, bo jest ona mocno wchodząca na rynek.

2. W pracy brakuje również odniesienia do innych metod z dokładnym porównaniem w czym proponowana metoda jest lepsza od innych i czy będzie się sprawdzać na innych obrazach wspomnianych wyżej w pkt.1.

Zbyt pobieżnie moim zdaniem potraktowano opis automatyzacji procesów pomiarowych i wykorzystania sieci neuronowych w teledetekcji. Brakuje m.in. odniesienia do jednej z pierwszych prac w Polsce dotyczącej wykorzystania sieci neuronowych w zagadnieniach przetwarzania obrazów lotniczych [Mikrut i inni, 2010, *Sieci neuronowe w procesach dopasowania zdjęć lotniczych*].

Dzisiaj w dobie wykorzystywania uczenia maszynowego i metod sztucznej inteligencji w większości prac interpretacyjnych czy związanych z ekstrakcją danych, warto było pokusić się o pokazanie aktualnego stanu wiedzy czy trendów w rozwoju tym zakresie, zwłaszcza, że takie próby są podejmowane na świecie i porównać do nich nasze osiągnięcia.

Proszę, aby te dwa zagadnienia Doktorant rozwinął na obronie.

Brakuje również szczegółowych informacji czym kierowali się Autorzy analiz przy wyborze obrazów (pory roku, stan wegetacji itp). W wynikach eksperymentów trudno odnaleźć również klasyczną macierz błędów klasyfikacji, a jest standardową metodą oceny klasyfikacji.

### **Uwagi edytorskie, językowe, redakcyjne i inne**

Rozprawa napisana jest bardzo dobrym językiem, układ pracy jest prawidłowy. Praca jest również bardzo dobrze przygotowana od strony edytorskiej. Składa się z dwóch głównych części:



A - teoretycznej (rozdziały 1-4, gdzie jest wprowadzenie, podany jest problem i metody badawcze),

B - praktycznej (wyniki badań zaprezentowane są w formie publikacji wraz z wnioskami).

W mojej opinii publikacja nr 5 powinna być w zestawieniu jako pierwsza bo jest bardzo dobrym wprowadzeniem jako przegląd literaturowy.

## **6. Wniosek końcowy**

Moja ocena merytoryczna pracy jest wysoka. Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą teoretyczną oraz posiada umiejętności samodzielnego prowadzenia interdyscyplinarnego eksperymentu naukowego i prawidłowego interpretowania wyników.

**Cel główny oraz cele szczegółowe zostały osiągnięte i zostały potwierdzone w eksperymentach opublikowanych w dobrych czasopismach naukowych.**

Doktorant prawidłowo dobrał materiał badawczy oraz wybrał odpowiednią metodykę udowadniając cel główny rozprawy. Umiejętnie połączył różne techniki przetwarzania obrazów z różnych danych, gdzie porównał wyniki uzyskane poszczególnymi metodami co podnosi wartość pracy.

Praca wymagała prowadzenia badań w szerszym zespole co tłumaczy współautorstwo w publikacjach, ale należy podkreślić, że wkład Doktoranta w te prace był bardzo wysoki.

Przedstawione powyżej uwagi krytyczne czy dyskusyjne nie obniżają wartości pracy.

Stwierdzam zatem, że na podstawie przeprowadzonych eksperymentów oraz wyników badań zrealizowany został cel pracy oraz udowodnione cele szczegółowe określające przydatność **wykorzystania technik uczenia maszynowego i teledetekcji do wspomagania interpretacji przestrzeni geograficznej.**

Doktorant wykazał się dobrym warsztatem naukowym, dobierając odpowiednie metody badawcze, poradził sobie z interdyscyplinarnością rozwiązywanych problemów, udowodnił, że potrafi analizować i oceniać uzyskane rezultaty oraz formułować poprawne wnioski.

Wykazał się przy tym bardzo dobrym przygotowaniem merytorycznym co stawia go w szeregu bardzo dobrych specjalistów w tym zakresie.

Stwierdzam zatem, że recenzowana rozprawa doktorska mgr Macieja Adamiaka pt. „Wykorzystanie technik uczenia maszynowego i teledetekcji do wspomaganie interpretacji przestrzeni geograficznej” **spełnia wymagania** zawarte w ustawie "O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki" z dnia 20 lipca 2018 r., art. 187, z późniejszymi zmianami.

**Stawiam zatem wniosek o przyjęcie przedłożonej rozprawy doktorskiej** i dopuszczenie mgr Macieja Adamiaka do następnych etapów przewidzianych w przepisach o przewodach doktorskich.

Z racji faktu, że Doktorant wykazał się oryginalnością w swoich badaniach oraz wpisał się w najnowsze trendy stosowane w przetwarzaniu i analizie danych teledetekcyjnych wykorzystując najnowsze metody uczenia maszynowego i otrzymując jednocześnie bardzo dobre rezultaty **wnoszę o wyróżnienie pracy.**



*dr hab. inż. Sławomir Mikrut, Prof. AGH*  
*Kraków, 1 czerwca 2022 r.*