

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Kingi Karwowskiej

p.t.: „Opracowanie metodyki podwyższenia rozdzielczości przestrzennej zobrazowań z małych satelitów z zastosowaniem algorytmów sztucznej inteligencji”

W ostatnich latach obserwuje się znaczny wzrost zainteresowania metodami pozyskiwania, zarządzania, analizowania i wizualizacji informacji geoprzestrzennej. Postęp technologiczny oraz rosnące potrzeby i wymagania użytkowników narzuca konieczność nowego spojrzenia na proces przetwarzania geodanych. Dotyczy to również problematyki przetwarzania zobrazowań satelitarnych w aspekcie podwyższania rozdzielczości przestrzennej, zwłaszcza zobrazowań z małych satelitów. Małe satelity, do których należą systemy nano, mikro i mini, stanowią ponad 70% satelitów umieszczonych na orbicie w latach 2018-2022. W ostatnich dniach sukcesem zakończyła się również misja umieszczenia na orbicie kolejnego polskiego satelity, również z grupy małych satelitów. O popularności małych satelitów stanowi łatwość i koszt ich produkcji, jednakże okupione jest to niższą rozdzielczością przestrzenną pomimo wykorzystania niskich orbit okołoziemskich. Rozdzielczość przestrzenna determinuje zakres możliwych analiz przestrzennych w tym możliwość detekcji obiektów, co jest istotnym czynnikiem również w obszarze bezpieczeństwa. Obecnie istniejące rozwiązania nie zapewniają odpowiedniej poprawy możliwości interpretacyjnych zobrazowań pozyskanych przez małe satelity.

Zagadnieniom tym poświęcona została przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt.: „Opracowanie metodyki podwyższenia rozdzielczości przestrzennej zobrazowań z małych satelitów z zastosowaniem algorytmów sztucznej inteligencji” stanowiąca cykl czterech powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych. W rozprawie podjęto próbę sformułowania metodyki, umożliwiającej podwyższenie rozdzielczości przestrzennej oraz poprawy potencjału interpretacyjnego zobrazowań pozyskiwanych za pomocą małych satelitów z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji. Metodyka taka opracowana została z wykorzystaniem odpowiednio dobranych i wytrenowanych generatywnych sieci przeciwstawnych (GAN). Opracowana metodyka

umożliwia czterokrotną poprawę rozdzielczości przestrzennej oraz co najmniej dwukrotny wzrost możliwości interpretacyjnej zobrazować satelitarnych lub sekwencji obrazów o dowolnym rozmiarze.

Należy podkreślić, że w rozprawie wykorzystano nowoczesne podejście wykorzystujące dedykowaną sztuczną sieć neuronową, w tym wypadku generatywną sieć przeciwstawną, dla której opracowano nowy sposób uczenia sieci.

Ponieważ zaproponowana metodyka ma charakter uniwersalny i może być wykorzystywana do analizy danych przestrzennych pozyskiwanych przez małe satelity, stanowi ona istotny wkład w rozwój teledetekcji i geoinformatyki. Podjęte, w dysertacji, badania mają istotne znaczenie poznawcze i praktyczne.

Rozprawa, zgodnie z art.187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (z późniejszymi zmianami) „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, prezentuje ogólną wiedzę kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem rozprawy doktorskiej, zgodnie z Ustawą, jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Zgodnie z art. 187.3 Ustawy rozprawę doktorską może stanowić zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych. I tak zostało to zrealizowane w opiniowanej rozprawie.

Rozprawa składa się ze streszczeń w języku polskim i angielskim, wykazu użytych skrótów oraz opisu cyklu opublikowanych 4 artykułów naukowych składającego się z wprowadzenia, trzech rozdziałów, podsumowania i wniosków oraz bibliografii, przedstawionych na 67 stronach oraz 4 załączników zawierających kopie opublikowanych przez Autorkę i Jej Promotora artykułów cyklu wraz z oświadczeniami obu współautorów.

We wprowadzeniu oznaczonym jako rozdział 1, przedstawiono uzasadnienie podjęcia tematu badawczego. Wskazano istotę podejmowanej tematyki, jak również jej związek z dotychczas stosowanymi metodami poprawy rozdzielczości przestrzennej.

W rozdziale drugim sformułowano tytuł rozprawy będący wspólnym tytułem cyklu czterech publikacji, zdefiniowano przedmiot badań oraz cele i hipotezy badawcze.

W rozdziale trzecim przedstawiono metodykę badawczą i schemat postępowania. W rozdziale tym przedstawiono podsumowanie opracowanej metodyki wraz z odniesieniem do poszczególnych publikacji cyklu.

W rozdziale czwartym w kolejnych czterech podrozdziałach przedstawiono omówienie poszczególnych publikacji cyklu i tak w podrozdziale 4.1 dokonano charakterystyki obszaru badawczego (publikacja P1). W podrozdziale 4.2 przedstawiono metodę wykorzystania okna czasowego do poprawy rozdzielczości przestrzennej zobrazowań satelitarnych (P2). W podrozdziale 4.3 zawarto projekt modelu generatywnego do poprawy rozdzielczości przestrzennej zobrazowań satelitarnych (P3). Natomiast w podrozdziale 4.4 podano opis metody poprawy rozdzielczości przestrzennej sekwencji obrazów pozyskanych przez małe satelity (P4).

W części końcowej o numerze piątym wyprowadzone zostały wnioski z przeprowadzonych badań.

Rozprawę uzupełnia numerowany wykaz literatury zawierający 64 publikacje. Znajdujemy tam 4 publikacje stanowiące cykl, wszystkie współautorskie Autorki rozprawy i Jej Promotora, potwierdzające zgodności zainteresowań naukowych Promotora z tematyką kierowanej przez Niego rozprawy doktorskiej.

Po przedstawieniu tego krótkiego streszczenia treści rozprawy, przystąpić mogą obecnie do charakterystyki i oceny jej treści.

Doktorantka zdefiniowała następujące cztery problemy badawcze:

- Jako pierwszy problem badawczy wskazano na konieczność zastosowania metod bazujących jedynie na obrazach o niskiej rozdzielczości przestrzennej, gdyż zobrazowania pozyskane przez małe satelity nie spełniają wymagań ich wyostżenia za pomocą klasycznych metod poprawy rozdzielczości.
- Drugi problem badawczy dotyczy niedostosowania istniejących metod SISR (super rozdzielczości pojedynczego obrazu) do poprawy rozdzielczości przestrzennej całych zobrazowań satelitarnych.
- Trzecim problemem badawczym jest uodpornienie generatywnej sieci przeciwstawnej na zjawisko znikających lub eksplodujących gradientów, gdyż jak zauważono trening sieci GAN charakteryzuje się niestabilnym procesem uczenia.
- Ostatni czwarty problem badawczy dotyczy właściwej oceny zobrazowań satelitarnych, których rozdzielczość przestrzenna została podwyższona za pomocą metod SISR.

Celem rozprawy było, jak podaje Autorka na stronie 14, **opracowanie metodyki wykorzystującej algorytmy sztucznej inteligencji na potrzeby podwyższenia rozdzielczości przestrzennej oraz poprawy potencjału interpretacyjnego zobrazowań z małych satelitów**. Tak postawiony cel główny ściśle koresponduje z tytułem dysertacji. Autorka starała się go zrealizować poprzez wykonanie następujących kolejnych etapów zawartych w postawionych celach szczegółowych:

1. Przygotowanie charakterystyki obszaru badawczego.
2. Opracowanie metodyki przewarzania całych zobrazowań satelitarnych w zagadnieniach automatycznej interpretacji zobrazowań.
3. Opracowanie strategii budowy bazy danych do uczenia sieci GAN odpowiedzialnych za poprawę rozdzielczości przestrzennej.
4. Wybór funkcji straty, uwzględniając jej odporność na zjawisko znikających gradientów.
5. Opracowanie zbioru metod oceny jakości działania algorytmów poprawy rozdzielczości przestrzennej obrazów cyfrowych.
6. Opracowanie metodyki poprawy rozdzielczości sekwencji obrazów pozyskanych przez małe satelity.

Dla potrzeb realizacji tak zdefiniowanego celu głównego i celów cząstkowych przyjęto następujące założenia:

- Sieci GAN pozwalają na generowanie realistycznych obrazów,
- Okna czasowe, określające sposób pobierania próbek, mogą zostać wykorzystane do tworzenia macierzy wag, na podstawie której łączone będą kafelki obrazu,
- Strata Wassersteina uwzględniająca ograniczenie Lipchitza poprawia stabilność procesu optymalizacji.

W rozprawie postawiono następującą hipotezę główną: **Zastosowanie odpowiednio dobranych i wytrenowanych generatywnych sieci przeciwstawnych (GAN) pozwoli na opracowanie metodyki podwyższania rozdzielczości przestrzennej zobrazowań z małych satelitów**.

Dodatkowo postawiono pięć hipotez pomocniczych:

1. Klasyczne metody poprawy rozdzielczości przestrzennej obrazów satelitarnych zazwyczaj nie znajdują zastosowania w przypadku obrazów pozyskanych przez małe satelity.
2. Podział obrazów satelitarnych na mniejsze fragmenty (kafelki), przetworzenie ich przez sieć konwolucyjną (dla zagadnień automatycznej interpretacji obrazów), a następnie ponowne połączenie fragmentów obrazu w jedno zobrazowanie za pomocą okien czasowych umożliwia przetwarzanie obrazów o dowolnym rozmiarze.
3. Przygotowanie bazy danych obrazów składającej się z fragmentów obrazów satelitarnych o różnej rozdzielczości przestrzennej ogranicza występowanie zjawiska gradientów, a w konsekwencji ma korzystny wpływ na stabilność treningu sieci generatywnych.
4. Zastosowanie dyskryminatora wielokolumnowego, składającego się z dwóch klasyfikatorów pracujących równolegle, umożliwia lepszą ocenę obrazów na etapie treningu sieci generatywnej. Ponadto wykorzystanie straty Wassersteina pozwala na lepsze odróżnienie obrazów o wysokiej rozdzielczości od obrazów rekonstruowanych, co dodatkowo poprawia jakość treningu generatora, a w konsekwencji jakość obrazów rekonstruowanych (SR).
5. Rozbudowanie architektury generatora o architekturę koder-dekoder wykorzystującą połączenia pomijające, pozwala na lepszą rekonstrukcję tektury obrazu, a w konsekwencji dodatkowo poprawia możliwości interpretacyjne obrazów SR.

W celu realizacji tak postawionych celów: głównego i sześciu celów szczegółowych oraz udowodnienia hipotez: głównej i pięciu hipotez pomocniczych przeprowadzono rozległe badania, które zostały przedstawione w powiązanych tematycznie artykułach naukowych opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych posiadających współczynnik wpływu.

Są to następujące publikacje:

1. Karwowska K., Wierzbicki D., 2022, Using Super-Resolution Algorithms for Small Satellite Imagery: A Systematic Review, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 15, pp. 3292-3312, IF=3.8.

2. Karwowska K., Wierzbicki D., 2022, Improving Spatial Resolution of Satellite Imagery Using Generative Adversarial Networks and Window Functions, Remote Sensing, 14(24):6285, IF=5.0.
3. Karwowska K., Wierzbicki D., 2023, Improving Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Network for Satellite Images, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 16, pp. 9459-9479, IF=5.5.
4. Karwowska K., Wierzbicki D., 2024, Modified ESGRAN with Uformer for Video Satellite Imagery Super-Resolution, Remote Sensing, vol. 16(11):1926, IF=5.0.

Jako element dysertabilny rozprawy można wskazać opracowanie nowatorskiej metodyki podwyższania rozdzielczości przestrzennej zobrażeń pozyskanych przez małe satelity z zastosowaniem algorytmów sztucznej inteligencji. Opracowana metodyka obejmuje:

1. Wybór okien czasowych oraz wyznaczenia stopnia pokrycia między kafelkami zobrażenia satelitarnego na potrzeby połączenia zrekonstruowanych fragmentów zobrażenia satelitarnego.
2. Przygotowania baz danych do uczenia modeli sieci neuronowych na potrzeby poprawy rozdzielczości przestrzennej zobrażeń i sekwencji wideo pozyskanych przez małe satelity.
3. Zdefiniowanie etapów poprawy rozdzielczości przestrzennych zobrażeń oraz sekwencji obrazów pozyskanych przez małe satelity.
4. Projekt architektury generatywnej sieci przeciwstawnej umożliwiającej poprawę rozdzielczości przestrzennej zobrażeń satelitarnych, zawierającej:
 - a. Dyskryminator wielokolumnowy,
 - b. Stratę Wassersteina,
 - c. Generator rozbudowany o koder-dekoder (w kształcie „U”) wykorzystujący połączenia pomijające.
5. Opracowanie metodyki oceny jakości zrekonstruowanych przez głębokie sieci neuronowe, jednocześnie uwzględniając ocenę poprawy możliwości interpretacyjnych.

W publikacji P1 przeprowadzono szczegółową analizę obszaru badawczego będącą podstawą do dalszych badań w zakresie ustalenia metodyki podwyższania rozdzielczości przestrzennej zobrażeń pozyskanych przez małe satelity. Metodyka ta została przedstawiona

w publikacjach P2 i P3 w tym w publikacji P2 podjęto zagadnienie wyboru okien czasowych stanowiące etap 1 metodyki zaś w publikacji P3 przedstawiono pozostałe jej etapy wraz z odpowiednim opisem naukowym. W publikacji P4 przedstawiono aspekty i wyniki weryfikacji opracowanej metodyki w zadaniu poprawy rozdzielczości przestrzennej sekwencji obrazów pozyskanych przez małe satelity.

Podjęty przez Doktorantkę wysiłek, może okazać się nieoceniony w dalszych pracach nad wdrożeniem nowoczesnych metod opracowania danych, po ich pozyskaniu i przesłaniu na stację naziemną, z istniejących lub projektowanych małych satelitów obserwacyjnych. Ze względu na znaczny wzrost możliwości interpretacyjnych obrazów satelitarnych i uzyskiwaniu zobrazowania o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej opracowana metodyka może znaleźć zastosowanie w rozpoznaniu obrazowym dla potrzeb Wojska Polskiego oraz w zarządzaniu kryzysowym, w tym do analizy zmian, w administracji publicznej.

Rozwiązania przedstawione w rozprawie wpisują się w nowoczesne trendy wdrażania metod sztucznej inteligencji w procesie podwyższania zdolności interpretacyjnych obrazów małych satelitów, będących obecnie w fazie szybkiego rozwoju co jest istotnym elementem nowości w pracy. Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do analizy danych obrazowych w znaczący sposób podnosi efektywność tej analizy w stosunku do metod stosowanych dotychczas. Rozwiązania przedstawione w rozprawie stanowią znaczący postęp w rozwoju technologii inteligentnego przetwarzania obrazów stosowanych do budowy systemów rozpoznania obrazowego.

Postawione cele badawcze zostały zrealizowane a hipotezy udowodnione należycie.

W czasie realizacji rozprawy Doktorantka nie ustrzegła się niewielkich niedociągnięć i potknięć, nieznacznie obniżających wysoką wartość naukową pracy. Poniżej przedstawię uwagi i komentarze, które nasunęły się w trakcie analizy rozprawy. Uwagi te często mają charakter polemiczny a mniej krytyczny.

Zaletą pracy jest wspólne z Promotorem publikowanie kolejnych artykułów cyklu bez udziału innych osób. Udział osoby trzeciej (poza Promotorem i Doktorantem) w publikacjach cytowanych w rozprawie zawsze nasuwa pytanie o wkład własny Autora dysertacji a szczególnie gdy, jak w tym przypadku, są to publikacje cyklu jednotematycznego. Można uznać takie postępowanie publikacyjne, jak w recenzowanej dysertacji, jako modelowe, jednak zdaniem

recenzenta zastanawiający jest wysoki deklarowany 80% wkład własny Autorki w zakresie realizowanych badań. Rola Promotora została w ten sposób, w pewnym sensie, zmarginalizowana a przecież to Promotor jest pomysłodawcą i inspiracją prowadzonych badań naukowych wykorzystując swoje dotychczasowe bogate doświadczenie naukowe w podjętej tematyce badawczej. W tym miejscu chciałbym podkreślić wyjątkową kompetencję Promotora w zakresie podjętych w dysertacji badań.

Opracowana metodyka ma wprawdzie charakter ogólny i uniwersalny, jednak zbudowany w rozprawie uzgodniony schemat przetwarzania danych obrazowych wykorzystuje tylko jeden typ sztucznej sieci neuronowej – sieci typu GAN. Kierunkiem dalszych badań mogłoby być badanie innych rozwiązań z wykorzystaniem metod głębokiego uczenia, dość powszechnie wykorzystywanych dzisiaj do przetwarzania danych obrazowych. Budowa takiego algorytmu postępowania dla innego typu sieci neuronowej wymagałaby powtórzenia analiz i przeprowadzenia stosownych czynności według pierwowzorów przedstawionych w rozprawie. Uwzględnienie innych rodzajów sieci neuronowych mogłoby być jednym z kierunków kontynuacji, podjętych w dysertacji, badań.

Opracowana metodyka umożliwiła czterokrotną poprawę rozdzielczości przestrzennej oraz co najmniej dwukrotny wzrost możliwości interpretacyjnych zobrażeń satelitarnych lub sekwencji obrazów o dowolnym rozmiarze. Kolejnym kierunkiem, w którym prace mogłoby być kontynuowane jest dalsza poprawa rozdzielczości i możliwości interpretacyjnych zobrażeń, również ze względu na rosnące wymagania użytkowników. W podsumowaniu zawartym w rozdziale 5 brakuje właśnie wskazania kierunków dalszych badań.

Pomimo starannej redakcji dysertacji można dostrzec w tekście sporadyczne błędy edytorskie i redakcyjne, takie jak np. dość częste zamienne używanie nazwy „Wessersteina” lub „Wassersteina” czy niekompletny opis bibliografii poz. 5 i 14 na str.61-62. Znajdujemy prawie na każdej stronie opisu pojedyncze nadmiarowe lub brakujące litery i innego typu literówki, ale ich specyfikacja nie jest celem Recenzenta.

Praca napisana jest bardzo dobrym językiem, jest rzeczową narracją naukową. Autorka niestety stosunkowo często używa pierwszej osoby liczby pojedynczej niefortunnie pisząc „zapropnowałam”, „zweryfikowałam”, „zauważyłam”, „postanowiłam”, „moich badań”, „moich prac”, „zwróciłam uwagę” itp. zamiast używania trzeciej osoby liczby pojedynczej. Autorka zamiennie stosuje pierwszą i trzecią osobę liczby pojedynczej niepotrzebnie przez to

personalizując naukowy wywód rozprawy. Ewentualnie dopuszczalną formą byłoby „my” tym bardziej, że wszystkie publikacje cyklu stanowiącego podstawę dysertacji są wspólne z Promotorem.

Na zakończenie chciałbym prosić Doktorantkę o ustosunkowanie się, oprócz wymienionych wcześniej uwag, do następujących zagadnień:

1. Proszę precyzyjnie określić wkład własny Autorki w prowadzonych badaniach w aspekcie 80% wskazanego wkładu we wszystkich publikacjach cyklu.
2. Czy i w jakim zakresie przedstawiona metodyka i oparty na niej system przetwarzania danych obrazowych z małych satelitów są podatne na ewentualne przyszłe zmiany i modyfikacje wykorzystywanych technologii informatycznych, w tym rozwój metod sztucznej inteligencji?
3. Proszę wyjaśnić co znaczy „... dość szybko (już po 4 godzinach dla bazy danych WorldView-2) ...” (str. 43, 2 wiersz góra).
4. Proszę wyjaśnić sformułowanie „... obrazy SR sprawiają wrażenie namalowanych pędzlem, co odróżnia je od obrazów HR.” (str.46, 2 wiersz dół).

Podsumowując, z całym przekonaniem stwierdzić mogę, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pt.: „Opracowanie metodyki podwyższenia rozdzielczości przestrzennej zobrazowań z małych satelitów z zastosowaniem algorytmów sztucznej inteligencji” spełnia warunki dla rozpraw doktorskich określone w art.187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) a jej autorka mgr inż. Kinga Karwowska wykazała się inwencją, kreatywnością i rzetelnością badawczą.

Proszę Pana Dziekana i Radę Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony, wnosząc zarazem o nadanie mgr inż. Kingie Karwowskiej stopnia doktora nauk technicznych.

Jednocześnie z uwagi na wysoką jakość naukową przedstawionej do recenzji rozprawy wnioskuję o jej wyróżnienie.

Andrzej Stępczyński