

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Kingi Karwowskiej

**pt. Opracowanie metodyki podwyższenia rozdzielczości przestrzennej zobrazowań z małych satelitów z zastosowaniem algorytmów sztucznej inteligencji**

sporządzona dla Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie

promotor: dr hab. inż. Damian Wierzbicki, prof. WAT

### **1. Struktura rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska składa się z następujących części: strony tytułowej, streszczenia w języku polskim, streszczenia w języku angielskim, spisu treści, wykazu użytych skrótów, wprowadzenia oraz czterech zasadniczych rozdziałów związanych z podjętą tematyką badawczą. W rozdziałach tych przedstawiono kolejno tytuł rozprawy, cel, hipotezy, cykl publikacyjny, metodykę badawczą i schemat postępowania, metody szczegółowe i badawcze, podsumowanie i wnioski. W rozdziale *Metody szczegółowe i badawcze* przedstawiono osiągnięcia na podstawie czterech publikacji. Rozprawę kończy wykaz literatury (łącznie 64 pozycje) oraz załączniki. Załączniki składają się z czterech publikacji oraz oświadczeń współautorów o procentowym udziale w ich przygotowaniu. Rozprawa bez załączników liczy 67 stron, a sumaryczna liczba stron czterech publikacji wynosi 99. Doktorantka w tekście rozprawy posługuje się identyfikatorami celu głównego, celów szczegółowych, hipotez pomocniczych, czterech publikacji będących podstawą rozprawy, pytań badawczych, co znacznie ułatwia analizę jej treści. W celu przedstawienia realizacji procesu badawczego często korzysta z zestawień tabelarycznych oraz rycin. Dużą zaletą jest również stosowanie przypisów dolnych wyjaśniających stosowaną terminologię. Język rozprawy jest komunikatywny, sporadycznie pojawiają się literówki.

Podsumowując, struktura pracy jest moim zdaniem prawidłowa, prezentuje bardzo dobry poziom edytorski, rozprawa zawiera wszystkie niezbędne elementy dokumentujące dorobek naukowy.

### **2. Tematyka rozprawy doktorskiej**

Tematyka rozprawy doktorskiej związana jest z zagadnieniami przetwarzania obrazów teledetekcyjnych z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji. Docelowym źródłem danych obrazowych wykorzystanych w badaniach były współczesne systemy teledetekcyjne (małe satelity), które, ze względu na ograniczenia techniczne, dostarczają zobrazowań o gorszej rozdzielczości przestrzennej. Ogół podjętych badań był skoncentrowany na poprawie ich rozdzielczości przestrzennej. Podjęta tematyka badawcza jest ściśle odzwierciedlona w prezentowanych publikacjach z zakresu teledetekcji, charakteryzujących się wysokim wskaźnikiem jakości i prestiżem czasopism naukowych w dziedzinach technicznych (IF w przedziale od 3.8 do 5.5). Publikacje te ukazały się w dwóch czasopismach naukowych: *Remote Sensing* oraz *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. Aktualność podjętej tematyki badawczej podkreśla rok publikacji artykułów – 2022, 2023 oraz 2024.

Podsumowując, nie wnoszę uwag do podjętej tematyki badawczej. Charakteryzuje się ona aktualnością oraz rozwiązuje problemy związane z niedoskonałością danych pozyskiwanych przez współczesne

systemy teledetekcyjne z wykorzystaniem nowych metod sztucznej inteligencji. Ujęcie tematyki badawczej niewątpliwie leży w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport.

### **3. Realizacja procesu badawczego**

Rozprawa została opracowana na podstawie czterech tematycznie powiązanych publikacji. Publikacje są dwuautorskie, gdzie współautorem jest promotor rozprawy doktorskiej. Udział Doktorantki we wszystkich publikacjach wynosi 80%.

Realizację procesu badawczego w niniejszej rozprawie można ująć w trzech kategoriach, związanych z sformułowaniem problemów badawczych, celów badawczych oraz postawieniem hipotez.

Problemy badawcze zostały jasno sformułowane, wynikały z ograniczeń technicznych umożliwiających polepszenie rozdzielczości obrazów pozyskanych z małych satelitów jak również braku odpowiednich technik ich przetwarzania. W tym zakresie doktorantka wskazuje na brak metod wyostrzania obrazów pozyskanych przez małe satelity, brak metodyk umożliwiających przetwarzanie całych scen satelitarnych z wykorzystaniem sieci neuronowych, brak poprawnej architektury sieci GAN zapewniającej stabilność uczenia w celu podwyższenia rozdzielczości obrazów oraz brak metod umożliwiających właściwą ocenę przetworzonych w ten sposób obrazów.

Tak postawione problemy badawcze posłużyły do sformułowania celu głównego pracy, którym było opracowanie metodyki wykorzystującej algorytm sztucznej inteligencji na potrzeby podwyższenia rozdzielczości przestrzennej oraz potencjału interpretacyjnego obrazów z małych satelitów. Dodatkowo w rozprawie sformułowano sześć celów szczegółowych, umożliwiających dokładny wgląd w etapowanie badań (przygotowanie obszaru badawczego, opracowanie przetwarzania całych obrazów satelitarnych, opracowanie strategii budowy baz danych w aspekcie uczenia generatywnych sieci przeciwstawnych (ang. *Generative Adversarial Networks*, GAN), wybór funkcji straty w procesie uczenia sieci, opracowanie metody oceny jakości działania algorytmów poprawiających rozdzielczość przestrzenną obrazów oraz opracowanie metodyki poprawy rozdzielczości sekwencji obrazów).

Doktorantka na podstawie analizy problemów badawczych oraz możliwych do realizacji celów badawczych postawiła hipotezę, że zastosowanie odpowiednio dobranych i wytrenowanych generatywnych sieci przeciwstawnych pozwoli na opracowanie metodyki podwyższania rozdzielczości przestrzennej obrazów z małych satelitów. Biorąc pod uwagę złożoność procesu badawczego, będącego wynikiem wcześniej zidentyfikowanych problemów, oprócz głównej hipotezy sformułowano pięć hipotez pomocniczych, które odpowiednio nawiązują do realizacji celu głównego i celów szczegółowych pracy.

Podsumowując mogę stwierdzić, że założenia w postaci sformułowania problemów badawczych, celów badań oraz hipotez dały podstawę do realizacji procesu badawczego. Sam udział Doktorantki w realizacji badań jest bardzo wysoki, co niewątpliwie wpływa pozytywnie na ocenę jej wkładu własnego.

### **4. Oryginalność rozprawy**

Po zapoznaniu się z całokształtem przeprowadzanych badań mogę stwierdzić, że opracowane rozwiązanie dotyczące podwyższenia rozdzielczości przestrzennej obrazów z małych satelitów jest oryginalne. Podstawą do takiego stwierdzenia jest unikatowość metody polegająca na kompleksowym podejściu do przetwarzania obrazów satelitarnych oraz opracowaniu efektywnego modelu sieci GAN umożliwiającego podwyższenie ich rozdzielczości.

Doktorantka w pierwszej fazie badań, na podstawie analizy literatury przedmiotu uzasadnia podjęcie tematyki badawczej. Zauważa, że wiele metod polepszających rozdzielczość obrazów nie wpływa na zwiększenie ich możliwości interpretacyjnych. Badania są zazwyczaj prowadzone na małych obszarach, co nie jest relewantne w odniesieniu do całego obrazu ani stosowanych wskaźników oceny możliwości interpretacyjnych.

W kolejnym kroku opracowuje metodę przetwarzania obrazów metodami głębokiego uczenia z wykorzystaniem modelu opartym na sieci generatywnej przeciwstawnej *Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks* w celu podwyższenia ich rozdzielczości z wykorzystaniem techniki podziału na mniejsze części (kafle), optymalizując dobór okien czasowych oraz stopień ich pokrycia. Istotnym elementem kolejnych badań jest dostosowanie architektury sieci GAN do zasadniczej poprawy rozdzielczości zobrażeń. Podczas badań Doktorantka koncentruje się na przyspieszeniu oraz stabilności procesu uczenia, wprowadzając takie modyfikacje jak dyskryminator wielokolumnowy (wskazanie na przyspieszenie czasu uczenia sieci), zaimplementowanie straty Wassersteina (wskazanie na dalsze przyspieszenie uczenia i dodatkowo na uzyskanie lepszej jakości poprawy rozdzielczości przestrzennej obrazów) oraz stosowanie baz danych składających się z obrazów o zróżnicowanej rozdzielczości przestrzennej (wskazanie na większą stabilność uczenia sieci). Efektem badań jest opracowanie nowego modelu GAN, tj. *Multicolumn Wasserstein Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks* (MCWESRGAN). Istotnym elementem tego etapu badawczego jest także opracowanie procesu oceny jakości obrazów. Doktorantka dostrzega również ograniczenia proponowanej metody, wskazując na jej podatność do przetrenowania oraz mniejszą efektywność dla wejściowych obrazów o większej rozdzielczości, poprzez co prezentuje dojrzałe podejście do przedstawienia wyników badań, wskazując zarówno na zalety jak również na ograniczenia opracowanego modelu. W ostatnim etapie badań dokonano kolejnej modyfikacji opracowanego modelu (tj. MCWESRGAN), polegającej na rozszerzeniu modelu o model Uformer, co umożliwiło poprawę jakości sekwencji obrazów wideo w procesie zwiększania ich rozdzielczości, a tym samym potencjału interpretacyjnego. Uzasadnieniem podjęcia kolejnej modyfikacji było pozbycie się dodatkowej tekstury, zidentyfikowanej jako wadę w ostatniej wersji modelu. Kolejna modyfikacja sieci przekłada się na ogólną poprawę jakości sekwencji obrazów wideo oraz także poszerza aplikacyjność proponowanego rozwiązania.

## 5. Aplikacyjność i znaczenie wyników badań

Aplikacyjność badań jest powiązana ze współczesnym trendem rozwojowych satelitarnych platform teledetekcyjnych. Należy się spodziewać, że obrazy pozyskane przez małe satelity coraz częściej będą wykorzystywane w różnych formach aktywności gospodarczej czy też strefach działalności człowieka. Biorąc pod uwagę zobrażenia satelitarne, z reguły bardziej pożądanym materiałem w aspekcie poszerzonej stosowalności są obrazy wysokorozdzielcze, ponieważ posiadają większy potencjał interpretacyjny. Uwzględniając uzyskane wyniki badań, którymi jest podwyższenie rozdzielczości zobrażeń satelitarnych, można spodziewać się szerokiego spektrum zastosowań wymagających bardziej szczegółowych analiz czy pozyskiwania danych.

Istotnym aspektem jest też znaczenie wyników badań dla dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport. Związane jest to z rozwojem nowych metod badawczych opartych o metody sztucznej inteligencji, skutkujących podwyższeniem rozdzielczości zobrażeń satelitarnych, nowych możliwości zwiększenia dokładności pomiarów czy rozwój teorii i praktyki związanej z pozyskiwaniem, analizą i interpretacją danych geoprzestrzennych. Należy podkreślić, że przedstawione osiągnięcie ma również wymiar interdyscyplinarny, który poza inżynierią lądową, geodezją i transportem może obejmować takie dziedziny jak np. nauki o Ziemi i środowisku.

2

## 6. Uwagi szczegółowe

Po zapoznaniu się z rozprawą, uważam, że istnieje kilka kwestii wymagających uwagi. Dotyczą one głównie aspektów badawczych, literatury oraz możliwości poprawy potencjału interpretacyjnego obrazów. Poniżej przedstawiam swoje uwagi i proszę o odniesienie się do nich.

- 1) Proszę o wyjaśnienia założeń badawczych w aspekcie wykorzystanych danych do trenowania sieci w publikacji P3. Doktorantka w rozprawie pisze (s. 21), że w publikacji 3 opracowano metodykę poprawy rozdzielczości obrazów pozyskanych przez małe satelity, jednak nie jest dla mnie do końca jasne czy takie dane na tym etapie wykorzystano w badaniach.
- 2) Kolejna moja uwaga związana jest z opracowaniem modelu generowania obrazów o podwyższonej rozdzielczości z wykorzystaniem sieci GAN. Doktorantka w pracy wymienia zastosowane modyfikacje modelu ESRGAN, ale w moim odczuciu brakuje szerszego ujęcia tematyki związanej z dostrajaniem hiperparametrów. Efekt opracowanego w rozprawie modelu jest zauważalny, natomiast opis dostrajania hiperparametrów według mnie nie został przedstawiony. Poprosiłbym w związku z tym o wskazanie hiperparametrów właściwych dla sieci GAN i omówienie sposobu ich optymalizacji.
- 3) W przypadku uczenia sieci istotne jest przygotowanie (balansowanie) zbioru do uczenia sieci. Proszę o rozwinięcie tego zagadnienia w aspekcie prowadzonych badań.
- 4) W zakresie poprawy potencjału interpretacyjnego Doktorantka odnosi się do podstawowych elementów pokrycia terenu, zaznaczając lepszą efektywność odwzorowania na poprawionych obrazach obiektów antropogenicznych niż np. obiektów pochodzenia naturalnego. Proszę dodatkowo o komentarz w zakresie odwzorowania podstawowych cech rozpoznawczych obiektów terenowych, takich jak kształt, barwa, ton, tekstura czy cień.
- 5) Z uwag szczegółowych proszę o skomentowanie cytowania [24] w ujęciu metody pozyskiwania i przetwarzania obrazów wykorzystujących dwie macierze detektorów CCD, które są przesunięte w płaszczyźnie ogniskowej.
- 6) Proszę o informację, czy w ocenie interpretacyjnej poprawionych obrazów z małych satelitów uwzględniano inne obiekty niż wymieniane w pracy, np. linia brzegowa cieków czy zbiorników wodnych, różne obiekty ruchome (pojazdy), inne obiekty topograficzne.
- 7) Brak w wykazie użytych skrótów własnego rozwiązania, tj. MCWESRGAN

## 7. Końcowa ocena dorobku naukowego

Dorobek naukowy Doktorantki oceniam pozytywnie. Oprócz tego, że udokumentowany jest publikacjami w renomowanych czasopismach naukowych, w niniejszej rozprawie przedstawiono szczegółowy wkład własny w ich opracowanie, co z kolei umożliwiło jego kompleksową ocenę. Pozytywnie odnoszę się do całego procesu badawczego, poczynając od uzasadnienia podjęcia badań poprzez identyfikację istniejących problemów, opracowania modeli bazujących na sieciach neuronowych umożliwiających poprawę rozdzielczości obrazów, aplikacyjności opracowanej metody w kontekście przetwarzania całych obrazów czy końcowej oceny ich jakości. Pomimo kilku uwag dotyczących przyjętego sposobu realizacji procesu badawczego, które nie wpływają na ogólną jakość pracy, uważam, że rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania i nie mam zastrzeżeń co do dopuszczenia jej do dalszych etapów procedury obrony.

## 8. Wniosek końcowy

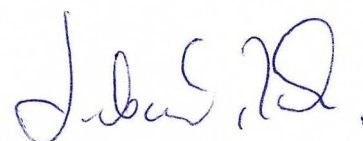
Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Kingi Karwowskiej w postaci opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych stwierdzam na jej podstawie, że Doktorantka:

- 1) wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport, ze szczególnym uwzględnieniem inżynierii geoprzestrzennej.

- 2) wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, czego potwierdzeniem jest przeprowadzanie badań według postawionych hipotez, sformułowanych celów badań oraz realizacją procesu badawczego kończącego się opracowaniem metody podwyższenia rozdzielczości obrazów z małych satelitów.
- 3) przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w postaci opracowanej metodyki wykorzystującej algorytmy sztucznej inteligencji na potrzeby podwyższenia rozdzielczości przestrzennej oraz poprawy potencjału interpretacyjnego zobrażeń z małych satelitów.

W związku z powyższym uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. z 2023 r. poz.742 z późn. zm.) oraz wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do obrony publicznej.

Biorąc pod uwagę całokształt przeprowadzonych badań, uwzględniający najnowsze trendy w pozyskiwaniu danych technikami satelitarnymi, kompleksowe podejście do rozwiązania problemu badawczego oraz opracowanie metody z wykorzystaniem generatywnych sieci przeciwstawnych (GAN), wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.



(-)

